একক 1 ❑ আলোকের চরিত্র

গঠন

1.1 প্রস্তাবনা

বিশ্বের রূপ ও রঙের বার্তা যে দূত আমাদের কাছে বহন করে আনে তা হল আলো। আলো কী, আলো কি কণিকার স্রোত না তরঙ্গ, তা কোন মাধ্যমে কেমন করে সঞ্চারিত হয় আর আলোর সাহায্যে আমরা কীভাবে

দোষ—এ প্রশ্নগুলি বহু শতাব্দী ধরে মানুষের মনে উদিত হয়েছে। আলোকের চরিত্র উদ্ঘাটনে বিজ্ঞানীরা নানা পরীক্ষা নিরীক্ষা করেছেন। তাঁরা কেউ ভেবেছেন আলো কণিকার সমষ্টি, আলোর যে সব ধর্ম তাঁরা প্রত্যক্ষ করেছেন, সেগুলি ব্যাখ্যা করতে চেয়েছেন এই কণিকার উপর নানা ধর্ম আরোপ করে। আবার কখনও তাঁরা ধাক্কা খেয়েছেন যুক্তির দেওয়ালে, পরীক্ষা করতে গিয়ে এমন ঘটনা তাঁরা লক্ষ্য করেছেন যা আলোকে তরঙ্গ ধরলে তবেই ব্যাখ্যা করা যায়। পদার্থবিদ্যার অগ্রগতির সঙ্গে কণিকা আর তরঙ্গের সীমারেখা অস্পষ্ট হয়ে গেছে। তাই আধুনিক যুগের বৈজ্ঞানিক ধারণায় আলো কণিকাও বটে, তরঙ্গও বটে, এক এক অবস্থায় তার এক এক রূপ প্রতীয়মান হয়।

আলোকে আমরা তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ হিসাবে চিনতে পেরেছি। কিন্তু সেটি ঠিক কোন ধরনের তরঙ্গ তা জানার আগেই তরঙ্গ সঞ্চারের পদ্ধতিটি অনুমান করে নিয়ে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের মত জ্যামিতীয় ধর্মগুলির ব্যাখ্যা করা যায়। অপর দিকে ব্যতিচার, ব্যবর্তন ও সমবর্তন ধর্মগুলির থেকে আলোর অনুপ্রস্থ তরঙ্গের রূপ প্রতিষ্ঠিত হওয়ার পরও আলোক তড়িৎক্রিয়ার মত কোন কোন ঘটনা আবার তার কণিকাচরিত্রের দিকে অঙ্গুলি নির্দেশ করে। এইভাবে নানা পরীক্ষা নিরীক্ষা, প্রকল্প ও তত্ত্বের মধ্যে কীভাবে আলোর কণিকাবাদ ও তরঙ্গবাদের সংশ্লেষণ ঘটেছে তা এই এককে পড়তে আপনি নিশ্চয়ই আগ্রহী হবেন।

আলোক বিদ্যার ইতিহাস আজ পদার্থবিদ্যার দীর্ঘ ইতিকথার অঙ্গীভূত হয়েছে। এই ইতিহাসের প্রথম কয়েকটি পাতা বর্তমান পর্যায়ের প্রথম এককের বিষয়বস্তু। এটি জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যা ও ভৌত আলোকবিদ্যা, উভয়েরই উপক্রমণিকা।

উদ্দেশ্য

এককের নাম থেকে এটি স্পষ্ট যে এই এককের উদ্দেশ্য আলোকের সার্বিক চরিত্রের সঙ্গে আপনাকে পরিচিত করা। আমরা আশা করব এই এককটি পড়ার পর আপনি

- আলোকের কণিকাতত্ত্বের সমর্থনে ও বিপক্ষে যুক্তি দিতে পারবেন এবং আলোকণিকার উপর কিছু বিশেষ ধর্ম আরোপিত করে কীভাবে কিছু ভৌত ঘটনার ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছিল তা বিবৃত করতে পারবেন।
- আলোকের তরঙ্গ তত্ত্বের স্বপক্ষে যুক্তি দিতে পারবেন এবং আলোক যে তড়িৎচুম্বকীয় অনুপ্রস্থ তরঙ্গ, কোন কাল্পনিক মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ নয় তা বোঝাতে পারবেন।
- তরঙ্গ সঞ্চারণের হাইগেন-নীতি ব্যাখ্যা করতে পারবেন এবং হাইগেন নীতির সাহায্যে প্রতিফলন, প্রতিসরণ ও অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- ফারমাট বা ফের্মার নীতি ব্যাখ্যা করতে পারবেন এবং প্রতিফলন ও প্রতিসরণের ক্ষেত্রে এই নীতির যথার্থতা প্রতিপন্ন করতে পারবেন।
- আধুনিক কোয়াণ্টাম তত্ত্বে কীভাবে আলোক ও সেইসঙ্গে যে কোন বস্তুর কণিকা ও তরঙ্গধর্মের একীভবন ঘটেছে তার সংক্ষিপ্ত বিবরণ দিতে পারবেন।

1.2 আলোক কণিকা না তরঙ্গ?

বিজ্ঞানের যে সব প্রশ্ন বহু শতাব্দী ধরে বৈজ্ঞানিকদের ব্যস্ত রেখেছে, এটি নিঃসন্দেহে সেগুলির একটি। আলোর চরিত্র সম্বন্ধে প্রাচীন গ্রীক দার্শনিক ও গণিতবিদ্ এমপিডো ক্লিস (খ্রিষ্টপূর্বাব্দ 490-430) ও ইউক্লিডের

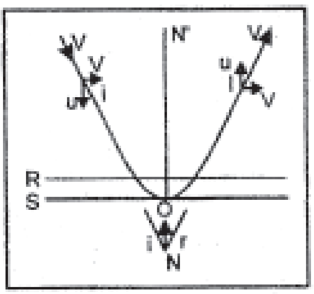
(প্রায় খ্রি. পূ. 300) রচনা থেকে বোঝা যায় সেযুগের দার্শনিকরা আলোর সরলরৈখিক গতি, প্রতিফলন, প্রতিসরণ, এমন কি আতস কাচের কথা জানতেন।

গাণিতিক পদার্থবিদ্যার দৃষ্টিভঙ্গি থেকে আলোর চরিত্র বিচারের চেষ্টা হয় এর অনেক পরে। ষোড়শ শতাব্দীতে দেকার্তে(Descartes) আলোর একটি ভৌত বর্ণনা দেওয়ার চেষ্টা করেন। তিনি ধরে নিয়েছিলেন আলো এক ধরনের চাপ, যেটি এক সর্বব্যাপী স্থিতিস্থাপক মাধ্যমের মধ্য দিয়ে সঞ্চারিত হয়। এই সময় থেকেই আলোক বিজ্ঞানের উন্নতি হতে থাকে। গ্যালিলিও তাঁর নির্মিত টেলিস্কোপ দিয়ে সৌরজগতের রহস্য উন্মোচন করার পথে অগ্রসর হন। 1621 খ্রিস্টাব্দে স্নেল (Snell) আলোর প্রতিসরণের সূত্র আবিষ্কার করেন। 1657 খ্রিষ্টাব্দে ফের্মা (Fermat) তাঁর প্রখ্যাত স্বল্পতম কালের নীতি বিবৃত করেন এবং তার সাহায্যে প্রতিফলন ও প্রতিসরণের নিয়মগুলি ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন। এ সম্বন্ধে আপনি এই এককেই কিছুটা জানতে পারবেন। এই শতকের একটি উল্লেখযোগ্য আবিষ্কার হল 'নিউটনের বলয়' যার কৃতিত্ব রবার্ট বয়েল (Robert Boyle) এবং রবার্ট হুক (Robert Hooke) উভয়েরই। আপনি নিশ্চয়ই ভাবছেন, এই ঘটনাটির নামকরণ নিউটনের নামে হয়েছিল কেন। নিউটন (Isaac Newton) এই ঘটনার ব্যাখ্যা দিয়েছিলেন আলোকে কণিকার স্রোত ধরে নিয়ে। নিউটনের তত্ত্ব সঠিক না হলেও ঐতিহাসিক কারণে আমরা নিউটনের বলয় নামটি এখনও ব্যবহার করি। নিউটনের কণিকাতত্ত্বটি কী সেটি এবার দেখা যাক।

1.2.1 আলোকের কণিকাতত্ত্ব

নিউটন তাঁর কণিকাতত্ত্বে ধরে নিয়েছিলেন যে, যে কোন দীপ্ত বস্তু থেকে আলো কণিকার স্রোতের রূপে নির্গত হয়। এই কণিকাগুলি প্রচণ্ড বেগে প্রথম গতিসূত্র অনুযায়ী সরলরেখায় ধাবিত হয়। কণিকাগুলি অত্যন্ত হাল্কা ও স্থিতিস্থাপক এবং আকারে এত ছোট যে, সেগুলি স্বচ্ছ বস্তুর আন্তরাণবিক শূন্যস্থানের মধ্য দিয়ে চলে যেতে পারে। প্রতিফলন ব্যাখ্যা করার জন্য সেগুলি মসৃণ তল থেকে বিকর্ষণী বলের প্রভাবে প্রতিক্ষিপ্ত হয়, এমনও ধরা হয়েছিল। এই কণিকাগুলি যখন চক্ষুর রেটিনায় পড়ে তখনই আলোকের অনুভূতি সৃষ্ট হয়।

দেখা যাক, কণিকাতত্ত্ব থেকে আলোকের প্রতিফলন ও প্রতিসরণ কীভাবে ব্যাখ্যা করা যায়।



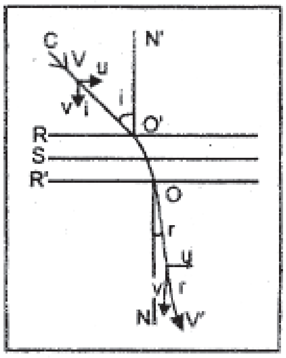
চিত্র 1.1

ধরুন, আলোককণিকা c, V বেগে প্রতিফলক s তলের উপর আপতিত হল (চিত্র 1.1)। কণিকাটি s এর সমান্তরাল R তলে পৌঁছালে সেটির উপর s এর লম্বমুখী বিকর্ষণী বল কাজ করে। এর ফলে কণিকাটি যখন s তলের O বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তখন তার বেগের যে উপাংশ (u) s এর সমান্তরাল সেটি অপরিবর্তিত থাকলেও, s এর লম্ব অভিমুখী উপাংশ v থেকে কমে শূন্য হয়। এর পর ঐ একই বিকর্ষণী বলের প্রভাবে কণিকাটি R তলে পৌঁছে s এর লম্ব অভিমুখে v গতির উপাংশ লাভ করে। প্রতিফলনের আগে ও পরে কণিকার বেগ s তলের লম্ব NON´ এর সঙ্গে যে কোণগুলি রচনা করে সেগুলিই আপতন কোণ i এবং প্রতিফলন কোণ r। স্পষ্টই বোঝা যায়

$v = V \cos i = V \cos r$ এবং $u = V \sin i = V \sin r$ সুতরাং $i = r$।

যেহেতু আপতনের আগে V ও NN´ যে তল রচনা করে, প্রতিফলনের ফলে তার লম্ব অভিমুখে কণিকাটি কোন গতিবেগ লাভ করে না; অতএব আপতিত রশ্মি, প্রতিফলিত রশ্মি ও লম্বটি একই তলে থাকবে। এইভাবে কণিকাতত্ত্ব থেকে প্রতিফলনের ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব।

আলোর প্রতিসরণ ব্যাখ্যা করার জন্য আমাদের ধরে নিতে হবে যে আলোক কণিকা প্রতিসারক তল S দ্বারা আকৃষ্ট হয়। S তলের দুই পাশে দুই সমান্তরাল তল R ও R′ এর মধ্যবর্তী অঞ্চলে এই বল ক্রিয়া করে। এই আকর্ষণী বলের প্রভাবে S তলের লম্ব বরাবর কণিকার বেগের উপাংশ v থেকে বেড়ে v′ হয় (চিত্র 1.2) এবং বেগ V থেকে বেড়ে V′ হয়। কিন্তু বেগের সমান্তরাল উপাংশ u প্রতিফলনের ক্ষেত্রের মত অপরিবর্তিত থাকে। প্রতিসরণের আগে ও পরে কণিকার বেগ S তলের লম্বের সঙ্গে যে কোণগুলি রচনা করে সেগুলি যথাক্রমে আপতন কোণ i ও প্রতিসরণ কোণ r। সুতরাং



চিত্র 1.2

$$u = V \sin i = V' \sin r$$

অর্থাৎ $\dfrac{\sin i}{\sin r} = \dfrac{V'}{V} = \dfrac{\text{দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোকের বেগ}}{\text{প্রথম মাধ্যমে আলোকের বেগ}}$

= প্রথম মাধ্যমের সাপেক্ষে দ্বিতীয় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক μ_{21}, যেটি একটি ধ্রুবক। ... (1.1)

আপনি নিশ্চয়ই জানেন, যে sin i / sin r = ধ্রুবক, এই সূত্রটিই হল স্নেলের সূত্র। এছাড়া প্রতিফলনের মত প্রতিসরণের ক্ষেত্রেও আলোক কণিকা আপতন তলের লম্বের দিকে কোন বেগ লাভ করে না। সুতরাং আপতিত রশ্মি, প্রতিসৃত রশ্মি আর প্রতিসারক তল S এর উপর লম্ব O′N′ বা ON একই তলে থাকবে। এইভাবে কণিকাতত্ত্ব থেকে প্রতিফলনের মত প্রতিসরণও ব্যাখ্যা করা যায়।

কণিকাতত্ত্বের অসঙ্গতি

কণিকাতত্ত্বের সাহায্যে আলোকের প্রতিফলন ও প্রতিসরণের যে ব্যাখ্যা দেওয়া হল, তার মধ্যে কয়েকটি গুরুতর অসঙ্গতি হয়ত আপনার চোখে পড়েছে। এগুলি হল ঃ

(i) বিভিন্ন মাধ্যমে আলোকের বেগ মেপে দেখা গেছে ঘন মাধ্যমে এই বেগ লঘু মাধ্যম অপেক্ষা কম। দেখা যায়, লঘু মাধ্যমের সাপেক্ষে ঘন মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক '1' এর চেয়ে বেশি। কিন্তু কণিকাতত্ত্ব অনুযায়ী, ঘন মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক 1 অপেক্ষা কম হওয়া উচিত। স্পষ্টত, এটি পর্যবেক্ষণের সম্পূর্ণ বিরোধী।

(ii) আলোক কণিকার উপর যে আকর্ষণী ও বিকর্ষণী বলের কল্পনা করা হয়েছে, সেগুলির উদ্ভব কীভাবে হয়? কোন মাধ্যম কণিকাগুলিকে আকর্ষণ করে, আবার অন্য কোন মাধ্যম কণিকাগুলিকে বিকর্ষণ করে, এরই বা কারণ কী?

(iii) যদি ধরে নেওয়া হয় মাধ্যম আলোক কণিকার উপর যে বল প্রয়োগ করে তা আকর্ষণী না বিকর্ষণী হবে তা মাধ্যমের চরিত্রের উপর নির্ভর করে, তাহলেও কাচ বা জলের তল থেকে আলো একই সঙ্গে প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত হয় কেন? এর ব্যাখ্যা দেওয়ার জন্য নিউটন কল্পনা করেছিলেন যে কণিকাগুলির মাঝে মাঝেই চরিত্রের পরিবর্তন ঘটে এবং আলোকরশ্মির মধ্যে কণিকাগুলির কতকগুলি প্রতিফলনের এবং কতকগুলি প্রতিসরণের পক্ষে সুবিধাজনক অবস্থায় থাকে। এই ব্যাখ্যা নিশ্চয়ই আপনার কাছে সহজগ্রাহ্য বলে মনে হচ্ছে না।

(iv) একটি সমতল প্রতিফলক আর তার উপরে রাখা একটি উত্তল লেন্সের মধ্যে যে সূক্ষ্ম বায়ুস্তর থাকে তার উপর আলো পড়লে আলোর ব্যতিচারের ফলে অনেকগুলি বলয়াকৃতি পটি দেখা যায়। নিউটন কণিকার চরিত্রের এই নিরন্তর ঘটতে থাকা পরিবর্তনের কল্পনা করে এই ঘটনার ব্যাখ্যা দিতে চেষ্টা করেছিলেন, যার জন্য ঐ পটিগুলির নাম হয়েছিল 'নিউটনের বলয়' (Newton's rings)। পরে দেখা গিয়েছিল যে কণিকাতত্ত্বের সাহায্যে আলোর ব্যতিচার, ব্যবর্তন বা সমবর্তনের কোন সুষ্ঠু ব্যাখ্যাই দেওয়া যায় না। এই পর্যায়ের পরবর্তী এককগুলিতে আপনি আলোকের তরঙ্গতত্ত্ব থেকে এসব ঘটনার সম্বন্ধে বিশদভাবে জানতে পারবেন।

1.2.2 আলোকের তরঙ্গতত্ত্ব

আলোর তরঙ্গ তত্ত্বের প্রথম প্রবক্তা ছিলেন রবার্ট হুক। আলো ঠিক কী ধরনের তরঙ্গ সে সম্বন্ধে কিছু না বললেও তাঁর মত ছিল এই যে আলো এক অত্যন্ত দ্রুত কম্পন যা নিমেষে সঞ্চারিত হয়। তিনি এও মনে করতেন যে সমসত্ত্ব মাধ্যমে প্রতি কম্পনশীল বিন্দু থেকে একটি গোলকাকার তরঙ্গ উৎপন্ন হয় যা সময়ের সঙ্গে আকারে বৃদ্ধি পায়। এই ধারণা থেকে হুক প্রতিসরণ এবং আলোকের বর্ণের ব্যাখ্যা দিতে চেষ্টা করেছিলেন। হুকের এই তত্ত্বের অনেকটা উন্নতি ও পরিবর্ধন ঘটিয়েছিলেন হাইগেন্স্ (Huygens)। হাইগেন্স্-এর প্রখ্যাত নীতি (1690) অনুযায়ী আলোকতরঙ্গ 'ইথার (Aether)' নামের এক কাল্পনিক মাধ্যমে সঞ্চারিত হয়। ইথারের যে বিন্দুতে এই তরঙ্গ আপতিত হয় সেটিকেই কেন্দ্র করে নূতন গোলকাকৃতি গৌণ তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। এই গৌণ-তরঙ্গগুলি আবার আকারে বৃদ্ধি পায় এবং সেগুলিকে স্পর্শ করে থাকা মোড়কটিই তরঙ্গমুখ (Wave-front) হিসাবে এগিয়ে চলে। 1.3 অনুচ্ছেদে আপনি হাইগেন্সের নীতির প্রয়োগের সঙ্গে পরিচিত হবেন। হাইগেন্স্ তাঁর তরঙ্গ সঞ্চারণের নীতির সাহায্যে ক্যালসাইট কেলাসের মধ্যে আলোর দ্বৈধ (double) প্রতিসরণও ব্যাখ্যা করেছিলেন, যা আপনি এই পাঠক্রমের অষ্টম এককে দেখতে পাবেন। আলোর এই দ্বৈধ প্রতিসরণ সম্বন্ধে পরীক্ষা করতে গিয়ে হাইগেন্স্ দেখতে পেলেন যে ক্যালসাইটের মধ্যে প্রতিসরণে যে দুটি রশ্মি উৎপন্ন হয় তার যে কোনটিকে ক্যালসাইটের অপর একটি কেলাসের মধ্য দিয়ে চালনা করে এবং ঐ কেলাসটিকে ঘুরিয়ে সম্পূর্ণ লুপ্ত করা যায়। আমরা জানি যে আলোর সমবর্তনই এই ঘটনার কারণ এবং হাইগেন্স্ এইভাবে আলোর সমবর্তন আবিষ্কার করেছিলেন। কিন্তু হাইগেন্স্ যে তরঙ্গের কল্পনা করেছিলেন তা ছিল পরিচিত শব্দতরঙ্গের মত অনুদৈর্ঘ্য, যার মধ্যে কম্পন কেবলমাত্র একদিকে, অর্থাৎ অগ্রপশ্চাতে হওয়া সম্ভব। তাই হাইগেন্সের তরঙ্গতত্ত্ব সমবর্তনের ব্যাখ্যা দিতে ব্যর্থ হয়েছিল।

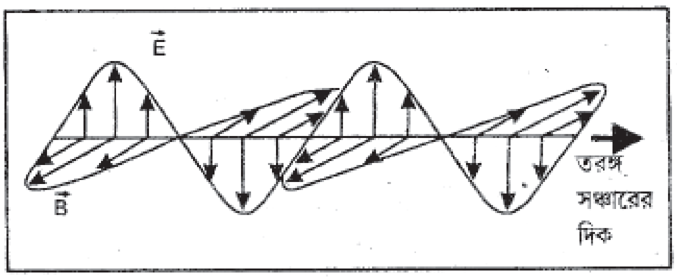
এর পর প্রায় গোটা অষ্টাদশ শতাব্দীতে আলোর চরিত্র সম্বন্ধে গবেষণার বিশেষ অগ্রগতি হয়নি। 1801 খ্রিষ্টাব্দে ইয়ং (Young) আলোক তরঙ্গের উপরিপাতন ও ব্যতিচারের তত্ত্ব বিবৃত করেন। তিনি সূক্ষ্মস্তরের (thin film) যে রং দেখতে পাওয়া যায়, তার ব্যাখ্যাও দেন। ইয়ং-এর তত্ত্ব কিছুটা গুণগত হওয়ায় সেটি ততটা গুরুত্ব পায়নি। এবং এরপর ম্যালাস (Malus) যখন 1809 খ্রিষ্টাব্দে প্রতিফলনের ফলে উৎপন্ন সমবর্তনের খোঁজ পেলেন তখন তার ব্যাখ্যা দেওয়ার কোন প্রচেষ্টা হয়নি। আলোর তরঙ্গ তত্ত্বের সবচেয়ে উল্লেখযোগ্য অগ্রগতি ঘটল যখন 1816 খ্রিষ্টাব্দে ফ্রেনেল (Fresnel) হাইগেন্স্-এর তরঙ্গমুখের ধারণা আর ইয়ং-এর উপরিপাতনের ফলে তরঙ্গের ব্যতিচারের ধারণা একত্রিত করে আলোর ব্যবর্তনের চমৎকার ব্যাখ্যা দিলেন। ফ্রেনেলের তত্ত্ব থেকে ব্যবর্তন সংক্রান্ত গণনার ফল ও পরীক্ষার পর্যবেক্ষণের মধ্যে সুন্দর মিল দেখা গেল। এবং এর ফলে কণিকাতত্ত্বকে নস্যাৎ করে আলোর তরঙ্গতত্ত্ব প্রতিষ্ঠা লাভ করল। হাইগেন্স্-এর তরঙ্গমুখের ধারণা থেকে কীভাবে প্রতিফলন, প্রতিসরণ প্রভৃতির ব্যাখ্যা দেওয়া যায় তা আমরা পরের অনুচ্ছেদে আলোচনা করব। কিন্তু তার আগে আলোক তরঙ্গ ঠিক কী ধরনের তরঙ্গ, সেটি আপনি নিশ্চয়ই জানতে চাইবেন। এ বিষয়টি সংক্ষেপে দেখে নেওয়া যাক।

1.2.3 আলোকতরঙ্গের প্রকৃতি

হাইগেন্‌স্‌ যে ইথার মাধ্যমের কল্পনা করেছিলেন তার উপর কিছু বিশেষ গুণাবলি আরোপ করা হয়েছিল। মনে রাখুন, যে যুগে স্থিতিস্থাপক শব্দতরঙ্গ ছাড়া আর কোন ত্রিমাত্রিক তরঙ্গের কথা জানা ছিল না। স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের বেগ $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, যেখানে E = স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক, ρ = মাধ্যমের ঘনত্ব। 1675 খ্রিষ্টাব্দে রোমার (Römer) বৃহস্পতির উপগ্রহের গ্রহণ লক্ষ্য করে মোটামুটিভাবে শূন্যে আলোর বেগ নির্ণয় করেছিলেন। আপনি জানেন, এই বেগ 3×10^5 km s^{-1}, যা বাতাসে শব্দের বেগের প্রায় নয় লক্ষ গুণ। কোন মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের বেগ এমন প্রচণ্ড হতে হলে তার স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক খুব বেশি, অথচ ঘনত্ব অত্যন্ত অল্প হতে হবে। ইথারকে এমনই একটি মাধ্যম বলে কল্পনা করা হয়েছিল। যেহেতু আলো সমস্ত স্বচ্ছ ও অর্ধস্বচ্ছ মাধ্যম, এমন কি শূন্য এবং সাধারণভাবে অনচ্ছ ধাতুর সূক্ষ্ম পাতের মধ্য দিয়েও যেতে পারে, এই মাধ্যমকে হতে হবে সর্বব্যাপী। উপরন্তু অত্যন্ত দৃঢ় হওয়া সত্ত্বেও তার মধ্য দিয়ে আমাদের চলাফেরা করতে কোন বাধা ঘটে না, কাজেই তাকে বস্তুর ক্ষেত্রেও আদর্শ প্রবাহীর মত ভেদ্য হতে হবে। আপনি নিশ্চয়ই অনুভব করছেন যে কল্পিত ইথার মাধ্যমটি খুবই অসাধারণ। 1881-87 খ্রিষ্টাব্দে মাইকেলসন (Michelson) ও মর্লি (Morley) ইথার মাধ্যমের অস্তিত্ব বা অলীকতা প্রমাণ করার জন্য একটি পরীক্ষা করেন।

আমরা জানি পৃথিবী সূর্যকেন্দ্রিক কক্ষপথে প্রায় 3×10^4 ms^{-1} বেগে ছুটে চলেছে। এই বেগ শূন্যে আলোকের বেগের 10^{-4} অংশ। ধরে নেওয়া যায়, পৃথিবীর এই বেগের ফলে ইথার মাধ্যম যেন পৃথিবীর সাপেক্ষে এই বেগের বিপরীত দিকে সমান দ্রুতিতে ধাবিত হচ্ছে। স্থির বায়ুতে আপনি যদি সাইকেল বা মোটর বাইক চড়ে যান, তাহলে আপনার পাশ দিয়ে যেমন বিপরীতমুখী বায়ুপ্রবাহ চলতে থাকে, এই ইথারের ঝড় কতকটা সেরকম। ইথারের এই আপাতপ্রবাহের ফলে আলোর বেগ প্রবাহের দিকে কিছুটা বেশি এবং প্রবাহের বিপরীতমুখে কিছুটা কম হবে বলে আশা করা যায়। এই দুই বেগের পার্থক্য থেকে ইথার প্রবাহের বেগও নির্ণয় করা যেতে পারে। মাইকেলসন ও মর্লি ইথার ঝড়ের বেগ নির্ণয় করার জন্য যে পরীক্ষা করেন তার সূক্ষ্মতা ইথারের প্রত্যাশিত বেগ পর্যবেক্ষণ ও পরিমাপের জন্য যথেষ্ট ছিল। কিন্তু সেই পরীক্ষায় ইথারের প্রবাহের কোন লক্ষণই দেখা যায়নি। এই পরীক্ষা থেকে ইথারের অলীকতা প্রমাণিত হল, কিন্তু আসল প্রশ্নটি রয়েই গেল — আলোক তাহলে কোন্‌ জাতীয় তরঙ্গ?

এই প্রশ্নের উত্তর তড়িৎ ও চুম্বকত্ব সম্বন্ধে সম্পূর্ণ পৃথক যে গবেষণা চলছিল তার থেকে। গাউস (Gauss), ফ্যারাডে (Faraday) ও অ্যাম্পিয়ার (Ampere) তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র সম্বন্ধীয় যে সব সূত্র প্রতিষ্ঠা করেন, ম্যাক্সওয়েল (Maxwell) সেগুলিকে চারটি ভেক্টর সমীকরণের সাহায্যে গাণিতিকভাবে প্রকাশ করেন। ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণ থেকে প্রমাণিত হয় যে তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্র তরঙ্গের রূপে সঞ্চারিত হয়। এই তরঙ্গের বেগ কত হবে তা তড়িৎ আধান, রোধ, ধারকের ধারকত্ব প্রভৃতি কোন একটি ভৌতরাশিকে একবার স্থিরতড়িতীয় (electrostatic) এবং আর একবার তড়িৎচুম্বকীয় (Electromagnetic) পদ্ধতিতে মেপে নির্ণয় করা যায়। এইভাবে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বেগ গণনা করে দেখা গেল তা হুবহু শূন্যে আলোকের বেগের সমান। এ থেকেই বোঝা গেল, আলোক তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। এ ধরনের তরঙ্গ সঞ্চারিত হতে কোন মাধ্যমের প্রয়োজন হয় না, সুতরাং ইথারের মত কোন মাধ্যমের কল্পনার কোন প্রয়োজন রইল না। উপরন্তু, ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলি



চিত্র 1.3

থেকে প্রতিপন্ন হল যে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ অনুপ্রস্থ তরঙ্গ। এতে তড়িৎক্ষেত্র $\vec{E}$ এবং চৌম্বক আবেশ $\vec{B}$ তরঙ্গ যে দিকে সঞ্চারিত হয় তার সঙ্গে সমকোণে থাকে। আবার এ দুটি পরস্পরের সঙ্গেও সমকোণ রচনা করে। 1.3 চিত্রে $\vec{E}$ ও $\vec{B}$ এর দিকগুলি দেখানো হয়েছে। তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অনুপ্রস্থ চরিত্র প্রমাণিত হওয়ার ফলে আলোকের সমবর্তনের ব্যাখ্যায় আর কোন বাধা রইল না।

আপনার মনে হতে পারে যে আলোকতরঙ্গ একই সঙ্গে তড়িৎক্ষেত্র $\vec{E}$ ও চৌম্বক আবেশ $\vec{B}$ এর তরঙ্গ। আলো আমাদের চোখে যে অনুভূতির সৃষ্টি করে, তার কারণ $\vec{E}$ ও $\vec{B}$ এর মধ্যে কোন্‌টি ? সপ্তম পাঠক্রমে আপনি যখন তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সম্বন্ধে বিশদভাবে পড়বেন তখন দেখতে পাবেন, যে তড়িৎক্ষেত্রের বিস্তার E_o আর চৌম্বক আবেশের বিস্তার B_o এর মধ্যে সম্পর্ক $B_o = E_o/C$ (C = শূন্যে আলোকের বেগ)। তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রে কোন আহিত কণা, যেমন ইলেকট্রন, থাকলে তার উপর তড়িতীয় বল হয় $q\,\vec{E}$ আর চৌম্বক বল হয় $q\,(\vec{v} \times \vec{B})$। এখানে q ও $\vec{v}$ যথাক্রমে আহিত কণার আধান ও বেগ। E_o ও B_o এর মধ্যে আমরা যে সম্পর্ক দেখলাম তা থেকে বোঝা যায় চৌম্বক বলের পরিমাণ তড়িতীয় বলের $\frac{v}{c}$ গুণ। আলো আমাদের চোখের মধ্যে যে সমস্ত আহিত কণাকে প্রভাবিত করে দৃষ্টির অনুভূতি ঘটায় সেগুলির বেগ সর্বদাই c এর তুলনায় নগণ্য। সুতরাং দৃষ্টির ক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্রই কার্যকরী, চৌম্বকক্ষেত্রের কোন ভূমিকা নেই বলে ধরা যায়। আমরা আলোক সম্বন্ধীয় যাবতীয় আলোচনায় তরঙ্গের সরণ বলতে তড়িৎক্ষেত্র $\vec{E}$ কেই বোঝাব।

আলোকের তরঙ্গপ্রকৃতি সম্বন্ধে এখন আমরা নিঃসন্দেহ হয়েছি। এবার আমরা হাইগেন্‌সের নীতিতে ফিরে যাব এবং তার হাতেকলমে প্রয়োগ করে দেখব। তবে তার আগে একটি সহজ অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী 1

পাশে দেওয়া শব্দগুলির কোন একটি ব্যবহার করে শূন্যস্থানগুলি পূর্ণ করুন ঃ

(i) আলোর কণিকাতত্ত্বের প্রধান প্রবক্তা ছিলেন ------------। (বয়েল / হুক / নিউটন / হাইগেন্‌স্)

(ii) কণিকাতত্ত্বে আলোর প্রতিফলনের ব্যাখ্যায় ধরে নেওয়া হয়েছিল যে প্রতিফলকটি আলোক কণিকাকে ----------------। (প্রভাবিত করে না / আকর্ষণ করে / বিকর্ষণ করে / শোষণ করে)

(iii) ইথার নামে আলোক তরঙ্গের যে মাধ্যম এক সময় কল্পনা করা হয়েছিল, তার স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক ও ঘনত্বকে ধরা হয়েছিল যথাক্রমে -------------। (অল্প ও খুব বেশি / অল্প ও খুবই সামান্য / অতিউচ্চ এবং বেশি / অতি উচ্চ এবং অতি অল্প)

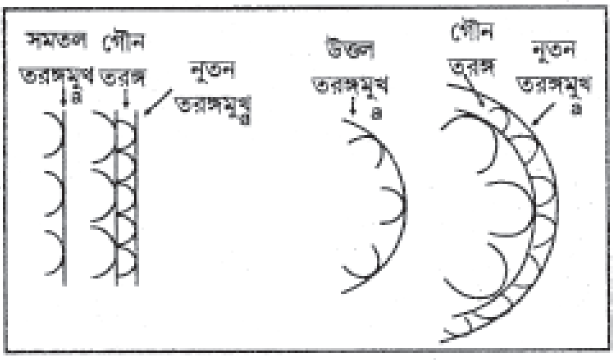
(iv) হাইগেন্‌স্ এর নীতি অনুযায়ী গৌণ তরঙ্গগুলির মোড়কটিই হয় --------------।(নতুন তরঙ্গমুখ / প্রতিফলিত রশ্মি / প্রতিসৃত রশ্মি / প্রতিফলক তল)

(v) মাইকেলসন ও মর্লির পরীক্ষাদ্বারা প্রমাণিত হয়েছিল যে --------------। (ইথারই আলোক তরঙ্গের মাধ্যম / ইথারের অস্তিত্ব নেই / আলোকের কণিকাতত্ত্ব সঠিক নয় / পৃথিবী ইথার মাধ্যমের মধ্যে বেগে ধাবমান)

(vi) ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলি থেকে দেখানো যায় যে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ --------------- (আলোর সমান বেগে চলে / একপ্রকার অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ / সমান্তরাল দুই ভেক্টর $\vec{E}$ ও $\vec{H}$ দ্বারা গঠিত / শূন্যে সঞ্চারিত হয় না)

1.3 হাইগেন্‌স্-এর নীতির প্রয়োগ

হাইগেন্‌স্‌এর নীতি সম্বন্ধে আপনি আগেই কিছুটা জেনেছেন। 1.4 চিত্রে আপনি দেখতে পাবেন কীভাবে একটি সমতল বা উত্তল তরঙ্গমুখের প্রতিটি বিন্দু থেকে গোলক আকৃতির গৌণ তরঙ্গ উৎপন্ন হয় এবং সেগুলির স্পর্শতল বা মোড়ক নতুন তরঙ্গ মুখ হিসাবে কাজ করে। মাধ্যমে তরঙ্গের বেগ যদি v হয় তবে Δt সময়ে তরঙ্গমুখ $v\Delta t$ দূরত্ব অগ্রসর হয়।

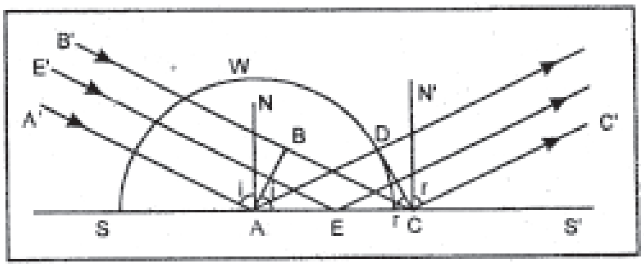


চিত্র 1.4

দেখা যাক, হাইগেন্‌স্‌এর এই নীতি প্রয়োগ ক'রে কীভাবে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ব্যাখ্যা করা যায়।

1.3.1 আলোকের প্রতিফলন

ধরে নিন একটি সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের AB তরঙ্গমুখ SS′ (চিত্র 1.5) প্রতিফলক সমতলের উপর আপতিত হল। A ও B বিন্দু একই সঙ্গে SS′ তলে পৌঁছাবে না। ধরা যাক A বিন্দু $t = o$ সময়ে এবং B বিন্দু $t = \Delta t$ সময়ে SS′ তলে এসে পৌঁছাল। A বিন্দু SS′ তলে আপতিত হওয়ার সঙ্গে সঙ্গে ঐ বিন্দু থেকে গোলকাকৃতি গৌণ তরঙ্গ উৎপন্ন হবে। এবং যতক্ষণে তরঙ্গমুখের B বিন্দু SS′ তলে C-তে এসে পৌঁছাবে অর্থাৎ যখন $t = \Delta t$, ততক্ষণে ঐ গৌণ তরঙ্গমুখের ব্যাসার্ধ হবে $v\Delta t$। এখানে v মাধ্যমে আলোর বেগ। লক্ষ্য করুন BC দৈর্ঘ্যও $v\Delta t$ এর সমান। W অর্ধবৃত্তটি $t = \Delta t$ সময়ে তরঙ্গমুখের প্রস্থচ্ছেদ নির্দেশ করছে। এখন যদি C থেকে Wএর উপর স্পর্শক CD টানা যায় তবে এই CD ই হবে প্রতিফলিত তরঙ্গমুখ।



চিত্র 1.5

এবার A ও C বিন্দুতে SS′এর উপর AN ও CN′ লম্ব আঁকলে,

আপতন কোণ $\angle i = \angle A'AN = \angle BAC$ (কেননা $A'A \perp AB$, $AN \perp AS'$)

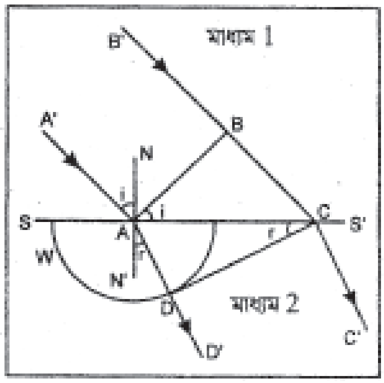
এবং প্রতিফলন কোণ $\angle r = \angle C'CN' = \angle DCA$ (কেননা $C'C \perp CD$, $CN' \perp CS'$)

আবার ΔABC ও ΔADC এর AC সাধারণ বাহু, $\angle ABC$ ও $\angle ADC$ উভয়ই সমকোণ এবং $BC = v\Delta t = AD$। সুতরাং ত্রিভুজ দুটি সর্বসম এবং $\angle BAC = \angle DCA$, অর্থাৎ $\angle i = \angle r$।

আপনি ইচ্ছা করলে SS′ এর আপতিত অন্য রশ্মির (যেমন E′E) বিবেচনা করেও দেখাতে পারেন যে সেটির আপতন বিন্দু থেকে উৎপন্ন তরঙ্গমুখও CDকে স্পর্শ করবে। এছাড়া চিত্রে আপতিত রশ্মি A′A, প্রতিফলিত রশ্মি AD এবং লম্ব AN একই তলে অবস্থিত। সুতরাং হাইগেন্‌স্-এর নীতি থেকে প্রতিফলনের দুটি সূত্রই প্রমাণিত হল।

1.3.2 আলোকের প্রতিসরণ

আলোকরশ্মি যখন দুটি ভিন্ন মাধ্যমের বিভেদতলে আপতিত হয় তখনই তার প্রতিসরণ ঘটে। ধরে নেওয়া যাক SS' দুই মাধ্যমের বিভেদতল (চিত্র 1.6) আলোর বেগ তার উপরের প্রথম মাধ্যমে u, নীচের দ্বিতীয় মাধ্যমে v। প্রথম মাধ্যম থেকে AB তরঙ্গ মুখ SS' তলে আপতিত হয়েছে। আগের মত ধরে নিন A বিন্দু $t = o$ সময়ে এবং B বিন্দু $t = \Delta t$ সময়ে SS' তলে এসে পৌঁছায়। যেহেতু BC দৈর্ঘ্য u বেগে অতিক্রম করতে আলোর Δt সময় লাগে, অতএব $BC = u\Delta t$। এই Δt সময়ে A বিন্দু থেকে উৎপন্ন গৌণ তরঙ্গমুখের ব্যাসার্ধ হবে $v\Delta t$। A কে কেন্দ্র করে $v\Delta t$ ব্যাসার্ধের অর্ধবৃত্ত W অঙ্কন করলে সেটিই হবে দ্বিতীয় মাধ্যমে $t = \Delta t$ সময়ে ঐ গৌণ তরঙ্গমুখের প্রস্থচ্ছেদ। এবার C বিন্দু থেকে W এর উপর স্পর্শক CD টানা হলে সেটি প্রতিসৃত তরঙ্গ মুখ নির্দেশ করবে। স্পষ্টত, গৌণ তরঙ্গমুখের ব্যাসার্ধ $AD = v\Delta t$।



চিত্র 1.6

এবার দেখা যাক তরঙ্গগুলি প্রতিসরণের নিয়ম পালন করে কি না। A বিন্দুতে SS' তলের উপর NN' লম্ব হলে আপতন কোণ $\angle i = \angle A'AN = \angle BAC$ এবং প্রতিসরণ কোণ $\angle r = \angle DAN' = \angle DCA$।

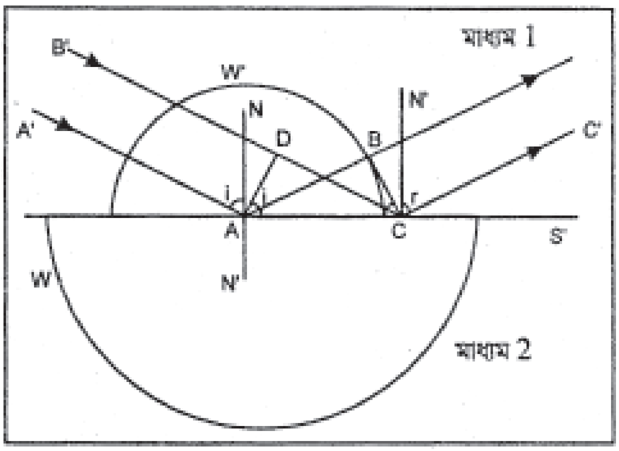
এখন, $$\sin\angle i = \frac{BC}{AC} \text{ এবং } \sin\angle r = \frac{DA}{AC}$$

সুতরাং $$\frac{\sin\angle i}{\sin\angle r} = \frac{BC}{DA} = \frac{u\Delta t}{v\Delta t} = \frac{u}{v} = \text{ধ্রুবক } \mu_{21} \qquad \dots (1.2)$$

এটি আপনার পরিচিত স্নেলের সূত্র। এখানে μ_{21} = প্রথম মাধ্যমের সাপেক্ষে দ্বিতীয় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক (refractive index)। স্পষ্টই বোঝা যাচ্ছে যে এটি প্রথম ও দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোকের বেগের অনুপাত। এছাড়া আগের মত বলা যায় যে আপতিত রশ্মি $A'A$, প্রতিসৃত রশ্মি AD' এবং আপতন বিন্দুতে লম্ব NN' একই তলে অবস্থিত, সুতরাং প্রতিসরণের দুটি নিয়মই হাইগেন্‌স্‌-এর নীতি থেকে পাওয়া গেল।

1.3.3 পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন

এবার একটি সমস্যার কথা ভেবে দেখুন। 1.6 চিত্রে আমরা A বিন্দুকে কেন্দ্র করে $v\Delta t$ ব্যাসার্ধের যে অর্ধবৃত্ত অঙ্কন করেছি, C বিন্দু তার বাইরে থাকায় CD স্পর্শক টানা সম্ভব হয়েছিল। কিন্তু যদি $v\Delta t > AC$ হত? এমন একটি অবস্থা 1.7 চিত্রে দেখতে পাবেন। এক্ষেত্রে C থেকে গৌণ-তরঙ্গমুখ W এর উপর স্পর্শক অঙ্কন করা সম্ভব নয়। সুতরাং কোন প্রতিসৃত রশ্মিও পাওয়া যাবে না। বরং প্রথম মাধ্যমেই A কে কেন্দ্র করে $u\Delta t$ ব্যাসার্ধের গৌণ-তরঙ্গমুখ অঙ্কন করলে C থেকে তার উপর স্পর্শক CD অঙ্কন করা যাবে এবং আমরা প্রতিফলিত তরঙ্গমুখ CD



চিত্র 1.7

পাব। আপনি নিশ্চয়ই অনুমান করতে পারছেন যে এটি হল পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন (total internal reflection) কেননা এক্ষেত্রে কোন প্রতিসৃত রশ্মি নেই।

1.6 চিত্র থেকে আপনি পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলনের শর্ত নির্ণয় করতে পারবেন। সেখানে

$$AC \sin i = BC = u\Delta t$$

∴ পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলনের শর্ত হল

$$v\Delta t > AC, \text{ বা } v\Delta t > \frac{u\Delta t}{\sin i}, \text{ বা } \sin i > \frac{u}{v} \text{ বা } \sin i > \mu_{21} \qquad \ldots (1.3)$$

যেহেতু sin i এর মান 1 অপেক্ষা কম, μ_{21} কে 1 অপেক্ষা কম হতে হবে, অর্থাৎ দ্বিতীয় মাধ্যমের তুলনায় প্রথম মাধ্যমে আলোর বেগ কম হতে হবে বা প্রথম মাধ্যমকে দ্বিতীয় মাধ্যমের তুলনায় ঘনতর হতে হবে। যদি দ্বিতীয় মাধ্যমটি বায়ু বা শূন্য হয় এবং প্রথম মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক μ হয় তবে 1.3 সূত্রকে লেখা যায়,

$$\sin i > \frac{1}{\mu} \quad (\text{কেননা } \mu = \mu_{12} = 1/\mu_{21}) \qquad \ldots (1.4)$$

1.4 সূত্র থেকে বোঝা যায় $\angle i$ যখন $\sin^{-1}\frac{1}{\mu}$ কে অতিক্রম করে তখনই পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ঘটে। এই কোণকে আমরা সঙ্কট কোণ (critical angle) বলি।

হাইগেন্‌স্‌-এর নীতির প্রয়োগে আপনি নিশ্চয়ই কিছুটা অভ্যস্ত হয়েছেন। এবার এ সম্বন্ধে একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী 2

1.6 চিত্রে AB = 2 cm, $\angle i = 30^o$, প্রথম ও দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোর বেগ যথাক্রমে $u = 3 \times 10^8$ ms^{-1} ও $v = 2 \times 10^8$ ms^{-1} ধরে নিন। এবার নীচের রাশিগুলির মান লিখুন ঃ

BC = __________ ; AD = __________ ; BC অথবা AD অতিক্রম করতে আলোর সময় লাগে

Δt = ____________ ; $\angle r$ = __________;

দ্বিতীয় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক = ___________ ;

দ্বিতীয় মাধ্যম থেকে প্রথম মাধ্যমে প্রতিসরণের ক্ষেত্রে সঙ্কট কোণ = ____________।

1.4 ফের্মার নীতি (Fermat's Principle)

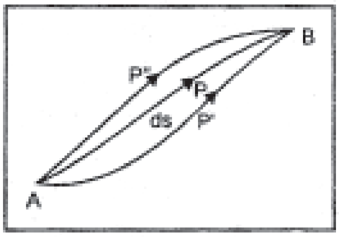
এবার আমরা ইতিহাসের কয়েক পাতা পিছনে ফিরে যাব। আপনি আগেই জেনেছেন যে নিউটনের যুগে (1642-1727) আলোর কণিকাতত্ত্বই ছিল প্রচলিত মতবাদ। কিন্তু প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি জানার পর ফরাসী গণিতবিদ্ ফের্মা আলোর গতির একটি ধর্ম আবিষ্কার করেন যা কেবলমাত্র প্রাকৃতিক ঘটনার পর্যবেক্ষণ প্রসূত, আলোর কণিকা বা তরঙ্গধর্মের উপর নির্ভরশীল নয়। ফের্মার নীতি অনুযায়ী 'আলো সর্বদাই এমন পথে চলে যাতে সেটি গন্তব্যস্থলে সর্বনিম্ন সময়ে পৌঁছাতে পারে।' এই নীতিকে 'সর্বনিম্ন সময়ের নীতি' বলা হত। পরে অবশ্য

দেখা গিয়েছে যে কোন কোন ক্ষেত্রে সেটি সর্বনিম্ন সময় না হয়ে সর্বোচ্চ সময়ও হয়। সুতরাং ফের্মার নীতিকে ঈষৎ পরিবর্তিত করে লেখা যায় 'আলো সর্বদাই এমন পথে চলে যাতে সেটি গন্তব্যস্থলে পৌঁছাতে যে সময় লাগে তা সন্নিহিত অন্য পথের তুলনায় সর্বনিম্ন বা সর্বোচ্চ, অর্থাৎ চরম মান সম্পন্ন হয়।'

আমরা বরং নীতিটিকে গাণিতিকভাবে প্রকাশ করি। ধরা যাক, কোন একটি অসমসত্ত্ব (inhomogeneous) মাধ্যমে (x, y, z) বিন্দুতে প্রতিসরাঙ্ক n। এই মাধ্যমে ds দূরত্ব যেতে আলোর সময় লাগে

$$dT = \frac{ds}{c/n} \quad (\text{ c = শূন্যে আলোর বেগ })$$

$$= \frac{1}{c}\, n\, ds$$



চিত্র 1.8

সুতরাং কোন একটি পথ P ধরে A বিন্দু থেকে B বিন্দুতে যেতে আলোর সময় লাগবে

$$T = \frac{1}{c} \int_{A(P)}^{B} n\, ds$$, যেখানে (P) নির্দেশ করছে, যে সমাকলনের পথ P (চিত্র 1.8)। P পথের সন্নিহিত P′,P″ প্রভৃতি পথে A থেকে B তে যেতে আলোর কত সময় লাগবে সেগুলিও একইভাবে নির্ণয় করা যায়। P পথটিই যদি আলোর প্রকৃত পথ হয় তবে T সময়টি সন্নিহিত অন্যান্য পথের ক্ষেত্রে যে সব সময়গুলি লাগবে সেগুলির মধ্যে চরম হবে। গাণিতিক ভাষায় লেখা যায়, আলোকরশ্মির প্রকৃত পথের ক্ষেত্রে $\delta T = 0$

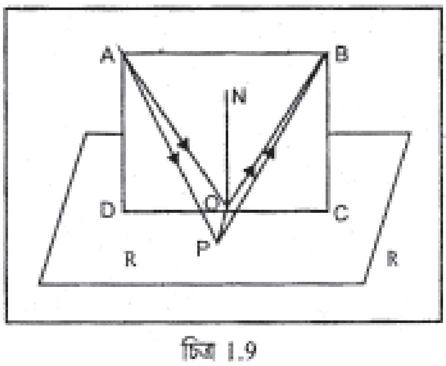
$$\text{অথবা} \quad \delta \int_{A}^{B} n\, ds = 0 \qquad \dots (1.5)$$

1.5 সূত্রটিই ফের্মার নীতির গাণিতিক রূপ।

এবার আমরা ফের্মার নীতি প্রয়োগ করে আলোকের প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি প্রতিষ্ঠিত করার চেষ্টা করব।

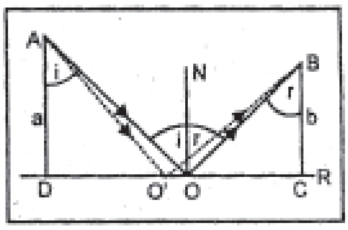
1.4.1 আলোকের প্রতিফলনের সূত্র

ধরে নিন R একটি সমতল, ABCD তল R-এর উপর লম্ব। A থেকে আলোকরশ্মি R তলে প্রতিফলিত হয়ে B বিন্দুতে পৌঁছায় (চিত্র 1.9)। R তলে দুটি আপতন বিন্দু কল্পনা করা যাক, যার একটি R ও ABCD তলের ছেদরেখার উপরে অবস্থিত O বিন্দু আর অন্যটি CD সরলরেখায় O বিন্দুতে টানা লম্ব বরাবর একটি বিন্দু P। এখানে ΔAOP সমকোণী ত্রিভুজ, সুতরাং অতিভুজ AP)AO। একইভাবে দেখা যায় BP)BO। সুতরাং AP + PB) AO + OB। মাধ্যমটি সমসত্ত্ব হওয়ায় (AO + OB) পথে যেতে আলোর (AP + PB) পথের তুলনায় বেশি সময় লাগবে। এইভাবে P এর মত ABCD তলের বাইরে যে কোন বিন্দু ধরে দেখানো যাবে যে AO+OB পথে A থেকে B তে যেতে সর্বনিম্ন সময় নেয়। সুতরাং আলোকের আপতন বিন্দু ABCD তলে থাকবে এবং আপতিত রশ্মি, প্রতিফলিত রশ্মি ও আপতন বিন্দুতে R তলের উপর লম্ব ON একই সমতলে থাকবে। এটি প্রতিফলনের প্রথম সূত্র।



চিত্র 1.9

এবার ধরা যাক ABCD তলে A বিন্দু থেকে আলোকরশ্মি O বিন্দুতে প্রতিফলিত হয়ে B তে পৌঁছাল (চিত্র 1.10)। AD, BC ও ON CD রেখার উপর লম্ব। রশ্মির আপতন ও প্রতিফলন কোণ যথাক্রমে $\angle i = \angle AON = \angle OAD$ এবং $\angle r = \angle BON = \angle OBC$। যদি AD দৈর্ঘ্য = a, BC দৈর্ঘ্য = b হয় তবে AO = a sec i, BO = b sec r।



চিত্র 1.10

সুতরাং আলোকরশ্মির A থেকে B তে পৌঁছাতে সময় লাগবে

$$T = \frac{AO + OB}{C} = \frac{1}{C}\,(a \sec i + b \sec r)$$

ফের্মার নীতি অনুযায়ী O বিন্দুর সন্নিহিত অন্য কোন বিন্দু O′ থেকে আলোকরশ্মি প্রতিফলিত হলে প্রয়োজনীয় সময়ে যদি δT পরিমাণ হেরফের হত, তবে $\delta T = O$

বা $\frac{1}{C}$ (a sec i tan i di + b sec r tan r dr) = 0

$$\therefore\ \frac{di}{dr} = -\,\frac{b \sec r \tan r\, dr}{a \sec i \tan i\, di} \qquad \dots (1.6)$$

যেহেতু A ও B নির্দিষ্ট দুটি বিন্দু, দৈর্ঘ্য DC = DO + OC = ধ্রুবক।

এখন DO = a tan i, CO = b tan r, সুতরাং DC = a tan i + b tan r

$\therefore\quad \delta\,(a \tan i + b \tan r) = 0$

বা $\quad a \sec^2 i\, di + b \sec^2 r\, dr = 0$

বা $$\frac{di}{dr} = -\,\frac{b \sec^2 r}{a \sec^2 i} \qquad \dots (1.7)$$

1.6 ও 1.7 থেকে $\frac{di}{dr}$ এর দুই মান সমানীত করে

$$\frac{b \sec r \tan r\, dr}{a \sec i \tan i\, di} = \frac{b \sec^2 r}{a \sec^2 i}$$

বা, সরল করে, sin i = sin r

বা, i = r, যেহেতু উভয়ই সূক্ষ্মকোণ।

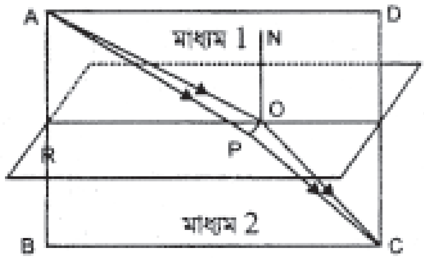
অর্থাৎ আপতন কোণ = প্রতিফলন কোণ।

দেখুন, ফের্মার নীতি থেকে আমরা আলোর প্রতিফলনের দুটি সূত্রই প্রতিষ্ঠিত করতে পারলাম।

এবার দেখা যাক প্রতিসরণ সূত্রগুলি ফের্মার নীতি থেকে পাওয়া যায় কি না।

1.4.2 আলোকের প্রতিসরণের সূত্র

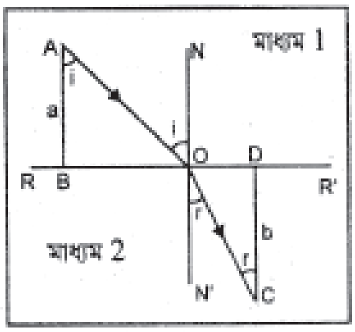
আগের মত ধরে নিন R প্রতিসারক তল, ABCD তল তাকে লম্বভাবে ছেদ করেছে (চিত্র 1.11)। R তলের উপরে প্রথম মাধ্যমে আলোর বেগ u এবং নীচে দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোর বেগ v। R তলে দুটি আপতন বিন্দু কল্পনা করুন, যাদের একটি O ABCD তলে অবস্থিত আর অন্যটিP, যেটি O বিন্দুর সন্নিহিত। OP রেখাটি ABCD তলের উপর লম্ব। এখন যদি আপনি মনে রাখেন যে $\angle AOP$ এবং $\angle COP$ কোণ দুটি সমকোণ হওয়ায় AP〉AO এবং CP 〉 CO, তবে আপনি সহজেই দেখাতে পারবেন যে আলোকরশ্মির AOC পথে A থেকে C বিন্দুতে পৌঁছাতে যে সময় লাগবে APC পথে পৌঁছাতে সর্বদাই তার চেয়ে বেশি সময় লাগবে, OP দৈর্ঘ্য যাই হোক না কেন। এই কাজটি আপনার জন্য রাখা রইল। মোটর উপর বোঝা যাচ্ছে যে ফের্মার নীতি পালন করলে আপতিত রশ্মি AO এবং প্রতিসৃত রশ্মি OC একই তলে থাকবে। আপতন বিন্দুতে লম্ব ON, ABCD তলে অবস্থিত। সুতরাং সেটিও আপতন তলেই অবস্থিত।



চিত্র 1.11

এবার দেখা যাক ফের্মার নীতি থেকে আমরা কীভাবে প্রতিসরণের স্নেলের সূত্রে পৌঁছাতে পারি।

ধরুন একটি নির্দিষ্ট তলে A বিন্দু থেকে আলোকরশ্মি O বিন্দুতে আপতিত হয়ে প্রতিসরণের পর C বিন্দুতে পৌঁছায় (চিত্র 1.12)। RR′ সরলরেখাটি এখানে দুই মাধ্যমের বিভেদতল নির্দেশ করছে এবং AB ও CD এই রেখার উপর লম্ব। NN′ আপতন বিন্দু O তে RR′ এর উপর লম্ব। ধরুন আপতন কোণ $\angle AON = \angle i$, প্রতিসরণ কোণ $\angle CON' = \angle r$, $AB = a$ এবং $CD = b$। এছাড়া প্রথম ও দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোকের বেগ যথাক্রমে u ও v।



চিত্র 1.12

আলোকরশ্মির A থেকেO বিন্দু হয়ে C বিন্দুতে পৌঁছাতে প্রয়োজনীয় সময়

$$T = \frac{AO}{u} + \frac{OC}{v} = \frac{a \sec i}{u} + \frac{b \sec r}{v}$$

ফের্মার নীতি অনুযায়ী i এবং r এর সামান্য পরিবর্তন ঘটলে,

$$\delta T = O, \text{ অর্থাৎ } \frac{a}{u} \sec i \tan i \, di + \frac{b}{v} \sec r \tan r \, dr = O$$

$$\text{বা, } \quad \frac{di}{dr} = -\frac{bu \sec r \tan r}{av \sec i \tan i} \qquad \ldots (1.8)$$

আবার A ও C নির্দিষ্ট দুটি বিন্দু হওয়ায়, দৈর্ঘ্য BD = BO + OD = ধ্রুবক।

যেহেতু $BO = a \tan i$, $\quad OD = b \tan r$,

$$\delta (a \tan i + b \tan r) = O$$

বা $\quad a \sec^2 i \, di + b \sec^2 r \, dr = 0$

বা $$\frac{di}{dr} = -\frac{b \sec^2 r}{a \sec^2 i} \qquad \text{... (1.9)}$$

1.8 ও 1.9 সমীকরণ দুটি থেকে $\frac{di}{dr}$ এর মান সমানীত করে,

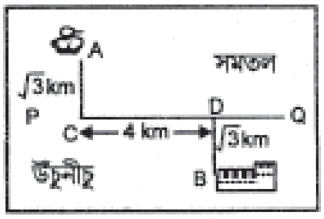
$$\frac{b\,u \sec r \tan r}{a\,v \sec i \tan i} = \frac{b \sec^2 r}{a \sec^2 i}$$

অথবা, $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{u}{v} = \mu_{21}$ যা প্রথম মাধ্যমের সাপেক্ষে দ্বিতীয় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক (1.2 সূত্রটি দেখুন)। এইভাবে, ফের্মার নীতি থেকে আমরা স্নেলের সূত্রে উপনীত হলাম।

ফের্মার নীতি নিশ্চয়ই আপনার কৌতূহল সৃষ্টি করছে। এই নীতি কি শুধু আলোকরশ্মির ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য? আমরাও কি অনেক সময় এক বিন্দু থেকে আর এক বিন্দুতে যেতে সবচেয়ে কম সময়ের পথে যাই না? এ ধরনের একটি অনুশীলনী আপনার নিশ্চয়ই ভাল লাগবে।

অনুশীলনী 3

একটি ট্যাঙ্ককে A বিন্দু থেকে যাত্রা শুরু করে B বিন্দুতে অবস্থিত দুর্গে সবচেয়ে কম সময়ে পৌঁছাতে হবে। A বিন্দুটি সমতল ক্ষেত্রে এবং B বিন্দু উঁচুনীচু জমিতে অবস্থিত এবং এই দুই ধরনের জমিতে ট্যাঙ্কটি যথাক্রমে ঘণ্টায় 30km ও $10\sqrt{3}$ km বেগে চলতে পারে। সমতল ক্ষেত্রের সীমা একটি সরলরেখা PQ, যার থেকে A ও B বিন্দু $\sqrt{3}$ km দূরে। ঐ সরলরেখার উপর A ও B বিন্দু থেকে আঁকা লম্বের পাদবিন্দু দুটির মধ্যে দূরত্ব 4 km। ট্যাঙ্কটিকে কোন বিন্দু দিয়ে PQ সীমানা পার হতে হবে? A থেকে B তে পৌঁছানোর সবচেয়ে কম সময় কত? A থেকেB তে সরলরেখায় গেলে ট্যাঙ্কের কত সময় লাগত?

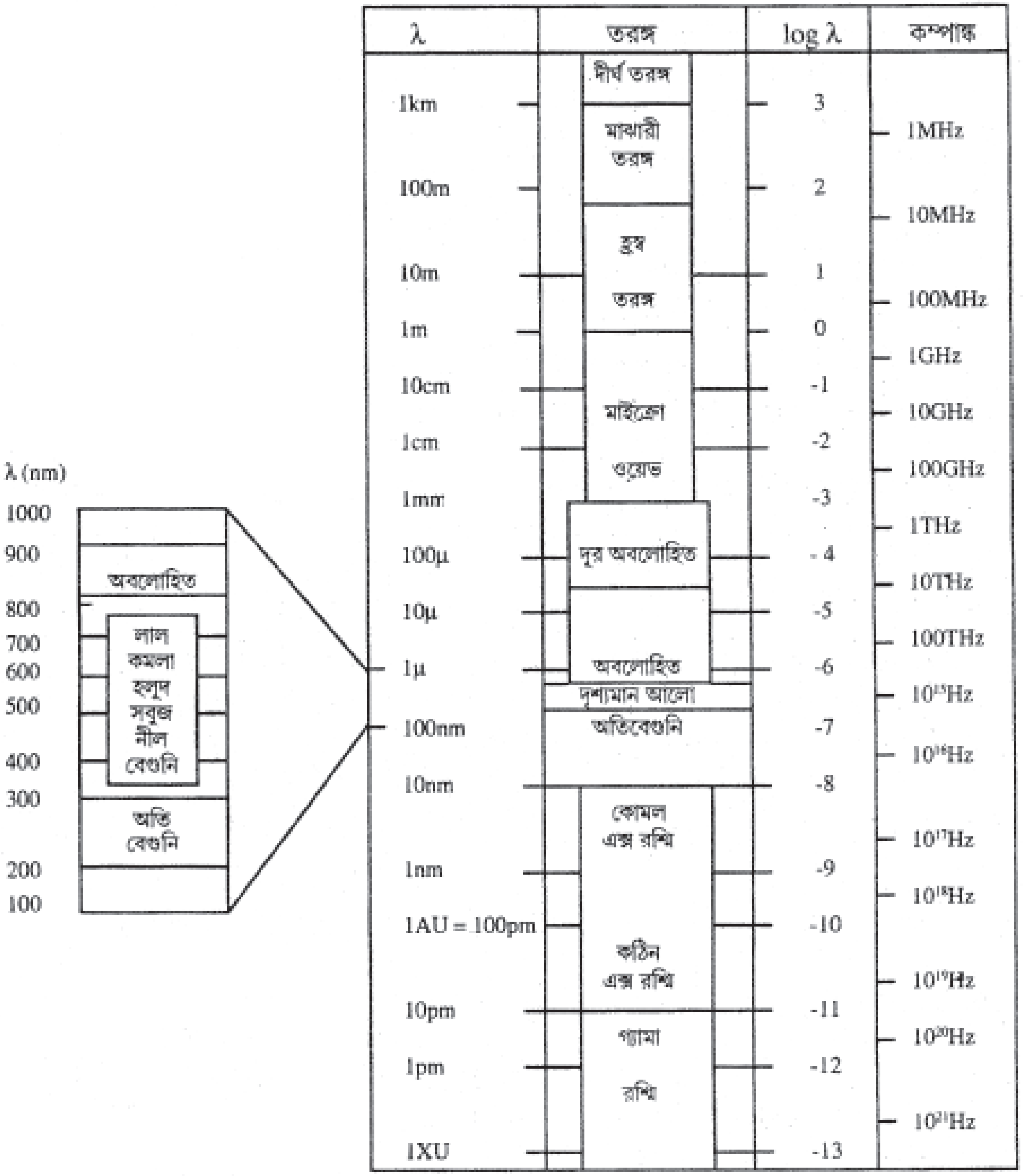


চিত্র 1.13

1.5 আলোকের দ্বিচারিতা

এ পর্যন্ত পড়ার পর আপনি হয়ত আলোকের তরঙ্গ প্রকৃতি সম্বন্ধে নিঃসন্দেহ হয়েছেন। আলোক যে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সে সম্বন্ধে কোন বিতর্কের অবকাশ নেই। এখন আমরা জানি যে শুধু দৃশ্যমান আলোই নয়, রেডিও তরঙ্গ থেকে শুরু করে, মাইক্রোওয়েভ তরঙ্গ, অবলোহিত (infra red) ও অতিবেগুনি (Ultra-violet) বিকিরণ, এক্স রশ্মি ও গ্যামা রশ্মিও তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। নীচের 1.1 সারণিতে বিভিন্ন ধরনের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ও কম্পাঙ্ক লিপিবদ্ধ হল।

সারণি 1.1 - তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ বর্ণালি



বিংশ শতাব্দীর সূচনার সঙ্গে সঙ্গে দেখা গেল যে আলোকের তরঙ্গতত্ত্বকে স্বয়ংসম্পূর্ণ বলে মেনে নেওয়া যায় না। এমন বেশ কিছু ঘটনা পরিলক্ষিত হল যেগুলির ব্যাখ্যা তরঙ্গতত্ত্ব থেকে দেওয়া যায় না। দেখা যাক সেগুলি কী?

i) যে সব বস্তু তাদের উপর আপতিত যে কোন বিকিরণকে সম্পূর্ণভাবে শোষণ করে, সেগুলিকে কৃষ্ণবস্তু বলে। কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণের বর্ণালির ব্যাখ্যা করতে গিয়ে প্লাঙ্ক (Max Planck) 1900 খ্রিষ্টাব্দে এক সম্পূর্ণ নূতন

তত্ত্বের প্রস্তাব করেন। তাঁর মত ছিল এই যে কৃষ্ণবস্তুটির মধ্যে অসংখ্যক স্পন্দক (oscillator) বর্তমান এবং এই স্পন্দকগুলি তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ-কে এক একটি কোয়াণ্টাম (Quantum) বা অবিভাজ্য খণ্ডের রূপে শোষণ বা মোক্ষণ করে। বিকিরণের কম্পাঙ্ক ν হলে প্রতি কোয়াণ্টামের শক্তি $h\nu$, যেখানে h একটি সমানুপাত ধ্রুবক। প্লাঙ্ক-এর নামানুসারে এই h ধ্রুবককে বলা হয় প্লাঙ্ক-ধ্রুবক(Planck's constant)। এই ধ্রুবকের মান 6.626×10^{-34}JS। কোয়াণ্টামের ধারণা ব্যবহার করে প্লাঙ্ক কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ-বর্ণালির সম্পূর্ণ ব্যাখ্যা দিতে সক্ষম হন এবং তার ফলে কোয়াণ্টাম তত্ত্ব প্রতিষ্ঠা লাভ করে। এই বিষয়টি আপনি হয়ত EPH 05 পাঠক্রমের সপ্তম এককে পড়ে থাকবেন। মোটের উপর, কোয়াণ্টাম তত্ত্ব আলোককণিকার ধারণাকে নতুন করে ফিরিয়ে আনতে পেরেছিল। আলোর কোয়াণ্টাম বা কণিকার নাম দেওয়া হয়েছিল ফোটন (photon) এবং এই ফোটন এখনও একটি নির্দিষ্ট ধর্মসম্বলিত কণিকা হিসাবে বিবেচিত হয়।

ii) প্লাঙ্কের কোয়াণ্টাম তত্ত্ব ব্যবহার করে বোর (Niels Bohr) 1913 খ্রিষ্টাব্দে হাইড্রোজেন পরমাণুর বর্ণালির ব্যাখ্যা দিলেন। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটি যখন এ[illegible] শক্তিস্তর থেকে নিম্নতর শক্তিস্তরে আসে তখন পরমাণুর অতিরিক্ত শক্তি একটি ফোটন হিসাবে নির্গত হয়। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেন বর্ণালিরেখার নির্ণীত কম্পাঙ্কগুলি পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সুন্দরভাবে মিলে যায়।

iii) পরীক্ষায় দেখা গিয়েছিল যে ধাতুর উপর আলো পড়লে অনেক সময় ধাতু থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়। এই ইলেকট্রনগুলিকে আমরা ফটো ইলেকট্রন বলি। আইনস্টাইন (Einstein) 1905 খ্রিস্টাব্দে কোয়াণ্টাম তত্ত্ব থেকে ফটো ইলেকট্রন নির্গমনের ব্যাখ্যা দেন। তাঁর তত্ত্ব অনুযায়ী ধাতুর মধ্যে একটি ইলেকট্রন যখন একটি আলোককণিকা বা ফোটন শোষণ করে, তখন ঐ ফোটনের শক্তি ধাতু থেকে ইলেকট্রনের মুক্তি পাওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তির তুলনায় বেশি হলে ইলেকট্রনটি ফটো ইলেকট্রন হিসাবে বেরিয়ে আসে। ইলেকট্রনের বাড়তি শক্তি সেটির গতীয় শক্তিতে পরিণত হয়। আলোকে তরঙ্গ ধরলে, আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া (photo electric effect) নামে পরিচিত এই ঘটনার ব্যাখ্যা দেওয়া যায় না; কেননা ইলেকট্রনের আকার এতই ক্ষুদ্র যে সেক্ষেত্রে আলোক তরঙ্গ তার উপর অত্যন্ত অল্প ক্ষমতা আপতিত করত এবং প্রয়োজনীয় শক্তি সংগ্রহ করে ধাতু থেকে নির্গত হতে ইলেকট্রনের সুদীর্ঘ সময় লেগে যেত।

পদার্থবিদ্যার বিভিন্ন অধ্যায় থেকে আপনি আলোকের কোয়াণ্টাম-তত্ত্বের প্রয়োগের আরও উদাহরণ খুঁজে পাবেন। কিন্তু আসল প্রশ্নটি হল এই যে তাহলে কি আমরা আলোর তরঙ্গতত্ত্বকে বর্জন করে আলোকে ফোটনের সমষ্টি বলে মনে করব? না কি তরঙ্গ তত্ত্বের সাহায্যেই সব ঘটনার ব্যাখ্যার চেষ্টা করব? এর উত্তর আলো আসলে তরঙ্গ এবং কণিকা, দুই-ই। কোন কোন ঘটনায় তার তরঙ্গরূপ প্রকাশ পায়, আবার কোন কোন ঘটনায় যেখানে শক্তি হস্তান্তরের পরিমাণ '$h\nu$' বা তার সঙ্গে তুলনীয় হয়, সেখানে আলোর কণিকারূপ প্রকাশিত হয়। আরও গুরুত্বপূর্ণ তথ্য এই, যে এই দ্বিচারিতা শুধু আলোর নয়, সব বস্তুর মধ্যেই দেখা যায়। ইলেকট্রন, নিউট্রন প্রভৃতি মৌলকণাকেও অবস্থা বিশেষে তরঙ্গের মত আচরণ করতে দেখা গেছে। কোয়াণ্টাম বলবিদ্যায় যে কোন বস্তু তরঙ্গের মত আচরণ করে এবং তার তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় $\frac{h}{p}$, যেখানে P ঐ বস্তুর রৈখিক ভর বেগ। আপনি বুঝতেই পারছেন যে একমাত্র মৌলকণার ক্ষেত্রেই এই তরঙ্গ আমাদের উপলব্ধিতে আসা সম্ভব কেননা h রাশির মান অত্যন্তই ক্ষুদ্র।

আলোকের চরিত্র অনুসন্ধানের এই সুদীর্ঘ ইতিহাস পড়তে আপনার নিশ্চয়ই ভালো লেগেছে। এবার একটি ছোট অনুশীলনী।

অনুশীলনী 4

i) আলোর সমজাতীয় অন্য তিন ধরনের তরঙ্গের নাম লিখুন।

ii) h ধ্রুবকটি সর্বপ্রথম কোন্ প্রসঙ্গে ব্যবহৃত হয়?

iii) যে আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য শূন্যে λ, তার ফোটনের শক্তি কত?

iv) আলোকের প্রতিফলন, আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া, ব্যবর্তন ও হাইড্রোজেন বর্ণালি সংক্রান্ত বোরের তত্ত্ব —এর মধ্যে কোন্ কোন্‌টি কোয়ান্টাম তত্ত্বকে সমর্থন করে?

1.6 সারাংশ

আলোকবিদ্যার এই প্রথম এককটিতে বিজ্ঞানীরা আলোকের চরিত্র নিরূপণে যে সব তত্ত্বের অবতারণা করেছেন সেগুলি সংক্ষেপে বিবৃত হয়েছে।

আমরা প্রথমেই নিউটনের কণিকাতত্ত্বে কীভাবে আলোকের প্রতিফলন ও প্রতিসরণের ব্যাখ্যা করতে চাওয়া হয়েছিল, তার পরিচয় পেয়েছি। আপনি লক্ষ্য করেছেন যে এই কণিকাতত্ত্বে অনেক অসঙ্গতি ছিল এবং এটি আলোর ধর্মের সুষ্ঠু ব্যাখ্যা দিতে পারেনি। অপরদিকে নানা পরীক্ষা নিরীক্ষার মধ্য দিয়ে আলো একপ্রকার তরঙ্গ সেটি স্বীকৃত হয়েছে, কিন্তু সেটি কী প্রকারের তরঙ্গ এবং তার মাধ্যম কী, সেগুলি বহুদিন অজ্ঞাত ছিল। হাইগেন্‌স্ গৌণ-তরঙ্গের উৎপত্তির মাধ্যমে তরঙ্গমুখের অগ্রগতির যে তত্ত্ব দিয়েছিলেন সেটি আমরা আলোচনা করেছি এবং তার সাহায্যে প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি প্রতিষ্ঠিত করেছি। অন্যদিকে ফের্মার সর্বনিম্ন সময়ের নীতি ব্যবহার করেও যে আলোর এই ধর্মগুলি ব্যাখ্যা করা যায়, সেটিও আপনি দেখেছেন। কিন্তু এগুলির সাহায্যে আলোকের ধর্মের ব্যাখ্যা দেওয়া গেলেও, ম্যাক্সওয়েলের গাণিতিক বিশ্লেষণ ও তাঁর নির্ণীত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বেগের সঙ্গে পরীক্ষালব্ধ মানের সঙ্গতিই আলোকতরঙ্গের প্রকৃত চরিত্রটি আমাদের সামনে উদঘাটিত করতে পেরেছে। তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বর্ণালি ও এই তরঙ্গে তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্রের ভূমিকাও এই এককে বর্ণিত হয়েছে।

সবশেষে আমরা আলোকের কোয়ান্টাম তত্ত্ব এবং তরঙ্গ ও কণিকা—উভয় ধর্মের সমন্বয়ের কথা আলোচনা করেছি।

1.7 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

i) নিউটনের কণিকাতত্ত্বের বর্ণনা দিন। এই তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণ কীভাবে ব্যাখ্যা করা হয়েছিল? আপনি কি এই ব্যাখ্যাকে সুষ্ঠু বলে মনে করেন?

ii) ম্যাক্সওয়েল আলোকে কীভাবে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ হিসাবে চিনতে পেরেছিলেন? এই তরঙ্গে তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্র কীভাবে বিন্যস্ত থাকে?

iii) হাইগেন্‌স্-এর নীতি ব্যাখ্যা করুন। এই নীতি প্রয়োগ করে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি কীভাবে পাওয়া যায়? পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলনের শর্তটি হাইগেন্‌স-এর নীতি থেকে কীভাবে সমর্থিত হয়?

iv) ফের্মার নীতির বিবৃতিটি লিখুন। আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি এই নীতির সাহায্যে প্রতিষ্ঠিত করুন।

v) আলোকের কোয়ান্টাম তত্ত্ব কীভাবে উদ্ভাবিত হয়েছে তার সংক্ষিপ্ত বিবরণ দিন।

1.8 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

(i) নিউটন (ii) বিকর্ষণ করে (iii) অতি উচ্চ এবং অতি অল্প (iv) নতুন তরঙ্গমুখ (v) ইথারের অস্তিত্ব নেই (vi) আলোর সমান বেগে চলে।

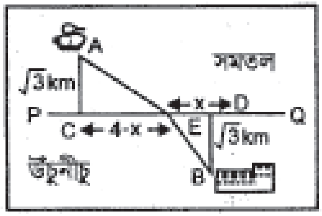
অনুশীলনী 2

$$\frac{2}{\sqrt{3}}\text{ cm},\ \frac{4}{3\sqrt{3}}\text{ cm},\ \frac{2}{3\sqrt{3}}\times 10^{-10}\text{ s},\ \sin^{-1}\frac{1}{3}=19{\cdot}5^{\circ}\ ,\ 1{\cdot}5,\ \sin^{-1}\frac{2}{3}=41{\cdot}8^{\circ}$$

অনুশীলনী 3

CD সরলরেখার মধ্যে E বিন্দু নিন। ধরুন

DE = x km। AE ও EB যোগ করুন।



চিত্র 1.14

দৈর্ঘ্য $\quad AE = \sqrt{AC^2 + CE^2}$

$$= \sqrt{3+(4-x)^2}$$

দৈর্ঘ্য $\quad DE = \sqrt{BD^2 + DE^2}$

$$= \sqrt{3+x^2}$$

AEB পথে A থেকে B তে যেতে ট্যাঙ্কের সময় লাগে

$$T = \frac{1}{30}\sqrt{3+(4-x)^2} + \frac{1}{10\sqrt{3}}\sqrt{3+x^2} = \frac{1}{30}\sqrt{x^2-8x+19} + \frac{1}{10\sqrt{3}}\sqrt{3+x^2}$$

T এর নিম্নতম মানের জন্য $\frac{dT}{dx} = O$ । অর্থাৎ

$$\frac{1}{30}\cdot\frac{2x-8}{2\sqrt{x^2-8x+19}} + \frac{1}{10\sqrt{3}}\cdot\frac{2x}{2\sqrt{3+x^2}} = O$$

বা, সরলীকরণের পর $(x-4)\sqrt{x^2+3} = -\sqrt{3}\, x\, \sqrt{x^2-8x+19}$

দুই দিক বর্গ করে , সরলীকরণের পর,

$x^4 - 8x^3 + 19x^2 + 12x - 24 = 0$

বা $(x-1)(x^3 - 7x^2 + 12x + 24) = 0.$

এই সমীকরণের একটি বীজ $x = 1$ এবং অন্য বীজগুলি $0 \le x \le 4$ সীমার বাইরে। সুতরাং যখন $x = 1$, তখনই ট্যাঙ্কের সর্বনিম্ন সময় লাগবে। ট্যাঙ্কটিকে E বিন্দু দিয়ে সীমানা পার হতে হবে, যেখানে DE = 1 km।

যখন $x = 1$, $T = \frac{1}{30}\sqrt{12} + \frac{1}{10\sqrt{3}}\sqrt{4} = \frac{2\sqrt{3}}{15}$ ঘণ্টা = 0.231 ঘ.।

A থেকে B তে সরলরেখায় গেলে ট্যাঙ্কটি দুধরনের জমিতে $\sqrt{2^2+3}$ বা $\sqrt{7}$ km দূরত্ব অতিক্রম করত। এতে সময় লাগত $\frac{\sqrt{7}}{30} + \frac{\sqrt{7}}{10\sqrt{3}}$ বা 0.241 ঘণ্টা। লক্ষ্য করুন, এটি আগের সময়টির চেয়ে বেশি।

অনুশীলনী 4

(i) রেডিও তরঙ্গ, অবলোহিত তরঙ্গ ও গ্যামা রশ্মি।

(ii) কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ বর্ণালির ব্যাখ্যায়।

(iii) ফোটনের শক্তি $h\nu = hc/\lambda$

(iv) আলোক তড়িৎ ক্রিয়া ও হাইড্রোজেন বর্ণালি সংক্রান্ত বোরের তত্ত্ব।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

i) 1.2.1 অনুচ্ছেদ দেখুন।

ii) 1.2.3 অনুচ্ছেদ দেখুন।

iii) 1.3, 1.3.1, 1.3.2 ও 1.3.3 অনুচ্ছেদগুলি দেখে নিন।

iv) 1.4, 1.4.1 ও 1.4.2 অনুচ্ছেদগুলি দেখে নিন।

v) 1.5 অনুচ্ছেদে এ সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে।

একক 2 □ জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যা

গঠন

2.1 প্রস্তাবনা

এই পর্যায়ের প্রথম এককে আপনি অলোকের তরঙ্গ ও কণিকা প্রকৃতির সঙ্গে পরিচিত হয়েছেন। আলোকের তরঙ্গপ্রকৃতি স্বীকার করে নিলেও বলা যায় যে আলো যখন কোন বাধার সম্মুখীন হয় বা কোনও ছিদ্রের মধ্য দিয়ে গমন করে তখন ঐ বাধা বা ছিদ্রের আকার আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় বড় হলে আলো মোটামুটিভাবে সরলরেখায়

চলে। আলোর এই সরলরৈখিক গতি থেকেই আলোকরশ্মির (ray) ধারণার উদ্ভব। আলোর তরঙ্গমুখের সঙ্গে লম্ব যে কোন সরলরেখাকেই আলোর একটি রশ্মি বলে ধরে নেওয়া যায়। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে আমরা সর্বদাই একটি রশ্মিগুচ্ছ (beam) দেখতে পাই যা অসংখ্য সন্নিহিত রশ্মির সমন্বয়। রশ্মিগুলি পরস্পর সমান্তরাল হতে পারে আবার সেগুলি যেন কোন একটি বিন্দু থেকে নির্গত হচ্ছে বা কোন একটি বিন্দুতে মিলিত হতে যাচ্ছে, এমনও হতে পারে। আপনি হয়ত জানেন যে এই তিন ক্ষেত্রে ঐ রশ্মিগুচ্ছকে আমরা যথাক্রমে সমান্তরাল (parallel), অপসারী (divergent) ও অভিসারী (convergent) রশ্মিগুচ্ছ বলে থাকি। দর্পণে প্রতিফলন এবং প্রিজ্‌ম্ বা লেন্সে প্রতিসরণ ঘটার ফলে আলোকের রশ্মিগুচ্ছ যে আচরণ করে সেটিই জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার আলোচ্য বিষয়।

আমাদের চক্ষু থেকে শুরু করে আতস কাচ, ফটোগ্রাফির ক্যামেরা, প্রজেক্টর, টেলিস্কোপ, মাইক্রোস্কোপ প্রভৃতি সমস্ত আলোকীয় যন্ত্রের কার্য জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার নীতির উপর ভিত্তি করে গঠিত। এজন্যই আলোকবিদ্যার তত্ত্বগত আলোচনাই বলুন আর তার ব্যবহারিক প্রয়োগের কথাই বলুন, যে কোন ক্ষেত্রেই জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার জ্ঞান একান্ত অপরিহার্য।

এই এককে অবশ্যই আমরা বিষয়টির সবদিক আলোচনা করার চেষ্টা করব না। দর্পণ ও লেন্স সমন্বিত একটি সমাক্ষ তন্ত্রের (coaxial system) উপর আপতিত রশ্মি কী আচরণ করে তার আলোচনাই আমাদের প্রধান উপজীব্য হবে। এখানে আমরা পূর্বপ্রচলিত পদ্ধতির পরিবর্তে আলোকরশ্মির ম্যাট্রিক্স (matrix) নির্দেশন ব্যবহার করব। আপনি দেখবেন যে এই পদ্ধতি গাণিতিক প্রক্রিয়াটিকে অনেক সরল করে তোলে।

আর একটি কথা। এখানে আমরা আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের সঙ্গে একতলীয় এবং অক্ষের নিকটবর্তী এবং তার সঙ্গে ক্ষুদ্র কোণে আনত, এমন রশ্মির কথাই বিবেচনা করব। এ ধরনের রশ্মিকে অক্ষ-সমীপবর্তী (paraxial) রশ্মি বলা হয়। রশ্মিগুলি আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের সঙ্গে যত বেশি কোণে আনত হয়, বক্র দর্পণ বা লেন্সের দ্বারা সৃষ্ট প্রতিবিম্ব ততই অস্পষ্ট ও বিকৃত হয়। এই ঘটনাকে আমরা অপেরণ (aberration) বলি। পরবর্তী এককে আপনি এ সম্বন্ধে বিস্তৃতভাবে জানতে পারবেন।

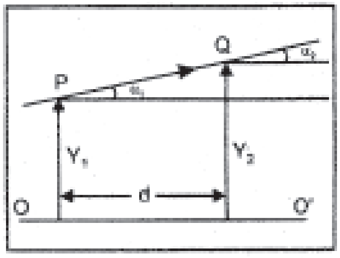
উদ্দেশ্য

এই এককের মূল উদ্দেশ্য সমতল ও বক্র দর্পণ; লেন্স ও একাধিক প্রতিফলক ও প্রতিসারক তল দিয়ে গঠিত সমাক্ষ আলোকীয় তন্ত্রের মূল ধর্মগুলির সঙ্গে আপনার পরিচয় ঘটানো। এককটি পড়ার পর আপনি

- আলোকীয় তন্ত্রে অক্ষের সমীপবর্তী কোন একটি রশ্মিকে 2×1 ম্যাট্রিক্সের সাহায্যে প্রকাশ করতে পারবেন।
- রশ্মির সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণের নির্দেশক ম্যাট্রিক্স গঠন করতে পারবেন।
- ম্যাট্রিক্স পদ্ধতিতে একটি মোটা লেন্স, দুটি সমাক্ষ সরু লেন্স বা যে কোনও সমাক্ষ আলোকীয় তন্ত্রের সমতুল্য লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য নির্ণয় করতে পারবেন।
- কোন আলোকীয় তন্ত্রের মূল বিন্দুগুলির (cardinal points) ধর্ম বিবৃত করতে পারবেন এবং যে কোন তন্ত্রের ক্ষেত্রে সেগুলির অবস্থান নির্ণয় করতে পারবেন।
- কোন আলোকীয় তন্ত্রের মূলবিন্দুগুলির অবস্থান জানা থাকলে যে কোনও বস্তুর প্রতিবিম্ব জ্যামিতিক পদ্ধতিতে বার করতে পারবেন।

2.2 জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যায় ম্যাট্রিক্স পদ্ধতি

ধরা যাক OO' একটি আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষ এবং PQ একটি অক্ষ-সমীপবর্তী রশ্মি (চিত্র 2.1)। P বিন্দুতে অক্ষ থেকে রশ্মিটির দূরত্ব y_1 এবং অক্ষের ধনাত্মক দিকের সঙ্গে সেটির নতিকোণ α_1। ভেবে দেখুন, y_1 এবং α_1 রাশিদুটি জানা থাকলে P বিন্দুতে রশ্মিটি সম্পূর্ণরূপে নির্দেশিত হয়ে যায়। এজন্যই রশ্মিটিকে তখন একটি 2×1 ম্যাট্রিক্স দিয়ে বোঝানো যায়, যার দুটি সারি ও একটি স্তম্ভ : $\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$। গাণিতিক সুবিধার জন্য আমরা α_1 রাশির পরিবর্তে $\lambda_1 (= n_1\alpha_1)$ রাশিটি ব্যবহার করি, যেখানে n_1 = P বিন্দুতে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক। এখন P বিন্দুতে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি দাঁড়াল ঃ $\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$



চিত্র 2.1

এবার আমরা সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণের ফলে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি কীভাবে পরিবর্তিত হয় সেটি লক্ষ্য করব।

2.2.1 রশ্মির সঞ্চলন

আলোকরশ্মিটি OO' অক্ষ বরাবর d দূরত্ব যাওয়ার পর, ধরুন সেটির নতিকোণ ও অক্ষ থেকে দূরত্ব হল যথাক্রমে α_2 এবং y_2। স্পষ্টই বোঝা যায় $\alpha_2 = \alpha_1$ এবং $y_2 = y_1 + d\tan\alpha_1 = y_1 + d\alpha_1$। এখানে আমরা $\tan\alpha_1 \simeq \alpha_1$ ধরেছি কেননা α_1 অত্যন্ত ক্ষুদ্র কোণ। যেহেতু Q বিন্দুতেও মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক n_1, $\lambda_2 = n_1\alpha_2 = n_1\alpha_1 = \lambda_1$ এবং $y_2 = \frac{d}{n_1}\lambda_1 + y_1$। এখন আমরা Q বিন্দুতে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি লিখতে পারি ঃ

$$\begin{pmatrix} \lambda_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \frac{d}{n_1}\lambda_1 + y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{d}{n_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad \text{... (2.1)}$$

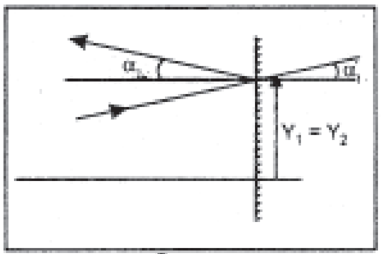
> এখানে আপনাকে ম্যাট্রিক্সের গুণের নিয়মটি স্মরণ করতে হবে। একটি 2×1 স্তম্ভ ম্যাট্রিক্সকে 2×2 বর্গ ম্যাট্রিক্স দিয়ে গুণের নিয়ম হল এইরকম ঃ
>
> $$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ap + bq \\ cp + dq \end{pmatrix}$$, যা একটি 2×1 স্তম্ভ ম্যাট্রিক্স।
>
> মনে রাখুন গুণের সময় প্রথম ম্যাট্রিক্সটির যতগুলি স্তম্ভ থাকবে, দ্বিতীয়টির ততগুলি সারি থাকতে হবে। তাই $\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ গুণটি করা যায় না।

2.1 সমীকরণে $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{d}{n_1} & 1 \end{pmatrix}$ ম্যাট্রিক্সটিকে আমরা সঞ্চলন ম্যাট্রিক্স, T_d নামে অভিহিত করব। রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্স দুটিকে R_1 ও R_2 বলে অভিহিত করলে 2.1 ম্যাট্রিক্স সমীকরণটিকে লেখা যায় ঃ $\quad R_2 = T_dR_1 \quad$ ...(2.2)

T_d বর্গম্যাট্রিক্সটি d দূরত্ব সঞ্চলনের প্রভাব বোঝাচ্ছে।

2.2.2 রশ্মির প্রতিফলন

প্রথমে আমরা সমতল দর্পণে প্রতিফলনের বিষয়টি বিবেচনা করব। প্রতিফলনের ফলে স্বাভাবিক ভাবেই রশ্মির দিক বিপরীত হয়ে যায়। তাই প্রতিফলনের পূর্বে দর্পণ অভিমুখে এবং প্রতিফলনের পরে দর্পণের বিপরীত দিকে রশ্মির দিককে আমরা ধনাত্মক ধরব। 2.2 চিত্র থেকে বোঝা যায় যে এক্ষেত্রে $y_2 = y_1$, $\alpha_2 = \alpha_1$, অর্থাৎ $\lambda_2 = \lambda_1$। সুতরাং ম্যাট্রিক্স হিসাবে লিখলে



চিত্র 2.2

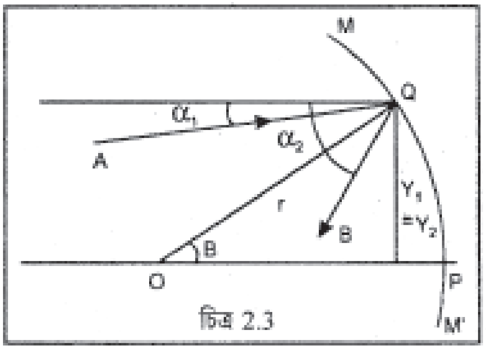
$$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix}$$

বা $$R_2 = U_\infty R_1\ ,\ U_\infty = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix} \qquad \text{... (2.3)}$$

এখানে U_∞ বর্গম্যাট্রিক্সটি সমতল দর্পণে প্রতিফলনের প্রভাব নির্দেশ করছে। এটিকে আমরা প্রতিফলন ম্যাট্রিক্স বলব। এখানে ∞ পাদলিপি ব্যবহারের কারণ নীচের অংশটি পড়লেই বুঝতে পারবেন।

এবার আমরা একটি অবতল দর্পণে প্রতিফলনের ফলে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি কী হয়, তা দেখব।

2.3 চিত্রে একটি অবতল দর্পণের প্রস্থচ্ছেদ MM′ দেখানো হয়েছে। দর্পণের অক্ষ P বিন্দুতে MM′ কে ছেদ করে। AQ রশ্মিটি দর্পণের Q বিন্দুতে আপতিত হয়েছে। BQ প্রতিফলিত রশ্মি, O বিন্দুটি দর্পণের বক্রতা কেন্দ্র এবং OQ আপতন বিন্দুতে দর্পণের তলের উপর লম্ব। প্রতিফলনের নিয়ম অনুযায়ী আপতন কোণ $i = \angle AQO = \angle BQO$। দর্পণের অক্ষের সঙ্গে আপতিত রশ্মির কোণ α_1। এখানে ধনাত্মক হলেও প্রতিফলিত রশ্মির কোণ α_2 ঋণাত্মক।



চিত্র 2.3

এক্ষেত্রে $y_2 = y_1$

এবং $\alpha_2 = -(\alpha_1 + 2i) = \alpha_1 - 2\theta$ (θ = কোণ $\angle POQ$; লক্ষ্য করুন, $i = \theta - \alpha_1$)

দর্পণের বক্রতা ব্যাসার্ধ যদি r হয় তবে

$$y_1 = r\sin\theta \approx r\theta \quad \text{(কেননা } \theta \text{ অতিক্ষুদ্র কোণ)}$$

$$\therefore \quad \alpha_2 = \alpha_1 - \frac{2}{r}y_1 \text{।}$$

মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক n দিয়ে গুণ করে, $\lambda_2 = \lambda_1 - \dfrac{2n}{r}y_1$

এখন আমরা প্রতিফলিত রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি লিখতে পারি ঃ

$$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\lambda_1 - \frac{2n}{r}y_1\\ y_1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & -\frac{2n}{r}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix}$$

বা $\quad R_2 = U_r R_1$, U_r = প্রতিফলন ম্যাট্রিক্স $\begin{pmatrix} 1 & -\frac{2n}{r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ....(2.4)

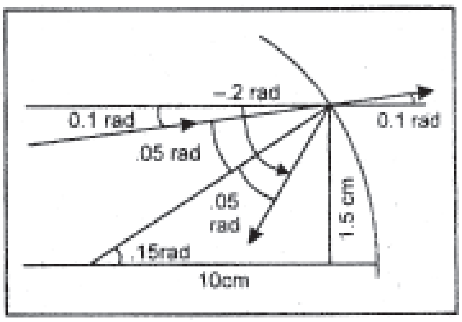
লক্ষ্য করুন, যখন দর্পণের ব্যাসার্ধ $r \to \infty$, তখন দর্পণটি সমতল দর্পণে পরিণত হয় এবং U_r ম্যাট্রিক্সটি 2.3 সমীকরণের U_∞ ম্যাট্রিক্সে পরিণত হয়। দর্পণটি যদি উত্তল হত তবে তার বক্রতা ব্যাসার্ধ ঋণাত্মক হত।

একটি উদাহরণ দিলে বিষয়টি আপনার কাছে স্পষ্ট হবে। ধরুন 10 cm বক্রতা ব্যাসার্ধের একটি অবতল দর্পণে একটি রশ্মি মেরুবিন্দু থেকে 15 cm দূরে অক্ষের সঙ্গে 0.1 রেডিয়ান কোণে বায়ুমাধ্যমে আপতিত হল। এক্ষেত্রে $y_1 = .015$ m , $r = 0.10$m , $n_1 = 1$, $\lambda_1 = 0.1$

ম্যাট্রিক্স $R_1 = \begin{pmatrix} 0\cdot 1 \\ \cdot 015 \end{pmatrix}$, ম্যাট্রিক্স $U_r = \begin{pmatrix} 1 & -20 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

$$\therefore \text{ ম্যাট্রিক্স } R_2 = \begin{pmatrix} 1 & -20 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0\cdot 1 \\ \cdot 015 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \times 0\cdot 1 - 20 \times \cdot 015 \\ 1 \times \cdot 015 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0\cdot 2 \\ \cdot 015 \end{pmatrix}$$

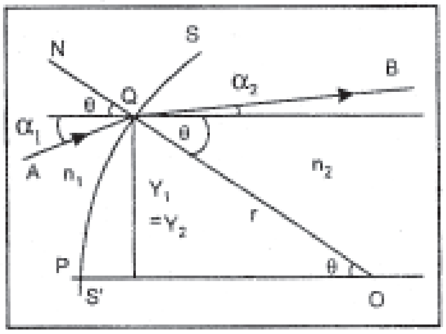
এর অর্থ প্রতিফলিত রশ্মিটি প্রতিফলনের ঠিক পরে অক্ষের সঙ্গে – 0.2 রেডিয়ান কোণে আনত থাকবে।



চিত্র 2.4

2.2.3 রশ্মির প্রতিসরণ

এবার আমরা একটি বক্রতলে রশ্মির প্রতিসরণ বিবেচনা করব। ধরুন একটি রশ্মি AQ n_1 প্রতিসরাঙ্কের প্রথম মাধ্যম থেকে SS′ বক্রতলে আপতিত হল এবং প্রতিসরণের পর n_2 প্রতিসরাঙ্কের দ্বিতীয় মাধ্যমে QB পথে গমন করল (চিত্র 2.5)। OQ যোগ করে সেটি N পর্যন্ত বর্ধিত করা হল। ON প্রতিসরণ বিন্দুতে প্রতিসারক তলের উপর লম্ব। বক্রতলের বক্রতা-কেন্দ্র O আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের উপর অবস্থিত এবং এই অক্ষটি SS′ তলকে P বিন্দুতে ছেদ করে। আলোকীয় অক্ষের সঙ্গে আপতিত রশ্মি α_1 কোণে এবং প্রতিসারিত রশ্মি α_2 কোণে আনত। ধরুন $\angle POQ = \theta$।



চিত্র 2.5

এখন আপতন কোণ $i = \alpha_1 + \theta$ এবং প্রতিসরণ কোণ $r = \alpha_2 + \theta$। প্রতিসরণের সূত্র অনুযায়ী

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin(\alpha_1 + \theta)}{\sin(\alpha_2 + \theta)} = \frac{n_2}{n_1}$$

যেহেতু $(\alpha_1 + \theta)$ এবং $(\alpha_2 + \theta)$ অত্যন্ত ক্ষুদ্র কোণ, আমরা লিখতে পারি, $\sin(\alpha_1 + \theta) \approx \alpha_1 + \theta$ এবং $\sin(\alpha_2 + \theta) \approx \alpha_2 + \theta$

সুতরাং $\quad n_1(\alpha_1 + \theta) = n_2(\alpha_2 + \theta)$

বা $\quad \lambda_2 = \lambda_1 + (n_1 - n_2)\,\theta \qquad (\because\ \lambda_1 = n_1\alpha_1,\ \lambda_2 = n_2\alpha_2)$

প্রতিসরণ বিন্দুতে প্রতিসরণের ঠিক আগে ও পরে অক্ষ থেকে রশ্মির দূরত্ব যথাক্রমে y_1 ও y_2 ধরা যাক। এই দূরত্ব দুটি স্পষ্টতই সমান

এখন $y_1 = y_2 = r\sin\theta \approx r\,\theta$ (কেননা θ কোণ অতি ক্ষুদ্র) এবার আপনি লিখতে পারেন

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \frac{n_1 - n_2}{r}\,y_1 = \lambda_1 - Py_1, \text{ যেখানে } P = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

অর্থাৎ $$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\lambda_1 - Py_1\\ y_1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & -P\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix}$$

বা $$R_2 = V_r R_1\ ,\ V_r = \text{প্রতিসরণ ম্যাট্রিক্স} \begin{pmatrix}1 & -P\\ 0 & 1\end{pmatrix} \qquad \dots (2.5)$$

যেখানে R_1 ও R_2 ম্যাট্রিক্স দুটি প্রতিসরণের আগে ও পরে যথাক্রমে আপতিত ও প্রতিসৃত রশ্মি নির্দেশ করছে এবং V_r বর্গ ম্যাট্রিক্সটি **r** বক্রতা ব্যাসার্ধের উত্তল বক্রতলে প্রতিসরণের প্রভাব সূচিত করছে।

লক্ষ্য করে দেখুন, প্রতিসারক তলটি উত্তল হলে এবং $n_2 > n_1$ হলে P রাশিটি ধনাত্মক। কিন্তু প্রতিসারক তলটি অবতল অথবা দ্বিতীয় মাধ্যমের তুলনায় প্রথম মাধ্যমটি ঘনতর হলে P রাশির মান ঋণাত্মক হবে।

T_d, U_r ও V_r ম্যাট্রিক্সগুলির একটি সাধারণ ধর্ম আপনি লক্ষ্য করে থাকবেন। সেটি হল

$$|T_d| = \begin{vmatrix}1 & 0\\ \frac{d}{n_1} & 1\end{vmatrix} = 1\ ,\ |U_r| = \begin{vmatrix}1 & -\frac{2n}{r}\\ 0 & 1\end{vmatrix} = 1$$

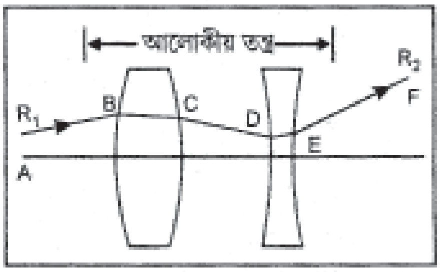
এবং $$|V_r| = \begin{vmatrix}1 & -P\\ 0 & 1\end{vmatrix} = 1 \qquad \dots (2.6)$$

অর্থাৎ প্রত্যেক ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্ট-এর মান 1। গণিতের নিয়ম অনুযায়ী দুটি ম্যাট্রিক্সের প্রতিটির ডিটারমিন্যান্টের মান 1 হলে তাদের গুণফলের ডিটারমিন্যান্টের মানও 1 হবে। সুতরাং T, U ও V ম্যাট্রিক্সগুলির যে কোনও গুণফল ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্টের মান 1 হবে। এই ধর্মটি পরে আমাদের কাজে লাগবে।

2.2.4 সাধারণ আলোকীয় তন্ত্র (General Optical System)

যে কোনও সমাক্ষ আলোকীয় তন্ত্রে একটি রশ্মির গতিপথকে আপনি কিছুসংখ্যক সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সমন্বয় হিসেবে দেখতে পারেন। 2.6 চিত্রে এমন একটি আলোকীয় তন্ত্র দেখতে পাবেন। এখানে AB

রশ্মিটি পরপর B, C, D ও E বিন্দুতে প্রতিসৃত হচ্ছে এবং AB, BC, CD, DE ও EF অংশগুলিতে রশ্মিটির সঞ্চলন ঘটছে। ধরা যাক চারটি প্রতিসরণের বিন্দুতে প্রতিসরণের নির্দেশক ম্যাট্রিক্সগুলি যথাক্রমে V_B, V_C, V_D এবং V_E। AB থেকে EF অংশগুলিতে সঞ্চলনের ম্যাট্রিক্সগুলি, ধরা যাক, যথাক্রমে T_{AB}, T_{BC}, T_{CD}, T_{DE} এবং T_{EF}। এবার ধরুন A বিন্দুতে রশ্মিটির নির্দেশক ম্যাট্রিক্স ছিল R_1। B বিন্দুতে আপতনের সময় রশ্মির ম্যাট্রিক্সটি হবে $T_{AB}\,R_1$। B বিন্দুতে প্রতিসরণের ঠিক পরেই রশ্মির ম্যাট্রিক্স হবে $V_B\,T_{AB}\,R_1$। এইভাবে রশ্মিটিকে অনুসরণ করলে দেখতে পাবেন যে F বিন্দুতে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্স হবে



চিত্র 2.6

$$R_2 = T_{EF}\,V_E\,T_{DE}\,V_D\,T_{CD}\,V_C\,T_{BC}\,V_B\,T_{AB}\,R_1 \qquad \text{... (2.7)}$$

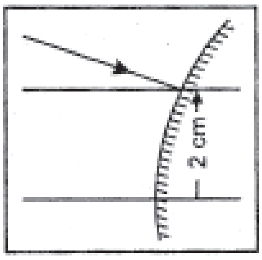
তন্ত্রটির মধ্যে কোন প্রতিফলক থাকলে প্রতিফলনটি নির্দেশ করার জন্য R_2 এর রাশিমালায় উপযুক্ত U ম্যাট্রিক্সেরও প্রয়োজন হত। 2.7 ম্যাট্রিক্স সমীকরণের ডানদিকে রশ্মিটির প্রারম্ভিক অবস্থার ম্যাট্রিক্স R_1 সহ অন্য ম্যাট্রিক্সগুলি জানা থাকলে কেবলমাত্র ম্যাট্রিক্স গুণনের সাহায্যেই রশ্মির চরম অবস্থার ম্যাট্রিক্স R_2-কে নির্ণয় করা যায়। এটি একটি সরল যান্ত্রিক প্রক্রিয়া এবং কম্পিউটারের সাহায্যে এই প্রক্রিয়াটি সহজেই সম্পন্ন করা যায়। এজন্যই জটিল আলোকীয় তন্ত্রের মধ্য দিয়ে আলোকরশ্মির গতিপথ অনুসন্ধান করতে ম্যাট্রিক্স পদ্ধতিকে উপযুক্ত মনে করা হয়।

2.6 চিত্রটি আর একবার দেখলে আপনি বুঝতে পারবেন যে আলোকীয় তন্ত্রটি প্রথম প্রতিসারক তল, অর্থাৎ B বিন্দু থেকে শেষ প্রতিসারক তল, অর্থাৎ E পর্যন্ত বিস্তৃত। এজন্য আলোকীয় তন্ত্রের মধ্যে যে প্রতিসরণ, সঞ্চলন প্রভৃতি ঘটে, সেগুলির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সগুলির গুণফলকে তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স (system matrix, S) নামে অভিহিত করা হয়। 2.7 সমীকরণকে আপনি লিখতে পারেন ঃ

$$R_2 = T_{EF}\,(V_E\,T_{DE}\,V_D\,T_{CD}\,V_C\,T_{BC}\,V_B)\,T_{AB}\,R_1$$

বা $$R_2 = T_{EF}\,S\,T_{AB}\,R_1 \qquad \text{... (2.8)}$$

এখানে বন্ধনীর মধ্যে অবস্থিত ম্যাট্রিক্সগুলির গুণফলই তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স S। আগের আলোচনা অনুযায়ী S ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্ট $|S| = 1$। পরের অনুচ্ছেদে আমরা সাধারণ আলোকীয় তন্ত্রের ধর্মগুলি আলোচনা করব। কিন্তু তার আগে আপনি একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

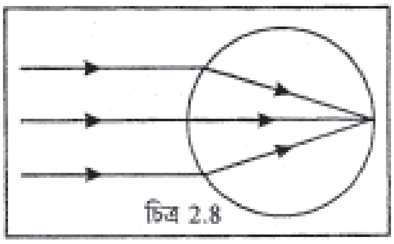


চিত্র 2.7

অনুশীলনী 1

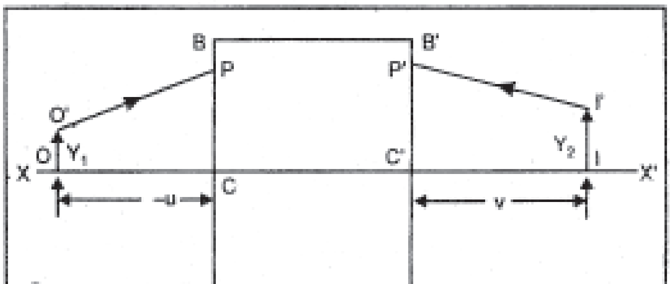
i) 50 cm ব্যাসার্ধের একটি উত্তল দর্পণের উপর একটি আলোকরশ্মি অক্ষ থেকে 2cm দূরে অক্ষের সঙ্গে – .08 rad নতিকোণে আপতিত হল। প্রতিফলনের পর রশ্মিটির নতিকোণ কত হবে?

ii) বায়ুতে রাখা একটি গোলকের উপর সেটির কেন্দ্র অভিমুখী একটি স্বল্প পরিসরের সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ আপতিত হল। গোলকের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক কত হলে রশ্মিগুচ্ছটি গোলকের বিপরীত তলে একটি বিন্দুতে মিলিত হবে?


চিত্র 2.8

2.3 সাধারণ আলোকীয় তন্ত্রের ধর্ম

আগের অনুচ্ছেদে আপনি একটি সাধারণ আলোকীয় তন্ত্রের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স বলতে কী বোঝায় তা জেনেছেন। এবার আমরা ম্যাট্রিক্স পদ্ধতি ব্যবহার করে আলোকীয় তন্ত্রের কয়েকটি ধর্মের পর্যালোচনা করব।



চিত্র 2.9

ধরা যাক কোন একটি আলোকীয় তন্ত্রের প্রথম ও শেষ প্রতিসারক তল যথাক্রমে AB ও A′B′ এবং XX′ সেটির অক্ষ (চিত্র 2.9)। অক্ষের সঙ্গে লম্ব বস্তুতলে O′ একটি বস্তুবিন্দু এবং O বিন্দুতে অক্ষটি বস্তুতলকে ছেদ করে। O′ এর প্রতিবিম্ব I′ বিন্দুতে গঠিত হয়েছে এবং অক্ষ XX′ প্রতিবিম্ব তলকে I বিন্দুতে ছেদ করে। বস্তুর নির্দিষ্ট অবস্থানের জন্য আমাদের প্রতিবিম্বের অবস্থান নির্ণয় করতে হবে।

বস্তু ও প্রতিবিম্বের দূরত্ব পরিমাপের জন্য আমাদের একটি রীতি স্থির করতে হবে। আমরা AB থেকে ডানদিকে বস্তু দূরত্ব এবং A′B′ থেকে ডানদিকে প্রতিবিম্ব দূরত্ব মাপব। AB এবং A′B′ তলের যথাক্রমে C ও C′ বিন্দু অক্ষের উপর অবস্থিত। বস্তু দূরত্ব u হলে দূরত্ব OC = – u এবং প্রতিবিম্ব দূরত্ব v হলে দূরত্ব C′I = v। লক্ষ্য করুন, এক্ষেত্রে u নেগেটিভ এবং – u পজিটিভ রাশি, কিন্তু v নিজেই পজিটিভ রাশি। বস্তু ও প্রতিবিম্ব বায়ু মাধ্যমে (n = 1) আছে বলে ধরে নিন।

এবার ধরা যাক O′ বিন্দুতে O′P রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্স $\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ এবং AB ও A′B′ এর মধ্যবর্তী আলোকীয় তন্ত্রের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স $S = \begin{pmatrix} b & -a \\ -d & c \end{pmatrix}$। রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্সটি হবে ঃ

P বিন্দুতে ঃ $$\begin{pmatrix} \lambda' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -u & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \qquad \text{... (2.9a)}$$

P′ বিন্দুতে ঃ $$\begin{pmatrix} \lambda'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b & -a \\ -d & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda' \\ y' \end{pmatrix} \qquad \text{... (2.9b)}$$

I′ বিন্দুতে ঃ $$\begin{pmatrix} \lambda_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ v & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda'' \\ y'' \end{pmatrix} \qquad \text{... (2.9c)}$$

2.9a, b ও c সমীকরণগুলি একত্রিত করে পাওয়া যায়

$$\begin{pmatrix} \lambda_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ v & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b & -a \\ -d & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -u & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

ডানদিকের রাশিমালার তিনটি বর্গম্যাট্রিক্সের গুণফল বার করে,

$$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & 0\\ v & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}b+au & -a\\ -d-cu & c\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}b+au & -a\\ bv+auv-cu-d & c-av\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix} \quad \text{... (2.10)}$$

2.10 সমীকরণটি বস্তুতলে যে কোন বিন্দু এবং তার প্রতিবিম্ব বিন্দুর ক্ষেত্রে সত্য হবে। আমরা যদি অক্ষের উপর O বিন্দুটিকে বস্তু হিসাবে ধরি তবে অবশ্যই অক্ষের উপর প্রতিবিম্ব তলে I বিন্দুটিই হবে তার প্রতিবিম্ব। এক্ষেত্রে y_1 এবং y_2 উভয়ের মানই শূন্য। কিন্তু 2.10 থেকে,

$$y_2 = (auv + bv - cu - d)\,\lambda_1 + (c - av)\,y_1$$

$y_1 = y_2 = 0$ বসালে, $$auv + bv - cu - d = 0 \quad \text{... (2.11)}$$

2.11 সমীকরণ থেকে আপনি u ও v এর সম্পর্ক পেতে পারেন ঃ

$$v = \frac{cu + d}{au + b} \quad \text{... (2.12a)}$$

বা $$u = \frac{d - bv}{av - c} \quad \text{... (2.12b)}$$

2.11 সম্পর্কটি ব্যবহার করে , 2.10 সমীকরণটি লেখা যায়

$$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}b+au & -a\\ 0 & c-av\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix} \quad \text{... (2.13)}$$

এই সমীকরণ থেকে যখন, y_1 ও y_2 এর মান শূন্য নয়, তখন

$$y_2 = (c - av)\,y_1 \quad \text{... (2.14)}$$

অর্থাৎ প্রতিবিম্বের বিবর্ধন $$M = \frac{y_2}{y_1} = c - av \quad \text{... (2.15)}$$

এখানে বিবর্ধনের রাশিমালাটি প্রতিবিম্ব দূরত্বের হিসাবে পেয়েছেন। ইচ্ছা করলে আপনি এটি বস্তু দূরত্বের হিসাবেও পেতে পারেন। 2.13 সমীকরণের বর্গ-ম্যাট্রিক্সটির ডিটারমিন্যান্ট-এর মান যেহেতু 1,

$$(b + au)(c - av) = 1, \text{ বা } c - av = \frac{1}{b + au}$$

$$\therefore \quad M = \frac{1}{b + au} \quad \text{... (2.16)}$$

এখন আপনি 2.13 সমীকরণটি খুবই সরল রূপে লিখতে পারেন

$$\begin{pmatrix} \lambda_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/M & -a \\ 0 & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad \text{... (2.17)}$$

এই অনুচ্ছেদে এ পর্যন্ত যা পড়েছেন তার সাহায্যে আপনি a, b, c ও d এই চারটি ধ্রুবকের মাধ্যমে আলোকীয় তন্ত্রটির আচরণের সম্পূর্ণ বর্ণনা দিতে পারবেন। এখানে আমরা তন্ত্রটির বিশেষ কয়েকটি বিন্দুর অবস্থান নির্ণয় করব।

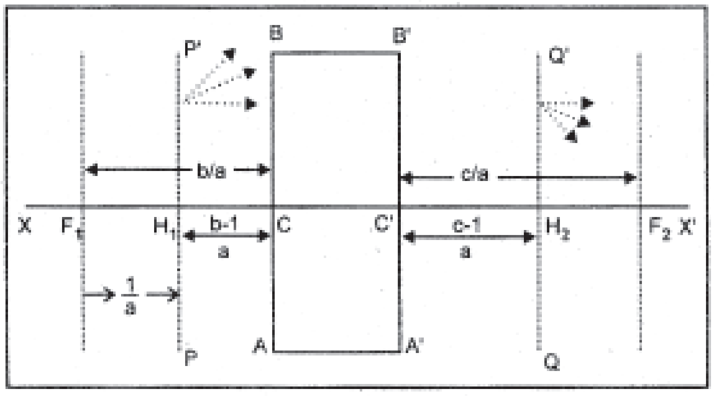
2.3.1 মূল ফোকাস বিন্দু (Principal Foci)

কোন একটি আলোকীয় তন্ত্রের দুটি মূল ফোকাস বিন্দু F_1 ও F_2 থাকে। AB ও A′B′ তল দুটির সাপেক্ষে এই দুটির দূরত্ব যথাক্রমে f_1 ও f_2 হলে বিন্দুটির সংজ্ঞা দেওয়া যায় ঃ

$$f_1 = \underset{v \to \infty}{Lt} \; u = \underset{v \to \infty}{Lt} \; \frac{d - bv}{av - c} = -\frac{b}{a} \quad \text{... (2.18a)}$$

এবং $$f_2 = \underset{u \to \infty}{Lt} \; v = \underset{u \to \infty}{Lt} \; \frac{cu + d}{au + b} = \frac{c}{a} \quad \text{... (2.18b)}$$

এখানে আমরা 2.12 a ও b এর রাশিমালাগুলি ব্যবহার করেছি। F_1 ও F_2 বিন্দু দুটির অবস্থান 2.10 চিত্রে দেখতে পারেন।



চিত্র 2.10

2.3.2 একক সমতল (Unit planes) ও প্রধান বিন্দু (Principal points)

একটি আলোকীয় তন্ত্রে অক্ষের সঙ্গে লম্ব দুটি একক সমতল থাকে। একক সমতলের বৈশিষ্ট্য এই, যে একটি সমতলে অক্ষ থেকে নির্দিষ্ট উচ্চতায় (y_1) অবস্থিত বিন্দু থেকে আগত কোন রশ্মি তন্ত্রের মধ্য দিয়ে যাওয়ার পর অন্য সমতলে অক্ষ থেকে একই উচ্চতায় (y_2) অবস্থিত বিন্দুর মধ্য দিয়ে নির্গত হবে। এর ফলে একটি একক সমতলে অবস্থিত বস্তুর প্রতিবিম্ব অপর একক সমতলে একক বিবর্ধনে $(M = 1)$ গঠিত হয়। একক সমতলগুলি 2.10 চিত্রে PP′ ও QQ′ হিসাবে দেখানো হয়েছে। এই সমতলগুলি XX′ অক্ষকে যে দুটি বিন্দুতে ছেদ করে (H_1 ও H_2) সেগুলিকে তন্ত্রটির প্রধান বিন্দু বলা হয়।

প্রধান বিন্দু দুটির অবস্থান আপনি সহজেই নির্ণয় করতে পারবেন। আমরা আগেই দেখেছি বিবর্ধন $M = C - av = \dfrac{1}{b + au}$ (2.15 ও 2.16 থেকে।)

প্রথম প্রধান বিন্দুর জন্য $\frac{1}{b + au} = 1$ অর্থাৎ $u = \frac{1-b}{a}$ $\therefore$ দূরত্ব $CH_1 = \frac{b-1}{a}$ ... (2.19a)

দ্বিতীয় প্রধান বিন্দুর জন্য $c - av = 1$ অর্থাৎ $v = \frac{c-1}{a}$ $\therefore$ দূরত্ব $C'H_2 = \frac{c-1}{a}$ ... (2.19b)

প্রধান বিন্দু থেকে ফোকাস দৈর্ঘ্যের পরিমাপ

আমরা আগে তন্ত্রের দুই প্রান্তের প্রতিসারক তলগুলি থেকে মূল ফোকাস বিন্দু দুটির দূরত্ব মেপেছি। এখন আপনি প্রধান বিন্দুগুলি থেকে সেই দিকের ফোকাস বিন্দুগুলির দূরত্ব নির্ণয় করতে পারেন।

$$H_2F_1 = \text{দূরত্ব } CF_1 - \text{দূরত্ব } CH_1 = -\frac{b}{a} - \frac{1-b}{a} = -\frac{1}{a} \quad \text{... (2.20a)}$$

এবং $$H_2F_2 = \text{দূরত্ব } C'F_2 - \text{দূরত্ব } C'H_2 = \frac{c}{a} - \frac{c-1}{a} = \frac{1}{a} \quad \text{... (2.20b)}$$

অর্থাৎ প্রধান বিন্দু থেকে মাপা হলে তন্ত্রটির দুই মূল ফোকাস সমান দূরত্বে অবস্থিত হয়।

দেখা যাক C ও C′ বিন্দুর পরিবর্তে প্রধান বিন্দু দুটি থেকে বস্তু ও প্রতিবিম্বের দূরত্ব মাপলে 2.11 সূত্রটির রূপ কী দাঁড়ায়।

ধরে নিন প্রধান বিন্দু থেকে মাপা বস্তু দূরত্ব $u' = u - \frac{1-b}{a}$ এবং প্রতিবিম্ব দূরত্ব $v' = v - \frac{c-1}{a}$। 2.11 সূত্রে u এর পরিবর্তে $u' + \frac{1-b}{a}$, v এর পরিবর্তে $v' + \frac{c-1}{a}$ লিখে পাবেন,

$$a\left(u' + \frac{1-b}{a}\right)\left(v' + \frac{c-1}{a}\right) + b\left(v' + \frac{c-1}{a}\right) - c\left(u' + \frac{1-b}{a}\right) - d = 0$$

রাশিমালাটি সরল করে

$$au'v' - u' + v' - \frac{1 + ad - bc}{a} = 0$$

আলোকীয় তন্ত্রটির তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্ট $|S| = bc - ad$

এবং 2.2.3 অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে এর মান 1। সুতরাং $ad - bc + 1 = 0$

এবং $$au'v' - u' + v' = 0$$

এটিকে সাজিয়ে লিখলে পাবেন $$\frac{1}{v'} - \frac{1}{u'} = a \quad \text{... (2.21)}$$

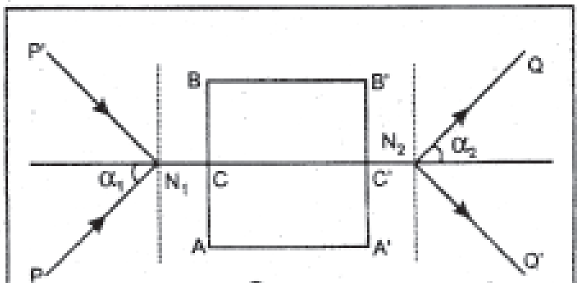
2.21 সূত্রটি নিশ্চয়ই আপনার কাছে লেন্সের বস্তু-দূরত্ব ও প্রতিবিম্ব-দূরত্বের পরিচিত সূত্র বলে মনে হচ্ছে। এখানে ফোকাস-দূরত্বের স্থান নিয়েছে $\frac{1}{a}$, যা আপনি 2.20 a ও b সূত্রে আগেই দেখেছেন। এটি লক্ষ্য করার বিষয় যে

একটি অজ্ঞাত আলোকীয় তন্ত্রের কেবলমাত্র তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি ধরে নিয়ে আমরা সেটিকে একটি পাতলা লেন্সের সমতুল বলে প্রতিষ্ঠিত করতে পেরেছি।

এবার আমরা তন্ত্রটির আরও একজোড়া গুরুত্বপূর্ণ বিন্দু সম্বন্ধে আলোচনা করব।

2.3.3 নোড্ বিন্দু (Nodal points)

আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের উপর এমন দুটি বিন্দু থাকে যার একটির মধ্য দিয়ে কোন একটি রশ্মি তন্ত্রের উপর আপতিত হলে সেটি অন্য বিন্দুটির মধ্য দিয়ে আপতিত রশ্মির সঙ্গে সমান্তরালভাবে নির্গত হয়। এক্ষেত্রে আপনি বলতে পারেন যে রশ্মিটির কৌণিক বিবর্ধনের মান 1। এই বিন্দু দুটিকে তন্ত্রটির নোড বিন্দু বলা হয় এবং এগুলির মধ্য দিয়ে তন্ত্রটির অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে যে দুটি সমতল কল্পনা করা যায় সেগুলিকে নোডাল সমতল (Nodal Plane) বলে। 2.11 চিত্র থেকে আপনি নোড বিন্দুর ধর্ম বুঝতে পারবেন। N_1 এবং N_2 বিন্দু দুটি এই চিত্রে নোড বিন্দু দুটিকে নির্দেশ করছে। এখানে PN_1 আপতিত রশ্মি N_2Q পথে এবং $P'N_1$ আপতিত রশ্মি N_2Q' পথে নির্গত হচ্ছে। লক্ষ্য করুন, প্রতিক্ষেত্রেই নির্গত রশ্মিটি আপতিত রশ্মির সমান্তরাল। নোড বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করতে আপনাকে 2.10 সমীকরণে ফিরে যেতে হবে। ঐ সমীকরণ থেকে



চিত্র 2.11

$$\lambda_2 = (b + au)\,\lambda_1 - ay_1$$

নোড বিন্দুর ক্ষেত্রে $y_1 = 0$। এছাড়া আমরা যদি নোড বিন্দু দুটি একই প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যমে আছে বলে ধরে নিই তবে $\lambda_2 = \lambda_1$, কেননা আপতিত ও নির্গত রশ্মি দুটির নতিকোণ α_1 ও α_2 সমান।

সুতরাং $\lambda_1 = (b + au)\,\lambda_1$

বা $$u = \frac{1-b}{a} \qquad \text{... (2.22a)}$$

2.12a সূত্রে u এর এই মান ব্যবহার করে,

$$v = \frac{c}{a}(1-b) + d \qquad (\text{কেননা } au + b = 1)$$

$$= \frac{c - bc + ad}{a}$$

বা $$v = \frac{c-1}{a} \qquad (\text{কেননা } bc - ad = 1) \qquad \text{... (2.22b)}$$

2.19 a ও b সমীকরণের সঙ্গে 2.22a ও b সমীকরণের তুলনা করলে দেখবেন যে নোড বিন্দুগুলি প্রধান বিন্দুগুলির সঙ্গে সমস্থানিক। এর কারণ, আমরা N_1 ও N_2 বিন্দু দুটি একই প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যমে রয়েছে বলে ধরেছি। মাধ্যম দুটির প্রতিসরাঙ্ক ভিন্ন হলে H_1N_1 ও H_2N_2 এর মান কত হয় তা আপনি নিজেই নির্ণয় করতে পারবেন।

যে কোন আলোকীয় তন্ত্রের মূল ফোকাস বিন্দু, প্রধান বিন্দু এবং নোড বিন্দুগুলির অবস্থান জানা থাকলে যে কোন আপতিত রশ্মির নির্গমন পথ নির্ণয় করা যায়। এই তিন বিন্দুযুগ্ম এজন্যই খুবই গুরুত্বপূর্ণ এবং এই কারণে এগুলিকে কার্ডিনাল (cardinal) বিন্দু বা মূলবিন্দু বলা হয়।

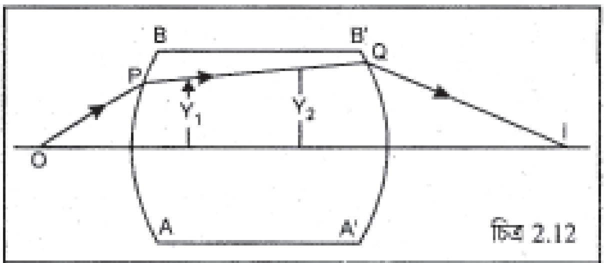
এবার আপনি একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী 2

2.9 চিত্রে $u = -10$ cm, $v = 15$ cm এবং তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের $a = 0.10\ cm^{-1}$, $b = 3$, $c = 2$, $d = 50$ cm ধরে নিন। O′ বিন্দুতে $\lambda_1 = 0.1$rad এবং $y_1 = 1$ cm হলে I′ বিন্দুতে λ_2 ও y_2 এর মান বার করুন।

2.4 স্থূল লেন্স

জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যায় ম্যাট্রিক্স পদ্ধতির সম্বন্ধে আপনি যা শিখেছেন এবার নিশ্চয়ই তার প্রয়োগ করতে চাইবেন। এই এককে আমরা দুটি অপেক্ষাকৃত সরল আলোকীয় তন্ত্রের ক্ষেত্রে পদ্ধতিটি প্রয়োগ করব। এর প্রথমটি হল স্থূল লেন্স। লেন্সের বেধ যখন তার দুটি তলের বক্রতা-ব্যাসার্ধের তুলনায় উপেক্ষণীয় হয় না, তখনই আমরা লেন্সটিকে স্থূল বলি।



চিত্র 2.12

2.12 চিত্রে একটি স্থূল লেন্সের মধ্য দিয়ে OPQI রশ্মির গতিপথ দেখানো হয়েছে। প্রথম প্রতিসারক তলের বক্রতা-ব্যাসার্ধ r_1। রশ্মিটি এই তলে P বিন্দুতে আপতিত হয়েছে। আপতনের ঠিক পূর্বে রশ্মিটির নতিকোণ α_1 ও অক্ষ থেকে দূরত্ব y_1। লেন্সের বেধ t অতিক্রম করার পর রশ্মিটি Q বিন্দুতে r_2 বক্রতা ব্যাসার্ধের দ্বিতীয় প্রতিসারক তলে প্রতিসরণের ঠিক পরে রশ্মিটির নতিকোণ α_2 এবং অক্ষ থেকে দূরত্ব y_2। আমরা ধরে নেব লেন্সটির উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক n এবং সেটি বায়ু মাধ্যমে রয়েছে। P ও Q বিন্দুতে লেন্সটির ঠিক বাইরে রশ্মির নির্দেশক ম্যাট্রিক্স যথাক্রমে $\begin{pmatrix}\lambda_1\\ y_1\end{pmatrix}$ ও $\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix}$ হলে

$$\begin{pmatrix}\lambda_2\\ y_2\end{pmatrix} = V_{r2}\ T_t\ V_{r1}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ r_1\end{pmatrix}$$ যেখানে V_{r_1}, T_t ও V_{r_2} যথাক্রমে AB তলে প্রতিসরণ, PQ পথে সঞ্চরণ ও A′B′ তলে প্রতিসরণের ম্যাট্রিক্স

$$= \begin{pmatrix}1 & -P_2\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ \frac{t}{n} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & -P_1\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ r_1\end{pmatrix}$$

$$= S\begin{pmatrix}\lambda_1\\ r_1\end{pmatrix}$$, যেখানে S তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি তিনটি বর্গম্যাট্রিক্সের গুণফল। লক্ষ্য করুন, এখানে $P_1 = \frac{n-1}{r_1}$, $P_2 = \frac{1-n}{r_2}$ । r_1 এর মান 2.12 চিত্রে পজিটিভ হলেও r_2 এর মান নেগেটিভ। ম্যাট্রিক্সগুলি গুণ করে পাওয়া যায়

$$S \text{ বা } \begin{pmatrix} b & -a \\ -d & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -P_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t}{n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -P_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & -P_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -P_1 \\ \frac{t}{n} & -P_1 \frac{t}{n} + 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - P_2 \frac{t}{n} & -P_1 - P_2 + P_1 P_2 \frac{t}{n} \\ \frac{t}{n} & -P_1 \frac{t}{n} + 1 \end{pmatrix}$$

সুতরাং তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের রাশিগুলি হল

$$a = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \frac{t}{n} = \frac{1}{F} \text{ ধরুন}$$

$$b = 1 - P_2 \frac{t}{n},$$

$$c = 1 - P_1 \frac{t}{n},$$

$$d = -\frac{t}{n} \qquad \dots (2.23)$$

এখন 2.18 a, b, 2.19 a, b এবং 2.22a, b সূত্রগুলির সাহায্যে সরাসরি ফোকাস বিন্দু, প্রধান বিন্দু এবং নোড বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করা যেতে পারে। 2.13 চিত্রে বিন্দুগুলির অবস্থান দেখানো হয়েছে।

লেন্সের প্রথম প্রতিসারক তল থেকে প্রথম প্রধান বিন্দুর দূরত্ব, অর্থাৎ

$$CH_1 = \frac{1-b}{a} = P_2 \frac{t}{n} \cdot F$$

এইভাবে $C'H_2 = \frac{c-1}{a} = -P_2 \frac{t}{n} \cdot F$

প্রধান বিন্দু দুটি থেকে মূল ফোকাস বিন্দু দুটির দূরত্ব

$$H_1F_1 = -\frac{1}{a} = -F$$

এবং $\quad H_2F_2 = \frac{1}{a} = F$

যেহেতু লেন্সটি বায়ুমাধ্যমে রাখা আছে, এটির বস্তু ও প্রতিবিম্ব, দুই দিকের মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক সমান। সুতরাং এক্ষেত্রে নোড বিন্দুগুলি প্রধান বিন্দুতেই অবস্থিত হবে।

এবার বায়ুতে রাখা একটি উভোত্তল লেন্সের উপর আমাদের নির্ণীত সূত্রগুলি প্রয়োগ করে দেখা যাক।

ধরুন একটি লেন্সের $r_1 = 25$ cm, $r_2 = -25$ cm, $t = 6$ cm, $n = 1.5$ ।

সুতরাং $P_1 = \frac{n-1}{r_1} = \frac{1 \cdot 5 - 1}{25} = \cdot 02 \text{ cm}^{-1}$ এবং

$$p_2 = \frac{1-n}{r_2} = \frac{1-1.5}{-25} = +\cdot 02\ \text{cm}^{-1} \text{ । } \quad \frac{t}{n} = \frac{6}{1\cdot 5} = 4\ \text{cm} \text{ ।}$$

$$\therefore\ a = P_1 + P_2 - P_1P_2\frac{t}{n} = \cdot 02 + \cdot 02 - \cdot 02 \times \cdot 02 \times 4 = \cdot 0384\ \text{cm}$$

$$b = 1 - P_2 \cdot \frac{t}{n} = 1 - \cdot 02 \times 4 = 0\cdot 92$$

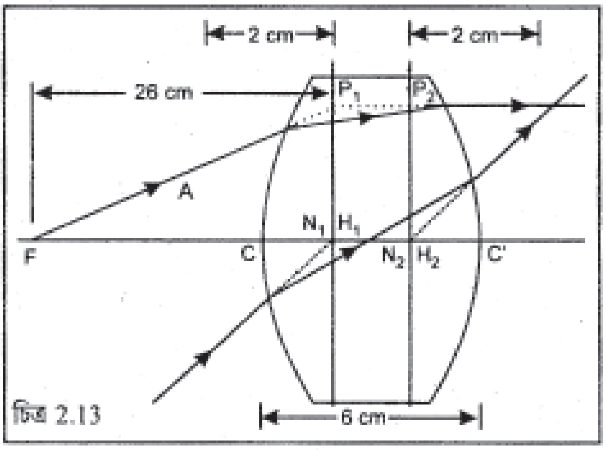
একইভাবে $C = 0.92$ এবং $d = -4$ cm।

লেন্সের প্রথম তল থেকে প্রথম প্রধান বিন্দুর দূরত্ব, $\frac{1-b}{a} = \frac{1-0\cdot 92}{\cdot 0384} \cong 2\,\text{cm}$ এই রাশিটি পজিটিভ হওয়ার অর্থ প্রধান বিন্দুটি লেন্সের তলে ডানদিকে, অর্থাৎ লেন্সের মধ্যে অবস্থিত হবে।

লেন্সের দ্বিতীয় তল থেকে দ্বিতীয় প্রধান বিন্দুর দূরত্ব $\frac{c-1}{a} = \frac{0\cdot 92-1}{\cdot 0384} \cong -2\,\text{cm}$ এটি নেগেটিভ হওয়ায় দ্বিতীয় প্রধান বিন্দুটিও লেন্সের মধ্যে থাকবে।

প্রধান বিন্দু থেকে মাপা ফোকাস দৈর্ঘ্য $\frac{1}{a} = \frac{1}{\cdot 0384} \cong 26\,\text{cm}$ ।

এক্ষেত্রে বস্তু ও প্রতিবিম্ব, দুই দিকেই মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক 1 হওয়ায় নোড্ বিন্দু দুটিও প্রধান বিন্দু দুটিতেই অবস্থিত হবে। নীচের চিত্র থেকে (চিত্র 2.13) আপনি লেন্সটির মূলবিন্দুগুলির অবস্থান ও রশ্মির গতিপথ বুঝতে পারবেন। এই চিত্রে A রশ্মি প্রথম মূল ফোকাস বিন্দু F_1 থেকে নির্গত হয়েছে এবং প্রথম একক তলের P_1 বিন্দু



চিত্র 2.13

অভিমুখে গমন করে লেন্সের উপর আপতিত হয়েছে। একক তলের ধর্ম অনুযায়ী রশ্মিটি P_1 এর সমান উচ্চতায় দ্বিতীয় একক তলে P_2 বিন্দু থেকে নির্গত হচ্ছে বলে মনে হবে। B রশ্মিটি নোড বিন্দু N_1 অভিমুখে গিয়ে লেন্সের উপর আপতিত হয়েছে এবং লেন্সের মধ্য দিয়ে প্রতিসরণের পর দ্বিতীয় নোড বিন্দু N_2 এর মধ্য দিয়ে নির্গত হচ্ছে বলে মনে হবে।

লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য

আমরা দেখেছি প্রধান বিন্দু থেকে মাপা হলে স্থূল লেন্সের ফোকাস-দৈর্ঘ্য হয় $\frac{1}{a}$ । যদি ফোকাস দৈর্ঘ্য F হয় তবে

$$\frac{1}{F} = a = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \frac{t}{n}$$

$$= \frac{n-1}{r_1} + \frac{1-n}{r_2} + \frac{(n-1)^2}{r_1 r_2} \frac{t}{n}$$

$$= (n-1)\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{t}{r_1 r_2}(1 - \frac{1}{n})\right] \quad \text{... (2.24)}$$

2.24 সূত্র থেকে আপনি বুঝতে পারবেন যে যদি $t << r_1$ বা r_2 হয় তবে t - যুক্ত রাশিটি উপেক্ষা করা যায় এবং লেন্সটি সরু লেন্স (thin lens) হিসাবে ধরা যায়।

সরু লেন্সের ক্ষেত্রে t কে উপেক্ষা করে পাওয়া যায়

$$\frac{1}{F} = (n-1)\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right] \quad \text{... (2.25)}$$

2.25 সূত্রটি লেন্স তৈরির জন্য একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সূত্র এবং এটি 'লেন্স নির্মাতার সূত্র' (lensmaker's formula) নামে পরিচিত। এই সূত্রটি ব্যবহার করার সময় আপনাকে মনে রাখতে হবে, আপতিত রশ্মির দিক থেকে উত্তল তলের বক্রতা-ব্যাসার্ধ পজিটিভ এবং অবতল তলের বক্রতা-ব্যাসার্ধ নেগেটিভ। এই রীতি অনুযায়ী উত্তল বা অভিসারী লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য পজিটিভ, অবতল বা অপসারী লেন্সের ফোকাস-দৈর্ঘ্য নেগেটিভ।

2.5 দুটি সরু লেন্সের সমন্বয়

আমরা আগেই দেখেছি যে লেন্সের বেধ t যখন বক্রতা ব্যাসার্ধ r_1 বা r_2 এর তুলনায় উপেক্ষণীয় হয় তখনই লেন্সটিকে সরু বলা যায়। এই অবস্থায় 2.23 থেকে তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের রাশিগুলি হবে

$$a = P_1 + P_2 = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{f} \text{ (2.25 সূত্র থেকে)}$$

$b = c = 1$, $d = 0$ ।

অর্থাৎ লেন্সটির তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি হবে $\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ।

এবার বায়ু মাধ্যমে রাখা দুটি সমাক্ষ সরু লেন্স বিবেচনা করা যাক, যাদের ফোকাস দৈর্ঘ্য f_1 ও f_2 এবং ব্যবধান D (চিত্র 2.14)। দুটি লেন্সের সমন্বয়ের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি হবে

S = দ্বিতীয় লেন্সের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স ×d দূরত্বের সঞ্চলন ম্যাট্রিক্স × প্রথম লেন্সের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স

$$\text{অর্থাৎ } S = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ D & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

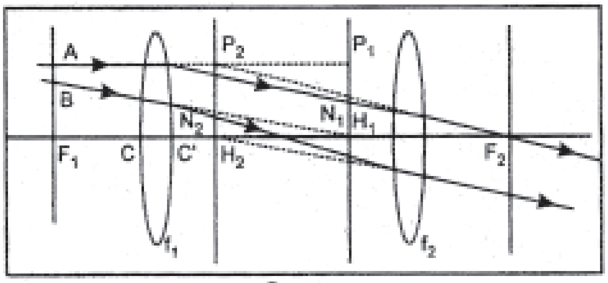
$$= \begin{pmatrix} 1-\dfrac{D}{f_2} & -\dfrac{1}{f_1}-\dfrac{1}{f_2}+\dfrac{D}{f_1 f_2} \\ D & 1-\dfrac{D}{f_1} \end{pmatrix} \qquad \text{... (2.26)}$$

তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের সাধারণ রূপ $\begin{pmatrix} b & -a \\ -d & c \end{pmatrix}$ এর সঙ্গে এটির তুলনা করলে পাবেন

$$a = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2} = \frac{1}{F} \text{ ধরা যাক}$$

$$b = 1 - \frac{D}{f_2}, c = 1 - \frac{D}{f_1}, d = -D$$

এখন আমরা তন্ত্রটির মূলবিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করতে পারি। প্রথম প্রতিসারক তল, অর্থাৎ C বিন্দু থেকে প্রথম প্রধান বিন্দুর দূরত্ব CH_1 (চিত্র 2.14)



চিত্র 2.14

$$= \frac{1-b}{a} = \frac{DF}{f_2} \qquad \text{... (2.27a)}$$

একইভাবে $C'H_2 = \dfrac{C-1}{a} = -\dfrac{DF}{f_1}$ ...(2.27b)

$$H_1F_1 = -\frac{1}{a} = -F \qquad \text{... (2.28a)}$$

এবং $H_2F_2 = \dfrac{1}{a} = F$ ... (2.28b)

2.14 চিত্রে A রশ্মিটির দিক প্রথম একক তলের যে বিন্দুর (P_1) দিকে ছিল, প্রতিসরণের পর সেটি দ্বিতীয় একক তলের সমান উচ্চতার বিন্দু (P_2) থেকে আসছে বলে মনে হবে। আবার, B রশ্মির দিক যেহেতু আপতনের আগে N_1 বিন্দু (বা H_1 বিন্দু) অভিমুখী, প্রতিসরণের পর সেটি কোন কৌণিক বিচ্যুতি ছাড়াই N_2 বিন্দু থেকে আসছে বলে মনে হবে।

আপনি নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে লেন্স সমন্বয়টির কার্যকরী ফোকাস দৈর্ঘ্য F, যেখানে

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2} \qquad \text{... (2.29)}$$

2.29 সূত্রটির উপর ভিত্তি করে লেন্স সমন্বয়টির আচরণ সম্বন্ধে বেশ কিছুটা জানা যায়। এখানে কয়েকটি বিশেষ অবস্থার আলোচনা করা যাক।

ক) যখন দুটি লেন্সই উত্তল, অর্থাৎ f_1 ও f_2 উভয়ই পজিটিভ ঃ

i) যদি D = 0 হয়, তবে $\dfrac{1}{F} = \dfrac{1}{f_1} + \dfrac{1}{f_2}$ অর্থাৎ লেন্স সমন্বয়ের ক্ষমতা (power) দুটি লেন্সের ক্ষমতার যোগফল হয়।

ii) যদি $D = f_1 + f_2$ হয় তবে $\frac{1}{F} = 0$ হয়, অর্থাৎ লেন্স সমন্বয়টির কোন অভিসারী বা অপসারী ক্ষমতা থাকে না, সেটি একটি স্বচ্ছ আয়তফলকের মত আচরণ করে। এ জাতীয় সমন্বয়কে দূরবীক্ষণীয় সমন্বয় (telescopic combination) বলা হয়, কেননা জ্যোতির্বিজ্ঞানে ব্যবহৃত দূরবীক্ষণে দুটি অভিসারী লেন্স এইভাবে থাকে।

iii) যখন $D > f_1 + f_2$, অর্থাৎ F নেগেটিভ হয়। অর্থাৎ লেন্স সমন্বয়টি একটি অপসারী লেন্সের মত কাজ করে।

খ) যখন দুটি লেন্সই অবতল, অর্থাৎ f_1 ও f_2 উভয়ই নেগেটিভ ঃ এই অবস্থায় D এর যে কোন মানের জন্য F নেগেটিভ হয় এবং সমন্বয়টি অপসারী হিসাবে কাজ করে।

গ) যখন একটি লেন্স উত্তল, অন্যটি অবতল অর্থাৎ, f_1 পজিটিভ কিন্তু f_2 নেগেটিভ ($f_2 = -f_3$ ধরুন)

যেহেতু $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_3} + \frac{D}{f_1 f_3} = \frac{f_3 - f_1 + D}{f_1 f_3}$,

i) $D > f_1 - f_3$ হলে সমন্বয়টি অভিসারী হবে।

ii) $D = f_1 - f_3$ হলে $\frac{1}{F} = 0$, অর্থাৎ সমন্বয়টি দূরবীক্ষণীয় সমন্বয় হিসাবে কাজ করবে এবং

iii) $D < f_1 - f_3$ হলে সমন্বয়টি অপসারী হবে।

iv) যদি $f_1 = f_3$ হয়, অর্থাৎ f_1 ও f এর মান একই হয় তবে D এর মান শূন্য না হলে সমন্বয়টি অভিসারী আচরণ করবে। এবার একটি অনুশীলনীর পালা।

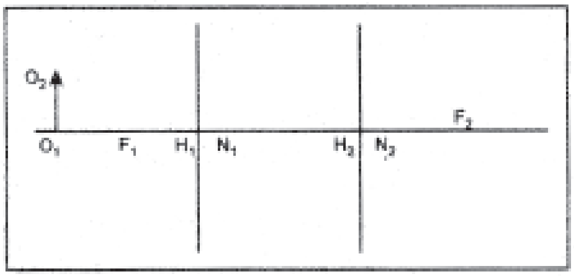
অনুশীলনী 3

(i) একটি অর্ধগোলকাকৃতি লেন্সের বক্রতলের ব্যাসার্ধ 20 cm এবং উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক 1.5। লেন্সটির একক তলগুলির অবস্থান এবং ফোকাস - দৈর্ঘ্য নির্ণয় করুন।

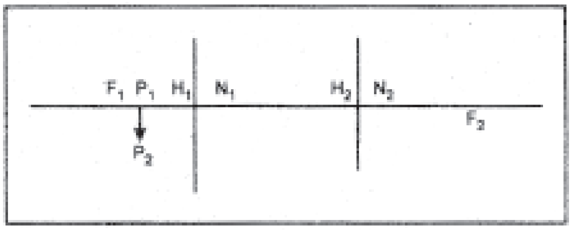
(ii) দুটি সমাক্ষ সরু অবতল লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য 20 cm ও 30 cm এবং তাদের মধ্যে ব্যবধান 10 cm। সমন্বয়টির প্রধান বিন্দু ও মূল ফোকাস বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করুন।

(iii) একটি কাঁচের অবতলোত্তল (concavo-convex) লেন্স এমনভাবে রাখা আছে যেন তার অক্ষ উল্লম্বভাবে এবং অবতল দিকটি উপরে থাকে। লেন্সটির অবতল পৃষ্ঠে জল ঢালা হলে সেটি একটি সমতলোত্তল (plano-convex) লেন্স গঠন করল। কাচের লেন্সের অবতল ও উত্তল পৃষ্ঠের বক্রতা-ব্যাসার্ধ যথাক্রমে 20 cm ও 12 cm, কাচ ও জলের প্রতিসরাঙ্ক যথাক্রমে 1.54 ও 1.33 হলে যুগ্ম লেন্সটির ফোকাস দৈর্ঘ্য নির্ণয় করুন।

(iv) 2.15 (a) ও (b) চিত্রে একটি আলোকীয় তন্ত্রের মূল ফোকাস বিন্দু F_1 ও F_2, প্রধান বিন্দু H_1 ও H_2 এবং নোড বিন্দু N_1 ও N_2 দেখানো হয়েছে। চিত্রে দেখানো দুটি বস্তু O_1O_2 এবং P_1P_2 এর প্রতিবিম্বগুলি অঙ্কনের সাহায্যে নির্ণয় করুন।



চিত্র 2.15(a)



চিত্র 2.15(b)

2.6 সারাংশ

আলোকরশ্মির ধারণা এবং আলোকরশ্মির সরলরৈখিক গতিই জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার মূল ভিত্তি। এই এককে আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের সমীপবর্তী একটি রশ্মিকে দুটি রাশি দিয়ে গঠিত স্তম্ভ ম্যাট্রিক্স দিয়ে নির্দেশিত করা হয়েছে। রশ্মির সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণের প্রভাবকে দুই সারি ও দুই স্তম্ভের এক একটি বর্গ ম্যাট্রিক্সের রূপে লেখা যায়। নির্দিষ্ট ব্যবধানে পর পর কয়েকটি প্রতিসারক তল দিয়ে গঠিত একটি আলোকীয় তন্ত্র একটি আলোকরশ্মির উপর যে প্রভাব ফেলে তা নির্ণয় করতে আমরা পরপর প্রতিসরণ ও সঞ্চলনের বর্গম্যাট্রিক্সগুলি দিয়ে আপতিত রশ্মির স্তম্ভ ম্যাট্রিক্সটিকে গুণ করি এবং শেষ গুণফল ম্যাট্রিক্সটি নির্গত রশ্মিটিকে নির্দেশ করে।

আলোকীয় তন্ত্রের মোট প্রভাব বোঝাতে বর্গম্যাট্রিক্সগুলির গুণফল ম্যাট্রিক্সটিই যথেষ্ট। এটিকে আমরা তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স বলি। এই এককে আপনি দেখেছেন কীভাবে তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের রাশিগুলির সাহায্যে আমরা আলোকীয় তন্ত্রটির মূল ফোকাস বিন্দু, প্রধান বিন্দু ও নোড্ বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করতে পারি।

এই এককের শেষভাগে আমরা দুটি অতি সাধারণ আলোকীয় তন্ত্রের ক্ষেত্রে ম্যাট্রিক্স পদ্ধতির প্রয়োগ করেছি। এগুলি হল স্থূল লেন্স ও দুটি সরু লেন্সের সমন্বয়। এই দুটি তন্ত্রের ক্ষেত্রে আমরা তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সগুলি নির্ণয় করেছি এবং ঐ ম্যাট্রিক্সগুলির সাহায্যে মূল বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ধারণ করেছি। মোটের উপর এই এককটিতে ম্যাট্রিক্স পদ্ধতির কার্যকারিতা এবং সরল সৌন্দর্য তুলে ধরা হয়েছে।

2.7 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. একটি আলোকরশ্মিকে কীভাবে ম্যাট্রিক্সের সাহায্যে নির্দেশ করা হয়? আলোকরশ্মিটি আলোকীয় তন্ত্রের অক্ষের সঙ্গে ক্ষুদ্র কোণে আনত থাকা প্রয়োজন কেন?
2. একটি অক্ষ-সমীপবর্তী রশ্মির সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ম্যাট্রিক্সগুলি নির্ণয় করুন।
3. একটি আলোকীয় তন্ত্রের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্স বলতে কী বোঝায়? তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্টের মান কত হয় এবং কেন?
4. একটি সাধারণ আলোকীয় তন্ত্রের ম্যাট্রিক্সের রাশিগুলির মাধ্যমে তন্ত্রটির প্রতিবিম্বের বিবর্ধন এবং মূল ফোকাস বিন্দু, প্রধান বিন্দু ও নোড্ বিন্দুর অবস্থান নির্ণয় করুন।

5. একটি স্থূল লেন্সের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি নির্ণয় করুন এবং তা থেকে স্থূল লেন্সটির ফোকাস দৈর্ঘ্য প্রধান বিন্দু থেকে মাপলে কত হবে তা নির্ণয় করুন। লেন্সটির প্রধান বিন্দু দুটির মধ্যে ব্যবধান কত?

6. দুটি সমাক্ষ সরু লেন্সের সমন্বয়ের তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি নির্ণয় করুন। এই সমন্বয়ের সমতুল্য লেন্সের ফোকাস-দৈর্ঘ্য কত হবে?

2.8 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

i) প্রতিফলন ম্যাট্রিক্স $= \begin{pmatrix} 1 & -\dfrac{2n}{r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

কেননা $-\dfrac{2n}{r} = -2 \times 1/\text{-}\,0.50 = 4$

$\therefore$ প্রতিফলনের পর রশ্মি ম্যাট্রিক্স $= \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -.08 \\ \cdot 02 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cdot 02 \end{pmatrix}$

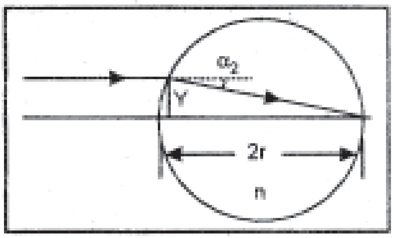
এখানে $\lambda_2 = 0$, অর্থাৎ $\alpha_2 = 0$। রশ্মিটি প্রতিফলনের পর অক্ষের সমান্তরাল পথে প্রত্যাবর্তন করবে।

ii) ধরে নিন, গোলকের ব্যাসার্ধ r, নির্ণেয় প্রতিসরাঙ্ক = n এবং কোন একটি রশ্মি অক্ষের সমান্তরালভাবে অক্ষ থেকে y দূরত্বে আপতিত হয়েছে (চিত্র 2.16)। প্রতিসরণের পর রশ্মিটি গোলকের অপর পৃষ্ঠে অক্ষকে ছেদ করবে। 2.5 সমীকরণ থেকে,

$$\lambda_2 = n\alpha_2 = \lambda_1 + \frac{1-n}{r} \cdot y$$

বা $-ny/2r = (1-n)\,y/r$, কেননা $\alpha_2 = -y/2r$

বা $1 - n + \dfrac{n}{2} = 0$, অর্থাৎ $n = 2$।



চিত্র 2.16

অনুশীলনী 2

u ও v এর প্রদত্ত মান ব্যবহার করে

$b + au = 3 - 10 \times 0.1 = 2.0$

$-a = -0.1\ \text{cm}^{-1}$

$bv + auv - cu - d = 3 \times 15 + 0.1 \times (-10) \times 15 - 2 \times (-10) - 50 = 0$

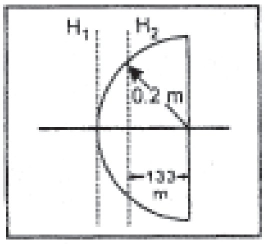
$c - av = 2 - 0.10 \times 15 = 0.5$

এখন 2.10 সূত্র অনুযায়ী $\begin{pmatrix} \lambda_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0 & -0.1 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

$\therefore \quad \lambda_2 = 0.1$ rad, $y_2 = 0.5$ cm।

অনুশীলনী 3

i) ধরুন, $r_1 = 0.2$ m, $r_2 = \infty$। এখানে $n = 1.5$।



চিত্র 2.17

$\therefore \; P_1 = \frac{1.5-1}{0.2} = 2.5\text{m}^{-1}, \; P_2 = \frac{1-1.5}{\infty} = 0$

তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের রাশিগুলি হল ঃ

$a = P_1 + P_2 - P_1P_2\, t/n = 2.5\text{ m}^{-1}$; $b = 1 - P_2\, t/n = 1$;

$c = 1 - P_1\, t/n = 1 - \frac{2.5 \times .20}{1.5} = 0.67$; $d = -t/n = -0.2/1.5 = -0.133$

লেন্সের প্রথম প্রান্ত থেকে প্রথম প্রধান বিন্দুর দূরত্ব $= \frac{1-b}{a} = \frac{1-1}{2.5} = 0$

লেন্সের দ্বিতীয় প্রান্ত থেকে দ্বিতীয় প্রধান বিন্দুর দূরত্ব $= \frac{c-1}{a} = \frac{0.67-1}{2.5} = -.133\text{m}$

একক তল থেকে মাপা হলে ফোকাস দৈর্ঘ্য $= \frac{1}{a} = \frac{1}{2.5}\text{ m} = 40\text{cm}$

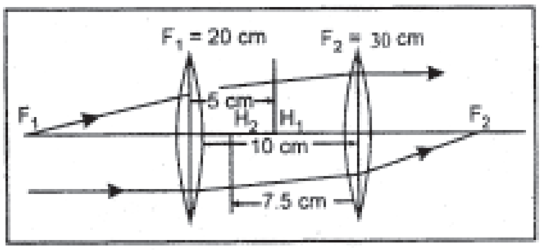
ii) 2.27a, 2.27b, 2.28a, 2.28b সমীকরণগুলি ব্যবহার করে প্রথম লেন্স থেকে প্রথম প্রধান বিন্দুর দূরত্ব,
$\frac{DF}{f_2} = 10.15/30 = 5\text{cm}$।

(এখানে $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1f_2}$

$= \frac{1}{20} + \frac{1}{30} - \frac{10}{20.30}$

$= \frac{4}{60}$

অর্থাৎ $F = 15$ cm)



চিত্র 2.18

একই ভাবে দ্বিতীয় লেন্স থেকে দ্বিতীয় প্রধান বিন্দুর দূরত্ব,

$-\frac{DF}{f_1} = -10.15/20 = -7.5\text{cm}$

প্রধান বিন্দুগুলির সাপেক্ষে মূল ফোকাস বিন্দুগুলির দূরত্ব $H_1F_1 = -F = -15$ cm

এবং $H_2F_2 = F = 15$ cm

সুতরাং প্রথম ফোকাস বিন্দুটি H_1 থেকে 15 cm বাম দিকে, বা প্রথম লেন্সের 10 cm বাম দিকে থাকবে। দ্বিতীয় ফোকাস বিন্দুটি দ্বিতীয় প্রধান বিন্দু থেকে 15 cm ডান দিকে, অর্থাৎ দ্বিতীয় লেন্সের 7.5 cm ডান দিকে থাকবে।

iii) 2.25 সূত্র ব্যবহার করে

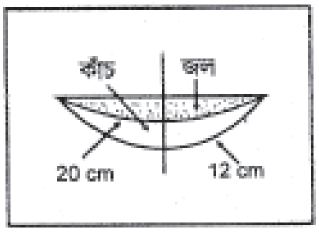
জল ও কাচের লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য যথাক্রমে f_1 ও f_2 হলে

$$\frac{1}{f_1} = (1.33-1)\left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-20}\right)$$

$$= .0165 \text{ cm}^{-1}$$

এবং $$\frac{1}{f_2} = (1.54-1)\left(\frac{1}{-20} - \frac{1}{-12}\right)$$

$$= .018 \text{ cm}^{-1}$$

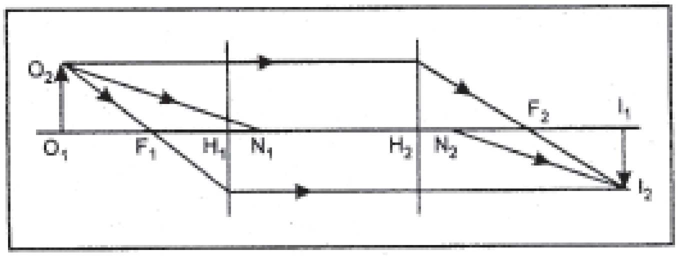


চিত্র 2.19

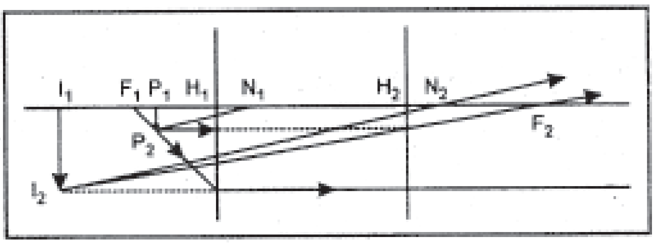
∴ যুগ্ম লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য F হলে, 2.29 সূত্রে D = 0 লিখে

$$\frac{1}{F} = .0165 + .018 = .0345,$$ অর্থাৎ F = 29 cm।

(iv) চিত্র 2.20 (a) ও (b) তে অঙ্কনের সাহায্যে দুটি ক্ষেত্রে প্রতিবিম্ব I_1I_2 নির্ণয় করা হয়েছে।



চিত্র 2.20(a)



চিত্র 2.20(b)

সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

1. প্রথম অংশের উত্তরের জন্য 2.2 অনুচ্ছেদ দেখুন।

এখানে আমরা আলোকরশ্মির নতিকোণ α কেসর্বদাই ক্ষুদ্র ধরেছি, যাতে $\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx \alpha$ হয়। এই শর্ত ব্যতিরেকে ম্যাট্রিক্স পদ্ধতি প্রয়োগ করা যায় না।

2. 2.2.1, 2.2.2 এবং 2.2.3 অংশগুলিতে এই প্রশ্নের উত্তর পাবেন।

3. 2.3 অনুচ্ছেদে প্রথম অংশটির উত্তর পাবেন।

   তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সটি কিছু সংখ্যক সঞ্চলন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ম্যাট্রিক্সের গুণফল। এই ম্যাট্রিক্সগুলির প্রত্যেকটির ডিটারমিন্যান্টের মান 1। দুটি ম্যাট্রিক্সের প্রতিটির ডিটারমিন্যান্ট 1 হলে সে দুটির গুণফলের ডিটারমিন্যান্টের মানও 1 হয়। এজন্য তন্ত্রীয় ম্যাট্রিক্সের ডিটারমিন্যান্টের মান 1।

4. 2.3 অনুচ্ছেদে এ বিষয়টি বিস্তৃতভাবে আলোচিত হয়েছে।

5. 2.4 অনুচ্ছেদে স্থূল লেন্স সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। প্রধান বিন্দু দুটির মধ্যে ব্যবধান (চিত্র 2.13 দেখুন)

$$(C'H_2 + t) - CH_1 = -P_1\frac{t}{n}F + t - P_2\frac{t}{n}F$$

$$= t\left[1 - \frac{F}{n}(P_1 + P_2\right]$$

   এই সূত্রে আপনি 2.24 সূত্র থেকে F- এর মান এবং $P_1 = \frac{n-1}{r_1}$, $P_2 = \frac{1-n}{r_2}$ ব্যবহার করতে পারেন।

6. 2.5 অনুচ্ছেদে প্রশ্নটির উত্তর পাওয়া যাবে।

একক 3 ❑ আলোকের অপেরণ

গঠন

3.1 প্রস্তাবনা

একক 2 এ জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার তত্ত্ব পাঠ করে আপনি লেন্স ও প্রতিফলক কিভাবে প্রতিবিম্ব তৈরি ক'রে তা জেনেছেন। এই তত্ত্বের মূল ধারণা সংক্ষেপে এ'ভাবে বলা যায় (i) আলো হ'ল রশ্মির সমষ্টি যা সমসত্ত্ব মাধ্যমে সরলরেখায় যায় (ii) আলোকরশ্মি প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্র (স্নেলের সূত্র) মেনে চলে।

লক্ষ্যবস্তু ও প্রতিবিম্বের মধ্যে অবস্থানের সম্পর্ক, বিবর্ধন ইত্যাদি গণনা করার জন্য কয়েকটি সমীকরণের ব্যবহার আপনি শিখেছেন। এই সব সমীকরণ নির্ণয় করার সময় কিছু সরলীকরণ করা হয়েছে। যেমন ধরা হয়েছে যে লক্ষ্যবস্তু থেকে আগত আলোকরশ্মি প্রতিবিম্ব গঠন করা পর্যন্ত সব সময়েই উপাক্ষীয় থাকবে অর্থাৎ এই সব রশ্মি অক্ষরেখার খুব কাছাকাছি থাকবে এবং অক্ষরেখার সঙ্গে যে কোণ করবে তা' হবে খুবই সামান্য। সুতরাং এই সব রশ্মির সঙ্গে যুক্ত আপতন, প্রতিফলন ও প্রতিসরণ কোণের মানও সামান্য হবে। জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার তত্ত্বে এই আসন্নায়নকে বলা হয় গাউসীয় আসন্নায়ন (Gaussian approximation)। কোন উপাক্ষীয় রশ্মি অক্ষরেখার সঙ্গে θ কোণ করলে ওই কোণ সামান্য হওয়ায় আমরা ধরতে পারি $\sin\theta = \theta$, যদি θ রেডিয়ানে প্রকাশ করা হয়। কেবলমাত্র উপাক্ষীয় রশ্মি দিয়ে প্রতিবিম্ব গঠিত হলে তা' আদর্শ বা ত্রুটিহীন হয়। এক্ষেত্রে তিনটি শর্ত পূরণ হয়।

প্রথম শর্ত : লক্ষ্যবস্তুর কোন বিন্দু থেকে আগত সব রশ্মিই আলোকতন্ত্রের ভিতর দিয়ে যাবার পর প্রতিবিম্বের একটি একক বিন্দুতে মিলিত হবে।

দ্বিতীয় শর্ত : আলোকতন্ত্রের আলোক অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত যে কোন সমতলের প্রতিটি বিন্দুর প্রতিবিম্বও অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত একটি সমতলে অবস্থিত হবে।

তৃতীয় শর্ত : লক্ষ্যবস্তু ও প্রতিবিম্ব সদৃশ হবে।

প্রতিবিম্ব ত্রুটিহীন হলেও গাউসীয় আসন্নায়নে উন্মেষ ও দৃষ্টির ক্ষেত্র উভয়ই অতি ক্ষুদ্র বলে ধরে নেওয়া হয়। আলোকতন্ত্রের ব্যবহারে এই ব্যবস্থা মোটেই গ্রহণযোগ্য নয়। কারণ এই ব্যবস্থায় প্রতিবিম্বের ঔজ্জ্বল্য কমে যায়, লক্ষ্যবস্তু ও উন্মেষ ছোট হয়। অনেক সময়েই প্রয়োজন বড় উন্মেষ ব্যবহার করা, লক্ষ্যবস্তুও বড় হতে পারে। আলোকরশ্মিগুচ্ছ কেবলমাত্র উপাক্ষীয় অঞ্চলের মধ্যে দিয়ে না গিয়ে আরও বিস্তৃত অঞ্চলের মধ্যে যেতে পারে। লক্ষ্য বিন্দুর অবস্থান অক্ষরেখার ওপরে না হয়ে কিছু দূরে হতে পারে এবং আলোকতন্ত্রের মধ্যে দিয়ে আলোকরশ্মি অক্ষরেখার সঙ্গে বড় কোণে তির্যকভাবে যেতে পারে। আলোকতন্ত্রের নানাবিধ ব্যবহারের জন্য যে সব ব্যবস্থা প্রয়োজন তা' গাউসীয় আসন্নায়নের শর্তকে মেনে চলে না। এই সব ক্ষেত্রে আদর্শ প্রতিবিম্বের তিনটি শর্ত পালিত হবে না এবং ফলে প্রতিবিম্বে নানা ত্রুটির উৎপত্তি হবে। 1855 সালে লুডভিগ ফন জাইডেল (Ludvig Von Seidel 1821-1896) গাউসীয় আসন্নায়নের বাইরে আলোকতন্ত্রে উদ্ভূত প্রতিবিম্বের বিবিধ ত্রুটি সম্পর্কে বিস্তারিত অনুসন্ধান করেন। বাস্তবক্ষেত্রে লক্ষ্যবস্তু থেকে আগত রশ্মিগুচ্ছ কেবলমাত্র প্রধান অক্ষরেখার নিকটেই সীমিত না থেকে একটি বিস্তৃত কোণযুক্ত শঙ্কুর মধ্যে থাকে, যার কৌণিক নতি θ রেডিয়ান হলে, $\sin\theta$ কে একটি শ্রেণির দ্বারা প্রকাশ করা যায়। এই শ্রেণি হ'ল

$$\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \ldots\ldots \qquad \ldots (3.1)$$

উপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে, কেবলমাত্র প্রথম রাশি ধরে প্রতিবিম্ব সম্পর্কে গণনা করা হয়েছে যা' একমাত্রিক তত্ত্ব (First order theory) নামে পরিচিত। আপনি একক 2 তে এ বিষয়ে বিস্তারিত জেনেছেন। বাস্তবক্ষেত্রে কেবলমাত্র প্রথম রাশি নিয়ে গণনা না ক'রে যদি θর উচ্চতর মাত্রার পদও নেওয়া হয় তা' হলে প্রতিবিম্ব গঠনের গণনা আরও সঠিক হবে। এইভাবে দ্বিতীয় পদ θর মাত্রা তিন সহ গণনা হ'ল ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব (Third order theory)। জাইডেল ত্রৈমাত্রিক তত্ত্বের ওপর অনেক অনুসন্ধান করেন। একবর্ণ আলোর ক্ষেত্রে একমাত্রিক তত্ত্ব থেকে যে প্রতিবিম্ব পাওয়া যায় ও বাস্তবে যে প্রতিবিম্ব গঠিত হয় এই দুইয়ের পার্থক্য তিনি ত্রৈমাত্রিক তত্ত্বের সাহায্যে গণনা করেন। প্রতিবিম্বের এই ত্রুটিকে বলা হয় **প্রাথমিক অপেরণ** (Primary aberrations)। জাইডেল অপেরণ নামেও তা পরিচিত। জাইডেলের গণনা অনুযায়ী মোট ত্রুটি S হল পাঁচটি পদ S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 এ বিভক্ত, অর্থাৎ

$$S = S_1+S_2+S_3+S_4+S_5 \qquad \text{.............................(3.2)}$$

এই পাঁচটি পদের সঙ্গে যুক্ত হয়ে আছে প্রতিবিম্ব গঠনের পাঁচটি বিশেষ প্রাথমিক অপেরণ। 3.1 শ্রেণিতে θ এর উচ্চতর মাত্রার বহুপদ আছে। পদগুলি ক্ষুদ্র হলেও নগণ্য নয় এবং প্রাথমিক অপেরণের পরে এই সব পদ থেকে পাওয়া যাবে উচ্চতর মাত্রার অপেরণ। আমরা এখানে প্রাথমিক অপেরণ বিষয়েই আলোচনা সীমাবদ্ধ রাখব।

খুব সংক্ষেপে এই পাঁচটি অপেরণের পরিচয় জেনে নেওয়া যাক। অউপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে এক বা একাধিক গোলীয় তলে প্রতিফলন বা প্রতিসরণের জন্য প্রতিবিম্ব গঠনে একটি বিশেষ ত্রুটি হ'ল—

(ক) লক্ষ্যের কোন বিন্দু থেকে আগত রশ্মিগুচ্ছ প্রতিবিম্বের একটি বিন্দুতে মিলিত হয় না। মনে করি লক্ষ্যটি একটি বিন্দুবস্তু। বিন্দুবস্তুর অবস্থান ও পর্যবেক্ষণের ক্ষেত্রের ওপর ভিত্তি ক'রে এই ত্রুটি বিভিন্ন নামে অভিহিত করা হয় —

(i) এই ত্রুটিকে **গোলীয় অপেরণ** (Spherical aberration) বলা হবে যখন বিন্দুবস্তুটি অক্ষরেখার ওপর অবস্থিত থাকে।

(ii) যদি বিন্দুবস্তুটি অক্ষরেখা থেকে সামান্য দূরে থাকে তখন অক্ষের অভিলম্বতলে পরিলক্ষিত ত্রুটিকে বলা হয় কোমা (Coma)।

(iii) যখন বিন্দুলক্ষ্য অক্ষরেখা থেকে কিছুটা দূরে অবস্থিত তখন অক্ষরেখা বরাবর পরিলক্ষিত প্রতিবিম্বের ত্রুটিকে অবিন্দুকত্ব (Astigmatism) বলা হয়।

(খ) যখন কোন বিস্তৃত লক্ষ্যবস্তুর বিন্দুগুলি একই তলে অবস্থিত হলেও তাদের প্রতিবিম্ব বিন্দুগুলি একই তলে থাকে না, তখন প্রতিবিম্বের বক্রতা (Curvature) সৃষ্টি হয়েছে বলা হয়।

(গ) প্রতিবিম্ব ও লক্ষ্যবস্তুর মধ্যে জ্যামিতিক সাদৃশ্য না থাকলে তাকে প্রতিবিম্বের বিকৃতি (Distortion) বলা হয়। অক্ষরেখার অভিলম্ব তলে কোন বর্গক্ষেত্রাকার লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব বর্গক্ষেত্র না হয়ে পিপা (barrel shape) অথবা পিন আঁটা গদির (Pin cushion-shape) মত দেখতে হয় (চিত্র 3.21 ও 3.22 দেখুন।)

জাইডেলের গণনা অনুযায়ী $S_1 = 0$ হ'লে গোলীয় অপেরণ থাকবে না। $S_1 = 0$ এবং $S_2 = 0$ হ'লে গোলীয় অপেরণ ও কোমা থাকবে না। এই সঙ্গে $S_3 = 0$ হলে অবিন্দুকত্ব ও এছাড়াও $S_4 = 0$ হলে বক্রতা থাকে না। একই

সঙ্গে যদি $S_5 = 0$ হয়, তো প্রতিবিম্বের বিকৃতিও থাকবে না।

আমরা 3.2-3.6 অংশে উপরোক্ত পাঁচটি অপেরণ নিয়ে আরও বিশদভাবে আলোচনা করব।

উপরোক্ত একবর্ণ অপেরণ ছাড়াও যখন ব্যবহৃত আলোয় একাধিক বর্ণ মিশে থাকে, তখন প্রতিবিম্ব গঠনে আরও একপ্রকার ত্রুটি দেখা যায়। গাউসীয় সীমার মধ্যে আলোকতন্ত্র কাজ করলে একবর্ণ আলোর জন্য আদর্শ প্রতিবিম্ব পাওয়া যাবে এবং সেক্ষেত্রে প্রতিবিম্বে কোন অপেরণ থাকবে না। কিন্তু একাধিক বর্ণের আলো ব্যবহার করলে লেন্সের তলে প্রতিসরণের সময় সেটির উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক (Refractive index) আলোর বর্ণের ওপর নির্ভরশীল হওয়ায় বিভিন্ন বর্ণের রশ্মি লেন্সের মধ্যে ঠিক একইভাবে যাবে না। ফলে বিভিন্ন বর্ণের প্রতিবিম্ব ঠিক একই জায়গায় গঠিত হবে না। একটি বিন্দুবস্তুর প্রতিবিম্ব একটিমাত্র বিন্দু প্রতিবিম্ব না হয়ে প্রতিটি বর্ণের জন্য পৃথক বিন্দু প্রতিবিম্ব হবে। প্রতিবিম্বের এই ত্রুটিকে বলা হয় **বর্ণাপেরণ** (Chromatic aberration)। 3.7 অনুচ্ছেদে বর্ণাপেরণ নিয়ে আলোচনা করা হবে।

বর্তমান এককে প্রতিবিম্বের বিবিধ ত্রুটির যেমন বর্ণনা করা হয়েছে সেই সঙ্গে কিভাবে আলোকতন্ত্রে এই ত্রুটি কমানো যায় সে বিষয়েও আপনি জানতে পারবেন। আলোকযন্ত্রের ব্যবহারের চাহিদা অনুযায়ী কোন কোন অপেরণ বিশেষভাবে কমানো প্রয়োজন একথা মনে রেখে আলোকযন্ত্রের নকশা করা দরকার। রশ্মি অঙ্কন পদ্ধতির (Ray tracing method) সাহায্যে আলোকতন্ত্রের কার্যকারিতার সম্যক বিশ্লেষণ একটি বহুল প্রচলিত প্রথা যার সাহায্যে আলোকতন্ত্রের বিস্তারিত নকশা করা যায়। 1960 সালের পরে এ-কাজে কম্প্যুটারের ব্যবহার করা হচ্ছে এবং এর জন্য প্রয়োজনীয় সফ্‌টওয়্যারও তৈরি হয়েছে।

পরিশেষে একটি বিষয়ে আপনার দৃষ্টি আকর্ষণ করতে চাই। আমাদের সমস্ত আলোচনাই জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার সীমাবদ্ধতার মধ্যে করা হয়েছে। অপেরণ ও আলোকতন্ত্রের কার্যকারিতা সংক্রান্ত এই তত্ত্ব সাধারণ ব্যবহারিক দিক দিয়ে অনেকটা সফল হ'লেও কখনও কখনও বিশেষ ক্ষেত্রে আলোর তরঙ্গ রূপ ধরে ব্যবর্তনকে (Diffraction) যুক্ত করে এই আলোচনা করার প্রয়োজন হয়। জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যায় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda \rightarrow 0$ ধরা হয়েছে। কিন্তু লক্ষ্যবস্তুর মাপ ও তরঙ্গ দৈর্ঘ্য তুলনীয় হ'লে এই অনুমান সঠিক থাকে না। সেক্ষেত্রে আলোর তরঙ্গরূপ অবশ্যই ধরতে হবে। আলোর তরঙ্গরূপকে ভিত্তি ক'রে প্রতিবিম্বের গঠন ও অপেরণের ওপর অনুসন্ধান নিয়ে যে তত্ত্বের উদ্ভাবন হয়েছে তা' অবশ্যই পদার্থ-বিজ্ঞানের মূলনীতির অনুসারী কিন্তু জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যার তুলনায় এই তত্ত্ব জটিলতর। বর্তমান পাঠক্রমে আমরা এই উচ্চতর আলোচনা থেকে বিরত থাকব।

উদ্দেশ্য

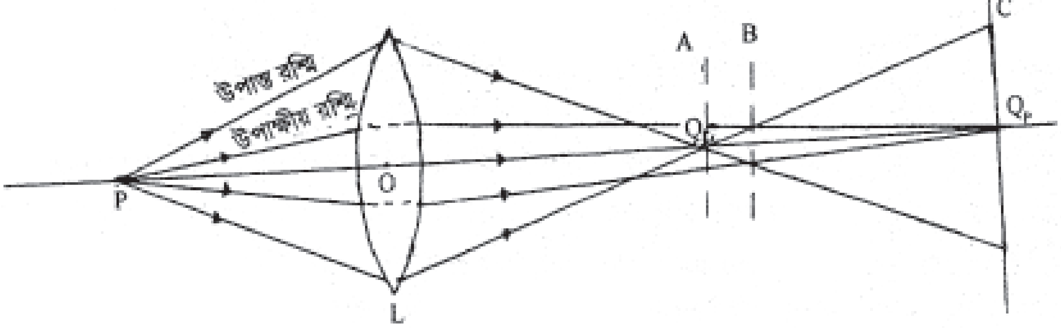
এই একক পাঠ করে আপনি —

- একবর্ণ আলো দিয়ে লেন্সে প্রতিবিম্ব-গঠনের সময় যে সব ত্রুটি বা অপেরণ সৃষ্টি হয় সেগুলির তালিকা দিতে পারবেন এবং বিভিন্ন ধরণের ত্রুটির চরিত্র ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- জ্যামিতীয় আলোকবিদ্যায় তৃতীয় মাত্রার তত্ত্ব প্রয়োগ ক'রে একবর্ণ অপেরণের মান গণনা করতে পারবেন।
- বহুবর্ণ আলোর ক্ষেত্রে প্রতিবিম্ব গঠনে ত্রুটি বা বর্ণাপেরণ কিভাবে সৃষ্টি হয় তার বিবরণ দিতে পারবেন ও এই অপেরণের মান গণনা করতে পারবেন।

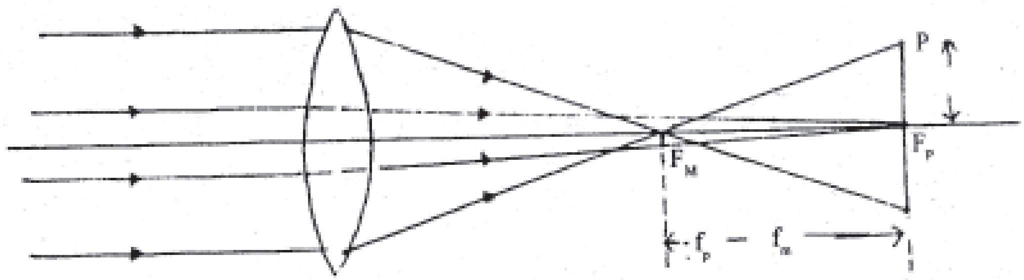
- বিবিধ আলোকতন্ত্রে একবর্ণ ও বহুবর্ণ অপেরণ কিভাবে কমানো যায় তা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

3.2 গোলীয় অপেরণ (Spherical aberration)

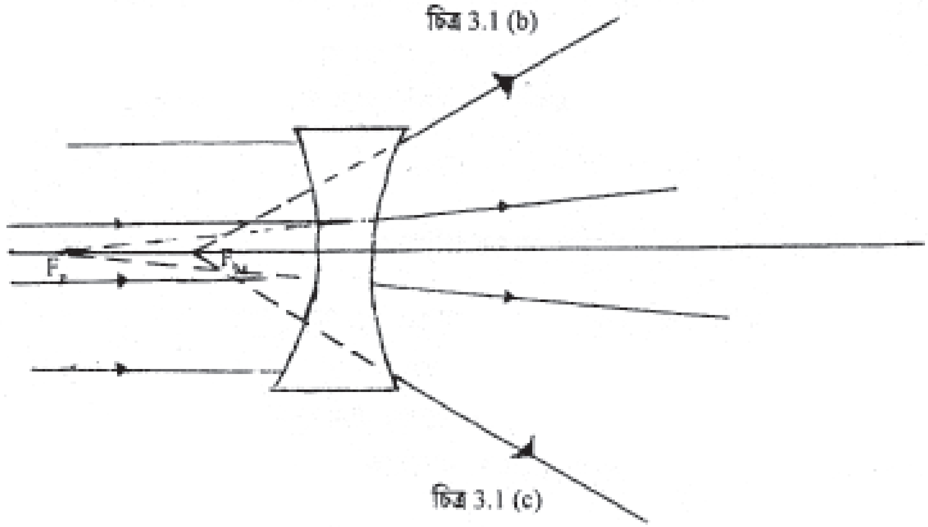
এই এককের প্রস্তাবনায় আমরা পাঁচটি একবর্ণ অপেরণের উল্লেখ করেছি। আমরা গোলীয় অপেরণ দিয়ে আমাদের আলোচনা শুরু করব।



চিত্র 3.1 (a)



চিত্র 3.1 (b)



চিত্র 3.1 (c)

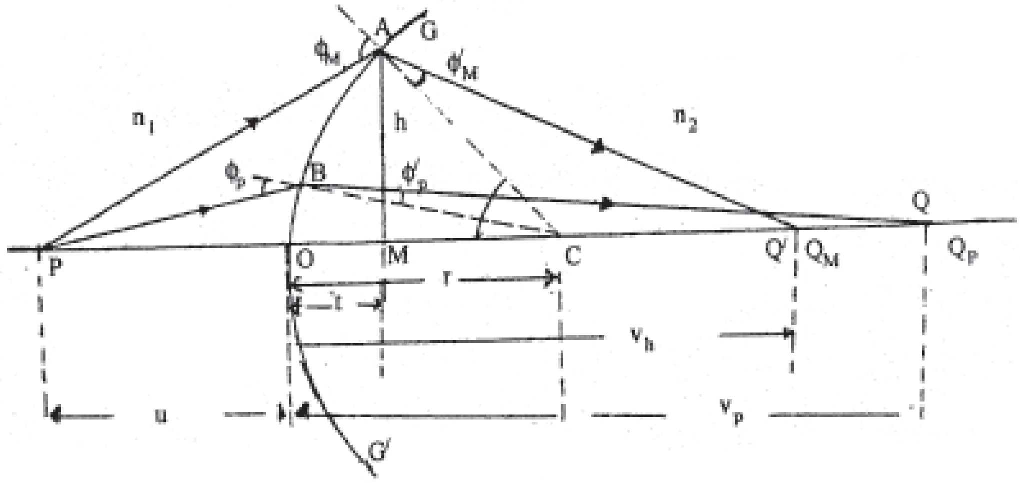
এখন এই গোলীয় অপেরণ কিভাবে সৃষ্টি হয় তা বোঝার চেষ্টা করি। চিত্র 3.1 (a) তে L একটি অভিসারী লেন্স। এখানে লেন্সের উন্মেষ বড় ধরা হয়েছে। অক্ষরেখার ওপরে একটি বিন্দু P থেকে অক্ষরেখার সঙ্গে বিভিন্ন কোণে রশ্মি নির্গত হয়ে লেন্সের ওপরে আপতিত হচ্ছে। লেন্সটিকে অক্ষরেখার সাপেক্ষে বিভিন্ন বৃত্তীয় বলয়ে ভাগ করে নিলে আমরা দেখব যে একই বলয় দিয়ে প্রতিসৃত রশ্মিগুচ্ছ অক্ষরেখার ওপর একটি বিন্দুতে মিলিত হবে। উপাক্ষীয় রশ্মির জন্য চ্যুতি সবচেয়ে কম হবে এবং প্রতিবিম্ব Q_P-র অবস্থান হ'বে লেন্স থেকে সবচেয়ে দূরে। উপান্ত রশ্মির জন্য চ্যুতি সর্বাধিক হবে এবং সেই কারণে লেন্সের সবচেয়ে নিকটে Q_M বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠিত হবে। P বিন্দু থেকে নির্গত অন্যান্য বলয় দিয়ে প্রতিসৃত রশ্মি অক্ষরেখা থেকে বলয়ের দূরত্ব ও রশ্মির চ্যুতি অনুযায়ী Q_M ও Q_P এর মধ্যে কোন বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠন করবে। সুতরাং অক্ষরেখার ওপর P এর প্রতিবিম্ব একটি বিন্দু না হয়ে Q_M থেকে Q_P পর্যন্ত বিস্তৃত হবে। Q_P বিন্দুতে অক্ষের অভিলম্বভাবে C অবস্থানে যদি কোন পর্দা ধরা যায় (চিত্র 3.1a) তা হলে পর্দায় উজ্জ্বল কেন্দ্রসহ একটি আলোকিত বৃত্ত পাওয়া যাবে। পর্দাকে Q_P থেকে Q_M এর দিকে সরালে ঐ বৃত্তের ব্যাস কমতে থাকবে এবং B অবস্থানে তা সর্বনিম্ন হবে। ঐ বৃত্তকে বলা হয় অল্পতম অস্পষ্টতার বৃত্ত (Circle of least confusion)। এই আলোচনা থেকে আমরা দেখি যে লেন্সের উন্মেষ বড় হ'লে বিন্দুলক্ষ্যের প্রতিবিম্ব আর বিন্দু থাকবে না এবং তার অবস্থানও সুনির্দিষ্ট হবে না। অল্পতম অস্পষ্টতা বৃত্তকেই বিন্দুলক্ষ্যের প্রতিবিম্ব হিসাবে ধরতে হবে। লেন্সের বড় উন্মেষের জন্য প্রতিবিম্ব গঠনে এই ত্রুটির সৃষ্টি হয় যার নাম **গোলীয় অপেরণ** (Spherical aberration)।

অক্ষরেখার সমান্তরালে রশ্মিগুচ্ছ আপতিত হ'লে অভিসারী লেন্সের ক্ষেত্রে চিত্র 3.1 (b), F_p উপাক্ষীয় রশ্মির ফোকাস ও F_m উপান্ত রশ্মির ফোকাস। f_p ও f_m যথাক্রমে উপাক্ষীয় ও উপান্ত রশ্মির জন্য ফোকাস দৈর্ঘ্য। f_p ও f_m এর ব্যবধান $f_p - f_m$ কে **অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ** (Longitudinal SA)-এর পরিমাপ ধরা হবে। F_p বিন্দুতে অক্ষরেখার লম্বতলে আলোকবৃত্তের ব্যাসার্ধ $F_p P$ কে বলা হবে **অনুপ্রস্থ গোলীয় অপেরণ** (Lateral / Transverse SA)। অপসারী লেন্সের ক্ষেত্রে চিত্র 3.1 (c) এ ফোকাস বিন্দু F_m ও F_p এর অবস্থান দেখান হয়েছে।

লেন্সের মধ্যে দিয়ে প্রতিসরণের পর রশ্মিগুচ্ছের স্পর্শক শঙ্কুকে কষ্টিকতল (Caustic surface) বলা হয়। অভিসারী লেন্সের ক্ষেত্রে এই কষ্টিকতলের সূচিমুখ (কাস্প) আলোর দিকে থাকে। অপসারী লেন্সের ক্ষেত্রে প্রতিসরণের পর মনে হবে যে আলো একটি কষ্টিকতল থেকে আসছে যার সূচিমুখ আলোর বিপরীত দিকে আছে।

3.2.1 একটি গোলীয় তলে গোলীয় অপেরণের পরিমাপ

মনে করি GG' একটি গোলীয় প্রতিসারক তল, যার ব্যাসার্ধ r। তলটির অক্ষরেখার উপরে P একটি বিন্দুবস্তু, যা শীর্ষবিন্দু (Vertex) o থেকে u দূরত্বে আছে। প্রান্তিক রশ্মি PA অক্ষরেখা থেকে AM = h দূরত্বে গোলীয় তলে আপতিত হয়ে প্রতিসরণের পর Q' বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠন করেছে। ধরা যাক বস্তুলোক (object space), অর্থাৎ প্রতিসারক তলের বামদিকে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক n_1 এবং বিম্বলোক (image space), অর্থাৎ প্রতিসারক তলের ডানদিকে প্রতিসরাঙ্ক n_2 (চিত্র 3.2)।



চিত্র 3.2

এবার উপাক্ষীয় রশ্মিটিতে (PB) লক্ষ্য করুন। এটি অক্ষের প্রায় সমান্তরাল ভাবে শীর্ষবিন্দুর কাছাকাছি B বিন্দুতে আপতিত হয়েছে এবং প্রতিসরণের পর অক্ষরেখার উপর Q বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠন করেছে। Q বিন্দুটি O বিন্দু থেকে Q' বিন্দুর চেয়ে বেশি দূরে আছে।

ধরুন, OQ' = v', OQ = v, AC = BC = OC = r (প্রতিসারক তলের বক্রতাব্যাসার্ধ)

জ্যামিতিক গণনার সাহায্যে দেখানো যায় যে,

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_2}{v'}=\frac{n_2-n_1}{r}+\frac{h^2n_2}{2u}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{v'}\right)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)-\frac{h^2n_1}{2v'}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)\left(\frac{1}{v'}-\frac{1}{r}\right) \quad ....(3.3)$$

প্রথম মাত্রার তত্ত্ব বা গাউসীয় আসন্নায়নে $h \rightarrow 0$ ধরা হয়। এই তত্ত্ব অনুযায়ী h^2 রশ্মিটিকে সম্পূর্ণ উপেক্ষা করে 3.3 সূত্র থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_2}{v}=\frac{n_2-n_1}{r} \quad ....(3.4)$$

এই সূত্রটি উপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। কিন্তু আমরা h^2 কে সম্পূর্ণ উপেক্ষা না করেও 3.3 সূত্রে যে রাশিগুলিতে h^2 আছে সেগুলিতে v' এর পরিবর্তে তার আসন্ন মান v ব্যবহার করতে পারি। এভাবে আমরা পাই

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_2}{v'}=\frac{n_2-n_1}{r}+\frac{h^2}{2}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{v}\right)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)\left(\frac{n_2}{u}+\frac{n_1}{v}\right) \quad ....(3.5)$$

প্রথম মাধ্যমের তুলনায় দ্বিতীয় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক $\frac{n_2}{n_1}=n$ লিখে পাবেন

$$\frac{1}{u}+\frac{n}{v'}=\frac{n-1}{r}+\frac{h^2}{2}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{v}\right)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)\left(\frac{n}{u}+\frac{1}{v}\right) \quad ....(3.6)$$

একইভাবে, 3.4 থেকে $\frac{1}{u}+\frac{n}{v}=\frac{n-1}{r}$ ....(3.7)

3.4 এ $u\to\infty$ ধরে উপাক্ষীয় ফোকাস দূরত্ব $v=f$ পাবেন, কেননা $\frac{n_2}{f}=\frac{n_2-n_1}{r}$

অথবা $\frac{1}{f}=\frac{n_2-n_1}{n_2 r}=\frac{n-1}{nr}$ .... (3.8)

আবার, 3.4 থেকে, $\frac{1}{v}=\frac{n-1}{nr}-\frac{1}{nu}$

$$\therefore\ \frac{n}{u}+\frac{1}{v}=\frac{n-1}{nr}+\frac{n^2-1}{nu}=\left(\frac{n-1}{n}\right)\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right)$$

আবার, $\frac{1}{r}-\frac{1}{v}=\frac{1}{r}-\frac{n-1}{nr}+\frac{1}{nu}=\frac{1}{n}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)$

3.5 সমীকরণে $\frac{n}{u}+\frac{1}{v}$ এবং $\frac{1}{r}-\frac{1}{v}$ এর মান f, r ও u দিয়ে প্রকাশ করলে পাওয়া যায়

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_2}{v'}=\frac{n_2-n_1}{r}+\frac{h^2 n_1}{2n}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{n-1}{n}\right)\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right)$$

$$=\frac{n_2-n_1}{r}+\frac{h^2}{2}.\frac{n_1(n-1)}{n^2}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right) \qquad \text{........(3.9 a)}$$

$$=\frac{n_2-n_1}{r}+\frac{h^2 n_1 r}{2nf}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right) \qquad \text{........(3.9 b)}$$

3.9 b থেকে 3.4 বিয়োগ ক'রে আমরা পাই,

$$\frac{n_2}{v'}-\frac{n_2}{v}=\frac{h^2 n_1 r}{2nf}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right)$$

$$v-v'=\frac{h^2 n_1 r}{2nn_2 f}.v'.v\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r}+\frac{n+1}{u}\right) \qquad \text{......(3.10)}$$

এখানে $r > 0$ এবং $f > 0$

অতএব, $v > v'$

$u \to \infty$ হলে $v = f$ এবং $v' = f'$

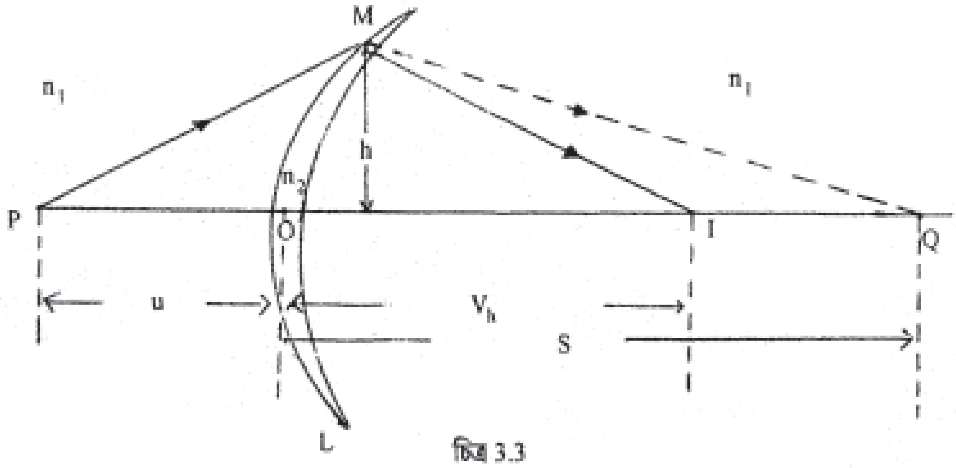
(3.1) থেকে পাওয়া গেল

$$f - f' = \frac{h^2}{2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot \frac{r}{f} \cdot f f' \cdot \frac{1}{r^3}$$

$$= \frac{h^2}{2} f' \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot \frac{1}{r^2} \qquad \text{............ (3.11)}$$

u এর মান সীমিত হ'লে সমীকরণ 3.10 এবং $u \to \infty$ অর্থাৎ সমান্তরাল আপতিত রশ্মির ক্ষেত্রে সমীকরণ 3.11 তৃতীয় মাত্রার তত্ত্ব অনুযায়ী গোলীয় তলে অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণের পরিমাপ নির্দেশ করছে। এখানে অপেরণের মান h^2 এর সমানুপাতী। $h \to 0$ হ'লে স্বাভাবিকভাবেই অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ শূন্য হবে কারণ এক্ষেত্রে কেবলমাত্র উপাক্ষীয় রশ্মি ব্যবহার করা হচ্ছে।

3.2.2 পাতলা লেন্সে গোলীয় অপেরণ। ন্যূনতম গোলীয় অপেরণের শর্ত



চিত্র 3.3

L একটি পাতলা অভিসারী লেন্স যার মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক n_2। লেন্সের দু'পাশে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক n_1। অক্ষরেখার ওপর P একটি বিন্দুবস্তু। P থেকে প্রান্তিক রশ্মি PM লেন্সের প্রথম গোলীয় তলে অক্ষরেখা থেকে h দূরত্বে প্রতিসরণের পর প্রতিবিম্ব Q ও দ্বিতীয় তলে প্রতিসরণের পর প্রতিবিম্ব I গঠন করে।

এখানে $PO = u$, $OQ = s$, $OI = v'$

প্রথম গোলীয় তলে প্রতিসরণের সমীকরণ হ'ল, 3.14a অনুযায়ী,

$$\frac{n_1}{u} + \frac{n_2}{s} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{h^2}{2}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{u}\right)^2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{n_1 + n_2}{n_1 u}\right) \qquad \text{..............(3.12)}$$

এখানে আলোকরশ্মি n_1 প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যম থেকে n_2 প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যমে যাচ্ছে।

দ্বিতীয় গোলীয় তলে প্রতিসরণের সমীকরণ হল,

$$-\frac{n_2}{s}+\frac{n_1}{v'}=\frac{n_1-n_2}{r_2}+\frac{h^2}{2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2(n_1-n_2)\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{S}\right)^2\times\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_2 s}\right) \quad ......(3.13)$$

এখানে আলোকরশ্মি n_2 প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যম থেকে n_1 প্রতিসরাঙ্কের মাধ্যমে যাচ্ছে। (3.12) এ প্রতিবিম্ব দূরত্ব s ধরা হয়েছে। সুতরাং (3.13) এ বিন্দুলক্ষ্যের দূরত্ব -s ধরতে হবে।

3.13 সমীকরণে h এর মান ক্ষুদ্র ধরলে h^2 সমেত রাশিটিকে উপেক্ষা করে S এর আসন্ন মান পাওয়া যেতে পারে। এক্ষেত্রে S ও V' এর সম্পর্ক।

$$-\frac{n_2}{s}+\frac{n_1}{v'}=\frac{n_1-n_2}{r_2} \quad .... (3.14)$$

3.13 সমীকরণে h^2 সমেত ডানদিকের রাশিতে S এর এই মান ব্যবহার করে আমরা গোলীয় অপেরণের পরিমাণ নির্ণয় করতে পারি।

এভাবে আমরা পাই,

$$\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{s}\right)=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{v'}\right) \quad ....(3.15)$$

এবং

$$\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_2 s}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_1 v'}\right) \quad ....(3.16)$$

3.15 ও 3.16 এর রাশিগুলিকে 3.13 সমীকরণের h^2 যুক্ত পদে ব্যবহার করে অবশেষে পাওয়া যায়,

$$-\frac{n_2}{s}+\frac{n_1}{v'}=\frac{n_1-n_2}{r_2}+\frac{h^2}{2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2(n_1-n_2)\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{v'}\right)^2\times\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_1 v'}\right)$$

.... (3.17)

এবার 3.12 ও 3.17 সমীকরণ যোগ করে আমরা পাই,

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_1}{v'}=(n_2-n_1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)+\frac{h^2}{2}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2(n_2-n_1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r_1}+\frac{n_1+n_2}{n_1 u}\right)$$

$$+\frac{h^2}{2}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2(n_1-n_2)\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{v'}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_1 v'}\right) \qquad ......(3.18)$$

উপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে লেন্সের সমীকরণ হ'ল,

$$\frac{n_1}{u}+\frac{n_1}{v}=(n_2-n_1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$$

এখানে v হ'ল উপাক্ষীয় রশ্মির জন্য প্রতিবিম্বের দূরত্ব।

$$\therefore \frac{n_1}{v'}-\frac{n_1}{v}=\frac{h^2}{2}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2(n_2-n_1)\left[\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r_1}+\frac{n_1+n_2}{n_1 u}\right)-\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{v'}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n_1+n_2}{n_1 v'}\right)\right] ...(3.19)$$

n_1 দিয়ে ভাগ ক'রে অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ v-v' হ'ল,

$$v-v'=\frac{h^2}{2}vv'\frac{(n-1)}{n^2}\left[\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{1}{r_1}+\frac{n+1}{u}\right)-\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{v'}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n+1}{v'}\right)\right] \qquad ....(3.20)$$

এখানে $n = n_2/n_1$ হ'ল পারিপার্শ্বিক মাধ্যমের তুলনায় লেন্সের মাধ্যমের প্রতিসরাংক।

সমান্তরাল রশ্মির ক্ষেত্রে $u\to\infty$, $v\to f$ এবং $v'\to f'$ হবে। এখানে f হ'ল উপাক্ষীয় রশ্মির জন্য ফোকাস দৈর্ঘ্য এবং f' হ'ল প্রান্তিক রশ্মির জন্য ফোকাস দৈর্ঘ্য।

সমান্তরাল রশ্মির জন্য অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ হল,

$$\Delta f=f-f'=\frac{h^2}{2}f^2\left(\frac{n-1}{n^2}\right)\left\{\frac{1}{r_1^3}-\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{f}\right)^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{n+1}{f}\right)\right\} \qquad .... (3.21)$$

এখানে ডানদিকের পদে f' এর জায়গায় f ব্যবহার করে আরও আসন্নায়ন করা হয়েছে।

পাতলা লেন্সে অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ কিভাবে কমানো যায় এবার আমরা সেটি অনুসন্ধান করব। আমরা জানি যে পাতলা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য f হ'ল,

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right) \qquad ....(3.22)$$

লেন্সের প্রথম ও দ্বিতীয় তলের ব্যাসার্ধ যথাক্রমে r_1 ও r_2।

মনে করি $\sigma = r_1/r_2$ ও $q=\frac{r_2+r_1}{r_2-r_1}=\frac{1+\sigma}{1-\sigma}$

q কে বলা হয় **লেন্সের আকৃতি-সূচক** (shape factor)। এখন ফোকাস দৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে σ বা q কে পরিবর্তিত ক'রে ন্যূনতম অনুদৈর্ঘ্য গোলীয় অপেরণ নির্ণয় করতে হবে।

3.22 থেকে লেখা যায় $\frac{1}{f}=\frac{(n-1)(1-\sigma)}{r_1}$

সুতরাং $\frac{1}{r_1}=\frac{1}{(n-1)(1-\sigma)f}$ এবং $\frac{1}{r_2}=\frac{\sigma}{r_1}=\frac{\sigma}{(n-1)(1-\sigma)f}$

Δf থেকে r_1 ও r_2 অপনয়ন করা হ'লে,

$\Delta f = f\text{-}f'$

$$=\frac{h^2}{2}.f^2\left(\frac{n-1}{n^2}\right)\left[\frac{1}{(n-1)^3(1-\sigma)^3f^3}-\left(\frac{\sigma}{(n-1)(1-\sigma)f}-\frac{1}{f}\right)^2\left(\frac{\sigma}{(n-1)(1-\sigma)f}-\frac{n+1}{f}\right)\right]$$

$$=\frac{h^2}{2}.f^2.\left(\frac{n-1}{n^2}\right)\left[\frac{1}{(n-1)(1-\sigma)f}\right]^3\times\left[1-\{\sigma-(n-1)(1-\sigma)\}^2\{\sigma-(n^2-1)(1-\sigma)\}\right]$$

...........(3.23)

এর থেকে আপনি দেখতে পারেন

$$\Delta f=\frac{h^2}{2n(n-1)^2(1-\sigma)^2f}\left[2-2n^2+n^3+\sigma(n+2n^2-2n^3)+\sigma^2n^3\right] \qquad ....(3.24)$$

উভোত্তল লেন্সে $r_1>0$, $r_2<0$, সুতরাং $\sigma<0$

উভাবতল লেন্সে $r_1<0$, $r_2>0$, সুতরাং $\sigma<0$

মেনিস্কাস লেন্সে r_1 ও r_2 একই চিহ্নের, সুতরাং $\sigma>0$

এখন (3.24) সূত্রে $2-2n^2+n^3+\sigma(n+2n^2-2n^3)+\sigma^2n^3$ কে $a\sigma^2+b\sigma+c$ হিসাবে লেখা যায়।

এখানে $a = n^3$, $b = n+2n^2-2n^3$, $c = 2-2n^2+n^3$

$$a\sigma^2+b\sigma+c = a\left[\left(\sigma+\frac{b}{2a}\right)^2-\frac{b^2-4ac}{4a^2}\right] \qquad .... (3.25)$$

এখন $a = n^3 > 0$

এবং $b^2\text{-}4ac = n^2(1\text{-}4n)<0$

কারণ n এর মান সাধারণত 1.5 থেকে 2.0 এর মধ্যে থাকে। সুতরাং $a\sigma^2+b\sigma+c>0$ এবং এই কারণে Δf এর চিহ্ন f এর চিহ্নের দ্বারা নির্ণীত হচ্ছে।

উত্তল লেন্সের ক্ষেত্রে f>0 সুতরাং Δf ধনাত্মক হবে। সুতরাং $f > f'$ এবং প্রান্তিক ফোকাস বিন্দু উপাক্ষীয় ফোকাস বিন্দুর তুলনায় লেন্সের নিকটতর হবে। অবতল লেনসের ক্ষেত্রে f<0 হওয়ায় Δf ঋণাত্মক এবং $f<f'$ হবে।

অনুশীলনী 1. 3.23 সমীকরণ ব্যবহার করে 3.24 এ প্রদত্ত Δf এর সূত্র প্রমাণ করুন।

ন্যূনতম গোলীয় অপেরণের শর্ত : আমরা আগেই দেখেছি

গোলীয় অপেরণ $\Delta f = \dfrac{h^2}{2n(n-1)^2(1-\sigma)^2 f}\left(a\sigma^2 + b\sigma + c\right)$

এ থেকে আপনি লক্ষ্য করবেন যে

(i) লেন্সের উন্মেষ h কমালে গোলীয় অপেরণও কম হবে।

(ii) একটি পাতলা লেন্সে গোলীয় অপেরণ সম্পূর্ণ দূর করা যাবে না কারণ ডানদিকের রাশি কোন অবস্থায়ই শূন্য হবে না।

এখন প্রশ্ন হচ্ছে কি ভাবে একটি পাতলা লেন্সে গোলীয় অপেরণ ন্যূনতম করা যায়। h, n, f অপরিবর্তিত রেখে $\sigma = r_1 / r_2$ পরিবর্তন করে লেন্সের আকৃতি এমনভাবে স্থির করা যায় যে Δf ন্যূনতম হবে।

এই শর্ত হ'ল $\dfrac{\partial}{\partial\sigma}\Delta f = 0$

অর্থাৎ $\dfrac{2}{(1-\sigma)^3}\left(a\sigma^2 + b\sigma + c\right) + \dfrac{1}{(1-\sigma)^2}(2a\sigma + b) = 0$

অথবা $2[a\sigma^2+b\sigma+c] + (1-\sigma)(2a\sigma+b) = 0$

$$\therefore \sigma = -\frac{b+2c}{b+2a} = \frac{2n^2-n-4}{2n^2+n} \qquad ....(3.26)$$

আপনি এখানে লক্ষ্য করবেন যে কোন বিশেষ আকৃতিতে গোলীয় অপেরণ সবচেয়ে কম হবে তা প্রতিসরাঙ্কের ওপর নির্ভর করে। লেন্সের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক n = 1.5 হলে ন্যূনতম গোলীয় অপেরণের জন্য σ এর মান হ'ল

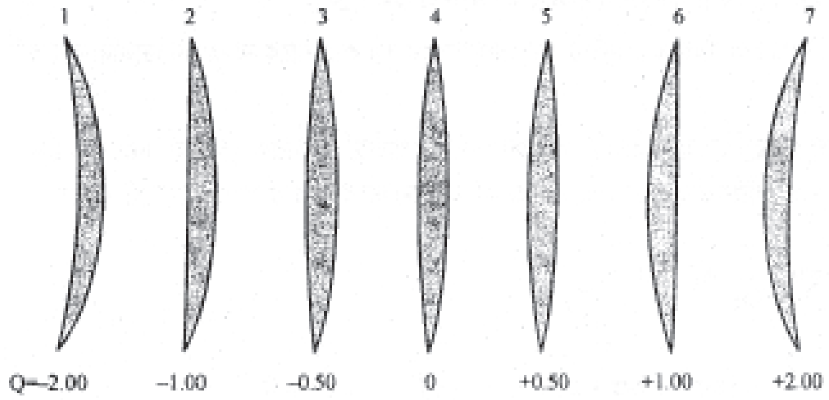
$\sigma = \dfrac{r_1}{r_2} = -\dfrac{1}{6}$ । n = 2.0 হলে $\sigma = \dfrac{1}{5}$ ।

প্রথম ক্ষেত্রে σ ঋণাত্মক রাশি সুতরাং লেন্সটি উভোত্তল বা উভাবতল নিতে হবে। লেন্সের যে তল আলোর দিকে মুখ করে থাকবে তার বক্রতা ব্যাসার্ধ অপর তলের এক ষষ্ঠাংশ অর্থাৎ যে তলের বক্রতা বেশি সেই তলটিকে আলোর দিকে রাখতে হবে।

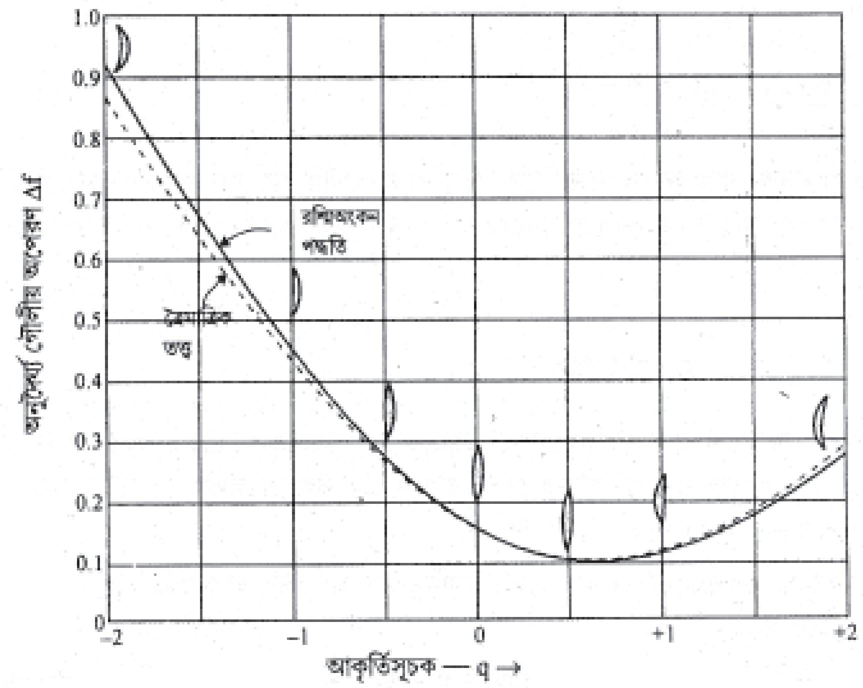
দ্বিতীয় ক্ষেত্রে σ ধনাত্মক রাশি এবং লেন্সটি মেনিস্‌কাস আকৃতির হবে। উভয় ক্ষেত্রেই অধিক বক্রতার তলটি আলোর দিকে থাকবে।

যে লেন্সের তলগুলির বক্রতা ন্যূনতম গোলীয় অপেরণের শর্ত পালন করে তাকে **ক্রস্‌ড্ লেন্স** (crossed lens) বলে।

কোন লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে গোলীয় অপেরণ কিভাবে আকৃতিসূচক (q) এর সঙ্গে পরিবর্তিত হয় আমরা সে বিষয়টি একটি উদাহরণের সাহায্যে আলোচনা করব। একটি অভিসারী লেন্স নেওয়া হ'ল যার ফোকাস দৈর্ঘ্য f = 10 cm, n = 1.5 এবং উন্মেষ h = 1 cm। লেন্সের উভয়তলের ব্যাসার্ধ r_1, r_2 কে এমনভাবে পরিবর্তিত করা হবে যে f অপরিবর্তিত থাকে। ইতিপূর্বে 3.24 সূত্রে ত্রৈমাত্রিক তত্ত্বে কিছু আসন্নায়নের পর পাতলা লেন্সে গোলীয় অপেরণের পরিমাপ জানা গেছে। সারণি 1 এ বিভিন্ন আকৃতির অভিসারী লেন্সে f অপরিবর্তিত রেখে Δf এর মান লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। 3.24 অনুযায়ী গণনার ফল ছাড়াও তুলনা করার জন্য আমরা রশ্মি অঙ্কন পদ্ধতি ও ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব অনুযায়ী কোন আসন্নায়ন না করে গণনার ফলও লিপিবদ্ধ করেছি। সারণি থেকে দেখা যাচ্ছে যে 3.24 সূত্র অনুযায়ী Δf গণনার মান অন্য পদ্ধতি থেকে সামান্য বেশি। চিত্র 3.4 এ বিভিন্ন q এর জন্য অভিসারী লেন্সের আকৃতি এবং চিত্র 3.5 এ Δf এর সঙ্গে q এর পরিবর্তন দেখান হয়েছে।



চিত্র 3.4



চিত্র 3.5

সারণি1 : গোলীয় অপেরণ Δf এর মান f অপরিবর্তিত রেখে লেন্সের বিভিন্ন আকৃতি q এর জন্য
$f = 10$ cm, $h = 1$ cm, $n = 1.5$

লেন্সের আকৃতি	r_1	r_2	σ	q	Δf (cm)		
					রশ্মি অঙ্কন পদ্ধতি	ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব (আসন্নায়ন না করে)	ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব আসন্নায়নসহ (3.24 অনুযায়ী)
1. অবতলোত্তল (Concavo-convex)	-10.000	-3.333	3	-2.00	0.92	0.88	.97
2. সমতলোত্তল (Plano-convex)	∞	-5.000	∞	-1.00	0.45	43	45
3. উভোত্তল (Double-convex)	20.000	-6.666	-3	-0.50	0.26	0.26	.28
4. সমোত্তল (Equi-convex)	10.000	-10.000	-1	0	0.15	0.15	.167
5. উভোত্তল (Double-convex)	6.666	-20.000	$-\frac{1}{3}$	+0.50	0.10	0.10	.113
6. সমতলোত্তল (Plano-convex)	5.000	∞	0	1.00	0.11	0.11	.117
7. অবতলোত্তল (Concavo-convex)	3.333	10.000	$+\frac{1}{3}$	+2.00	0.27	0.29	.30

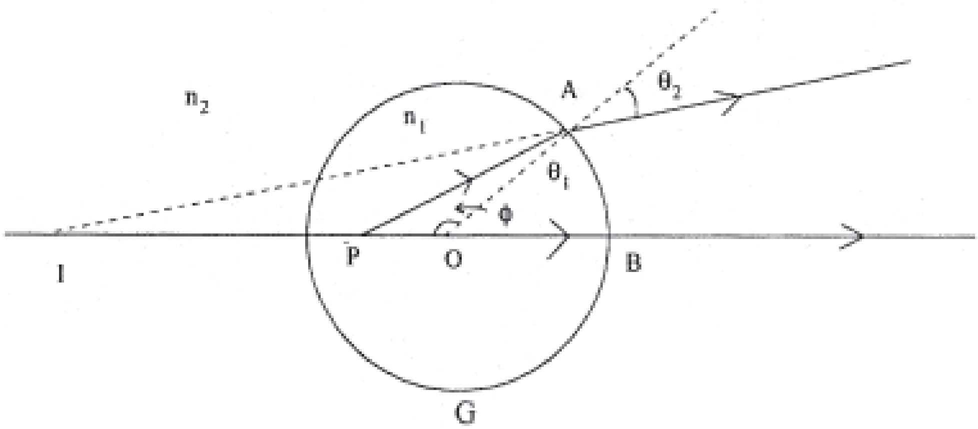
$q = +.714$ এ গোলীয় অপেরণ ন্যূনতম হয় অর্থাৎ এটি হ'ল বর্তমান উদাহরণে ক্রসড লেন্সের আকৃতি। একই ফোকাস দৈর্ঘ্যের একটি সমতলোত্তল লেন্সের অধিকতর বক্রতার তলকে যদি আলোর দিকে মুখ করে ব্যবহার করা হয় ($q = 1.0$) তবে এই লেন্সের গোলীয় অপেরণ ক্রসড লেন্স থেকে সামান্য বেশি হবে। কিন্তু লেন্সটিকে উল্টে দিয়ে যদি বসানো হয় ($q = -1.0$) অর্থাৎ সমতলটিকে আলোর দিকে মুখ করে তাহলে গোলীয় অনেকটাই বেশি হবে। এখান থেকে আমরা একটা নিয়ম দেখতে পাই তা হ'ল এই যে আলোর চ্যুতি লেন্সের উভয় তলেই যতটা সম্ভব সমভাবে ভাগ করে দিলেই গোলীয় অপেরণকে কমানো যায়। সারণি 1 থেকে অন্যান্য লেন্সের ক্ষেত্রেও এই নিয়ম কার্যকরী দেখা যাচ্ছে। কোন লেন্সের অধিকতর বক্রতার তলকে আলোর দিকে মুখ করে রাখলে গোলীয় অপেরণ তুলনামূলকভাবে কম হয়।

গোলীয় অপেরণ সম্পূর্ণভাবে দূর করতে হলে লেন্সের একটি বা উভয়তলকেই বিভিন্ন বলয় অনুযায়ী ঘষে প্রয়োজন অনুসারে বিভিন্ন বক্রতায় আনতে হবে। এই ব্যবস্থা যথেষ্ট ব্যয়সাপেক্ষ। কেবলমাত্র বিশেষ প্রয়োজনেই কোন আলোকতন্ত্রে এই ব্যবস্থা নেওয়া হয়। এ-ছাড়া এই ধরনের লেন্স কেবলমাত্র কোন নির্দিষ্ট লক্ষ্যবস্তুর দূরত্বের জন্যই গোলীয় অপেরণ দূর করতে পারে অন্য দূরত্বের জন্য নয়। সাধারণত বিভিন্ন ব্যবহারের জন্য গোলীয় তলযুক্ত লেন্স নেওয়া হয় এবং উভয়তলের বক্রতা এমনভাবে স্থির করা হয় যে গোলীয় অপেরণ খুবই কম হয়।

3.2.3 গোলীয় তলের অবিপথী বিন্দুর অবস্থান

গোলীয় অপেরণের প্রসঙ্গে স্বাভাবিকভাবেই **অবিপথী তলের** (Aplanatic surface) উল্লেখ করা প্রয়োজন। এই তলের বিশেষত্ব হ'ল যে দু'টি বিন্দু যাদের **অবিপথী বিন্দু** (Aplanatic point) বলা হবে তার মধ্যে একটিতে বিন্দুবস্তু রাখলে অপর বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠিত হবে। এক্ষেত্রে প্রতিবিম্ব গঠন করার জন্য উপাক্ষীয় বা উপাক্ষীয় নয় এমন সমস্ত রশ্মির জন্যই প্রতিবিম্বের অবস্থান একই থাকবে। এই আলোচনা থেকে আপনি নিশ্চয়ই বুঝতে পারছেন যে এই দুটি বিন্দুর জন্য প্রতিবিম্ব গঠনে কোন গোলীয় অপেরণ থাকবে না।

আমরা এবার গোলীয় তলের অবিপথী বিন্দুর অবস্থান নির্ণয় করব। মনে করি G একটি কাঁচের গোলক (চিত্র 3.6) যার প্রতিসরাঙ্ক n_1 এবং ব্যাসার্ধ r। O কেন্দ্রবিন্দু। কাঁচের গোলকটি যে মাধ্যমে রয়েছে তার প্রতিসরাঙ্ক n_2 এবং ধরে নিন $n_1 > n_2$। গোলকের অভ্যন্তরে P বিন্দু থেকে আলোকরশ্মি গোলকের ওপর A বিন্দুতে θ_1 কোণে



চিত্র 3.6

আপতিত হয়ে θ_2 কোণে প্রতিসৃত হচ্ছে। PB অপর একটি রশ্মি গোলীয়তলে B বিন্দুতে লম্বভাবে আপতিত হয়েছে এবং কোন বিচ্যুতি ছাড়াই প্রতিসৃত হয়েছে। এই দুটি রশ্মিকে পিছনের দিকে প্রসারিত করলে I বিন্দুতে মিলিত হবে। I হল P বিন্দুবস্তুর অসৎ বিম্ব। এখন স্নেলের সূত্র অনুযায়ী

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2, \ \angle AOP = \phi$$

$$\therefore \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

ΔAPO এ $\frac{PO}{\sin\theta_1} = \frac{AP}{\sin\phi}$, অর্থাৎ $\frac{u}{\sin\theta_1} = \frac{AP}{\sin\phi}$, এখানে PO = u

$AP^2 = PO^2+OA^2-2\ PO.OA\ \cos\phi = u^2+r^2-2ur\ \cos\phi$

$$\therefore \frac{u^2}{\sin^2\theta_1} = \frac{AP^2}{\sin^2\phi} = \frac{u^2+r^2-2ur\cos\phi}{\sin^2\phi}$$

$$\therefore \frac{\sin^2\phi}{\sin^2\theta_1} = \frac{u^2+r^2-2ur\cos\phi}{u^2}$$

ΔAIO এ $\frac{IO}{\sin\theta_2} = \frac{IA}{\sin\phi}$, যেখানে IO = v

$$\therefore \frac{v}{\sin\theta_2} = \frac{IA}{\sin\phi}$$

$$\therefore IA^2 = IO^2 + OA^2 - 2IO.OA\ \cos\phi$$

$$= v^2 + r^2 - 2vr\ \cos\phi$$

$$\frac{v^2}{\sin^2\theta_2} = \frac{IA^2}{\sin^2\phi} = \frac{v^2+r^2-2vr\ \cos\phi}{\sin^2\phi}$$

$$\frac{\sin^2\phi}{\sin^2\theta_2} = \frac{v^2+r^2-2vr\ \cos\phi}{v^2}$$

(3.37) কে (3.36) দিয়ে ভাগ করে আমরা পাই,

$$\frac{\sin^2\theta_1}{\sin^2\theta_2} = \frac{v^2+r^2-2vr\cos\phi}{v^2} \times \frac{u^2}{u^2+r^2-2ur\cos\phi}$$

$$\therefore n^2\left(\frac{u^2+r^2-2ur\cos\phi}{u^2}\right) = \frac{v^2+r^2-2vr\cos\phi}{v^2}$$

বা, $n^2\left(1+\frac{r^2}{u^2}\right)-\left(1+\frac{r^2}{v^2}\right)=\cos\phi\left(2\frac{r}{u}n^2-\frac{2r}{v}\right)$ ....(3.27)

P থেকে নির্গত সমস্ত রশ্মির জন্যই I এর অবস্থান অপরিবর্তিত থাকতে হ'লে 3.27 সমীকরণটিকে ϕ নিরপেক্ষ হ'তে হবে। এই শর্ত হ'ল $\frac{2r}{u}n^2-\frac{2r}{v}=0$

অর্থাৎ $\frac{n^2}{u}=\frac{1}{v},\ u=n^2v$ ....(3.28)

(3.27) ও (3.28) থেকে আমরা পাই,

$$n^2\left(1+\frac{r^2}{u^2}\right)=1+\frac{r^2}{v^2}$$

$$\left(n^2-1\right)+\frac{n^2r^2}{n^4v^2}-\frac{r^2}{v^2}=0$$

বা, $\left(n^2-1\right)+\frac{r^2}{v^2}\left(\frac{1}{n^2}-1\right)=0$

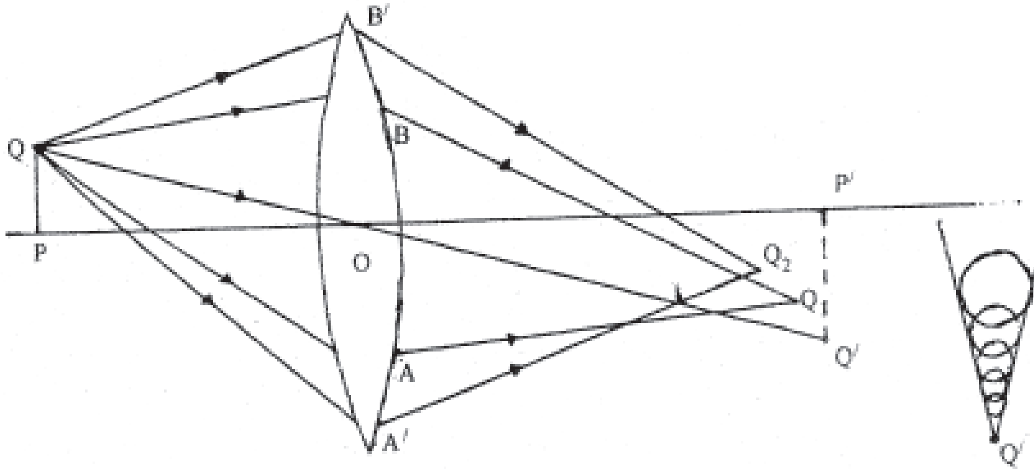
বা, $\left(n^2-1\right)\left[1-\frac{r^2}{n^2v^2}\right]=0$

$\therefore n^2v^2=r^2,\ v=\frac{r}{n}$ ......(3.29 a)

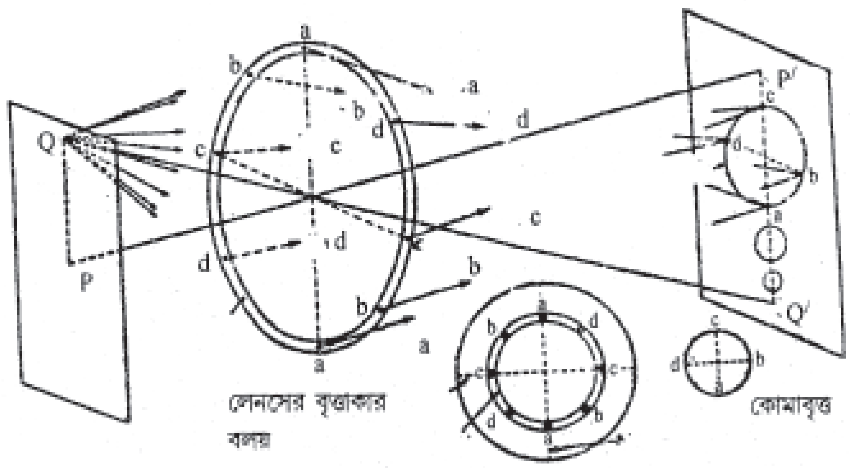
$\therefore u=n^2v=n^2\frac{r}{n}=nr$ ....(3.29 b)

এখানে $n<1$, সুতরাং $u<r$ এবং $v>r$।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে আমরা দেখলাম যে কোন গোলীয় তলের দু'টি অবিপথী বিন্দু আছে যাদের অবস্থান কেন্দ্রের একদিকে এবং কেন্দ্র থেকে দূরত্ব হ'ল $\frac{n_2}{n_1}r$ ও $\frac{n_1}{n_2}r$ কাঁচের গোলকের দুই অবিপথী বিন্দুকে ব্যবহার করে উচ্চক্ষমতাসম্পন্ন তৈল নিমজ্জিত অভিলক্ষ্য (Oil inmersion objective) গঠন করা সম্ভব হয়েছে।



চিত্র 3.7 ঋণাত্মক কোমা



চিত্র 3.8

এই চিত্রে কোমার উৎপত্তি বিশদভাবে দেখান হয়েছে। লেন্সের প্রতিটি বলয় বৃত্তাকার প্রতিবিম্ব বা কোমাবৃত্ত গঠন করছে। চিত্রে লেন্সের একটি বলয়ের কেন্দ্রের চারপাশে অবস্থিত ব্যাসের প্রান্ত বিন্দুদ্বয় যেমন (a,a) দিয়ে প্রতিসরিত আলোকরশ্মি কোমাবৃত্তের a বিন্দুতে প্রতিবিম্ব সৃষ্টি করছে। একই ভাবে প্রান্তবিন্দু দ্বয় (b,b), (c,c), (d,d) ইত্যাদি দিয়ে প্রতিসরিত আলোকরশ্মি যথাক্রমে কোমাবৃত্তের b, c, d বিন্দুতে মিলিত হচ্ছে। এভাবে উত্তরোত্তর বৃহত্তর ব্যাসার্ধের কোমা বৃত্তের উপরিস্থাপনের দ্বারা কোমার সৃষ্টি হয়।

3.3 কোমা (Coma)

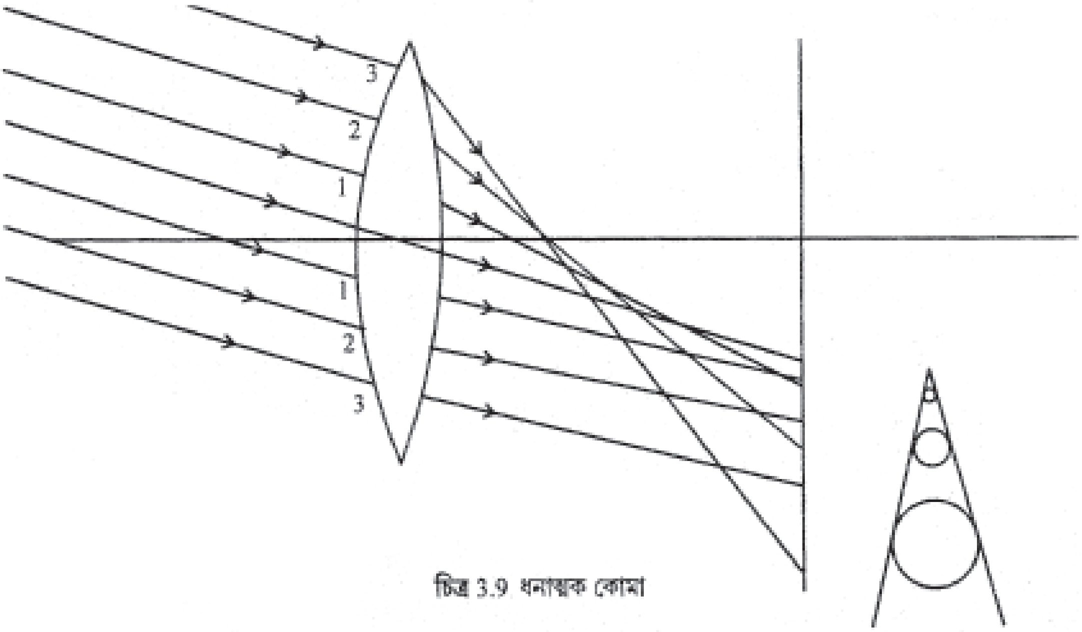
গোলীয় অপেরণের আলোচনার সময় আমরা দেখেছি যে আলোকতন্ত্র এই অপেরণ থেকে মুক্ত হলে অক্ষরেখার ওপরে কোন বিন্দু থেকে উপাক্ষীয় ও অউপাক্ষীয় সব রশ্মিই প্রতিসরণের পর অক্ষরেখার ওপরে একটি বিন্দুতে

প্রতিবিম্ব গঠন করবে। কিন্তু বিন্দু যদি অক্ষরেখার ঠিক ওপরে না থেকে নিকটে থাকে তা'হলে গোলীয় অপেরণ না থাকলেও দেখা যাবে যে বিন্দু থেকে আগত বিভিন্ন রশ্মি প্রতিসরণের পর এক বিন্দুতে মিলিত না হয়ে কিছুটা অস্পষ্ট প্রতিবিম্ব সৃষ্টি করছে। প্রতিবিম্ব গঠনে এই ত্রুটির নাম দেওয়া হয়েছে **কোমা**। এই বিষয়ে আলোচনা করার সময় আমরা ধরে নেব যে আলোকতন্ত্রে কোমা ছাড়া গোলীয় অপেরণ বা অন্য কোন অপেরণ নেই।

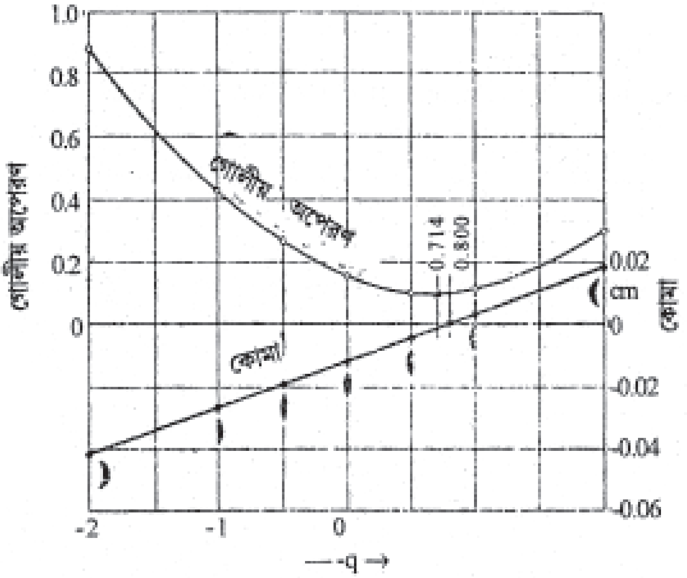
3.7 চিত্রে PQ একটি রৈখিক লক্ষ্য বস্তু। O বিন্দু লেন্সের কেন্দ্র এবং POP' সেটির অক্ষরেখা। Q বিন্দু অক্ষরেখা থেকে অল্প দূরে আছে। লেন্স L এর উন্মেষ পুরো খোলা আছে। Q বিন্দুর উপাক্ষীয় প্রতিবিম্ব হ'ল QOQ' অক্ষের ওপরে Q' বিন্দু। Q থেকে উপাক্ষীয় নয় এমন দুটি রশ্মি QA ও QB, QOQ' এর উভয় দিকে একই কোণ করে নির্গত ধরা হ'ল। কিন্তু এই দু'টি রশ্মি লেন্স L এর সাপেক্ষে প্রতিসম নয়। QB এর তুলনায় QA আরও বড় কোণে লেন্সে আপতিত হওয়ায় তার চ্যুতি আরও বেশি হবে এবং এই দু'টি রশ্মি Q' বিন্দুতে মিলিত না হয়ে তার আগে ও ওপরে Q_1 বিন্দুতে মিলিত হবে। একইভাবে দু'টি প্রান্তিক রশ্মি QA' ও QB', QOQ' থেকে আরও দূরে এবং Q_1 এর বামে অবস্থিত Q_2 বিন্দুতে মিলিত হবে। এভাবে প্রান্তিক ও উপাক্ষীয় রশ্মির মধ্যবর্তী আরও অনেক রশ্মির কল্পনা করা যায় যাদের প্রতিবিম্ব $Q'Q_2$ এর মধ্যে এবং Q' এর বামে অবস্থিত হবে। মনে করি Q' এর মধ্যে দিয়ে POP' এর ওপর লম্বভাবে কোন পর্দা রাখা হয়েছে। Q বিন্দু থেকে নির্গত রশ্মিগুচ্ছের একটি শঙ্কু লেন্সের একটি বৃত্তাকার বলয়ের মধ্যে দিয়ে যাবে এবং ঐ পর্দায় বৃত্তাকার প্রতিবিম্ব গঠন করবে। ত্রিমাত্রিক অবস্থানের সাহায্যে বৃত্তাকার প্রতিবিম্ব কিভাবে গঠিত হয় তা 3.8 চিত্রে বিশদভাবে দেখানো হয়েছে। Q বিন্দু থেকে নির্গত বিভিন্ন রশ্মির শঙ্কু ধরলে এই শঙ্কুর শীর্ষ কোণ যত বড় হবে পর্দায় বৃত্তাকার প্রতিবিম্বও তত বড় হবে। এভাবে Q' বিন্দু প্রতিবিম্ব থেকে শুরু করে POP' অক্ষরেখার দিকে ক্রমশ বৃহত্তর বৃত্তাকার প্রতিবিম্ব গঠিত হবে এবং এই সব প্রতিবিম্ব উপরিস্থাপনের ফলে পর্দায় ডিম্বাকৃতি বা ধূমকেতু সদৃশ আলোকছটা দেখা যাবে। এইআলোকছটার শীর্ষবিন্দু Q' খুব উজ্জ্বল দেখাবে। অনেকটা ধূমকেতুর মত চেহারার জন্য এই অপেরণকে **কোমা** নামে অভিহিত করা হয়। (ইংরাজীতে comet শব্দের অর্থ ধূমকেতু)। চিত্র 3.7 ও চিত্র 3.8 এ কোমা অপেরণের উৎপত্তি দেখানো হয়েছে।

কোমার পুচ্ছ অক্ষরেখা POP' এর দিকে বিস্তৃত হলে সেই কোমাকে ঋণাত্মক এবং পুচ্ছ POP' অক্ষরেখা থেকে দূরে বিস্তৃত হলে সেই কোমাকে ধনাত্মক বলা হয়। 3.7 চিত্রে ঋণাত্মক কোমা ও 3.9 চিত্রে ধনাত্মক কোমা দেখানো হয়েছে। অন্যান্য অপেরণের উপস্থিতিতে প্রতিবিম্বে কোমার ত্রুটি ততটা সুস্পষ্টভাবে দেখা যায় না সত্য কিন্তু এই অপেরণে প্রতিবিম্বের অপ্রতিসম (Unsymmetrical) প্রকৃতির জন্য দূরবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্যে (Objective), বড় উন্মেষের ক্যামেরা লেন্স বা অনুবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্যে বিশেষ সমস্যার সৃষ্টি করে যা দূর করা বিশেষ প্রয়োজন।

কোমা দূর করার বিষয়ে অ্যাবের সাইন শর্ত (Abbe's sine condition) বিশেষ কার্যকরী। অ্যাবে অনুসন্ধান করে দেখলেন যে অক্ষরেখার ওপর একটি ছোট লক্ষ্যবস্তু থেকে আলো লেন্সের বিভিন্ন বৃত্তাকার বলয়ের মধ্যে দিয়ে গিয়ে প্রতিবিম্ব গঠন করার সময় প্রতিবিম্বের বিবর্ধন অক্ষরেখা থেকে বলয়ের দূরত্বের ওপর নির্ভর করে এবং এই ভাবে কোমার সৃষ্টি হয়। ধনাত্মক কোমার ক্ষেত্রে লেন্সের বাইরের বলয়ের মধ্যে দিয়ে যাওয়া আলোকরশ্মির বিবর্ধনের মান কেন্দ্রীয় অঞ্চলে সীমাবদ্ধ বলয়ের তুলনায় বেশি হয়। ঋণাত্মক কোমার ক্ষেত্রে উল্টোটাই দেখা যায়। যদি প্রতিবিম্বের বিবর্ধন সব বৃত্তাকার বলয়ের জন্যই এক রাখা যায় তবে প্রতিবিম্বে কোমা দেখা যাবে না।



চিত্র 3.9 ধনাত্মক কোমা



চিত্র 3.10 গোলীয় অপেরণ ও কোমার গ্রাফের তুলনা বিভিন্ন আকৃতির লেন্সের জন্য

কোমা পরিমাপ করার তাত্ত্বিক আলোচনায় না গিয়েও আমরা এ-বিষয়ে একটা ধারণা দেওয়ার চেষ্টা করব। কোমার পুচ্ছের দৈর্ঘ্য কত তা থেকে কোমার পরিমাপ করা যায়। ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব অনুযায়ী কোমার পুচ্ছের দৈর্ঘ্য হ'ল—

$$L_C = \frac{3dh^2}{f^3}(Ap + Bq) \qquad \text{.......(3.30)}$$

এখানে d হ'ল লেন্সের অক্ষরেখা থেকে কোমার শীর্ষবিন্দুর দূরত্ব। h = লেনসের উন্মেষ, f = ফোকাস দৈর্ঘ্য।

p হ'ল অবস্থান সূচক (position factor) এবং এর সংজ্ঞা হ'ল $p = \frac{S' - S}{S' + S}$ এখানে S লক্ষ্যবস্তুর দূরত্ব ও S' প্রতিবিম্বের দূরত্ব। q লেন্সের আকৃতি সূচক যার সংজ্ঞা আগেই দেওয়া হয়েছে। 3.30 এ A ও B হ'ল

$$A = \frac{3(2n+1)}{4n} \quad B = \frac{3(n+1)}{4n(n-1)}$$

এখানে n = লেন্স মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক। চিত্র 3.10 এ কোমা কিভাবে q এর ওপর নির্ভর করে তা' গ্রাফ দিয়ে দেখানো হয়েছে। তুলনার জন্য গোলীয় অপেরণের গ্রাফও দেওয়া হয়েছে।

এই উদাহরণে অক্ষরেখার সঙ্গে সূক্ষ্মকোণে সমান্তরাল রশ্মি লেন্সে আপতিত হচ্ছে। এখানে f = 10 cm, h = 1 cm, d = 2 cm, n = 1.5 সমান্তরাল রশ্মির জন্য S = ∞ এবং S' = f। সুতরাং p = -1 সারণি 2 তে q এর বিভিন্ন মানের জন্য 3.30 অনুযায়ী কোমার পরিমাপ করা হয়েছে এবং চিত্র 3.10 এ ঐ মান নিয়ে গ্রাফ অঙ্কন করা হয়েছে। এখানে লক্ষণীয় যে q = 0.800 এ কোমার মান শূন্য এবং q = 0.714 এ গোলীয় অপেরণ সবচেয়ে কম। সুতরাং যে আকৃতির লেন্স ব্যবহার করে কোমা শূন্য হবে ঐ আকৃতিতে গোলীয় অপেরণও প্রায় ন্যূনতম ধরা যেতে পারে।

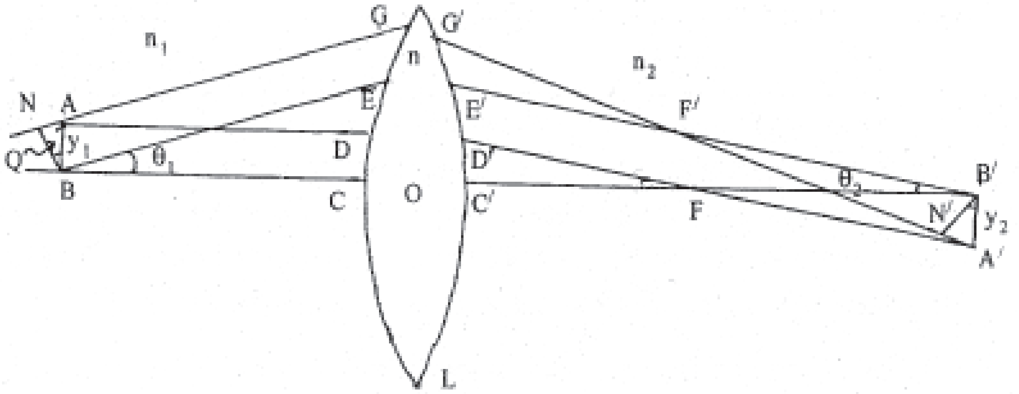
সারণি 2. লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে আকৃতি সূচকের বিভিন্ন মানের জন্য কোমার পরিমাপ।

f = 10 cm, h = 1 cm, n = 1.5, d = 2 cm

লেনসের আকৃতি	r_1	r_2	q	কোমা (cm)
1. অবতলোত্তল	-10.000	-3.333	-2.0	-0.0420
2. সমতলোত্তল	∞	-5.000	-1.00	-0.0270
3. উভোত্তল	20.000	-6.666	-0.50	-0.0195
4. সমোত্তল	10.000	-10.000	0	-0.0120
5. উভোত্তল	6.666	-20.000	+0.50	-0.0045
6. সমতলোত্তল	5.000	∞	1.00	+0.0030
7. অবতলোত্তল	3.333	10.000	+2.0	+0.0180

3.3.1 অ্যাবের সাইন শর্ত

অ্যাবের সাইন শর্ত থেকে আমরা পাই কোন্ অবস্থায় কোনও ছোট লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্বের অনুপ্রস্থ বিবর্ধন লেন্সের বিভিন্ন বলয়ের মধ্যে দিয়ে যাওয়া আলোকরশ্মির জন্য একই হবে। অর্থাৎ প্রতিবিম্বে কোন কোমা অপেরণ থাকবে না।



চিত্র 3.11

AB একটি ছোট লক্ষ্যবস্তু অক্ষরেখা BOB' এর ওপর লম্বভাবে অবস্থিত। অবতল লেন্স L, AB এর প্রতিবিম্ব A'B' গঠন করেছে। B থেকে আগত BEE' B' ও BCC' B' রশ্মি B' বিন্দুতে মিলিত হয় এবং A থেকে আগত AGG' A' এবং ADD' A' রশ্মি A' বিন্দুতে মিলিত হয়। B' হ'ল B বিন্দুর প্রতিবিম্ব এবং A' হ'ল A বিন্দুর প্রতিবিম্ব। এখানে AD ও BC রশ্মি সমান্তরাল এবং AG ও BE রশ্মি সমান্তরাল। BE ও E'B' রশ্মিদ্বয় অক্ষরেখার সঙ্গে যথাক্রমে θ_1 ও θ_2 কোণে আনত।

n_1, n ও n_2 যথাক্রমে লক্ষ্যালোক, লেন্স L ও বিম্বলোকের মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক। B ও তার প্রতিবিম্ব B' এর মধ্যে বিভিন্ন রশ্মির আলোকপথ সমান হবে। এই শর্ত প্রয়োগ করে পাওয়া যায়

$$n_1 BA \sin\theta_1 = n_2 B'A' \sin\theta_2$$

অথবা, $n_1 y_1 \sin\theta_1 = n_2 y_2 \sin\theta_2$ $(AB = y_1, A'B' = y_2)$ ..... (3.31)

$\therefore$ অনুপ্রস্থ বিবর্ধন $\dfrac{y_2}{y_1} = \dfrac{n_1 \sin\theta_1}{n_2 \sin\theta_2}$ ......(3.32)

3.32 থেকে প্রমাণ হল যে ক্ষুদ্র লক্ষ্যবস্তুর ক্ষেত্রে অনুপ্রস্থ বিবর্ধন লক্ষ্যালোকে লক্ষ্যবস্তুর অক্ষের ওপরে অবস্থিত বিন্দু থেকে নির্গত রশ্মির অক্ষের সঙ্গে কোণের সাইন ($\sin\theta_1$) ও বিম্বলোকে নির্গত রশ্মির অক্ষের সঙ্গে কোণের সাইন ($\sin\theta_2$) এর অনুপাতের ওপর নির্ভর করে। উপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে 3.31 এ θ_1, θ_2 এর মান ক্ষুদ্র হবে এবং তখন $\sin\theta_1 = \theta_1$ ও $\sin\theta_2 = \theta_2$ ধরা যেতে পারে। সেক্ষেত্রে $n_1 y_1 \theta_1 = n_2 y_2 \theta_2$ হবে যা হল পূর্বে আলোচিত লাগাঞ্জের সূত্র। 3.32 থেকে আমরা দেখছি যে উপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে বিবর্ধন ও অউপাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে বিবর্ধন যদি একই রাখতে হয় তবে প্রয়োজনীয় শর্ত হ'ল,

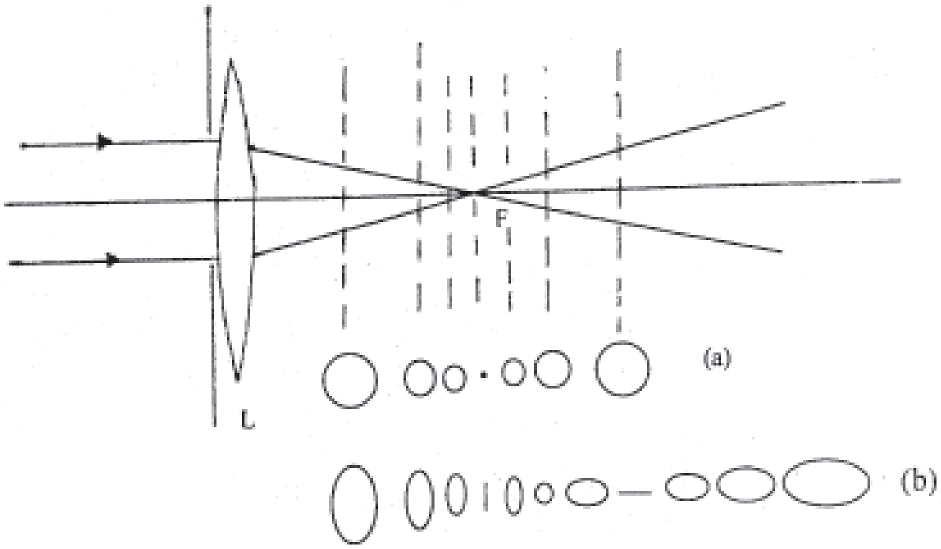
$\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} =$ ধ্রুবক। ......(3.33)

এই শর্তকে বলা হয় সাইন শর্ত। এই শর্ত সিদ্ধ হ'লে অনুপ্রস্থ বিবর্ধন আলোকরশ্মি লেনসের কোন বলয়ের মধ্য দিয়ে গিয়ে প্রতিবিম্ব গঠন করছে তার ওপর নির্ভর করবে না।

3.4 অবিন্দুকত্ব (Astigmatism)

কোন আলোকতন্ত্র প্রথম দুটি অপেরণ অর্থাৎ গোলীয় অপেরণ ও কোমা থেকে মুক্ত হ'লে অক্ষরেখার ওপর বা তার নিকটে অবস্থিত লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব সুস্পষ্ট হবে। কিন্তু লক্ষ্যবস্তু অক্ষরেখা থেকে আরও দূরে থাকলে প্রতিবিম্বের ত্রুটি দেখা যাবে। এক্ষেত্রে কোন বিন্দু লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব পর্দায় ফেলা হ'লে দেখা যাবে যে পর্দার অবস্থানের ওপর নির্ভর করে এই প্রতিবিম্ব বৃত্তাকার, উপবৃত্তাকার, রেখাকৃতি ইত্যাদি বিভিন্ন রূপ নেয় কিন্তু কখনই একটি বিন্দু হয় না। সঙ্গত কারণেই এই অপেরণকে বলা হয় **অবিন্দুকত্ব** (Astigmatism) বা **একবিন্দু না হওয়া**।

এবার এই অপেরণের উদ্ভব কিভাবে হয় দেখা যাক। প্রথমে একটি সহজ পরীক্ষা করা যাক। একটি উভ-উত্তল লেন্স নেওয়া হ'ল। লেন্সকে পর্দা দিয়ে ঢেকে সমাক্ষ (co-axial) বৃত্তাকার ছিদ্র করা হয়েছে। যদি অক্ষের সমান্তরাল রশ্মি এই লেন্সের ওপর ফেলা হয় তা'হলে লেন্সের মধ্যে দিয়ে প্রতিসৃত রশ্মিগুচ্ছের প্রস্থচ্ছেদ বৃত্তাকার হবে। লেন্সের অপর দিকে ঘষা কাঁচ পর্দা হিসাবে রাখলে দেখা যাবে যে পর্দা যদি লেন্সের কাছে থেকে ক্রমশ দূরে সরানো হয় (চিত্র 3.12) তা'হলে বৃত্তাকার আলোকচ্ছটা দেখা যাবে যার ব্যাসার্ধ কমতে কমতে একটি বিন্দু F হয়ে আবার বাড়তে থাকবে। F বিন্দু হ'ল সুস্পষ্ট ফোকাস বিন্দু।

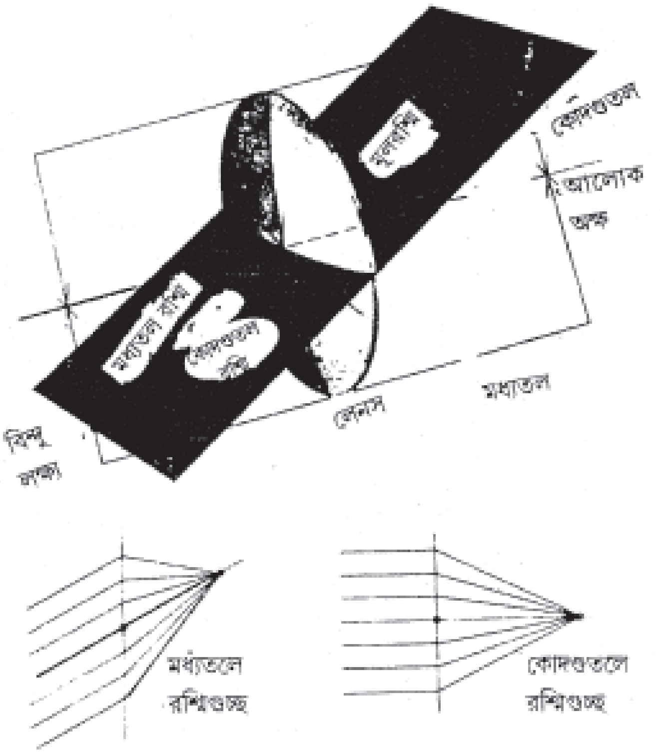


চিত্র 3.12

এখন যদি লেন্সকে অক্ষরেখার সাপেক্ষে কিছুটা কাত ক'রে বসানো হয় তা'হলে নির্গত রশ্মিগুচ্ছের প্রস্থচ্ছেদ সাধারণভাবে উপবৃত্তাকার রূপ নেবে। এক্ষেত্রে পর্দা বিভিন্ন অবস্থানে রাখলে প্রতিবিম্বের চেহারা কি হবে? পর্দার একটি বিশেষ অবস্থানে বৃত্তাকার আলোকচ্ছটা দেখা যাবে। পর্দার দু'টি পৃথক অবস্থানে উপবৃত্তাকার আলোকচ্ছটা পরিবর্তিত হয়ে দু'টি পরস্পর লম্ব সরলরেখা বা ফোকাস রেখায় পরিণত হবে। পর্দার কোন অবস্থানেই নির্গত রশ্মি একটি বিন্দু প্রতিবিম্ব হবে না। লেন্সকে আরও কাত করলে দু'টি পরস্পর লম্ব ফোকাস রেখার মধ্যে দূরত্ব বেড়ে যাবে।

এই প্রাথমিক বর্ণনার পর আমরা অবিন্দুকত্ব সম্পর্কে আরও বিশদভাবে আলোচনা করব। আলোচনার সুবিধার জন্য আমরা দু'টি তলের কল্পনা করতে পারি। একটি হ'ল **মধ্যতল** (meridional plane) যা মূলরশ্মি

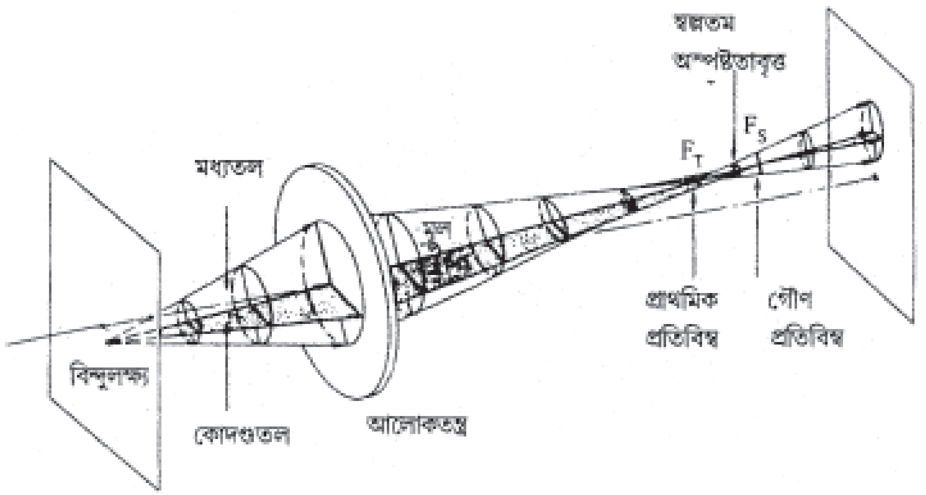
(chief ray) ও আলোক অক্ষের (optic axis) মধ্যে দিয়ে যাওয়া একটি তল। **কোদণ্ড তল** (Sagittal plane) হ'ল মূলরশ্মি দিয়ে যাওয়া কিন্তু মধ্যতলের ওপর লম্বভাবে অবস্থিত তল। কোন লক্ষ্যবিন্দু আলোক অক্ষরেখার



চিত্র 3.13 মধ্যতল ও কোদণ্ডতল

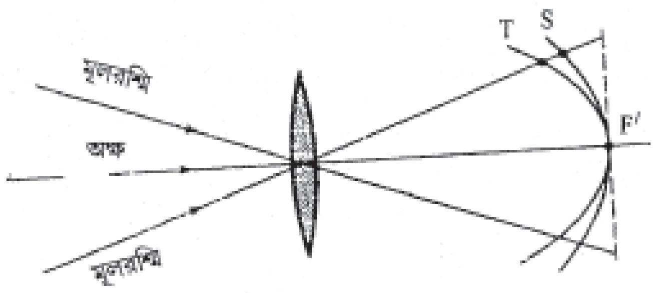
ওপরে থাকলে তা' থেকে নির্গত রশ্মি শঙ্কু লেনসের গোলীয় তলের সাপেক্ষে প্রতিসম হবে। সেই জন্য মধ্যতল ও কোদণ্ডতলের মধ্যে পার্থক্য থাকবে না। আলোক অক্ষরেখা দিয়ে যাওয়া সমস্ত তলেই রশ্মি বিন্যাস একই রকম থাকবে। গোলীয় অপেরণ না থাকলে বিভিন্ন রশ্মির জন্য ফোকাস দৈর্ঘ্য এক হবে এবং বিভিন্ন রশ্মি একই ফোকাস বিন্দুতে মিলিত হবে। কিন্তু সেই তুলনায় তির্যক সমান্তরাল এক গুচ্ছ রশ্মির বিন্যাস মধ্যতল ও কোদণ্ডতলের ক্ষেত্রে এক হবে না ফলে এই দুই তলে ফোকাস দৈর্ঘ্যও আলাদা হবে। মধ্যতলের অন্তর্গত কোন রশ্মি কোদণ্ডতলের অন্তর্গত রশ্মির তুলনায় লেন্সের উপর অধিকতর তির্যক কোণে আপতিত হবে এবং সেই কারণে এই রশ্মির ফোকাস দৈর্ঘ্য কোদণ্ডতলের ফোকাস দৈর্ঘ্য থেকে কম হবে। এই দু'রকম ফোকাস দৈর্ঘ্যের অন্তরকে **অবিন্দুকত্ব অন্তর** বলা হয়। লক্ষ্য বস্তু অক্ষরেখা থেকে যত দূরে থাকবে আপতিত রশ্মি ততই তির্যক হবে এবং অবিন্দুকত্ব অন্তর ততই বেড়ে যাবে। দু'টি ফোকাস দৈর্ঘ্য থাকায় আপতিত রশ্মির শঙ্কুর আকৃতি লেন্সে প্রতিসরণের পর ধীরে ধীরে পরিবর্তিত হয়ে যায়। লেন্সের পর থেকে এই শঙ্কুর প্রস্থচ্ছেদ প্রথমে বৃত্তাকার থেকে শুরু হয়ে ক্রমশ উপবৃত্তাকার আকৃতি নেয়। এই উপবৃত্তের পরাক্ষ (major axis) কোদণ্ডতলে থাকবে। এ-ভাবে মধ্যতল ফোকাস বিন্দু F_T পর্যন্ত রশ্মি শঙ্কুকে বর্ণনা করা যায়। F_T তে উপবৃত্ত একটি রেখায় পরিবর্তিত হয় যাকে বলা হয় প্রধান বা প্রাথমিক প্রতিবিম্ব (Primary image)। F_T-র পর আলোকরশ্মিগুচ্ছ দ্রুত প্রসারিত হ'তে থাকে এবং শেষ পর্যন্ত বৃত্তাকার আকৃতি নেয়। এই অবস্থায় প্রতিবিম্ব একটি বৃত্তাকার আলোকচ্ছটা যা' হ'ল স্বল্পতম অস্পষ্টতার বৃত্ত (Circle of least confusion)। লেন্স থেকে আরও দূরে চলে গেলে রশ্মিগুচ্ছের প্রস্থচ্ছেদ আবার উপবৃত্তে পরিবর্তিত হয়ে

শেষে একটি রেখায় পরিণত হয় যাকে বলা হয় গৌণ (বা অপ্রধান) প্রতিবিম্ব (Secondary image)। এর অবস্থান হ'ল কোদণ্ডতলে কোদণ্ড ফোকাস F_S এর জায়গায়। এই আলোচনায় ধরা হয়েছে যে আলোকতন্ত্রে গোলীয় অপেরণ ও কোমা নেই।



চিত্র 3.14

মধ্যতল ফোকাস বিন্দু F_T ও কোদণ্ডতল ফোকাস বিন্দু F_S এর মধ্যে ব্যবধান অক্ষরেখা থেকে লক্ষ্যবিন্দুর দূরত্বের সঙ্গে উত্তরোত্তর বৃদ্ধি পায়। লক্ষ্য বিন্দুর অবস্থান অনুযায়ী ফোকাস বিন্দুদ্বয় F_T ও F_S দু'টি তল যথাক্রমে T ও S এর ওপর অবস্থিত থাকে।

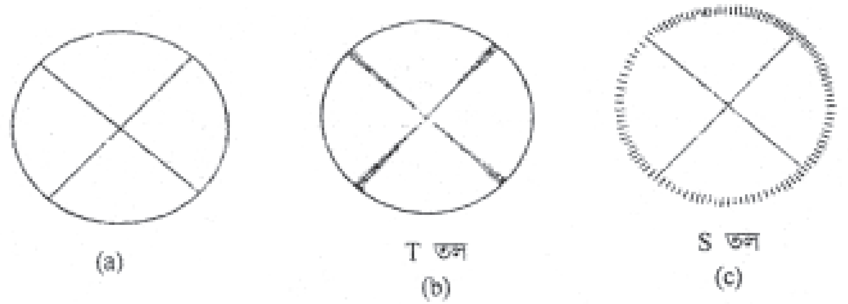


চিত্র 3.15

3.15 চিত্রে T, S ও উপাক্ষীয় প্রতিবিম্বতল দেখানো হয়েছে। অক্ষরেখাসংলগ্ন অঞ্চলে T, S উপাক্ষীয় প্রতিবিম্ব তলের সঙ্গে মিলে যায়। আলোকতন্ত্র অবিন্দুকত্ব থেকে মুক্ত হতে গেলে প্রয়োজনীয় শর্ত হল T ও S তলকে মিলে যেতে হবে। কিন্তু এই দু'টি তল মিলে গেলেও ফোকাস তলের একটি বক্রতা থেকে যায়। এই তলে গঠিত প্রতিবিম্বেও **বক্রতাজনিত** ত্রুটি বর্তমান থাকবে।

প্রতিবিম্ব গঠনে অবিন্দুকত্বের প্রভাব কি বোঝার জন্য একটি সুন্দর উদাহরণ এখানে দেওয়া হ'ল। লক্ষ্যবস্তু হিসাবে একটি চাকা নেওয়া হ'ল যার কেন্দ্র থেকে কয়েকটি দণ্ড পরিধি পর্যন্ত বিস্তৃত। T তলে

কোন বিন্দু লক্ষ্যের প্রতিবিম্ব মধ্যতলের লম্বভাবে একটি ক্ষুদ্র সরলরেখা হবে। এই নিয়ম অনুসারে T তলে চাকার বেড়-এর প্রতিবিম্ব স্পষ্ট দেখা যাবে। কিন্তু দণ্ডগুলি কিছুটা অস্পষ্ট হবে কারণ দণ্ডের ওপর কেন্দ্র থেকে দূরত্ব অনুযায়ী প্রত্যেক বিন্দুর প্রতিবিম্ব ক্ষুদ্র সরলরেখার অংশ হবে। S- তলে দণ্ডগুলির প্রতিবিম্ব স্পষ্ট হবে কিন্তু বেড়ের প্রতিবিম্ব অস্পষ্ট হবে। এখানে আবার বেড়ের প্রত্যেক বিন্দুর জন্য প্রতিবিম্ব ক্ষুদ্র সরলরেখা হবে।



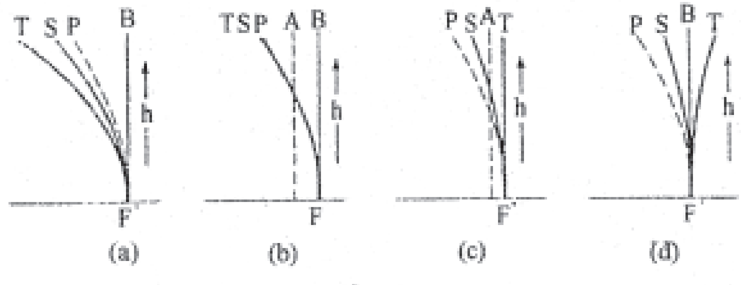
চিত্র 3.16 (a) লক্ষ্যবস্তু একটি দণ্ডযুক্ত চাকা যার কেন্দ্র অক্ষরেখার ওপরে আছে (b) এবং (c) তে যথাক্রমে T-তল ও S-তলে প্রতিবিম্বকে দেখানো হয়েছে।

চিত্র 3.16 এই উভয় ক্ষেত্রে কি হ'বে তা' দেখানো হয়েছে।

আলোকতন্ত্রে অবিন্দুকত্ব আলোচনা করার সময় T ও S তলের কথা বলা হয়েছে। এই সঙ্গে আরও একটি তল প্রাসঙ্গিক যাকে পেৎসভাল তল (Petzval surface) নামে অভিহিত করা হয়। হাঙ্গেরীয় গণিতজ্ঞ জোসেফ ম্যাক্স পেৎসভাল (1807-1891) আলোকতন্ত্রে বক্রতার ওপর অনুসন্ধান করতে গিয়ে এই তলের কল্পনা করেন। T ও S তল দুটিই সাধারণভাবে বক্র হয়। যখন এই দু'টি তল মিলে যায় তখন অবিন্দুকত্ব থাকবে না কিন্তু বক্রতা থাকবে এবং এই তলটিই হ'ল পেৎসভাল তল। আমরা এই তলকে P তল বলে উল্লেখ করব।

অবিন্দুকত্ব কমাবার সম্ভাব্য উপায় :

একটি পাতলা লেন্স অথবা পাতলা উত্তল ও অবতল লেন্স যুগ্ম দিয়ে যে প্রতিবিম্ব পাওয়া যায় তাতে অবিন্দুকত্ব অনেকটা থাকে। কিন্তু যদি এর সঙ্গে আরও একটি লেন্স বা রোধক ব্যবহার করা হয় তবে অবিন্দুকত্ব অনেকটাই কমানো সম্ভব। আলোকতন্ত্রে লেন্সগুলির ঠিকমত অবস্থান অথবা রোধকের ঠিকমত ব্যবহার করে T ও S তলের বক্রতার পরিবর্তন করা সম্ভব হয়।



চিত্র 3.17

3.5 বক্রতা (Curvature)

আলোকতন্ত্রে গোলীয় অপেরণ, কোমা ও অবিন্দুকত্ব না থাকলে অর্থাৎ প্রথম তিনটি জাইডেল যোগ (Seidel sum) শূন্য হ'লে অক্ষরেখার বাইরে বিভিন্ন বিন্দুর প্রতিবিম্বও বিন্দু হবে এবং এই বিন্দুগুলি পেৎসভাল তলের ওপর থাকবে। অবিন্দুকত্ব না থাকলেও প্রতিবিম্বের বক্রতা থাকবে। এই অপেরণের জন্য উপাক্ষীয় ফোকাসের মধ্য দিয়ে অক্ষরেখার ওপর লম্বভাবে পর্দা রাখলে দেখা যাবে যে প্রতিবিম্বের কেন্দ্রীয় অংশ সুস্পষ্ট হলেও বাইরের অংশে অস্পষ্ট দেখা যাচ্ছে। ক্যামেরার ক্ষেত্রে উন্নত আলোকচিত্রের জন্য প্রতিবিম্বের বক্রতা কমানো বিশেষ জরুরি। একটি সহজ উপায় হ'ল লেন্সের সামনে উপযুক্ত একটি রোধক বসানো। এ ক্ষেত্রে অবিন্দুকত্ব থাকলেও রোধকের জন্য লক্ষ্যবস্তুর বিভিন্ন বিন্দু থেকে আসা মূলরশ্মি লেন্সের বিভিন্ন অংশ দিয়ে যাওয়ার জন্য বক্রতা কম হয়।

অভিসারী লেন্সের ক্ষেত্রে পেৎসভাল তল লক্ষ্যবস্তুর দিকে থাকে এবং অপসারী লেন্সের জন্য পেৎসভাল তল লক্ষ্যবস্তুর বিপরীত দিকে থাকে। অভিসারী ও অপসারী লেন্সের সুবিধামত যুগ্ম ব্যবহার করে প্রতিবিম্বের বক্রতা দূর করা যেতে পারে।

অক্ষরেখা থেকে y উচ্চতায় পেৎসভাল তলে কোন প্রতিবিম্ব বিন্দু ও উপাক্ষীয় তলের ওপর প্রতিবিম্ব বিন্দুর দূরত্ব গণনা করলে হবে,

$$\Delta x = \frac{y^2}{2}\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{n_i f_i} \qquad ......(3.34)$$

n_i, f_i হ'ল i তম লেন্সের জন্য যথাক্রমে প্রতিসরাঙ্ক ও ফোকাস দৈর্ঘ্য। এখানে m সংখ্যক পাতলা লেন্সের সমন্বয়ে আলোকতন্ত্রটি গঠিত ধরা হয়েছে। 3.34 থেকে দেখা যাচ্ছে যে পেৎসভাল তল বিভিন্ন লেন্সের বক্রতা ও অবস্থানের ওপর নির্ভর করে না।

$m = 2$ ধরে, $\Delta x = 0$ হওয়ার শর্ত হ'ল

$$\frac{1}{n_1 f_1}+\frac{1}{n_2 f_2} = 0 \qquad ....(3.35)$$

অথবা, $n_1 f_1 + n_2 f_2 = 0$ .....(3.36)

3.36 কে বলা হয় পেৎসভাল শর্ত। একটি সহজ উদাহরণ নেওয়া যাক। মনে করি দু'টি পাতলা লেন্স একটি অভিসারী ও অপরটি অপসারী নেওয়া হ'ল। এদের ফোকাস দৈর্ঘ্য এমন যে $f_1 = -f_2$ এবং $n_1 = n_2$

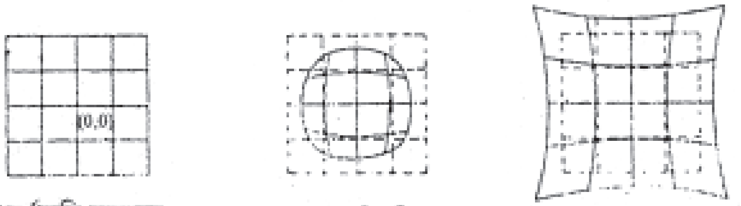
লেন্স দু'টি যদি পরস্পর থেকে d দূরত্বে থাকে, তা' হলে পেৎসভাল শর্ত পূরণ করে তুল্যমান ফোকাস দৈর্ঘ্য f হবে; $f = f_1^2 / d$

কারণ আমরা জানি, $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}-\frac{d}{f_1 f_2}$

f ধনাত্মক সুতরাং এ ভাবে একটি অভিসারী আলোকতন্ত্র গঠন করা যায় যেখানে প্রতিবিম্ব তলে বক্রতা থাকবে না। দেখার জন্য যে আলোকযন্ত্র ব্যবহার করা হয় সেই যন্ত্রে প্রতিবিম্বের বক্রতা বিশেষ অসুবিধা সৃষ্টি করে না কিন্তু ফটো লেন্সের ক্ষেত্রে বক্রতা কমানো জরুরি কারণ তা' না হলে ফিল্মের সমতলে প্রতিবিম্বের বক্রতার জন্য আলোকচিত্র অস্পষ্ট হবে। বক্রতা কমানোর উদ্দেশ্যে ফটো ও প্রক্ষেপক যন্ত্রের অভিলক্ষ্যের ফোকাসতলের আগে ক্ষেত্র সমতলক (Field flattener) লেন্স ব্যবহার করা হয়।

3.6 বিকৃতি (Distortion)

এ পর্যন্ত আপনি চারটি জাইডেল অপেরণ বিষয়ে জেনেছেন। এগুলি হ'ল অপেরণ, কোমা, অবিন্দুকত্ব এবং বক্রতা। কোন আলোকতন্ত্রে যদি এ-সব অপেরণ না থাকে তবে যে প্রতিবিম্ব গঠিত হবে তা' সুস্পষ্ট হবে এবং বক্রতা দোষ থাকবে না। কিন্তু এই শর্ত পূরণ হলেও প্রতিবিম্ব কিন্তু পুরোপুরি দোষমুক্ত হবে না। কোন আদর্শ-আলোকতন্ত্রে এ ছাড়াও লক্ষ্যবস্তু ও প্রতিবিম্বের মধ্যে পুরোপুরি জ্যামিতিকভাবে সাদৃশ্য থাকা দরকার অর্থাৎ লক্ষ্যবস্তুর প্রতিটি বিন্দুর জন্য প্রতিবিম্বের অনুরূপ বিন্দুর জ্যামিতিক সম্বন্ধ ঠিকমত বজায় থাকতে হবে। এ শর্ত পূরণ না হ'লে প্রতিবিম্বে যে ত্রুটি দেখা যায় তাকে বলা হয় বিকৃতি (Distortion)। এ সম্পর্কে অনুসন্ধান



(a)বর্গাকৃতি লক্ষ্যবস্তু (b) বিকৃতি (c) পিনকুশন বিকৃতি

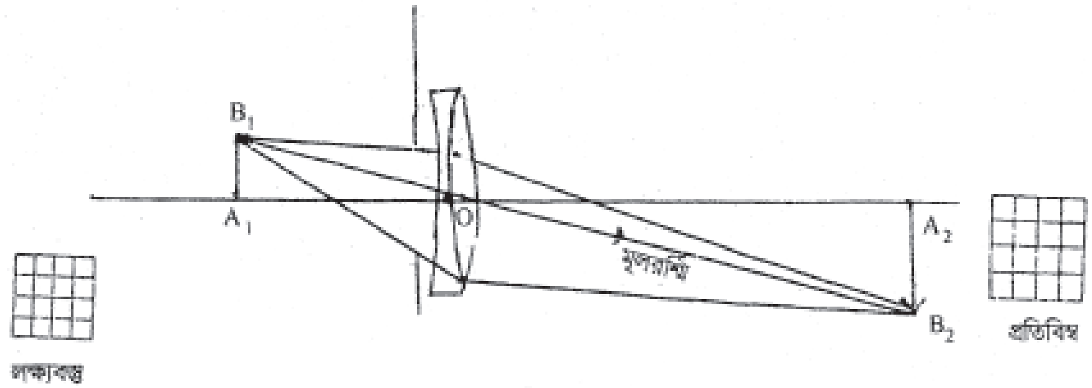
চিত্র 3.18

করতে গিয়ে দেখা গেছে যে কোন আলোকতন্ত্রে অক্ষরেখা থেকে বিভিন্ন দূরত্বে থাকা লক্ষ্যবস্তুর বিবর্ধন সমান না হ'লে এই ত্রুটির সৃষ্টি হয়। যদি অক্ষরেখা থেকে দূরত্বের সঙ্গে বিবর্ধন বেড়ে যায় তা'হলে বর্গাকৃতি লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব পিন কুশন বা ডমরুর আকারের চেহারা নেবে কারণ বর্গক্ষেত্রের চার কোণের দূরত্ব প্রতিবিম্বে তুলনামূলকভাবে বেশি হবে। এ-ধরণের বিকৃতিকে বলা হয় **পিন কুশন** অথবা **ডমরু বিকৃতি** (Pin cushion distortion) এবং এর প্রকৃতিকে বলা হবে **ধনাত্মক**। আবার বিবর্ধন যদি অক্ষরেখা থেকে দূরত্বের সঙ্গে কমে যায় তা'হলে বর্গের বাহুর তুলনায় দু'টি কর্ণের দৈর্ঘ্য কম বাড়বে — প্রতিবিম্বের এই বিকৃতিকে বলা হয় **পিপা আকারের বিকৃতি** (Barrel shaped distortion) এবং এর প্রকৃতিকে **ঋণাত্মক** বলা হবে।

চিত্র 3.18 এ দু'ক্ষেত্রেই আদর্শ-প্রতিবিম্বকে বিন্দু রেখা দিয়ে আঁকা বর্গক্ষেত্র হিসাবে দেখানো হয়েছে।

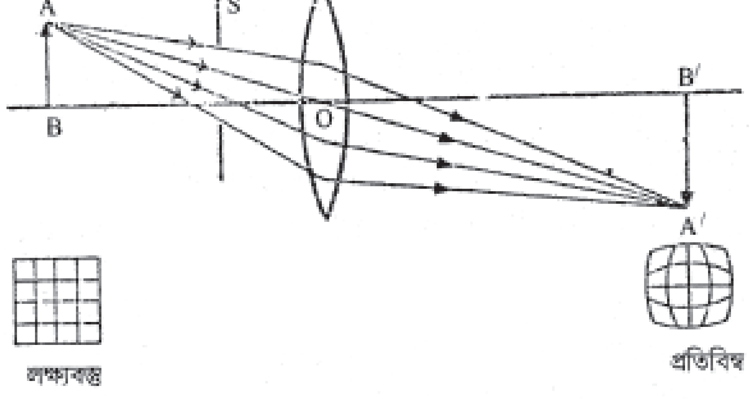
প্রতিবিম্ব অবিকৃত অবস্থায় পেতে গেলে আলোকযন্ত্রে এমন ব্যবস্থা করতে হবে যে অনুপ্রস্থ বিবর্ধন (Transverse magnification) প্রতিবিম্ব তলের সর্বত্র একই থাকবে।

একটি পাতলা লেন্সে অবিকৃত প্রতিবিম্ব গঠনে এই শর্ত প্রযোজ্য। পাতলা লেন্সের প্রতিবিম্বে বিকৃতি প্রায় থাকেই না। কিন্তু একই সঙ্গে অন্যান্য সব অপেরণ থেকে প্রতিবিম্ব মুক্ত হবে না। পাতলা লেন্সের সামনে বা

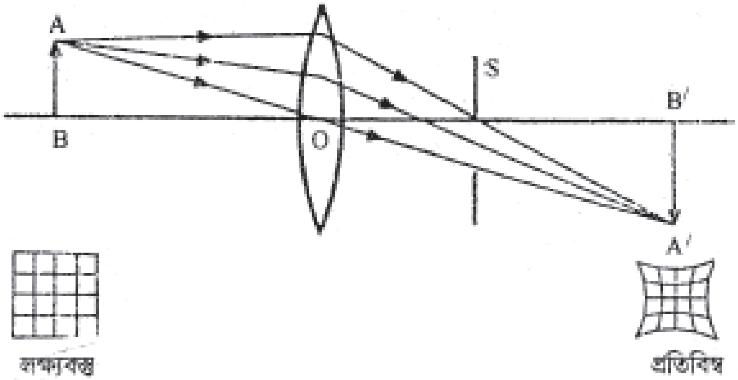


চিত্র 3.19

পিছনে রোধক রাখলে কিন্তু বিকৃতির সৃষ্টি হবে যদিও লেন্সের গায়ে রোধক রাখলে বিকৃতি হবে না। পাতলা লেন্সে রোধকের অবস্থানের সঙ্গে প্রতিবিম্বে বিকৃতি কিভাবে সৃষ্টি হয় তা' দেখা যাক। একটি অভিসারী পাতলা লেন্স নেওয়া হ'ল। আমরা ধরে নিচ্ছি যে প্রথম চারটি জাইডেল অপেরণ এখানে অনুপস্থিত। A_1B_1 একটি পরিমিত লক্ষ্যবস্তু যা' আলোচনার সুবিধার জন্য বর্গাকৃতি ধরা হয়েছে। প্রথমে ধরা যাক যে রোধক লেন্সের সঙ্গে সংলগ্ন। (চিত্র 3.19) এক্ষেত্রে A_1 থেকে উপাক্ষীয় রশ্মি লেন্সের কেন্দ্রীয় অঞ্চল দিয়ে গিয়ে A_2 প্রতিবিম্ব সৃষ্টি করেছে এবং অক্ষরেখার বাইরে B_1 বিন্দুর প্রতিবিম্বও একইভাবে মূলরশ্মি B_1O এর ওপর B_2 বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠন করেছে। এক্ষেত্রে উপাক্ষীয় রশ্মির প্রতিবিম্বে বিকৃতি প্রায় হবেই না। কিন্তু 3.20 চিত্রে রোধকটি লেনসের সামনে বসানো হয়েছে। এক্ষেত্রে A_1 থেকে উপাক্ষীয় রশ্মি লেন্সের কেন্দ্রীয় অঞ্চল দিয়ে গিয়ে A_2 প্রতিবিম্ব গঠন করছে। কিন্তু অক্ষরেখার বাইরে B_1 বিন্দু থেকে আলোকরশ্মি লেন্সের নিচের অংশ দিয়েই যেতে পারে। এর ফলে B_1 এর প্রতিবিম্ব মূল রশ্মি অনুযায়ী B_2' না হয়ে A_2 এর নিকটতর B_2 বিন্দুতে হবে। লক্ষ্যবস্তুর প্রান্তিক অঞ্চলের বিবর্ধন সেইজন্য উপাক্ষীয় রশ্মির প্রতিবিম্বের তুলনায় কম হবে এবং বর্গাকৃতি লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্বে ঢোলক বিকৃতি দেখা যাবে।

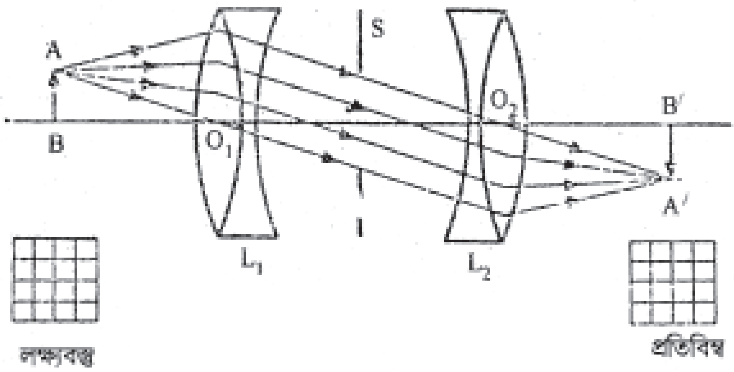


চিত্র 3.20



চিত্র 3.21

চিত্র 3.22 এ রোধক রাখা হয়েছে প্রতিবিম্বের দিকে অর্থাৎ লক্ষ্যবস্তু থেকে দূরে লেন্সের পরে। এক্ষেত্রে লক্ষ্যবস্তুর প্রান্তিক বিন্দু B_1 থেকে আলোকরশ্মি লেন্সের উপরের অংশ দিয়ে কেবলমাত্র যেতে পারবে। এর ফলে



চিত্র 3.22

B_1 এর প্রতিবিম্ব B_2 মূল রশ্মি ধরে যে প্রতিবিম্ব B_2' হত তার তুলনায় A_2 থেকে আরও দূরে অবস্থিত হবে। এক্ষেত্রে লক্ষ্যবস্তুর প্রান্তিক অঞ্চলের প্রতিবিম্বের বিবর্ধন উপাক্ষীয় প্রতিবিম্বের তুলনায় বেশি হবে এবং বর্গাকৃতি লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্বে আমরা পিন কুশন বিকৃতি দেখতে পাব।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে আমরা বুঝতে পারি যে যদি দু'টি অনুরূপ লেন্সের ঠিক মাঝখানে রোধক রাখা যায় তা'হলে এই ব্যবস্থায় প্রতিবিম্বের বিকৃতি দূর করা সম্ভব হবে যদি বিবর্ধনের মান একক হয়। চিত্র 3.22 তে এই ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। কারণ প্রথম লেন্সের পরে রোধক থাকায় এই অংশে পিনকুশন বিবর্ধন হবে এবং দ্বিতীয় লেন্সের আগে রোধক থাকায় ঢোলক বিকৃতি সৃষ্টি হবে যা' প্রথম লেন্সের বিকৃতিকে অনেকটাই দূর করবে এই দুই অংশের প্রতিসাম্যের জন্য।

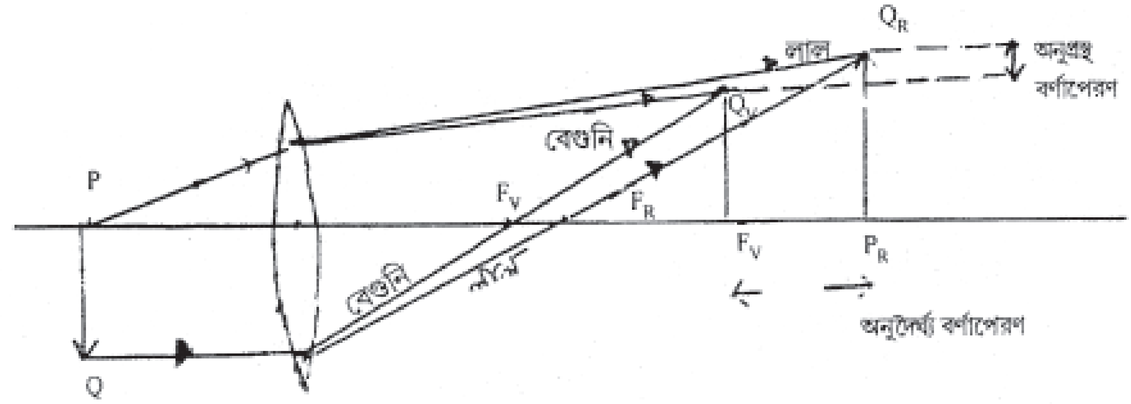
উচ্চমানের ক্যামেরার লেন্সের নকশায় বিকৃতি ও অবিন্দুকত্ব দূর করার জন্য এই ব্যবস্থার সাহায্য নেওয়া হয়।

3.7 বর্ণাপেরণ (Chromatic aberration)

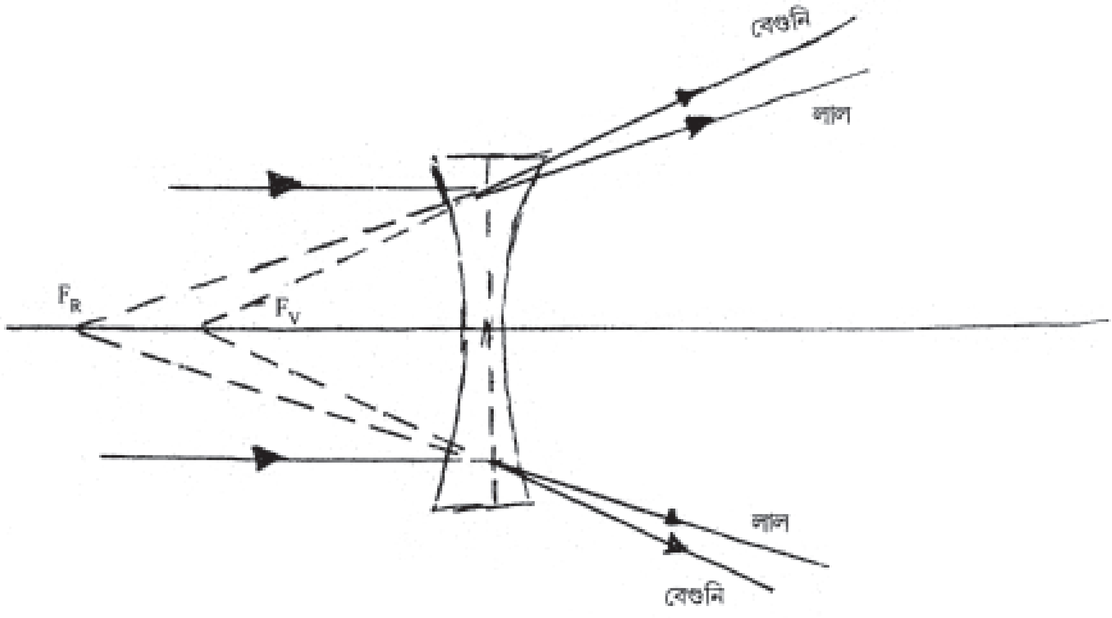
আপনি আগেই জেনেছেন যে এক বর্ণ আলোর ক্ষেত্রে প্রতিসম আলোকীয় তন্ত্র যখন গাউসীয় সীমার মধ্যে কাজ করে তখন আদর্শ প্রতিবিম্ব তৈরি করে। কিন্তু গাউসীয় সীমার বাইরে প্রতিবিম্বে পাঁচ রকম ত্রুটি বা অপেরণ দেখা যায়। আমরা এ-বিষয়ে এতক্ষণ আলোচনা করেছি। বহুবর্ণ আলো, যেমন সাদা আলো ব্যবহার করলে গাউসীয় সীমার মধ্যেও লেন্সের প্রতিবিম্বে একধরনের ত্রুটির সৃষ্টি হয়। এর কারণ হ'ল আলোকতন্ত্রে প্রতিসারক মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে। এর ফলে আলোকতন্ত্রের মধ্যে দিয়ে বিভিন্ন বর্ণের আলোর গতিপথ পুরোপুরি এক থাকবে না। ফোকাস দৈর্ঘ্য বর্ণ নির্ভর হওয়ায় প্রতিবিম্বের অবস্থান ও বিবর্ধনও বর্ণের ওপর নির্ভর করবে। সাদা আলো থেকে যে প্রতিবিম্ব তৈরি হবে তা' সাদা না হয়ে রঙিন দেখা যাবে। একটি পাতলা লেন্সে বিষয়টি অনুধাবন করা যাক। বায়ুতে অবস্থিত একটি পাতলা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য f হ'ল

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right) \qquad \text{.... (3.37)}$$

n হ'ল লেন্স মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক। r_1, r_2 লেন্সের দুই গোলীয় তলের ব্যাসার্ধ। লেন্স মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক বেগুনি রং-এর জন্য যদি n_v হয় এবং লাল রং-এর জন্য যদি n_r হয় তা'হলে $n_V > n_r$ হওয়ায় ফোকাস দৈর্ঘ্য লাল থেকে বেগুনি রং পরিবর্তনের সঙ্গে কমে যায়। পাতলা উত্তল লেন্স দিয়ে কোন সাদা লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব তৈরি হ'লে দেখা যাবে কয়েকটি রঙিন প্রতিবিম্ব বর্ণ অনুযায়ী কাছাকাছি গঠিত হয়েছে। যাদের মাপের অল্প পার্থক্যও আছে। বেগুনি রং-এর প্রতিবিম্ব লেন্সের সবচেয়ে কাছে ও লাল আলোর প্রতিবিম্ব সবচেয়ে দূরে থাকবে। সাদা রং-এর বর্ণালিতে হলুদ-সবুজ রং হ'ল সবচেয়ে উজ্জ্বল। যদি এই আলোর প্রতিবিম্ব পর্দায় স্পষ্ট করা হয় তা'হলে অন্যান্য রং-এর প্রতিবিম্ব ঠিকমত ফোকাস থাকবে না। ফলে কিছুটা অস্পষ্ট সাদা প্রতিবিম্ব পাওয়া যাবে। পর্দাকে যদি লেন্সের দিকে সরানো যায় তা' হলে প্রতিবিম্বের প্রান্তরেখা (Edge) লাল রং-এ রঞ্জিত হবে। আবার অপরদিকে সরালে প্রতিবিম্বের প্রান্ত নীল রং-এ রঞ্জিত হবে। বহুবর্ণ আলো ব্যবহার করলে লেন্স মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক আলোর রং-এর ওপর নির্ভরশীল হওয়ায় প্রতিবিম্বে এই যে ত্রুটি দেখা যায় তাকে **বর্ণাপেরণ** (Chromatic aberration) নামে অভিহিত করা হয়।



চিত্র 3.23



চিত্র 3.24

PQ একটি ছোট লক্ষ্যবস্তু অক্ষরেখার ওপর লম্বভাবে আছে। PQ এর বেগুনি রং-এর প্রতিবিম্ব $P_V Q_V$, লাল রং-এর প্রতিবিম্ব $P_R Q_R$ এর তুলনায় নিকটতর হবে। অক্ষের ওপর উভয় প্রতিবিম্বের দূরত্বের অন্তর হ'ল **অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ** এবং তাদের উচ্চতার অন্তর হ'ল **অনুপ্রস্থ বর্ণাপেরণ**। অভিসারী লেন্সের ক্ষেত্রে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ **ধনাত্মক** কিন্তু অপসারী লেন্সের ক্ষেত্রে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ **ঋণাত্মক**।

পরবর্তী আলোচনার সুবিধার জন্য কিছু তথ্য আমরা এখানে সন্নিবেশিত করেছি। আলোকবিজ্ঞানে বিভিন্ন রং-এর আলোকে চিহ্নিত করা হয় ফ্রাউনহোফার রেখার (Frounhofer line) নাম দিয়ে। বিভিন্ন কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক ফ্রাউনহোফার রেখা অনুযায়ী লিপিবদ্ধ করা আছে। আমরা আপনার জ্ঞাতার্থে দু'টি সংক্ষিপ্ত সারণি দিলাম।

সারণি 2 : ফ্রাউনহোফার রেখা সম্পর্কীয় তথ্য

ফ্রাউনহোফার রেখা	রং	তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $1\ \mathring{A} = 10^{-8}$ cm
C	লাল	6563 Å
D	হলুদ	5893 Å
F	নীল	4862 Å
G	বেগুনি	4308 Å

সারণি 3 : কিছু ক্রাউন (Crown) ও ফ্লিন্ট (Flint) কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক ফ্রাউনহোফার রেখা অনুযায়ী

কাঁচ	n_C	n_D	n_F	n_G	$\omega = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$
বোরোসিলিকেট ক্রাউন (B SC-2)	1.51462	1.51700	1.52264	1.52708	0.0155125
ক্রাউন (চশমার জন্য) (SPC-1)	1.52042	1.52300	1.52933	1.53435	0.0170363
পাতলা ফ্লিন্ট (L F)	1.57208	1.57600	1.58606	1.59441	0.0242708
ঘন ফ্লিন্ট (DF-2)	1.61216	1.61700	1.62901	1.63923	0.0273095

3.7.1 একটি পাতলা লেন্সে বর্ণাপেরণ

বর্ণাপেরণ পরিমাপ করার সময় সাধারণত দু'টি নির্দিষ্ট প্রান্তীয় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য হিসাবে ফ্রাউন হোফার রেখা C ও F এবং মধ্যবর্তী তরঙ্গ দৈর্ঘ্য হিসাবে D রেখা নেওয়া হয়। একটি পাতলা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য f হ'ল

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad \text{....(3.38)}$$

বরং লক্ষ্যবস্তুর দূরত্ব u ও প্রতিবিম্বের দূরত্ব v হ'লে

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \qquad \text{...... (3.39)}$$

তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পরিবর্তন $\delta\lambda$ এর সঙ্গে প্রতিসরাঙ্ক n এর পরিবর্তন δn হ'লে অন্তরকলনের সাহায্যে (3.38)

থেকে পাই $\delta\left(\frac{1}{f}\right) = -\frac{\delta f}{f^2} = \delta n\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ ......(3.39)

কিন্তু $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{1}{f(n-1)}$

$$\therefore \delta f = -f^2 \frac{\delta n}{f(n-1)} = -f \frac{\delta n}{n-1} \qquad \text{.....(3.40)}$$

C ও F রেখাকে প্রান্তীয় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং D রেখাকে মধ্যবর্তী তরঙ্গ দৈর্ঘ্য ধরে,

$$\delta f = f_C - f_F = -f_D \frac{(n_C - n_F)}{n_D - 1} = f_D . \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \omega . f_D$$

এবং 3.39 থেকে, $\delta\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{\omega}{f_D}$

এখানে ω হ'ল C ও F রেখার সাপেক্ষে প্রতিসারকের বিচ্ছুরণ। যেহেতু $n_F > n_C$, $\omega = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} > 0$

f_C-f_F হ'ল **সমান্তরাল রশ্মির ক্ষেত্রে** অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ।

অভিসারী লেন্সের ক্ষেত্রে $f > 0$ সুতরাং $f_C > f_F$ এবং অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ ধনাত্মক।

একইভাবে uকে ধ্রুবক ধরে,

$$\delta\left(\frac{1}{v}\right) = \delta\left(\frac{1}{f}\right)$$

$$\therefore -\frac{\delta v}{v^2} = -\frac{\delta f}{f^2}$$

$$\delta v = v^2 \frac{\delta f}{f^2} = \frac{v^2}{f^2}(-f)\frac{\delta n}{n-1} = -\frac{v^2}{f}.\frac{\delta n}{n-1}$$

C ও F রেখার সাপেক্ষে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ হ'ল—

$$v_C - v_F = -\frac{{v_D}^2}{f_D}\left(\frac{n_C - n_F}{n_D - 1}\right) = \frac{{v_D}^2}{f_D}\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad = \omega\frac{{v_D}^2}{f_D} \qquad .....(3.41)$$

কোন মাধ্যমের ক্ষেত্রেই ω এর মান শূন্য হয় না সুতরাং একক পাতলা লেন্সের প্রতিবিম্বে বর্ণাপেরণ থাকবেই।

3.7.2 অবর্ণক লেন্স ও লেন্স সমবায়

একক পাতলা লেন্সে বর্ণাপেরণ দূর করা যে সম্ভব নয়, তা আমরা আগেই দেখেছি। এখন লেন্স সমবায়ে বর্ণাপেরণের উৎপত্তি এবং তা' দূর করা সম্ভব কিনা দেখা যাক।

(ক) সংলগ্ন লেনস সমবায়ে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ

দুটি পাতলা লেন্স নেওয়া হ'ল যাদের ফোকাস দৈর্ঘ্য f' ও f"। এদের সংলগ্ন সমবায়ের ফোকাস দৈর্ঘ্য F, তাহলে

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f''} \qquad ....(3.42)$$

তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পরিবর্তনের সঙ্গে ফোকাস দৈর্ঘ্য পরিবর্তিত হয়, সুতরাং দুটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের মধ্যে 1/F এর পরিবর্তন $\delta\left(\frac{1}{F}\right)$ হ'লে 3.42 কে অন্তরকলনের সাহায্যে আমরা পাই

$$\delta\left(\frac{1}{F}\right)=\delta\left(\frac{1}{f'}\right)+\delta\left(\frac{1}{f''}\right)$$

$$-\frac{\delta F}{F^2}=-\frac{\omega'}{f'}-\frac{\omega''}{f''}$$

$$\therefore \delta F = F^2\left(\frac{\omega'}{f'}+\frac{\omega''}{f''}\right)$$

সংলগ্ন সমবায়ে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ হ'ল δF। অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ না থাকার প্রয়োজনীয় শর্ত হ'ল $\delta F=0$

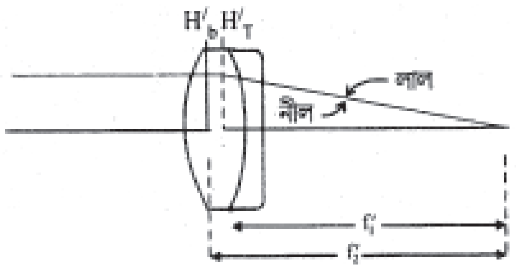
অর্থাৎ $\frac{\omega'}{f'}+\frac{\omega''}{f''}=0$ .....(3.43)

অথবা $f'/f''=-\omega'/\omega''$ ....(3.44)

এখানে $\omega'=\frac{n'_F-n'_C}{n'_D-1}$, প্রথম লেন্সের প্রতিসারকের C ও F এর মধ্যে বিচ্ছুরণ।

$\omega''=\frac{n''_F-n''_C}{n''_D-1}$, দ্বিতীয় লেনসের প্রতিসারকের C ও F এর মধ্যে বিচ্ছুরণ।

যেহেতু ω' এবং ω" সব মাধ্যমের ক্ষেত্রেই ধনাত্মক সুতরাং (3.44) অনুযায়ী f', f" এর মধ্যে একটি ধনাত্মক



চিত্র 3.25

হ'লে অপরটিকে ঋণাত্মক হতে হবে। অর্থাৎ একটি লেন্স অভিসারী হলে অপরটি অপসারী হতে হবে এবং এভাবে দু'টি সংলগ্ন পাতলা লেন্সের সমবায়ের সাহায্যে প্রতিবিম্বে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ দূর করা সম্ভব। এ ধরনের দুটি পাতলা লেন্সের সমবায়কে **অবার্ণ যুগ্ম** (Achromatic doublet) বলা হয়। (চিত্র 3.25)

অবার্ণ যুগ্মে দুটি লেন্সের কাচ পৃথক হওয়া দরকার। ω' ও ω" এর মধ্যে পার্থক্য বেশি হ'লে f' ও f" এর মধ্যেও পার্থক্য বেশি হবে এবং যুগ্ম লেন্সটি পাতলা হলেও অধিকতর অভিসারী বা অপসারী লেন্স হিসাবে কাজ করবে। একটি লেন্সের কাচ ক্রাউন হ'লে অপরটি ফ্লিন্ট কাচের হবে। কিন্তু যদি ω' = ω" হয় তা'হলে $\frac{1}{F}=0$ হবে অর্থাৎ লেন্সযুগ্ম এক্ষেত্রে একটি কাচের ফলকের মত কাজ করবে যার অভিসারী বা অপসারী ক্ষমতা নেই।

একটি অবার্ণ লেন্স যুগ্ম গঠন করতে গেলে আমাদের শেষ পর্যন্ত দুটি লেন্সের উভয় তলের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করতে হবে। কয়েকটি ধাপে এই গণনা করা হয়ে থাকে তা' এখানে লিপিবদ্ধ করা হ'ল।

1) প্রথমে দরকার সংলগ্ন সমবায়ের ফোকাস দৈর্ঘ্য F অথবা ক্ষমতা $P = \frac{1}{F}$ এর মান। সংলগ্ন লেন্স দুটির ফোকাস দৈর্ঘ্য f', f" এবং ক্ষমতা p', p" হ'লে

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f''} \quad .....(i)$$

এবং $P = p' + p''$ ....(ii)

2) আমরা জানি

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{f'} &= (n'_D - 1)k', \\ \frac{1}{f''} &= (n''_D - 1)k'' \end{aligned}\right\} \quad ....(iii)$$

$$\left.\begin{aligned} \text{এখানে, } K' &= \frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2}, \\ K'' &= \frac{1}{r''_1} - \frac{1}{r''_2} \end{aligned}\right\} \quad ....(iv)$$

3) কি ধরণের ক্রাউন ও ফ্লিন্ট কাচ ব্যবহার করা হবে সে বিষয়ে তথ্য। এই তথ্যের সাহায্যে এই দু'রকম কাচের বিচ্ছুরণ ক্ষমতা ω', ω" গণনা করতে হবে :

$$\left.\begin{aligned} \omega' &= \frac{n'_F - n'_C}{n'_D - 1}, \\ \omega'' &= \frac{n''_F - n''_C}{n''_D - 1} \end{aligned}\right\} \quad ....(v)$$

4) অবার্ণ লেনস যুগ্মের শর্ত হ'ল

$$\frac{\omega'}{f'} + \frac{\omega''}{f''} = 0 \quad ..... (vi)$$

বা, $\omega' p' + \omega'' p'' = 0$ ..... (vii)

5) (ii) ও (vii) থেকে পাওয়া যায়,

$$\left.\begin{aligned} p' &= \frac{P\omega''}{\omega'' - \omega'}, \\ p'' &= -\frac{P\omega'}{\omega'' - \omega'} \end{aligned}\right\} \quad ....(viii)$$

(viii) থেকে p' ও p" নির্ণয় করা যাবে।

$$\left.\begin{array}{l}\text{6) যেহেতু } p' = (n'_D-1)k' \\ \text{এবং } p'' = (n''_D-1)\,k''\end{array}\right\} \quad ....(ix)$$

(ix) এর সাহায্যে k', k" গণনা করা যায়।

7) k', k" গণনা করার পর (iv) এর সাহায্যে প্রথম ও দ্বিতীয় লেন্সের একটি ক'রে তলের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করা যাবে যদি সংলগ্ন দুটি তলের ব্যাসার্ধের সুবিধামত মান ধরে নেওয়া হয়।

একটি উদাহরণের সাহায্যে অবার্ণ যুগ্মের গণনার পদ্ধতিটি আপনি সহজে বুঝতে পারবেন।

উদাহরণ 1

একটি অবার্ণ লেন্স যুগ্ম গঠন করতে হবে যার ফোকাস দৈর্ঘ্য 10 cm

উত্তর : ফোকাস দৈর্ঘ্য 10 cm মানে হল ক্ষমতা 10D। প্রথমে C ও F রেখার সাপেক্ষে লেন্স যুগ্ম গঠনের গণনা করব। মধ্যবর্তী তরঙ্গ দৈর্ঘ্য D রেখা ধরা হয়েছে। তা'হলে D রেখার জন্য P_D=10D

ধরা যাক বোরোসিলিকেট ক্রাউন (BSC-2) ও পাতলা ফ্লিন্ট (LF) কাচ ব্যবহার করে লেন্স যুগ্ম গঠন করা হবে। অভিসারী লেন্স ক্রাউন ও অপসারী লেন্স ফ্লিন্ট কাচের করতে হবে যার ফলে প্রদত্ত অবর্ণক যুগ্ম অভিসারী হয়।

এখন P_D=10D, $\omega' = 0.0155175$, $\omega'' = 0.0242708$

$$\therefore p'_D = \frac{P_D\omega''}{\omega''-\omega'} = \frac{10\times 0.0242708}{0.0242708-0.0155125}$$

= 27.7118D

$$p''_D = -\frac{P_D\omega'}{\omega''-\omega'} = \frac{-10\times 0.0155175}{0.0242708-0.0155125}$$

= -17.7118D

আপনি লক্ষ্য করবেন যে দু'টি লেন্সের ক্ষমতা যোগ করলে 10D হয় যা' থেকে গণনা সঠিক হয়েছে বোঝা যায়। দু'টি লেন্সের ক্ষমতা থেকে ফোকাস দৈর্ঘ্য সহজেই নির্ণয় করা যায়। এখন প্রশ্ন হচ্ছে প্রত্যেক লেন্সের উভয় তলের বক্রতা কি হ'বে কারণ একই বর্ধনাংকের জন্য বিভিন্ন r_1, r_2 এর মান নেওয়া যেতে পারে কারণ $\frac{1}{r_1} = k + \frac{1}{r_2}$

লেন্স প্রস্তুতকারক কিছু সুবিধার জন্য সাধারণত প্রথম ও দ্বিতীয় লেন্সের সংলগ্ন দুটি তলের বক্রতা সমমান কিন্তু বিপরীত চিহ্নের রাখেন যার ফলে দু'টি লেন্সকে কানাডা বালসাম (Canada Balsam) বা অন্য কোন স্বচ্ছ প্লাস্টিকের আঠা দিয়ে একসঙ্গে লাগানো যায়। এই ব্যবস্থায় দু'টি লেন্সের মধ্যে ফাঁক না থাকায় আলোকরশ্মির তীব্রতা দুই লেন্সের বায়ু প্রতিফলনের জন্য কমে যাবে না এবং লেন্সের বিভিন্ন তলের ঘষা মাজার ব্যয়ও কম হবে। অনেক সময়েই অভিসারী লেন্সকে সমোত্তল (bi-convex) নেওয়া হয়। তা'হলে $r'_1 = -r'_2$ এবং

$$k' = \frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} = \frac{2}{r_1'} = \frac{p_D'}{n_D' - 1}$$

$$k' = \frac{27.7118}{.51700} = 53.6011$$

$$r_1' = \frac{2}{53.6011} = 0.03731\text{m} = 3.731 \text{ cm}$$

দ্বিতীয় লেন্সের প্রথম তলের বক্রতা প্রথম লেন্সের বক্রতার সমমান হবে সুতরাং ঐ লেন্সের দ্বিতীয় তলের বক্রতা এমন করতে হবে যে ক্ষমতা -17.711D হয়।

এখানে $r_1'' = -r_1'$ এবং

$$k'' = \frac{1}{r_1''} - \frac{1}{r_2''} = -\frac{1}{0.03731} - \frac{1}{r_2''} = \frac{p_D''}{n_D'' - 1}$$

$$= -\frac{17.7118}{0.57600} = -30.7496$$

$$\therefore \frac{1}{r_2''} = 30.7496 - \frac{1}{0.03731} = 30.7496 - 26.8024$$

$= 3.9471$

$\therefore r_2'' = 0.2533 \text{ m} = 25.33 \text{ cm}$

অবার্ণ লেন্স যুগ্মের ব্যাসার্ধ হবে,

$r_1' = 3.731 \text{ cm}, \ r_2' = -3.731 \text{ cm}$

$r_1'' = -3.731 \text{ cm}, \ r_2'' = 25.33 \text{ cm}$

C, F ও G রেখার তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে অবার্ণ লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য নির্ণয় করে এখন দেখতে হবে বর্ণাপেরণ কতটা দূর হ'ল।

$P_C = (n_C' - 1)k' + (n_C'' - 1)k''$

$= 0.51462 \times 53.6011 + .57208 \times (-30.7496)$

$= 9.9930\text{D}$

$f_C = 10.0070 \text{ cm}$

$P_F = 0.52264 \times 53.6011 + 0.58606 \times (-30.7496)$

$= 9.9930\text{D}$

$f_F = 10.0070 \text{ cm}$

$P_G = 0.52708 \times 53.6011 + 0.59441 \times (-30.7496)$

$= 9.9742\text{D}$

$f_G = 10.0259$ cm

f_C, f_D এবং f_F এর মধ্যে পার্থক্য অকিঞ্চিৎকর কিন্তু f_G এর মান অন্য ফোকাস দৈর্ঘ্যের তুলনায় প্রায় .2 mm বেশি। সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে C ও F এর মধ্যে বর্ণাপেরণ দূর করতে পারলেও তার বাইরে অন্য রং এর অস্তিত্ব প্রতিবিম্বে থেকে যাবে। এই ত্রুটিকে বলা হয় গৌণ বর্ণালি (Secondary spectrum)। মাধ্যমের যথোপযুক্ত নির্বাচনের দ্বারা এই ত্রুটিকে কমানো হয়।

3.7.3 ব্যবধানে অবস্থিত দু'টি পাতলা লেন্সে বর্ণাপেরণ দূর করার পদ্ধতি

বর্ণাপেরণ দূর করার আর একটি উপায় হ'ল একই কাচের তৈরি দু'টি পাতলা লেন্স ব্যবহার করা যাদের মধ্যে দূরত্ব তাদের ফোকাস দৈর্ঘ্যের গড় মান অর্থাৎ ফোকাস দৈর্ঘ্যের যোগফলের অর্ধেক। এই মন্তব্যের প্রমাণ এখানে দেওয়া হ'ল।

মনে করি দু'টি পাতলা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য f' ও f'' এবং লেন্স দু'টি d ব্যবধানে রাখা হয়েছে। পূর্বের পাঠ অনুযায়ী এই সমবায়ের ফোকাস দৈর্ঘ্য F হবে

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f''} - \frac{d}{f'f''} \qquad .....(3.45)$$

এবং লেন্সের ক্ষমতার সূত্রে (3.45) হবে

$P = p'+p''-d\,p'\,p''$

$= (n'-1)\,k'+(n''-1)\,k''-d\,(n'-1)k'\,(n''-1)k''$ .... (3.46)

দু'টি লেন্স একই কাচের তৈরি হ'লে $n' = n'' = n$

তখন 3.46 কে লেখা যায়,

$P = (n-1)\,(k'+k'') - d\,(n-1)^2 k'\,k''$

আলোর রং এর ওপর P নির্ভর না করার শর্ত হ'ল

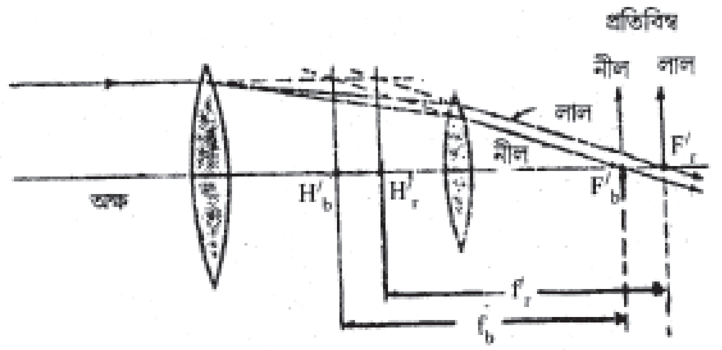
$$\frac{dp}{dn} = (k'+k'') - 2d(n-1)k'k'' = 0$$

বা, $$d = \frac{1}{2(n-1)}\left(\frac{1}{k'} + \frac{1}{k''}\right)$$

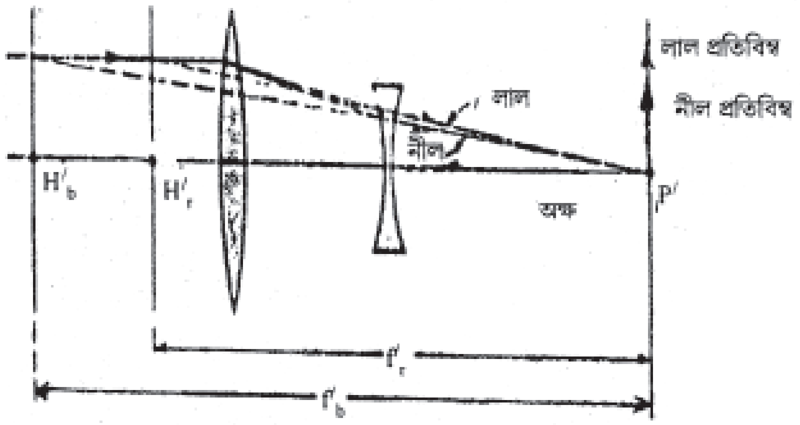
এখন $\frac{1}{f'} = (n-1)k'$, $\frac{1}{f''} = (n-1)k''$

সুতরাং $$d = \frac{1}{2}(f' + f'') \qquad .... (3.47)$$

3.47 থেকে আমরা দেখলাম যে একই কাচের তৈরি দু'টি লেন্সকে যদি তাদের ফোকাস দৈর্ঘ্যের গড়ের সমান ব্যবধানে রাখা হয় তা'হলে এই লেন্স সমবায়ের ফোকাস দৈর্ঘ্য পাতলা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোয় মাপা হয় তার কাছাকাছি বেশি বা কম তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে একই হবে।



চিত্র 3.26 ব্যবধানে অবস্থিত লেন্সযুগ্মে অনুপ্রস্থ বর্ণাপেরণ মুক্ত করা হয়েছে



চিত্র 3.27 ব্যবধানে অবস্থিত লেন্সযুগ্ম। এখানে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ নেই

বিভিন্ন আলোকযন্ত্রে যেমন অভিনেত্রের (Ocular) ক্ষেত্রে এ-ধরণের ব্যবধানে অবস্থিত লেন্স যুগ্মের বহুল ব্যবহার আছে কারণ এ-ব্যবস্থায় ফোকাস দৈর্ঘ্য আলোর রং-এর সাপেক্ষে অপরিবর্তিত থাকায় চোখ দিয়ে দেখার সময় প্রতিবিম্ব অনুপ্রস্থ বর্ণাপেরণ মুক্ত বোধ হবে। কিন্তু এখানে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ দূর করা যায় না (চিত্র 3.26)।

চিত্র 3.27 এ ব্যবধানে অবস্থিত আর একটি লেন্সযুগ্ম ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে যেখানে অনুদৈর্ঘ্য বর্ণাপেরণ নেই।

দুটি পৃথক মাধ্যমের সহযোগে অবর্ণক লেন্স যুগ্ম তৈরি করার সময় দুটি লেন্সের তলগুলির বক্রতা যদি এমনভাবে নেওয়া হয় যে একই সঙ্গে গোলীয় অপেরণও দূর করা যায় তা'হলে সেই লেন্সযুগ্মকে অতি-অবার্ণ (Apochromat) বলা হয়।

3.8 উপসংহার

এ পর্যন্ত আমরা প্রতিবিম্ব গঠনে সাতটি মূল অপেরণ নিয়ে আলোচনা করেছি যার মধ্যে একবর্ণ-আলোর ক্ষেত্রে পাঁচটি অপেরণ ও একাধিক বর্ণের মিশ্র আলোর জন্য দু'টি বর্ণাপেরণ আছে। এই আলোচনা থেকে আপনি

উপলব্ধি করেছেন যে কোন লেন্সে বা একাধিক লেন্সযুক্ত আলোকতন্ত্রে প্রতিবিম্বকে অধিকাংশ ক্ষেত্রেই কোন অপেরণ থেকে সম্পূর্ণভাবে মুক্ত করা সম্ভবপর নয়। সুতরাং বাস্তব প্রয়োগের ক্ষেত্রে কোনভাবেই প্রতিবিম্বকে একই সঙ্গে সমস্ত অপেরণ থেকে মুক্ত করা যাবে না। এ-অবস্থায় ভাল লেন্স দিয়ে আলোকতন্ত্র তৈরি করার সময়ে প্রয়োজন অনুসারে যে অপেরণগুলি কমানো বেশি জরুরি সেই দিকে নজর দিয়ে লেন্সের নকশা ঠিক করা হয়। দূরবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্যে বর্ণাপেরণ, গোলীয় অপেরণ ও কোমা হ্রাস করা বিশেষ জরুরি। এ-ক্ষেত্রে প্রতিবিম্বে অবিন্দুকত্ব, বক্রতা ও বিকৃতি তত গুরুত্বপূর্ণ নয় কারণ পর্যবেক্ষণের জন্য অভিলক্ষ্যের ব্যবহার সীমিত অঞ্চলের মধ্যেই থাকে। অপরপক্ষে ক্যামেরার অভিলক্ষ্য ব্যবহার করার সময় বৃহৎ কৌণিক উন্মেষ প্রয়োজন হয় এবং সেইজন্য প্রতিবিম্বে অন্যান্য অপেরণের তুলনায় অবিন্দুকত্ব, কোমা ও বিকৃতিকে কমানোর জন্য বেশি গুরুত্ব আরোপ করা হয়।

3.9 সারাংশ

আলোকবিদ্যার অন্তর্গত একক 03 পাঠ ক'রে আপনি জেনেছেন যে কোন আলোকতন্ত্রে বাস্তব চাহিদা অনুযায়ী লেন্সের উন্মেষ বড় হলে বা লক্ষ্যবস্তু বড় হলে বা অন্যান্য নানা কারণে যে প্রতিবিম্ব সৃষ্টি হয় তা' গাউসীয় আসন্নায়নের আদর্শ প্রতিবিম্ব নয় এবং বাস্তব প্রতিবিম্বে নানা ত্রুটি বা অপেরণ দেখা যায়।

প্রতিবিম্বে এই ত্রুটির উৎপত্তির কারণ অনুযায়ী বিভিন্ন অপেরণের সঙ্গে আপনি পরিচিত হয়েছেন। যেমন একবর্ণ আলোর ক্ষেত্রে এই অপেরণগুলি হ'ল গোলীয় অপেরণ, কোমা, অবিন্দুকত্ব, বক্রতা ও বিকৃতি।

- আপনি ত্রৈমাত্রিক তত্ত্ব অনুযায়ী গোলীয় অপেরণ পরিমাপ করতে শিখেছেন। ন্যূনতম গোলীয় অপেরণের শর্ত কি জেনেছেন। গোলীয় তলের অবিপথী বিন্দুর অবস্থান নির্ণয় করতে শিখেছেন।
- কোমা কি এবং তা' দূর করার বিষয়ে অ্যাবের সাইন শর্ত কি তা' জেনেছেন।
- অবিন্দুকত্ব কি এবং তা' কিভাবে কমানো যায় সে সম্পর্কে সম্যক ধারণাও আপনার হয়েছে।
- প্রতিবিম্বের বক্রতা এবং তা' দূর করার উপায় সম্পর্কে জেনেছেন।
- প্রতিবিম্বের বিকৃতি কি ভাবে হয় এবং কিভাবে তা' দূর করা যায় সে বিষয়ে জেনেছেন।
- বিভিন্ন বর্ণের মিশ্র আলো লেন্সে কিভাবে বর্ণাপেরণ সৃষ্টি করে তা' জেনেছেন।
- বর্ণাপেরণ দূর করার একাধিক পদ্ধতি শিখেছেন।
- বিভিন্ন আলোকযন্ত্রের ব্যবহারিক চাহিদা অনুসারে কোন্ কোন্ অপেরণ গুরুত্বপূর্ণ যা হ্রাস করা প্রয়োজন সে সম্পর্কেও কার্যকরী ধারণা লাভ করেছেন।

3.10 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

1. একটি লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য $f = 10$ cm. উন্মেষ = 1 cm., $n = 1.5$. সারণি 1 এ এই লেনসের f অপরিবর্তিত রেখে লেন্সের বিভিন্ন আকৃতি সূচক q এর জন্য গোলীয় অপেরণ Δf এর মান দেওয়া হয়েছে।

আপনি 3.24 অনুযায়ী Δf এর মান গণনা করুন। আপনার উত্তর সারণি 1-এর সর্বশেষ কলমে দেওয়া আছে।

2. সারণি 2-এ প্রদত্ত লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে আকৃতি সূচকের বিভিন্ন মানের জন্য 3.30 অনুযায়ী কোমার পরিমাপ গণনা করুন। উত্তর সারণি 2-এ দেওয়া আছে।

3. দু'রকম কাচ ব্যবহার ক'রে একটি অবর্ণক লেন্স যুগ্ম তৈরি করতে হবে যার ফোকাস দৈর্ঘ্য 50 cm. দু'রকম কাচের প্রতিসরাঙ্ক লাল ও নীল রং এর আলোর জন্য নীচে দেওয়া হয়েছে। দু'টি লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য নির্ণয় করুন।

	1নং কাচ	2নং কাচ
$n_{\text{লাল}}$	1.51	1.64
$n_{\text{নীল}}$	1.52	1.66

3.11 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

3.29 অনুযায়ী Δf হ'ল,

$$\Delta f = \frac{h^2}{2} . f^2 \left(\frac{n-1}{n^2} \right) \left[\frac{1}{(n-1)(1-\sigma)f} \right]^3 \times$$

$$\left[1 - \left\{\sigma - (n-1)(1-\sigma)\right\}^2 \left\{\sigma - (n^2-1)(1-\sigma)\right\}\right] \qquad .....(3.48)$$

প্রথমে তৃতীয় বন্ধনীতে নিম্নলিখিত রাশিকে সরলীকরণ করা হ'ল

$$\left[1 - \left\{\sigma - (n-1)(1-\sigma)\right\}^2 \left\{\sigma - (n^2-1)(1-\sigma)\right\}\right]$$

$$= 1 - \left\{\sigma - n + n\sigma + 1 - \sigma\right\}^2 \times \left\{\sigma - n^2 + 1 + \sigma n^2 - \sigma\right\}$$

$$= 1 - \left\{n(\sigma-1) + 1\right\}^2 \times \left\{n^2(\sigma-1) + 1\right\}$$

$$= 1 - \left\{n^2(\sigma-1)^2 + 2n(\sigma-1) + 1\right\} \times \left\{n^2(\sigma-1) + 1\right\}$$

$$= 1 - \left\{n^4(\sigma-1)^3 + n^2(\sigma-1)^2 + 2n^3(\sigma-1)^2 + 2n(\sigma-1) + n^2(\sigma-1) + 1\right\}$$

$$= -n(\sigma-1)\left\{n^3(\sigma-1)^2 + n(\sigma-1) + 2n^2(\sigma-1) + 2 + n\right\}$$

$$= n(1-\sigma)\left\{n^3\sigma^2 - 2\sigma n^3 + n^3 + n\sigma - n + 2n^2\sigma - 2n^2 + 2 + n\right\}$$

$$= n(1-\sigma)\left\{2 - 2n^2 + n^3 + \sigma\left(n + 2n^2 - 2n^3\right) + \sigma^2 n^3\right\} \qquad .....(3.49)$$

3.49 Δf এর রাশি 3.48 এ প্রতিস্থাপিত করে আমরা পাই

$$\Delta f = \frac{(n-1)f^2h^2}{2n^2} \times \frac{n(1-\sigma)}{f^3(n-1)^3(1-\sigma)^3} \times$$

$$\left\{2-2n^2+n^3+\sigma\left(n+2n^2-2n^3\right)+\sigma^2n^3\right\}$$

$$= \frac{h^2}{2nf(n-1)^2(1-\sigma)^2}\left[2-2n^2+n^3+\sigma\left(n+2n^2-2n^3\right)+\sigma^2n^3\right]$$

Δf এর 3.30 রাশি পাওয়া গেল।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলির উত্তর

1. 3.24 অনুযায়ী Δf এর মান হ'ল

$$\Delta f = \frac{h^2}{2n(n-1)^2(1-\sigma)^2 f}\left(a\sigma^2+b\sigma+c\right)$$

এখানে $a = n^3$, $b = n+2n^2-2n^3$, $c = 2-2n^2+n^3$

প্রদত্ত প্রশ্নে $n = 1.5$, $f = 10$ cm, $h = 1$ cm

সুতরাং $a = 3.375$, $b = 1.5+2\times2.25-2\times3.375$

$= 1.5+4.5-6.75$

$= -.75$

$C = 2-2\times2.25+3.375$

$= 2-4.5+3.375$

$= 0.875$

$$\therefore a\sigma^2+b\sigma+c = 3.375\sigma^2-0.75\sigma+0.875$$

$$A = \frac{h^2}{2n(n-1)^2(1-\sigma)^2 f} = \frac{1.0}{3\times.25\times10(1-\sigma)^2}$$

$$= \frac{1.0}{7.5(1-\sigma)^2}$$

$$\therefore \Delta f = \frac{1.0}{7.5(1-\sigma)^2}\left[3.375\sigma^2-0.75\sigma+0.875\right]$$

1) $\sigma = 3,\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5\times 4}[3.375\times 9 - 0.75\times 3 + .875]\ = .97$

2) $\sigma = \infty,\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5}\times 3.375 = .45$

3) $\sigma = -3,\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5\times 16}[3.375\times 9 + 0.75\times 3 + 0.875] = .28$

4) $\sigma = -1,\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5\times 4}[3.375 + 0.75 + 0.875] = 0.17$

5) $\sigma = -\frac{1}{3},\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5\times\left(\frac{16}{9}\right)}\left[3.375\times\frac{1}{9} + 0.75\times\frac{1}{3} + 0.875\right]$

$= 0.75\times 1.5 \qquad \cong .113$

6) $\sigma = 0,\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5}\times 0.875 = .117$

7) $\sigma = \frac{1}{3},\ \Delta f = \frac{1.0}{7.5\times\left(\frac{4}{9}\right)}\times\left[3.375\times\frac{1}{9} - 0.75\times\frac{1}{3} + 0.875\right] = 0.30$

2. কোমার পুচ্ছের দৈর্ঘ্য হল (3.30) অনুযায়ী

$$L_C = \frac{3dh^2}{f^3}(Ap + Bq) \qquad \text{....(3.50)}$$

এখানে f = ফোকাস দৈর্ঘ্য = 10 cm, h = 1.0 cm, n = 1.5, d = 2 cm

$$A = \frac{3(2n+1)}{4n},\quad B = \frac{3(n+1)}{4n(n-1)}$$

$$A = \frac{3\times(2\times 1.5+1)}{4\times 1.5} = \frac{3\times 4}{6} = 2$$

$$B = \frac{3\times(1.5+1)}{4\times 1.5\times .5} = \frac{3\times 2.5}{3} = 2.5$$

এখানে সমান্তরাল রশ্মি সূক্ষ্মকোণে লেন্সে আপতিত হচ্ছে।

S =∞ এবং S' = f, সুতরাং $p = \frac{s' - s}{s' + s} = -1$

সুতরাং 3.50 এ মান বসিয়ে পাওয়া গেল,

$$L_C = \frac{3\times2\times1}{10^3}\times(2\times(-1)+2.5q)$$

$$= 6\times10^{-3}\times(-2+2.5q) \qquad \text{....(3.51)}$$

1) $q=-2.0$, $L_C = 6\times10^{-3}\times(-2-2.5\times(+2)$ cm

$= 6\times10^{-3}(-7.0)$ cm $= -0.042$ cm

2) $q=-1.0$

$L_C = 6\times10^{-3}\times(-2-2.5) = -0.027$ cm

3) $q=-0.50$

$L_C = 6\times10^{-3}\times(-2-2.5\times.5) = -0.0195$ cm

4) $q = 6\times10^{-3}\times(-2) = -0.012$ cm

5) $q = 0.50$

$L_C = 6\times10^{-3}\times(-2+2.5\times.5) = -0.0045$ cm

6) $q = 1.0$

$L_C = 6\times10^{-3}\times(-2+2.5) = +0.0030$ cm

7) $q = 2.0$

$L_C = 6\times10^{-3}\times(-2+2.5\times2) = 6\times10^{-3}\times3 = +0.018$ cm

3. 1নং কাচের জন্য মধ্যবর্তী বর্ণের আলোর প্রতিসরাঙ্ক ধরা যেতে পারে $n_1 = \frac{1.51+1.52}{2} = 1.515$

2নং কাচের জন্য মধ্যবর্তী বর্ণের আলোর প্রতিসরাঙ্ক হ'ল $n_2 = \frac{1.64+1.66}{2} = 1.65$

1নং কাচের বিচ্ছুরণ $\omega_1 = \frac{n_{নীল} - n_{লাল}}{n_1 - 1} = \frac{1.52-1.51}{1.515-1.0} = \frac{.01}{.515} = 0.0194$

2নং কাচের বিচ্ছুরণ $\omega_2 = \frac{1.66-1.64}{1.65-1.0} = \frac{.02}{.65} = 0.0307$

f_1, f_2 যথাক্রমে 1নং কাচ ও 2নং কাচের লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য এবং F লেন্স যুগ্মের ফোকাস দৈর্ঘ্য।

অবর্ণক লেন্স যুগ্ম গঠনের শর্ত হ'ল,

$$\frac{\omega_1}{f_1}+\frac{\omega_2}{f_2}=0 \quad \text{অর্থাৎ } \frac{f_1}{f_2} = -\frac{\omega_1}{\omega_2}$$

এখন $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$

$\therefore \frac{f_1}{F} - 1 = \frac{f_1}{f_2} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} \quad \therefore f_1 = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)F$

$\therefore f_1 = \left(1 - \frac{0.0194}{0.0307}\right) \times 50 = 18.4 \text{ cm}$

আবার, $\frac{f_2}{F} - 1 = \frac{f_2}{f_1} = -\frac{\omega_2}{\omega_1}$

$\therefore f_2 = \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)F = \left(1 - \frac{0.0307}{0.0194}\right) \times 50$

$= -29.12 \text{ cm}$

1নং কাচের লেন্স অভিসারী ও ফোকাস দৈর্ঘ্য 18.4 cm

2নং কাচের লেন্স অপসারী ও ফোকাস দৈর্ঘ্য = −29.12 cm

একক 4 ❑ আলোকের ব্যতিচার ও সুসম্বদ্ধতা

গঠন

4.1· প্রস্তাবনা

বিভিন্ন আলোকীয় ঘটনার (Optical phenomena) সঙ্গে আমরা যথেষ্ট পরিচিত। প্রতিফলন, প্রতিসরণ বা বিচ্ছুরণের বিষয়ে পূর্ববর্তী এককে আলোচনাও হয়েছে। আপনি নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে ঐসব ঘটনাগুলি ব্যাখ্যার জন্য আমরা জ্যামিতীয় আলোক বিভাগের সাহায্য নিয়েছি। অর্থাৎ আলোকরশ্মিকে ঋজুরেখ (rectilinear) পথে গমনকারী শক্তিপ্রবাহ হিসেবে ধরে নিয়ে আমরা আলোক সংক্রান্ত বেশ কিছু ঘটনার সন্তোষজনক ব্যাখ্যা দিতে পেরেছি। অথচ এই পর্যায়ের (Block-1) প্রথম এককে (Unit-1) আলোকের চরিত্র নিয়ে আলোচনায় দেখা গেছে আলো এক বিন্দু থেকে আরেক বিন্দুতে তরঙ্গাকারে প্রবাহিত হয়। এই তরঙ্গের দৈর্ঘ্য খুব ছোট (যেমন দৃশ্যমান আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 400nm [ন্যানোমিটার] থেকে 800nm বা এক মিটারের একশ কোটি ভাগের 400 ভাগ থেকে 800 ভাগ)। তাই কতগুলি ক্ষেত্রে আলোর তরঙ্গ স্বরূপকে (wave nature) উপেক্ষা করে সরল রেখায় প্রবাহিত রশ্মি হিসেবে ধরে নিয়ে আমরা কিছু বিষয় ব্যাখ্যা করতে পারি। কিন্তু সর্বদা এই কাজ করা সম্ভব নয়। আমরা এই এককে বিশেষ কিছু আলোকীয় ঘটনা পর্যালোচনা করব যা ব্যাখ্যার জন্য আলোকের তরঙ্গ স্বরূপ স্বীকার করে নেওয়া অবশ্য প্রয়োজনীয়।

এই একক থেকে শুরু করে পরবর্তী কয়েকটি এককে আমরা যে আলোকীয় ঘটনাগুলির কথা বলব তা হল, আলোকের ব্যতিচার, ব্যবর্তন, সমবর্তন প্রভৃতি এবং প্রতিটি ক্ষেত্রেই ব্যাখ্যার জন্য প্রয়োজন হবে আলোর তরঙ্গতত্ত্ব। ইতিহাসগত দৃষ্টিকোণ থেকে দেখলে বোঝা যাবে যে এই ঘটনাগুলি আবিষ্কৃত হয়েছে তুলনায় অনেক পরে। প্রতিফলন বা প্রতিসরণের সূত্রের সম্যক উপলব্ধির আগেই দূরবীণ তৈরি সম্ভব হয়েছিল। প্রতিসরণের স্নেলের সূত্র পাওয়া গিয়েছিল সপ্তদশ শতাব্দীর গোড়াতে। কিন্তু আলোকের ব্যতিচার সংক্রান্ত একটি অতি বিখ্যাত পরীক্ষা আজ থেকে দুশ বছর আগে 1801 সালে আলোর তরঙ্গচরিত্রের দিকে বিজ্ঞানীদের দৃষ্টি আকর্ষণ করতে সক্ষম হয়। টমাস ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষা (Young's double slit experiment) তাই একটি দিগ্‌নির্দেশক পরীক্ষা। টমাস ইয়ং এর নামের সঙ্গে অবশ্য আপনাদের আগেই পরিচয় ঘটেছে স্থিতিস্থাপকতার ইয়ং গুণাঙ্কের মধ্য দিয়ে।

খুব স্বাভাবিকভাবে এই প্রশ্ন উঠবে যে কেন এত দেরী হল আলোকের তরঙ্গ চরিত্রের হদিস পেতে। কেনই বা তরঙ্গভিত্তিক ব্যাখ্যার দাবী রাখে এমন আলোকীয় ঘটনাগুলি আরও আগে ধরা যায় নি? খুব সংক্ষেপে এর জবাব হচ্ছে যে এই পর্যবেক্ষণগুলির জন্য বেশির ভাগ ক্ষেত্রেই কিছু বিশেষ যন্ত্রব্যবস্থার প্রয়োজন যা পরবর্তীকালে তৈরি করা সম্ভব হয়েছে। আর কিছু পর্যবেক্ষণ, যেমন জলের ওপর ছড়ানো তেল স্তরের বর্ণ ইত্যাদির ব্যাখ্যা অন্যপথে দেওয়ার চেষ্টা হয়েছে। তাই ইয়াং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষা আলোকের ব্যতিচার তথা আলোকের তরঙ্গ ধর্ম বিষয়ক আলোচনার প্রথম ধাপ হিসেবে সুগৃহীত হয়েছে। আমরাও সেখান থেকেই শুরু করব। অবশ্য তার আগে তরঙ্গের উপরিপাত ও ঐ বিষয়ক গাণিতিক আলোচনার প্রয়োজন হবে।

এই এককের আরেকটি অন্যতম বিষয় সুসম্বদ্ধতা (coherence) বিষয়ক আলোচনার মধ্য দিয়ে আরও একবার বোঝা যাবে আলোর ব্যতিচার কেন খুব অনায়াসে দেখা সম্ভব হয় নি, আলোকের ব্যতিচারের ক্ষেত্রে সুসম্বদ্ধ উৎসের কেন প্রয়োজন হয় এবং কীভাবে সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরি করা যায়। নীতিগতভাবে যে দুটি উপায়ে সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরি করা যায় তার প্রথমটি অর্থাৎ তরঙ্গমুখের বিভাজনের (division of wavefront) বিষয়টি এখানে আলোচিত হবে। অপরটি অর্থাৎ বিস্তার বিভাজনের (division of amplitude) সাহায্যে সুসম্বদ্ধ উৎস গঠনের বিষয়টি পরবর্তী এককে পর্যালোচনা করা হবে।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করার পর আপনি

- ব্যতিচার বিষয়ে জানতে ও বুঝতে পারবেন।
- পদার্থবিদ্যার ইতিহাসে এক বিশেষ জায়গা দখল করে থাকা ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষা বিষয়ে অবগত হবেন।
- ব্যতিচারের ক্ষেত্রে সুসম্বদ্ধতা ও সুসম্বদ্ধ উৎসের প্রয়োজনীয়তা সম্পর্কে সম্যক ধারণা করতে পারবেন।
- বিভিন্ন উপায়ে গঠিত ব্যতিচার ব্যবস্থা ও সেগুলির বৈশিষ্ট্যের সঙ্গে আপনি পরিচিত হবেন।
- ব্যতিচার ঝালরে (Pattern) ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের বেধ নির্ণয় করতে পারবেন।

4.2 তরঙ্গের উপরিপাতের নীতি

দুটি তরঙ্গ পরস্পরকে প্রভাবিত না করে একই সঙ্গে প্রসার লাভ করতে পারে। শব্দ তরঙ্গ বা অন্য যান্ত্রিক তরঙ্গের ক্ষেত্রে আমরা দেখেছি কোনো মাধ্যমের মধ্য দিয়ে চলমান তরঙ্গগুলির প্রতিটিই স্বাধীনভাবে অগ্রসর হয়। আলোক রশ্মি যখন শূন্য মাধ্যমে গমন করে তখনও এই নীতি প্রযোজ্য হয়। কোনো মাধ্যমের একটি বিন্দু দিয়ে একাধিক তরঙ্গ প্রবাহিত হলে ঐ বিন্দুর লব্ধি সরণ হবে বিন্দুটিতে প্রতিটি তরঙ্গের নিজ নিজ সরণের ভেক্টর যোগফল। আবার দুটি তরঙ্গ মাধ্যমের কোনো একটি বিন্দুতে মিলিত হওয়ার পরে যখন অগ্রসর হয় তখন তাদের কোনো বৈশিষ্ট্যগত পরিবর্তন ঘটে না। ফলে ধরা যায় না তাদের উপরিপাত ঘটেছিল কিনা। পূর্ববর্তী একটি ব্লকে (EPH 03, Block 1, Unit-7) এই বিষয়টি বিস্তৃত ভাবে আলোচিত হয়েছে। তাই এখানে আমরা উপরিপাতের সম্পর্কে সংক্ষেপে কয়েকটি কথা বলে নেব।

সন্দেহ নেই ব্যতিচারের জন্য দুটি আলোক তরঙ্গের উপরিপাত অবশ্য প্রয়োজনীয়। কিন্তু ব্যতিচার হওয়ার জন্য আরও কিছু শর্ত পূরণ আবশ্যক। তাই উপরিপাত মানেই ব্যতিচার নয়। আমরা এই এককে ব্যতিচার সম্পর্কে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করব।

আলোক তরঙ্গের ব্যতিচারের জন্য যখন দুটি আলোকরশ্মির উপরিপাত ঘটে তখন সেখানে শক্তির পুনর্বিন্যাস তথা পুনর্বন্টন দেখা যায়। ফলে যে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ (interference fringe) গঠিত হয় তা পর্যায়ক্রমে আলোকিত ও অন্ধকার অঞ্চল বিশেষ। এইরকম ব্যতিচার ঝালরকে স্থায়ী চেহারা দেওয়ার জন্য আলোর উৎস দুটি বিশেষ সম্পর্কযুক্ত হওয়া প্রয়োজন।

আমরা এবার গণণা করে দেখব যে একই কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট কিন্তু দশা-পার্থক্য রয়েছে এমন দুটি তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে কী পাওয়া যাচ্ছে।

ধরা যাক

$$y_1 = a_1 \sin \omega t,$$
$$y_2 = a_2 \sin (\omega t + \delta)$$

তরঙ্গের উপরিপাতের নীতি অনুযায়ী লেখা যায় যে

$$y = y_1+y_2= a_1 \operatorname{Sin} \omega t+ a_2 \operatorname{Sin} (\omega t+ \delta)$$
$$= a_1 \operatorname{Sin} \omega t+ a_2 \operatorname{Sin} \omega t \operatorname{Cos} \delta+a_2 \operatorname{Cos} \omega t \operatorname{Sin} \delta$$
$$= \operatorname{Sin} \omega t\, [a_1+a_2 \operatorname{Cos} \delta] + [\operatorname{Cos} \omega t]\ [a_2 \operatorname{Sin} \delta] \quad \text{.................(4.1)}$$

এখন ধরা যাক

$$a_1+ a_2 \operatorname{Cos} \delta= A \operatorname{Cos} \theta,$$

এবং $\quad a_2 \operatorname{Sin} \delta= B \operatorname{Sin} \theta,$

যেখানে B এবং θ উভয়েই দুটি নতুন ধ্রুবক।

$$y = (\operatorname{Sin} \omega t) (B \operatorname{Cos} \theta) + (\operatorname{Cos} \omega t) (B \operatorname{Sin} \theta)$$
$$= B \operatorname{Sin} (\omega t +\theta) \quad \text{...............(4.2)}$$

অতএব দেখা যাচ্ছে লব্ধি তরঙ্গও একই কম্পাঙ্কযুক্ত একটি সাইন তরঙ্গ (Sine wave) যার বিস্তার হচ্ছে B। B র সম্যক পরিচয়ের জন্য আমরা নীচের পদ্ধতি অবলম্বন করব। আমরা লিখতে পারি

$$B^2 \operatorname{Cos}^2\theta + B^2 \operatorname{Sin}^2\theta = (a_1+a_2 \operatorname{Cos} \delta)^2 + (a_2 \operatorname{Sin} \delta)^2$$

$$\therefore B^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos\delta \quad \text{...............(4.3)}$$

আমরা জানি যে তরঙ্গের প্রাবল্য বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক তাহলে লব্ধি প্রাবল্য I লিখলে (4.3) সমীকরণটি হবে।

$$I =I_1+I_2+2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Cos}\delta \quad \text{..............(4.4)}$$

লক্ষ্য করুন যে লব্ধি প্রাবল্য দুটি তরঙ্গের কেবল বিস্তার নয়, দশা পার্থক্যের ওপরেও নির্ভরশীল। আর ওপরের (4.4) সমীকরণটি পাওয়া যায় কারণ লব্ধি প্রাবল্য $I \propto B^2$, প্রথম তরঙ্গের প্রাবল্য $I_1 \propto a_1^2$ এবং দ্বিতীয় তরঙ্গের প্রাবল্য $I_1 \propto a_2^2$ তাহলে লেখা যায় যে স্পষ্টতই লব্ধি প্রাবল্য তরঙ্গ দুটির প্রত্যেকটির প্রাবল্যের থেকে ভিন্ন এবং তরঙ্গ দুটির দশা পার্থক্যের ওপর নির্ভরশীল। এই সমীকরণ ব্যবহার করে একটি গাণিতিক উদাহরণ দেখা যাক,

উদাহরণ 1

দুটি উৎস থেকে নির্গত সমান কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট অথচ ভিন্ন বিস্তারের দুটি আলোক তরঙ্গের প্রাবল্যের অনুপাত 81:1। তরঙ্গ দুটির উপরিপাতের ফলে উদ্ভূত ব্যতিচার নকশায় সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন প্রাবল্যের ফ্রিঞ্জের প্রাবল্য দুটির অনুপাত নির্ণয় করুন।

উত্তর :

আমরা (4.3) সমীকরণ থেকে লিখতে পারি যে

সর্বোচ্চ প্রাব্যল্য $I_{max} = \left(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}\right)^2$, যখন $Co\delta = 1$

সর্বনিম্ন প্রাবল্য $I_{min} = \left(\sqrt{I_1} \sim \sqrt{I_2}\right)^2$, যখন $Co\delta = -1$

এক্ষেত্রে দেওয়া আছে $I_1/I_2 = 81/1$

অতএব, $\sqrt{\frac{I_1}{I_2}} = \sqrt{\frac{81}{1}}$ অথবা, $\sqrt{I_1} = 9\sqrt{I_2}$

অতএব,
$$I_{max} = \left(9\sqrt{I_2} + \sqrt{I_2}\right)^2 = 100\, I_2$$
$$I_{min} = \left(9\sqrt{I_2} \sim \sqrt{I_2}\right)^2 = 64\, I_2$$

সুতরাং সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন প্রাবল্যের অনুপাত হবে

$$\frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{100 I_2}{64 I_2} = \frac{25}{16} \quad \therefore I_{max} : I_{min} = 25 : 16$$

এবার আপনি নীচের অনুশীলনী নিজে চেষ্টা করে দেখুন।

অনুশীলনী 1 : দুটি উৎস থেকে আগত আলোক তরঙ্গের বিস্তারের অনুপাত 2 :1, সমান কম্পাঙ্কের এই দুটি তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে প্রাপ্ত লব্ধি প্রাবল্যের সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন মানের অনুপাত গণনা করুন।

অনুশীলনী 2 : দুটি উৎস থেকে আগত সমান কম্পাঙ্ক এবং স্থির দশা পার্থক্য বিশিষ্ট দুটি তরঙ্গের প্রাবল্য যথাক্রমে I_1 এবং $4I_1$, যখন তরঙ্গ দুটির দশা পার্থক্য $\frac{\pi}{2}$ তখন তাদের উপরিপাতের ফলে উদ্ভূত লব্ধি প্রাবল্য কত? দশা পার্থক্য π হলে লব্ধি প্রাবল্য কী দাঁড়াবে?

এবার আমরা (4.4) সমীকরণের দিকে আর একবার দৃষ্টি দেব। যদি দুটি তরঙ্গের বিস্তার সমান হয় অর্থাৎ যদি $a_1 = a_2 = a$ হয় তবে আমরা পাই

$$I = a^2 + a^2 + 2a^2 Cos\delta$$

এক্ষেত্রে যেহেতু $a_1 = a_2 = a$, সুতরাং $I_1 = I_2 = I'$ ধরা যায়

অতএব
$$I = I' + I' + 2I' Cos\delta$$
$$= 2I'(1 + Cos\,\delta)$$
$$= 4I' Cos^2 \delta/2 \qquad \text{..........(4.5)}$$

অতএব দেখা যাচ্ছে যে দুটি সমপ্রাবল্যের তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে লব্ধি প্রাবল্য ঐ তরঙ্গদুটির প্রাবল্য এবং তাদের দশা পার্থক্যের ওপর নির্ভর করে।

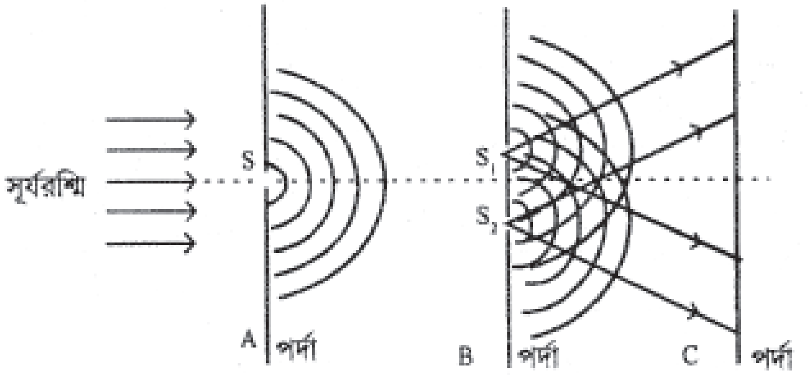
যেহেতু $\cos^2 \delta/2$ -এর সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন মান যথাক্রমে 1 এবং O, অতএব সমীকরণ (4.5) থেকে লব্ধি প্রাবল্যের সর্বোচ্চ মান হবে $4I'$ অর্থাৎ যে দুটি তরঙ্গের উপরিপাত ঘটেছে তাদের প্রাবল্যের চারগুণ যখন $\cos^2 \delta/2 = 1$ এবং এই লব্ধি প্রাবল্যের সর্বনিম্ন মান শূন্য হবে যখন $\cos^2 \delta/2 = 0$ ।

আমরা আগেই বলেছি যে উপযুক্ত ব্যবস্থার সাহায্যে উপরিপাতের ঘটনা ক্ষেত্রবিশেষে ব্যতিচার সৃষ্টি করতে পারে। আলোর ব্যতিচারের ক্ষেত্রে দুটি আলোক রশ্মির উপরিপাতের মধ্যে দিয়ে ব্যতিচার ঘটে। সেই রশ্মিদ্বয় এমন ভাবে মিলিত হতে পারে যার ফলে লব্ধি প্রাবল্য সর্বোচ্চ হয় অর্থাৎ $\cos^2 \delta/2$-র মান 1 হয়। যার অর্থ $\delta/2 = m\pi$ যেখানে m একটি ধনাত্মক বা ঋণাত্মক পূর্ণ সংখ্যা অথবা শূন্য। এই ঘটনাকে বলে সংপোষী বা গঠনমূলক ব্যতিচার (Constructive interference)। অন্যদিকে যদি ব্যতিচারের ফলে লব্ধি প্রাবল্য শূন্য হয় অর্থাৎ $\cos^2 \delta/2 = 0$ বা $\delta/2 = m\frac{\pi}{2}$ (যেখানে $m \neq 1, \neq 2, \neq 3,$ ইত্যাদি) তাহলে সেই ব্যতিচারকে বলা হয় বিনাশী ব্যতিচার (destructive interference)। এই বিষয়গুলি আমাদের আলোচনায় আবার আসবে।

4.3 ইয়ং-এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষা (Young's double-slit experiment)

1801 সালে, বিজ্ঞানী টমাস ইয়ং এর একটি বিশেষ পরীক্ষা আলোক বিজ্ঞানের জগতে অন্যতম মাইলফলক। তার এই পরীক্ষা আলোর তরঙ্গ স্বরূপ সন্দেহাতীত ভাবে প্রতিষ্ঠা করে দেয়। তার আগে আলোকের তরঙ্গ স্বরূপের সম্ভাব্যতা নিয়ে বিভিন্ন তত্ত্ব প্রস্তাবিত হলেও ইয়ং তার এই দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার মাধ্যমে দেখান যে এই পরীক্ষালব্ধ পর্যবেক্ষণ কেবলমাত্র আলোককে তরঙ্গ হিসেবে ধরে নিয়ে ব্যাখ্যা করা সম্ভব। আপনারা স্থিতিস্থাপকতা বিষয়ে চর্চা করতে গিয়ে যে ইয়ং গুণাঙ্কের কথা শুনেছেন তা এসেছে এই টমাস ইয়ং এর নাম থেকেই।

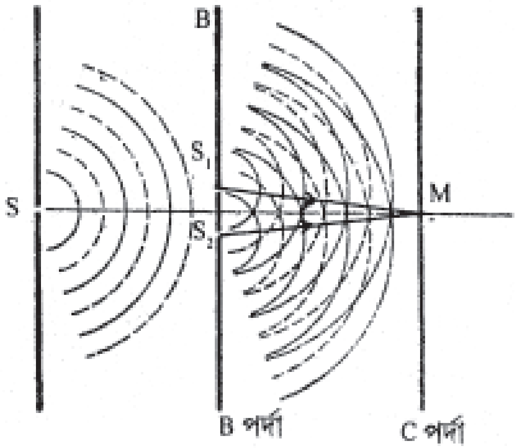
ইয়ং এর পরীক্ষাটি নীচের চিত্রের (4.1) সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। পর্দা A এর ওপর একটি অতিক্ষুদ্র পিনছিদ্র (pinhole) রয়েছে (S_0) সেখানে সূর্যালোক আপতিত হচ্ছে।



চিত্র 4.1 ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার যান্ত্রিক ব্যবস্থা

এই পিনছিদ্র থেকে নির্গত আলোকরশ্মি আপতিত হয় পর্দা B র ওপর যার মধ্যে খুব অল্প দূরত্বে দুটি পিনছিদ্র S_1 এবং S_2 রয়েছে যেখান থেকে আলো আবার নির্গত হয়ে পর্দা C র ওপর আপতিত হতে পারে। চিত্র 4.2 লক্ষ্য করলে দেখা যাবে S_1 এবং S_2 থেকে আগত আলোকরশ্মির B পর্দা ও C পর্দার মধ্যবর্তী অঞ্চলে এবং C পর্দায় উপরিপাত ঘটে।

বিষয়টি আপাতদৃষ্টিতে যথেষ্ট সরল মনে হলেও এবং এই ধরণের ঘটনার কথা আগে জানা থাকলেও ইয়ং প্রথম লক্ষ্য করেন যে C পর্দায় আপতিত আলোক সর্বত্র সমান ঔজ্জ্বল্যের সৃষ্টি করেনি বরং সেখানে তৈরি হয়েছে পর্যায়ক্রমে কিছু অন্ধকার ও উজ্জ্বল পটি। এর মধ্যে একটি পটি বিশেষভাবে উজ্জ্বল এবং ঐ পটিটির মধ্যবিন্দু M, S_1 ও S_2 ছিদ্র থেকে সমদূরত্বে অবস্থিত। এই উজ্জ্বল পটিটিকে কেন্দ্রীয় ঝালর হিসেবে অভিহিত করা হয়। লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে এই কেন্দ্রীয় ঝালর থেকে যত দূরে যাওয়া যায় উজ্জ্বল ঝালরগুলির ঔজ্জ্বল্য তত কমতে থাকে। এই ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থাকে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ বলা হয়।



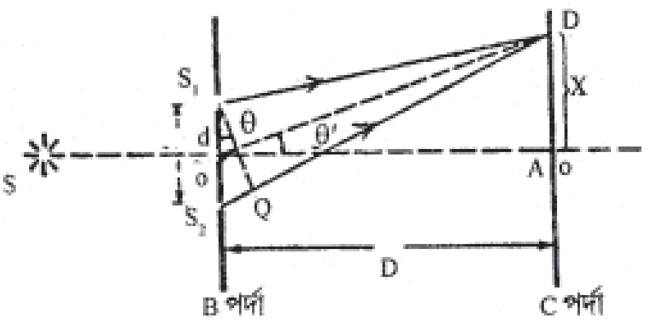
চিত্র 4.2 ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষায় সৃষ্ট কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জ C পর্দার M বিন্দুতে সৃষ্টি হয়েছে।

ইয়ং এর পরীক্ষায় যে ঝালর পাওয়া যায় তার উৎস তরঙ্গের উপরিপাতের নীতি থেকে ব্যাখ্যা করা যায় এবং সেই ব্যাখ্যায় আমরা যাবো। তবে তার আগে C পর্দায় আপতিত আলোর এই ঝালর সৃষ্টি তথা শক্তিবিন্যাসের ও পুনর্বণ্টনের কয়েকটি বৈশিষ্ট্য আমরা আলোচনা করব। আরও একটি বিষয়ে আপনাদের দৃষ্টি আকর্ষণ করছি। নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষায় যে ঝালর সৃষ্টির বিষয়টি দেখা যায় তার ব্যাখ্যা কিন্তু আলোর ঋজুরেখ গতির সাহায্যে দেওয়া সম্ভব নয়। কারণ আলো যদি S_1 এবং S_2 পিনছিদ্র দিয়ে কেবলমাত্র ঋজুরেখ পথে অগ্রসর হয়ে C পর্দায় আপতিত হত তাহলে কিন্তু C পর্দায় কেবলমাত্র দুটি আলোক বিন্দু আমরা দেখতে পেতাম অর্থাৎ এই পরীক্ষার মাধ্যমে আলোর ফ্রিঞ্জের (fringe) সৃষ্টি নিশ্চিত ভাবে প্রমাণ করে আলোক রশ্মি এক বিন্দু থেকে অন্য একটি বিন্দুতে তরঙ্গাকারে প্রসার লাভ করে। আলোর ঋজুরেখ গতি ঐ তরঙ্গাকারের এক সরলীকৃত অভিরূপ মাত্র।

ইয়ং এর পরীক্ষা যেভাবে করা হয়েছিল তাতে খুব ভালো ফল অবশ্য পাওয়া যায়নি। কারণ একদিকে A ও B পর্দার তিনটি ছিদ্র S, S_1 এবং S_2 খুব ছোট হওয়া প্রয়োজন কারণ তা না হলে সমস্ত ঘটনাটি প্রত্যক্ষ করা সম্ভব হবে

না অথচ ছিদ্র যদি অত্যন্ত ছোট হয় তবে C পর্দাতে পৌঁছনো আলোর পরিমাণ ভীষণ কমে যায়। সেক্ষেত্রে উজ্জ্বল এবং কালো বা অন্ধকার (dark) ফ্রিঞ্জকে আলাদা করে চেনা শক্ত হয়ে পড়ে। দ্বিতীয়ত সূর্যের আলো, আমরা জানি, অনেকগুলি বর্ণের আলোর সমষ্টি। প্রতিটি বর্ণের আলো আলাদা করে একটি ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থা গড়ে তোলে। C পর্দার ঠিক কোন জায়গায় উজ্জ্বল এবং কালো ফ্রিঞ্জ তৈরি হবে তা নির্ভর করে আপতিত আলোকের বর্ণ তথা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ওপর সূর্যের আলোয় বহু তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোর উপস্থিতির ফলে C পর্দার একই বিন্দুতে একটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য উজ্জ্বল পটি তৈরি হলে ঐ একই বিন্দুতে আরেকটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর জন্য কালো ঝালর তৈরি হতে পারে। ফলে সামগ্রিক ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থাটি তুলনায় অস্পষ্ট হয়ে পড়ে। এই অবস্থা এড়ানোর জন্য পরবর্তী পর্যায়ে দুটি পদক্ষেপ নেওয়া হয়। প্রথমত সূর্যের আলোর মত বহু বর্ণ বিশিষ্ট আলোর পরিবর্তে একবর্ণ বিশিষ্ট আলোর সাহায্যে পরীক্ষাটি করা হয় এবং দ্বিতীয়ত: ইয়ং এর মূল পরীক্ষায় ব্যবহৃত পিনছিদ্রগুলির (S, S_1, S_2) পরিবর্তে রেখাছিদ্র (Slit) ব্যবহার করে অপেক্ষাকৃত ভালো ফল পাওয়া যায়। তবু একথা আবারও বলা প্রয়োজন যে ঐতিহাসিক দিক থেকে আলোর তরঙ্গ স্বরূপ প্রতিষ্ঠা করার ক্ষেত্রে ইয়ং এর পরীক্ষা এক অনন্য স্থান দখল করে রয়েছে। এবার আমরা দেখব কীভাবে আলোর তরঙ্গ স্বরূপের ওপর ভিত্তি করে ও উপরিপাতের নীতি প্রয়োগ করে ইয়ং এর পরীক্ষায় প্রাপ্ত ফ্রিঞ্জের বেধ নির্ণয় করা যায়।

4.3.1 ইয়ং এর পরীক্ষায় প্রাপ্ত ফ্রিঞ্জের বেধ নির্ণয়



চিত্র 4.3 ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষায় আলোক রশ্মির পথপার্থক্য গণনা।

চিত্র 4.3 এ দেখা যাচ্ছে যে S_1 এবং S_2 পিনছিদ্র দুটি থেকে আলোকরশ্মি এসে পর্দায় আপতিত হচ্ছে। A বিন্দুটি S_1 এবং S_2 থেকে সমদূরত্বে অবস্থিত। ফলে S_1 এবং S_2 থেকে দুটি আলোক তরঙ্গ যখন সেখানে মিলিত হবে তখন সমান দূরত্ব অতিক্রম করে আসার ফলে সেই তরঙ্গ দুটির মধ্যে কোনো পথ পার্থক্য (Path difference) থাকবে না এবং তাদের মধ্যে কোনো দশার পার্থক্যও হবে না, ফলে উপরিপাতের নীতি অনুযায়ী ঐ A বিন্দুতে আলোক তরঙ্গের সংপোষী ব্যতিচার (Constructive interference) ঘটবে অর্থাৎ ঐ বিন্দুতে একটি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের সৃষ্টি হবে। কিন্তু ঐ একই পর্দার ওপর P বিন্দুতে S_1 এবং S_2 থেকে আলো বিভিন্ন দূরত্ব অতিক্রম করে পৌঁছচ্ছে। এখানে $S_1P < S_2P$।

তাই S_1 ও S_2 রেখাছিদ্র থেকে P বিন্দুতে আগত তরঙ্গ দুটির পথপার্থক্য ($S_2P- S_1P$) এবং দশাপার্থক্য $\delta = \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(S_2P- S_1P)$। স্পষ্টতই দশাপার্থক্য ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ -র ওপর নির্ভরশীল। পথপার্থক্য ($S_2P- S_1P$) কে S_2Q-এর সমান লেখা যায়। S_1S_2 দূরত্বটি খুব ক্ষুদ্র S_2P -র ওপর Q এমন একটি বিন্দু যে S_1=PQ, উৎসদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব d, উৎস ও পর্দার মধ্যে দূরত্ব D-র তুলনায় খুবই ছোট। অর্থাৎ $d << D$।

তাই লেখা যায় $S_2P\text{-}S_1P = S_2Q = d\ \mathrm{Sin}\,\theta$ ।

S_1QS_2 কোণটি প্রায় সমকোণ বলে ধরে নেওয়া যায়। θ এবং θ' কোণ দুটিই ক্ষুদ্র এবং প্রায় সমান $\theta \simeq \theta'$ । আর এই কোণ দুটি অত্যন্ত ক্ষুদ্র হলে লেখা যায় $\mathrm{Sin}\theta' = \tan\theta'$

$$\therefore S_2P - S_1P = d\mathrm{Sin}\theta' = d\frac{x}{op}$$

$$= d\frac{x}{OA} = d\frac{x}{D}$$

এখানে $x = AP = \dfrac{D}{d}(S_2P - S_1P)$ ....(4.6a)

আমরা জানি যে S_1 ও S_2 থেকে আগত আলোক তরঙ্গের সম্মিলিত প্রভাবে P বিন্দুতে যে প্রাবল্যের সৃষ্টি হবে তা

হল $I = 4a^2\mathrm{Cos}^2\dfrac{\delta}{2} = 4a^2\mathrm{Cos}^2\left(\dfrac{2\pi}{\lambda}\dfrac{d}{2}\dfrac{x}{D}\right)$

$$= 4a^2\mathrm{Cos}^2\left(\frac{2\pi}{D}\frac{d}{\lambda}\right) \quad ....(4.6)$$

এই প্রাবল্য সর্বোচ্চ হবে যখন $I = 4a^2$, অর্থাৎ $\mathrm{Cos}^2\left(\dfrac{x\pi}{D}\dfrac{d}{\lambda}\right) = 1$ হয় বা $\mathrm{Cos}\left(\dfrac{x\pi}{D}\dfrac{d}{\lambda}\right) = \pm 1$ হয় অর্থাৎ যখন

$\dfrac{x\pi}{D}\dfrac{d}{\lambda} = m\pi$ হয় যেখানে m = যে কোনো ধনাত্মক বা ঋণাত্মক অখণ্ড সংখ্যা অথবা শূন্য

সুতরাং $x = \dfrac{D}{d}m\lambda = \dfrac{D}{d}(2m)\lambda/2$ ....(4.7)

আবার প্রাবল্য সর্বনিম্ন হবে যদি $I = O$ হয়। সেক্ষেত্রে (4.6) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় $\mathrm{Cos}^2\left(\dfrac{x\pi}{D}\cdot\dfrac{d}{\lambda}\right) = 0$

বা $\dfrac{x\pi}{D}\dfrac{d}{\lambda} = (2m+1)\pi/2$

বা, $x = \dfrac{D}{d}(2m+1)\lambda/2$ ....(4.8)

এখানেও m একটি অখণ্ড সংখ্যা অথবা শূন্য। এই দুটি ক্ষেত্রেই m ব্যতিচার ঝালরের ক্রম বোঝাচ্ছে। দেখা যাচ্ছে যে A বিন্দু থেকে m ক্রমিক সংখ্যার বা m-ক্রমের (m^{th} order) উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্ব

$$x_m = \frac{D}{d}m\lambda = \frac{D}{2d}2m.\lambda/2 \quad ....(4.8a)$$

একইভাবে (m+1) ক্রমের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্ব $x_{m+1} = \dfrac{D}{d}(m+1)\lambda = \dfrac{D}{2d}2(m+1)\lambda/2$ ....(4.8b)

সুতরাং একটি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের প্রস্থ

$$X_{m+1} - X_m = \frac{D}{d}\lambda(m+1-m) = \frac{D\lambda}{d} \quad ....(4.8c)$$

$\therefore$ ফ্রিঞ্জের প্রস্থকে β দ্বারা সূচিত করলে লেখা যায়

$$\beta = \frac{D\lambda}{d} \quad .... (4.9)$$

লক্ষ্য করুন এই প্রস্থ D, d এবং λ -র ওপর নির্ভরশীল এবং এটি ক্রমের ওপর নির্ভরশীল নয়। যার অর্থ সমস্ত ক্রমের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের প্রস্থ একই রকম। ঠিক একইভাবে লেখা যায়

m- ক্রমের অন্ধকার বা কালো (dark) ফ্রিঞ্জের A বিন্দু থেকে দূরত্ব

$$x'_m = \frac{D}{d}(2m+1)\lambda/2 \qquad \text{................(4.10a)}$$

এবং (m+1) -ক্রমের কালো ফিঞ্জের A বিন্দু থেকে দূরত্ব

$$x'_{m+1} = \frac{D}{d}[2(m+1)+1]\lambda/2 = \frac{D}{d}[2m+3]\lambda/2 \qquad \text{............. (4.10b)}$$

এক্ষেত্রেও ফ্রিঞ্জের প্রস্থ

$$x'_{m+1} - X'_m = \frac{D}{d}[2m+3-2m-1]\lambda/2 = \frac{D\lambda}{d} = \beta \qquad \text{............... (4.10c)}$$

অর্থাৎ অন্ধকার ফ্রিঞ্জের প্রস্থ ও উজ্জ্বলই ফ্রিঞ্জের প্রস্থ সমান এবং উভয়ক্ষেত্রেই ফ্রিঞ্জের প্রস্থ $\beta = \frac{D\lambda}{\lambda}$।

কাজেই ফ্রিঞ্জ উজ্জ্বল হোক বা অন্ধকার হোক ফ্রিঞ্জের প্রস্থ β বৃদ্ধি বা হ্রাস পাবে

(i) উৎসদ্বয়ের দূরত্ব কমালে বা বাড়ালে, এবং (ii) তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ ও পর্দা থেকে উৎসের দূরত্ব D উভয়ই বাড়ালে বা কমালে ।

আমরা পরবর্তী পর্যায়ে এই ব্যতিচারের অন্যান্য বৈশিষ্ট্য নিয়ে আলোচনার আগে আপনি একটি অনুশীলনী চেষ্টা করে দেখুন।

অনুশীলনী 3 : পরস্পরের থেকে 3mm দূরে অবস্থিত দুটি সরু সমান্তরাল রেখাছিদ্র থেকে নির্গত আলো 0.60m দূরে অবস্থিত পর্দার ওপর ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ গঠন করে। যদি রেখাছিদ্র দুটি 590nm তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের অলোর সাহায্যে আলোকিত হয়ে থাকে তবে গঠিত ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের প্রস্থ নির্ণয় করুন।

4.3.2 ইয়ং এর পরীক্ষায় প্রাপ্ত ফ্রিঞ্জের প্রকৃতি

পর্দার ওপরে অবস্থিত P বিন্দুতে যদি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ দেখা যায়, তাহলে লেখা যায়

$$S_2P - S_1P = m\lambda \qquad \text{..............(4.11a)}$$

একবর্ণী আলোর ক্ষেত্রে λ ধ্রুবক, সুতরাং $m\lambda$ -ও ধ্রুবক। আমরা যদি $S_2P = r_2$ এবং $S_1P = r_1$ দ্বারা সূচিত করি তবে ওপরের সমীকরণ (4.11a)-কে আমরা লিখতে পারি $r_2 - r_1 =$ ধ্রুবক ....(4.11b)

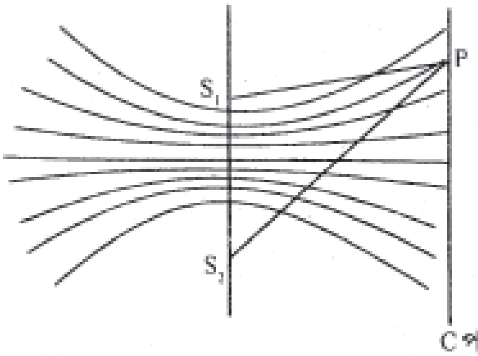
এটি একটি পরাবৃত্তের (hyperbola) সমীকরণ।

P বিন্দুটিকে পর্দার ওপর ভিন্ন স্থানে নির্বাচিত করলে দেখা যাবে যে ধ্রুবকটি ভিন্ন হচ্ছে। যার অর্থ ভিন্ন ভিন্ন ক্রমের (order) ফ্রিঞ্জগুলি বিভিন্ন পরাগোলকের (hyperboloid of revolution) ওপর অবস্থিত থাকবে এবং প্রতিটিরই ফোকাস বিন্দুদ্বয় হবে S_1 এবং S_2। ফ্রিঞ্জের আকৃতি অবশ্য পর্দার অবস্থানের ওপর নির্ভর করবে। যেমন, (i) যদি দুটি উৎসের সংযোগকারী সরলরেখার সমান্তরাল করে পর্দাটি রাখা হয় তাহলে আমরা পর্যায়ক্রমে উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জ দেখতে পাব, এবং এই ফ্রিঞ্জগুলি মূল রেখাছিদ্র S এর দৈর্ঘ্যের সমান্তরাল হবে। (চিত্র 4.4)

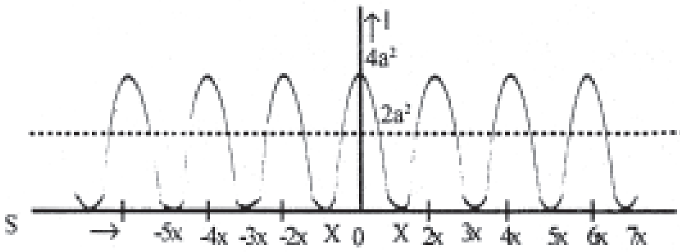
(ii) যদি S_1ও S_2 র সংযোগকারী রেখার লম্বভাবে পর্দাকে রাখা যায় তাহলে কতগুলি সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকৃতি ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। এই বৃত্তগুলি পর্যায়ক্রমে উজ্জ্বল ও অন্ধকার হবে।

লক্ষ্য করার বিষয় ত্রিমাত্রিক দেশের (three dimensional space) যেখানে ব্যতিচার ঘটেছে সেখানে পর্দা রাখলেই ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে। অর্থাৎ ফ্রিঞ্জ একটি বিশেষ স্থানেই গঠিত হয় নি। তাই এই ধরণের ফ্রিঞ্জকে বলা হয় অস্থানীকৃত ফ্রিঞ্জ (non-localized fringe)।

আরেকটি বিষয় আমাদের খেয়াল রাখতে হবে। ব্যতিচারের ফলে শক্তি পুনর্বিন্যাস ও পুনর্বণ্টন ঘটে কিন্তু শক্তির সংরক্ষণ সূত্রটি রক্ষিত হয়। নীচের চিত্রে (4.5) একটি ব্যতিচার ব্যবস্থায় S_1ও S_2 উৎস থেকে সমদূরত্বে অবস্থিত পর্দার ওপর বিভিন্ন বিন্দুতে দশাপার্থক্যের সঙ্গে আলোক প্রাবল্যের পরিবর্তনটি দেখানো হয়েছে। যেখানে $4a^2$ চরম (maximum) প্রাবল্য সেখানে পাওয়া যাবে উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ এবং সর্বনিম্ন প্রাবল্য যেখানে শূন্য হবে, সেখানে পাওয়া যাবে অন্ধকার ফ্রিঞ্জ। লক্ষ্য করুন (চিত্র4.5) সমগ্র ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থাটির গড় আলোক প্রাবল্য $2a^2$, যা সংশ্লিষ্ট আলোকরশ্মি দ্বয়ের প্রাবল্যের যোগফল। এর থেকে বোঝা যায় যে শক্তির সংরক্ষণ সূত্রটি এখানে রক্ষিত হয়েছে।



চিত্র (4.4) ইয়ং এর পরীক্ষায় গঠিত ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের আকৃতি পর্দা কীভাবে রাখা হচ্ছে তার ওপর নির্ভরশীল।



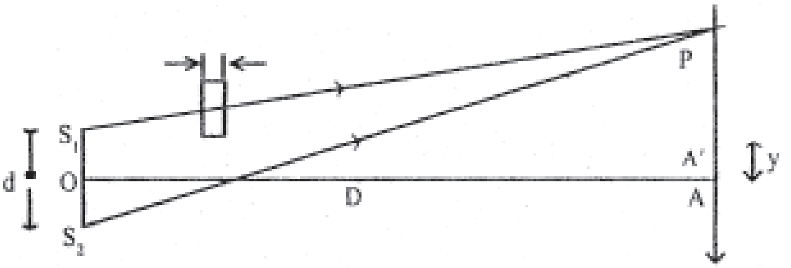
চিত্র (4.5) ব্যতিচার নকশায় দশা পার্থক্যের সঙ্গে আলোক প্রাবল্যের পরিবর্তন।

4.3.3 ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের সরণের সাহায্যে পাতলা, স্বচ্ছ পাতের বেধ নির্ণয়

ব্যতিচার নকশায় যে ফ্রিঞ্জ দেখা যায় দুটি উৎস থেকে আগত আলোকরশ্মির পথপার্থক্যের ওপর তা নির্ভর করে আমরা দেখেছি। এ ধরনের ব্যতিচার ব্যবস্থায় উৎসে দুটির যে কোনো একটি থেকে নির্গত আলোক রশ্মির পথে যদি স্বচ্ছ ও পাতলা কোন পাত রাখা হয় তাহলে রশ্মিটিকে অতিরিক্ত কিছু পথ অতিক্রম করতে হয়। এই অতিরিক্ত পথের পরিমাণ যে পাত রাখা হয়েছে তার বেধ ও তার উপাদানের প্রতিসরাঙ্কের ওপর নির্ভর করে। রশ্মির পথটি

দীর্ঘতর হয়ে যাওয়ার ফলে পাতটি রশ্মিটির পথে স্থাপনের পূর্বে যেখানে অপর রশ্মিটির সঙ্গে মিলিত হয়ে শূন্য ক্রমের ফ্রিঞ্জটি তৈরি করেছিল এখন সেখানে রশ্মি দুটির মধ্যে পথপার্থক্য সৃষ্টি হওয়ায় ভিন্ন ক্রমের ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে। অর্থাৎ সামগ্রিকভাবে ফ্রিঞ্জগুলি একটু সরে যাবে। ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থার এই সরে যাওয়া বা স্থানান্তরের পরিমাণ মাপা সম্ভব হলে ঐ পাতটির বেধ মাপা সম্ভব যদি ঐ পাতের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক জানা থাকে। অন্যভাবে বলা যায় যে, যদি পাতলা পাতটির বেধ জানা থাকে তাহলে ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থার সরণের পরিমাণ মেপে পাতের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক নির্ণয় করা সম্ভব।

চিত্র 4.6 -এ দেখানো হয়েছে যে t বেধের একটি পাতলা পাত,যার উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক μ,তাকে



চিত্র (4.6) দুটি উৎস থেকে নির্গত দুটি রশ্মির একটির পথে 't' বেধের ও μ প্রতিসরাঙ্ক বিশিষ্ট উপাদানের একটি স্বচ্ছ পাত রাখা হয়েছে। ফলে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি A থেকে A^1 -এ সরে গেছে।

রাখা হয়েছে S_1 থেকে নির্গত আলোক রশ্মির পথে। ফলে S_1থেকে যে রশ্মি পর্দার P বিন্দুতে পৌঁছতে আগে কেবলমাত্র বায়ুতে S_1P পথ অতিক্রম করত সেই রশ্মি বর্তমানে $(S_1P\text{-}t)$ পথ বায়ুতে এবং বাকী t পথ μ প্রতিসরাঙ্ক বিশিষ্ট মাধ্যমের ভিতর দিয়ে যাবে। যদি বায়ুতে এবং ঐ মাধ্যমে আলোর গতিবেগ যথাক্রমে C এবং ν হয় তবে

S_1 থেকে P তে পৌঁছনোর জন্য প্রয়োজনীয় সময় T হবে $T = \dfrac{S_1P - t}{c} + \dfrac{t}{\nu}$

যেহেতু $\nu = \dfrac{c}{\mu}$,

$$\therefore T = \frac{S_1P - t}{c} + \frac{\mu t}{c} = \frac{S_1P + (\mu - 1)t}{c}$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে পাতটি S_1P পথটিকে $(\mu - 1)t$ পরিমাণ দীর্ঘতর করে দিয়েছে। চিত্র 4.3 এর অনুসরণে 4.6 নং চিত্রেও পর্দার A বিন্দুটি দুটি উৎস S_1ও S_2 থেকে সমদূরত্ব বিশিষ্ট। ফলে ঐ A বিন্দুতেই কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জটি পাওয়ার কথা। কিন্তু এ ক্ষেত্রে পর্দার ওপর অপর এক বিন্দু A^1 আলোক পথের (optical path) বিচারে S_1ও S_2 থেকে সমদূরত্বে রয়েছে। ফলে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জটিও সেখানেই গঠিত হবে।

P বিন্দুতে দুটি উৎস থেকে আগত রশ্মিদ্বয়ের পথপার্থক্য এখন কী হবে দেখা যাক।

নতুন পথপার্থক্য $S_2P - \left[S_1P + (\mu - 1)t\right] = S_2P - S_1P - (\mu - 1)t$

কিন্তু সমীকরণ (4.6a) থেকে পাই $= S_2P - S_1P = \dfrac{d}{D}x$

$\therefore$ নতুন পথপার্থক্য $= \dfrac{d}{D}x - (\mu - 1)t$ ....(4.11)

এখন যদি পর্দার ওপর A থেকে x'_m দূরত্বের কোন বিন্দুতে m ক্রমিক সংখ্যার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জটি গঠিত হয় তাহলে ওপরের সমীকরণটি কে (4.7) সমীকরণের সাহায্যে লেখা যায় $= \frac{d}{D}x'_m - (\mu-1)t = m\lambda$ ...(4.12)

$$\therefore x'_m = \frac{D}{d}\left[m\lambda + (\mu-1)t\right] \qquad ....(4.13)$$

লক্ষ্য করুন ঐ পাত না থাকলে t=0 হতো এবং (4.13 সমীকরণে) t=0 বসালে আমরা সমীকরণ (4.7) -এর মত একটি ব্যঞ্জনা পেতাম।

অতএব পাতটির জন্য ফ্রিঞ্জের অবস্থানের যে সরণ দেখা যাবে অর্থাৎ একই ক্রমিক সংখ্যার ফ্রিঞ্জ ঐ পাত প্রবেশ করানোর আগে যেখানে ছিল সেখান থেকে যতটা সরে যাবে তা হল

$$x'_m - x_m = \frac{D}{d}\left[(\mu-1)t + m\lambda\right] - \frac{D}{d}(m\lambda)$$

এই সরণ $(x'_m - x_m) = y$ লিখলে উপরের সমীকরণটি হবে

$$y = \frac{D}{d}(\mu-1)t \qquad ....(4.14)$$

লক্ষ্য করুন ফ্রিঞ্জের এই সরণ ফ্রিঞ্জের ক্রমের ওপর নির্ভরশীল নয়। সমীকরণ (4.14) ব্যবহার করে ফ্রিঞ্জের সরণ পরিমাপের সাহায্যে কোন পাতের যেমন, অভ্র (mica) বেধ নির্ণয় করা সম্ভব যদি μ জানা থাকে। বস্তুত: পাতটি সমাগ্রিক ভাবে ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থাটিকে পর্দার ওপর কিছুটা সরিয়ে দেয়। এই সরণ সেই দিকে ঘটে যে দিকের উৎস থেকে নির্গত আলোক রশ্মির পথে অভ্রের পাতটি রাখা হয়েছে। এক্ষেত্রে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জের অবস্থান A থেকে A′ বিন্দুতে যাবে কারণ A′ বিন্দুটি A র সাপেক্ষে যেদিকে S_1 সেদিকে অবস্থিত। যদি অভ্রের পাতটি S_2 থেকে নির্গত আলোর পথে রাখা হত তাহলে চিত্র 4.6 এ A′ বিন্দুর অবস্থান হত A বিন্দুর নীচে।

আরও একটি বিষয়ে দৃষ্টি দেওয়া প্রয়োজন। এই পাতটি প্রবেশ করানোর ফলে কিন্তু ফ্রিঞ্জের প্রস্থ পরিবর্তিত হয় না কেবল ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থাটির সরণ ঘটে। বস্তুত প্রায়শই কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জটির সরণ গণনা করে y এর মান নির্ণয় করা হয়। সাদা আলো ব্যবহার করলে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটিই সাদা হবে। দুপাশে বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের জন্য ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। কাজেই পাতটি প্রবেশ করানোর ফলে সাদা ফ্রিঞ্জটির সরণ সহজেই চেনা যাবে। যদি পাত ঢোকানোর পরে m- ও (m+1)-ক্রমের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ অর্থাৎ পরপর দুটি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের মধ্যে দূরত্ব গণনা করা যায় তাহলে আমরা পাই

$$X'_{m+1} - X'_m = \frac{D}{d}\left[(m+1)\lambda + (\mu-1)t\right] - \frac{D}{d}\left[m\lambda + (\mu-1)t\right]$$

$$= \frac{D}{d}\left[(m+1)\lambda - m\lambda\right] = \frac{D}{d}\lambda = \beta \qquad ....(4.14a)$$

যেহেতু দুটি পর পর উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের ভিতর দূরত্ব হচ্ছে ফ্রিঞ্জের প্রস্থ, অতএব $(x'_{m+1} - x_m) = \beta$ প্রকৃত পক্ষে ফ্রিঞ্জের প্রস্থ সূচিত করছে। এই প্রস্থের কিন্তু কোনো পরিবর্তন ঘটে নি। পাতটি ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থার সরণ ঘটিয়েছে মাত্র।

সমীকরণ (4.14a)-এর সাহায্যে (4.14) কে লেখা যায় $y = \frac{\beta}{\lambda}(\mu - 1)t$ ....(4.15)

এরকম পাতলা পাতের বেধ গণনা করার জন্য নীচের অনুশীলনীটি করে দেখুন।

অনুশীলনী 5 : 7 মাইক্রন বেধবিশিষ্ট কাচের একটি পাতলা পাতকে দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার একটি রশ্মির পথে রাখার ফলে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি এমন জায়গায় সরে গেল যেখানে আগে ষষ্ঠ ক্রমের ফ্রিঞ্জটি ছিল। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 6300 $\overset{0}{A}$ হলে কাচের প্রতিসরাঙ্ক কত?

4.4 সুসম্বদ্ধতা ও সুসম্বদ্ধ উৎস (Coherence and Coherent source)

ইয়াং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষা একদিকে যেমন আলোর তরঙ্গ প্রকৃতির ইঙ্গিত দিল তেমনই অন্যদিকে প্রশ্ন উঠল যে আলোর ব্যতিচার আমরা সর্বদা দেখতে পাই না কেন অর্থাৎএকটা ঘরে দুটি আলো যখন জ্বলে তখন সেই দুটি উৎস থেকে আগত আলোকরশ্মি কেন ব্যতিচার দেখায় না? বস্তুত: দুটি পৃথক উৎস থেকে নির্গত আলোকরশ্মির উপরিপাত হলেই যদি ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা যেত তাহলে ব্যতিচার তথা আলোর তরঙ্গ স্বরূপ আবিষ্কার বহু আগেই হয়ত সম্ভব হত। অতএব একথা খুব সুস্পষ্টভাবে বলা প্রয়োজন যে উপরিপাত ও ব্যতিচার দুটি সম্পূর্ণ ভিন্ন ঘটনা। এটা ঠিক যে আলোর ব্যতিচারের জন্য উপরিপাতের প্রয়োজন কিন্তু উপরিপাত হলেই ব্যতিচার সম্ভব হয় না— আরও কিছু শর্তপূরণের প্রয়োজন হয়। তাই ঘরের দুটি আলো থেকে টেবিলের ওপর যখন আলো এসে পড়ে তখন টেবিলের ঐ অংশটি উজ্জ্বলতর দেখায় কিন্তু সেখানে পর্যায়ক্রমে সাজানো উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জ দেখা যায় না।

যে সময়টুকু কোন তরঙ্গাবলী (wave train) সরল সমঞ্জস (Simple harmonic) থাকে, সেই সময়কে বলা হয় সুসম্বদ্ধ সময় (Coherence time) , এই সময়কে তরঙ্গের দ্রুতি দ্বারা গুণ ক'রে যে অনুরূপ দূরত্ব পাওয়া যায় তা হচ্ছে সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্য (Coherent length).

দুটি আলোক উৎস থেকে নিঃসৃত আলোক তরঙ্গ কোন এক স্থানে মিলিত হ'লে তাদের দশা সম্পর্ক উপরিপাতের ফলে সেই সময়টুকুই কেবল স্থির থাকে যা সুসম্বদ্ধ সময়ের সঙ্গে তুলনা করা যেতে পারে।

সাধারণ আলোক উৎসগুলোর ক্ষেত্রে সুসম্বদ্ধ সময় দ্রুততম অভিজ্ঞাপকগুলোর (detectors) প্রতিক্রিয়া সময়ের (Response time) চেয়েও ক্ষুদ্রতর। এর অর্থ হচ্ছে এই যে, দুটি ভিন্ন উৎস থেকে নিঃসৃত তরঙ্গের মধ্যে ব্যতিচার নিরীক্ষণ করা অসম্ভব। অন্যভাবে আমরা বলতে পারি ব্যতিচার তরঙ্গের দশা তথা সরণ অভিজ্ঞাপকের প্রতিক্রিয়া সময়ের তুলনায় এত বেশী দ্রুত অনিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় যে অভিজ্ঞাপক শুধু সময় সাপেক্ষে গত সরণেরই প্রতিক্রিয়ার ইঙ্গিত দেয়।

সেই কারণেই আলোকীয় ব্যতিচার পরীক্ষাগুলিতে একই উৎস থেকে নিঃসৃত আলোকের বিভাজন এবং যথোপযুক্তভাবে পুনর্মিলনের ব্যবস্থা করতে পারলেই ব্যতিচারের সৃষ্টি হয়।

দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস থেকে আগত আলোক রশ্মির মধ্যে সর্বদা একটি সুনির্দিষ্ট দশা পার্থক্য (Phase difference) বজায় থাকে। সময়ের সঙ্গে তা পরিবর্তিত হয় না। অন্যদিকে দুটি ভিন্ন উৎস থেকে আগত রশ্মির মধ্যে দশার সম্পর্ক (Phase relation) তথা দশার পার্থক্য অনিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয়। ঘরের দুটি বাল্ব থেকে যখন আলো এসে দেওয়ালে পড়ে তখন আপতিত তরঙ্গদুটির মধ্যে দশার পার্থক্যের একটি মান মাত্র 10^{-8} সেকেন্ডের জন্য বজায়

থাকে। তারপরই যে দুটি তরঙ্গ দেওয়ালের ঐ বিন্দুটিতে এসে উপস্থিত হয় তাদের মধ্যে দশার পার্থক্য পাল্টে যায়। ফলে যে বিন্দুটিতে 10^{-8} সেকেন্ড আগে আপতিত রশ্মিদ্বয় হয়ত উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের সৃষ্টি করেছিল তা পরিবর্তিত হয়ে যায়, হয়ত বা নতুন আসা দুই রশ্মির দশা পার্থক্যের ওপর নির্ভর করে ঠিক সেই মুহূর্তে সেখানে গড়ে ওঠে কোনো অন্ধকার বা কালো ফ্রিঞ্জ। অর্থাৎ যে ব্যতিচার পটি মাত্র 10^{-8} সেকেন্ড আগে সৃষ্টি হয়েছিল তা নষ্ট হয়ে তৈরি হয় এক নতুন ব্যতিচার নকশা। খুব স্বাভাবিক ভাবেই আমাদের চোখ অত স্বল্প সময়ে ঘটে যাওয়া ব্যতিচারের ঘটনাকে ধরতে পারে না। একটি ব্যতিচার ব্যবস্থা থেকে পাল্টে অন্যটিতে যেতে যখন মাত্র 10^{-8} সেকেন্ড সময় লাগে মনে রাখতে হবে আমাদের চোখ বড়জোর 10^{-1} সেকেন্ডে ঘটে যাওয়া ঘটনাকে আলাদা করে চিনতে পারে। তার থেকে কম সময়ে ঘটে যাওয়া ঘটনাকে আলাদা করে চেনা তার পক্ষে সম্ভব নয়।

অতএব একটি স্থায়ী ব্যতিচার ব্যবস্থা দেখা এবং ফটো তোলার জন্য অবশ্যই দুটি সুসম্বদ্ধ উৎসের দরকার যে দুটি উৎস থেকে আগত আলোকরশ্মির মধ্যে ব্যতিচার ঘটবে। স্বভাবতই প্রশ্ন উঠবে যে কীভাবে এরকম দুটি উৎস পাওয়া সম্ভব। এই প্রশ্নের খুব সংক্ষিপ্ত এবং সরাসরি উত্তর হচ্ছে যে, দুটি উৎসকে প্রকৃতপক্ষে একটি উৎস থেকে তৈরি করে নিতে হবে, যেমন ইয়ং এর পরীক্ষার ক্ষেত্রে ঘটেছিল, যেখানে S_1 এবং S_2 উৎস দুটিই তৈরি হয়েছিল S পিনছিদ্র থেকে। এর ফলে S বা মূল উৎস থেকে নির্গত পরপর দুটি আলোক তরঙ্গের মধ্যে যে দশা পার্থক্যই থাকুক না কেন তা নবসৃষ্ট উৎসদ্বয় S_1 এবং S_2 কে উৎস S থেকে আগত আলোকরশ্মি একইভাবে প্রভাবিত করবে। ফলে ঐ দুটি উৎস S_1 এবং S_2 থেকে নির্গত আলোক রশ্মির দশার মধ্যে একটি স্থায়ী সম্পর্ক থাকবে এবং একটি স্থায়ী ব্যতিচার ব্যবস্থা পাওয়া যাবে। এরকম দুটি উৎসকে বলা হয় সুসম্বদ্ধ উৎস এবং এই ঘটনাকে বলা হয় সুসম্বদ্ধতা।

প্রসঙ্গত: দুটি বিষয় মনে রাখা দরকার। আমরা একটি উৎস থেকে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস পাওয়ার যে পদ্ধতির কথা বলেছি তা নীতিগতভাবে দুটি উপায়ে হতে পারে। এদের একটিকে বলা হয় তরঙ্গমুখের বিভাজন পদ্ধতি (division of wavefront) অপরটিকে বলা হয় বিস্তার বিভাজন পদ্ধতি (division of amplitude)। এই দুটি পদ্ধতির প্রথমটি নিয়ে আমরা এই এককেই আলোচনা করব, দ্বিতীয়টি নিয়ে পরবর্তী এককে আলোচনা হবে।

সুসম্বদ্ধতা প্রসঙ্গে ফিরে আসা যাক। ব্যতিচারের জন্য সুসম্বদ্ধ উৎসের প্রয়োজন একথা আগেই বলা হয়েছে। তবে সুসম্বদ্ধতা বিষয়টি আরও খানিকটা বিস্তৃত করে বলা প্রয়োজন কারণ তার আরও কিছু বৈশিষ্ট্যের সঙ্গে আপনাকে পরিচিত হতে হবে।

4.4.1 সুসম্বদ্ধতার প্রকারভেদ

একেবারে বিশুদ্ধ একবর্ণী (monochromatic) আলো কিন্তু বাস্তবে পাওয়া খুবই শক্ত। এর ফলে বর্ণালিতে একটি বর্ণের আলোর জন্য যে রেখা পাওয়া যায় তার মধ্যে অন্য বর্ণের কিছু আলোর প্রায়শই উপস্থিতি দেখা যায় এবং রেখা বর্ণালিটি কিছুটা চওড়া বা বেধবিশিষ্ট হয়ে পড়ে। ঘটনাটিকে বলা হয় রেখাবেধ (line width)। তাই একটি তরঙ্গকে একটি বিশুদ্ধ সাইন তরঙ্গ (Sine wave) হিসাবে প্রকাশ করলে সেখানে কিছু ত্রুটি থেকে যায়।

কাজেই যেসব তরঙ্গকে বিশুদ্ধ সাইন তরঙ্গ বলে ভাবা হয় সেগুলিকে প্রকৃতপক্ষে সীমিত সময়ে বা সীমিত দেশ (space) বা অঞ্চলে লক্ষ্য করতে হয়। বেশি দূরত্বে বা বেশি সময় ধরে সেগুলিকে লক্ষ্য করা গেলে তাদের সেই বৈশিষ্ট্যে বিচ্যুতি ধরা পড়বে। সেই তরঙ্গগুলি একটি উৎস থেকে নির্গত হলেও সুসম্বদ্ধ একথা বলা যাবে না। বাস্তব ক্ষেত্রে আমরা একবর্ণী আলোকরশ্মি পাই না, পাই আপাত একবর্ণী (quasi monochromatic) তরঙ্গ। তাই সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরি করার বিষয়টি যথেষ্ট কঠিন হয়ে পড়ে। আংশিক সুসম্বদ্ধ (partially coherent) তরঙ্গ অপেক্ষাকৃত

সহজে পাওয়া যায় এবং ব্যতিচারের ঘটনাটি সহজে দৃশ্যমান হয় না।

তাই সুসম্বদ্ধতার ক্ষেত্রে আমরা দুটি ধরণের সুসম্বদ্ধতার কথা বলে থাকি। এগুলি হল সাময়িক বা সময়ভিত্তিকসুসম্বদ্ধতা (temporal coherence) এবং স্থানিক সুসম্বদ্ধতা (spatial coherence)।

সময়ভিত্তিক সুসম্বদ্ধতার জন্য দুটি উৎস থেকে আগত আলোর তরঙ্গ ক্ষেত্র (wave field) দুটির মধ্যে একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে বিভিন্ন সময়ে সম্পর্কটি লক্ষ্য করা হয়। এক্ষেত্রে সুসম্বদ্ধতার সময় (coherence time) হিসাবে একটি রাশিকে সংজ্ঞায়িত করে বিষয়টি বিচার করা যায়।

অন্যদিকে স্থানিক সুসম্বদ্ধতা বলতে দুটি তরঙ্গ ক্ষেত্রের মধ্যে একই মুহূর্তে ভিন্ন বিন্দুতে তাদের আন্তঃসম্পর্কটি লক্ষ্য করা হয়। এবং ঠিক আগের মতই এক্ষেত্রে সুসম্বদ্ধতার দূরত্ব (coherence region) বা অঞ্চল নামে একটি রাশিকে সংজ্ঞায়িত করে বিষয়টি পরিমাণগত ভাবে বুঝবার চেষ্টা করা হয়।

সুসম্বদ্ধতা এবং সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরি করার সময় এই দিকগুলি বিবেচনা করে সমগ্র পরীক্ষা ব্যবস্থাটি গড়ে তুলতে হয়। সুসম্বদ্ধ উৎস থেকে আগত রশ্মিদের মধ্যে ব্যতিচার ঘটানোর জন্য কেবল উৎসদ্বয়ের দূরত্ব কম হলেই চলে না, তাদের সঙ্গে অভিনেত্রের এক রেখায় আনার কাজটিও অর্থাৎ সংরেখনের কাজটিও (alignment) সুষ্ঠুভাবে করতে হয়। তারপরই অভিনেত্রের দৃষ্টি ক্ষেত্রে (field of view) ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা সম্ভব হয়।

4.5 তরঙ্গমুখের বিভাজন (Division of Wavefront) ও ব্যতিচার

তরঙ্গমুখ বলতে কী বোঝায়? প্রথমে এই প্রশ্নের উত্তর দেওয়া যাক। একটি তরঙ্গ যখন উৎস থেকে প্রসার লাভ করে তখন যে অঞ্চলের মধ্যে দিয়ে তরঙ্গ প্রসারিত হচ্ছে সে অঞ্চলটিতে দৃষ্টি দেওয়া যাক। একটি মুহূর্তে ঐ তরঙ্গের যে বিন্দুগুলি একই দশায় রয়েছে সেই বিন্দুগুলি যুক্ত করে যে নিরবচ্ছিন্ন রেখা (দ্বিমাত্রিক প্রসারের (ক্ষেত্রে) বা তল (ত্রিমাত্রিক প্রসারের ক্ষেত্রে) পাওয়া যায় তাকে তরঙ্গমুখ বলা হয়। তরঙ্গের প্রসার মানে এই তরঙ্গমুখের প্রসার। তরঙ্গমুখ বিস্তার লাভ করার অর্থ মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে বা শূন্য মাধ্যমে (যেমন আলোর ক্ষেত্রে) ঐ তরঙ্গের সমদশা সম্পন্ন বিন্দুগুলি বিস্তার লাভ করছে। অর্থাৎ একটি তরঙ্গমুখের ওপর অবস্থিত সকল বিন্দুতেই এক বিশেষ মুহূর্তে আন্দোলিত কণাগুলি (যান্ত্রিক তরঙ্গের ক্ষেত্রে) বা আন্দোলিত ভেক্টর (আলোক তরঙ্গের ক্ষেত্রে) একই দশায় রয়েছে।

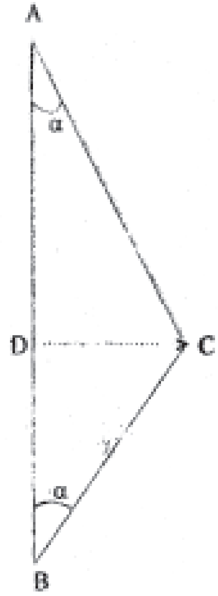
এখন এইরকম একটি তরঙ্গমুখের উপস্থিত তরঙ্গসমূহকে যদি কোনো বিশেষ পদ্ধতির সাহায্যে দুটি ভিন্ন পথে পরিচালিত করা যায় তাহলে একই তরঙ্গমুখ থেকে দুটি ভিন্ন রশ্মি পাওয়া যায় এবং সেই রশ্মিদ্বয়ের দশার মধ্যে এক স্থায়ী সম্পর্ক বজায় থাকে। ফলে তরঙ্গমুখের এই বিভাজনের মধ্যে দিয়ে সৃষ্ট দুটি তরঙ্গ প্রকৃত পক্ষে একই তরঙ্গমুখের সদস্য তাই এই দুটি তরঙ্গ দুটি সুসমঞ্জস উৎস থেকে নির্গত হচ্ছে বলে ধরা যায়। প্রকৃতপক্ষে এইরকম ভাবে তৈরি করে নেওয়া দুটি উৎস থেকে নিঃসৃত রশ্মির মধ্যে ব্যতিচার সম্ভব।

এখন প্রশ্ন হচ্ছে এই তরঙ্গমুখের বিভাজন কীভাবে করা যায়? আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সাহায্যে বিশেষ ব্যবস্থার ওপর ভিত্তি করে একটি তরঙ্গমুখের বিভাজন সম্ভব। আমরা এখানে কয়েকটি ক্ষেত্রের ব্যতিচার বিষয়ে আলোচনা করব যেখানে তরঙ্গমুখের বিভাজনের সাহায্যে সুসমঞ্জস উৎস গঠন করে ব্যতিচার গঠন করা হয়েছে। যেমন লয়েডের দর্পণ (Lloyd's mirror) ব্যবস্থায় প্রতিফলনের সাহায্যে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরি হয়েছে এবং ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম (Fresnel's biprism) ব্যবস্থায় সুসম্বদ্ধ উৎস পাওয়া গেছে প্রতিসরণের সাহায্যে তরঙ্গ মুখের বিভাজন করে।

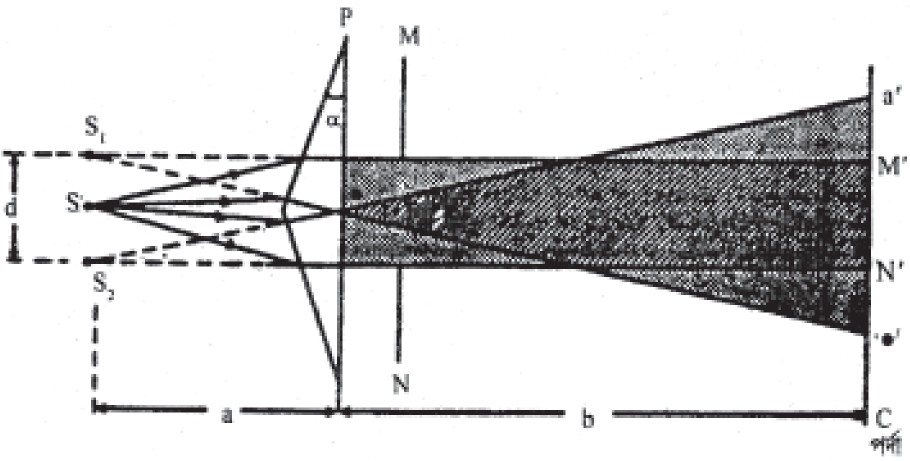
বিস্তারের বিভাজনের (division of amplitude) সাহায্যে একটি উৎস থেকে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস গঠন করে নেওয়ার বিষয়টি পরবর্তী এককে আলোচনা করা হবে। বিস্তার বিভাজনের ফলে গঠিত সুসম্বদ্ধ উৎস থেকে নির্গত আলোর ব্যতিচারের সম্পর্কেও সেখানেই আলোচনা হবে।

4.6 ফ্রেনেলের যুগ্ম-প্রিজম (Frenel's Biprism) পরীক্ষা

তরঙ্গমুখের বিভাজনের সাহায্যে একটি মূল উৎস থেকে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস সৃষ্টি করে ব্যতিচার ঘটানোর ক্ষেত্রে ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম পরীক্ষা অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। এই যুগ্ম প্রিজমটি দুটি অনুরূপ পাতলা প্রিজমের সমন্বয়ে গঠিত। এখানে আলোর উৎস থেকে নিঃসৃত একটি তরঙ্গ মুখ ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজমের সাহায্যে বিভাজিত হয়ে দুটি তরঙ্গ মুখের সৃষ্টি করে প্রতিসরণের ফলে মূল উৎসটি থেকে যুগ্ম প্রিজমের সাহায্যে যে দুটি অসদবিম্বের সৃষ্টি হয় তারা দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস হিসেবে কাজ করে। চিত্র (4.7) -এ ABC একটি যুগ্ম প্রিজম। এখানে ADC ও BDC পাতলা প্রিজম দুটির ভূমি CD তলে পরস্পর সংলগ্ন রয়েছে। অনুরূপ পাতলা প্রিজম দ্বয়ের শীর্ষ কোণ $\angle BAC$ এবং $\angle ABC$ উভয়েই সমান ও খুব ছোট। যুগ্ম প্রিজমটি সাধারণত: একটি সমদ্বিবাহু প্রিজম যার শীর্ষকোণ $A\hat{C}B$ 180^0 -র চেয়ে সামান্য কম।



চিত্র (4.7) যুগ্ম প্রিজম



চিত্র (4.8) ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজমের সাহায্যে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ গঠন। C পর্দার ওপর M'N' অঞ্চলে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে।

ওপরের চিত্র (4.8) -এ যুগ্ম-প্রিজম দিয়ে আলোকরশ্মির পথ এবং ব্যতিচারের ঝালর গঠনের বিষয়টি দেখানো হয়েছে। এখানে আলোর মূল উৎস S একটি রেখাছিদ্র (slit) এবং উৎসটিকে দীপ্ত করার জন্য ব্যবহৃত আলো একবর্ণী বা প্রায় একবর্ণী, যেমন সোডিয়াম আলো।

লক্ষ্য করুন S উৎস থেকে নির্গত আলোর পাতলা যুগ্ম প্রিজম P-তে প্রতিসৃত হয়ে C পর্দার ওপর দুটি কিরণপুঞ্জ a'M' ও M'e' এর আংশিক উপরিপাত ঘটায় এবং a'N' ও M'e' দুটি অসদ্ উৎস S_1 এবং S_2 থেকে আসছে বলে মনে হয়। বস্তুত: এই S_1 এবং S_2 সুসম্বদ্ধ উৎস দুটি একই উৎস S_1 থেকে গঠিত হয়েছে। 4.8

চিত্রে দেখানো অবস্থানে M ও N পর্দা দুটি থাকলে C পর্দার $M'N'$ অঞ্চলটিতে দুটি উৎস S_1 ও S_2 থেকে আলোর উপরিপাত ঘটে এবং এই অঞ্চলে আলোর ব্যতিচার লক্ষ্য করা যায়। যদি M ও N পর্দা দুটি না থাকে, তবে সমস্ত $a'e'$ অঞ্চল জুড়েই কিরণপুঞ্জ দুটির উপরিপাত ঘটবে। ইয়ং এর পরীক্ষায় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের প্রস্থ আলোক উৎস দুটির দূরত্ব d র ব্যস্তানুপাতিক হয়। তাই স্পষ্ট ঝালর পাওয়ার জন্য d কমানো দরকার এবং এই উদ্দেশ্য পূরণের জন্য যুগ্ম প্রিজমের সমান ক্ষুদ্র কোণদ্বয় α ছোট হওয়া দরকার।

আমরা এবার একটি গণনার সাহায্যে প্রিজমের কোণ α-র সঙ্গে বিচ্যুতির সম্পর্কটি নির্ণয় করব।

আলোক রশ্মি যখন যুগ্ম প্রিজমের মধ্য দিয়ে গমন করে তখন প্রতিসরণের ফলে রশ্মির বিচ্যুতি ঘটে।

চিত্রে এই বিচ্যুতিকে δ দিয়ে সূচিত করা হয়েছে। যদি প্রিজমের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক μ হয় তবে আমরা জানি যে পাতলা প্রিজমের ক্ষেত্রে লেখা যায়

$$\delta = (\mu - 1)\alpha \qquad ....(4.16)$$

এখানে α এবং $(\mu-1)$ দুয়েরই মান ছোট হওয়ার ফলে δ-ও খুব ছোট হবে।

চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস S_1 এবং S_2 র মধ্যে দূরত্ব d । যুগ্ম প্রিজম থেকে ঐ দুই উৎস সংযোগকারী রেখার দূরত্ব a হলে লেখা যায়।

$$\frac{d/2}{a} = \tan\delta$$

অর্থাৎ $d = 2a\tan\delta$ ....(4.17)

যেহেতু δ খুব ক্ষুদ্র, অতএব লেখা যায় যে

$\tan\delta = \delta \therefore d = 2a\delta$

(4.16) সমীকরণের সাহায্য নিয়ে পাই

$d = 2a(\mu - 1)\alpha$ ....(4.18)

অতএব দেখা যাচ্ছে যে α ছোট হলে d, অর্থাৎ দুটি উৎসের মধ্যে দূরত্ব, কম হবে, আমরা দেখতে পাব যে এর ফলে ফ্রিঞ্জের বেধ বড় হবে এবং তা স্পষ্টতর হবে।

4.6.1 ফ্রেনেলের যুগ্ম-প্রিজমে ফ্রিঞ্জের বেধ

এই বিষয়টি পাঠের আগে ইয়ং এর পরীক্ষায় যে ফ্রিঞ্জের প্রস্থ গণনা করা হয়েছিল তা একবার দেখে নিন। এবার চিত্র 4:10 দেখুন।

যদি C বিন্দু থেকে m ক্রমিক সংখ্যার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্ব X_m হয় তবে

$$X_m = \frac{D}{d} m\lambda \qquad .... (4.19)$$

এখানে $D = a+b$ যেখানে

$a \rightarrow$ যুগ্ম প্রিজম থেকে মূল আলোক উৎস S এর দূরত্ব

$b \rightarrow$ যুগ্ম প্রিজম থেকে পর্দা (MN) এর দূরত্ব

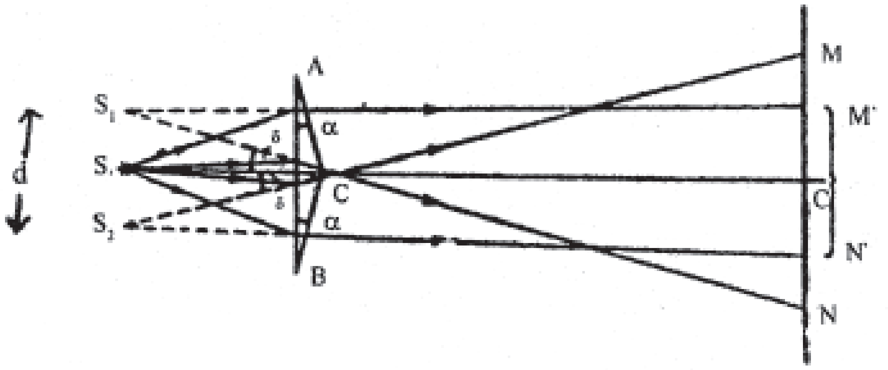
α কোণ দুটি ছোট ও সমান হওয়ায় লেখা যায়

$SC = S_1C = S_2C = a$

এবং আমরা (4.18) সমীকরণ থেকে জানি যে

$d = 2a(\mu - 1)\alpha$

d এর এই মান (4.19) সমীকরণে বসালে X_m এর ব্যঞ্জনাটি একটু ভিন্ন ভাবে পাওয়া যাবে।



চিত্র (4.10) যুগ্ম প্রিজমের মধ্যে দিয়ে আলোকরশ্মির পথ ও দুটি সুসমঞ্জস উৎস S_1 ও S_2 গঠন ও পর্দার যে অঞ্চলে (M′N′) ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে এগুলি এখানে দেখানো হয়েছে।

সুতরাং m ক্রমিক সংখ্যার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের C বিন্দু থেকে দূরত্বকে লেখা যায়

$$x_m = \frac{a+b}{2a(\mu-1)\alpha} m\lambda \qquad \text{............(4.20)}$$

ঠিক একই ভাবে (m+1) ক্রমিক সংখ্যার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্বকে লেখা যায়

$$X_{m+1} = \frac{a+b}{2a(\mu-1)\alpha}(m+1)\lambda$$

অতএব ফ্রিঞ্জের বেধ $\beta = x_{m+1} - x_m$

$$\therefore \beta = \frac{a+b}{2a(\mu-1)\alpha}\lambda \qquad \text{...........(4.21)}$$

এই সম্পর্ক থেকে দেখা যাচ্ছে যে যুগ্ম প্রিজমে সৃষ্ট ফ্রিঞ্জের বেধ যে বিষয়গুলির ওপর নির্ভর করে তা হল

(i) উৎস থেকে যুগ্ম প্রিজমের দূরত্ব (a)।

(ii) উৎস থেকে পর্দার দূরত্ব $(a+b) = D$। যুগ্ম প্রিজম নিয়ে পরীক্ষার সময় অভিনেত্র ব্যবহার করে এই ফ্রিঞ্জ দেখা যায়। তাই উৎস ও অভিনেত্রের দূরত্বই উৎস ও পর্দার দূরত্ব D বলে মনে করা যেতে পারে।

(iii) ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ)। λ বৃদ্ধি পেলে ফ্রিঞ্জের বেধ বাড়ে। তাই লাল আলোতে তৈরি ফ্রিঞ্জ বেগুনি আলোর ফ্রিঞ্জ থেকে বেশি প্রস্থ বিশিষ্ট হবে।

(iv) প্রিজমের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক (μ) । লক্ষ্য করবেন μ কেবল প্রিজমের উপাদান নয়, ব্যবহৃত আলোর বর্ণের ওপরও নির্ভর করে।

(v) যুগ্ম প্রিজমের সূক্ষকোণ α র ওপরেও ফ্রিঞ্জের প্রস্থ নির্ভর করে। α যত ছোট হবে এই ফ্রিঞ্জ তত চওড়া হবে।

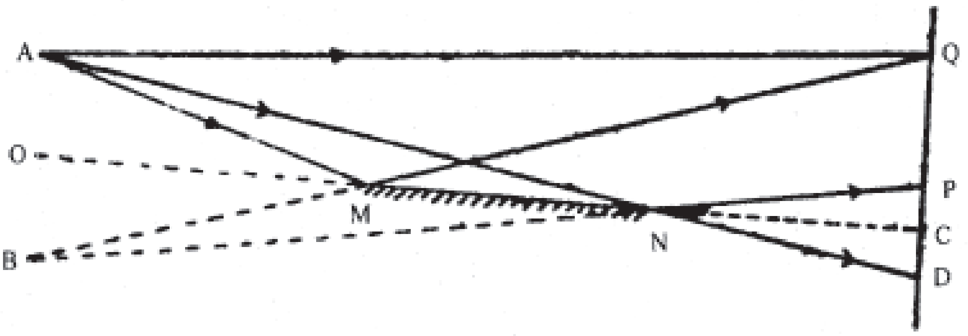
আসুন এবার আমরা যুগ্ম প্রিজমের ওপর নীচের অনুশীলনীটি চেষ্টা করি।

অনুশীলনী 5 : একটি যুগ্ম প্রিজমের সূক্ষ্ম কোণটির মান 1^0 30 এবং তার উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক1 52, 6563 $\overset{o}{A}$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করে ব্যতিচার ঝালর তৈরি করা হলে ফ্রিঞ্জের প্রস্থ কত হবে? দেওয়া আছে উৎস ও যুগ্ম প্রিজমের দূরত্ব 20cm এবং যুগ্ম প্রিজম ও পর্দার দূরত্ব 80cm।

ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম বিষয়ক আলোচনা থেকে সম্ভবত অনুমান করা গেছে অভ্রের পাতের বেধ নির্ণয় সংক্রান্ত যে পরীক্ষার বর্ণনা আমরা 4.3.3 অংশে দিয়েছি সেই পরীক্ষাটি এই যুগ্ম প্রিজমে গঠিত ব্যতিচার ব্যবস্থাতেও করা সম্ভব। বস্তুত: ফ্রিঞ্জের সরণ ঘটিয়ে পাতলা পাতের বেধ নির্ণয়ের পরীক্ষা ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম ব্যবস্থার সাহায্যেই করা হয়ে থাকে। (4.15) সমীকরণ দ্বারা বেধ নির্ণয়ের সম্পর্কটি যুগ্ম প্রিজমের ক্ষেত্রেও অপরিবর্তিতভাবে প্রযোজ্য।

4.7 লয়েডের দর্পণ (Lloyd's mirror) পরীক্ষা

লয়েডের দর্পণ পরীক্ষায় আলোর প্রতিফলনের সাহায্য নিয়ে দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস গঠন করা হয় এবং এক্ষেত্রেও তরঙ্গমুখের বিভাজন ঘটে। 4.11 নং চিত্রে নীচে এই ব্যবস্থাটি দেখানো হয়েছে।



চিত্র (4.11) লয়েডের দর্পণ পরীক্ষার সাহায্যে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ।

এই ব্যবস্থায় একটি রেখাছিদ্র A থেকে আলো একটি সমতল দর্পণ MN-এর ওপর আপতিত হয়।

(4.11) চিত্রে দেখানো হয়েছে এই দর্পণের প্রতিফলক তলটি কাগজের তলের লম্ব এবং মূল আলোক উৎস হিসেবে ব্যবহৃত বিন্দু A প্রকৃত পক্ষে একটি সরু রেখাছিদ্র। এই রেখাছিদ্রকে প্রায় একবর্ণী সোডিয়াম আলোর সাহায্যে আলোকিত করা হয়েছে। লক্ষ্য করুন এই ব্যবস্থাটিতে মূল উৎস হল A এবং দর্পণে ঐ উৎসের প্রতিফলনের ফলে সৃষ্ট অসদ্‌বিম্ব B অন্য একটি উৎস। এই দুটি উৎসই ব্যতিচারের জন্য প্রয়োজনীয় দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস হিসেবে কাজ করে।

4.11 চিত্রে দেখুন যে উৎস A থেকে আগত আলোকরশ্মি পর্দার D থেকে ওপরের অংশকে আলোকিত করে। প্রতিফলিত আলো, যা কিনা অসদবিম্ব B থেকে নির্গত হচ্ছে বলে মনে হয় পর্দার QP অংশকে আলোকিত করে। ফলে পর্দার QP অংশে সুসম্বদ্ধ উৎসদ্বয় থেকে আগত আলোর উপরিপাত ঘটে। এবং ঐ অঞ্চলে আলোর ব্যতিচার ঝালর সৃষ্টি হয়।

এই পরীক্ষায় যে ফ্রিঞ্জ উৎপন্ন হয় তার কতগুলি বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করা যায়।

চিত্র 4.11 থেকে দেখা যাচ্ছে যে, কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি পর্দার ওপর নিরীক্ষণ করা যাবে না যে পর্যন্ত না পর্দাটিকে দর্পণের দিকে সরিয়ে N অবস্থানে নিয়ে আসা হবে। N অবস্থানে পর্দাটি প্রতিফলক MN এর উৎস থেকে দূরের প্রান্তটিকে স্পর্শ করবে। বাস্তবিক পক্ষে, যদি কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি সাদা আলোর দ্বারা নিরীক্ষণ করা হয়, তা হ'লে ফ্রিঞ্জটি অন্ধকার দেখা যাবে। এর থেকে বোঝা যাচ্ছে যে, প্রতিফলিত রশ্মির প্রতিফলনের দরুণ হঠাৎ π পরিমাণ দশা পরিবর্তন ঘটে। এখানে লক্ষ্যণীয় যে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি যখন পাওয়া যাবে তখন AN =BN অর্থাৎ পথ পার্থক্য সমান। তাই অন্ধকার কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জ পাওয়া যায় যেহেতু দশার পরিবর্তন π ঘটে আলো লঘুতর মাধ্যম থেকে অপেক্ষাকৃত বেশি প্রতিসরাংকের দর্পণে প্রতিফলিত হওয়ার দরুন, অপেক্ষাকৃত বেশি প্রতিসরাংকের মাধ্যম থেকে আলো লঘুতর প্রতিসরাংকের দর্পণে প্রতিফলিত হলে কিন্তু কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি উজ্জ্বল দেখাবে।

সুতরাং পর্দার ওপর P বিন্দুটি যদি এমন হয় যে,

$BP - AP = n\lambda$, $n = 0,1,2,3,\ldots\ldots$

তা হলে আমরা বিনাশী ব্যতিচার পাব। অপর পক্ষে, যদি

$BP - AP = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ হয়, তবে চরম ব্যতিচারের শর্তটি সিদ্ধ হবে।

4.8 সারাংশ

1. আলোর ব্যতিচারের ঘটনা আলোর তরঙ্গ ধর্মের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব। বস্তুত: আলোর ব্যতিচারই প্রথম আলোর তরঙ্গ ধর্মের দিকে অঙ্গুলি নির্দেশ করে।

2. ব্যতিচারের জন্য আলোক তরঙ্গের উপরিপাত প্রয়োজন। তরঙ্গের উপরিপাতের নীতি প্রয়োগ করে বিষয়টি বোঝা সম্ভব। তবে ব্যতিচারের জন্য তরঙ্গের উপরিপাতের সঙ্গে সঙ্গে আরও বিশেষ কিছু শর্তপূরণ আবশ্যিক।

3. ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার মাধ্যমে আজ থেকে দুশ বছর আগে (1801 সালে) প্রথম ব্যতিচার প্রত্যক্ষ করা সম্ভব হয়। আলোর তরঙ্গ প্রকৃতি প্রতিষ্ঠা করার ব্যাপারে এটি একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা।

4. ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষায় প্রাপ্ত ব্যতিচার ঝালরে উজ্জ্বল ও অন্ধকার উভয় শ্রেণির ফ্রিঞ্জের প্রস্থ সমান এবং শক্তির সংরক্ষণ সূত্র মেনেই সেগুলি গঠিত হয়। পাতলা স্বচ্ছ উপাদানের বেধ বা প্রতিসরাঙ্ক নির্ণয়ে ব্যতিচারের সাহায্য নেওয়া যায়।

5. স্থায়ী ব্যতিচার ব্যবস্থা সৃষ্টির জন্য দুটি সুসম্বদ্ধ উৎস প্রয়োজন। ইয়ং এর পরীক্ষার আগে বিষয়টি উপলব্ধি করা সম্ভব হয়নি এবং ব্যতিচার তথা আলোর তরঙ্গধর্ম অচেনা থেকে গিয়েছিল।

6. সুসম্বদ্ধ উৎস তৈরির জন্য কিছু শর্তপূরণ আবশ্যিক। এই শর্তপূরণের ওপর নির্ভর করে যে পদ্ধতিতে সুসম্বদ্ধ উৎস গঠন করা হয় সেগুলিকে দুটি ভাগে ভাগ করা যায়। এদুটি হল তরঙ্গমুখের বিভাজন পদ্ধতি এবং বিস্তার বিভাজন পদ্ধতি।

7. তরঙ্গমুখের বিভাজন পদ্ধতিতে গঠিত সুসম্বদ্ধ উৎসের দ্বারা সৃষ্ট ব্যতিচার এখানে আলোচিত হয়েছে। ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম এবং লয়েডের দর্পণের পরীক্ষা দুটিতে তরঙ্গমুখের বিভাজনের মাধ্যমে ব্যতিচার ঘটে। পরীক্ষাদ্বয় এখানে বর্ণিত হয়েছে।

8. ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম পরীক্ষাটি আগত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা পাতলা স্বচ্ছ বস্তুর বেধ নির্ণয়ে উপযোগী এবং ব্যতিচারের একটি গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা ব্যবস্থা।

9. লয়েডের দর্পণে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি উজ্জ্বল না হয়ে অন্ধকার হয়, কারণ দুটি ব্যতিচারি উৎপন্নকারী রশ্মির একটি লঘুতর মাধ্যম থেকে ঘনতর মাধ্যমে প্রতিফলিত হয়। এক্ষেত্রে প্রতিফলনের ফলে ঐ রশ্মিটির π দশা পার্থক্য ঘটে।

4.9 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. দুটি সুসম্বদ্ধ আলোক উৎসের প্রাবল্যের অনুপাত 64:9 । এই দুটি উৎস থেকে নির্গত আলোক তরঙ্গ ব্যতিচার ঝালর তৈরি করলে সেই ঝালরের উজ্জ্বল ও 'অন্ধকার' ফ্রিঞ্জের প্রাবল্যের তুলনা করুন। এক্ষেত্রে সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন বিস্তারের অনুপাত কত?

2. ইয়ং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষায় 6500Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করে উৎস থেকে 120 cm দূরে রাখা পর্দার ওপর ফ্রিঞ্জ পাওয়া গেল। যদি উৎস দুটির মধ্যে দূরত্ব 2mm হয় তাহলে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ থেকে পর্দার ওপর তৃতীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্ব কত?

3. একটি ঘরে দুটি মোমবাতি জ্বলছে। ঘরের দেওয়ালে কি ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে? কারণসহ উত্তর লিখুন।

4. ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম পরীক্ষায় একটি রশ্মির পথে পাতলা একটি কাচের পাত রাখায় কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জটি এমন জায়গায় সরে গেল যেখানে আগে পঞ্চম ক্রমের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের অবস্থান ছিল। যদি কাচের প্রতিসরাঙ্ক 1.5 এবং ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 6000Å হয় তাহলে কাচের পাতের বেধ নির্ণয় করুন।

5. ফ্রেনেলের যুগ্ম প্রিজম পরীক্ষায় যুগ্ম প্রিজম থেকে রেখাছিদ্র এবং পর্দা উভয়ের দূরত্বই 50 cm রাখা হল। যদি যুগ্ম প্রিজমের প্রিজম কোণ 179^0 এবং তার উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক 1.5 এবং সৃষ্ট ফ্রিঞ্জের বেধ 0.0135 cm হয় ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত?

4.10 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

(4.3) সমীকরণ থেকে আমরা জানি যে দুটি তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে প্রাপ্ত লব্ধি প্রাবল্য I হলে,

$I_{max} = \left(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}\right)^2$ যখন $Cos\delta = 1$

$I_{min} = \left(\sqrt{I_1} \sim \sqrt{I_2}\right)^2$ যখন $Cos\delta = -1$

δ হল তরঙ্গদ্বয়ের দশা পার্থক্য

প্রশ্নানুসারে বা $\frac{I_1}{I_2} = 4$ বা $\sqrt{I_1} = 2\sqrt{I_2}$

$\therefore I_{max} = (2+1)^2 I_2 = 9I_2$

$I_{min} = (2-1)^2 I_2 = I_2$

সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন প্রাবল্যের অনুপাত

$\frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{9I_2}{I_2} = I_{max} : I_{min} = 9:1$

অনুশীলনী 2

(4.4) সমীকরণের সাহায্যে লব্ধি প্রাবল্যের ব্যঞ্জনা লেখা যায়

$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} Cos\delta$

δ সেই তরঙ্গদ্বয়ের দশা পার্থক্য যে তরঙ্গ দুটির প্রাবল্য I_1 ও I_2 ।

প্রশ্নানুসারে এক্ষেত্রে I_1 ও I_2 যথাক্রমে I_1 ও $4I_1$

যখন $\delta = \pi$ তখন

$I = I_1 + 4I_1 + 2\sqrt{I_1.4I_1} Cos\pi$

$= 5I_1 + 2.2I_1(-1)$

$= 5I_1 - 4I_1 = I_1$

সুতরাং লব্ধি প্রাবল্য ক্ষুদ্রতর প্রাবল্যের সমান

যখন $\delta = \pi/2$ তখন

$I = I_1 + 4I_1 + 2.\sqrt{I_1.4I_1} Cos\pi/2$

$= 5I_1 + 2.2I_1.0 = 5I_1$

সুতরাং এক্ষেত্রে লব্ধি প্রাবল্য, প্রাবল্য দুটির যোগফলের সমান।

অনুশীলনী 3

আমরা জানি যে দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার ক্ষেত্রে ফ্রিঞ্জের প্রস্থ β হলে $\beta = \frac{D\lambda}{d}$

এখানে $D = 0.60m = 60cm$

$d = 3mm = 0.3cm$, $\lambda = 590nm = 5900\ \mathring{A} = 5900 \times 10^{-8} \times cm$

$$\therefore \beta = \frac{60 \times 5900 \times 10^{-8}}{0.3} = \frac{6 \times 59 \times 10^{-4}}{3}\ cm$$

$= 118 \times 10^{-4} cm = 1.18 \times 10^{-2} cm$

অনুশীলনী 4

(4.15) সমীকরণ থেকে আমরা দেখেছি ফ্রিঞ্জের সরণের পরিমাণ y হলে

$$y = \frac{\beta}{\lambda}(\mu - 1)t$$

যেখানে $\beta =$ ফ্রিঞ্জের প্রস্থ, λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য,

$t = 7 \times 10^{-6} m = 7 \times 10^{-4} cm$

এক্ষেত্রে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জ সরে গেছে ষষ্ঠ ফ্রিঞ্জের জায়গায়

$\therefore$ ফ্রিঞ্জের সরণ ছ'টি ফ্রিঞ্জের প্রস্থের সমান।

$\therefore$ অর্থাৎ $y = 6\beta$ । $6^{\beta} = \dfrac{\beta}{6300 \times 10^{-8}}(\mu - 1)(7 \times 10^{-4})$

$\therefore\ 6 \times 63 = 7(\mu - 1) \times 10^{2}$

$\therefore\ \mu = 1.54$

অনুশীলনী 5

এখানে $\alpha = 1^{0}30' = \dfrac{1.5 \times \pi}{180}\ rad = \dfrac{\pi}{120}\ radian$

সুতরাং দুটি সুসম্বদ্ধ উৎসের মধ্যে দূরত্ব d হলে,আমরা জানি $d = 2a(\mu - 1)\alpha$

এখানে $\mu = 1.52$, $a =$ যুগ্ম প্রিজম ও উৎসের মধ্যবর্তী দূরত্ব $= 20cm$

$$\therefore d = 2(20)(1.52 - 1) \times \frac{\pi}{120} = 0.544cm$$

কিন্তু ফ্রিঞ্জের প্রস্থ $\beta = \dfrac{D\lambda}{d}$

এখানে $D = (20+80)cm = 100cm$ $\lambda = 6563\mathring{A} = 6563 \times 10^{-8} cm$

$$\therefore \beta = \frac{100 \times 6563 \times 10^{-8}}{0 \cdot 544}\ cm = 0.0121cm$$ ।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. প্রশ্নানুসারে $I_1 : I_2 = 64 : 9$

$$\therefore I_1/I_2 = 64/9 \therefore I_1 = \frac{64}{9} I_2$$

$\therefore$ লব্ধি প্রাবল্য $\quad I = \frac{64}{9} I_2 + I_2 + 2\sqrt{\frac{64}{9} I_2 \cdot I_2} \cos\delta$

সর্বোচ্চ প্রাবল্য I_{max} পাওয়া যায় যখন $\cos\delta = 1$

$$\therefore I_{max} = \left(\frac{64}{9} + 1 + 2.\frac{8}{3}\right) I_2 = \frac{121}{9} I_2$$

সর্বোনিম্ন প্রাবল্য I_{min} পাওয়া যায় তখন $\cos\delta = -1$

$$\therefore I_{min} = \frac{64}{9} I_2 + I_2 - 2\sqrt{\frac{64}{9} I_2 . I_2}$$

$$= \left(\frac{64}{9} + 1 - 2 \times \frac{8}{3}\right) I_2 = \frac{25}{9} I_2$$

$$\therefore \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{121}{25}$$

2. ইয়াং এর দ্বিরেখাছিদ্র পরীক্ষার ক্ষেত্রে আমরা জানি যে যদি m কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ থেকে m তম উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের দূরত্ব x হয় তবে আমরা লিখতে পারি

$$x_m = \frac{D}{d} m\lambda$$

$d \rightarrow$ উৎসদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব এবং D হচ্ছে উৎস থেকে পর্দার দূরত্ব (উৎস দ্বয়ের সংযোগকারী রেখা থেকে পর্দার লম্ব দূরত্ব)

প্রশ্নানুসারে m=3 এবং $\lambda = 6000 \mathring{A}$, $D = 120 cm$
এবং $d = 2mm = 0.2cm$

$$\therefore x_3 = \frac{120 \times 3}{0.2} \times 6000 \times 10^{-8} cm = 1.08 \times 10^{-1} cm$$

$$= 0.108 cm$$

3. দুটি জ্বলন্ত মোমবাতি ভিন্ন দুটি উৎস। এই দুটি উৎস থেকে আগত আলো দেওয়ালের ওপর পড়বে ঠিকই এবং আলোক তরঙ্গের উপরিপাতও ঘটবে কিন্তু উৎস দুটি সুসম্বদ্ধ না হওয়ায় স্থায়ী ব্যতিচার ঘটবে না, ফলে ঘরের দেওয়ালে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে না।

4. আমরা (4.15) সমীকরণ থেকে পাই ফ্রিঞ্জের সরণ y হলে, $y = \frac{\beta}{\lambda}(\mu - 1)t$ এখানে β = ফ্রিঞ্জের প্রস্থ, t পাতের বেধ ও μ পাতের উপাদানের প্রতিসরাঙ্ক। প্রশ্নানুসারে ফ্রিঞ্জ ব্যবস্থায় সরণ ফ্রিঞ্জের বেধের 5 গুণ। অতএব

লেখা যায় যে

$$y = 5\beta = \frac{\beta}{\lambda}(\mu - 1)t$$

$$\therefore t = \frac{5\lambda}{(\mu - 1)} = \frac{5 \times 6000 \times 10^{-8}}{1.5 - 1}\text{cm}$$

$$= \frac{5 \times 6 \times 10^{-5}}{5}\text{cm} = 6 \times 10^{-4}\text{cm} = 6 \times 10^{-6}\text{m}$$

এই বেধকে 6μm (মাইক্রোমিটার) বা 6micron বলা যায়।

5. যুগ্ম প্রিজমের স্থূলকোণটি 179^0

$\therefore$ সূক্ষ্মকোণ দুটির সমষ্টি $= 180^0 - 179^0 = 1^0$

$\therefore$ সূক্ষ্মকোণ $\alpha = \frac{1^0}{2} = 0.5^0 = 0.5 \times \frac{\pi}{180}\text{rad}$

উৎসদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব $d = 2a\alpha(\mu - 1)$

এখানে যুগ্ম প্রিজম ও উৎসের মধ্যবর্তী দূরত্ব $a = 50\text{cm}$

$$\therefore d = 2(50)\frac{\pi \times (.5)}{180}(1.5 - 1)$$

$$= \frac{25\pi}{180}\text{cm}$$

ফ্রিঞ্জের প্রস্থ $\beta = \frac{D\lambda}{d}$

এখানে D = উৎস থেকে পর্দার দূরত্ব $= (50+50)\text{cm}$

$= 100\text{cm}$

এবং $\beta = 0.0135\text{cm}$

$$\therefore \lambda = \frac{d\beta}{D} = \frac{\frac{25\pi}{180} \times .0135}{100}\text{cm}$$

$$= 5891 \times 10^{-8}\text{cm} = 5891\overset{0}{\text{A}}$$

একক 5 ❑ বিস্তার বিভাজন দ্বারা ব্যতিচার

গঠন

5.1 প্রস্তাবনা

একক-4 এ আমরা তরঙ্গমুখ বিভাজন দ্বারা ব্যতিচার ঘটার বিষয়ে জেনেছি। কীভাবে তরঙ্গমুখ বিভাজন করা হয় এবং ফলে কীভাবে দুটি সুসম্বদ্ধ তরঙ্গ-উৎস উৎপন্ন হয় তাও আমরা জেনেছি। কিন্তু তরঙ্গবিস্তার বিভাজন বলতে আমরা কী বুঝব?

আমরা জানি প্রতিফলিত আলোকরশ্মির তীব্রতা আপতিত আলোক রশ্মির তীব্রতা অপেক্ষা অনেক কম। আমরা এও জানি, আলোর তীব্রতা তার তরঙ্গ বিস্তারের বর্গের সমানুপাতী। অতএব বলা যায় প্রতিফলিত আলোর তরঙ্গ-বিস্তার আপতিত আলোর তরঙ্গ-বিস্তার অপেক্ষা কম। এর কারণ কিছুটা আলো প্রতিসারক মাধ্যমে প্রবেশ করে। অর্থাৎ আপতিত আলোক তরঙ্গের বিস্তার বিভাজিত হয়ে প্রতিফলিত তরঙ্গ ও প্রতিসৃত তরঙ্গ উৎপন্ন করে। এই দুই তরঙ্গের উপরিপাত ঘটিয়ে ব্যতিচার সংঘটিত হতে পারে দুটি শর্তে ঃ 1) তাদের মধ্যে সৃষ্ট পথ-পার্থক্য সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্য অপেক্ষা কম হবে এবং 2) উভয় তরঙ্গের তীব্রতার পার্থক্য নগণ্য হবে।

সাবানের বুদ্‌বুদের উপর সূর্যালোক পড়লে আমরা যে বর্ণালি দেখতে পাই, অথবা বৃষ্টিধোয়া রাস্তায় ইতস্তত জমা জলের উপর পাতলা তেলস্তরে যদি সূর্যালোক আপতিত হয় তখনও আমরা যে বর্ণালি দেখি তা হল বিস্তার বিভাজন দ্বারা সৃষ্ট ব্যতিচারের ফল।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করার পর আপনারা যা যা জানবেন তা হ'ল

- আলোক রশ্মির প্রতিফলনে কেন পরিবর্তন ঘটে
- পাতলা ঝিল্লিতে কেন বর্ণালি সৃষ্টি হয়
- কীলকাকৃতির ঝিল্লিতে উৎপন্ন ব্যতিচার নকশার গঠন ও অবস্থান
- নিউটনের বলয় কী এবং এর সাহায্যে তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য নির্ণয়
- কাকে বলে সমবেধের ব্যতিচার নকশা এবং কাকে বলে সমনতির ব্যতিচার নকশা
- কী ভাবে প্রতিফলনহীন বিভেদতল গঠন করা যায়
- মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটার-এর গঠন ও ব্যবহার।

5.2 প্রতিফলনে দশার পরিবর্তন ঃ স্টোক্স্-এর বিশ্লেষণ

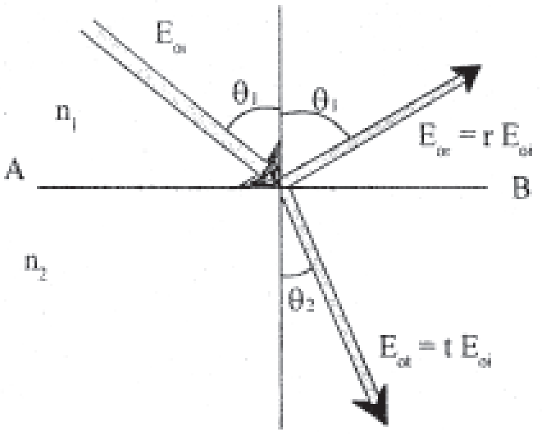
তরঙ্গমুখ-বিভাজন পদ্ধতিতে ব্যতিচার এর তীব্রতা বণ্টন ব্যাখ্যা করতে গিয়ে (একক-4) উপরিপাতিত তরঙ্গ দ্বয়ের পথ-পার্থক্য থেকে দশা-পার্থক্য নির্ণয় করা হয়েছে। কিন্তু যখন লয়েড-দর্পণের ব্যতিচার তীব্রতা ব্যাখ্যা করা হয় তখন বলা হল আলোক তরঙ্গ দর্পণে প্রতিফলিত হলে হঠাৎই প্রতিফলিত দশা তরঙ্গের পরিবর্তন হয়।

আমরা প্রস্তাবনায় জেনেছি যে বিস্তার-বিভাজন ঘটে মাধ্যমের বিভেদ-তলে প্রতিফলন ও প্রতিসরণের দরুন। তাই আমরা জানবো কীভাবে প্রতিফলনে দশা-পরিবর্তন ঘটে। বৃটিশ বিজ্ঞানী স্যার জর্জ গাব্রিয়েল স্টোক্স্ (1819–1903) প্রদত্ত বিশ্লেষণ থেকে এই দশা পরিবর্তনের ঘটনাটিকে আমরা বুঝে নেবো।

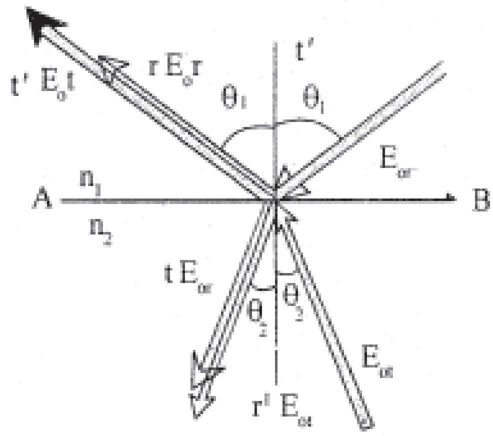
আমরা এখানে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ রূপে আলোককে বিবেচনা করব। এই তরঙ্গের বৈদ্যুতিক সরণ-ভেকটর-$\vec{E}$ কে আলোকের কারণ হিসেবে ধরা হয়। লেখা হয় $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\vec{k}.\vec{r} - \omega t)$

যেখানে $\vec{E}_0$ = বৈদ্যুতিকসরণ ভেক্টরের বিস্তার, $\vec{r}$ = যে স্থানে তরঙ্গকে বিবেচনা করা হচ্ছে তার স্থান ভেক্টর এবং $\vec{k}$ = তরঙ্গ ভেক্টর বা বিস্তারণ (Propagation) ভেক্টর, যে দিকে তরঙ্গ গমন করে $\vec{k}$ সেই দিক নির্দেশ করে; এটি তরঙ্গ মুখের অভিলম্ব ভেক্টর।

অতএব তরঙ্গ বিস্তার $|\vec{E}_0|$ কে বিভাজিত করে পাওয়া যাবে প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত তরঙ্গের বিস্তার।



চিত্র- 5.1a আপতিত তরঙ্গের প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত তরঙ্গে বিভাজন।



চিত্র- 5.1b বিভাজিত প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত তরঙ্গের প্রত্যাবর্তন দ্বারা বিপরীতগামী আপতন তরঙ্গ সৃষ্টি।

দুটি পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যম (প্রতিসরাংক n_1 ও n_2) AB বিভেদতলে মিলিত হয়েছে। n_1 প্রতিসরাংকের মাধ্যমে E_{oi} বিস্তারের আলোক তরঙ্গ θ_1 কোণে আপতিত হলে θ_1 কোণে E_{or} বিস্তারের প্রতিফলিত তরঙ্গ এবং θ_2 কোণে E_{oi} বিস্তারের প্রতিসৃত তরঙ্গ উৎপন্ন হবে। যদি r ও t যথাক্রমে প্রতিফলন গুণাংক ও উত্তরণ গুণাংক হয় এবং অন্যকোন ভাবে আলোর শোষণ না ঘটে তবে [চিত্র-5.1a]

$E_{or} = r E_{oi}$ এবং $E_{ot} = t E_{oi}$. ....(5.1a)

আলোক নীতি (Principle of reversibility) অর্থাৎ আলোকে বিপরীত দিকে ফেরত পাঠালে সে তার অতিক্রান্ত পথকে বিপরীত দিকে অনুসরণ করে। চিত্র-5.1b আলোর প্রত্যাবর্তনের নীতিকে ব্যাখ্যা করছে। এবার দুটি আপতন তরঙ্গ দুটি ভিন্ন মাধ্যমের বিভেদ তলে আপতিত হচ্ছে। n_1 প্রতিসরাংকের মাধ্যম থেকে n_2 প্রতিসরাংকের মাধ্যমের বিভেদ তলে প্রতিফলন ও প্রতিসৃত গুণাংক r এবং t কিন্তু n_2 প্রতিসরাংকের মাধ্যম থেকে n_1 প্রতিসরাংকের মাধ্যমের বিভেদতলে আপতন হলে প্রতিফলন ও উত্তরণ গুণাংক যথাক্রমে r^1 ও t^1 অতএব বিপরীতগামী E_{or}-এর প্রতিফলন বিস্তার ও উত্তরণ বিস্তার যথাক্রমে

$$\left.\begin{aligned} r E_{or} &= r\, r E_{oi} = r^2 E_{oi} \\ \text{এবং } t E_{or} &= tr E_{oi} \end{aligned}\right| \qquad ....(5.1b)$$

আবার বিপরীতগামী E_{ot} এর উত্তরণ ও প্রতিফলন বিস্তার হবে যথাক্রমে

$$\left.\begin{aligned} t^1 E_{ot} &= t^1 t E_{oi} \\ r^1 E_{ot} &= r^1 t E_{oi} \end{aligned}\right\} \qquad \text{.........(5.1c)}$$

অতএব n_1 মাধ্যমে আলোর লব্ধিবিস্তার হবে

$$r E_{or} + t^1 E_{ot} = (r^2 + tt^1) E_{oi}$$

আবার n_2 মাধ্যমে আলোর মোট বিস্তার হবে

$$t E_{or} + r^1 E_{ot} = (t r + r^1 t) E_{oi}$$

চিত্র (5.1a) ও (5.1b) তুলনা করলে লেখা যায়

$$(r^2 + tt^1) E_{oi} = E_{oi} \qquad \text{........... (5.1d)}$$

এবং $$(tr + r^1 t) E_{oi} = 0 \qquad \text{...........(5.1e)}$$

এবং যেহেতু $E_{oi} \neq 0$,অতএব (5.1d) এবং (5.1e) থেকে যথাক্রমে পাওয়া যায়, $tt^1 = 1 - r^2$(5.2a)

এবং $r^1 = -r$ ....(5.2b)

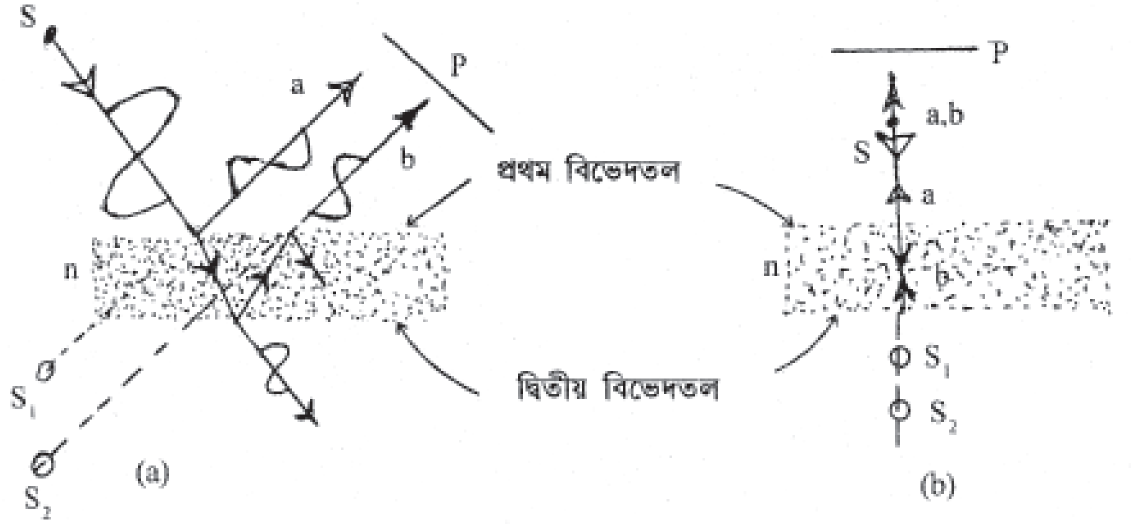
(5.2a) ও (5.2b) সমীকরণ দ্বয়কে বলে স্টোকসের সমীকরণ বা স্টোকস্-এর সম্পর্ক সমীকরণ (Stokes' relations) (5.2b) সম্পর্ক থেকে বলা যায় আলোক রশ্মি বিভেদতলের উভয় পার্শ্বে প্রতিফলিত হলে দুই প্রতিফলিত রশ্মির মধ্যে বিপরীত দশা-পার্থক্য অর্থাৎ π বা 180^0 দশা-পার্থক্য সৃষ্টি হয়। প্রশ্ন হল এই দশা পরিবর্তন কোন্ মাধ্যমে আলোকরশ্মির প্রতিফলনের জন্য ঘটেছে। কোন একটা রশ্মির না উভয় রশ্মির প্রতিফলনের ক্ষেত্রে এই দশা পরিবর্তন ঘটেছে? আমরা পূর্বের এককে লয়েডের দর্পণ পরীক্ষায় জেনেছি যে আলোক তরঙ্গ ঘনতর মাধ্যম থেকে প্রতিফলিত হলে তরঙ্গটির π দশা পরিবর্তন ঘটে। অতএব সমীকরণ (5.2b) থেকে বলা যায় যে লঘুতর মাধ্যমে প্রতিফলনের জন্য কোন আলোক তরঙ্গের হঠাৎই π দশা পরিবর্তন ঘটেনা। দ্বিতীয় সম্পর্কটি আরো একটা বিষয় সম্পর্কে আমাদের অবহিত করে। তা' হল- r^0 ও r^1 এর মান সমান। অর্থাৎ যে কোন দুই মাধ্যমের বিভেদ তলে প্রতিফলন গুণাংকের মান উভয় মাধ্যমেই সমান।

5.3 সমান্তরাল ঝিল্লি কর্তৃক ব্যতিচার ঃ আপতিত তরঙ্গমুখ সমতল [Interference by parallel film: plane incident wave]

ঝিল্লি হলো স্বচ্ছ পাতলা পাত যার মাধ্যম হল পরাবৈদ্যুতিক। যে সব ঝিল্লিতে ব্যতিচার পরিলক্ষিত হয় তার বেধ সংশ্লিষ্ট আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের থেকে কমও হতে পারে আবার কয়েক সেমি পুরু ফলকও হতে পারে। তবে পাতলা ঝিল্লি বলতে এমন পরাবৈদ্যুতিক পাতকে বোঝাবে যার বেধ ব্যতিচারের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয়। সমান্তরাল ঝিল্লি বলতে বোঝাবে যার বেধ সর্বত্র সমান।

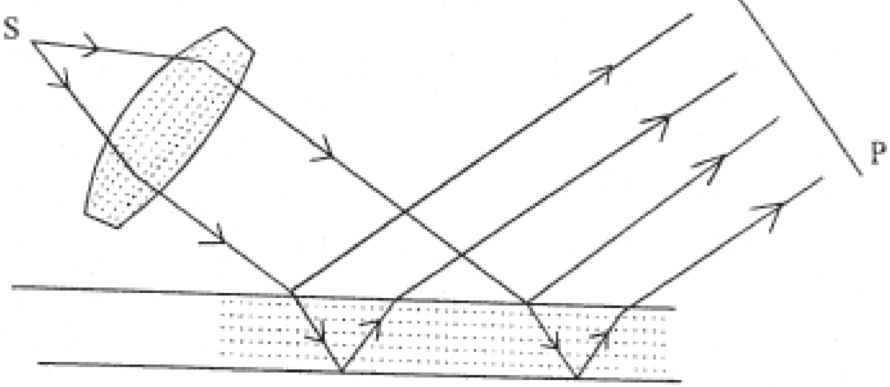
আমরা যদিও এই অনুচ্ছেদে সমান্তরাল ঝিল্লি কর্তৃক ব্যতিচার আলোচনা করব বলেছি, কিন্তু প্রথমেই আমরা দেখব যে ঝিল্লিতে আপতিত আলোক তরঙ্গ যদি সমতল হয় (plane wave) তবে আদৌ কোন ব্যতিচার নকশা সৃষ্টি হবে না। এবং এর পর দেখব যে যদি আলোক তরঙ্গ বিন্দু উৎস জাত হয় অথবা ঝিল্লি যদি অসমতল বা কীলকাকৃতির হয় তবে ব্যতিচার নকশা পাওয়া যাবে। অবশ্য কীলকাকৃতির ঝিল্লির ক্ষেত্রে সমতল তরঙ্গেও ব্যতিচার নকশা দৃষ্টি গ্রাহ্য হয় বা ফটো-ফিলমে ধরা যায়।

আমরা বলেছি, সমান্তরাল ঝিল্লিতে সমতল তরঙ্গ আপতিত হলে ব্যতিচার নকশা গঠিত হয় না। কিন্তু প্রতিটি আলোক রশ্মি থেকে বিস্তার বিভাজনের ফলে ব্যতিচার ঘটে। প্রশ্ন হল ঝিল্লিতে কী ভাবে ব্যতিচার ঘটে?



চিত্র ঃ 5.2 কীভাবে ঝিল্লিতে ব্যতিচার হয়।

n প্রতিসরাংকের সমান্তরাল ঝিল্লির প্রথম বিভেদতলে আলোক রশ্মি আপতিত হয়ে প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত হয়। প্রতিসৃত আলোকরশ্মি ঝিল্লির দ্বিতীয় বিভেদ তলে প্রতিফলিত হয়ে প্রথম বিভেদতলে পুনরায় আপতিত হয়। এই রশ্মির কিছু অংশ ঝিল্লি থেকে প্রতিসৃত হয় এবং বাকি অংশ পুনঃ পুনঃ উভয় বিভেদতলে প্রতিফলিত হতে থাকে। যদি ঝিল্লির প্রথম ও দ্বিতীয় তলে প্রতিফলন গুণাংক কম হয় তবে দ্বিতীয় প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা নগণ্য হয়ে পড়ে। ফলে ধরে নেওয়া যায় যে ঝিল্লির প্রথম ও দ্বিতীয় বিভেদতলে প্রতিফলিত রশ্মিদ্বয় a ও b হল ঝিল্লির দ্বারা বিস্তার বিভাজনের ফলে উৎপন্ন তরঙ্গ বা রশ্মি। মনে হয় যেন রশ্মিদ্বয় সুসম্বদ্ধ উৎসদ্বয় s_1 ও s_2 [যা কিনা Sএর প্রতিবিম্ব] হতে আসছে। যদি a ও b রশ্মিকে P ফটো ফিল্মের উপর উত্তল লেন্স দ্বারা অভিসৃত করা যায় তবে তারা চরম বা অবম ব্যতিচার সৃষ্টি করবে বিশেষ শর্ত পূরণ হলে অথবা, আমরা যদি a ও b এর গমন পথে চোখ স্থাপন করি যেন অসীমে চোখটি তবে রেটিনার উপর তারা অভিসৃত হবে। ফলে আমরা ঝিল্লিকে অন্ধকার বা উজ্জ্বল দেখব নির্দিষ্ট শর্ত সাপেক্ষে। আসলে একটা মাত্র রশ্মির সাহায্যে কোন কিছু দেখা যায় না। তাই আমরা একগুচ্ছ সমান্তরাল রশ্মি যদি ঐ ঝিল্লির উপর আপতিত করি তবে প্রতিটি রশ্মি থেকে বিস্তার-বিভাজন-জাত রশ্মি দ্বয়ের ব্যতিচার হবে।

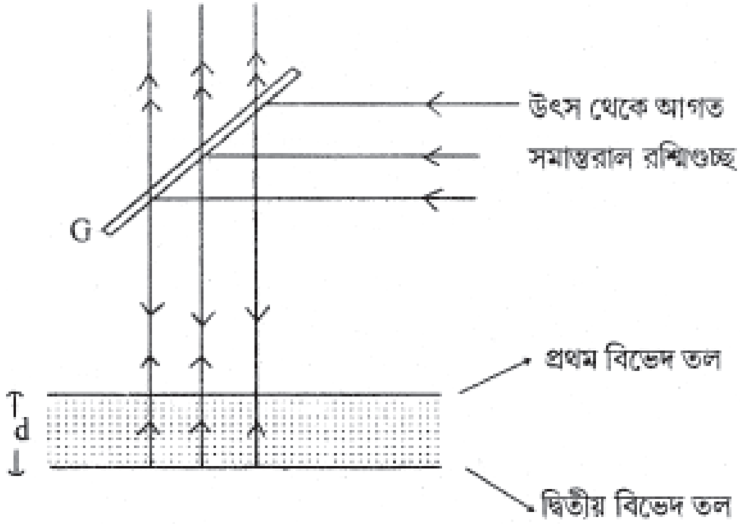


চিত্র 5-3 ঃ আপতিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের কোন পাতলা ফিল্ম বা ঝিল্লিতে প্রতিফলনে ব্যতিচার।

(চিত্র 5.3)। অতএব সব প্রতিফলিত রশ্মিগুলি হয় গঠনমূলক অথবা ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি করবে। উভয় ক্ষেত্রে ফটো ফিল্মের (P) উপর বা চোখের রেটিনার উপর সুষম তীব্রতার ঝিল্লির ছবি গঠিত হবে বা সুষম তীব্রতার ঝিল্লি দেখা যাবে। যদি দুই প্রতিফলিত রশ্মি সমদশায় মিলিত হয় তবে সুষম তীব্রতার উজ্জ্বল ঝিল্লির ছবি গঠিত হবে বা দেখা যাবে, বিপরীত দশায় মিলিত হলে অন্ধকার ঝিল্লির ছবি গঠিত হবে যা দেখা যাবে না। কিন্তু কখনই ঝিল্লির উপর উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে না।

কীভাবে বিস্তার বিভাজনে ব্যতিচার সৃষ্টি হয় তার গাণিতিক বিশ্লেষণ করা যাক পরবর্তী অনুচ্ছেদে

5.3.1 ঝিল্লির উপর অভিলম্বভাবে আপতনের জন্য ব্যতিচার শর্ত



চিত্র 5.4 ঃ সমান্তরাল ঝিল্লিতে সমতল তরঙ্গের অভিলম্ব আপতনে ব্যতিচার।

যদি একটি সমতল তরঙ্গ কোণ 'd" সুষম বেধের সমান্তরাল ঝিল্লি বা পাতলা ফলকের (Thin plate) ওপর অভিলম্বভাবে আপতিত হয় তবে ঝিল্লির উপরিতল থেকে প্রতিফলিত তরঙ্গ ঝিল্লির নীচের তল থেকে প্রতিফলিত তরঙ্গের সঙ্গে ব্যতিচার উৎপন্ন করে। এই ব্যতিচার নকশার বিষয়েই আমরা আলোচনা করব।

ব্যতিচার নকশা নিরীক্ষণ করতে গিয়ে আপতিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ যাতে বাধা প্রাপ্ত না হয় সেইজন্য আমরা একটি আংশিক প্রতিফলনী ফলক (Partially reflecting plate) G ব্যবহার করব। এই ব্যবস্থার ফলে রশ্মিগুচ্ছ যাতে সরাসরি ফটোপ্লেট P (অথবা চোখ) এর ওপর গিয়ে না পড়ে তা সুনিশ্চিত হবে। এই সমতল তরঙ্গ পাওয়া যাবে যদি কোন সূচিছিদ্রকে একটি লেন্সের ফোকাস বিন্দুতে রাখা হয়। ফলক G সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছকে প্রতিফলিত ক'রে ঝিল্লির উপর আপতিত করে। এই রশ্মিগুচ্ছ অংশত প্রথম ও দ্বিতীয় বিভেদতল থেকে প্রতিফলিত হয়ে P ফটোফিল্ম -এ পৌঁছায় (চিত্র- 5.4)। যদি ঝিল্লির পদার্থের প্রতিসরাংক n হয় তবে ঝিল্লির নীচের তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মি উপরের তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির চেয়ে যে অতিরিক্ত পথ অতিক্রম করে তা হল

$$\Delta' = 2nd$$

যদি আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ হয় তবে সংশ্লিষ্ট দশাপার্থক্য হবে

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda}\times 2nd$$

আমরা স্টোক্‌সের বিশ্লেষণ থেকে দেখেছি যে যদি ঝিল্লিটি বায়ুর মধ্যে অবস্থান করে তবে উপরের তলে প্রতিফলিত রশ্মির π দশা পরিবর্তন ঘটে। অতএব P ফটোফিল্মে উপস্থিত প্রতিজোড়া প্রতিফলিত রশ্মির দশা পার্থক্য

$$\delta = \frac{4n\pi d}{\lambda} \pm \pi$$

দশা পার্থক্যের $\pm$ চিহ্ন গুরুত্বপূর্ণ কিছু নয়। উভয় চিহ্ন একই দশা-পার্থক্য সূচিত করে। তাই সুবিধার জন্য কেবল ঋণাত্মক চিহ্নটি গ্রহণ করব। অর্থাৎ দশা পার্থক্য হবে

$$\delta = \frac{4n\pi d}{\lambda} - \pi$$

এই অবস্থায় কার্যকরী পথ পার্থক্য হল

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\pi} \times \delta = 2nd - \frac{\lambda}{2},$$

এই পথ পার্থক্য $\Delta = 2m \times \frac{\lambda}{2}$ হলে, গঠনমূলক বা চরম ব্যতিচার হবে। এখানে m=0,1,2....... ইত্যাদি।

সেক্ষেত্রে আমরা লিখতে পারব $2nd - \frac{\lambda}{2} = 2m \times \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2nd = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

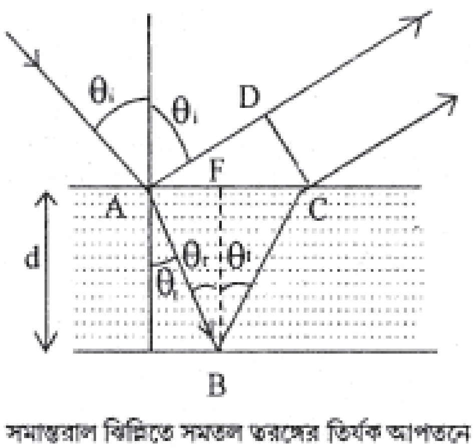
m=0,1,2 ....(5.3)

অর্থাৎ সমীকরণ (5.3) হবে চরম ব্যতিচারের শর্ত। কিন্তু যদি $\Delta = (2m-1)\frac{\lambda}{2}$ হয়, যেখানে m =1,2,3.... ইত্যাদি, তবে বিনাশী বা অবম ব্যতিচার হবে।

অর্থাৎ $2nd - \frac{\lambda}{2} = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2nd = 2m \times \frac{\lambda}{2} = m\lambda$; m=1,2,3 ....(5.4)

সমীকরণ (5.4) হল বিনাশী ব্যতিচারের শর্ত।

যদি আমরা কোন ফটোপ্লেট P স্থাপন করি (চিত্র 5.4) তা হ'লে প্লেটটি সুষমভাবে দীপ্ত হবে। প্লেটটি অন্ধকার হবে যখন $2nd = m\lambda$, যেখানে m= 1,2 এবং উজ্জ্বল হবে যখন $2nd = (2m+1) = \frac{\lambda}{2}$, যেখানে, m= 0,1,2.... । ফটোপ্লেটের বদলে ওপর থেকে খালি চোখে ঝিল্লিকে দেখার চেষ্টা করলে ঝিল্লি সুষমভাবে দীপ্ত মনে হবে। এখানে উল্লেখ করা যেতে পারে যে ঝিল্লির ওপর ও নীচের তল দুটি থেকে প্রতিফলিত তরঙ্গের বিস্তার সাধারণত কিছুটা



চিত্র ঃ 5-5 সমান্তরাল ঝিল্লিতে সমতল তরঙ্গের তির্যক আপতনে ব্যতিচার।

আলাদা হবে এবং সেজন্য ব্যতিচার সম্পূর্ণ বিনাশী হবে না, তবে ঝিল্লির মাধ্যম ও তার নিম্ন তলের সংলগ্ন মাধ্যমের প্রতিসরাংক দুটি যথাযথভাবে বেছে নিতে পারলে বিস্তার দুটিকে প্রায় সমানই করা সম্ভব।

5.3.2 ঝিল্লির উপর সমতল তরঙ্গের তীর্যক আপতনের জন্য ব্যতিচারের শর্ত

বায়ুমাধ্যম থেকে ঝিল্লির ওপর তির্যকভাবে আপতিত আলোক রশ্মি A বিন্দুতে বিস্তার বিভাজিত হওয়ার পর ঝিল্লির মধ্যে প্রতিসৃত রশ্মি AB যখন তার দ্বিতীয় বিভেদ তলে B বিন্দুতেপ্রতিফলিত হয়ে ঝিল্লির প্রথম তলের C বিন্দুতে প্রতিসৃত হয় তখন সেটি প্রথম তলে প্রতিফলিত রশ্মির সমান্তরালে নির্গত হয় (চিত্র 5.5)। AC-র ওপর BF লম্ব টানা হল। এখানে BF=d এবং $\angle ABF = \angle FBC = Q_t$

সমতল তরঙ্গমুখের ক্ষেত্রে C ও D একই তলে কিন্তু ভিন্ন দশায়। তাদের আলোকীয় পথ পার্থক্য

$$\Delta' = n\,(AB+BC) - AD \qquad ......(5.5a)$$

যেখানে n= ঝিল্লি মাধ্যমের প্রতিসরাংক, যদি ঝিল্লির বেধ d হয় তবে

$$AB = \frac{d}{\cos_t} = BC \qquad ....(5.5b)$$

এবং $AD = AC\, Cos\,(90^0 - \theta_i) = AC \sin\,\theta_i$ ....(5.5c)

এখানে θ_i ও θ_t যথাক্রমে আপতন ও প্রতিসরণ কোণ

কিন্তু $AC = AF + FC = 2BF\tan\theta_t = 2d\tan\,\theta_t$ ....(5.5d)

এবং $Sin\theta_i = n\,Sin\theta_t$ ....(5.5e)

সমীকরণ (5.5b) এবং (5.5c) ব্যবহার করে (5.5a) থেকে আমরা পাই

$$\Delta' = \frac{2nd}{\cos\theta_t} - ACSin\theta_i$$

(5.5d) এবং (5.5e) সমীকরণ থেকে Ac -এবং $Sin\theta_i$ মান -এর বসিয়ে লেখা যায়

$$\Delta' = \frac{2nd}{\cos\theta_t} - \frac{2nd\sin^2\theta_t}{\cos\theta_t}$$

$$= \frac{2nd}{\cos\theta_t}(1 - \sin^2\theta_t) = 2nd\cos\theta_t$$

অতএব সংশ্লিষ্ট দশা পার্থক্য হবে

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta'$$

কিন্তু বায়ুতে রাখা ফলক বা ঝিল্লির ক্ষেত্রে যেহেতু দুই প্রতিফলিত রশ্মির মধ্যে একটা π দশা পার্থক্য সৃষ্টি হয়, তাই প্রকৃত দশাপার্থক্য হবে

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta' \pm \pi$$

যেহেতু $\pm$ চিহ্ন একই দশা পার্থক্য সূচিত করে; আমরা সুবিধার জন্য লিখব

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta' - \pi$$

অথবা পথপার্থক্য হবে

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\pi}\delta = \Delta^{\prime} - \frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \Delta = 2nd\cos\theta_t - \frac{\lambda}{2} \qquad .....(5.5f)$$

এই Δ যখন $\frac{\lambda}{2}$ এর যুগ্ম গুণিতক অর্থাৎ যখন

$\Delta = 2m\times\frac{\lambda}{2} = m\lambda$, যেখানে $m = 0,1,2$ .....(5.5g)

তখন চরম বা গঠন মূলক ব্যতিচার উৎপন্ন হবে। অতএব সমীকরণ (5.5f) এবং (5.5g) থেকে আমরা পাই

$$2nd\cos\theta_t = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

অথবা, $2nd\cos\theta_t = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ ······(5.6a)

সমীকরণ (5.6a) হল চরম ব্যতিচারের শর্ত।

কিন্তু যখন $\Delta = (2m-1)\frac{\lambda}{2}$, $m = 1,2,3$ ....(5.6b)

তখন হবে অবম বা বিনাশী ব্যতিচার। অতএব, অবম ব্যতিচারের শর্ত হল

$2nd\cos\theta_t = m\lambda$ ....(5.6c)

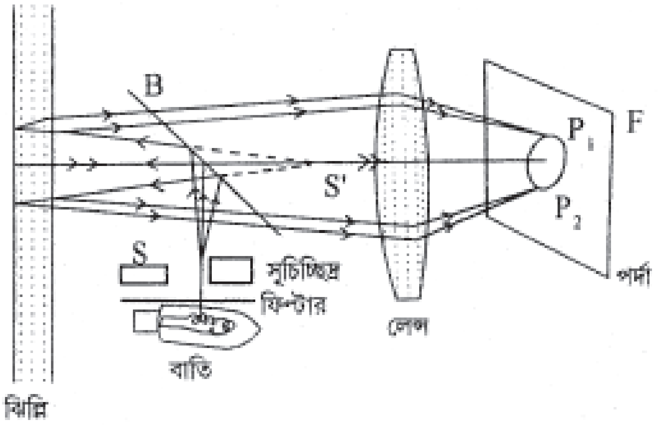
প্রতিফলিত রশ্মি দুটির বিস্তার সমান বা প্রায় সমান হলে এ ক্ষেত্রে বিনাশী ব্যতিচার পাওয়া যাবে।

মন্তব্য ঃ সমীকরণ (5.3) ও(5.4) -এ d ধ্রুবক। নির্দিষ্ট তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোর ঝিল্লির উপর অভিলম্ব অতএব আপতনের ক্ষেত্রে চরম বা অধম ব্যতিচার নির্ভর করবে d এর মানের উপর নির্দিষ্ট প্রতিসরাংকের ঝিল্লির ক্ষেত্রে। ঝিল্লির যে অঞ্চল থেকেই আলো আসুক, সেই অঞ্চলকে তাই অন্ধকার (অবম ব্যতিচার হলে) বা উজ্জ্বল (চরম ব্যতিচার হলে) দেখাবে। অর্থাৎ কোনরূপ ব্যতিচার নকশা তৈরি হবে না। কিন্তু যদি ঝিল্লির বেধ d পরিবর্তনশীল

হয় (যেমন, কীলকাকার ঝিল্লি) তা হলে ফটো ফিল্মে বা চোখে যে অঞ্চল থেকে আলো আসবে সেই অঞ্চলে পরিবর্তনশীল বেধ 'd'-এর মানের ওপর নির্ভর করে চরম বা অবম ব্যতিচার সৃষ্টি হবে বা দৃষ্টিগোচর হবে। অর্থাৎ পরিবর্তনশীল বেধের ঝিল্লিতে সমতল তরঙ্গ ব্যতিচার নকশা গঠন করে।

অন্যদিকে (5.6a) ও (5.6c) সমীকরণে দেখা যায় নির্দিষ্ট তরঙ্গের আলোর নির্দিষ্ট প্রতিসরাংকের ঝিল্লির উপর আপতনে চরম বা অবম ব্যতিচার ঝিল্লির বেধ এবং আপতন কোণ তথা প্রতিসরণ কোণ এই উভয় রাশির উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ যদি ঝিল্লির বেধ স্থির থাকে (সমান্তরাল ঝিল্লি) তা হলে কোন বিস্তৃত আলোক উৎস থেকে নির্গত আলোর ঝিল্লির উপর বিভিন্ন কোণে আপতিত হওয়ার ফলে যেসব বিন্দু থেকে নির্গত আলোক রশ্মি সমূহ একই θ_i কোণে আপতিত হয় তারা ফটোফিল্মে বিভিন্ন বিন্দুতে অবম বা চরম ব্যতিচার সৃষ্টি করবে। এইসব বিন্দুর সঞ্চার পথ উজ্জ্বল বা অন্ধকার পটি তৈরি করবে, অর্থাৎ ব্যতিচার নকশা পাওয়া যাবে। তাই ব্যতিচার নকশা পেতে হলে সমান্তরাল ঝিল্লির উপর বিস্তৃত উৎসের আলোক আপতিত করা দরকার।

5.4 সমান্তরাল ঝিল্লি কর্তৃক ব্যতিচার ঃ আপতিত আলোক বিন্দু-উৎস জাত



চিত্র 5.6 ঃ বিন্দু উৎস S থেকে নির্গত আলোক তরঙ্গ।

আমরা পূর্বের অনুচ্ছেদে কোন পাতলা ফিল্‌ম বা ঝিল্লির ওপর সমান্তরাল আলোকগুচ্ছের আপতনের কথা বিবেচনা করেছি এবং ফিল্মের নীচের ও উপরের তল থেকে প্রতিফলিত আলোক তরঙ্গের দ্বারা উৎপন্ন ব্যতিচারের বিষয়ে আলোচনা করেছি।

আলোচ্য অনুচ্ছেদে আমরা আলোকের একটি বিন্দু উৎস S দ্বারা ঝিল্লি বা পাতলা ফিল্‌মকে আলোকিত করার বিষয়টি আলোচনা করব। ফিল্‌মটি নিরীক্ষণ করতে গিয়ে যাতে আপতিত রশ্মিগুচ্ছ বাধা প্রাপ্ত না হয় তার জন্য এখানেও আবার একটি আংশিক প্রতিফলনীরূপে কাচের ফলক B ব্যবহার করা হবে। সেই সঙ্গে এটাও সুনিশ্চিত হবে যাতে আলো সরাসরি ফটোফিল্মে না পৌঁছায়।

ধরা যাক বিন্দু উৎস S থেকে নির্গত আলোক তরঙ্গকে বিভাজক কাচ ফলক B দ্বারা প্রতিফলিত করে ঝিল্লির ওপর ফেলা হল। মনে হবে S-এর অসদবিম্ব S' থেকে আলোক তরঙ্গ সরাসরি ঝিল্লির উপর পড়ছে। যেন একটি আলোক শঙ্কুর শীর্ষ বিন্দু S', যে কোন একটি আলোক-শঙ্কু বিবেচনা করলে বলা যায় যে যেসব রশ্মি দ্বারা শঙ্কুটি গঠিত তারা সকলেই ঝিল্লি তলে একই আপতন কোণে আপতিত হবে। ফলে ঝিল্লির উভয় তল থেকে প্রতিফলিত

রশ্মিগুচ্ছকে লেন্স দ্বারা অভিসৃত করে ফটো ফিল্ম F এর উপর আপতিত করলে তারা সমদশায় বা বিপরীত দশায় বৃত্তাকার ফ্রিঞ্জ বা পটি গঠন করবে। উভয় তলের প্রতিফলিত তরঙ্গদ্বয় সমদশায় থাকলে উজ্জ্বল বৃত্তাকার, বিপরীত দশায় থাকলে অন্ধকার বৃত্তাকার পটি গঠিত হবে (সমীকরণ 5.6a) ও (5.6c)। $\theta_t \approx 0$ হলে অর্থাৎ প্রায় অভিলম্ব আপতনের জন্য (5.6a) ও (5.6c) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় ।

$$2nd = (2m+1)\frac{\lambda}{2},\ m=0, 1,2,\ldots\ \text{চরম ব্যতিচার} \qquad \ldots\ldots(5.7a)$$

$$2nd = m\lambda,\ m=1,2\ldots\ldots\ \text{অবম ব্যতিচাব} \qquad \ldots\ldots(5.7b)$$

কোন নির্দিষ্ট বর্ণের আলোকের ক্ষেত্রে ব্যতিচার কেন্দ্র উজ্জ্বল কিংবা অন্ধকার হবে তা নির্ভর করবে ঝিল্লির বেধ d ও প্রতিসরাংক n এর উপর। বিভিন্ন আপতিত আলোক শঙ্কুর θ_t বিভিন্ন। সেইজন্য ফটো ফিল্মের উপর পর্যায়ক্রমে উজ্জ্বল ও অন্ধকার বৃত্তের ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। ফটো ফিল্মের স্থানে যদি চোখ রাখা যায় তবে ঝিল্লির উপর এই বৃত্তাকার উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে। যদি বাতির সামনে ফিল্টার ব্যবহার না করা হয় তবে এই নকশা হবে নানা বর্ণের। কারণ কি? $\theta_t \neq 0$ হলে,

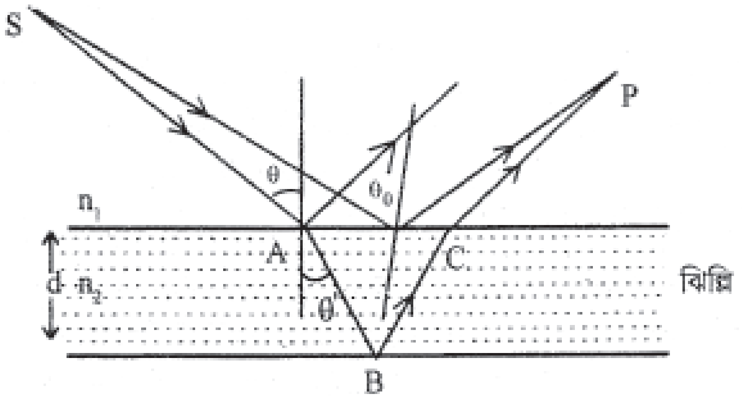
উপরে বর্ণিত ব্যতিচার নকশার শর্ত হবে

$$2nd\cos\theta_t = (2m+1)\frac{\lambda}{2},\ \text{চরম ব্যতিচার}\ m=0, 1,2\ldots\ \text{ইত্যাদি} \qquad \ldots\ldots(5.8a)$$

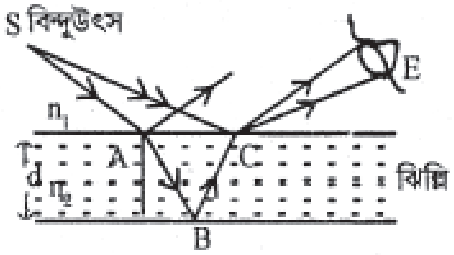
$$2nd\cos\theta_t = m\lambda,\ \text{অবম ব্যতিচার}\ m=1,2,3\ldots\ \text{ইত্যাদি} \qquad \ldots\ldots(5.8b)$$

নির্দিষ্ট বেধের ও প্রতিসরাংকের ঝিল্লির ক্ষেত্রে 2nd ধ্রুবক। অতএব θ_t তথা θ_i এর পরিবর্তন ঘটলে m এর মানও বিভিন্ন হবে, অর্থাৎ আমরা বিভিন্ন উজ্জ্বল বা অন্ধকার ফ্রিঞ্জ পাব। θ_t বা θ_i এর এক একটা নির্দিষ্ট মানের জন্য আমরা একটা নির্দিষ্ট উজ্জ্বল বৃত্তাকার বা অন্ধকার বৃত্তাকার ফ্রিঞ্জ দেখব। এই জন্য এই ফ্রিঞ্জকে বলে সমনতির ফ্রিঞ্জ (fringes of equal inclination)। বিন্দু উৎসের বদলে বিস্তৃত উৎস ব্যবহার করলে এই সমনতির নকশা আরও উজ্জ্বল ও সুস্পষ্টরূপে পরিদৃষ্ট হয়। কিন্তু তির্যক আপতনের ক্ষেত্রে আরও দুইভাবে ব্যতিচার হতে পারে।

বিন্দু উৎস থেকে তির্যক ভাবে আপতিত তরঙ্গের ক্ষেত্রে ঝিল্লির দুই তল থেকে একই রশ্মির আংশিক প্রতিফলিত তরঙ্গের মধ্যে ব্যতিচার সম্পর্কে ইতিমধ্যে আলোচনা করেছি। কিন্তু S থেকে আগত SA রশ্মির দ্বিতীয় তলের প্রতিফলন ও SD রশ্মির প্রথম তলে প্রতিফলন জাত তরঙ্গদ্বয়ের মধ্যে ব্যতিচার হতে পারে (চিত্র5.7)।



চিত্র 5.7 ঃ বিন্দু উৎস থেকে কোন ঝিল্লির দুটি তলে দুটি ভিন্ন রশ্মির প্রতিফলনে ব্যতিচার।



চিত্র 5.8 আলোর একটি বিন্দু উৎস থেকে নির্গত দুটি ভিন্ন রশ্মির ঝিল্লিতে আপতনে ব্যতিচার।

বিন্দু উৎস S থেকে ঝিল্লির নীচের ও ওপরের তলে আপতিত দুটি আলোক রশ্মির প্রতিফলনের দরুন প্রায় অভিলম্ব আপতনের জন্য পথপার্থক্য

$$\Delta \simeq 2nd \cos \theta' \qquad ....(5.9a)$$

আমরা যদি একটি ফটো ফিল্ম ঝিল্লির তল দুটির সমান্তরাল করে P তে রাখি তা হলে সাধারণত ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। P বিন্দুটির তীব্রতার শর্ত হবে

$$\Delta = (m+\frac{1}{2})\lambda \text{ চরম ব্যতিচার } m=0,1,2,...... \qquad ....(5.9b)$$

$$= m\lambda,\ m=1,2......\text{অবম ব্যতিচার} \qquad ....(5.9c)$$

যেখানে $n=\frac{n_2}{n_1}$

এবং $\Delta = \{n_1SA + n_2(AB+BC) + n_1CP\} - n_1(SD+DP)$ (5.10)

ওপরের এই শর্তগুলি আপতন কোন বড় হলেও সঠিক হবে। অবশ্য আমরা যদি খালি চোখে ঝিল্লির দিকে তাকাই, তবে চোখের কোন একটি নির্দিষ্ট অবস্থানের জন্য ঝিল্লির একটি অতি ক্ষুদ্র অংশকেই শুধু দেখা যাবে (চিত্র 5.8)। যেমন, আলোকের বিন্দু উৎসটিকে S অবস্থানে এবং চোখটিকে E-তে রাখলে C বিন্দুটির চারপাশে ঝিল্লির কিছু অংশ দেখা যাবে এবং এই বিন্দুটি অন্ধকার বা উজ্জ্বল দেখাবে যদি আলোকীয় পথ পার্থক্য $m\lambda$ বা $\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$ হয়। $\Delta = n_1SA + n_2(AB+BC) - n_1SC$

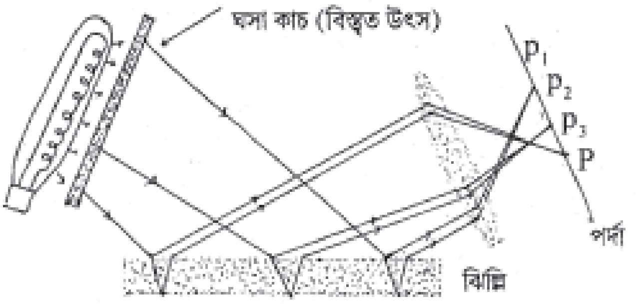
5.3.2 অনুচ্ছেদের অনুসরণে আমরা পাব $\Delta \simeq 2n_2d \operatorname{Cos}\theta'$.

5.4.1 বিস্তৃত উৎসজাত তরঙ্গের ব্যতিচার

আমরা পূর্বেই লক্ষ্য করেছি বিন্দুবৎ উৎসের ক্ষেত্রে চোখের তারারন্ধ্র ছোট হওয়ার দরুন বা ব্যবহৃত লেন্সের উন্মেষ (aperture) ক্ষুদ্র বলে ঝিল্লির একটি ক্ষুদ্র অংশেই ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দেখা যায়। কেবলমাত্র বিন্দুবৎ উৎস থেকে নির্গত সেই রশ্মিগুলিই দেখা যায় যারা প্রতিফলনের পর সরাসরি লেন্সে এসে পৌঁছায়। প্রশ্ন উঠতে পারে ঝিল্লির বৃহদংশ কিভাবে দেখা যাবে। এর জন্য প্রয়োজন বিস্তৃত আকারের আলোক উৎস। বিস্তৃত আকারের উৎস ব্যবহার করে আমরা ঝিল্লি কর্তৃক ব্যতিচার নকশা দেখতে পারি, যদিও বিস্তৃতাকার উৎসের প্রতিটি উৎস বিন্দুই অন্য উৎস

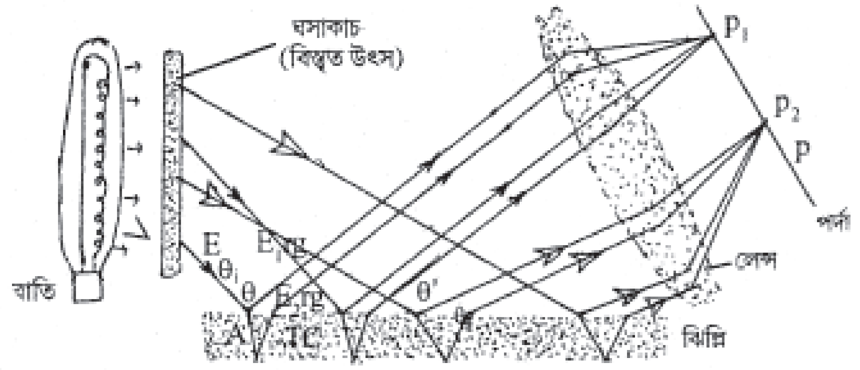
বিন্দুগুলির সাপেক্ষ সুসম্বদ্ধ নয়। আপনাদের কি মনে হতে পারে যে ব্যতিচারের এই শর্তটি তা'হলে মৌলিক কোন শর্ত নয়? আদৌ তেমন কিছু নয়। বিস্তার বিভাজন পদ্ধতিতে একটি রশ্মি থেকে দুটি সুসম্বদ্ধ রশ্মির সৃষ্টি হয়, একটি আলোকের সঙ্গে অন্য রশ্মির আলোকের ব্যতিচার ঘটে না। উৎসের কোন একটি বিন্দু হ'তে নির্গত রশ্মির সঙ্গে অন্য কোন বিন্দু থেকে নির্গত রশ্মির ব্যতিচার ঘটে না।

কীরূপে বিস্তৃত উৎস গঠন করা হয়? একটি ঘসা কাচকে আলোকিত করলে তা একটি বিস্তৃত উৎস রূপে কাজ করবে।



চিত্র 5-9 : ঝিল্লির বৃহদাংশে ব্যতিচার নকশা দৃষ্টিগোচর হয়।

বিস্তৃত আকারের উৎসের ক্ষেত্রে, আলো বিভিন্ন দিক থেকে চোখে এসে পড়বে এবং ফ্রিঞ্জ নকশাটি ঝিল্লির বা ফলকের অনেকটা জায়গা জুড়ে ছড়িয়ে পড়বে (চিত্র5.9)



চিত্র : 5.10 : বিস্তৃত উৎসের বিভিন্ন বিন্দু-উৎস থেকে আগত রশ্মিগুলির মধ্যে যাদের আপতন কোণ সমান তারা পর্দা P-এর ওপর একই বিন্দুতে অভিসৃত হয় এবং ব্যতিচার ঘটায়।

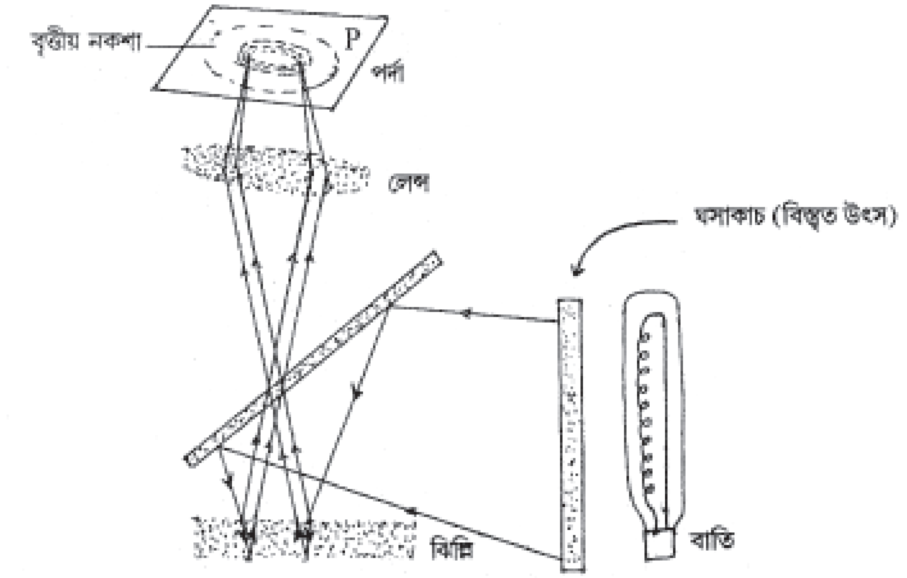
আমরা বিন্দুউৎস জাত তরঙ্গের ব্যতিচার আলোচনায় সমনতির ব্যতিচার নকশা সম্পর্কে জেনেছি। বিস্তৃত উৎসজাত তরঙ্গের সমতল সমান্তরাল ঝিল্লির উপর আপতনের ক্ষেত্রে সমনতির ব্যতিচার নকশা পাওয়া যায়। উৎসের বিভিন্ন বিন্দু থেকে আগত আলোক রশ্মিগুলি যদি একই θ_i কোণে ঝিল্লির উপর আপতিত হয় তবে সব ক্ষেত্রেই θ_t ও সমান হবে। ফলে একই আপতিত কোণের প্রতিটি রশ্মির জন্য ঝিল্লির উভয়তল থেকে প্রাপ্ত দুটি প্রতিফলিত রশ্মি E_{1r} ও E_{2r} লেন্সের ফোকাস তলে সমদশায় বা বিপরীত দশায় মিলিত হবে; যেমন P_1 ও P_2 বিন্দু (চিত্র 5.10) P-এর অবস্থানের উপরই নির্ভর করবে θ_i বা θ_t তথা δ_1 P_1 এবং P_2 বিন্দুতে যে ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে তাদের বলা হয় সমনতির ফ্রিঞ্জ (Fringes of equal inclination)। এখানে লক্ষণীয় বিষয় হল এই যে ঝিল্লির বেধ বৃদ্ধি পেলে E_{1r} ও E_{2r} রশ্মির মধ্যে পার্থক্য $\overline{AC}$ - ও বাড়বে কারণ $(\overline{AC}) = 2d \tan \theta_t$ (5.11)

যখন রশ্মি দুটির মধ্যে একটিই শুধু তারারন্ধ্রের মধ্যে প্রবেশ করতে সক্ষম হয় তখন ব্যতিচার নকশা অদৃশ্য হয়। অবশ্য কোন টেলিস্কোপের বৃহত্তর লেন্স ব্যবহার ক'রে উভয় রশ্মিকেই সংগ্রহ করা যাবে এবং ব্যতিচার নকশাও দৃষ্টিগোচর হবে।

অতএব বিস্তৃত উৎসের প্রতিটি উৎস বিন্দুই একে অপরের সাপেক্ষে সুসংবদ্ধ না হলেও ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে।

হাইডিংগার নকশা (Haidinger Fringes)

θ_i এবং সেই কারণে θ_r-এর মানও হ্রাস পেলে E_{1r} ও E_{2r} রশ্মি দুটির পার্থক্যও হ্রাস পায়। অর্থাৎ আলোকের ব্যতিচার নকশা প্রায় লম্বভাবে কোনপুরু ঝিল্লি বা ফলকে নিরীক্ষণ করলে পরিদৃশ্যমান ফ্রিঞ্জকে বলে হাইডিংগার ফ্রিঞ্জ। ভিলহেল্‌ম কার্ল হাইডিংগার (1795-1871)-এর নামে এই নামকরণ। নকশাটি হবে সমকেন্দ্রিক উজ্জ্বল ও অন্ধকার বৃত্তপুঞ্জ। চোখ থেকে ঝিল্লির উপর লম্ব টানলে, নকশার কেন্দ্র থাকবে ঐ লম্বরেখার উপর। চোখ এদিক-ওদিক সরালে নকশার কেন্দ্রও এদিক ওদিক সরবে (চিত্র 5.11)। নকশাটি যে সমকেন্দ্রিক বৃত্তসমূহের সমাহার হবে তা বোঝা যায় পরীক্ষা-ব্যবস্থার প্রতিসাম্য থেকে।



চিত্র ঃ 5.11 ঃ বৃত্তাকার হাইডিংগার ব্যতিচার নকশা। যদি চিত্র 5.6 এর সংগে তুলনা করা হয়, তবে দেখা যাবে সমনতির ব্যতিচার হলেও সেখানে সব রশ্মি এক-বিন্দু জাত। কিন্তু এখানে প্রতিটি রশ্মি ভিন্ন বিন্দু-উৎস থেকে আসছে।

5.5 কীলকাকৃতির ঝিল্লি (Wedge-shaped film) কর্তৃক ব্যতিচারঃ আপতিত আলোক তরঙ্গমুখ সমতল

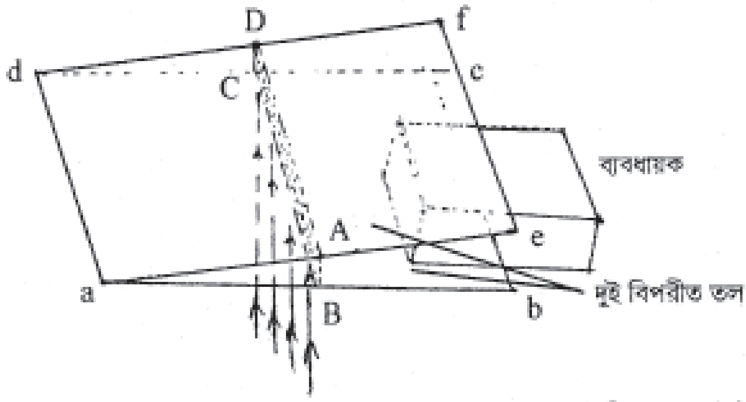
আপনারা ইতিপূর্বে জেনেছেন যে সমান্তরাল ঝিল্লির উপর আপতিত আলোক তরঙ্গমুখ যদি সমতল হয় তবে সে আলোতে ঝিল্লিকে হয় সুষমভাবে উজ্জ্বল অথবা সুষমভাবে অনুজ্জ্বল কালো দেখাবে, কিন্তু উজ্জ্বল ও অন্ধকার ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ নকশা দৃশ্যমান হবে না। কিন্তু যদি ঝিল্লির বেধ সর্বত্র সমান না হয় অর্থাৎ যদি তার প্রতিফলক তলদ্বয় পরস্পর সমান্তরাল না হয় সে ক্ষেত্রে কি সমগ্র ঝিল্লি কেবলমাত্র উজ্জ্বল বা কেবলমাত্র কালো দেখাবে? আপনারা অবশ্যই এই প্রশ্নের উত্তর জানেন। কারণ কোন নির্দিষ্ট তরঙ্গের ক্ষেত্রে ফ্রিঞ্জ অন্ধকার বা উজ্জ্বল হবে, তা নির্ভর

করবে n,d এবং θ_t এর উপর। n স্থির থাকলে এবং $\theta_t \simeq 0$ হলে কেবলমাত্র d এর উপরই নির্ভর করবে ফ্রিঞ্জটি উজ্জ্বল কিংবা অন্ধকার হবে। ঝিল্লির কোন এক অন্ধকার বিন্দুতে উজ্জ্বল ব্যতিচার হলে, ঐ বিন্দুতে ঝিল্লির যা বেধ সেই বেধের সব বিন্দুই উজ্জ্বল হবে। এই বিন্দুগুলির সঞ্চার পথ তাই হবে একটি উজ্জ্বল রেখা। সমবেধের এই সঞ্চার পথ সরল রেখা যেমন হতে পারে গোঁজ আকৃতি বিশিষ্ট (wedge shaped) পাতলা সরে (film) ব্যতিচারে, তেমনি নিউটনের বলয় পরীক্ষায় বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জও পাওয়া যায়। আবার আপতিত রশ্মিগুচ্ছ যদি সূর্যালোক হয়, তবে আলোকের বিভিন্ন বর্ণের (অর্থাৎ বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের) উপর নির্ভর ক'রে পাশাপাশি নানা বর্ণের উজ্জ্বল রেখা দৃষ্টিগোচর হবে৷

কেন রাস্তায় জমা জলের উপর ভাসমান পাতলা তেলের স্তরে নানা বর্ণের আঁকাবাঁকা রেখা দেখা যায় অথবা কোন সাবানের বুদবুদের গায়ে ঐরূপ বর্ণালিরেখা কেন দেখা যায় সেটা কি এখন আপনারা বুঝতে পারছেন?

অনুরূপভাবে অন্য কোন d এর জন্য ব্যতিচারের অবম শর্ত সাপেক্ষে অন্ধকার (dark) এর রেখার সঞ্চার পথও দৃশ্যমান হবে। ব্যতিচার প্রসূত এই উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখার ফ্রিঞ্জকে বলে সমবেধের ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ (fringes of equal thickness) কারণ যেকোন ব্যতিচার রেখা ঝিল্লি বা কোন পাতলা পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের একটি বিশেষ বেধ বরাবর পাওয়া যায়।

সমবেধের ব্যতিচার নকশা উৎপাদন করার জন্য আমরা কীলকাকার ঝিল্লি বিবেচনা করব। আমরা দুটি সমতল কাচের পাত নিয়ে এক প্রান্তে একটিকে অপরের উপর স্থাপন করে অন্য প্রান্তে ব্যবধান সৃষ্টিকারী কোন বস্তু কাচ পাত দুটির মাঝখানে প্রবেশ করিয়ে পরিবর্তনশীল বেধের বায়ু-ঝিল্লি গঠন করতে পারি যার আকৃতি হবে কীলকের ন্যায়। কীলক হল এমন বস্তু যার দুই বিপরীত সমতল তলের ব্যবধান শূন্য থেকে ক্রমাগত অন্য প্রান্তের দিকে বৃদ্ধি পেতে থাকে (চিত্র 5.12)।



চিত্র 5.12 abcd সমতল কাচ ও aefd সমতল কাচের মধ্যে আবদ্ধ বায়ু একটি কীলকাকার ঝিল্লি।

ব্যতিচার নকশা গঠন

আমরা চিত্র 5.12 -এ প্রদর্শিত কীলকাকার ঝিল্লি বিবেচনা করব। ঝিল্লির প্রতিসারক সমতলদ্বয় abcd এবং aefd পরস্পরের সঙ্গে ad রেখায় মিলিত হয়েছে। abcd তলের অভিলম্ব তলে ABCD তল কল্পনা করি যা ad এর সমান্তরাল। অর্থাৎ AD-র যে কোন বিন্দুতেই বায়ুর বেধ সমান। ধরা যাক AB=d, ABCD তলের সমান্তরালে ঝিল্লির aefd তলের উপর একগুচ্ছ আলোক আপতিত হল। অতএব প্রতিটি রশ্মির দুবার প্রতিফলনের ফলে ব্যতিচার শর্ত হবে

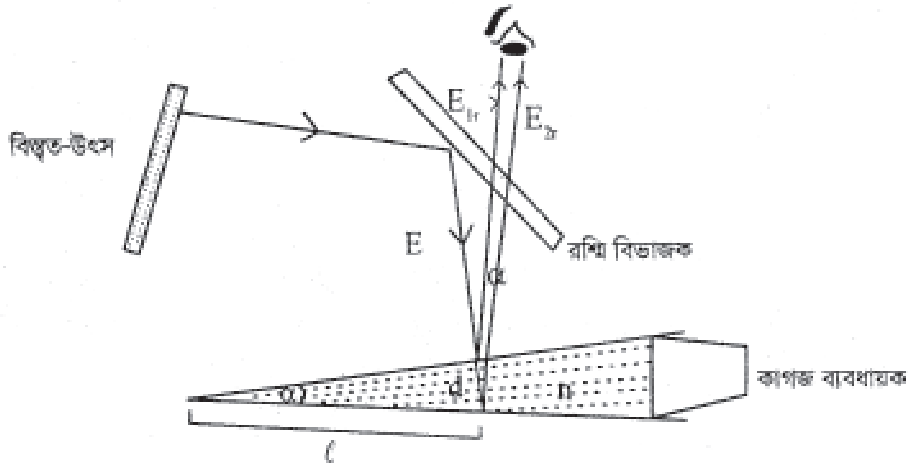
চরম ঃ $$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \; m = 0, 1, 2, \qquad (5.12a)$$

অবম ঃ $2nd = m\lambda$, m =0, 1, 2, ...(5.12b)

যেহেতু BC-র উপর সর্বত্র d ধ্রুবক, অতএব BC বরাবর চরম বা অবম ব্যতিচার ঘটবে, অর্থাৎ BC হবে উজ্জ্বল বা অন্ধকার রেখা যা কীলকাকার ঝিল্লির প্রান্তরেখা ad এর সমান্তরাল। অর্থাৎ ঝিল্লির উপর সমতল তরঙ্গ আপতিত হলে তার উপর ব্যতিচার নকশা হবে কীলক-প্রান্তের সমান্তরাল উজ্জ্বল ও অন্ধকার রেখার সমাহার।

5.5.1 কীলকাকার ঝিল্লি কর্তৃক ব্যতিচার ঃ আপতিত আলোক তরঙ্গ বিস্তৃত উৎসজাত

একটি বিস্তৃত-উৎস বহুসংখ্যক স্বতন্ত্র বিন্দু-উৎসের সমাহার। এর বিভিন্ন অংশ থেকে কীলকাকার ঝিল্লির উপর আলোক প্রায় অভিলম্বভাবে আপতিত হলে যে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের সৃষ্টি হবে তাকে বলে ফিজো ফ্রিঞ্জ (Fizean fringes)। কিন্তু যদি আলোক বিস্তৃত উৎস থেকে নানা দিকে তির্যকভাবে আপতিত হয়, তবে প্রতিটি বিন্দু উৎস নিজ নিজ ব্যতিচার নকশা গঠন করবে। এ জন্য কোন সুনির্দিষ্ট আকৃতির নকশা পাওয়া যাবে না। কিন্তু প্রায় অভিলম্ব আপতনের ক্ষেত্রে ব্যতিচার নকশা সমতল তরঙ্গের ব্যতিচার নকশার অনুরূপ হয়।



চিত্র 5.13 ঃ কীলকাকার ঝিল্লিতে বিস্তৃত উৎসজাত আলোকের ব্যতিচার।

কোন বিন্দু থেকে আগত রশ্মিকে রশ্মি বিভাজক দ্বারা ঝিল্লির উপর প্রায় লম্বভাবে আপতিত করলে তার প্রথম তল থেকে E_{1r} এবং দ্বিতীয় তল থেকে E_{2r} প্রতিফলিত রশ্মিদ্বয়-এর উভয়ে চোখে প্রবেশ করলে ঝিল্লির উপর আপতন বিন্দু অঞ্চলে ব্যতিচার নকশা দৃষ্টিগোচর হবে। এ জন্য এই নকশাকে বলে স্থানীয় ব্যতিচার নকশা (localised fringes).

যদি আপতন বিন্দুতে ঝিল্লির বেধ d হয় তবে উজ্জ্বল ব্যতিচার হবে যখন

$$\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda = 2nd\cos\theta_t \,.......$$

কিন্তু প্রায় লম্ব আপতনের ক্ষেত্রে $\cos\theta_t \approx 1$ এবং θ_i অপেক্ষা nd-এর প্রভাব অনেক বেশি। অতএব চরম ব্যতিচার শর্ত হবে $2nd = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$, m= 0,1,2........

আবার যদি আপতন বিন্দু ঝিল্লির শূন্যবেধের প্রান্ত থেকে ℓ দূরত্বে হয় তবে $d = \ell\alpha$,

যেখানে α = ঝিল্লির তলদ্বয়ের মধ্যবর্তী কোণ (radian).

$$\therefore 2n\ell\alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

যেহেতু ℓ এর এই বিশেষ মানের জন্য উজ্জ্বল ব্যতিচার পাওয়া যাবে তাই ধরা যাক $\ell = \ell_m$. ($m \to$ max).

$$\therefore \ell_m = \frac{\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda}{2n\alpha} = \left(\frac{m+\frac{1}{2}}{2\alpha}\right)\lambda F$$

এখানে $\lambda F = \frac{\lambda}{n}$ অতএব বলা যায় উজ্জ্বল ব্যতিচার গঠিত হবে

যখন $\ell_m = \frac{\lambda F}{4\alpha}, \frac{3\lambda F}{4\alpha}, \frac{5\lambda F}{4\alpha}$........

পরপর দুটি উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের ব্যবধান

$$\Delta\ell_m = \frac{\lambda F}{2\alpha} \qquad ....(5.13a)$$

আবার যদি $d = d_m$ হয় চরম ব্যতিচারের জন্য ঝিল্লি বেধ, তবে

$$d_m = \left(\frac{m+\frac{1}{2}}{2n}\right)\lambda = \left(m+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2\ell}F \qquad ....(5.13b)$$

অতএব উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জগুলির অবস্থানে ঝিল্লি বেধ হবে

$$d_m = \frac{\lambda F}{4}, \frac{3\lambda F}{4}, \frac{5\lambda F}{4} \qquad ....(5.13c)$$

অতএব পাশাপাশি দুটি চরম ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের মধ্যে ঝিল্লির বেধের পার্থক্য $\frac{\lambda F}{2}$, আবার E_{2r} রশ্মিটি ঝিল্লির অভ্যন্তরে দুবার অতিক্রম করে ($\theta_i \simeq \theta_t \simeq 0$)। তাই দুই পাশাপাশি ফ্রিঞ্জের মধ্যে চরম পথপার্থক্য

$$2\Delta d_m = 2 \times \frac{\lambda F}{2} = \lambda F$$

এখন $\frac{\lambda F}{2}$ পথপার্থক্য = π দশা পার্থক্য।

এই দশা পার্থক্যের সঙ্গে প্রতিফলনজাত দশা পার্থক্য π যুক্ত হলে E_{1r} এবং E_{2r} সমদশায় থাকে।

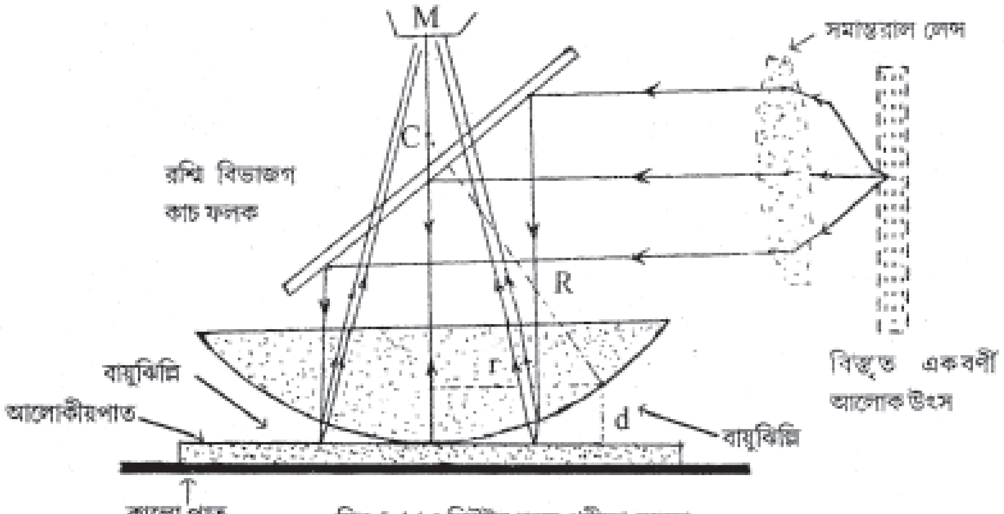
কীভাবে কীলক ঝিল্লি গঠন করবেন?

দুটি পরিষ্কার মাইক্রোস্কোপ স্লাইডকে চেপে ধরলে তাদের মধ্যবর্তী বায়ুস্তর যে ঝিল্লি গঠন করবে তার বেধ পরিবর্তনশীল হবে। ফিজো ফ্রিঞ্জ বা নকশার পর্যবেক্ষণ দ্বারা কোন পাতলা পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের বেধ সুষম কিনা তা জানা যায়। আলোক বিজ্ঞানে ব্যবহৃত লেন্স প্রিজম বা কোন আলোকপাতের তলের মসৃণতাও ফিজো নকশার দ্বারা চিহ্নিত করা যায়।

5.6 নিউটনের বলয় পরীক্ষা

নিউটনের বলয় পরীক্ষা ব্যবস্থায় একটি মসৃণ কাচ-পাতের উপর একটি উত্তল বা সমোতলোত্তল লেন্সের বক্রতল স্থাপন করা হয়। এই লেন্সের বক্রতা ব্যাসার্ধ বেশ দীর্ঘ। এর ফলে কাচফলক ও লেন্সের বক্রতলের মধ্যবর্তী বায়ু স্তর একটি বর্ধমান বেধের বায়ু-ঝিল্লি গঠন করে। লেন্সের অক্ষের উপর কোন বিন্দুকে কেন্দ্র করে অংকিত বৃত্ত (যার ব্যাসার্ধের দৈর্ঘ্য লেন্সের উন্মেষের ব্যাসার্ধ থেকে কম) যে পথে গমন করবে সে পথটির উপর ঝিল্লির বেধ একই হবে। অর্থাৎ এই ঝিল্লিস্তর বৃত্তাকার ব্যতিচার নকশা গঠন করবে।

কাচফলক-লেন্স সমবায়ের দ্বারা গঠিত বায়ু ঝিল্লির উপর উল্লম্বভাবে একটি রশ্মিবিভাজক কাচ দ্বারা কোন আলো উৎস থেকে আপতিত হয়। আলোর উৎস সাধারণত প্রায় একবর্ণী আলো উৎপন্ন করে, যেমন সোডিয়াম (sodium lamp) বাতি। উৎসকে অন্য একটা লেন্সের ফোকাসে স্থাপন করে আপতিত আলোক রশ্মিগুচ্ছকে সমান্তরাল করা হয় ও অনুভূমিক ভাবে রশ্মিবিভাজকের উপর ফেলা হয়। রশ্মিবিভাজকটি সমতলোত্তল লেন্সের অক্ষের উপরে তার সংগে 45° কোণে স্থাপিত থাকে। ফলে প্রতিফলিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ সমতলোত্তল লেন্সের সমতল পৃষ্ঠে লম্বভাবে আপতিত হয়। এই আলোক ঝিল্লির দুইতলে প্রতিফলিত হয়ে বৃত্তাকার ব্যতিচার নকশা গঠন করে। রশ্মি বিভাজকের উপর থেকে একটি অণুবীক্ষণ যন্ত্রে (M) এই নকশা সহজে দৃষ্টিগোচর হয়। লেন্সের গঠনের গোলীয় আকৃতি যত নিখুঁত হবে বৃত্তাকার নকশাও তত নিখুঁত বৃত্তাকার হবে। (চিত্র 5.14)।



চিত্র 5-14 ঃ নিউটন বলয় পরীক্ষা-ব্যবস্থা

ধরা যাক নিউটন বলয়-এর কোন একটি বলয়ের (উজ্জ্বল বৃত্তীয় ব্যতিচার বলয়) ব্যাসার্ধ r এবং যে স্থানে এই বলয় গঠিত হয়েছে সেখানে বায়ু ঝিল্লির বেধ d, c যদি সমতলোত্তল লেন্সের বক্রতা কেন্দ্র হয় এবং R যদি তার বক্রতা ব্যাসার্ধ হয় তবে

$$R^2=r^2+(R-d)^2$$

$$\Rightarrow r^2=R^2-(R-d)^2$$

$$\Rightarrow r^2=2Rd-d^2$$

যেহেতু $R>>d$,

$$r^2 = 2Rd$$

প্রায় অভিলম্ব আপতনের ক্ষেত্রে সংস্পর্শ বিন্দুর খুব কাছাকাছি বিন্দুগুলি বিবেচনা করলে দুটি তরঙ্গের মধ্যে আলোকীয় পথ পার্থক্য হয় 2nd। এখানে n ঝিল্লির প্রতিসরাংক। এখন d বেধের স্থানে চরম ব্যতিচারের শর্ত হল

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

এই ব্যতিচার ফ্রিঞ্জটি m ক্রমের উজ্জ্বল বৃত্ত যার ব্যাসার্ধ $r = r_m$। বা $r_m^2 = 2RD$.

$$\therefore 2n \times \frac{r_m^2}{2R} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \text{ [n = 1, বায়ু ঝিল্লি]}$$

$$\Rightarrow r_m = \left[\frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (5.14)$$

m-তম ক্রমের অন্ধকার বলয়ের ব্যাসার্ধ অনুরূপভাবে হবে

$$r_m = \left(\frac{m\lambda R}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (5.14a)$$

[n = 1, বায়ু ঝিল্লি]

যদি আলোকীয় কাচ পাত ও সমতলোত্তল লেন্সের মধ্যে কোন রকম ধুলোবালি না থাকে, অর্থাৎ যদি তাদের দুইতল যথার্থই পরস্পরের সংস্পর্শে থাকে, তবে $d = d_m = 0$ বা $r_m = 0$ হবে। তখন $m = 0$ ক্রমের ব্যতিচার পাওয়া যাবে। সমীকরণ (5.8) এই শর্ত মেনে নেয়। অতএব কেন্দ্রীয় বলয় অন্ধকার হবে। যদিও তত্ত্বগতভাবে দুইতল কেবল একটি বিন্দুতেই পরস্পরকে স্পর্শ করতে পারে তবুও অনুবীক্ষণে কেন্দ্রীয় বৃত্তাকার অঞ্চল একটিমাত্র অন্ধকার বিন্দু নয়। বরং একটা অঞ্চল জুড়ে অন্ধকার ব্যতিচার দৃষ্ট হয়। এর কারণ একটা অঞ্চলজুড়ে d এর মান কার্যত শূন্য।

হাইডিংগার নকশা ও নিউটন বলয়—উভয়েই বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশা। কীভাবে এই দুই নকশাকে চিহ্নিত করা যাবে? প্রথমত নিউটন বলয়ের ক্ষেত্রে কেন্দ্র থেকে বলয়ের ক্রম বাহিরের দিকে বৃদ্ধি পায়, কিন্তু হাইডিংগার ফ্রিঞ্জের বেলায় কেন্দ্রীয় বলয়ের সংখ্যাটি গরিষ্ঠ হবে। দ্বিতীয়ত নিউটন বলয় সমবেধের ফ্রিঞ্জ এবং স্থানীকৃত ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ। কিন্তু হাইডিংগার ফ্রিঞ্জ হচ্ছে সমনতি ফ্রিঞ্জ ও অস্থানীকৃত ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ।

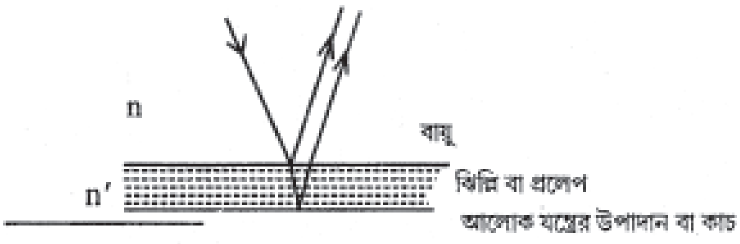
সমীকরণ (5.13a) বা (5.13b) থেকে লেন্সের ব্যাসার্ধ বা আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের কোন একটি পরিমাপ করা যায় যদি অপরটি জানা থাকে।

5.7 পাতলা ঝিল্লিতে ব্যতিচারের প্রয়োগ

i) অপ্রতিফলক ঝিল্লি (non-reflecting film)

অনেক আলোক যন্ত্রে লেন্স তল থেকে যে আলো প্রতিফলিত হয় তা আলোকযন্ত্র কর্তৃক উৎপন্ন প্রতি বিম্বের

গুণগত মান ক্ষুণ্ণ করতে পারে। যন্ত্রের বিভিন্ন উপাদানের তল থেকে যাতে আলোক প্রতিফলিত হতে না পারে তার জন্য কাচ তলে অন্য পরা বৈদ্যুতিক মাধ্যমের প্রলেপ লাগানো হয়। এই প্রলেপ আসলে এমন এক ঝিল্লি যা আলোক প্রতিফলিত করে না।



চিত্র 5.15

ঘটনা হল এই যে কোন পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যম তলে লম্বভাবে আপতিত রশ্মির ক্ষেত্রে প্রতিফলিত ও আপতিত রশ্মির বিস্তারের অনুপাত হল $\frac{n'-n}{n'+n}$ (5.15a)

যেখানে n' = পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের প্রতিসরাংকএবং n হল আপতন মাধ্যমের প্রতিসরাংক

অতএব ঝিল্লি তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির বিস্তার (যদি আপতন বিস্তার ধরা হয় 1 একক) হবে

$\frac{n_F-1}{n_F+1}$, n_F = ঝিল্লির প্রতিসরাংক

আবার কাচতল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির বিস্তার হবে

$\frac{n_G-n_F}{n_G+n_F}$, n_G = কাচের প্রতিসরাংক

এই দুই বিস্তার সমান হলে

$$\frac{n_F-1}{n_F+1}=\frac{n_G-n_F}{n_G+n_F} \Rightarrow n_F=\sqrt{n_G} \quad (5.15b)$$

অতএব অপ্রতিফলক ঝিল্লি বা প্রলেপ দিতে হলে গৃহীত পরা বৈদ্যুতিক মাধ্যমের প্রতিসরাংক হবে নির্বাচিত কাচের প্রতি সরাংকের বর্গমূল।

যেহেতু দুটি প্রতিফলিত রশ্মি মিলিতভাবে বিনাশী ব্যতিচার উৎপন্ন করবে তাই তাদের দশা পার্থক্য π এর বিযুগ্ম গুণিতক হতে হবে। অতএব প্রলেপের বা ঝিল্লির বেধ প্রায় অভিলম্ব আপতনের জন্য হবে

$$2n_F d=\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \quad (5.15c)$$

প্রায় অভিলম্ব আপতনের জন্য শূন্য প্রতিফলনাংক পাওয়া যাবে যদি film বা ঝিল্লির বেধ $d = \lambda/\Delta n_F$ হয়। তখন $n_F = \sqrt{n_G}$ শর্তটিও সঠিক হবে।

এটা লক্ষণীয় যে যদিও শূন্য প্রতিফলনাংকের শর্ত সঠিকভাবে পূর্ণ হবে একটি মাত্র আপতন কোণ এবং একটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য, তথাপি খানিকটা বড় পাল্লার আপতন কোণ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রেও প্রতিফলিত আলোর তীব্রতা কম হয়। এইভাবে কাচফলক বা লেন্সের তলে অপ্রতিফলক প্রলেপ লাগিয়ে প্রতিফলনাংক হ্রাস করার পদ্ধতিকে বলা হয় ব্লুমিং (blooming)।

i) 1.5 প্রতিসরাংকের কাচের জন্য ঝিল্লির প্রতিসরাংক হওয়া উচিত $\sqrt{1.5}$, সাধারণ আলোক যন্ত্রের লেন্স বা প্রিজম এর তল ম্যাগনেসিয়াম ফ্লুরাইড দ্বারা প্রলিপ্ত করা হয়। এর প্রতিসরাংক 1.38 যা সাধারণভাবে প্রাপ্ত কাচের প্রতিসরাংকের বর্গমূল থেকে অনেকটা বেশি।

ii) উচ্চ প্রতিফলনাংক ঝিল্লির অপরদিকে আবার প্রলেপ দ্বারা প্রতিফলনের হার বৃদ্ধিও করা যায়। এরূপ ক্ষেত্রে প্রলেপ ঝিল্লির প্রতিসরাংক কাচের প্রতিসরাংক থেকে বেশী হবে এবং বায়ু-ঝিল্লি প্রতিফলিত তরঙ্গ ও কাচ-ঝিল্লি প্রতিফলিত তরঙ্গ গঠনমূলক ব্যতিচার সংঘটিত করবে।

iii) কাচকে ঘসে লেন্স তৈরি করা হয়। এই সব লেন্সের তলের গোলীয় আকৃতি নিখুঁত কিনা তা পরীক্ষা করা যায় নিউটন বলয় পরীক্ষা দ্বারা। যথার্থ মসৃণ ও সুষম তলের কাচের পাতের উপর পরীক্ষাধীন লেন্স স্থাপন করে যে ব্যতিচার নকশা পাওয়া যায় তার বলয়গুলি যথার্থ বৃত্তাকার হলে লেন্স গোলীয়।

iv) কোন তলের বেধের সুষমতা (flatness) পরীক্ষা করা যায় কীলকাকার ঝিল্লির দ্বারা। একটি যথার্থ আলোকীয় সুষম বেধের (Optical flat) তলের উপর পরীক্ষাধীন ফলককে স্থাপন করে কীলকাকার বায়ু-ঝিল্লি গঠন করে উৎপন্ন ব্যতিচার পরীক্ষা করতে হবে। যদি ব্যতিচার নকশার প্রতিটি ফ্রিঞ্জ সরলরৈখিক ও পরস্পরের সমান্তরাল হয় তবে বুঝতে হবে যে পরীক্ষাধীন ফলক মসৃণ ও সুষম বেধের।

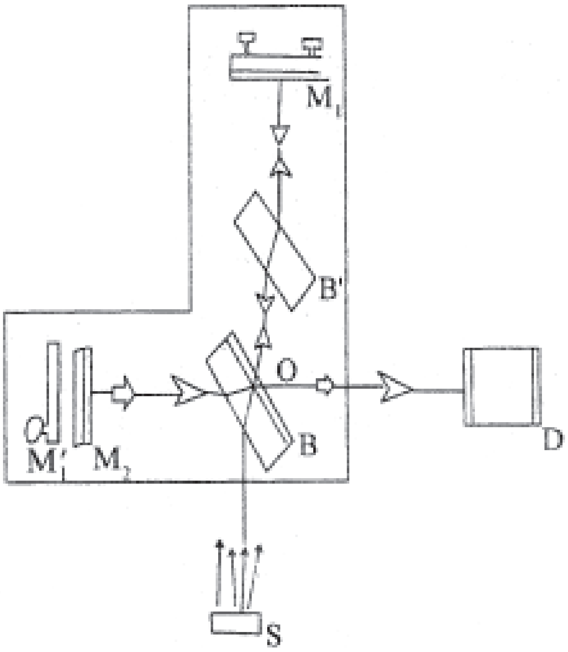
অনুশীলনী - 1

1. নিউটন বলয়ের পরীক্ষা ব্যবস্থায় লেন্স ও আলোকীয় সমতল ফলকের মধ্যবর্তী পাতলা বায়ুর ঝিল্লির পরিবর্তে জলের ঝিল্লি ব্যবহার করলে কোন একটি নির্দিষ্ট ক্রমের বলয়ের ব্যাসার্ধের কিরূপ পরিবর্তন হবে?

5.8 মাইকেলসন-ইন্‌টারফেরোমিটার (The Michelson Interferometer)

আমরা দেখেছি বিস্তার বিভাজনের দ্বারা যেসব ব্যতিচার নকশা গঠিত হয় তাদের গঠন বিভিন্ন প্রকার হয়। কিন্তু ঐসব বিভিন্ন ধরনের ব্যতিচার নকশা পেতে বিভিন্ন ব্যবস্থা গ্রহণের দরকার হয়। আমরা দেখব, মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারের দ্বারা বিভিন্ন প্রকারের ব্যতিচার নকশা পাওয়া যাবে। অন্যান্য বহুপ্রকার ইনটারফেরো মিটারের মত মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারেও দর্পণ ও রশ্মি-বিভাজক ব্যবহার করা হয়।

চিত্র 5.16 -এ মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটরের ছক-চিত্র দেখানো হল। (Schematic diagram)



চিত্র 5.16 মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারের নকশা চিত্র।

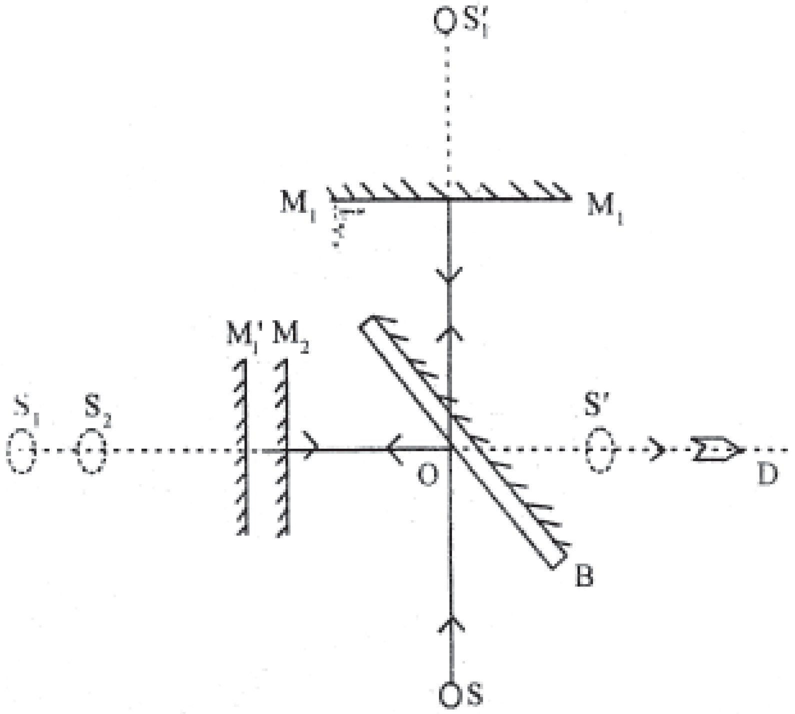
একটা বিস্তৃত আলোক উৎস S থেকে যে আলোক তরঙ্গ নির্গত হয় তার একটা অংশ রশ্মি বিভাজক B-এর উপর আপতিত হবে। রশ্মিবিভাজকের অপর তলটিতে রূপার পাতলা প্রলেপ লাগানো থাকে। আপতিত আলোক তরঙ্গ এই প্রলেপে অংশত প্রতিফলিত ও অংশত প্রতিসৃত হয়। প্রতিফলিত অংশ রশ্মিবিভাজকের মাধ্যম থেকে নির্গত হয়ে M_2 সমতল দর্পণে প্রতিফলিত হয় এবং পুনরায় B রশ্মি বিভাজকে ফিরে আসে যা ঐ বিভাজকে প্রতিফলিত হয়ে D-তে অবস্থিত চক্ষু বা সন্ধানী যন্ত্রে (Detector) প্রবেশ করে। রশ্মি বিভাজক থেকে তরঙ্গের প্রতিসৃত অংশ M_1 সমতল দর্পণ কর্তৃক প্রতিফলিত হয়ে পুনরায় B রশ্মি বিভাজকেই ফিরে আসে এবং তার মধ্য দিয়ে পারগত হয়ে D অবস্থানের চক্ষু বা সন্ধানী যন্ত্রে প্রবেশ করে। যেহেতু D-তে অবস্থিত সন্ধানী যন্ত্রে প্রবিষ্ট তরঙ্গ দ্বয় একই আপতিত তরঙ্গ থেকে বিস্তার-বিভাজনের দ্বারা প্রাপ্ত, অতএব তারা সুসম্বদ্ধ। তাই উভয় তরঙ্গ মিলিত হয়ে ব্যতিচার সৃষ্টি করবে অবশ্য যদি তাদের পথপার্থক্য সুসম্বদ্ধতার দৈর্ঘ্য (Coherent length) অপেক্ষা অধিক না হয়। M_1 ও M_2 দর্পণের সম্মুখতলে রূপার পাতলা প্রলেপ দেওয়া থাকে এবং স্বাভাবিক সমন্বয়নে (Normal adjustment) M_1ও M_2 -এর তলদ্বয় পরস্পর অভিলম্বভাবে রাখা হয় রশ্মিবিভাজক B দর্পণ M_1ও M_2 -এর তলের সঙ্গে 45^0 কোণে নত থাকে। দর্পণ M_1ও M_2-এর অবস্থান এবং তাদের তলের নতি নিয়ন্ত্রণ করার জন্য দর্পণ দুটির পিছনে স্ক্রু যুক্ত থাকে। পরস্পরের সঙ্গে অভিলম্বভাবে থাকা দুটি বাহুযুক্ত একটি কাঠামোর উপর দর্পণ M_1 ,M_2 এবং বিভাজক B কে স্থাপন করা হয়।

লক্ষ্যণীয় যে D সন্ধানী যন্ত্রে যে দুটি রশ্মি বা তরঙ্গ উপস্থিত হয় তার একটি রশ্মি বিভাজকের মধ্য দিয়ে তিনবার যাতায়াত করে, কিন্তু অপর রশ্মিটি কেবলমাত্র একবার মাত্র অতিক্রম করে। যাতে দ্বিতীয় রশ্মিটি (M_1-মুখী) আরো দুবার রশ্মি বিভাজকের সমবেধযুক্ত অনুরূপ মাধ্যম অতিক্রম করতে পারে তাই B বিভাজকের সম্পূর্ণ সদৃশ অর্থাৎ একই বেধের ও একই মাধ্যমের একটি প্রতিবিধায়ক ফলক B', B -এর সমান্তরালে M_1-মুখী রশ্মি পথে স্থাপন করা হয়। B'-এ কোন রূপার প্রলেপ থাকে না।

প্রশ্ন হচ্ছে এই প্রতিবিধায়ক ফলকের প্রয়োজন কেন হল? বস্তবে প্রায় একবর্ণী আলোকের ক্ষেত্রে এই পরিপূরকের (Compensator) কোন প্রয়োজন নেই। কারণ রশ্মি-বিভাজকের বেধ d হলে M_2 দর্পণমুখী রশ্মিটি n প্রতিসরাংকবিশিষ্ট বিভাজকে যে অতিরিক্ত 2d পথ অতিক্রম করে তা M_2 দর্পণটিকে 'nd' দূরত্ব সরালেই প্রতিবিহিত হয়। যথাস্থানে 45^0 কোণে পরিপূরকটি রাখলে প্রকৃত পথ পার্থক্য থেকেই কোন আলোকীয় পথ উদ্ভূত হয়। এ ছাড়াও, রশ্মিবিভাজকের বিচ্ছুরণের জন্য আলোকীয় পথ তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ -এর অপেক্ষক। ফলে কোন মাত্রিক কাজের (quantitative work) ক্ষেত্রে মাইকেলসন ইন্টারফেরোমিটার ব্যবহার করা যেতে পারে কেবল প্রায় একবর্ণী আলোর উৎসের ক্ষেত্রে। পরিপূরকের অন্তর্ভুক্তি বিচ্ছুরণের প্রভাবকে বাতিল করে। ফলে বেশ চওড়া ব্যাণ্ড প্রসার (Broad Band-width) যুক্ত কোন উৎসের বেলায়ও যে ফ্রিঞ্জ তৈরি হবে তাদের আলাদা করে চেনা যাবে।

ব্যতিচার নক্‌শা গঠনের ব্যাখ্যা

রশ্মি বিভাজকে প্রতিফলনের দরুন উৎস S ও দর্পণ M_1এ এর প্রতিবিম্ব S' ও M_1' গঠিত হয়। M_1ও M_2 দর্পণে S' এর প্রতিবিম্ব হবে S_1ও S_2 যা সরাসরি সন্ধানী যন্ত্র বা অভিজ্ঞাপক D-এর সমরেখ হবে। (চিত্র 5.17)



চিত্র 5.17 : মাইকেলসন ইন্টারফেরোমিটারের মনন চিত্র।

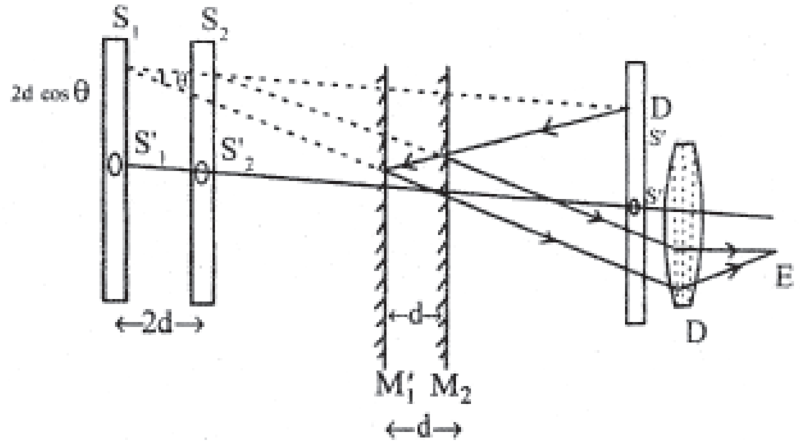
রশ্মিবিভাজকে প্রতিফলনের ফলে D সাপেক্ষে M_1এর অবস্থান হবে M'_1 অর্থাৎ $BM_1 = BM'_1$। M_2 কে তার নিজের অবস্থানেই দেখা যাবে D থেকে। M'_1 এর অবস্থান নির্ভর করবে BM_1 এর উপর। $BM_1 > BM_2$ হলে M'_1 হবে M_2 এর পশ্চাতে; $BM_1 < BM_2$ হলে M'_1 হবে M_2 এর সম্মুখে। আবার $M_1B = M_2B$ হলে M'_1ও M_2 এর অবস্থান একই হবে। অর্থাৎ $M_2M'_1 = d = 0$ হবে। আবার রশ্মিবিভাজকে S এর প্রতিবিম্ব হবে S'। অতএব M_2ও M_1 অসদবিম্ব S' এর S_2 ও S_1 অসদবিম্ব গঠন করবে। অর্থাৎ D এর নিকট মনে হবে S_1 ও S_2 থেকে আলো আসছে।

স্পষ্টতই S_1 ও S_2 সুসম্বদ্ধ উৎস (হাইডিংগার ব্যতিচারে যেমন)। D এর সমাক্ষীয় রশ্মির ক্ষেত্রে যদি $M_2M'_1=d$ হয় তবে $S_1S_2= 2d$।

অনুশীলনী - 2

প্রমাণ করুন যে মাইকেলসন ইন্টারফেরোমিটারের ক্ষেত্রে রশ্মি বিভাজক থেকে দর্পণদ্বয়ের দূরত্বের ব্যবধান d হলে তাদের দ্বারা উৎপন্ন প্রতিবিম্বদ্বয়ের ব্যবধান 2d হবে।

কিন্তু যদি আমরা সমাক্ষীয় নয় এমন রশ্মি বিবেচনা করি তবে চিত্র 5.17 এর রূপটি হবে চিত্র 5.18 এর মত এখানে কেবল অসদ উৎস S', এবং দর্পণ M_2 ও M'_1 দ্বারা উৎপন্ন তার প্রতিবিম্ব যথাক্রমে S_2 ও S_1 কে দেখানো হয়েছে।



চিত্র 5.18-মাইকেলসন ইন্টারফেরোমিটারে ব্যতিচার ধারণা

চিত্র 5.17-এ যে যে স্থলে S', S_1, S_2 বিন্দু উৎস, চিত্র 5.18 তে সেই সেই স্থলে বিস্তৃত উৎস ধরা হয়েছে যথাক্রমে S'', S'_1, S'_2. এই S'' বিস্তৃত উৎসের উপর S' যে কোন একটা বিন্দু উৎস যা D-এর অক্ষ থেকে দূরে। S' থেকে নির্গত রশ্মি দর্পণ M_2 এবং M'_1 কর্তৃক প্রতিফলিত হয়ে D সন্ধানীতে পৌছায়। মনে হবে যেন বিস্তৃত অসদ উৎস S'_2 ও S'_1 এর উপর S_2 ও S_1 বিন্দু থেকে আলোক তরঙ্গ আসছে। S_1 ও S_2 সর্বার্থে এবং কার্যত সুসম্বদ্ধ আলোক উৎস। D সন্ধানীতে আগত রশ্মিদ্বয়ের পথ পার্থক্য হবে $2d\cos\theta$ যেখানে θ হল অক্ষের সঙ্গে রশ্মিদ্বয়ের কোণ। অর্থাৎ রশ্মিদ্বয়ের মধ্যে দশা পার্থক্য $= \frac{2\pi}{\lambda} \times 2d\cos\theta$। লক্ষ্য করা যেতে পারে যে M_2 থেকে আগত আলোক তরঙ্গ পূর্বেই রশ্মি বিভাজকের অভ্যন্তরে প্রতিফলিত হয়েছে এবং M'_1 থেকে আগত আলোক তরঙ্গ তাতে বহিস্থভাবে প্রতিফলিত হয়। ফলে তাদের মধ্যে একটি অতিরিক্ত π দশা পার্থক্য ঘটে। তাই চরম ব্যতিচারের জন্য আমরা লিখতে পারি

$$\frac{2\pi}{\lambda} \times 2d\cos\theta - \pi = 2\pi m\lambda \qquad m = 0, 1, 2$$

$$\Rightarrow 2d\cos\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad .... \quad (5.9)$$

এখন কোন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে যদি চরম ব্যতিচার ঘটার এই শর্ত S' এর এই বিশেষ অবস্থানে সত্য হয় তবে S" S' ব্যাসার্ধের পরিধির উপর যেকোন বিন্দু উৎসের ক্ষেত্রেও তা সত্য হবে।

লক্ষণীয় যে S" সন্ধানী D এর অক্ষের উপর অবস্থিত। অতএব এই অক্ষকে কেন্দ্র করে একটি বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশা গড়ে উঠবে। যদি সন্ধানীর অবস্থানে চোখ রাখা যায়, তবে চক্ষুলেন্সের অক্ষকে ঘিরে এই ব্যতিচার নকশা দৃশ্যমান হবে। অবশ্য এই বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশায় উজ্জ্বল বা অন্ধকার বৃত্তের সংখ্যা খুবই কম হবে, কারণ উৎসের অতি নগণ্য অংশ থেকেই আলোক কেবল অক্ষি-উন্মেষ অতিক্রম করবে। যদি রশ্মি বিভাজকের নিকট একটি বড় উন্মেষের লেন্স ব্যবহার করা যায় তবে পর্যবেক্ষক সমগ্র ব্যতিচার নকশাটি দেখতে সক্ষম হবেন।

অপর পক্ষে অবম ব্যতিচারের জন্য অর্থাৎ বিনাশী ব্যতিচারের জন্য

$$2d\cos\theta = m\lambda \tag{5.16}$$

লক্ষ্য করুন, যখন $\theta = 0^0$, $m = \dfrac{2d}{\lambda}$ (5.17)

আমাদের মনে রাখতে হবে যে সমীকরণ (5.16) বা (5.17) অনুসারে দর্পণদ্বয়ের দূরত্ব d ও আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ -এর নির্দিষ্ট মানের জন্য $\theta = 0^0$ হলে m-এর মান সর্বোচ্চ হবে। তবে বিশেষ ক্ষেত্রেই অবম ব্যতিচারের শর্তটি পূর্ণ হলে কেন্দ্রস্থ ফ্রিঞ্জটি অন্ধকার হবে এবং m-এর ক্রমও সর্বোচ্চ হবে। সাধারণ ভাবে কেন্দ্রীয় অঞ্চলটিতে চরম বা অবম ব্যতিচারের মধ্যে কোনটিরই শর্ত পূরণ নাও হতে পারে।

প্রায়-একবর্ণী (Quasimonnochromatic) আলোকে কোন ব্যতিচার নকশা গঠিত হয় বহুসংখ্যক পর্যায়ক্রমে উজ্জ্বল ও অন্ধকার বলয়ের সমন্বয়ে। কোন একটি বিশেষ বলয় হবে একটি নির্দিষ্ট m-ক্রমের। দর্পণ M_2-কে M_1'-এর দিকে সরাতে থাকলে হ্রাস পায় এবং একই M-ক্রমের ক্ষেত্রে সমীকরণ (5.10) অনুসারে $\cos\theta$ বৃদ্ধি পায় অর্থাৎ "θ" হ্রাস পাবে। d-এর হ্রাসের পরিমাণ যখনই $\lambda/2$ হয়, তখনই সর্বোচ্চ ক্রমের ফ্রিঞ্জটি কেন্দ্রে অদৃশ্য হয়। এইভাবে বলয়গুলি কেন্দ্রের দিকে সঙ্কুচিত হয় এবং একটি একটি করে ফ্রিঞ্জ যখন কেন্দ্রে অদৃশ্য হয়, তখন অবশিষ্ট বলয়গুলির প্রত্যেকটিই চওড়া হয় যে পর্যন্ত না কয়েকটি মাত্র ফ্রিঞ্জ সমস্ত পর্দা জুড়ে থাকে। তখন পুরো দৃষ্টি ক্ষেত্রে কেবল কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটি ছড়িয়ে পড়বে। রশ্মিবিভাজকে প্রতিফলনের দরুন যে π দশা পরিবর্তন ঘটে তারই ফলে সমস্ত পর্দায় পাওয়া যাবে অবম ব্যতিচার। অপর পক্ষে M_2 দর্পণকে সরিয়ে M_1 এর পশ্চাতে নিয়ে যেতে থাকলে আবার দৃষ্টিক্ষেত্রের কেন্দ্রে ফ্রিঞ্জগুলি পুনরায় একে একে দৃশ্যমান হবে। এবং d বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে বলয়গুলিও বাইরের দিকে ছড়িয়ে পড়তে থাকবে।

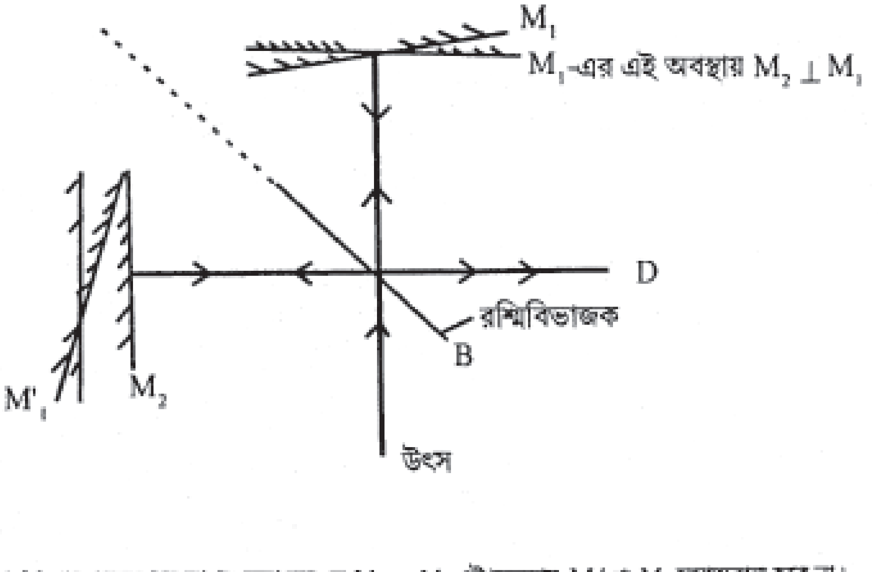
বিভিন্ন আকৃতির ব্যতিচার নকশা

ইতিমধ্যে আমরা দেখেছি যে মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারে বৃত্তাকার ব্যতিচার নকশা গঠিত হয়। এই নকশা গঠনের 'মূলশর্ত' কি? আমরা চিত্র 5-18-এ কীভাবে বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশা গঠিত হয় তা ব্যাখ্যা করেছি। M_1 দর্পণের অসদবিম্ব M_1' এবং দর্পণ M_2 সমান্তরাল অর্থাৎ দুই দর্পণের মধ্যে যেন একটি সমান্তরাল ঝিল্লি বর্তমান। অর্থাৎ আমরা ভাবতে পারি সমান্তরাল ঝিল্লিতে আলোক রশ্মির অভিলম্ব আপতনের জন্য এই বৃত্তীয় ব্যতিচার

নকশা পাওয়া গেছে। এক্ষেত্রে আমাদের হাইডিংগার ব্যতিচার নকশার কথা অবশ্যই মনে পড়বে। প্রশ্ন হল, কীভাবে দর্পণদ্বয় স্থাপিত হলে তাদের প্রতিবিম্বের অবস্থান M_2, M_1' পরস্পরের সমান্তরাল হবে? মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারে দর্পণদ্বয়কে অবশ্যই পরস্পরের অভিলম্বে স্থাপন করতে হবে। এটাই হ'ল বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশা পাওয়ার মূলশর্ত।

চিত্র 5.18-এ সম্ভাব্য একটি ক্ষেত্রে যেখানে আমরা শুধু সমান্তরাল নির্গত জোড়া রশ্মিগুলির জোড়াগুলির কথাই বিবেচনা করেছি। এই রশ্মিগুলি যেহেতু যথার্থই পরস্পর মিলিত হয় না, সেইজন্য এরা কোন না কোন ধরনের অভিসারী লেন্স ছাড়া প্রতিবিম্ব গঠন করতে পারে না। বাস্তবিক পক্ষে অসীম দূরত্বে ফোকাস করা পর্যবেক্ষকের চোখও এ ধরনের লেন্স হিসাবে কার্যকরী হবে। অসীমে অবস্থিত এ ধরণের সমনতির ফ্রিঞ্জকে কখনও হাইডিংগার ফ্রিঞ্জ হিসাবেও উল্লেখ করা হয়।

আমরা ইতিপূর্বে ফিজো ফ্রিঞ্জ বা ফিজো ব্যতিচার নকশা কীভাবে গঠিত হয় জেনেছি। যদি ঝিল্লির বেধ সর্বত্র সুষম না হয় তবে এই ঝিল্লিতে ফিজো ব্যতিচার নকশা গঠিত হয়, সমবেধের সঞ্চার পথ ধরে এই স্থানীয় নকশা উৎপন্ন হওয়ায় এর আকৃতি বিচিত্র ধরণের হতে পারে। আমরা দেখেছি কীলকাকার উৎপন্নকারী সমতল কাচ দুটি যদি যথার্থই মিলিত হয় অথবা প্রকৃতই মিলিত না হলে তাদের তল দুটি পরিবর্ধিত করলে মিলিত হয় এক প্রান্তে, কোন সরলরেখায় মিলিত হয় বলে মনে হয়, তবে ঝিল্লিতে সমবেধের সঞ্চারপথ হয় প্রান্তের ঐ সরল রেখারই সমান্তরাল এবং ব্যতিচার নকশা হবে সমান্তরাল সরল রেখার উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জের সমাহার। তাই বলা যায় যদি M_2 ও M_1' দর্পণদ্বয় পরস্পরের সঙ্গে অতিক্ষুদ্র কোণে আনত থাকে তবে তাদের মধ্যবর্তী ঝিল্লি হবে কীলকাকার। এরূপ ক্ষেত্রে এই কীলকাকার "ঝিল্লি"তে সমান্তরাল সরল রৈখিক ব্যতিচার নকশা পাওয়া যাবে। তাহ'লে প্রশ্ন হ'ল, কী রূপে M_2 ও M_1' এর মধ্যে একটি ক্ষুদ্র কোণ সৃষ্টি করা যায়? অবশ্যই যদি M_1কে M_2 এর অভিলম্বে না রেখে একটু আবর্তিত করা হয় তবে চিত্র 5.19 এ প্রদর্শিত অবস্থায় থাকবে M_2 ও M_1' এই অবস্থায় M_2 দর্পণের পশ্চাতে দৃষ্টি নিবদ্ধ করলে স্থানীয় ব্যতিচার নকশা দৃষ্টিগোচর হবে।



চিত্র 5.19 ঃ M_1কে এমনভাবে স্থাপন করা হল যে $M_2 \perp M_1$ এই অবস্থায় M_1' ও M_2 সমান্তরাল হবে না।

লক্ষণীয় যে M_2 ও M_1 এর তল উল্লম্ব রেখে তাদের যেমন পরস্পর আনত করা যায়, তেমনি তাদের তলদ্বয়কে উল্লম্ব সাপেক্ষেও আনত করা যায়। যথাযথভাবে M_1 ও M_2, দর্পণ দুটির দিগ্‌বিন্যাস (Orientation) পরিবর্তন করে সরলরৈখিক বৃত্তাকার, উপবৃত্তাকার, পরাবৃত্তাকার ইত্যাদি বিভিন্ন প্রকার ফ্রিঞ্জ উৎপন্ন করা যেতে পারে।

স্থানীকৃত ফ্রিঞ্জ (Localized fringes)

যখন d খুব ছোট তখন দর্পণ দুটির একটিকে ধরা যাক্ একটু কাৎ করা হল এমনভাবে যাতে M_1' ও M_2 পরস্পরের সঙ্গে ক্ষুদ্র কোণে আনত থাকে। এই অবস্থায় যে ফ্রিঞ্জগুলি পাওয়া যাবে তারা হবে পাতলা কীলকে যেমন ফ্রিঞ্জ পাওয়া যায় তেমনি। বিস্তৃত আকারের উৎসের বেলায় ফ্রিঞ্জগুলির আকার হবে সোজা এবং M_1' ও M_2 -এর প্রতিচ্ছেদী রেখার (intersecting line) সমান্তরাল এবং কীলকের সমতলে স্থানীকৃত। d বৃদ্ধি করলে ফ্রিঞ্জগুলি কীলকের পাতলা প্রান্তের দিকে সরতে থাকে। আরেকটি প্রভাব হচ্ছে θ-এর সঙ্গে পথ পার্থক্যের পরিবর্তনের প্রবর্তন। এর ফলে ফ্রিঞ্জগুলি বাঁকতে সুরু করে। ফ্রিঞ্জগুলি যেহেতু সুষম আলোকীয় পথ পার্থক্যের রেখা এবং যেহেতু θ-এর বৃহত্তর মানের জন্য পথ পার্থক্য ক্ষুদ্রতর হয়, সেইজন্যই ফ্রিঞ্জগুলি দৃষ্টিক্ষেত্রের বহিরাংশে (outer part) কীলকের অপেক্ষাকৃত বেশী বেধের দিকে বাঁকবে। চিত্র (5.20)-এ M_1' ও M_2 প্রতিচ্ছেদী রেখা AB খাড়া রেখা এবং দৃষ্টিক্ষেত্রের বামে; কাজেই ফ্রিঞ্জগুলি আঁকা হয়েছে কীলকের অপেক্ষাকৃত বেশী বেধের দিকে P& Q-তে যেখানে θ হচ্ছে সবচেয়ে বেশী এবং এরা, কীলকের অপেক্ষাকৃত বেশী বেধের দিকেই অবতল আকার নিয়েছে। M_1' ও M_2 প্রতিচ্ছেদী রেখার দিকে শূন্য ক্রমের যে ফ্রিঞ্জটি রয়েছে সেটিই হচ্ছে একমাত্র সঠিকভাবে সোজা।

বৃত্তীয় ব্যতিচার নকশার কৌণিক ব্যাসার্ধ

আমাদের নিশ্চয়ই মনে আছে যে বিনাশী বা অন্ধকার ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের শর্ত হল (সমীকরণ 5.16)

$$2d\cos\theta = m\lambda \tag{5.16}$$

অতএব উপরের সমীকরণ থেকে $\theta=0$ হলে, অর্থাৎ কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জ অন্ধকার হলে আমরা লিখতে পারব $2d = m_o\lambda$ এখানে কেন্দ্রীয় বৃত্তীয় নকশার কৌণিক ব্যাসার্ধ $\theta=0^\circ$ এবং ঐ ফ্রিঞ্জের ক্রমাঙ্ক M_0; অবশ্য এটা মনে রাখা প্রয়োজন যে কেন্দ্রীয় অঞ্চলটিতে চরম বা অবম কোন ফ্রিঞ্জই পাওয়া না-ও যেতে পারে। যেহেতু λ খুবই ক্ষুদ্র এবং d এর মান 10cm. হলেও m_0 এর মান হবে বিশাল, যেমন ~ 400000, যা গণনা করা জটিল। কিন্তু কেন্দ্রীয় অন্ধকার ফ্রিঞ্জ থেকে n-তম অন্ধকার ফ্রিঞ্জ গণণা করা যায় এবং তার সংশ্লিষ্ট কৌণিক ব্যাসার্ধও পরিমাপ করা সম্ভব। ধরুন পূর্ববর্তী অন্ধকার ফ্রিঞ্জগুলির ক্রমাংক m_0-1, m_0-2,........m_0-n.......ইত্যাদি। অতএব যদি সংশ্লিষ্ট কৌণিক ব্যাসার্ধগুলি যথাক্রমে $\theta_1, \theta_2, \ldots\ldots\ldots \theta_n \ldots\ldots$ ইত্যাদি হয় তবে (5.10) সমীকরণ থেকে লেখা যায়

$$\begin{aligned}
2d\cos\theta_1 &= (m_0-1)\lambda \\
2d\cos\theta_2 &= (m_0-2)\lambda \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots \\
2d\cos\theta_n &= (m_0-n)\lambda
\end{aligned} \tag{5.18}$$

সমীকরণ (5.12) ও (5.13) থেকে লেখা যায়

$$2d\left(1-\cos\theta_n\right)=n\lambda \tag{5.19}$$

যেহেতু কেন্দ্রীয় অন্ধকার ফ্রিঞ্জ ($\theta=0$)থেকে গণনা করলে সমীকরণ (5.14) n-তম অন্ধকার ফ্রিঞ্জের শর্ত জ্ঞাপন করে তাই (5.14) এবং (5.10) তুল্য সমীকরণ।

(5.14) সংখ্যক সমীকরণ থেকে পাই

$$4d\sin^2\frac{\theta_n}{2}=n\lambda$$

যদি θ_n ক্ষুদ্র হয় তবে $\sin\frac{\theta_n}{2}\simeq\frac{\theta_n}{2}$

$$\therefore 4d\left(\frac{\theta_n}{2}\right)^2=n\lambda$$

$$\theta_n=\sqrt{\frac{n\lambda}{d}} \tag{5.20}$$

এটা n-তম অন্ধকার বলয়ের কৌণিক ব্যাসার্ধ।

5.9 মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারের ব্যবহার

তিনটি উদ্দেশ্যে এই ইনটারফেরোমিটার ব্যবহার করা হয় : i) অতিসূক্ষ্মভাবে দৈর্ঘ্য নির্ণয় করতে ii) বর্ণালির সূক্ষ্মরেখার ব্যবধান এবং iii) মাধ্যমের প্রতিসরাংক নির্ণয়ে।

i) তরঙ্গ দৈর্ঘ্য নির্ণয়

আমরা জেনেছি যে মাইকেল্‌সন্ ইনটারফেরমিটারের দর্পণদ্বয়ের ব্যবধান d যদি $\frac{\lambda}{2}$ পরিমাণে পরিবর্তন করা যায় তবে পরবর্তী ক্রমের ফ্রিঞ্জ পাওয়া যায়। অতএব যে দর্পণটির সরণ ঘটানো যায় তাকে $\frac{\lambda}{2}$ পরিমাণে সরানো হলে, কোন নির্দিষ্ট বিন্দুর ফ্রিঞ্জটি পরবর্তী ফ্রিঞ্জের অবস্থানে সরে যাবে। যদি N সংখ্যক ফ্রিঞ্জ কেন্দ্রে অদৃশ্য হলে যে দর্পণটিকে সরানো যায় তাকে d_o দূরত্ব সরানো হয় তবে আমরা লিখতে পারি $2d=m\lambda$

$$2\left(d-d_o\right)=(m+N)\lambda$$

এখানে $\theta=0$ ধরা হয়েছে কারণ কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জটিকে দেখছি। এইভাবে পাওয়া যায়

$$2=d_o=N\lambda$$

$$\text{or}\quad \lambda=\frac{2d_o}{N} \qquad \text{...........(5.21b)}$$

এটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য মাপার একটি পদ্ধতি।

কোন একটি নির্দেশ বিন্দু (reference point) দিয়ে যে N সংখ্যক ফ্রিঞ্জ, অথবা তার অংশ সরে গেছে দর্পণটি Δx দূরত্ব অতিক্রম করার ফলে তাই কেবল অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে গণনা করতে হবে যদি Δx নির্ণয় করতে হয়। অর্থাৎ, $\Delta x = \dfrac{N\lambda}{2}$ ....(5.21a)

অতএব অত্যন্ত সূক্ষ্মভাবে এই দৈর্ঘ্য মাপা সম্ভব। এই পদ্ধতি অবলম্বন করে মাইকেলসন নির্ণয় করেছিলেন একপ্রমাণ মিটার (Standard meter) কত লাল ক্যাডমিয়াম তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সমান।

ii) বর্ণালির সূক্ষ্ম রেখার তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ব্যবধান নির্ণয়

আমরা সমীকরণ $2d\cos\theta = n\lambda$ থেকে বুঝতে পারি যে $d \approx 0$ হলে $n\lambda = 0$ হবে, অর্থাৎ $n\lambda_1 = m\ \lambda_2 = 0$ যেখানে λ_1 ও λ_2 দুটি ভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং n ও m ক্রমাংক, এর থেকে বলা যায় যে উভয় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য কোন ব্যতিচার নকশা গঠন করবে না। কিন্তু ধীরে ধীরে d বৃদ্ধি করতে থাকলে λ_1 ও λ_2-এর ব্যতিচার নকশা প্রকাশ পাবে। ধরা যাক d এর কোন একটা মানের জন্য λ_1-এর অন্ধকার বলয় λ_2-এর উজ্জ্বল বলয়ের উপর গঠিত হয়। এই অবস্থায় ব্যতিচার নকশা খুবই অস্পষ্ট হবে।

ধরা যাক λ_1, এর n-তম অন্ধকার বলয় এবং λ_2-এর m-তম উজ্জ্বল বলয় যখন পরস্পরের উপর সমপাতিত হয় তখন দর্পণদ্বয়ের দূরত্ব d_1

$$2d_1 = n\lambda_1 = (2m+1)\frac{\lambda_2}{2} \qquad \text{............(i)}$$

এর পর d আবার বৃদ্ধি করতে থাকলে দৃষ্টি ক্ষেত্রে সুস্পষ্ট λ_1 ও λ_2 এর ব্যতিচার নকশা গঠিত হবে। d আরো বৃদ্ধি করলে আবার ব্যতিচার নকশা খুবই অস্পষ্ট হবে যখন λ_1 এর অন্ধকার বলয়ের উপর λ_2 এর উজ্জ্বল বলয় পুনরায় সমপাতিত হবে। ধরা যাক d এর এই পরিবর্তন কালে λ_1 এর P সংখ্যক অন্ধকার বলয় কেন্দ্রে গঠিত হয়েছে এবং λ_2 এর P+1 সংখ্যক উজ্জ্বল বলয় গঠিত হয়েছে। যদি এই অবস্থায় d এর মান d_2 হয় তবে

$$2d_2 = \frac{\lambda_2}{2}(n+p)\lambda_1 = \left[2(m+p+1)+1\right]\frac{\lambda_2}{2} \qquad \text{..........(ii)}$$

i) এবং ii) থেকে

$$2(d_2 - d_1) = \frac{\lambda_2}{2}P\lambda_1 = 2(p+1)\ \frac{\lambda_2}{2}$$

ধরা যাক d_2-$d_1 = \Delta x$

$$\therefore 2\Delta x = P\lambda_1 = (P+1)\lambda_2$$

$$\therefore p = \frac{2\Delta x}{\lambda_1}; P+1 = \frac{2\Delta x}{\lambda_2}$$

$$\therefore 2\Delta x\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = 1$$

$$\therefore \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\Delta x} = \frac{\lambda^2}{2\Delta x} \qquad \text{.........(5.16)}$$

যেখানে $\lambda_1 \approx \lambda_2 = \lambda =$ গড় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য।

সাধারণ স্পেক্ট্রোমিটার দ্বারা λ নির্ণয় করা যায়। Δx পরিমাপ করা যায় দর্পণে যুক্ত মাইক্রোমিটার দ্বারা। অতএব পরপর দুবার ব্যতিচার নকশার অবলুপ্তির জন্য প্রয়োজনীয় Δx পরিমাপ করে $\lambda_1 - \lambda_2$ নির্ণয় করা যায়।

iii) প্রতিসরাংক নির্ণয়

যে মাধ্যমের প্রতিসরাংক পরিমাপ করতে হবে তেমন মাধ্যমের খুবই পাতলা পাতকে যদি কোন দর্পণে আপতিত রশ্মির পথে রাখা যায় তবে দুই রশ্মির মধ্যে একটি অতিরিক্ত পথ পার্থক্য সৃষ্টি হবে। ফলে উৎপন্ন ব্যতিচার নকশার সরণ ঘটবে। এ ক্ষেত্রে সাদা আলো ব্যবহার করা হয় এবং দর্পণদ্বয়ের মধ্যে নতি সৃষ্টি করে সরলরৈখিক ব্যতিচার নকশা গঠন করা হয়। এই নকশায় বিভিন্ন বর্ণের ব্যতিচার রেখার সঙ্গে একটা সাদা রেখাও থাকবে। কোন একটা রশ্মির পথে যদি পাতলা পাতটি স্থাপন করা হয় তবে সাদা ফ্রিঞ্জের সরণ ঘটবে। প্রাথমিকভাবে যদি সাদা ফ্রিঞ্জকে দূরবীক্ষণের ক্রশ-তারের উপরে রাখা থাকে, পাতলা পাত স্থাপনের পর তা ক্রশ-তার থেকে সরে যায়। এবার চলনক্ষম দর্পণকে সরিয়ে d এর পরিবর্তন ঘটিয়ে আবার সাদা ফ্রিঞ্জকে ক্রশতারের উপরে আনা যায়।

ধরা যাক পাতলা পাতের বেধ t এবং প্রতিসরাংক n ফলে অতিরিক্ত পথ পার্থক্য হবে $2(n-1)t$ [ধরা যাক মূল পথ = ℓ, বর্ধিত পথ = $\ell - t + nt$. তাই অতিরিক্ত পথ = $(\ell - t + nt) - \ell = nt - t = (n-1)t$. যেহেতু আলোকরশ্মি পাতের মধ্য দিয়ে দুবার যাতায়াত করে তাই অতিরিক্ত পথ পার্থক্য $2t(n-1)$.] M_2 দর্পণকে x সরালে যদি সাদা ফ্রিঞ্জ আবার ক্রশ তারে ফিরে আসে তবে $2x = 2t(n-1)$

বা $x = t(n-1)$

যদি t জানা থাকে তবে x পরিমাপ করে n নির্ণয় করা যায় অথবা যদি n জানা থাকে তবে t নির্ণয় করা যায়।

অনুশীলনী- 3

মাইকেলসন ইনটারফেরোমিটারের দর্পণ দ্বয়ের দূরত্ব হ্রাস করতে থাকলে ব্যতিচার নকশার উচ্চতম ক্রমের বলয় অবলুপ্ত হতে থাকে এবং একই সময়ে অবশিষ্ট বলয়গুলির বেধ বৃদ্ধি পেতে থাকে। এর কারণ কি?

5.10 সারাংশ

* যদি আলোক তরঙ্গ ঘনতর মাধ্যমের তল থেকে প্রতিফলিত হয় তবে তার π দশা পরিবর্তন ঘটে।
* অভিলম্ব আপতনের জন্য ব্যতিচার শর্ত ঃ

i) চরম ব্যতিচার $2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0,1,2..........$

ii) অবম ব্যতিচার $2nd = m\lambda \qquad m = 1,2,3..........$

n = ঝিল্লি মাধ্যমের প্রতিসরাংক

* তির্যক আপতনের জন্য ব্যতিচার শর্ত :

চরম ব্যতিচার $2nd\cos\theta_t = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0,1,2..........$

অবম ব্যতিচার $2nd\cos\theta_t = m\lambda \quad m = 1,2,3..........$

* যদি সুষম বেধের ঝিল্লি হয় তবে অবম ও চরম ব্যতিচার θ_t এর উপর নির্ভর করে এবং এই জন্য এই ব্যতিচার নকশাকে বলে সমনতির ব্যতিচার নকশা। কিন্তু θ_t ধ্রুবক হলে ব্যতিচার নির্ভর করে ঝিল্লির বেধ d এর উপর। তখন ব্যতিচার নকশাকে বলে সমবেধের ব্যতিচার নকশা।

* নিউটন বলয় গঠিত হলে m-ক্রমের উজ্জ্বল বলয়ের ব্যাসার্ধ r_m হবে

$$r_m = \left[\left(\frac{(2m+1)R\lambda}{2n}\right)\right]^{1/2}$$

R = লেন্সের ব্যাসার্ধ, n = ঝিল্লির মাধ্যমের প্রতিসরাংক।

* মাইকেল্সন্ ইনটারফেরোমিটারে যদি দর্পণদ্বয়ের (M_1, M_2) তল পরস্পর অভিলম্ব হয় অর্থাৎ যখন M_1',ও M_2 এর তলদ্বয় সমান্তরাল হয় তখন বলয়াকৃতির ব্যতিচার নকশা গঠিত হয়।

* M_1',ও M_2 এর মধ্যে কীলকাকৃতির ঝিল্লি গঠিত হলে তলদ্বয়ের নতির বিভিন্নতা অনুসারে রৈখিক, উপবৃত্তাকার ইত্যাদি ব্যতিচার নকশা দৃষ্ট হয়।

* মাইকেল্সন্ ইন্টারফেরোমিটার দ্বারা তরঙ্গ দৈর্ঘ্য, দুটি অতিনিকটবর্তী তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ব্যবধান এবং কোন মাধ্যমের প্রতিসরাংক অতি সূক্ষ্মভাবে পরিমাপ করা যায়।

5.11 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. একটি 1.5 প্রতিসরাংকের মসৃণ সমতল কাচফলকের উপর একটি 1.36 প্রতিসরাংকের তরলের পাতলা আস্তরণ ছড়ানো আছে। এই আস্তরণের উপর সাদা আলো ফেললে একটি রঙিন নকশা গঠিত হয়। যদি কোন অঞ্চল থেকে আস্তরণটি তীব্র লাল আলো প্রতিফলিত করে তবে ঐ অঞ্চলে আস্তরণের (ঝিল্লির) ন্যূনতম বেধ কত? লাল আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য =6330 Å।

2. একটি সাবান গোলা জলের ঝিল্লির 550×10^{-9} মি বেধের অঞ্চলে প্রতিসরাংক 1.34। এই ঝিল্লিকে সাদা আলোয় আলোকিত করা হল। কোন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো এই ঝিল্লি কর্তৃক প্রতিফলিত হবে না?

3. 1.5 প্রতিসরাংক বিশিষ্ট মাধ্যমের কীলকাকার ঝিল্লির উপর 5000 Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো লম্বভাবে আপতিত হল। যদি ফ্রিঞ্জ প্রস্থ 1/3 সেমি হয় তবে কীলক কোণ নির্ণয় করুন।

4. দুই খণ্ড মসৃণ ও সমতল কাচ পাতের এক প্রান্তে 7.618×10^{-5} মি পুরু পিজবোর্ড ঢুকিয়ে একটি কীলকাকার বায়ুর-ঝিল্লি গঠন করা হল। 5000 Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো কীলকাকার ঝিল্লির ওপর অভিলম্বভাবে আপতিত হলে তার ওপর কতগুলি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে ধরে নিতে হবে কীলকাকার ঝিল্লির অপর প্রান্তের বেধ শূন্য।

5. নিউটন বলয় পরীক্ষা ব্যবস্থায় ব্যবহৃত লেন্সের ব্যাসার্ধ যদি 4 মিটার হয় এবং যদি আপতিত আলোকে 5000 Å ও 5003 Å এর দুটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো থাকে তবে লেন্স ও ফলকের সংস্পর্শ বিন্দু থেকে কত দূরে বলয়গুলি অন্তর্হিত হবে?

6. মাইকেল্‌সন্‌ ইনটারফেরোমিটারের একটি দর্পণকে কিছুটা স্থানান্তরিত করায় দূরবীক্ষণের ক্রশ তারের উপর দিয়ে 1000 টি উজ্জ্বল-অনুজ্জ্বল ব্যতিচার নকশা অতিক্রম করে। যদি আলোক উৎসের আলোক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 6000 Å হয় তবে দর্পণটিকে কতটা সরানো হয়েছিল?

অনুশীলনী 1

m ক্রমের উজ্জ্বল নিউটন বলয়ের ব্যাসার্ধ r_m হলে

$$r_m^2 = (2m+1)\frac{R\lambda}{2n}$$

যেখানে R = লেন্সের ব্যাসার্ধ, n = ঝিল্লির প্রতিসরাংক

অন্য কোন মাধ্যমের ঝিল্লির প্রতিসরাংক n' হলে

$$r_m'^2 = (2m+1)\frac{R\lambda}{2n'}$$

$\therefore \frac{r_m'^2}{r_m^2} = \frac{n}{n'}$; অনুরূপভাবে m-ক্রমের অন্ধকার ফ্রিঞ্জের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়, $r_m'^2 = \frac{m\lambda R}{2n'}$ এবং $r_m^2 = \frac{m\lambda R}{2n}$ অর্থাৎ $\frac{r_m'^2}{r_m^2} = \frac{n}{n'}$ প্রদত্ত ক্ষেত্রে n=1, $n' = \frac{4}{3}$ ফলে উজ্জ্বল ও অন্ধকার উভয় ফ্রিঞ্জের ক্ষেত্রেই

$$\frac{r_m'}{r_m} = \sqrt{\frac{3}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$r_m' = \frac{\sqrt{3}}{2}\ r_m = 0.866 r_m$$

অর্থাৎ $\Delta r_m = r_m' - r_m = (0.866-1)r_m = -0.134 r_m$

$$\frac{\Delta r_m}{r_m} = -0.134$$

অর্থাৎ যে কোন বলয়ের ব্যাসার্ধ হ্রাসের হার = 0.139. [ঋণাত্মক চিহ্ন হ্রাস সূচিত করে।]

অনুশীলনী 2

চিত্র 5-17 দেখুন। B রশ্মিবিভাজকে M_1 এর প্রতিবিম্ব M'_1 অতএব $OM_1 = OM'_1$ অতএব M_1 ও M_2 এর দূরত্বের ব্যবধান d= $M_2M'_1$ রশ্মি বিভাজকে S এর প্রতিবিম্ব S' আবার M_2 ও M'_1 -S' এর প্রতিবিম্বদ্বয় S_2 ও S_1 প্রমাণ

করতে হবে $S_2 S_1 = 2d$. এখন

$$S'S_2 = 2M_2S_2 \text{ এবং } S'S_1 = 2M'_1S_1$$

$$\therefore S'S_1 - S'S_2 = 2(M'_1S_1 - M_2S_2)$$

$$\Rightarrow S_1S_2 = 2(S'M'_1 - S'M_2) = 2M_2M'_1 = 2d$$

অনুশীলনী 3

ব্যতিচারে বিপরীতদশার রশ্মিদ্বয়ের লব্ধি শূন্য হলেও আলোক শক্তি, শূন্য হয় না। এই শক্তি উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জে সঞ্চারিত হয়। মাইকেল্সন ইন্টারফেরোমিটারে যখন কেন্দ্রে উজ্জ্বল ব্যতিচার বলয়ের অবলুপ্তি ঘটে তখন তার আলোক শক্তি বাকি উজ্জ্বল বলয়ে সঞ্চারিত হয়। এই জন্য উজ্জ্বল ব্যতিচার বলয়ের বেধ বৃদ্ধি ঘটে।

5.12 উত্তরমালা

1. এখানে তরল ঝিল্লির প্রতিসরাংক n_ℓ=1.36, কাচের প্রতিসরাংক $n_g = 1.5$ এবং বায়ুর প্রতিসরাংক $n_a = 1.0$

$\therefore n_a < n_\ell < n_g$

অতএব আলোক রশ্মি উভয় তলে প্রতিফলনে π দশা এই জন্য উজ্জ্বল ব্যতিচারের শর্ত

$2nd = m\lambda$

$\Rightarrow d = \dfrac{m\lambda}{2n}, m = 1,2........$

ন্যূনতম ঝিল্লির বেধ তখনই পাওয়া যাবে যখন m =1; এক্ষেত্রে $d = \dfrac{\lambda}{2n} = \dfrac{6330}{2\times 1.36}\text{Å} = 2327\text{Å}$

2. সাবানে জলের ঝিল্লির প্রতিসরাংক $n_f = 1.34$ অতএব $n_g < n_f > n_a$. অতএব দুই তলের প্রতিফলিত রশ্মিদ্বয়ের মধ্যে দশা পার্থক্য π হবে প্রতিফলনের জন্য।

যেহেতু কোন এক বিশেষ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো প্রতিফলিত হবে না, তাই দুই প্রতিফলিত রশ্মি বিনাশী ব্যতিচার ঘটাবে। এ জন্য শর্ত হল অন্ধকার ব্যতিচার

যেহেতু $2nd = m\lambda \;\therefore \lambda = \dfrac{2nd}{m}$, m= 1,2,3 ....

এখানে $2nd = 1.34\times550\times10^{-9}$ মি $= 1.34\times5500\,\text{Å} = 7370\,\text{Å}$

$\therefore m=1$ হলে $\lambda = 7370\,\text{Å}$ (লাল)

অতএব এই ঝিল্লি লাল আলো প্রতিফলিত করবে না।

3. সমীকরণ (5.7) থেকে, ফ্রিঞ্জ প্রস্থ

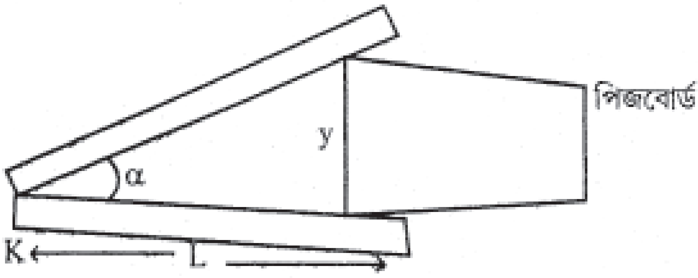
$$\Delta\ell = \frac{\lambda_F}{2\alpha} = \frac{\lambda_F}{2n\alpha}$$

λ_F = ঝিল্লিতে তরঙ্গদৈর্ঘ্য, $\alpha = 1$ ঝিল্লি কীলকের কোণ (রেডিয়ানে)

$$\therefore \alpha = \frac{\lambda}{2n\Delta\ell} = \frac{5000\times10^{-8}}{2\times\frac{1}{3}\times1\cdot5} = 5.0\times0^{-5}$$ রেডিয়ান

$$\frac{5\cdot1\times180\times60\times60}{\pi}\times10^{-5}$$ সে. = 10.52 সেকেন্ড

4. ধরা যাক পাতদ্বয়ের প্রত্যেকের দৈর্ঘ্য L. তাহাদের প্রান্তে y বেধের পিজবোর্ড প্রবেশ করালে কীলকাকার ঝিল্লি গঠিত হবে যার কোণ = α (রেডিয়ান) $\therefore \alpha = \frac{y}{L}$



চিত্র- 5.20

আবার প্রতিটি উজ্জ্বল ও অন্ধকার ফ্রিঞ্জের প্রস্থ $\Delta\ell$ হলে $\Delta\ell = \frac{\lambda}{2n\alpha} = \frac{\lambda L}{2ny}$. যদি মোট উজ্জ্বল অন্ধকার ফ্রিঞ্জের সংখ্যা p হয় তবে $\Delta\ell P = L$

$$\frac{P\lambda L}{2ny} = L \text{ বা, } p = \frac{2ny}{\lambda}$$

এখানে ঝিল্লি মাধ্যম বায়ু, $n = 1$

$$\therefore p = \frac{2\times7\cdot618\times10^{-5}}{5000\times10^{-10}} = \frac{2\times7\cdot618}{5}\times10^{2} = 308 \text{ টি}$$

অর্থাৎ উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ 154 টি।

5. যখন $\lambda_1 = 5000\ \mathring{A}$ এর উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ ও $\lambda_2 = 5003\ \mathring{A}$ এর অন্ধকার ফ্রিঞ্জ পরস্পরের উপর সমপাতিত হয় তখন ব্যতিচার নকশা অন্তর্হিত হয়। ধরা যাক লেন্স ও ফলকের মধ্যবর্তী ঝিল্লির বেধ যখন d তখন এরূপ ঘটে।

$$\therefore 2nd = m\lambda_1 = (2m+1)\frac{\lambda_2}{2}$$

যেখানে $n = 1$. $\therefore \frac{2d}{\lambda_1} = m \qquad \frac{4d}{\lambda_2} = 2m+1$

$$\therefore \frac{4d}{\lambda_2} - \frac{4d}{\lambda_1} = 1$$

$$\Rightarrow 4d = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2} \text{ বা } d = \frac{1}{4}\left(\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)$$

ধরা যাক সংস্পর্শ বিন্দু থেকে r দূরে ঝিল্লি বেধ = α. অতএব চিত্র 5.14 থেকে

$$R^2 = x^2 + (R-d)^2 = x^2 + R^2 + d^2 - 2Rd.$$

$$\therefore r^2 = 2Rd - d^2 \simeq 2Rd,\ R >> d.$$

$$\therefore r^2 = 2R \times \frac{1}{4}\left(\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)$$

$$r = \sqrt{\frac{R\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1-\lambda_2)}}$$

$$= \sqrt{\frac{400 \times 5000 \times 5003 \times 10^{-16}}{2 \times 3 \times 10^{-8}}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 5 \times 5003 \times 10^{-3}}{6}}$$

$$\sqrt{\frac{5003}{3} \times 10^{-2}} = 4.08 \text{ সে মি}$$

6. $\frac{\lambda}{2}$ পথপার্থক্য সৃষ্টি করে একটি ফ্রিঞ্জকে স্থানান্তরিত করা যায়। ধরা যাক Δx পথ পার্থক্য সৃষ্টি করলে N সংখ্যক ফ্রিঞ্জ সরবে। অতএব $\Delta x = N\frac{\lambda}{2} = 1000 \times \frac{6000 \times 10^{-8}}{2}$ সেমি

$$= 3 \times 10^{-2} \text{ সেমি} = .03 \text{ সেমি}$$

$$= 0.3 \text{মি মি.}$$

5.13 পুস্তক নির্দেশিকা

1. Optics - Ajoy Ghatak
2. Geo & physical optics -R.S. Longhurst
3. Optics - Hecht
4. Fundamentals of optics - Jenkins and white

একক 6 ❑ বহুরশ্মীয় ব্যতিচার (Multiple beam interference)

গঠন

6.1 প্রস্তাবনা

আপনারা ইতিমধ্যেই জেনেছেন যে দুটি সন্নিকটবর্তী সুসম্বদ্ধ আলোক উৎস থেকে নির্গত আলোক রশ্মিগুচ্ছ (beam) পরস্পরের উপর যেখানেই উপরিপাতিত হোক ব্যতিচারের ঘটনা ঘটবে। অবশ্য আলোকীয় পথ দৈর্ঘ্য যদি সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্যের ($c\Delta t$) চেয়ে কম হয়। আপনারা এও জেনেছেন যে সুসম্বদ্ধ আলোকরশ্মিগুচ্ছ দুই প্রকারে উৎপাদন করা হয় : (ক) তরঙ্গমুখ বিভাজন দ্বারা এবং (খ) তরঙ্গের বিস্তার বিভাজন দ্বারা। এই দুই পদ্ধতিতে ব্যতিচারের ঘটনাবলী নিয়ে পূর্ববর্তী এককে বিস্তারিত আলোচনা হয়েছে। সেখানে আমরা বিশেষভাবে যেটা লক্ষ্য করেছি তা হ'ল :উভয়ক্ষেত্রে ব্যতিচার ঘটে কেবলমাত্র দুটি সুসম্বদ্ধ আলোক রশ্মিগুচ্ছ বা আলোক তরঙ্গের উপরিপাতের

ফলে। কিন্তু আমাদের বর্তমান এককে আমরা বহু রশ্মিগুচ্ছের উপরিপাত থেকে উৎপন্ন ব্যতিচার সম্পর্কে আলোচনা করব। মূল বিষয়ে প্রবেশের পূর্বে আমরা কেবল বলব যে বহুরশ্মীয় ব্যতিচারও তরঙ্গ-বিস্তার বিভাজন পদ্ধতিতে উৎপন্ন হয়। কিরূপে তরঙ্গবিস্তারকে বিভাজিত করা হয় তা নিশ্চয়ই আপনাদের মনে আছে। একটি কাচের পাতের উপর আলোক তরঙ্গ আপতিত হলে একটা অংশ প্রতিফলিত হয় এবং বাকী অংশ পারগত (transmitted) হয়। ফলে উভয় অংশের তীব্রতা আপতিত আলোক তরঙ্গের তীব্রতা অপেক্ষা কম হয়। কিন্তু আমরা জানি যে আলোকের তীব্রতা তরঙ্গের বিস্তারের উপর নির্ভর করে। অতএব, বলা যায়, প্রতিফলিত ও পারগত আলোক তরঙ্গের বিস্তার আপতিত আলোক তরঙ্গের বিস্তার অপেক্ষা কম। যেন আপতিত আলোক তরঙ্গের বিস্তার বিভাজিত হয়ে এরূপ ঘটেছে। বহুরশ্মীয় ব্যতিচার পাওয়ার জন্য আমাদের কাজ হবে আপতিত তরঙ্গ বিস্তারকে একই প্রক্রিয়ায় বহুসংখ্যক তরঙ্গ বিস্তারে ভাগ করা। তবে একাজ করতে গিয়ে যে কথাটা মনে রাখতে হবে তা হল এই যে, এই বহু সংখ্যক তরঙ্গগুলির মধ্যে যেন সুসম্বদ্ধতা বজায় থাকে।

যথোপযুক্ত ব্যবস্থার মাধ্যমে কোন সমান্তরাল ফলকের উভয়তল থেকে নির্গত প্রতিফলিতও পারগত সমান্তরাল রশ্মিগুলির তীব্রতা পৃথকভাবে গণনা করা হবে এই এককের আলোচ্য বিষয়। ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপক প্রস্তুত ও তার ব্যবহারিক প্রয়োগ সম্পর্কেও এই এককে আলোচনা হবে। ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোন এবং ব্যতিচার পরিস্রাবক তাদের প্রয়োজনীয়তা, বিশেষ করে ব্যতিচার পরিস্রাবকের প্রস্তুত প্রণালী আপনারা এই এককে অধ্যয়ন করবেন। তাছাড়া ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপকের বিভেদন ক্ষমতার ধারণাটিও জানতে পারবেন এই একক অধ্যয়ন করে।

উদ্দেশ্য

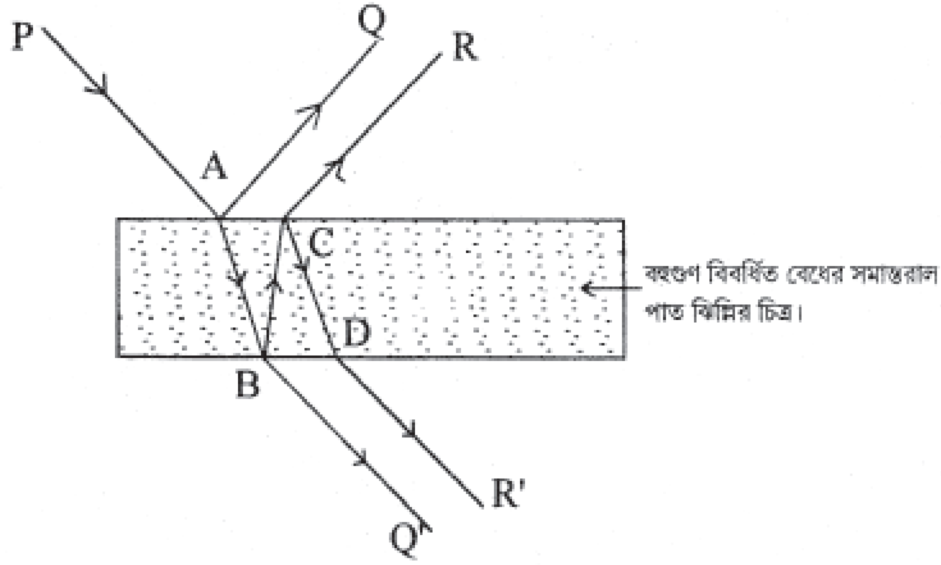
এই একক পাঠের পর আপনারা নিম্নের বিষয়গুলি সম্পর্কে অবহিত হবেন

- কোন সমতল সমান্তরাল ফলকে বহুরশ্মীয় ব্যতিচার কেমন ক'রে পাওয়া যাবে তা জানতে পারবেন, এবং প্রতিফলিত সমান্তরাল বহুরশ্মীয় ব্যতিচারে তীব্রতা গণনা করতে সমর্থ হবেন। একইভাবে পারগত সমান্তরাল বহুরশ্মীয় ব্যতিচারের তীব্রতা নির্ণয় করতে সমর্থ হবেন।
- ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপক এবং, ইটালোন কীভাবে তৈরি হয় এবং তাদের ব্যবহারিক প্রয়োগ বিষয়েও জানতে পারবেন।
- ফ্যাব্রি-পেরোর বর্ণীয় বিভেদন ক্ষমতা সম্পর্কে ধারণা করতে সক্ষম হবেন।
- ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের নীতির উপর ভিত্তি ক'রে ব্যতিচার পরিস্রাবক প্রস্তুত করতে সক্ষম হবেন।

6.2 বহুরশ্মীয় ব্যতিচার সংঘটন : সমতল সমান্তরাল ফলকে বারংবার প্রতিফলন ও পারগমন (transmissions)

আপনারা জানেন কিরূপে দুটি রশ্মিগুচ্ছ বিস্তার-বিভাজন পদ্ধতিতে উৎপাদন করা হয়। P (চিত্র 6.1) বিন্দু থেকে একটি তরঙ্গ, (যা একটি রশ্মি রেখা দ্বারা সূচিত করা হল) একটি সমতল সমান্তরাল ফলকের উপর

আপতিত হলে তার একাংশ প্রতিফলিত রশ্মি AQ এবং অপরাংশ প্রতিসৃত রশ্মি AB-তে বিভাজিত হবে। দ্বিতীয় তলে AB রশ্মি পুনরায় বিভাজিত হবে — একটা আভ্যন্তরীণ প্রতিফলিত রশ্মি BC এবং অপর একটি পারগত রশ্মি BQ′ পাওয়া যাবে। এক্ষেত্রে শর্ত হল এই যে কোন তলেই আলোক রশ্মি সম্পূর্ণরূপে প্রতিফলিত বা প্রতিসৃত হবে না।



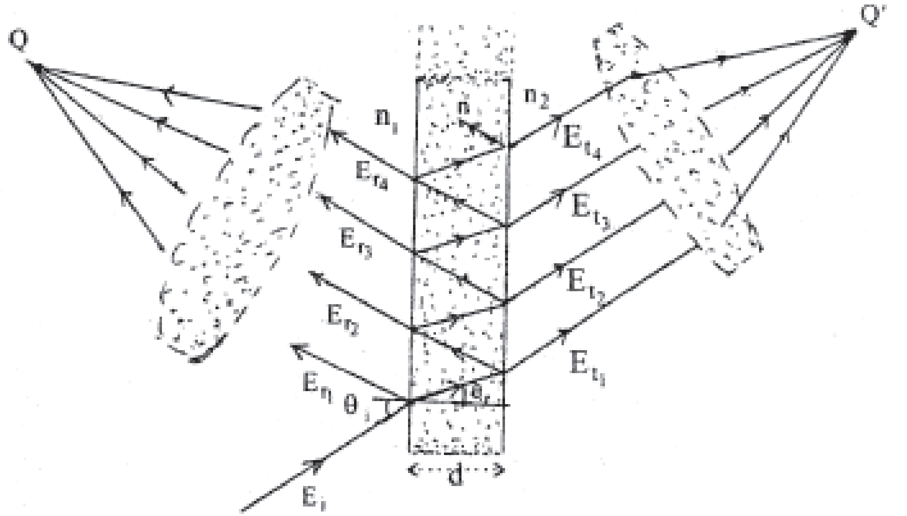
চিত্র 6.1 : তরঙ্গ-বিস্তার বিভাজন

অত:পর BC রশ্মিরও ফলকটির প্রথমতলে আভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ও প্রতিসরণ হবে। যদি প্রতিফলন গুনাংক ক্ষুদ্র হয় ও পারগমন (transmission coefficient) গুণাংক খুব ক্ষুদ্র না হয় তবে এরপর প্রতিফলিত ও পারগত রশ্মির তীব্রতা গণ্য করার মত থাকবে না। এইভাবে আমরা একই রশ্মিগুচ্ছের বিস্তার থেকে দুই জোড়া ক্ষুদ্রতর বিস্তারের রশ্মিগুচ্ছ পাচ্ছি : একজোড়া প্রথম তল থেকে প্রতিফলিত AQ ও পারগত CR রশ্মিগুচ্ছ এবং অন্যজোড়া বিপরীত তল থেকে পারগত BQ′ ও DR′ রশ্মিগুচ্ছদ্বয়। যদি এই প্রতিজোড়া রশ্মিগুচ্ছদ্বয়ের পরস্পরের মধ্যে পথ পার্থক্য সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্যের (coherence length) চেয়ে কম হয় তা হলে তাদের উপরিপাতের ফলে ব্যতিচার সৃষ্টি হয়। এই সম্পর্কে ইতিমধ্যে আপনারা জেনেছেন। কিন্তু যদি প্রতিফলন গুণাঙ্ক বেশি হয় এবং পারগমন গুণাংক খুব কম হয় তখন কী হবে? স্পষ্টতই আমরা তখন আরো বহুসংখ্যক প্রতিফলিত রশ্মিগুচ্ছ ও পারগত রশ্মিগুচ্ছ পাবো। এখন প্রশ্ন হল কীভাবে এই দুই গুণাংকের মান যথাক্রমে খুব বেশি ও খুব ক্ষুদ্র করা যাবে?

যদি কোন কাচ ফলকের উভয় পৃষ্ঠকে অত্যন্ত হালকাভাবে রূপা দ্বারা প্রলিপ্ত করা যায় তবে বিস্তার-প্রতিফলন গুণাংক r (Amplitude-reflection coefficients) 1-এর খুব কাছাকাছি হবে। তখন ফলকের অভ্যন্তরে কোন রশ্মি বহুবার প্রতিফলিত হবে। এই ঘটনাকে বলা হয় বারংবার প্রতিফলন। এর ফলে পারগত আলোক রশ্মিগুলির তীব্রতা ক্রমশ: হ্রাস পাবে। এই পারগত সমান্তরাল আলোক রশ্মিগুলিকে কোন লেন্সের সাহায্যে সংহত

করলে তার ফোকাসতলে ব্যতিচার নকশা পরিদৃষ্ট হবে। একেই বলে বহুরশ্মীয় ব্যতিচার। প্রকৃতপক্ষে r বেশি বলে বিস্তার পারগত গুণাংক t (Amplitude transmission coefficient) খুবই কম। ফলে প্রতিটি প্রতিফলনের সঙ্গে একটি করে রশ্মিগুচ্ছ পারগত। যেহেতু বারংবার প্রতিফলন ঘটে, তাই বহুসংখ্যক পারগত রশ্মিগুচ্ছ পাওয়া যায়। অত্যন্ত হালকাভাবে কোন কাচ ফলকের উপর ধাতুর প্রলেপ দেওয়ার কাজটি খুবই কঠিন। কিন্তু নির্বাত অবক্ষেপণ কৌশল (vaccum deposition techniques) আবিষ্কৃত হওয়ার পর এখন ব্যবসায়িক ভিত্তিতে আংশিক রৌপ্য প্রলিপ্ত দর্পণ পাওয়া যায়। এমন দর্পণের মধ্যদিয়ে বিপরীত পার্শ্বের দ্রব্যাদি যেমন দেখা যায় তেমনি আবার প্রতিবিম্বও দেখা যায়।

6.2.1 বহুরশ্মীয় ব্যতিচারে তীব্রতা বণ্টন (Intensity distribution in multiple-beam interference)



চিত্র 6.2 : বহুরশ্মীয় ব্যতিচার—

আমরা একটি সমতল সমান্তরাল ফলক বিবেচনা করি যার উভয় পার্শ্বের মাধ্যমের প্রতিসরাংক n_1 ও n_2; এক্ষেত্রে $n_1 = n_2$। ফলকের প্রতিসরাংক n। আপনারা জানেন যে কোন তরঙ্গতমুখের অভিলম্ব বরাবরই আলোক রশ্মি বিবেচনা করা হয়। অতএব চিত্রে (6.2) প্রদর্শিত আলোক রশ্মিকে তরঙ্গরূপেই বিবেচনা করতে হবে। এখানে ফলকের উভয়তলে আভ্যন্তরীণ প্রতিফলন গুণাংক r' এবং তার প্রথমতলের প্রতিফলন গুণাংক r এবং $r' = -r$ আলোক যখন পারিপার্শ্বিক মাধ্যম থেকে ফলকের মধ্যে প্রবেশ করে তখন তার পারগমন গুণাংক t এবং যখন ফলক ত্যাগ করে তখন তার পারগমন গুণাংক t', এবং $tt' = 1 - r^2$ অবশ্য যদি শোষণ শূন্য হয়। ধরা যাক্ E_i বিস্তারের একটি তরঙ্গ ফলকের উপর θ_i কোণে আপতিত হল। আমরা লক্ষ্য করি যে E_{r_1} ফলকের প্রথমতল থেকে প্রতিফলিত তরঙ্গ। কিন্তু E_{r_2}, E_{r_3}...... প্রভৃতি তরঙ্গগুলি প্রকৃতপক্ষে ফলকটির প্রথম তল থেকে পারিপার্শ্বিক মাধ্যমে পারগত তরঙ্গ এবং, তারা প্রতিফলিত তরঙ্গ E_{r_1}-এর সমান্তরাল। আবার $E_{t_1}, E_{t_2}, E_{t_3}$...... ইত্যাদি পারগত তরঙ্গ

গুলিও পাওয়া যায় ফলকটির দ্বিতীয় তল থেকে পারিপার্শ্বিক মাধ্যমে প্রতিসরণের দরুন। এখানে E_{r_1}, ফলকের উপরের তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মি; আর E_{r_2}, E_{r_3} ; .... ইত্যাদি ফলকের অভ্যন্তরে নিম্নতল থেকে প্রতিফলিত হওয়ার পরে উপরের তল থেকে পারিপার্শ্বিক মাধ্যমে প্রতিসৃত হয়ে E_{r_1}-এর সমান্তরাল পারগত হয়। তাই এই $E_{t_1}, E_{t_2}, E_{t_3}$...ইত্যাদি সমান্তরাল রশ্মিগুলিকে আমরা আলোচনার সময় প্রতিফলিত তরঙ্গ বা রশ্মিরূপেই উল্লেখ করব। এখন যেহেতু $|r'| = |r| \approx 1$, তাই ফলকটির অভ্যন্তরে প্রবিষ্ট তরঙ্গ বহুবার তার উভয় তলে প্রতিফলিত হবে এবং তখন দ্বিতীয়, তৃতীয়... ইত্যাদি তরঙ্গগুলির অর্থাৎ E_{r_2}, E_{r_3}... ইত্যাদি প্রতিফলিত তরঙ্গগুলির বিস্তার প্রায় সমান হবে এবং একটি বহুরশ্মীয় ব্যতিচার নকশা উৎপন্ন হবে। তাছাড়া, যদি ফলকটি যথেষ্ট লম্বা হয় এবং রশ্মিগুচ্ছের আপতন যথেষ্ট তির্যক না হয় তবে বহুসংখ্যক তরঙ্গ পাওয়া যাবে এবং ধরে নেওয়া যায় যে তাদের সংখ্যা অসীম। ঠিক একই কারণে ফলকের নিম্নতল থেকে প্রতিসৃত E_{t_1}, E_{t_2}... ইত্যাদি, তরঙ্গগুলির বিস্তারও প্রায় সমান হবে। কোন লেন্সের সাহায্যে এই প্রতিফলিত তরঙ্গগুলিকে Q বিন্দুতে অভিসৃত করলে প্রতিফলিত তরঙ্গসমূহের লব্ধি পাওয়া যাবে। কোন লেন্সের সহায়তায় পারগত তরঙ্গগুলিকেও অনুরূপভাবে Q′ বিন্দুতে অভিসৃত করলে ঐ বিন্দুটিতে পারগত তরঙ্গসমূহের লব্ধি পাওয়া যাবে। স্বভাবতঃই প্রশ্ন জাগে কীরূপে এই তরঙ্গগুলির লব্ধি নির্ণয় করা যাবে। এই প্রসঙ্গে আমরা জটিল রূপায়ণের (complex representation) ব্যবহার করব। যেমন পারিপার্শ্বিক মাধ্যম থেকে প্রাথমিক আগত তরঙ্গ E_i-কে আমরা লিখব,

$$E_i = E_0 e^{i\omega t} \qquad \text{...........(i)}$$

এখানে ফলকের উপর আপতিত তরঙ্গের বিস্তার হল E_0, কৌণিক কম্পাঙ্ক ω এবং যে কোন t সময়ে ωt তরঙ্গটির দশা। r যদি পারিপার্শ্বিক মাধ্যম থেকে ফলকের ওপরের তলে প্রতিফলন গুণাংক হয়, এবং r' হয় ফলকের অভ্যন্তরে উভয়তলে প্রতিফলন গুণাংক, আবার t যদি পারিপার্শ্বিক মাধ্যম থকে ফলকের মধ্যে প্রতিসৃত তরঙ্গের পারগমন গুণাংক হয় এবং t' হয় ফলকের মধ্য থেকে পারিপার্শ্বিক মাধ্যমে পারগমন গুণাংক তবে Q বিন্দুতে মিলিত প্রতিফলিত তরঙ্গগুলিকে আমরা লিখতে পারি

$$E_{r_1} = E_{0r} e^{i\omega t}$$

$$E_{r_2} = E_0 t r' t' e^{i(\omega t - \delta)}$$

$$E_{r_3} = E_0 t r'^3 t' e^{i(\omega t - 2\delta)}$$

$$\vdots$$

$$E_{r_p} = E_0 t r'^{(2p-3)} e^{i[\omega t - (p-1)\delta]}$$

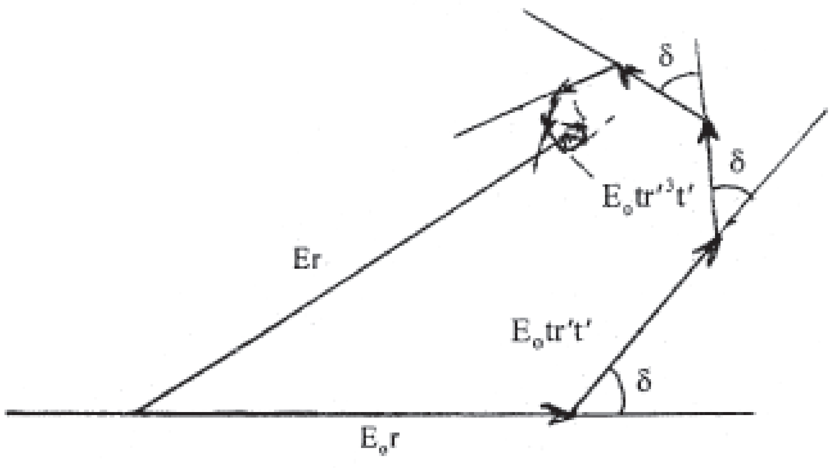
যেখানে $E_0 e^{i\omega t}$ হল আপতিত তরঙ্গ, E_{r_1} তরঙ্গটির বিস্তার $E_0 r$ হয় কারণ আপতিত তরঙ্গ E_i ফলকের উপরের তলে প্রতিফলনের দরুণ E_{r_1} তরঙ্গটি পাওয়া যায় এবং এখানে যেহেতু আপতিত তরঙ্গের বিস্তার E_0,

অতএব E_{r_1} তরঙ্গের বিস্তার হয় E_0r। আপতিত তরঙ্গ E_i ফলকের উপরের তলে প্রতিসৃত হওয়ার ফলে ফলকের অভ্যন্তরে বিস্তারটি হয় E_0t। এরপর তরঙ্গটি ফলকের নীচের তলে প্রতিফলিত হয় ফলে তরঙ্গটির বিস্তার হয় E_0tr'। তারপর ফলকের উপরের তলে প্রতিসৃত হলে তবেই E_{r_2} পাওয় যায় এবং E_{r_2}-এর বিস্তার হয় $E_0tr't'$। এভাবেই বিভিন্ন তরঙ্গের বিস্তার পাওয়া যায়। পাশাপাশি রশ্মিগুলির মধ্যে আলোকীয় পথ-দৈর্ঘ্য পার্থক্য থেকে যে দশার উদ্ভব, তারই থেকে আমরা পাই $\delta, 2\delta, \ldots\ldots, (p-1)\delta$ পদগুলি।

কারণ যে কোন দুটি পাশাপাশি প্রতিফলিত তরঙ্গের আলোকীয় পথ-পার্থক্য হল $\Delta = 2nd\cos\theta_r$ এবং, প্রতিষঙ্গী (corresponding) দশা-পার্থক্য $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(2nd\cos\theta_r) = k\Delta$। (চিত্র 6.2)। এখানে '$\theta_r$' হল আপতিত কোণ θ_i-এর প্রতিষঙ্গী ফলকের অভ্যন্তরে প্রতিসৃত কোণ। অর্থাৎ এখানে δ হল ফলকের অভ্যন্তরে যে অতিরিক্ত পথ অতিক্রম করতে হয় কোন রশ্মিকে তার পাশের রশ্মির তুলনায় তারই জন্য প্রবর্তিত দশা-পার্থক্য। এছাড়াও Q বিন্দুতে পৌঁছাতে গেলে প্রতিটি রশ্মিকেই একটি আলোকীয় দূরত্ব অতিক্রম করতে হয় যার জন্য একটি অতিরিক্ত দশারও উদ্ভব হয় এবং এর অবদানও থাকা উচিত মোট দশার নির্ণয়ে। কিন্তু যেহেতু Q বিন্দুতে পৌঁছাবার এই পথটি সকল রশ্মির ক্ষেত্রেই সমান হয়, তাই এই অতিরিক্ত দশা পার্থক্যের অবদান উহ্য রাখা হয়েছে, $E_{r_1}, E_{r_2}, E_{r_3}, \ldots$ ইত্যাদি তরঙ্গগুলির জটিল রূপায়ণের ক্ষেত্রে। অতএব Q বিন্দুতে উৎপন্ন লব্ধি প্রতিফলিত তরঙ্গ হবে

$$\begin{aligned} E_r &= E_{r_1} + E_{r_2} + E_{r_3} + \ldots + E_{r_p} \\ &= E_0 re^{i\omega t} + E_0 tr't'e^{i(\omega t-\delta)} + E_0 tr'^3 t'e^{i(\omega t-2\delta)} + \ldots \\ &\qquad + \ldots\ldots + E_0 t_{r'}^{(2p-3)} t'e^{i[\omega t-(p-1)\delta]} \end{aligned}$$

এই লব্ধির বিষয়টি চিত্রের সাহায্যেও অনুধাবন করা যায়। (চিত্র 6.3)



চিত্র 6.3 : ঘূর্ণি ভেক্টর (Phase) চিত্র

এই লব্ধির তরঙ্গটিকে আমরা লিখতে পারি

$$E_r = E_0 e^{i\omega t}\left\{r + r'tt'e^{-i\delta}\left[1 + r'^2 e^{-i\delta} + r'^4 e^{-2i\delta} + \ldots + r'^{2(p-2)} e^{-i(p-1)\delta}\right]\right\}$$

ধরা যাক $r'^2 e^{-i\delta} = x$

$$\therefore E_r = E_0 e^{i\omega t}\left\{r + r'tt'e^{-i\delta}\left[1 + x + x^2 + \ldots + x^{p-2}\right]\right\}$$

যদি $r'^2 e^{-i\delta} = x < 1$ হয়, এবং যদি বন্ধনীভুক্ত শ্রেণিটির পদের সংখ্যা অনন্ত হয় তবে শ্রেণীটি অভিসারী হয়। সেক্ষেত্রে লব্ধি তরঙ্গটিকে আমরা লিখতে পারি

$$E_r = E_0 e^{i\omega t}\left[r + r'tt'e^{-i\delta} \times \frac{1}{1-x}\right]$$

$$= E_0 e^{i\omega t}\left[r + \frac{r'tt'e^{-i\delta}}{1 - r'^2 e^{-i\delta}}\right] \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(6.1)$$

এখন (6.1) সমীকরণে শোষণ শূন্য হলে, কোন শক্তিই তরঙ্গগুলির বাইরে যাবে না। সেক্ষেত্রে $r' = -r$ এবং $tt' = 1 - r^2$ বসিয়ে পাওয়া যায়

$$E_r = E_0 e^{i\omega t}\left[r - \frac{r(1-r^2)e^{-i\delta}}{1 - r^2 e^{-i\delta}}\right]$$

$$= E_0 e^{i\omega t}\left\{\frac{r(1 - e^{-i\delta})}{1 - r^2 e^{-i\delta}}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(6.2)$$

প্রতিফলিত আলোক তরঙ্গগুলির দরুণ Q বিন্দুতে তীব্রতা, হল

$$I_r = \left|E_r^2\right|_2 = \left|E_r E_r^*\right|_2$$

অর্থাৎ $I_r = \dfrac{E_0^2 r^2}{2} \times \dfrac{(1 - e^{-i\delta})(1 - e^{+i\delta})}{(1 - r^2 e^{-i\delta})(1 - r^2 e^{+i\delta})}$

$$= \frac{E_0^2 r^2}{2} \times \frac{2 - (e^{+i\delta} + e^{-i\delta})}{1 + r^4 - r^2(e^{+i\delta} + e^{-i\delta})}$$

$$= \frac{E_0^2 r^2}{2} \times \frac{2 - 2\cos\delta}{1 + r^4 - 2r^2\cos\delta}$$

যদি আপতিত তরঙ্গের বিস্তার E_0 হয়, তবে আপতিত আলোক তীব্রতা $I_0 = \frac{E_0^2}{2}$ হয়। সেক্ষেত্রে প্রতিফলিত তরঙ্গগুলির লব্ধি তীব্রতা

$$I_r = I_0 \times \frac{2r^2(1-\cos\delta)}{(1+r^4)-2r^2\cos\delta} \qquad \text{.............(6.3)}$$

অপর পক্ষে Q' বিন্দুতে সংহত পারগত আলোকতরঙ্গগুলির লব্ধি পেতে [চিত্র 6.2] একইভাবে পারগত তরঙ্গ সমূহের বিস্তারগুলিকে আমরা লিখতে পারি

$$E_{t_1} = E_o tt' e^{i\omega t}$$

$$E_{t_2} = E_o tt' r'^2 e^{i(\omega t-\delta)}$$

$$E_{t_3} = E_o tt' r'^4 e^{i(\omega t-2\delta)}$$

$$E_{t_p} = E_o tt' r'^{2(p-1)} e^{i[\omega t-(p-1)\delta]}$$

অতএব Q' বিন্দুতে লব্ধি আলোক তরঙ্গ হবে

$$E_t = E_{t_1} + E_{t_2} + E_{t_3} + \ldots\ldots + E_{tp}$$

$$= E_o e^{i\omega t} \times \frac{tt'}{1-r'^2 e^{-i\delta}}$$

$$= E_o e^{i\omega t} \times \frac{1-r^2}{1-r^2 e^{-i\delta}} \qquad \text{.............(6.4)}$$

যদি পারগত আলোকের লব্ধির তীব্রতা I_t হয় তবে

$$I_t = \frac{\left|E_t^2\right|}{2} = \frac{E_t E_t^*}{2}$$

$$\therefore I_t = \frac{E_o^2}{2} \times \frac{\left(1-r^2\right)^2}{\left(1-r^2e^{-i\delta}\right)\left(1-r^2e^{+i\delta}\right)}$$

$$= I_o \times \frac{\left(1-r^2\right)^2}{\left(1+r^4\right)-2r^2\cos\delta} \qquad \text{.............(6.5)}$$

সমীকরণ (6.3) এবং (6.5) থেকে পাওয়া যায়

$$I_r + I_t = I_o \qquad \text{.............(6.6)}$$

সমীকরণ (6.6) থেকে আমরা জানতে পারছি যে প্রতিফলিত ও পারগত তরঙ্গের তীব্রতার সমষ্টি আপতিত তরঙ্গের তীব্রতার সমান। অর্থাৎ ফলক আপতিত আলোক তরঙ্গের কিছুমাত্র শক্তি শোষণ করছে না। আপনারা পূর্ববর্তী পাঠ থেকে জেনেছেন যে যখন এইরূপ শোষণ ঘটে না তখন $tt' = 1 - r^2$ হয়। আমরাও এই শর্ত প্রয়োগ করেই সমীকরণ (6.6) পাই।

এখন I_r ও I_t কোন শর্তে চরম ও অবম হবে? লক্ষ্য করুন যখন $\cos\delta = 1$ তখন সমীকরণ (6.5) এর হরের মান সর্বনিম্ন। এর অর্থ I_t এর মান চরম

$$\therefore (I_t)_{\text{চরম}} = I_o \times \frac{(1-r^2)^2}{1+r^4-2r^2} = I_o \qquad ....(6.7)$$

কিন্তু এই শর্তে সমীকরণ (6.3) থেকে পাই

$$I_r = 0$$

সমীকরণ (6.6) থেকেও বলা যায় $(I_t)_{\text{চরম}} = I_o$ হলে $I_r = 0$ হবে এবং এটাই হবে (I_r) এর অবম মান।

$$\therefore (I_r)_{\text{অবম}} = 0 \qquad ....(6.7a)$$

অপরপক্ষে যখন $\cos\delta = -1$, তখন সমীকরণ (6.5) এর হরের মান চরম, অর্থাৎ I_t এর মান হবে অবম।

$$\therefore (I_t)_{\text{অবম}} = I_o \times \frac{(1-r^2)}{(1+r^2)^2} \qquad ....(6.8)$$

এইরূপ ক্ষেত্রে I_r এর মান চরম হবে।

$$\therefore (I_r)_{\text{চরম}} = I_o - (I_t)_{\text{অবম}}$$

$$= I_o\left[1 - \frac{(1-r^2)^2}{(1+r^2)^2}\right]$$

$$= I_o \times \frac{4r^2}{(1+r^2)^2} \qquad ....(6.9)$$

অবশ্য $\cos\delta = -1$ যদি সমীকরণ (6.3)-এ বসানো যায় তা হলেও $(I_t)_{\text{চরম}}$-এর মান (6.9) সমীকরণের মতই পাওয়া যাবে।

অতএব আমরা লিখতে পারি

যখন $\delta = 2m\pi$, $m = 0,1,2\ldots$

$$I_t = (I_t)_{\text{চরম}} = I_o \qquad ....(6.7)$$

এবং $I_r = (I_r)_{\text{অবম}} = O$ ....(6.7a)

আবার যখন $\delta = (2m+1)\pi$, $m = 0,1,2\ldots$

$$I_t = (I_t)_{\text{অবম}} = I_O \times \left(\frac{1-r^2}{1+r^2}\right)^2 \qquad \text{................(6.8)}$$

এবং $$I_r = (I_r)_{\text{চরম}} = I_O \times \frac{4r^2}{(1+r^2)^2} \qquad \text{................(6.9)}$$

এই হল বহুরশ্মীয় প্রতিফলিত ও পারগত তরঙ্গ সমূহের মোট তীব্রতার চরম ও অবম মান। এখন আমাদের ঐ দুই শ্রেণীর বহুরশ্মীয় তীব্রতার সাধারণ অবস্থার ফলাফল বিশ্লেষণ করা দরকার। এ জন্য আমরা সমীকরণ (6.3) কে লিখতে পারি :

$$I_r = I_O \times \frac{4r^2\sin^2\frac{\delta}{2}}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

$$= I_o \times \frac{\left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2 \sin^2\frac{\delta}{2}}{1+\left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2 \sin^2\frac{\delta}{2}}$$

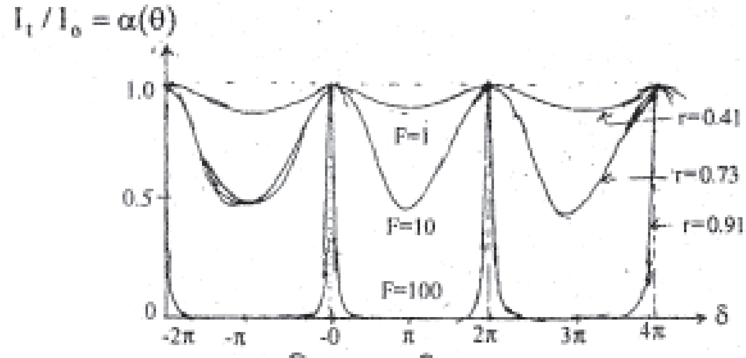
$$= I_o \times \frac{F\sin^2\frac{\delta}{2}}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}} \qquad \text{..................(6.10)}$$

যেখানে $$F = \left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2 \qquad \text{..................(6.11)}$$

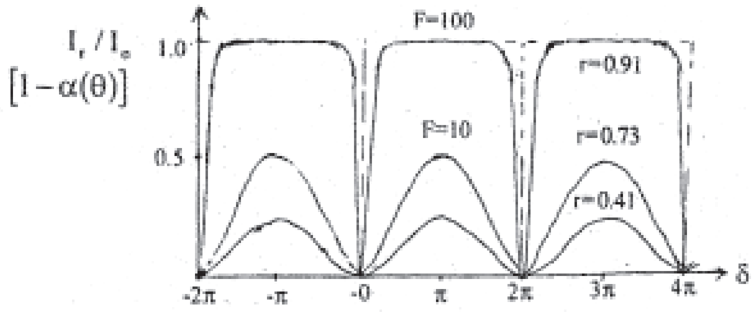
F কে বলে সূক্ষ্মতা গুণাঙ্ক (Coefficient of Finesse)। আবার সমীকরণ (6.5) কে আমরা লিখতে পারি (6.11) সমীকরণটি ব্যবহার করে

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}} = \left[1+F\sin^2\frac{\delta}{2}\right] \qquad \text{...................(6.12)}$$

$\left[1+F\sin^2\frac{\delta}{2}\right]^{-1} \equiv \alpha(\theta)$ এয়ারি অপেক্ষক (Airy function) বলেই পরিচিত। এয়ারি অপেক্ষক $= \frac{I_t}{I_o}$, অর্থাৎ পারগত আলোকে তীব্রতা ও আপতিত আলোকে তীব্রতার অনুপাতের বণ্টন δ-এর বিভিন্ন মানের জন্য কেমনটি হয় তাই $\alpha(\theta)$ বা এয়ারি অপেক্ষক প্রকাশ করে। চিত্র 6.4-এ F-এর বিভিন্ন মানের জন্য $\frac{I_t}{I_o}$ বনাম δ-এর লেখ গুলি অঙ্কিত হল। এয়ারি অপেক্ষকের পরিপূরক অপেক্ষক অর্থাৎ $[1-\alpha(\theta)]$, অর্থাৎ $\frac{I_r}{I_o}$ বনাম δ-এর লেখটিও দেখান হয়েছে F-এর বিভিন্ন মানের জন্য চিত্র 6.5-এ।



চিত্র 6.4 : এয়ারি অপেক্ষক।



চিত্র 6.5 : এয়ারি অপেক্ষকের পূরক $[1-\alpha(\theta)]$

চিত্র 6.4 থেকে স্পষ্টতই বলা যায় যে বহুরশ্মীয় ব্যতিচারে এয়ারি অপেক্ষকটির মান অর্থাৎ $\frac{I_T}{I_o}$-এর মান 1 হবে যখন $\delta = 2m\pi$, F এবং সেজন্য r-এর মান যা-ই হোক না। r-এর মান যখন 1-এর খুব কাছাকাছি হয় অর্থাৎ যখন $r \to 1$, তখন $\delta \neq 2m\pi$ হলে এয়ারি অপেক্ষক $\alpha(\theta)$ $\left(=\frac{I_T}{I_o}\right)$-এর মান খুবই কম হয় অর্থাৎ পারগত তীব্রতা প্রায় শূন্য মানের কাছাকাছি হয়। ফলে $\delta = 2m\pi$ বিন্দুগুলিকে কেন্দ্র করে সূচীমুখ তীক্ষ্ণ উজ্জ্বল অঞ্চলের উভয় পাশেই রয়েছে δ-এর অন্য সব মানের জন্য এক বিস্তৃত অন্ধকার অঞ্চল অবশ্যাই $r \to 1$ অর্থাৎ F-এর উচ্চ মানের ক্ষেত্রে। আমরা পূর্বেই দেখেছি যে নির্দিষ্ট আপতন কোণ θ_i-এর প্রতিসঙ্গী θ_r হল ফলকের অভ্যন্তরে প্রতিসরণ কোণ। θ_r-এর সঙ্গে দশা-পার্থক্য δ-এর সম্পর্কটি হচ্ছে

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(2nd\cos\theta_r)$$

তাই আমরা স্মরণে রাখব যে, এয়ারি অপেক্ষক α বাস্তবিক পক্ষে θ_r বা θ_i-এর অপেক্ষক, যেহেতু এয়ারি অপেক্ষক δ-এর উপর নির্ভরশীল অতএব এয়ারি অপেক্ষকের প্রতীকটি হল $\alpha(\theta)$। এয়ারি অপেক্ষক $\alpha(\theta)$-এর যে লেখ δ-এর সাপেক্ষে পাওয়া যায়, তার তীক্ষ্ণ উজ্জ্বল অংশই একটি বিশেষ δ এবং সেইজনাই একটি বিশেষ θ_i-এর প্রতিযঙ্গী। কোন সমতল-সমান্তরাল ফলকের ক্ষেত্রে পারগত আলোকে প্রাপ্ত ফ্রিঞ্জগুলি হবে প্রায় সম্পূর্ণ অন্ধকার পশ্চাৎপটে কতগুলি তীক্ষ্ণ উজ্জ্বল বলয়। পারগত আলোকে বহুরশ্মি ব্যাতিচারে তীব্রতা বণ্টনে যে তীক্ষ্ণতা লক্ষ্য

করা যায় তাকে বলা যায় শীর্ষগঠন অভিক্রিয়া (peaking effect)। ব্যবর্তন গ্রেটিং (diffraction grating) বিবেচনা করার সময়ও একই অভিক্রিয়া দেখা যাবে। সে সময় এই একই শীর্ষ গঠন অভিক্রিয়া স্পষ্টতই দেখতে পাব ব্যবর্তন নক্‌শাতেও। সুসম্বদ্ধ উৎসের সংখ্যা বৃদ্ধি পাওয়ার ফলেই ব্যতিচার নকশায় তার যে প্রভাব পড়ে তারই দরুণ এই অভিক্রিয়াটি সংঘটিত হয়।

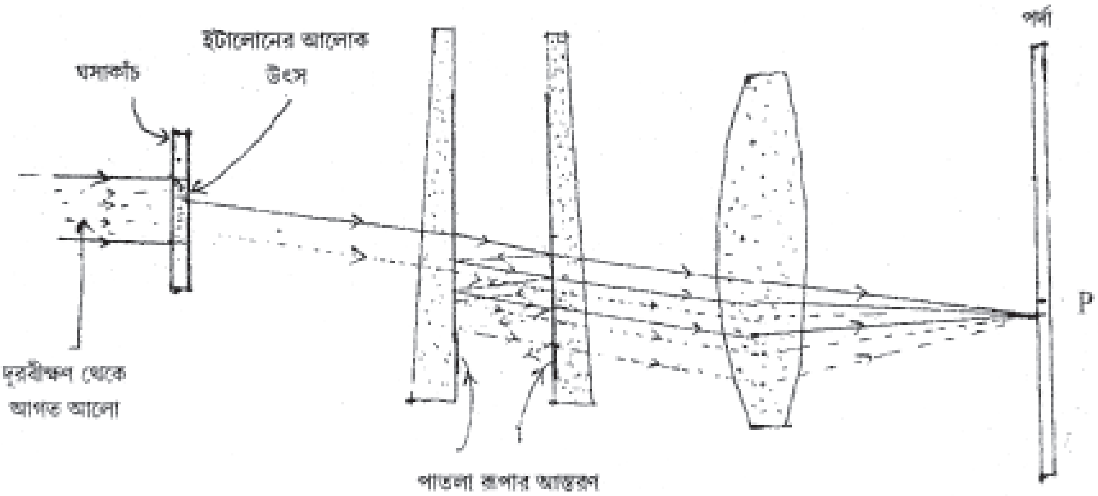
অনুশীলনী।

সূক্ষ্মতা গুণাংকের (coefficient of finesse) মান কীভাবে এয়ারি অপেক্ষকের মান নিয়ন্ত্রিত করে? এর সঙ্গে প্রতিফলন গুনাঙ্কের সম্পর্ক কেমন?

6.3 ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার-মাপক(Fabry-Perot Interferometer)

1896 খৃষ্টাব্দে ফরাসী বিজ্ঞানী চার্লস্ ফ্যাব্রি এবং আল্‌ফ্রেদ পেরো সর্ব প্রথম বহু রশ্মীয় ব্যতিচারের তত্ত্বকে ভিত্তি করে ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপক (Interferometer) উদ্ভাবন করেন। আধুনিক আলোক বিজ্ঞানে বিভিন্ন পরিমাপের জন্য এই যন্ত্রটির ভূমিকা অতীব গুরুত্বপূর্ণ। যন্ত্রটি কেবল বর্ণালী সংক্রান্ত পরিমাপের ক্ষেত্রেই ব্যবহৃত হয় এমন নয়, এটা লেসার রশ্মির অনুনাদ কোটর (resonant cavity) রূপেও ব্যবহৃত হয়।

ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপকের মূল কাঠামোটি হল দুটি সমতল সমান্তরাল উচ্চ প্রতিফলকমুখোমুখি পরস্পর থেকে সামান্য দূরত্বে অবস্থিত। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে প্রতিফলক (reflecting) পৃষ্ঠ তৈরী করা হয় দুটি আলোকীয় সমতল কাচ ফলকের পাতের উপর রূপার বা অ্যালুমিনিয়ামের অতি-পাতলা প্রলেপন দ্বারা (semisilvered বা semialuminised)। বলা যায় দুটি রূপার বা অ্যালুমিনিয়ামের পাতলা প্রলেপযুক্ত সমতল কাচ দর্পণকে মুখোমুখি সামান্য দূরত্বে সমান্তরালভাবে স্থাপন করলে ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপক গঠিত হয়। যন্ত্রটি ব্যতিচার মাপকরূপে ব্যবহৃত হলে প্রলেপযুক্ত পৃষ্ঠ দুটির মধ্যবর্তী আবদ্ধ বায়ুস্তরের ব্যবধান কয়েক মিলিমিটার থেকে কয়েক সেন্টিমিটার পর্যন্ত হতে পারে। যখন যান্ত্রিক ব্যবস্থার সাহায্যে দুটি দর্পণের একটিকে সরিয়ে এই ব্যবধান পরিবর্তন করা যায়, তখন এই যন্ত্রটিকে ব্যতিচার মাপক রূপে উল্লেখ করা হয়। এই ব্যবধান অপরিবর্তনীয়ও রাখা যায়। যখন দর্পণ দুটিকে নির্দিষ্ট দূরত্বে স্থির রাখা হয় এবং কোন নির্দিষ্ট ব্যবধান রক্ষাকারী বস্তুর উপর স্ক্রুর সাহায্যে চাপ সৃষ্টি করে দর্পণ দুটিকে সমান্তরাল করার ব্যবস্থা করা হয় তখন এই ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপককে বলা হয় ইটালোন (Etalon)। এই ব্যবধান রক্ষাকারী বস্তু হিসাবে সাধারণত ব্যবহার করা হয় ইনভার বা কোয়ার্টজ্ (invar or quartz)। ইটালোনটি আসলে একটি ব্যতিচার মাপকই। বাস্তবিক পক্ষে যদি একটি মাত্র কোয়ার্টজ্ ফলকের দুটি তল যথাযথভাবে মসৃণ করে প্রলেপ দেওয়া যায় তবে এটিই একটি ইটালোন হিসাবে কাজ করবে। বায়ুর বদলে কোয়ার্টজই হবে কোটরের মাধ্যম। এখানে একটি বিষয় লক্ষ্যণীয় হল এই যে প্রতিফলক তল দ্বয় পরস্পরের সঙ্গে সমতল সমান্তরাল, হলেও ফলক দ্বয়ের বাইরের দিকের অরজতিত (unslilvered) তল দ্বয় কিন্তু প্রায়ই পরস্পরের সঙ্গে সামান্য কোণ করে আনত রাখা হয়। অর্থাৎ প্রতিটি ফলকই কিছুটা ফলকাকৃতির উদ্দেশ্য হচ্ছে অরজতিত তলগুলো থেকে প্রতিফলনের দরুণ উদ্ভূত ব্যতিচারকে হ্রাস করা। যন্ত্রটির আলোক উৎসটি বিস্তৃত আকারের। অসীমে ফোকাস করা কোণ দূরবীক্ষণ যন্ত্রের পিছন দিক থেকে কোন উৎস থেকে আলোক রশ্মিগুচ্ছ পাঠিয়ে এরূপ বিস্তৃত উৎস তৈরী করা যেতে পারে। দূরবীক্ষণ যন্ত্র থেকে নির্গত আলোকরশ্মিগুচ্ছ তারপর একটি ঘসা কাচের পাতের মধ্য দিয়ে পাঠিয়ে ব্যাপ্ত আলো (diffused light) পাওয়া যেতে পারে।



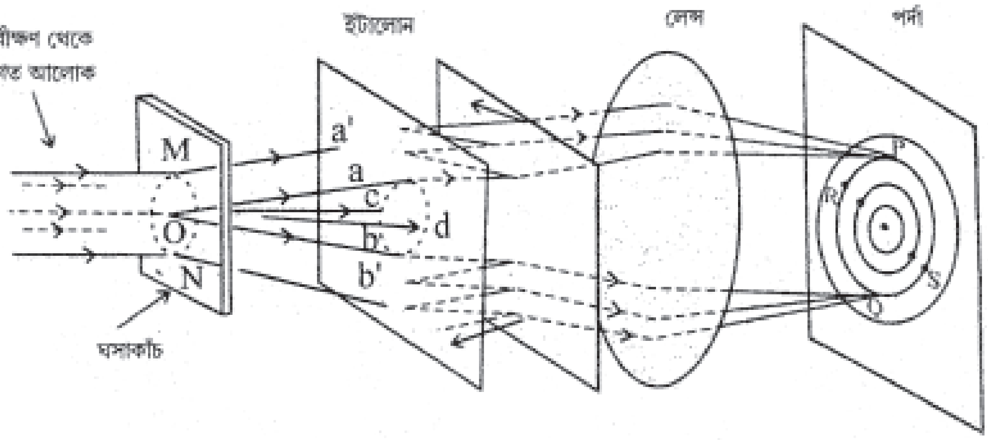
চিত্র 5.6 : ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপক-এর আঙ্গিক চিত্র।

উৎসের উপরের কোন বিন্দু S_1 থেকে কেবল একটি নির্গত রশ্মিকেই ইটালোনের মধ্যে অঙ্কন করে দেখানো হয়েছে। অংশত রজতিত (partially silvered) ফলকের মধ্যে প্রবেশ করার পর রশ্মিটি ইটালোনের রজতিত তল দুটির মাঝের ফাঁকটিতে উভয়তল থেকে বহুবার প্রতিফলিত হয়। এখন দ্বিতীয় প্রতিফলক তল থেকে পারগত রশ্মিগুলিকে একটি লেন্সের সাহায্যে একটি পর্দার উপর কোন এক বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত (focussed) করা হলে এরা ব্যতিচার উৎপন্ন করে তারই ফলে পর্দার উপর একটি উজ্জ্বল বা একটি অন্ধকার বিন্দু পাওয়া যাবে। এক্ষেত্রে ব্যতিচার সম্ভব হয় কারণ পারগত রশ্মিগুলি একই উৎস থেকে উদ্ভূত হওয়ার ফলে পরস্পরের সঙ্গে সুসম্বদ্ধও। আবার অন্য একটি বিন্দু উৎস S_2 থেকে অপর একটি রশ্মি পূর্ববর্তী রশ্মিটির সমান্তরালে একই আপতন তলে নির্গত হয়ে একই P বিন্দুতে একটিবিন্দু গঠন করবে। পূর্বের অনুচ্ছেদে পারগত তীব্রতার যে ব্যঞ্জকটিআমরা নির্ণয় করেছি তা এখানেও প্রযোজ্য হবে। ইটালোনের বায়ু কোটরে উৎপন্ন বহুধা তরঙ্গগুলি পর্দার উপর P বিন্দুতে S_1 থেকেই আসুক অথবা S_2 থেকেই আসুক, এরা নিজেদের মধ্যে সুসম্বদ্ধ। কিন্তু S_1 থেকে আগত রশ্মিগুলি S_2 থেকে আগত রশ্মিগুলির সাপেক্ষে সম্পূর্ণরূপে অ-সুসম্বদ্ধ (incoherent)। কাজেই কোন স্থায়ী পারস্পরিক ব্যতিচার হয় না। উৎস দুটি থেকে একই আপতন তলে সমান্তরালভাবে নির্গত রশ্মি দুটির জন্য P বিন্দুতে পারগত তীব্রতা I_t হবে প্রতিটি রশ্মির জন্য প্রাপ্ত পারগত তীব্রতার যোগফল।

এবার আমরা বিস্তৃত আলোক উৎসের সকল বিন্দু উৎসগুলির কথাই বিবেচনা করব। একটি নির্দিষ্ট কোণে একই আপতন তলে যে সব রশ্মি বিস্তৃত উৎসের বিভিন্ন বিন্দু উৎস থেকে সমান্তরালভাবে ফ্যাব্রি পেরো ব্যাতিচারমাপক বা ইটালোনের বায়ু কোটরের উপর আপতিত হয় তারা সকলে সুষম তীব্রতার একটিমাত্র বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জ গঠন করবে। এখানেও বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জের প্রতিটি বিন্দুর মোট পারগত তীব্রতা হল বিন্দু উৎসগুলি থেকে একই আপতন তলে সমান্তরালভাবে নির্গত রশ্মিগুলির জন্য প্রাপ্ত প্রত্যেকটি পারগত তীব্রতার যোগফল, যেহেতু পূর্বের ন্যায় এখনও আমরা বলব যে সমান্তরাল রশ্মিগুলি বিভিন্ন বিন্দু থেকে উদ্ভূত হওয়ার দরুণ তারা, পরস্পরের সঙ্গে সুসম্বদ্ধ নয়। এবং একদিকে প্রত্যেকটি রশ্মি থেকে উদ্ভূত পারগত রশ্মিগুলি যেমন নিজেদের মধ্যে সুসম্বদ্ধ হওয়ার দরুণ ব্যতিচার উৎপন্ন করতে সক্ষম হয়, তেমনি বিভিন্ন রশ্মি থেকে উদ্ভূত পারগত রশ্মিগুলি সুসম্বদ্ধ নয় বলে পরস্পরের সঙ্গে পূর্বের ন্যায় এক্ষেত্রেও স্থায়ী ব্যতিচার সৃষ্টি করতে পারে না।

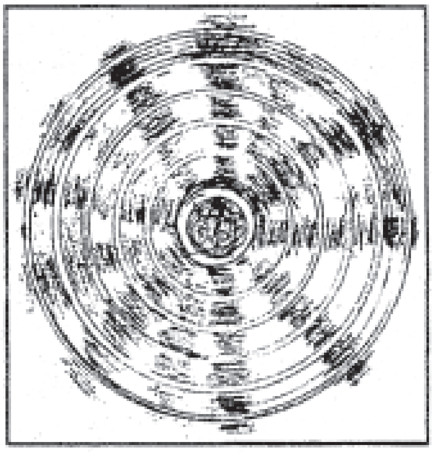
এখন প্রশ্ন হল পর্দার উপর ব্যতিচার নক্‌শাটি কী রূপের হবে? আমরা বহুরশ্মীয় ব্যতিচার নকশা কিরূপ

হবে তা জানি। এক্ষেত্রেও ব্যতিচার নকশাটি হবে সমকেন্দ্রিক তীক্ষ্ণরেখ বহু সংখ্যক আলোক বলয়। আমরা পূর্বেই দেখেছি যে উৎসের বিভিন্ন বিন্দু থেকে নির্গত সমান্তরাল আলোক রশ্মিগুচ্ছ (অর্থাৎ একই আপতন কোণ) যদি একই আপতন তলে থাকে তবে তারা পর্দার উপর একই বিন্দুতে মিলিত হবে। এই আপতন কোণ এক থাকলেও যদি রশ্মিগুলির আপতন তল বিভিন্ন হয় তবে ভিন্ন ভিন্ন আপতন তলের রশ্মিগুচ্ছ ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে মিলিত হবে এবং তাদের লব্ধি হবে একটি বৃত্ত (চিত্র 6.7)।



চিত্র 6.7 : ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপক ব্যতিচার নকশা গঠন।

আবার লক্ষ্য করুন oa এবং ob রশ্মির আপতন কোণ ও আপতন তল একই কিন্তু তারা সমান্তরাল নয়। অতএব তাদের ব্যতিচার বিন্দু ভিন্ন (P এবং Q)। Ma' এবং oa একই আপতন তলে এবং একই আপতন কোণে ইটালোনে প্রবেশ করে। অতএব তারা একই P বিন্দুতে মিলিত হয়। অনুরূপভাবে ob এবং Nb' রশ্মিদ্বয় Q বিন্দুতে মিলিত হয়। কিন্তু oc, od রশ্মিদ্বয় oa এবং ob রশ্মিদ্বয়ের মত একই আপতন কোণে থাকলেও তাদের আপতনতল 90^o কোণে আবর্তিত হয়েছে। তাই তাদের ব্যতিচার বিন্দুও 90^o কোণে আবর্তিত তলের যথাক্রমে R ও S বিন্দুতে গঠিত হয়। এইরূপে একই আপতন কোণ কিন্তু ভিন্ন আপাতন তলের রশ্মিগুলির ব্যতিচার বিন্দু P,S,Q,R একটি বৃত্তের উপর অবস্থান করবে। যদি ব্যতিচার বিন্দুগুলির লব্ধি তীব্রতা শূন্য না হয় তবে আমরা পর্দায় PSQR উজ্জ্বল বলয় বা বৃত্তীয় রেখা দেখতে পাবো।



চিত্র 6.8 : ফ্যাব্রি পেরো ব্যতিচার নকশা

আপতন কোণের বিশেষ বিশেষ মানের জন্য এইরূপ ভিন্ন ভিন্ন ব্যাসার্ধের উজ্জ্বল বলয়ের সমাহার উৎপন্ন হবে পর্দার উপর। (চিত্র 6.8)। অন্ধকারের প্রেক্ষাপটে উজ্জ্বল সমকেন্দ্রিক বলয়ের সমাহার। নিউটন রিং পরীক্ষায় যেমন ঠিক তেমনি। পার্থক্য এই যে এক্ষেত্রে বলয়গুলি অত্যন্ত তীক্ষ্ণ। অবশ্য এই দুধরনের বলয়ের মধ্যে অন্য পার্থক্যও আছে।

6.3.1 ফ্যাব্রি-পেরোর ব্যতিচার নকশার তীব্রতা বন্টন (Intensity distribution of the interference pattern of the fabry-perot interferometer)

ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার নকশাটি গঠিত হয় পারগত বহুরশ্মীয় ব্যতিচারের ফলে। আপনারা এই পারগত তীব্রতা বন্টনের রাশিমালা পেয়েছেন (6.5) নং বা (6.12) নং সমীকরণে। সমীকরণ (6.5) থেকে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{I_1}{I_o} = \frac{\left(1-r^2\right)^2}{1+r^4-2r^2\cos\delta}$$

আমরা জানি, যদি কোন শোষণ অনুপস্থিত থাকে, তবে

$$tt' = 1-r^2$$

$$\Rightarrow T = 1-R \qquad \text{..................(6.13)}$$

যেখানে $T = tt'$ =আলোর উত্তরণাংক (transmittance) এবং $R=r^2$ আলোর প্রতিফলনাংক (Reflectance)

$$\therefore \frac{I_1}{I_o} = \frac{T^2}{1+R^2-2R\cos\delta}$$

$$= \frac{T^2}{1+R^2-2R+4R\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

$$= \frac{T^2}{(1-R)^2+4R\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

$$\text{or,} \quad \frac{I_1}{I_o} = \left(\frac{T}{1-R}\right)^2 \times \frac{1}{1+\frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\frac{\delta}{2}} \qquad \text{................(6.14)}$$

আমরা ইতিপূর্বে আলোচনা করেছি যে পারগত রশ্মির সংখ্যা যত বেশি হবে ব্যতিচার নকশার তীক্ষ্ণতা তত বৃদ্ধি পাবে। এজন্য প্রতিফলক তলের প্রতিফলনাংক R বৃদ্ধি করার দরকার হয়। তাই অংশত স্বচ্ছ ধাতব ঝিল্লি

(film) ব্যবহার করা হয়। কিন্তু ধাতব ঝিল্লির উপর আলোক তরঙ্গ (তড়িৎ-চুম্বকীয় তরঙ্গ) আপতিত হলে তাতে পৃষ্ঠ তড়িৎ প্রবাহের (surface current) সৃষ্টি হয়। ফলে আলোক শক্তির শোষণ ঘটে।

আপতিত আলোকের যে ভগ্নাংশ শোষিত হয় তাকে বলে শোষণাংক (absorptance)। এরূপ ক্ষেত্রে (6.13) সমীকরণটিকে সংশোধিত করে লিখতে হবে

$$T+R+A=1 \qquad \text{..............(6.16)}$$

$$\Rightarrow \frac{T}{1-R}=1-\frac{A}{1-R}$$

অতএব সমীকরণ (6.14) কে লেখা যায়

$$\frac{I_t}{I_o}=\left(1-\frac{A}{1-R}\right)^2\times\frac{1}{\left(1+\frac{4R}{(1-R)^2}\times\sin^2\frac{\delta}{2}\right)} \qquad \text{...............(6.16)}$$

কিন্তু সূক্ষ্মতা গুণাংক

$$F=\left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2=\frac{4R}{(1-R)^2}$$

এবং এয়ারি অপেক্ষক

$$\alpha(\theta)=\frac{1}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}}=\frac{1}{1+\frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\frac{\delta}{2}} \qquad \text{............(6.17)}$$

$$\therefore \frac{I_t}{I_o}=\alpha(\theta)\left[1-\frac{A}{1-R}\right]^2 \qquad \text{............(6.18)}$$

যখন কোন শোষণ ঘটবে না, তখন $A=0$ এবং

$$\frac{I_t}{I_o}=\alpha(\theta)$$

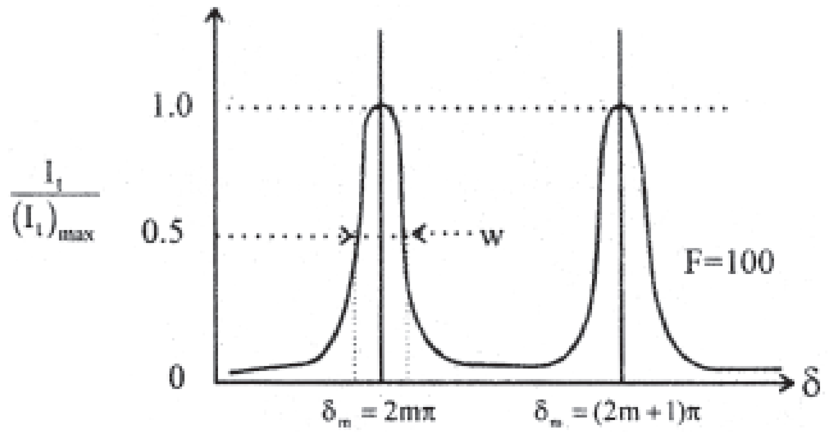
যা আমরা ইতি পূর্বেই দেখেছি। আপনাদের আবার মনে করিয়ে দিচ্ছি যদিও $\alpha=\alpha(\delta)$, কিন্তু যেহেতু δ প্রতিসরণ কোণ θ_r-এর উপর নির্ভর করে আবার θ_r আপতন কোণ θ_i-এর উপর নির্ভরশীল, তাই $\alpha=\alpha(\theta_i)$ বা শুধু $\alpha(\theta)$ও বলা যায়। শোষণহীন পারগমণের ক্ষেত্রে আমরা দেখেছি $(I_t)_{m}=I_o$ বা $\alpha(\theta_i)=1$। কিন্তু শোষণ বর্তমান থাকলে $(I_t)_{m}<I_o$ হবে সর্বদা। (6.18) সমীকরণটি থেকেও পাওয়া যায় এই সিদ্ধান্তের সমর্থন।

$$\therefore \frac{(I_t)_{min}}{I_0} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \qquad ....(6.19)$$

এখন I_t যদি হয় যে কোণ δ-এর জন্য বহুরশ্মীয় ব্যতিচারে পারগত তীব্রতা, তবে তাকে $(I_t)_{max}$ (= সর্বোচ্চ পারগত তীব্রতা)-এর সাপেক্ষে লেখা যায়

$$\frac{I_t}{(I_t)_{max}} = \alpha(\theta_i) = \frac{1}{1 + F\sin^2\frac{\delta}{2}} \qquad ....(6.20)$$

অর্থাৎ এয়ারি অপেক্ষক বহুরশ্মীয় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ নকশার আপেক্ষিক পারগত তীব্রতা নির্ধারণ করে। এখন F=100 পূর্বের ন্যায় ব্যতিচার তীব্রতা লেখ চিত্র 6.9 এর অনুরূপ হবে।



চিত্র 6.9 : ফ্যাব্রি পেরো নকশার তীব্রতা লেখ

6.3.2 ফ্যাব্রি-পেরো চরম ব্যতিচার তীব্রতার তীক্ষ্ণতা (Sharpness of bright fringes)

চিত্র (6.9)-এ ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার নকশার পারগত তীব্রতা বণ্টনের লেখ থেকে দেখা যায় $\delta_m = 2m\pi[m = 0,1,2,...]$ হলে তীব্রতা হবে সর্বোচ্চ অর্থাৎ $I_t / (I_t)_{max} = 1$ এবং δ_m থেকে δ-এর ব্যবধান বাড়লে আপেক্ষিক তীব্রতাও দ্রুত হ্রাস পাবে। একই $|\delta_m - \delta|$-এর জন্য $I_t / (I_t)_{max}$ যত বেশি হ্রাস পাবে ততই চরম তীব্রতা বেশি তীক্ষ্ণ হবে। এই তীক্ষ্ণতার একটি পরিমাপ হল অর্ধ-প্রস্থ (half-width) w। চিত্র (6.9)-এ তীব্রতা চরম শীর্ষটির মান যখন $I_t = \frac{1}{2}(I_t)_{max}$ শীর্ষটির উভয় পাশে হয় তখন শীর্ষ লেখটির প্রস্থ w কে বলে অর্ধপ্রস্থ। w কে রেডিয়ানে পরিমাপ করা হয়।

ধরা যাক $\delta = \delta_m \pm \Delta\delta$ অবস্থায় $I_t = \frac{1}{2}(I_t)_{max}$ হয়। অতএব (6.20) থেকে

$\alpha(\theta_i) = \frac{1}{2}$, যখন $\delta = \delta_m \pm \Delta\delta$

$$\Rightarrow \frac{1}{1 + F\sin^2\frac{\delta}{2}} = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow F\sin^2\frac{\delta}{2} = 1$$

$$\Rightarrow \sin^2\left(\frac{\delta_m \pm \Delta\delta}{2}\right) = \frac{1}{F}$$

$$\sin^2\left(m\pi \pm \frac{1}{2}\Delta\delta\right) = \frac{1}{F}$$

$$\sin\frac{\Delta\delta}{2} = \frac{1}{\sqrt{F}}$$

[$-\sin\frac{\Delta\delta}{2} = \frac{1}{\sqrt{F}}$ পরিহার করা হল, কারণ আমরা কেবল $|\Delta\delta|$ তেই আগ্রহী]

$$\therefore \Delta\delta = 2\sin^{-1}\frac{1}{\sqrt{F}}$$

সাধারণত F এর মান বৃহৎ হয়, ফলে $\frac{1}{\sqrt{F}}$ খুবই ক্ষুদ্র হয়। আর তাই লেখা যায় $\sin^{-1}\frac{1}{\sqrt{F}} \approx \frac{1}{\sqrt{F}}$

$$\therefore w = 2\Delta\delta = \frac{4}{\sqrt{F}}$$

বা $w = \frac{4(1-R)}{\sqrt{4R}} = \frac{2(1-R)}{\sqrt{R}}$ ....(6.21)

স্পষ্টতঃই R যত বৃদ্ধি পাবে W ততই হ্রাস পাবে, অর্থাৎ উজ্জ্বল ব্যতিচার নকশা ততই তীক্ষ্ণতর হবে।

অনুশীলনী 2 : R বৃদ্ধি পেলে ব্যতিচার নকশা তীক্ষ্ণতর হয় কেন?

দুটি উজ্জ্বল নকশার অন্তস্থ যে অন্ধকার অঞ্চল তার প্রস্থ বৃদ্ধিপাবে যত w হ্রাস পাবে। দুটি পাশাপাশি চরম শীর্ষের ব্যবধান 2π। এবং অর্ধ-প্রস্থ w-এর অনুপাতকে বলে সুক্ষ্মতা বা ফিনেস্ (finesse) অর্থাৎ, $\Phi = \frac{2\pi}{w}$ অথবা (6.21) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\Phi = \frac{2\pi}{4/\sqrt{F}} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2}$$ ....(6.22)

অর্থাৎ ফিনেস্ বা সূক্ষ্মতা বৃদ্ধি পেলে অর্ধপ্রস্থ হ্রাস পায় যার অর্থ হ'ল উজ্জ্বল শীর্ষের তীক্ষ্ণতা বৃদ্ধি পায়।

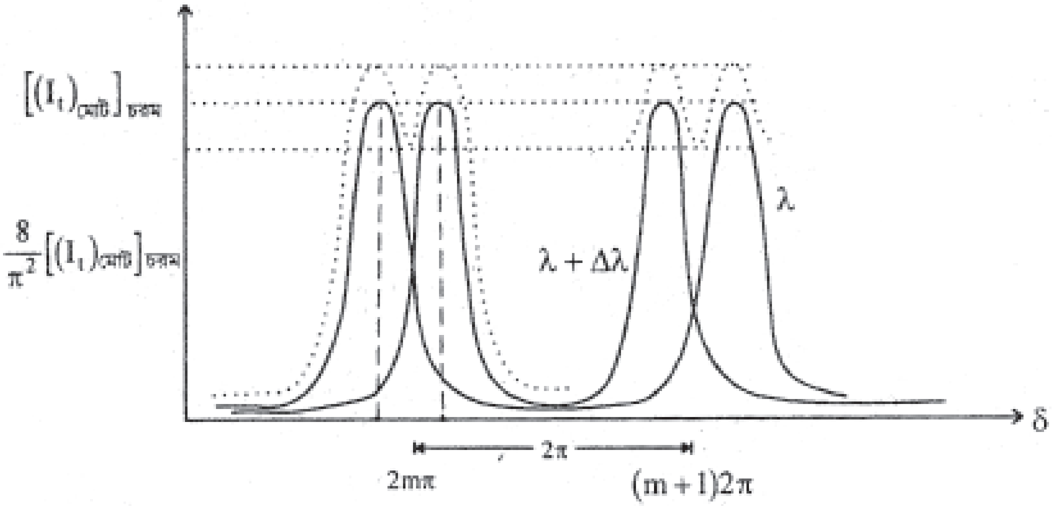
সর্বশেষে আরো একটা সমস্যার কথা এসে যায়। আমরা R বৃদ্ধি করার জন্য ধাতব ঝিল্লি ব্যবহার করার কথা বলেছি। কিন্তু এতে দশা পার্থক্যের পরিবর্তন ঘটে। এই ধাতব ঝিল্লির প্রতিফলন বিবেচনা না করলে পরপর দুটি পারগত তরঙ্গের দশা পার্থক্য হয়

$$\delta = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times (d\cos\theta_r)n$$

কিন্তু ধাতব প্রতিফলনের ক্ষেত্রে প্রতিটি প্রতিফলনে একটি বাড়তি দশা পার্থক্য $\psi = \psi(\theta_r)$ যুক্ত হবে।

ফলে $\delta = \frac{4\pi nd}{\lambda}\cos\theta_r + 2\psi$

আমাদের আলোচনায় θ_r ছোট এবং ψ কে ধ্রুবক মনে করা যেতে পারে। δ-এর এই বৈশিষ্ট্যকে পূর্বের আলোচনায় বিবেচনা করা হয়নি। অবশ্য d খুবই বৃহৎ মানের এবং λ খুবই ক্ষুদ্রমানের হওয়ায় δ-এর রাশিমালার প্রথম পদ সাপেক্ষে 2ψ নগণ্য $[0 < \psi < \pi]$। অতএব আমাদের আলোচনায় বিবেচনাযোগ্য ত্রুটি বিশেষ ঘটেনি।



চিত্র 6.10 : র‍্যালির নির্ণায়কের ব্যাখ্যা। দুটি বর্ণালী রেখা কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট।

6.3.3 ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনে বর্ণালী তত্ত্ব (Spectroscopy in Fabry-perot Interferrometer)

ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপককে বর্ণালীর সূক্ষ্মাতিসূক্ষ্ম রেখার বিশ্লেষণের জন্য ব্যবহার করা হয়। এর কারণ এই যন্ত্রের বিভেদন ক্ষমতা (resolving power) খুবই বেশি (বিভেদন ক্ষমতা সম্পর্কে 7.8.1 দেখুন)। যদি কোন আলোক যন্ত্র λ ও $\lambda+\Delta\lambda$ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বর্ণালী রেখাকে পরস্পরের থেকে পৃথক করতে পারে তবে তার বর্ণীয় বিভেদন ক্ষমতা (Chromatic Resolving Power) হল $\lambda/\Delta\lambda$। দুটি বর্ণালী রেখাকে কখন বলা হবে যে তারা যথাযথ বিশ্লিষ্ট (just resolved), দুটি বর্ণালী রেখা (spectral line) যথাযথভাবে বিশ্লিষ্ট হয়েছে কিনা একথা

যাতে সুনিশ্চিত ভাবে বলতে পারা যায় তার জন্য বিভিন্ন নির্ণায়ক (criterion) রয়েছে। সর্বাধিক ব্যবহৃত হ'ল র‍্যালে'র নির্ণায়ক (Rayleigh's criterion) [এ বিষয়ে 7.8.1 দ্রষ্টব্য] র‍্যালে'র নির্ণায়ক একটু পরিবর্তিতরূপে ব্যবহার করা হয়েছে। এ ক্ষেত্রে দুটি অতি নিকটবর্তী তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোকের ব্যতিচার নকশার একই ক্রমের দুটি উজ্জ্বল রেখাকে কোনক্রমে বিশ্লেষিত হওয়ার শর্ত হিসেবে র‍্যালে নির্ণায়ক প্রয়োগ করতে হবে। এ জন্য র‍্যালের নির্ণায়ককে একটু পরিবর্তন করতে হবে : দুটি তরঙ্গের ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ দুটি তখনই কেবল বিশ্লিষ্ট বলা হবে যখন লব্ধি বিস্তৃত ফ্রিঞ্জটির মধ্যবর্তী বিন্দুতে ফ্রিঞ্জ দুটির মোট তীব্রতা সর্বোচ্চ তীব্রতার $8/\pi^2$ গুণ হবে। (চিত্র 6.10)

আমরা সমীকরণ (6.16) থেকে লিখতে পারি

$$I_t = \frac{I_o}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

ধরা যাক λ ও $\lambda+\Delta\lambda$ তরঙ্গের জন্য

$$(I_t)_\lambda = \frac{I_o}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

$$(I_t)_{\lambda+\Delta\lambda} = \frac{I_o}{1+F\sin^2\left(\frac{\delta-\Delta\delta}{2}\right)}$$

অতএব লব্ধি তীব্রতা হবে

$$(I_t)_{\text{মোট}} = (I_t)_\lambda + (I_t)_{\lambda+4\lambda}$$

$$\therefore (I_t)_{\text{মোট}} = \frac{I_o}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}} + \frac{I_o}{1+F\sin^2\left(\frac{\delta-\Delta\delta}{2}\right)} \qquad \text{.............(6.21)}$$

ধরে নিতে হবে যে $(I_t)_{\text{মোট}}$ যেখানে যেখানে চরম মানে পৌঁছাবে $(I_t)_\lambda$ ও $(I_t)_{\lambda+\Delta\lambda}$ এর মানও সেখানে চরম হবে [চিত্র 6.10]। যদি আমরা m-ক্রমের ফ্রিঞ্জটি বিবেচনা করি তবে λ তরঙ্গের জন্য $\delta = 2m\pi$ হলে $(I_t)_\lambda$ চরম হবে।

$$\therefore \left[(I_t)\right]_{\text{চরম}} = \frac{I_o}{1+F\sin^2 m\pi} + \frac{I_o}{1+F\sin^2\left(m\pi - \frac{\Delta\delta}{2}\right)}$$

$$= I_o + \frac{I_o}{1+F\sin^2\frac{\Delta\delta}{2}} \qquad \text{.............(6.22)}$$

এবার দুই পরপর m-ক্রমের উজ্জ্বল রেখার মধ্যবর্তী অবস্থানে $\delta = 2m\pi + \frac{\Delta\delta}{2}$ হবে। ধরা যাক এই অবস্থানে

$(I_t)_{\text{মোট}} = [(I_t)_{\text{মোট}}]_{\text{মধ্য}}$

$$\therefore [(I_t)_{\text{মোট}}]_{\text{মধ্য}} = \frac{I_o}{1 + F\sin^2\left(m\pi + \frac{\Delta\delta}{4}\right)} + \frac{I_o}{1 + F\sin^2\left(m\pi - \frac{\Delta\delta}{4}\right)}$$

$$= \frac{2I_o}{1 + F\sin^2\frac{\Delta\delta}{4}} \qquad \text{....................(6.23)}$$

র্যালির নির্ণায়ক অনুসারে λ ও $\lambda + \Delta\lambda$ এর বর্ণালি রেখাদ্বয় তখনই কেবল বিশ্লিষ্ট হবে যখন

$$[(I_t)_{\text{মোট}}]_{\text{মধ্য}} = \frac{8}{\pi^2} \times [(I_t)_{\text{মোট}}]_{\text{চরম}} \text{ হয়।}$$

অথবা $$\frac{2I_o}{1 + F\sin^2\frac{\Delta\delta}{4}} = \frac{8}{\pi^2} \times \left(I_o + \frac{I_o}{1 + F\sin^2\frac{\Delta\delta}{4}}\right) \qquad \text{...................(6.24)}$$

$\Delta\delta$ খুবই ক্ষুদ্র বলে $\sin\frac{\Delta\delta}{4}$ $\frac{\Delta\delta}{4}$ এবং $\sin\frac{\Delta\delta}{2}$ $\frac{\Delta\delta}{2}$

অতএব সমীকরণ (6.24) এখন হবে

$$\frac{2}{1 + \frac{F}{16}(\Delta\delta)^2} = \frac{8}{\pi^2}\left(1 + \frac{1}{1 + \frac{F}{4}(\Delta\delta)^2}\right)$$

সরল করে পাওয়া যায়

$$\left[F(\Delta\delta)^2\right]^2 - 4(\pi^2 - 6)\left[F(\Delta\delta)^2\right] - 16(\pi^2 - 8) = 0$$

সমীকরণটির সমাধান করে আমরা পাই

$$\left[F(\Delta\delta)^2\right] = 7.7392 \pm 9.4768$$

বাস্তব মূল্যের জন্য

$$\Delta\delta = \frac{4.149}{\sqrt{F}} \qquad \text{..................(6.25)}$$

কিন্তু $\delta = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times nd\cos\theta_r$

কোন বিশেষ ক্রমের ক্ষেত্রে θ_i ধ্রুবক। অতএব θ_r ও ধ্রুবক।

$$\therefore |\Delta\delta| = \neq \frac{4\pi nd}{\lambda^2}\cos\theta_r \Delta\lambda \qquad \text{..................(6.26)}$$

অতএব (6.26) ও (6.25) থেকে পাই

$$\frac{4.149}{\sqrt{F}} = \frac{4n\pi d\cos\theta_r}{\lambda} \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

বা $$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{4n\pi\sqrt{F}d\cos\theta_r}{4.149\lambda} \qquad \text{..................(6.27)}$$

যা হ'ল আমাদের অভিষ্ট বিভেদন ক্ষমতা।

অথবা $$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \sqrt{F} \times \frac{\delta}{4.149} = \frac{2\pi m\sqrt{F}}{4.149}$$

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1.514m\sqrt{F} \qquad \text{..................(6.28)}$$

ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের বিভেদন ক্ষমতা কী মাত্রার হতে পারে? আমরা জেনেছি এই ইটালোনের দুই সমান্তরাল পাতের দূরত্ব d কয়েক মিলিমিটার থেকে 40 সেমি পর্যন্ত হতে পারে। ধরা যাক d=1 সেমি। প্রতিফলনাংক R=0.8 হলে

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} = \frac{4 \times 0.8}{(1-0.8)^2} = 80$$

ধরা যাক পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী মাধ্যম বায়ু অর্থাৎ $n = 1$। যদি আলোকরশ্মির আপতন কোন 30° হয় এবং $\lambda = 5 \times 10^{-5}$ cm হয় তবে বর্ণীয় বিভেদন ক্ষমতা,

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{4\pi \times \sqrt{80} \times 1 \times \cos 30^\circ}{4.149 \times 5 \times 10^{-5}} = 4.69 \times 10^5$$

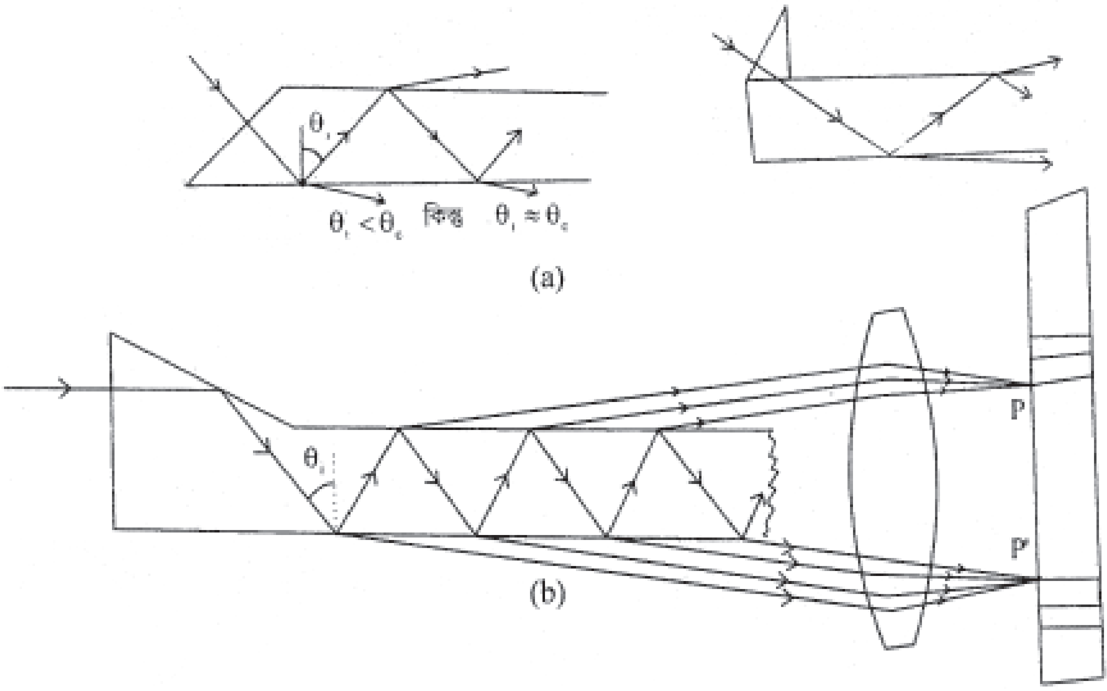
$$\therefore \Delta\lambda = \frac{5 \times 10^{-5}}{4.69 \times 10^5}\ \text{cm} = 1.07 \times 10^{-10}\ \text{cm} \quad \approx .0107\,\text{Å}$$

অর্থাৎ এইরূপ ফ্যাব্রিপেরো ইটালোনের সাহায্যে 30^0 আপতন কোণের ক্রমে $5000\,\mathring{A}$ তরঙ্গের থেকে যে তরঙ্গের ব্যবধান $0.0107\,\mathring{A}$ তাদের ব্যতিচার রেখাকে পৃথক করা যাবে। এই ব্যবধান আরো হ্রাস পায় যদি R- র মান আরো বৃদ্ধি করা যায়। গ্রেটিং-এর বিভেদন ক্ষমতার সঙ্গে তুলনা করা যাক। বড় জোর $\Delta\lambda = 0.1\,\mathring{A}$ হবে গ্রেটিং-এর ক্ষেত্রে। আরো সামান্য কমানো সম্ভব। এ বিষয়ে পরবর্তী অধ্যায়ে বিস্তারিত জানা যাবে।

যদি λ এবং $\lambda + \Delta\lambda$ এর মধ্যে ব্যবধান বেশি হয়, সেক্ষেত্রে ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোন ব্যবহার করা যায় না। কেন না বর্ণালি রেখা দ্বয়ের ব্যবধান তাদের নিজ নিজ বলয় নকশার সরণ থেকে বেশি হবে। ফলে বিভিন্ন ক্রমের মধ্যে প্রাবরণ (Overlapping) ঘটে।

6.4 লুমার-গেহরকে ফলক (The Lummer-Gehrcke Plate)

আপনারা দেখেছেন ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোন-এর বিভেদন ক্ষমতা সুক্ষ্মতার গুণাংক বা ফিনেস্ গুণাংক F-এর বর্গমূলের সমানুপাতী। কিন্তু $F = \dfrac{4R}{(1-R)^2}$ যেখানে R=প্রতিফলনাংক অর্থাৎ বিভেদন ক্ষমতা বৃদ্ধি করতে প্রতিফলনাংক বৃদ্ধি করা প্রয়োজন। ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের ক্ষেত্রে কাচ বা কোয়ার্টজ-এর উপর ধাতব প্রলেপন দিয়ে R-এর মান বৃদ্ধি করা হয়। সে ক্ষেত্রে আপনারা এও জেনেছেন যে ধাতব প্রলেপন আলো শোষণ করে। ফলে পারগত আলোকের তীব্রতাও খুব কমে যায়। ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের এই সীমাবদ্ধতাকে অতিক্রম করা গেল লুমার গেহ্র্কের ফলক ব্যতিচারমাপকে। এই ব্যবস্থায় আলোকের আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের ধর্মকে কাজে লাগানো হয়েছে। আলোকের আপতন কোণ যত বেশি সংকট কোণের নিকটবর্তী হবে আলোও তত বেশি প্রতিফলিত হবে।



চিত্র 6.11 : লুমার-গেহ্রকে ফলক

লুমার-গেহরকে ফলকটি হল কাচ বা কোয়ার্টজ-এর তৈরী একটি সমতল সমান্তরাল ফলক যার এক প্রান্তে একটি একই উপাদানের ক্ষুদ্র সমকোণী প্রিজম্ যুক্ত থাকে। প্রিজমটির প্রতিসারক কোণ এমন হবে যে তাতে প্রবেশকারী আলোক রশ্মি ফলকের তলে সংকট কোণের থেকে সামান্য ক্ষুদ্রতর কোণে আপতিত হবে [চিত্র 6.11(b)]। অবশ্য প্রিজমকে এমনভাবে সংযুক্ত করা যায় যেন তাতে লম্বভাবে আপতিত রশ্মি সরাসরি ফলক তলে অভীষ্ট কোণে (সংকট কোণ অপেক্ষা সামান্য ক্ষুদ্রতর) আপতিত হতে পারে [চিত্র6.11(a)]।

লক্ষ্য করুন, প্রতিফলক তলদ্বয় সমান্তরাল বলে প্রতিতলে আলোক রশ্মি একই কোণে আপতিত হবে। অতএব পারগত আলোক রশ্মিগুলি পরস্পর সমান্তরাল হবে। আবার এও লক্ষ্য করুন, যেহেতু আপতন কোণটি সংকট কোণের প্রায় সমান কিন্তু ছোট, তাই পারগত রশ্মিগুলি ফলকের প্রায় তল ঘেঁষে গমন করবে। কোণ লেন্স দ্বারা পারগত রশ্মিগুচ্ছকে সংহত করলে তারা লেন্সের ফোকাস তলে P বা P' বিন্দুতে মিলিত হয়ে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ নকশা গঠন করবে ফলকের উভয়পাশে। ফ্রিঞ্জগুলি হবে, প্রায় সরল রেখা চওড়া উল্লম্ব রেখাছিদ্র উৎসের ক্ষেত্রে এবং তারা সকলেই ফলকের উভয় তলের সমান্তরালভাবে অবস্থান করবে [চিত্র-5.11(খ)]

ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারের সঙ্গে লুমার-গেহ্রকে-এর ব্যতিচারের মিল এত স্পষ্ট যে আমরা বলতে পারি যেন এটা বায়ুর বদলে কাচ বা কোয়ার্টজ মাধ্যমের ফ্যাব্রিপেরো ব্যতিচার মাপক। তবুও অমিলও বর্তমান:

i) এখানে আপতন কোণ বেশ বড়, প্রায় সংকট কোণের সমান; কিন্তু ফ্যাব্রিপেরো ইটালোনে আলোক রশ্মি প্রায় অভিলম্বভাবে আপতিত হয়।

ii) ফ্যাব্রি-পেরো প্রতিফলক তলদ্বয়ের মধ্যবর্তী মাধ্যম আলোর বিচ্ছুরণ (dispersion) ঘটায় না, কিন্তু লুমার-গেহরকে ফলক একটি বিচ্ছুরক মাধ্যম।

iii) ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনে আলোর প্রতিফলন কোণ খুব কম হওয়ায় অল্প দৈর্ঘ্যে বহুসংখ্যক প্রতিফলন ঘটে; কিন্তু লুমার-গেহরকে ফলকের দৈর্ঘ্য সীমিত এবং আপতন কোণ বড় হওয়ায় পারগত আলোক তরঙ্গের সংখ্যাও সীমিত; অবশ্য ফলকের দৈর্ঘ্যের উপর সংখ্যাটা নির্ভরশীল। লুমার-গেহ্রকে ফলকের বিভেদন ক্ষমতা ফলকের দৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে।

ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের তুলনায় লুমার-গেহ্রকে ফলক উচ্চতর বিভেদন ক্ষমতা সম্পন্ন হলেও বেশী খরচ ও কতকগুলি অসুবিধার জন্য লুমার ফলকের ব্যবহার আজকাল প্রায় হয় না বললেই চলে।

6.5 ফ্যাব্রিপেরো ইটালোনের ব্যবহার ঃ ব্যতিচার পরিস্রাবক (Interference filters)

যখন কোন অসমান্তরিত (uncollimated) একবর্ণী রশ্মিগুচ্ছ কোন ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপককে আলোকিত করে তখন একটি বর্ণালী পাওয়া যায়। এই বর্ণালী বিভিন্ন তীব্রতা চরমের দ্বারা গঠিত। আর এই বিভিন্ন তীব্রতা চরমগুলি পাওয়া যায় নীচের সম্পর্কটি সিদ্ধ হলেই

$$2nd\cos\theta_r = m\lambda$$

এবার যদি একটি ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচারমাপককে অভিলম্বভাবে আপতিত ($\theta_r \simeq 0$) সমান্তরিত (collimated) সাদা আলো দ্বারা আলোকিত করা হয়, তবে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের প্রতিবঙ্গী পারগত আলোকে গঠিত বিভিন্নক্রমের চরম তীব্রতাগুলি আমরা পাব

$$\lambda = \frac{2nd}{m}$$

সমীকরণটি থেকে। d যদি বড় হয়, তবে এক বিরাট সংখ্যক চরম তীব্রতা পাওয়া যাবে দৃশ্য অঞ্চলে (visible region)।

উদাহরণস্বরূপ যদি $d = 1$ সেমি. তবে $n = 1$(বায়ু) এবং $\lambda = 5 \times 10^{-5}\,cm = 5000\,\mathring{A}$ হয়, তবে $m = 40.000$; অর্থাৎ 40.000 তীব্রতা চরম দেখতে পাওয়া যাবে। কিন্তু d হ্রাস করতে থাকলে, এমন একটা অবস্থায় আমরা পৌছব যখন শুধু একটি বা দুটি চরম তীব্রতাই দৃশ্য অঞ্চলে আমরা দেখত পাব।

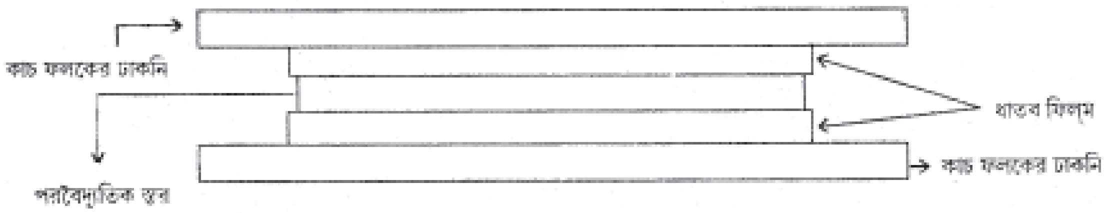
উদাহরণ : যদি $n = 1.5$ এবং $d = 6 \times 10^{-5}$ cm হয়, তবে $\lambda = 6000\,\mathring{A}$ এবং $\lambda = 4500\,\mathring{A}$-এর ক্ষেত্রে যথাক্রমে $n = 3$ এবং $n = 4$ হয়। অর্থাৎ দুটি তীব্রতা চরমই কেবল দৃশ্য অঞ্চলে পাওয়া যাবে।

এই তীব্রতা চরম দুটির ব্যবধান অনেকটাই হয় এবং এদের একটিকে এমনভাবে ঢেকে আড়াল করা যায় যে একটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যই শুধু পারগত হয়। এইভাবে, কোন সাদা আলোর রশ্মিগুচ্ছ থেকে একটি বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যকে পরিস্রুত করা সম্ভব।

এই ব্যবস্থাকে ব্যতিচার পরিস্রাবক বলা হয়।

পরিস্রাবক উৎপাদন : ব্যতিচার পরিস্রাবক পাওয়া যেতে পারে আধুনিক নির্বাত অবক্ষেপণ কৌশল প্রয়োগ করে (vacuum deposition Technique)।

একটি কাচের প্লেটের উপর নির্বাত অবক্ষেপণ কৌশল প্রয়োগ করে সাধারণত অ্যালুমিনিয়াম বা রূপার একটি ধাতব ফিল্ম অবক্ষিপ্ত (deposited) হয়। তারপর পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের একটি পাতলা স্তর ধাতব ফিল্মের উপর অবক্ষেপণ করা হয়। এ ধরণের একটি পদার্থ হল ক্রায়োলাইট $(3NaFAlF_3)$। এই ফিল্মটিকেও আবার একটি ধাতব ফিল্ম দিয়ে ঢাকা হয়। এই ধাতব ফিল্মটি যাতে কোনভাবেই নষ্ট না হয় সেজন্য তাহার উপর আবার একটি কাচ ফলক স্থাপন করা হয়। এইভাবে দুটি কাচ ফলকের মধ্যে একটি ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার ব্যবস্থা গড়ে ওঠে।



চিত্র 6.12 : ব্যতিচার পরিস্রাবক।

পরাবৈদ্যুতিক ফিল্ম-এর বেধ পরিবর্তন করে আমরা যে কোন বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যকে পরিস্রুত করতে পারি। কিন্তু পরিস্রুত আলোর একটি নির্দিষ্ট প্রস্থ থাকে, অর্থাৎ তীক্ষ্ণ শীর্ষযুক্ত একটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উভয়পার্শ্বে অপ্রশস্ত বর্ণালি পাওয়া যায়। পারগত বর্ণালির তীক্ষ্ণতা নির্ণয় করা হয় তৈরী ফ্যাব্রি-পেরো ব্যবস্থার বিভেদন ক্ষমতার দ্বারা এবং এর থেকেই বলা যায় তল দুটির প্রতিফলনাংক দ্বারাও বর্ণালির তীক্ষ্ণতা নির্ণয় করা সম্ভব। প্রতিফলনাংক যতই বড় হবে

পারগত বর্ণালিও ততই অপ্রশস্ত হবে। কিন্তু তাই বলে ধাতব ফিল্মগুলির বেধ অনির্দিষ্টভাবে যতখুশি বাড়ানো সম্ভব নয় কারণ সেক্ষেত্রে শোষণের দরুণ পারগত আলোর তীব্রতা হ্রাস পাবে।* এই প্রতিবন্ধকতা দূর করার জন্যই তাই ধাতব ফিল্মগুলির বদলে সব স্তরগুলিই হয় পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের।

যে সব পরাবৈদ্যুতিক পদার্থ দিয়ে স্তরগুলি গঠিত হবে তাদের প্রতিসরাংকগুলি যথাযথ হ'লেই তবে তাদের অবক্ষেপণ ক'রে গড়ে তোলা হয় সকল পরাবৈদ্যুতিক স্তরের ব্যতিচার ব্যবস্থা। কোন একটি তলের প্রতিফলনাংক বাড়াতে গেলে, তলটির উপর পরাবৈদ্যুতিক একটি ফিল্ম তৈরী ক'রে কিভাবে তা করা হয় এ সম্পর্কে আপনারা পূর্বের এককেই জেনেছেন। কাচ ফলকের প্রতিফলনাংক বাড়াতে গেলে যে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থ কাচের উপর অবক্ষেপণ করা হয় তার প্রতিসরাংক কাচের প্রতিসরাংকের তুলনায় বেশি হওয়া প্রয়োজন। কাচ এবং পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের প্রতিসরাংকের মধ্যে পার্থক্য যতই বড় হবে প্রতিফলনাংকও ততই বৃদ্ধি পাবে। ব্যতিচার পরিস্রাবকে সাধারণত: যে পদার্থগুলি ব্যবহৃত হয় তাদের মধ্যে রয়েছে টিটানিয়াম অক্সাইড এবং জিংক সালফাইড। এদের প্রতিসরাংক হল যথাক্রমে $n = 2.8$ এবং $n = 2.3$। কাচের প্রতিফলনাংক বৃদ্ধির জন্য অবক্ষিপ্ত পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের ফিল্ম-এর বেধটি হবে $\frac{\lambda}{4}$। যেমন ব্যতিচার পরিস্রাবক পেতে হলে নিম্নস্তরের (substrate) কাচ ফলকের উপর টিটানিয়াম অক্সাইডের $\frac{\lambda}{4}$ বেধের একটি ফিল্ম অবক্ষেপণ করতে হবে তারপর অপেক্ষাকৃত কম প্রতিসরাংকের (যেমন ক্রায়োলাইট বা ম্যাগনেসিয়াম ফ্লুয়োরাইড) পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের একটি পাতলা স্তর অবক্ষেপণ করা হয়। এই স্তরটির উপরে আবার $\frac{\lambda}{4}$ বেধের অপেক্ষাকৃত বেশী প্রতিসরাংকের একটি পদার্থ অবক্ষেপণ করা হয়। প্রতিফলনাংকে বৃদ্ধি করার উদ্দেশ্যে এইভাবে পরপর অপেক্ষাকৃত বেশি এবং অপেক্ষাকৃত কম প্রতিসরাংকের পদার্থ ব্যবহার করে বহুস্তরীয় ব্যবস্থাটি তৈরী হয়। এইভাবে 90%-এরও বেশী প্রতিফলনাংক পাওয়া সম্ভব কোন বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে। এই ধরণের পরিস্রাবকগুলি দৃশ্য অঞ্চলের মধ্যে যে কোন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তীব্রতা চরম শীর্ষের সঙ্গে 11 Å বা তার চেয়েও ছোট একটি ব্যাণ্ডের প্রসার (bandwidth) পারগত করতে সমর্থ হয়।

6.6 সারাংশ

- কীভাবে বহুরশ্মীয় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ উৎপন্ন হয় তা আমরা শিখলাম। বহুরশ্মীয় প্রতিফলিত ও পারগত ব্যতিচারের লব্ধি তীব্রতা যথাক্রমে

$$I_r = I_o \times \frac{2r^2(1-\cos\delta)}{1+r^4-2r^2\cos\delta}$$

$$I_t = I_o \times \frac{\left(1-r^2\right)^2}{1+r^4-2r^2\cos\delta}$$

- প্রতিফলিত রশ্মিগুলির ব্যতিচারে তীব্রতার চরম ও অবম মান হল যথাক্রমে

$$\left(I_r\right)_{\text{চরম}} = I_o \times \frac{4r^2}{\left(1+r^2\right)^2} = I_o \times \frac{4R}{(1+R)^2}$$

$$\left(I_r\right)_{\text{অবম}} = 0$$

● সূক্ষ্মতা-গুণাংক বা ফিনেস গুণাংক

$$F = \left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2 = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

● এয়ারি অপেক্ষক

$$\alpha(\theta) = \frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

● বহুরশ্মীয় ব্যতিচার নীতিকে কাজে লাগিয়ে যে ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার মাপক তৈরী হল, তাতে উৎপন্ন ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের তীব্রতা বন্টনের রাশিমালা

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{1+\frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\frac{\delta}{2}}$$

● উজ্জ্বল ব্যতিচার রেখার তীক্ষ্ণতার ধারণা পাওয়া যায়।

● বর্ণালীতত্ত্ব বিশ্লেষণে ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের কীভাবে ব্যবহার করা যায় তা জানতে পারা যায়।

● ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের বর্ণীয় বিভেদন ক্ষমতা হল

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{4n\pi\sqrt{F}d\cos\theta_i}{4.149\lambda}$$

● লুমার-গেহরকের ফলক সম্পর্কে ধারণা।

● ...ব্যতিচার পরিস্রাবক এবং এটা প্রস্তুত করার পদ্ধতি ও এর প্রয়োগ।

6.7 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. একটি ফ্যাব্রি-পেরো ইটালনের ফলকতলের প্রতিফলনাংক $(R = r^2)$ 0.9। 5000 Å অবস্থানে দুটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ব্যবধান $\Delta\lambda = 0.1$ Å হলে অভিলম্ব আপতনের ক্ষেত্রে যথাযথভাবে তরঙ্গদুটির বিভেদন হবে ইটালোনটির ফলকদ্বয়ের সর্বনিম্ন ব্যবধান কত হলে? [এখানে $n = 1$]

2. কোন ফ্যাব্রি-পেরো ইটালোনের প্রতিফলন গুণাংক (reflection coefficient) $r = 0.9$ হলে তার (i) সূক্ষ্মতা গুণাংক (coefficient of finesse), (ii) অর্ধ-প্রস্থ (half width-full width of the fringe at half of its intensity) এবং (iii) ফিনেস বা সূক্ষ্মতা নির্ণয় করুন।

6.8 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

1. এই প্রশ্নটির উত্তরের জন্য সমীকরণ (6.12) এবং (6.11)-এর সাহায্য নিন।

অনুশীলনী 2

2. ব্যতিচার নকশার অর্ধপ্রস্থ $w = \frac{4}{\sqrt{F}}$। এই অর্ধ প্রস্থ যত ক্ষুদ্র হবে, ব্যতিচার রেখা ততই তীক্ষ্ণতর হবে। অর্থাৎ

তীক্ষ্ণতা (S) $\propto \frac{1}{\text{অর্ধ- প্রস্থ}}$

$$\therefore S \propto \frac{1}{w}$$

$$\propto \sqrt{F}$$

কিন্তু $$F = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

যেহেতু $R < 1$ তাই R বৃদ্ধি পেলে F বৃদ্ধি পাবে।

অর্থাৎ Sও বৃদ্ধি পাবে।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

1. ফাব্রি-পেরো ইটালোনের বর্ণীয় বিভেদন ক্ষমতা

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{4\pi n\sqrt{F} d\cos\theta_i}{4.149\lambda}$$

এখানে $\theta_i = 0^o, n = 1, F = \frac{4R}{(1-R)^2} = \frac{4 \times 0.9}{(0.1)^2} = 360$

অতএব ফলক দ্বয়ের ব্যবধান

$$d = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \times \frac{4.149}{4\pi\sqrt{360}} = \frac{\left(5 \times 10^{-5}\right)^2 \times 4.149}{0.1 \times 10^{-8} \times 4\pi \times \sqrt{360}} = 0.435 \text{ মি.মি.}$$

2. i) সূক্ষ্মতা গুণাংক $F = \frac{4r^2}{\left(1-r^2\right)^2} = \frac{4 \times (0.9)^2}{\left[1-(0.9)^2\right]^2}$

$$= \frac{4 \times 0.81}{(1-0.81)^2} = 89.75 \simeq 90$$

ii) অর্ধ-প্রস্থ $w = \frac{4}{\sqrt{F}} = \frac{4}{\sqrt{90}} = 0.42$ rad

iii) সূক্ষ্মতা বা ফিনেস্ হল

$$\Phi = \frac{2\pi}{w} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2} = \frac{\pi\sqrt{90}}{2} = 14.96$$

একক 7 ❑ ফ্রন হফার ব্যবর্তন

গঠন

7.1 প্রস্তাবনা

জ্যামিতীয় আলোক বিজ্ঞান থেকে আপনারা জানেন যে যদি কোন বিন্দু আলোক উৎসের সম্মুখে একটি অনচ্ছ বস্তু রাখা যায় তবে পশ্চাতে রক্ষিত পর্দার উপর তার একটি 'সুস্পষ্ট' ছায়া প্রক্ষিপ্ত হবে। 'সুস্পষ্ট' বলতে বুঝতে হবে যে ছায়াটি একটি তীক্ষ্ণ সীমারেখা দ্বারা আবদ্ধ। কিন্তু বাস্তবে এরূপ ঘটে না। লক্ষ্য করলে দেখা যায় গাঢ় ছায়াটিকে ঘিরে আছে একটা হালকা আলোর বলয়। আবার গাঢ় ছায়ার সীমানাকে অতিক্রম করে অর্থাৎ জ্যামিতিক ছায়ার মধ্যেও হালকা আলোক বলয় দেখা যায়। স্পষ্টতই এ ঘটনা আলোর সরলরেখায় গমনের ধারণাকে নস্যাৎ করে। ইতালীয় বিজ্ঞানী ফ্রানসেসকো মারিয়া গ্রিমালদি (1618-63) সপ্তদশ শতাব্দীর মাঝামাঝি নানা পরীক্ষা দ্বারা আলোকের সরলরৈখিক গমন থেকে এরূপ বিচ্যুতি সর্বপ্রথম লক্ষ্য করেন। তিনি এই ঘটনার নামকরণ করেন দিফ্রাকশিও (diffractio) যাকে আমরা বলছি ব্যবর্তন (diffraction)।

আলোকের (সঠিক অর্থে তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের) এই যে প্রতিবন্ধকের জ্যামিতিক ছায়ার অভ্যন্তরে অনুপ্রবেশ করার ঘটনা, এটা যে কোন প্রকার তরঙ্গের ক্ষেত্রেই সত্য। আলোক তরঙ্গ বা শব্দ তরঙ্গ বা জড় তরঙ্গ (matter wave) যাই হোক না কেন, যখনই কোন তরঙ্গের তরঙ্গমুখের (wave front) কিছু অংশ কোনরূপভাবে বাধা পায় তখনই এরূপ ব্যবর্তনের ঘটনা ঘটে।

শব্দের ক্ষেত্রে আমরা এরূপ ব্যবর্তনের ঘটনা সর্বদাই লক্ষ্য করি। দরজার সোজাসুজি না থাকলেও অন্য ঘরে কথাবার্তার শব্দ-তরঙ্গ আমরা এই ব্যবর্তনের জন্যই শুনতে পাই। বুঝতে অসুবিধা নেই যে ব্যবর্তন শব্দের ক্ষেত্রে কত গুরুত্বপূর্ণ। আলোর ব্যবর্তনও সমান গুরুত্বপূর্ণ। যেমন ধরুন আলোক যন্ত্রের কথা। আমরা যেসব আলোক যন্ত্র ব্যবহার করি সেসব যন্ত্র আলোক তরঙ্গমুখের সামান্য অংশ ব্যবহার করে। অতএব এই যন্ত্রে আলোর ব্যবর্তন ঘটবে। ফলে গঠিত প্রতিবিম্ব অপবর্তনের জন্য ক্রটিযুক্ত হবে (অর্থাৎ গঠিত প্রতিবিম্বে ব্যবর্তনগত নকশা (diffraction pattern) দৃষ্ট হবে।

আমাদের দৈনন্দিন জীবনে এবং বৈজ্ঞানিক ও প্রযুক্তিগত কর্মক্ষেত্রে ব্যবর্তনের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা থাকায় ব্যবর্তন সম্পর্কে তত্ত্বগত বিশ্লেষণ জরুরি। এ সম্পর্কে সর্বপ্রথম ধারাবাহিক অনুসন্ধান ও ব্যাখ্যা করার কাজটি করেন ফরাসী পদার্থ বিজ্ঞানী অগাস্তিন জাঁ ফ্রেনেল (Augustin Jean Fresnel, 1785-1841)। যে নীতিকে অবলম্বন করে ফ্রেনেল ব্যবর্তনের ব্যাখ্যা করেন তাকে বলে ''হাইগেন্স-ফ্রেনেল নীতি' (Hygens-Fresnel Principle)। কীভাবে আলোক তরঙ্গ গমন করে তা ব্যাখ্যা করতে গিয়ে হাইগেনস আমাদের 'গৌণ তরঙ্গিকার' (secondary wavelets) ধারণা দিয়েছেন। ফ্রেনেল ব্যবর্তন ব্যাখ্যা করতে গিয়ে বলেন — বাধাপ্রাপ্ত তরঙ্গ মুখের মুক্ত অংশের বিভিন্ন বিন্দু থেকে যেসব গৌণ তরঙ্গিকা নির্গত হয় তাদের উপরিপাতজাত ব্যতিচার থেকে ব্যবর্তন নকশা বা ফ্রিঞ্জের (diffraction fringe) সৃষ্টি হয়। অর্থাৎ ফ্রেনেলের মতে ব্যবর্তনও ব্যতিচার। কিন্তু একই তরঙ্গমুখের বহুসংখ্যক তরঙ্গিকার ব্যতিচার ব্যবর্তন সৃষ্টি করা ও নিরীক্ষণ করার দুটি পদ্ধতি আছে। এই দুই পদ্ধতিজাত ব্যবর্তনকে বলা হয় ফ্রেনেল ব্যবর্তন ও ফ্রন হফার ব্যবর্তন। প্রখ্যাত জার্মান পদার্থ বিজ্ঞানী জোসেফ ভন ফ্রন হফার (Joseph Von Fraun Hofer, 1787-1826)-এর স্মরণে এই নামকরণ। অন্য দুটি নামও আছে। প্রথমটি নিকট ক্ষেত্র (near-field) ব্যবর্তন এবং দ্বিতীয়টি দূর-ক্ষেত্রে (far-field) ব্যবর্তন। উভয় প্রকার ব্যবর্তন কীরূপে পরীক্ষা পদ্ধতির দ্বারা সৃষ্টি করা যায় এবং তাদের পবস্পর সম্পর্ক কী তা আমরা পরবর্তী দুটি অনুচ্ছেদে বর্ণনা করব।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করার পর আপনি নিম্নে বিবৃত বিষয়গুলি সম্পর্কে দক্ষতা অর্জন করবেন

- ব্যবর্তন পর্যবেক্ষণের সহজ পরীক্ষা
- কীরূপে ফ্রেনেল ব্যবর্তন থেকে একটি বিশেষ ক্ষেত্র হিসেবে ফ্রন হফার ব্যবর্তন গঠিত হয়
- বিভিন্ন শ্রেণির স্লিট-এ ফ্রন হফার ব্যবর্তন
- ফ্রন হফার ব্যবর্তনের গাণিতিক বিশ্লেষণ
- যুগ্মস্লিট ও N-সংখ্যক সমান্তরাল স্লিটে ব্যবর্তন
- গ্রেটিং ও তার বর্ণালির বিশ্লেষণ
- আলোকযন্ত্রের প্রতিবিম্ব গঠন ও ব্যবর্তনের ভূমিকা
- দূরবীক্ষণ, অনুবীক্ষণ ও ব্যবর্তন গ্রেটিং-এর প্রভেদন ক্ষমতা সম্পর্কে র‍্যালে (Rayleigh) নির্ণায়ব (criterion)
- প্রভেদন ক্ষমতার কীরূপে উন্নতিবিধান সম্ভব
- মাইকেলসনের নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপক

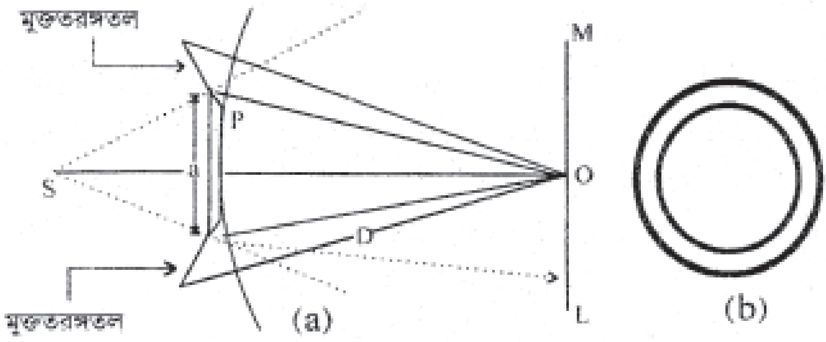
7.2 ফ্রেনেল ও ফ্রন হফার ব্যবর্তন

আপনারা ইতিমধ্যে জেনেছেন যে আলোর সরলরৈখিক গমনের (প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ব্যতিরেকে) যে কোন রূপ বিচ্যুতির ঘটনাকে বলে আলোর ব্যবর্তন। এও জেনেছেন যে এরূপ বিচ্যুতি ঘটাবার জন্য আলোক তরঙ্গের গমন পথে প্রতিবন্ধকতা সৃষ্টি করতে হবে। দুইভাবে এই প্রতিবন্ধকতা সৃষ্টি করা যায় : (1) আলোর গতিপথে অনচ্ছ তীক্ষ্ণ প্রান্তযুক্ত আংশিক বাধা এবং (2) সমগ্র তরঙ্গমুখকে অবরুদ্ধ করে স্লিটের মাধ্যমে আলোক তরঙ্গের সীমিত অংশকে গমন করতে দেওয়া। আবার এইরূপ প্রতিবন্ধকতা সৃষ্টি করার ফলে আলোর যে ব্যবর্তন হল তা নিরীক্ষণ করার জন্য চাই একটা পর্দা — যাকে আমরা বলব নিরীক্ষা-পর্দা। প্রতিবন্ধককে সেই অর্থে বলা যায় ব্যবর্তন সৃষ্টিকারী পর্দা বা সংক্ষেপে ব্যবর্তন পর্দা। তা হ'লে ব্যবর্তনের পরীক্ষার জন্য চাই (1): আলোক তরঙ্গ অর্থাৎ একটি আলোক-উৎস, (2) ব্যবর্তন পর্দা এবং (3) নিরীক্ষা পর্দা। এখন আমরা কীভাবে ফ্রেনেল ও ফ্রন হফার ব্যবর্তন সৃষ্টি হয় তার পরীক্ষাকেন্দ্রিক আলোচনা করব।

7.2.1 ব্যবর্তন নিরীক্ষণের পরীক্ষামূলক ব্যবস্থা

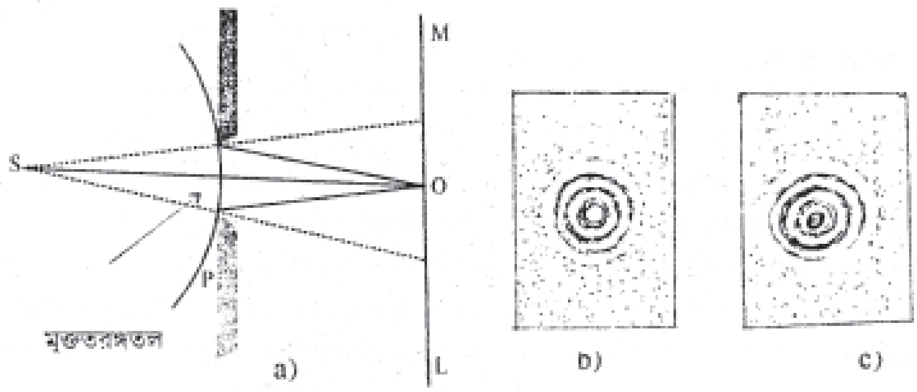
চিত্র 7.1-এ S একটি বিন্দুবৎ আলোক উৎস। তার সম্মুখে একটা ক্ষুদ্র বৃত্তাকার অনচ্ছ পর্দা — এটাই হল ব্যবর্তন পর্দা P S -এর বিপরীত পার্শ্বে নিরীক্ষা পর্দা LM। যদি ব্যবর্তন পর্দা P থেকে নিরীক্ষণ পর্দার দূরত্ব D এমন হয় যে $2D\lambda \sim a^2$ (চিত্র. 1a) যেখানে λ= S উৎসের আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং a= বৃত্তাকার অনচ্ছ পর্দার ব্যাসার্ধ তবে নিরীক্ষা পর্দার উপর অনচ্ছ P পর্দার যে ছায়া প্রক্ষিপ্ত হবে তার প্রান্ত ঘিরে থাকবে বৃত্তাকার আলোক ও অন্ধকারের বলয় শ্রেণি যাকে আমরা বলব ব্যবর্তন নকশা বা ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ (diffraction pattern or fringe)। O বিন্দুতে যে উজ্জ্বল বৃত্তাকার অঞ্চলটি দেখা যায় তার আলোক তীব্রতা প্রায় উৎসের তীব্রতার সমান। মনে হবে যেন অনচ্ছ ব্যবর্তন পর্দাটা নেই এবং আলো সরাসরি S উৎস থেকে O বিন্দুকে ঘিরে প্রতিবিম্ব গঠন করেছে। ফ্রিঞ্জসহ অনচ্ছ পর্দার ছায়ার সমগ্র নকশাটি উৎপন্ন হয়েছে আলোর ব্যবর্তনের জন্য। একে আমরা বলছি ফ্রেনেল ব্যবর্তন (চিত্র 7.1 b)।

দ্বিতীয় পরীক্ষা ব্যবস্থায় ব্যবর্তন পর্দাটা দ্বিতীয় শ্রেণির, অর্থাৎ স্লিট যুক্ত (চিত্র 7.2)। ধরা যাক স্লিটটা গোলাকার।



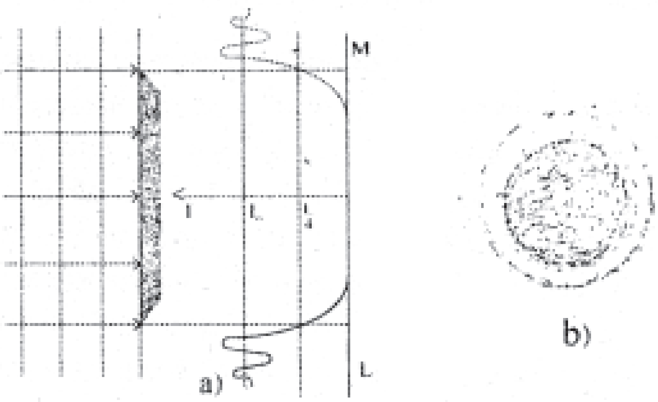
চিত্র 7.1 : অনচ্ছ পর্দায় ফ্রেনেল ব্যবর্তন।

ML নিরীক্ষা পর্দার উপর ফ্রেনেল ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যাবে যা কিনা পর পর সমকেন্দ্রিক উজ্জ্বল ও অনুজ্জ্বল বলয় দ্বারা গঠিত (চিত্র 7.2)। P পর্দা থেকে LM পর্দার দূরত্বের উপর নির্ভর করে নকশার কেন্দ্রটি উজ্জ্বল বা অনুজ্জ্বল হবে।



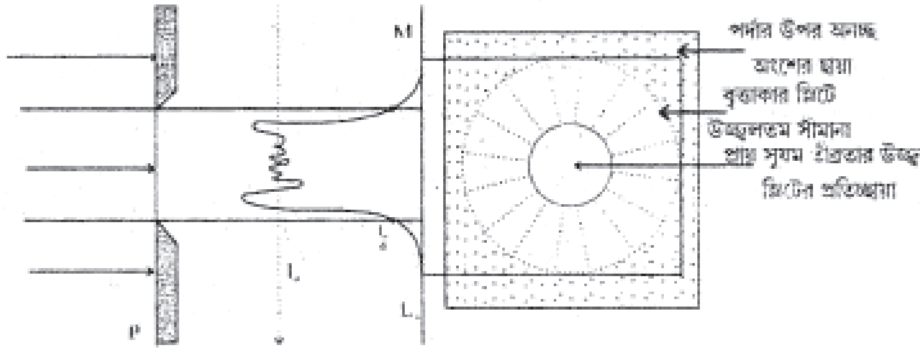
চিত্র 7.2 : স্লিট-এ ফ্রেনেল ব্যবর্তন

চিত্র 7.3-এ আলোক উৎস থেকে সমতল আলোক তরঙ্গ অনচ্ছ বৃত্তাকার ব্যবর্তন পর্দায় আপতিত হলে ML নিরীক্ষা পর্দায় অনচ্ছ বৃত্তাকার পর্দার একটি ছায়া পড়বে (চিত্র 7.3 b)। কিন্তু এই ছায়ার প্রান্ত জ্যামিতীয়



চিত্র 7.3 : বৃত্তাকার অনচ্ছ পর্দায় সমতল আলোক তরঙ্গের ব্যবর্তন।

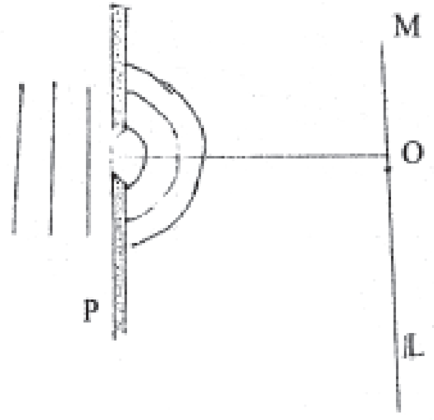
আলোক বিজ্ঞানের ধারণা মত সুস্পষ্ট তীক্ষ্ণ রেখায় আবদ্ধ হবে না। প্রান্তের দিকে কিছু আলোকের অনুপ্রবেশের ফলে সেখানে ছায়ার গাঢ়তা কমে যাবে। আবার জ্যামিতিক অঞ্চলের বাইরে আলোর তীব্রতায় হ্রাসবৃদ্ধি লক্ষ্য করা যায়। চিত্র 7.3 a) এ তীব্রতা I-এর পরিবর্তন লক্ষণীয়। তীব্রতা লেখ জ্যামিতিক ছায়ার কিছুটা অভ্যন্তর থেকে ক্রমাগত বৃদ্ধি পাওয়ার পর একটা সর্বোচ্চমান I_0 কে কেন্দ্র করে হ্রাসবৃদ্ধি পায়।



চিত্র 7.4 : স্লিটযুক্ত ব্যবর্তন পর্দায় ফ্রেনেল ব্যবর্তন।

যখন ব্যবর্তন পর্দা P-এ বৃত্তাকার স্লিট থাকে তখন, LM নিরীক্ষা পর্দার উপর স্লিটের ব্যবর্তন প্রতিবিম্ব গঠিত হয় (চিত্র7.4)। লেখ-এর সাহায্যে এই তীব্রতার পরিবর্তন দেখানো হয়েছে।

উপরে যে সব ফ্রেনেল ব্যবর্তন পাওয়া গেল সেসব ক্ষেত্রে আমরা নিরীক্ষা পর্দার উপর যে সব ছায়া বা প্রতিচ্ছায়া পেয়েছি সেগুলির সকলেই প্রতিবন্ধক বা স্লিটের প্রতিবিম্ব। বরং বলা ভাল— ব্যবর্তন নকশাযুক্ত প্রতিবিম্ব (fringed image of obstacles or slits/apertures)। আমরা আরো লক্ষ্য করলাম যে উৎস থেকে আগত তরঙ্গ গোলীয় (উৎস নিকটে) বা সমতল (উৎস অসীমে বা কোন অভিসারী লেন্সের ফোকাসে) হতে পারে কিন্তু ব্যবর্তন পর্দা থেকে নিরীক্ষা পর্দা (যেমন LM) সসীম দূরত্বে। কিছুটা দূরত্ব পর্যন্ত নিরীক্ষা পর্দার উপর ফ্রেনেল ব্যবর্তন যুক্ত প্রতিবিম্ব পাওয়া যায়। একে বলে ফ্রেনেল ব্যবর্তন অঞ্চল (Fresnel diffraction zone)। এবার আমরা ফ্রেনেল ব্যবর্তন সম্পর্কে বলতে পারি **যে ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে আপতিত তরঙ্গে ও ব্যবর্তিত তরঙ্গের (বা কেবলমাত্র ব্যবর্তিত তরঙ্গের) তরঙ্গ তলের বক্রতা অগ্রাহ্য করা যায় না সেই সব ক্ষেত্রের ব্যবর্তনকে বলে ফ্রেনেল ব্যবর্তন।**



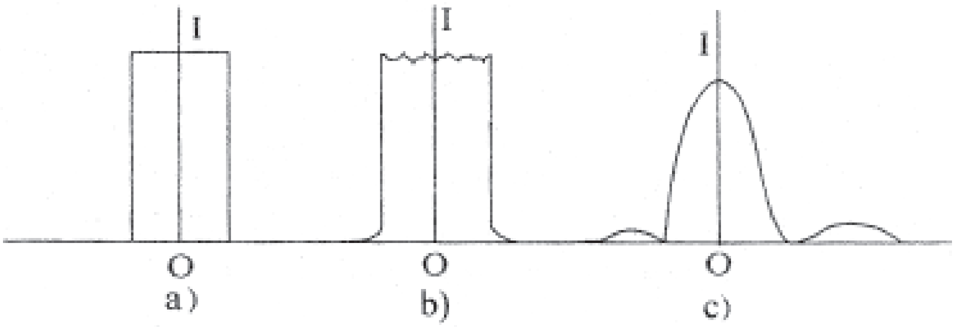
চিত্র 7.5 : সমতল তরঙ্গ বা সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের ব্যবর্তন।

অন্যদিকে যেসব ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে আপতিত ও ব্যবর্তিত তরঙ্গের তরঙ্গতল সমতল সেসব ক্ষেত্রে উৎপন্ন হয় ফ্রন হফার ব্যবর্তন।

এটা প্রমাণের জন্য আমরা অন্য একটা সাধারণ পরীক্ষার পরিকল্পনা করতে পারি।

P ব্যবর্তন পর্দার স্লিটে এই ব্যবর্তন ঘটছে। চিত্র 7.5-এ কোন অভিসারী লেন্সের ফোকাসে রক্ষিত কোন আলোক উৎস থেকে বা বহুদূরবর্তী কোন আলোক উৎস থেকে আসা সমতল তরঙ্গ P ব্যবর্তন পর্দার স্লিটে আপতিত হয়। স্লিট অতিক্রম করার পর আলোকতরঙ্গ ব্যবর্তিত হয় ও LM নিরীক্ষা পর্দার উপর স্লিটের প্রতিচ্ছায়া গঠন করে।

যখন LM পর্দা স্লিটের খুবই কাছে ওর সমান্তরালে স্থাপন করা হয় তখন পর্দার উপর সুষম উজ্জ্বলতার স্লিট সদৃশ প্রতিবিম্ব গঠিত হয় (চিত্র 7.6a)। এরকম ক্ষেত্রে বলা যায় আলো জ্যামিতিক আলোক বিজ্ঞানের ধারণামত সরলরেখায় যাচ্ছে। কিন্তু LM পর্দাটিকে ধীরে ধীরে দূরে সরিয়ে নিতে থাকলে কিছু দূর পর্যন্ত পর্দার উপর স্লিটের প্রতিবিম্বকে চিনতে পারা যাবে। যদিও এই প্রতিবিম্বের প্রান্ত ঘিরে ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে (চিত্র 7.b)। যতদূর পর্যন্ত এই রকম ফ্রিঞ্জযুক্ত স্লিটের প্রতিবিম্ব দৃশ্য হবে ততদূর পর্যন্ত অঞ্চলকে বলে ফ্রেনেল ব্যবর্তন অঞ্চল। এই অঞ্চলটা স্লিটের নিকটবর্তী বলে ফ্রেনেল ব্যবর্তনকে নিকট ক্ষেত্র (near field) ব্যবর্তনও বলা হয়। লক্ষ্যণীয় যে এই নিকটবর্তী অঞ্চলে ব্যবর্তিত তরঙ্গ গোলীয় থাকে অর্থাৎ ব্যবর্তিত তরঙ্গতলের বক্রতা এই অঞ্চলের মধ্যে অগ্রাহ্য করা যায় না। কিন্তু পর্দা LM কে যদি বহুদূরে নিয়ে যাওয়া যায় তখন আগের দেখা প্রান্তিক ফ্রিঞ্জ ছড়িয়ে পড়ে (চিত্র 7.c) এবং স্লিটের প্রতিবিম্বকে আর চেনা যায় না। চিত্র 7.6-এ LM পর্দায় বিভিন্ন অবস্থানে স্লিটের প্রতিবিম্বের তীব্রতার লেখ প্রদর্শিত হল।



চিত্র 7.6 : নিরীক্ষা-পর্দার বিভিন্ন দূরত্বে তার উপর স্লিট অতিক্রমকারী আলোর তীব্রতার পরিবর্তন। a) যখন নিরীক্ষা-পর্দা ব্যবর্তন পর্দার সংস্পর্শে, b) যখন নিরীক্ষা পর্দা ব্যবর্তন পর্দা থেকে সামান্য দূরে (কয়েক সেন্টিমিটার) c) যখন নিরীক্ষা পর্দা 20 মিটারের মত দূরে।

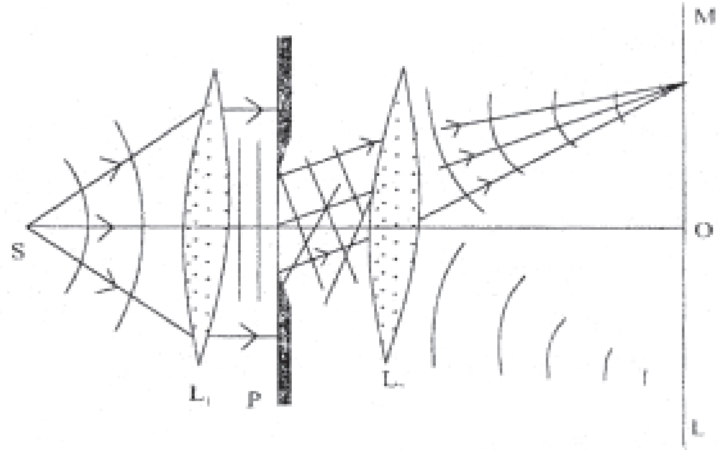
ব্যবর্তন পর্দায় স্লিটের আকৃতির বা স্লিট সংখ্যার পরিবর্তন ঘটালে চিত্র (7.6 c) প্রদর্শিত তীব্রতা বণ্টনের পরিবর্তন ঘটে। কিন্তু সেই পরিবর্তন পর্দার স্লিটের অবস্থার আকৃতি (বৃত্তকার বা রৈখিক) বা সংখ্যার (—একক বা যুগ্ম বা বহুসংখ্যক স্লিট) সঙ্গে এমনভাবে সম্পর্কিত নয় যে সহজে তা লক্ষ্য করা যাবে।

দূরবর্তী LM পর্দার উপর এই যে ব্যবর্তন নকশা যা স্লিটের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব নয় তাকে আমরা বলছি ফ্রন হফার ব্যবর্তন। আবার আমরা লক্ষ্য করি — কিছুদূর পর্যন্ত LM পর্দার উপর স্লিটের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব দেখতে পাই — এটা হল ফ্রেনেল ব্যবর্তন বা নিকট ক্ষেত্র ব্যবর্তন। কিন্তু নিরীক্ষা পর্দা LM বহুদূরে সরিয়ে নিলে তার উপর আমরা ফ্রিঞ্জ দেখতে পাবো ঠিকই, তবে তা কোনভাবেই স্লিটের প্রতিবিম্ব নয়। একে আমরা বলছি দূরক্ষেত্র ব্যবর্তন বা ফ্রন হফার ব্যবর্তন। এরও পর দূরত্ব বৃদ্ধি করলে ফ্রিঞ্জের আকার পাল্টায় কিন্তু আকৃতি একই থাকে। এটাই হল ফ্রন হফার ব্যবর্তন অঞ্চল — যে অঞ্চলে ব্যবর্তিত আলোক তরঙ্গকে সমতল তরঙ্গরূপে বিবেচনা করা চলে।

আমরা আরো দুটি বিষয় লক্ষ্য করি। যদি নিরীক্ষা-পর্দাকে দূরে রেখে আমরা আলোক উৎসকে ব্যবর্তন পর্দার স্লিটের নিকটে নিয়ে আসি অর্থাৎ যদি আপতিত তরঙ্গকে গোলীয় তরঙ্গে পরিণত করি — আমরা দেখব, নিরীক্ষা-পর্দার উপর আবার ফ্রেনেল ব্যবর্তনযুক্ত স্লিটের প্রতিবিম্ব গঠিত হয়েছে।

আবার যদি চিত্র 7.5-এর ব্যবস্থাটি বজায় রেখে আপতিত আলোক তরঙ্গের দৈর্ঘ্য কমানো হতে থাকে তাহলেও দূরবর্তী নিরীক্ষা পর্দার উপর ফ্রেনেল ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যাবে। এক্ষেত্রে অবশ্য পর্দার স্থলে আলোকচিত্র

গ্রহণের ফিল্ম ব্যবহার করতে হবে। এই ফিল্মের উপরই গঠিত হবে ফ্রেনেল ব্যবর্তনের ফ্রিঞ্জযুক্ত স্লিটের ছবি। যদি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\rightarrow 0$ হয় অর্থাৎ তরঙ্গটি হয় জড়তরঙ্গ তবে ফিল্মের উপর স্লিটের ফ্রিঞ্জবিহীন প্রতিবিম্ব গঠিত হবে।



চিত্র 7.7 : উৎস ও নিরীক্ষা-পর্দাকে অপবর্তন পর্দার নিকটে রেখে ফ্রন হফার অপবর্তন সৃষ্টি।

চিত্র 7.7-এ ব্যবর্তন পর্দা P থেকে উৎস S এবং নিরীক্ষা পর্দা LM সন্নিকটে। যদি উৎস S থেকে লেন্স L_1 এর ফোকাসে রাখা হয় তবে P-এর স্লিটে সমতল তরঙ্গ আপতিত হবে। আবার LM পর্দাটি যদি L_2 লেন্সের ফোকাস তলে অবস্থিত হয় তবে P পর্দার সাপেক্ষে ওকে অসীমে মনে হবে। এ রকম ক্ষেত্রে LM পর্দার উপর S উৎসের ফ্রন হফার নকশাযুক্ত প্রতিবিম্ব গঠিত হবে।

7.2.2 দুই শ্রেণির ব্যবর্তনের তুলনা

চিত্র 7.5-এ ব্যবর্তন সৃষ্টির যে পরীক্ষা-ব্যবস্থাটি আলোচিত হয়েছে তাতে আপনারা দেখেছেন যে কেবলমাত্র নিরীক্ষা-পর্দার অবস্থানের পরিবর্তন ঘটিয়ে ফ্রেনেল এবং ফ্রন হফার এই দুই প্রকারের ব্যবর্তনই পাওয়া যায়। স্বভাবতই বলতে হয় উভয় প্রকার ব্যবর্তনের মধ্যে মৌলিক কোন পার্থক্য নেই। আমরা আবার এও লক্ষ্য করি যে সুনির্দিষ্ট সীমারেখা দ্বারা উভয় ব্যবর্তনের অঞ্চলকে পৃথক করা না গেলেও তাদের অঞ্চলটি কিন্তু সহজেই চিহ্নিত করা যায়। আমরা আরো লক্ষ্য করি :

1) ফ্রেনেল ব্যবর্তনের জন্য উৎস এবং/অথবা নিরীক্ষাপর্দা উভয়কে ব্যবর্তন পর্দার (diffracting screen) থেকে এমন পরিমিত (finite) দূরত্বে রাখতে হবে যেন আপতিত ও ব্যবর্তিত উভয় তরঙ্গেরই তরঙ্গমুখের বক্রতা উপেক্ষণীয় না হয়।

   অপর পক্ষে ফ্রন হফার ব্যবর্তনের জন্য উৎস ও পর্দাকে স্লিট থেকে বহুদূরে (অর্থাৎ গাণিতিকভাবে অসীমে) অবস্থিত হতে হবে যেন আপতিত ও ব্যবর্তিত তরঙ্গের তরঙ্গ মুখ সমতল হয় অর্থাৎ যেন তরঙ্গমুখের বক্রতা অগ্রাহ্য করা যায়।

2) ফ্রেনেল ব্যবর্তনে নিরীক্ষা-পর্দার উপর গঠিত হয় স্লিটের ফ্রিঞ্জ-যুক্ত প্রতিবিম্ব বা প্রতিচ্ছায়া। অপরপক্ষে ফ্রন হফার ব্যবর্তনে নিরীক্ষা-পর্দার উপর গঠিত হয় উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব।

3) উভয় প্রকার ব্যবর্তনে যে ফ্রিঞ্জ উৎপন্ন হয় তা ঘটে স্লিটের তরঙ্গাংশের তরঙ্গিকা সমূহের ব্যতিচারের ফলে যাকে বলা হয় হাইগেনস্-ফ্রেনেল নীতি।

4) কেবলমাত্র নিরীক্ষা-পর্দার দূরত্ব নয়, উভয় প্রকার ব্যবর্তন নির্ভর করে স্লিটের আকার এবং তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উপরও। দেখানো যায় যে যদি $d > \frac{a^2}{\lambda}$ (a = স্লিটের বেধ, λ = তরঙ্গ দৈর্ঘ্য) হয়, যখন d হল ব্যবর্তন পর্দার স্লিট থেকে উৎস বা নিরীক্ষা পর্দার দূরত্বের ক্ষুদ্রতরটি; তা হ'লে ফ্রন হফার ব্যবর্তন হবে। অন্যথায় ফ্রেনেল ব্যবর্তন।

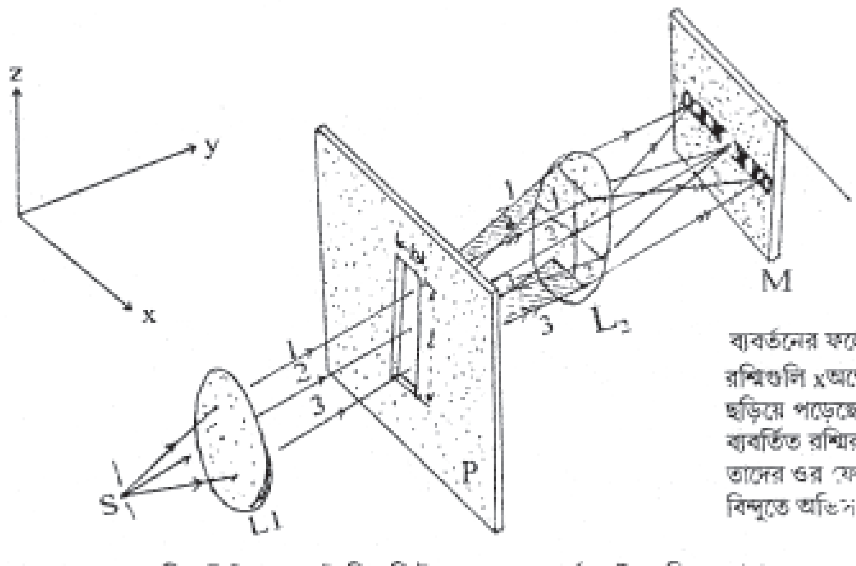
5) ফ্রেনেল ব্যবর্তনের গাণিতিক বিশ্লেষণ ফ্রন হফার ব্যবর্তনের গাণিতিক বিশ্লেষণ অপেক্ষা কঠিনতর। এর কারণ, ফ্রেনেল ব্যবর্তনে তরঙ্গতলের বক্রতা অগ্রাহ্য করা যায় না। এজন্য তরঙ্গতলের বিভিন্ন তরঙ্গিকার দশাসম্পর্ক বেশ জটিল হয়।

এই গাণিতিক বিষয়টি ফ্রন হফার ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে যথেষ্ট সরল এবং ফ্রন হফার ব্যবর্তনে যেহেতু উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব গঠিত হয় যা যে কোন লেন্সযুক্ত আলোকযন্ত্রের ক্ষেত্রেও সত্য হবে। এইজন্য আমরা বিভিন্ন ক্ষেত্রে প্রথমেই ফ্রন হফার ব্যবর্তন নিয়ে আলোচনা করব।

7.3 একক-স্লিটে ফ্রন হফার ব্যবর্তন

পূর্বেই আলোচিত হয়েছে কীরূপে ফ্রন হফার ব্যবর্তন পর্যবেক্ষণ করার পরীক্ষামূলক ব্যবস্থা করা যায়। সে আলোচনা ছিল সাধারণভাবে। আমরা এবার একক-স্লিটে ফ্রনহফার ব্যবর্তন পর্যবেক্ষণ করার পরীক্ষা ব্যবস্থাটি সম্পর্কে বিশদ আলোচনা করব। (চিত্র-7)-এর ত্রিমাত্রিক নকশাটি (চিত্র-7.8)-এ প্রদর্শিত হল। ব্যবর্তন পর্দার স্লিটটি হবে আয়তাকার। অংকের ভাষায় রৈখিক স্লিট বা রৈখিক ছিদ্র। কারণ স্লিটের দৈর্ঘ্য হবে বেধের তুলনায় বহুগুণ বড়। এত বড় যে, বলা হয় অসীম দৈর্ঘ্যের স্লিট। স্লিট দীর্ঘ হলে ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জের উজ্জ্বলতা বৃদ্ধি পায়।

একটি একবর্ণী আলোক উৎস S কে(চিত্র 7.8) একটি অভিসারী লেন্স L_1 এর ফোকাসে স্থাপন করে ফ্রন হফার ব্যবর্তনের জন্য প্রয়োজনীয় সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ উৎপাদন করা হয়। L_1-এর অক্ষ y-অক্ষের সমান্তরাল। xz তলের সমান্তরালে P ব্যবর্তন পর্দাকে স্থাপন করা হয়। এই পর্দার কেন্দ্রস্থলে z অক্ষের সমান্তরালে একটি রৈখিক স্লিট বর্তমান।



ব্যবর্তনের ফলে 1, 2, 3 আপতিত রশ্মিগুলি x অক্ষের সমান্তরালে ছড়িয়ে পড়েছে। 1,2,3 এর ব্যবর্তিত রশ্মির যারা সমান্তরাল L_2 তাদের ওর ফোকাস তলের এক বিন্দুতে অভিসারী করেছে।

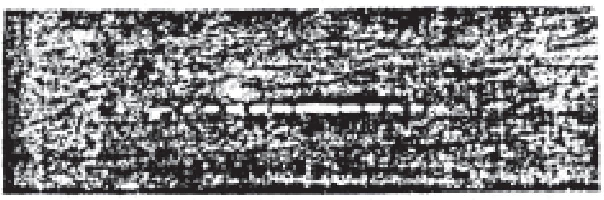
চিত্র 7.8 : একক-রৈখিক স্লিটে ফ্রন হফার ব্যবর্তন। উৎস বিন্দুবৎ (s)

স্লিট থেকে ব্যবর্তিত আলোক তরঙ্গকে L_1 এর সমাক্ষীয় অপর একটি অভিসারী লেন্স L_2 দ্বারা ওর ফোকাস তলে XZ তলের সমান্তরালে রাখা নিরীক্ষা-পর্দা M-এর উপর ফেলা হয়। যেহেতু M-পর্দা L_2-এর ফোকাস তলে অবস্থিত অতএব P পর্দা থেকে M পর্দা কার্যত অসীমে অবস্থিত হবে। অতএব ফ্রনহফার ব্যবর্তন পাওয়ার শর্তাবলি এই পরীক্ষা ব্যবস্থায় পূরণ করা হয়েছে। নিরীক্ষা-পর্দা M-এর উপর, অত:পর, ফ্রনহফার ব্যবর্তন নকশা গঠিত হবে।

কার্যক্ষেত্রে আমাদের দরকার একটি স্পেক্‌ট্রোমিটার। স্পেকট্রোমিটারের কলিমেটর স্লিটকে একটি সূচিছিদ্রে পরিণত করে তার উপর আলো ফেললে সেটি একটি বিন্দুবৎ উৎস বলে গ্রাহ্য হবে। কলিমেটর লেন্সকে স্যুস্টার পদ্ধতির সাহায্যে এমনভাবে স্থাপন করতে হবে যেন কলিমেটরের সূচিছিদ্র স্লিটটি ওর ফোকাসে অবস্থিত হয়। কলিমেটর লেন্স বর্ণিত পরীক্ষা ব্যবস্থায় L_1 লেন্সের অবস্থান নেবে। এর পর স্পেকট্রোমিটার টেবিলের উপর একক স্লিটযুক্ত ব্যবর্তন পর্দাকে স্থাপন করতে হবে। এই পর্দা থেকে আগত ব্যবর্তিত তরঙ্গ স্পেক্‌ট্রোমিটারের দূরবীক্ষণে প্রবেশ করলে ওর অভিলক্ষ্য লেন্সটি (objective) ঐ তরঙ্গকে লেন্সের ফোকাস তলে প্রক্ষিপ্ত করবে। এব্বার একটি অভিনেত্রের (eye-piece) সাহায্যে দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্যের ফোকাস তলে ফ্রন হফার ব্যবর্তন নকশা (Fraunhofer Diffraction pattern) দৃষ্টিগোচর হবে।

অভিলক্ষ্যের ফোকাসতলের নকশা

ফ্রন হফার ব্যবর্তন নকশা সম্পর্কে আমরা এরই মধ্যে জেনেছি যে পর্দার উপর উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব গঠিত হবে। এই ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব বলতে আমরা কী বুঝব? এখন পর্দা বলতে আমাদের চোখের উপর আছে অভিনেত্র— ক্রুশতার যুক্ত বা ক্রুশ-দাগ যুক্ত অভিনেত্র। এই ক্রুশতার যে তলে অবস্থিত সেই তলে গঠিত হবে ব্যবর্তন নকশা। যেহেতু এই নকশা উৎসের প্রতিবিম্ব দ্বারা গঠিত তাই আমরা আশা করব বৃত্তাকার বিন্দুবৎ উজ্জ্বল আলোকপটি পর্দায় গঠিত হবে। লক্ষ্য করতে হবে যে পর্দার উপর রৈখিক স্লিটের কোন প্রতিবিম্ব গঠিত হবে না। আমরা বাস্তবিক যে প্রতিবিম্ব দেখব তা কিন্তু বৃত্তাকার হবে না। আমরা দেখব বেশ কিছু লম্বাটে উপবৃত্তাকার উজ্জ্বল আলোক পটি যা x-অক্ষের সমান্তরালে অর্থাৎ উল্লম্ব স্লিটের অভিলম্বে ছড়ানো। আলোক পটিগুলি ফালি করা পটল সদৃশ এবং তারা পরস্পর থেকে ক্ষুদ্রাকার অনুজ্জ্বল অঞ্চল দ্বারা পৃথকীকৃত। যে উজ্জ্বল পটিটি সরাসরি লেন্সদ্বয়ের সাধারণ অক্ষের উপর অবস্থিত তার উজ্জ্বলতা সর্বাধিক এবং তার দৈর্ঘ্য অন্যান্য পটিগুলির দৈর্ঘ্যের দ্বিগুণ। আলোকপটির এই x-অক্ষ বা অনুভূমিক রেখায় ছড়িয়ে যাওয়ার ঘটনাটিই ফ্রন হফার ব্যবর্তন। পটিটি যে মাঝে মাঝে অনুজ্জ্বল অঞ্চল দ্বারা বিচ্ছিন্ন তার কারণ, এইসব অঞ্চলে স্লিট থেকে আগত তরঙ্গিকাগুলির তরঙ্গতল বিপরীত দশায় ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার ঘটিয়েছে।



চিত্র 7–.9 : রৈখিক স্লিটে বিন্দু-উৎসের ব্যবর্তনজাত ফ্রন হফার নকশা।

আমরা যদি উল্লম্ব স্লিটের বেধকে বৃদ্ধি করতে থাকি তা হলে ব্যবর্তন নকশার x-অক্ষ বরাবর দৈর্ঘ্য হ্রাস পেতে থাকে। অপর দিকে স্লিটের বেধকে যত কমান যায় ততই ব্যবর্তন নকশার দৈর্ঘ্য বৃদ্ধি পায়। আবার স্লিটের দৈর্ঘ্য বৃদ্ধি বা হ্রাস করলে উজ্জ্বল পটিগুলির উজ্জ্বলতা বৃদ্ধিও হ্রাস পায়। কিন্তু স্লিটের বেধ কিছু বেশি পরিমাণে বৃদ্ধি করলে পর্দার উপর কেবলমাত্র বিন্দুবৎ উৎসের একটি বৃত্তাকার উজ্জ্বল প্রতিবিম্ব পাওয়া যাবে। এর অর্থ হল বৃহৎ বেধের স্লিট আদৌ আর তরঙ্গমুখে বাধার সৃষ্টি করছে না। অন্যভাবে বলা যায় বৃহৎ বেধের স্লিট এক অর্থে স্লিটের অনুপস্থিতি।

ফ্রন হফার নকশার বৈশিষ্ট্য

বিন্দু-উৎস থেকে আগত একবর্ণী আলোক তরঙ্গ একক রৈখিক স্লিটে ব্যবর্তিত হওয়ার পর যে ফ্রন হফার নকশা সৃষ্টি হয় তার বৈশিষ্ট্যগুলি এরকম :

i) পর্দার উপর স্লিটের অভিলম্ব রেখায় কিছু আলোকপটির সৃষ্টি হবে।

ii) লেন্সদ্বয়ের সাধারণ অক্ষ পর্দাকে যে বিন্দুতে ছেদ করবে সেখানে উজ্জ্বলতম এবং বৃহত্তম বেধের উজ্জ্বল পটি দৃষ্ট হবে। একে বলে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বলপটি বা মুখ্য গরিষ্ঠ (principal maximum) ফ্রিঞ্জ।

iii) মুখ্য গরিষ্ঠের উভয় পার্শ্বে প্রতিসমভাবে আরো কয়েকটি উজ্জ্বল পটি দেখা যাবে। এদের বলে গৌণ গরিষ্ঠ। এদের উজ্জ্বলতা মুখ্য গরিষ্ঠের উজ্জ্বলতা থেকে অনেকটা কম। গৌণ গরিষ্ঠদের বেধ মুখ্য গরিষ্ঠের বেধের অর্ধেক।

iv) মুখ্য গরিষ্ঠের উজ্জ্বলতা কেন্দ্র-বিন্দুর উভয় পার্শ্বে প্রতিসমভাবে হ্রাস পায়। দুটি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ যে অনুজ্জ্বল বা অন্ধকার অঞ্চল দ্বারা বিভাজিত তাদের বলে লঘিষ্ঠ (minimum)। গৌণ গরিষ্ঠগুলির উজ্জ্বলতম বিন্দুটি সামান্য কেন্দ্রীয় উজ্জ্বলপটির দিকে সরে থাকে।

এই যে ব্যবর্তন নকশাটি আমরা পর্যবেক্ষণ করলাম এবার তার তত্ত্বগত ব্যাখ্যা ও বিশ্লেষণের অনুসন্ধান করা যাক।

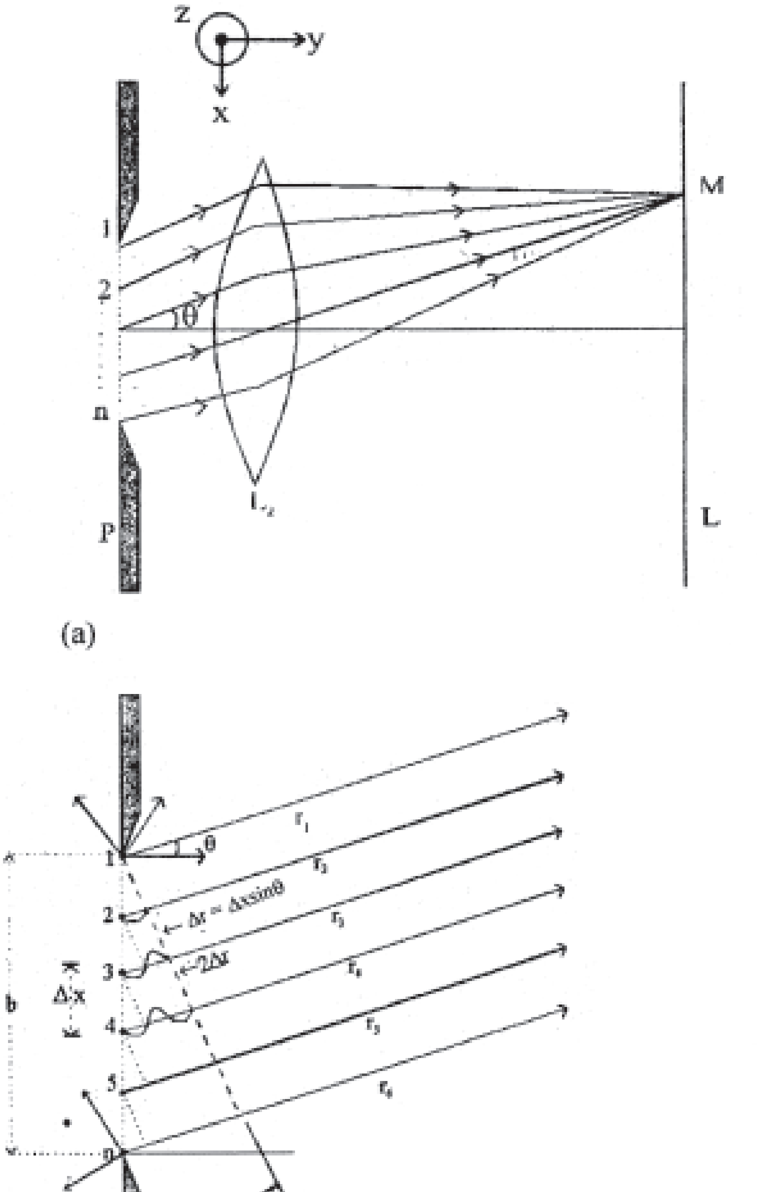
7.3.1 একক-স্লিটের ব্যবর্তন নকশা বা ফ্রিঞ্জের তীব্রতা বণ্টন

চিত্র-7.8 এ ব্যবর্তন সৃষ্টির যে প্রক্রিয়া ধরা হয়েছে তাতে যদিও নিরীক্ষা পর্দা সসীম দূরত্বে অবস্থিত, কিন্তু কার্যত ব্যবর্তন পর্দার স্লিট থেকে নিরীক্ষা পর্দা অসীম দূরত্বে অবস্থিত। স্লিটের বিভিন্ন বিন্দু থেকে গৌণ তরঙ্গিকার সমান্তরাল সমমুখী তরঙ্গগুলো পর্দার উপর একটি বিন্দুতে মিলিত হয় এবং ঐ বিন্দুতে একটা লব্ধি তরঙ্গের সৃষ্টি করে। স্পষ্টতই এই লব্ধি তরঙ্গের বিস্তার নির্ভর করবে স্লিটতল থেকে আগত বহুসংখ্যক তরঙ্গের অবদানের (contributions) উপর। এই অবদানের দুটো দিক আছে . i) নিরীক্ষা-পর্দার উপর কোন একটি বিন্দু সাপেক্ষে স্লিটের বিভিন্ন বিন্দুর কৌণিক অবস্থান বিভিন্ন হওয়ায় ঐ সব বিন্দু থেকে আসা তরঙ্গিকাগুলোর বিস্তার বিভিন্ন হবে। (কারণ তীব্রতা এই কোণের কোসাইনের সমানুপাতী)। ii) উল্লেখিত বিন্দু থেকে স্লিটের বিভিন্ন বিন্দুর দূরত্ব বিভিন্ন হওয়ায় ঐসব বিন্দু থেকে আসা তরঙ্গিকাগুলো পর্দার উপর বিন্দুটিতে বিভিন্ন দশায় (phase) মিলিত হবে।

যেহেতু নিরীক্ষা-পর্দাটি ব্যবর্তন পর্দা সাপেক্ষে বহুদূরে, তাই নিরীক্ষা-পর্দার উপর যেকোন বিন্দু থেকে স্লিটের যে কোন বিন্দুর কৌণিক অবস্থান একই হবে। অতএব স্লিটের বিভিন্ন বিন্দু থেকে নিরীক্ষা পর্দার কোন বিন্দু অভিমুখে যে সব তরঙ্গিকা যাবে তাদের সকলের বিস্তার একই ধরা চলবে। অতএব লেখা চলে

$$E_0(r_1) = E_0(r_2) = \ldots\ldots\ldots\ldots E_0(r_n) = E_0(r) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

এখানে $E_0 = yz$ তলের সঙ্গে θ কোণ গমনকারী তরঙ্গের বিস্তার এবং $r_1, r_2 \ldots\ldots\ldots r_n$ স্লিটের উপর বিভিন্ন বিন্দু থেকে নিরীক্ষা পর্দার উপর উল্লেখিত বিন্দুর দূরত্ব।



চিত্র 7.10 : ব্যবর্তন পর্দার স্লিটের সমতল তরঙ্গতল থেকে তরঙ্গিকাদল সবদিকে তরঙ্গ বিকিরণ করে। a) yz তলের সঙ্গে θ কোণে গমনশীল তরঙ্গদল L_2 লেন্সের ফোকাসতল LM নিরীক্ষা পর্দার উপর সমপাতিত হয়। b) যদি M বহুদূরে হয় তবে θ কোণে গমনকারী রশ্মিগুলো M-এ মিলিত হবে।

উল্লম্ব স্লিটের যে কোন xy তলে x-অক্ষ বরাবর বহুসংখ্যক গৌণ তরঙ্গিকার আন্দোলন কেন্দ্র থেকে বিভিন্ন দিকে আলোক তরঙ্গ ছড়িয়ে পড়ছে — এমনভাবে ব্যবর্তিত তরঙ্গকে বিবেচনা করা চলে (চিত্র 7.10 b)। 1, 2, 3......n- ইত্যাদি হল n-সংখ্যক গৌণ তরঙ্গিকার আন্দোলন কেন্দ্র। এই কেন্দ্রগুলি পর পর Δx দূরে দূরে অবস্থিত। যদি $\Delta x \to o$ হয় তবে $n \to \infty$ হবে, এবং সে ক্ষেত্রে

$(n-1)\Delta x = b =$ স্লিটের বেধ।

অর্থাৎ $n\Delta x = b$ যেহেতু n বিশাল বড়,

এইসব বিন্দু থেকে আলোক তরঙ্গগুলি যখন নিরীক্ষা পর্দার উপর M বিন্দুতে পৌঁছাবে, তখন তাদের দশা পরস্পর থেকে ভিন্ন হবে। যদি 1 থেকে আসা তরঙ্গের দশা হয় ωt তবে পর পর বিন্দুগুলি থেকে আসা তরঙ্গ গুলির দশা হবে $\omega t - \phi,\ \omega t - 2\phi, \omega t - 3\phi, \ldots\ldots\ldots\ldots \omega t - (n-1)\phi$

যেখানে

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{ আলোকীয় পথ পার্থক্য}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta r$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta x \sin\theta, \quad \lambda = \text{একবর্ণী আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য}$$

$$\therefore \quad \phi = \frac{2\pi b}{n\lambda} \sin\theta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(7.2)$$

অতএব M বিন্দুতে উপরিপাতের ফলে তরঙ্গগুলির লব্ধ সরণ হবে

$$E = E_0 \cos\omega t + E_0 \cos(\omega t - \phi) + E_0 \cos(\omega t - 2\phi) + \ldots + E_0 \cos\left(\omega t - \overline{n-1}\phi\right)$$

$$= E_0\left[\cos\omega t + \cos(\omega t - \phi) + \cos(\omega t - 2\phi) + \ldots\ldots + \cos\left(\omega t - \overline{n-1}\phi\right)\right]$$

জটিল রাশির আকারে লেখা যায়

$$E = E_0\left[e^{i\omega t} + e^{i(\omega t - \phi)} + e^{i(\omega t - 2\phi)} + \ldots\ldots + e^{i\left(\omega t - \overline{n-1}\phi\right)}\right]$$

$$= E_0 e^{i\omega t}\left\{1 + e^{-i\phi} + \left(e^{-i\phi}\right)^2 + \left(e^{-i\phi}\right)^3 + \ldots + \left(e^{-i\phi}\right)^{\overline{n-1}}\right\}$$

$$= E_0 e^{i\omega t} \times \frac{1 - \left(e^{-i\phi}\right)^n}{1 - e^{-i\phi}}$$

$$= E_0 e^{i\omega t} \times \frac{e^{-i\frac{n\phi}{2}}\left(e^{i\frac{n\phi}{2}} - e^{-i\frac{n\phi}{2}}\right)}{e^{-i\frac{\phi}{2}}\left(e^{i\frac{\phi}{2}} - e^{-i\frac{\phi}{2}}\right)}$$

$$= E_0 e^{i\omega t} \times \frac{e^{i(n-1)\frac{\phi}{2}}\left(e^{i\frac{n\phi}{2}} - e^{-i\frac{n\phi}{2}}\right)/2i}{\left(e^{i\frac{\phi}{2}} - e^{-i\frac{\phi}{2}}\right)/2i}$$

$$E = E_\theta \left(\frac{\sin\frac{\phi}{2}}{\sin\frac{\phi}{2}}\right) \times e^{i\left[\omega t - (n-1)\frac{\phi}{2}\right]} \qquad \text{...............(7.3)}$$

$$\operatorname{Re} E = E_\theta \frac{\sin\frac{n\phi}{2}}{\sin\frac{\phi}{2}} \times \cos\left[\omega t - (n-1)\frac{\phi}{2}\right] \qquad \text{...............(7.4)}$$

এখানে ReE বলতে জটিল E এর বাস্তব অংশ বোঝাচ্ছে।

সমীকরণ (7.2) এ $n \to \infty$ হলে $\phi \to o$ হবে

$$\therefore \sin\frac{\phi}{2} = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi b}{n\lambda}\sin\theta \text{ [(2) থেকে]}$$

$$\therefore E = E_\theta \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta\right)}{\frac{\pi b}{n\lambda}\sin\theta} \times e^{i\left[\omega t - (n-1)\frac{\phi}{2}\right]}$$

$$= nE_\theta \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta} \times e^{i\left[\omega t - (n-1)\frac{\phi}{2}\right]}$$

$$\therefore E = nE_\theta \frac{\sin\beta}{\beta} \times e^{i\left[\omega t - (n-1)\frac{\phi}{2}\right]} \qquad \text{...............(7.5)}$$

সমীকরণ (7.5) এর বাস্তব অংশরূপে লেখা যায়

$$E = A\frac{\sin\beta}{\beta}\cos(\omega t - \beta) \qquad \text{...............(7.5)}$$

যেখানে $A = nE_0$ এবং $n \to \infty$ হলে $(n-1)\frac{\phi}{2} = \frac{n\phi}{2}$

অর্থাৎ $\frac{n\phi}{2} = \frac{\lambda b}{\lambda}\sin\theta$

এবং যেখানে $\beta = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta$ ....(7.6)

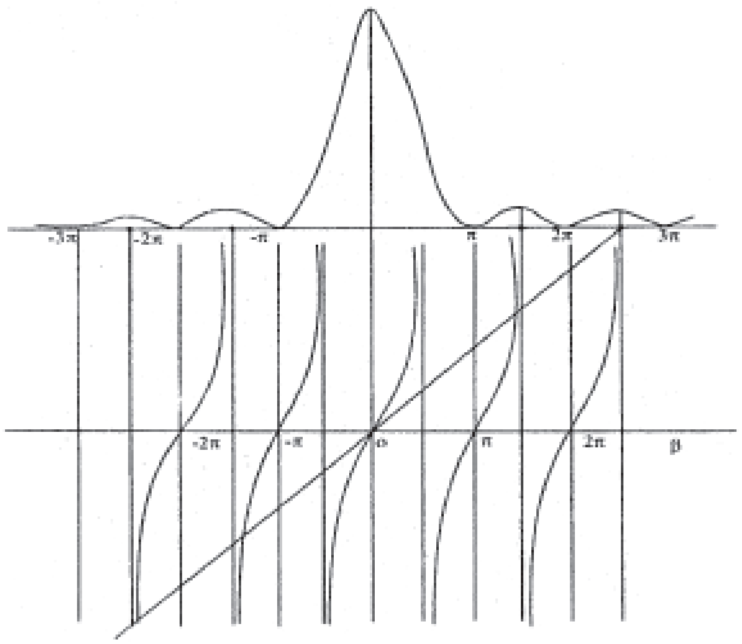
আলোক তরঙ্গের জটিল রাশিমালার ক্ষেত্রে তীব্রতার সংজ্ঞা $I = EE^*$

$$\therefore I = I_o\frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \qquad \text{...............(7.7)}$$

যেখানে $\therefore I_o = n^2E_0^2$

কিন্তু সমীকরণ 7.6 থেকে $\theta \to o$ হলে $\beta \to o$ আবার $\beta \to o$ হলে $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2} = 1$

অতএব I_o হবে I এর সর্বোচ্চ মান। অর্থাৎ যখন ব্যবর্তিত তরঙ্গ আপতন তরঙ্গের অভিমুখে থাকে তখন ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতা হবে চরম। $\theta = o$ হলে পর্দার উপর মুখ্য গরিষ্ঠের চরম তীব্রতা পাওয়া যায়। θকে বলে ব্যবর্তন কোণ।



চিত্র 7.11 : a) একক স্লিটে ফ্রনহফার ব্যবর্তনের তীব্রতা বণ্টন,
b) $\beta = \tan\beta$ থেকে β-এর মান নির্ণয় যা গৌণ গরিষ্ঠের অবস্থান নির্দেশ করে।

তীব্রতার চরম ও অবম অবস্থান

চিত্র 7.11 এ সমীকরণ 7.7 প্রদত্ত তীব্রতা বণ্টনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হল। y অক্ষ বরাবর I এবং x অক্ষ বরাবর β অংশায়িত করা হয়েছে। $I=I_o$, তীব্রতার চরম মান পাওয়া যায় যখন $\theta=o$, অর্থাৎ $\beta=o$, তীব্রতা β এর মান o থেকে $+\pi$ পরিবর্তিত হলে তীব্রতা দ্রুতহারে হ্রাস পায় এবং $\beta=+\pi$ এ $I=o$। β এর মানের $-\pi$ থেকে $+\pi$ পর্যন্ত পরিবর্তনে আলোকের উজ্জ্বলতার তীব্রতা বণ্টন মুখ্য গরিষ্ঠকে সূচিত করে। আবার তীব্রতার বিভিন্ন লঘিষ্ঠ পাওয়া যায় যখন

$$\beta = \pm\pi, \pm 2\pi, \ \pm 3\pi \ldots\ldots\ldots$$

$$= m\pi, \ m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots(7.8)$$

$\beta=o$ যখন $m=o$ অবস্থানটি কোন লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান নয়। ইতিমধ্যে দেখা গেছে এটা হল মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান। সমীকরণ (7.8) কে (7.6) এ ব্যবহার করে আমরা লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের শর্ত পাই

$$b\sin\theta = m\lambda, \quad m = \pm 1, \ \pm 2, \ \pm 3 \ldots \qquad \ldots\ldots\ldots(7.9)$$

স্পষ্টতই ব্যবর্তন কোণ θ (যে কোণে ব্যবর্তনের জন্য আলো ছড়িয়ে পড়ে) আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ এবং স্লিটের বেধ b এর উপর নির্ভর করে। যে আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য যত বেশি তার ব্যবর্তন কোণও তত বেশি হবে। অপর দিকে স্লিটের বেধ বেশি হলে আলো কম ছড়াবে অর্থাৎ ব্যবর্তন কোণ হ্রাস পাবে। এই যে ব্যবর্তনের ছড়িয়ে পড়ার বিষয়টা আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে, তাতে অন্য একটা প্রশ্ন আসে। সাদা আলোয় বিভিন্ন বর্ণের তরঙ্গ থাকে। সাদা আলোর ব্যবর্তন নকশা কেমন হবে? আমরা দেখছি যে মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতা সব তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে পাওয়া যায় যখন $\beta=0$ অর্থাৎ $\theta=0$। এ জন্য মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থানে সব বর্ণের মুখ্য গরিষ্ঠ গঠিত হওয়ায় সাদা আলোর মুখ্য গরিষ্ঠ অঞ্চল সাদা হবে। কিন্তু লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান λ-নির্ভর হওয়ায় ভিন্ন ভিন্ন বর্ণ ভিন্ন ভিন্ন অবস্থানে লঘিষ্ঠ তীব্রতা গঠন করবে। অর্থাৎ সাদা আলোর ব্যবর্তন নকশা হবে বহুবর্ণী যার কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জ হবে সাদা এবং বাহিরের দিকে থাকবে লালবর্ণের ফ্রিঞ্জ।

যেখানে গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান হবে সেখানে $\dfrac{dI}{d\beta} = o$

কিন্তু $\dfrac{dI}{d\beta} = I_o\left\{2\left(\dfrac{\sin\beta}{\beta}\right)\left[\dfrac{\beta\cos\beta - \sin\beta}{\beta^2}\right]\right\}$

অতএব, I-এর গরিষ্ঠ বা লঘিষ্ঠ অবস্থানের জন্য, $\sin\beta(\beta\cos\beta - \sin\beta) = 0$

এখন $\sin\beta = 0$ হলে, $\beta = m\pi, \ m = \pm 1, \ \pm 2, \ \pm 3 \ldots$

এবং $m \neq 0$ হলে আমরা পাই বিভিন্ন লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান। অতএব গরিষ্ঠ তীব্রতা সমূহের শর্ত হল

$$\beta\cos\beta - \sin\beta = 0$$

$$\Rightarrow \beta = \tan\beta$$

এখন এই সমীকরণের বীজ $\beta = 0$ হ'ল মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান। অন্যান্য বীজ হবে গৌণ গরিষ্ঠসমূহের অবস্থান। এর বীজ পাওয়া যাবে

$$y = \beta \text{ এবং } y = \tan\beta$$

এই দুই সমীকরণের লেখচিত্রের সাহায্যে (চিত্র 7.11(b)) লেখ চিত্র-দ্বয়ের ছেদ বিন্দুতে β-র বীজগুলিই হ'ল গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান স্থল। ছেদ বিন্দুগুলিতে $\beta = 1.43\pi,\ 2.46\pi,\ 3.47\pi$ ইত্যাদি।

লক্ষণীয় যে গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতাগুলি দুই লঘিষ্ঠ বিন্দুর ঠিক ঠিক মধ্যস্থান $1.50\pi,\ 2.50\pi,\ 3.50\pi$ ইত্যাদি নয়। বরং এই গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান সামান্য মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার দিকে সরে আছে।

প্রথম গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতার মান

$$= I_0\left\{\frac{\sin 1.43\pi}{1.43\pi}\right\}^2 = 0.0496 I_0$$

অর্থাৎ কেন্দ্রীয় তীব্রতার 4.96% অনুরূপে দ্বিতীয় ও তৃতীয় গৌণ গরিষ্ঠ তীব্রতা হল 1.68% ও 0.83%। অতএব আমরা দেখলাম যে কেন্দ্রীয় মুখ্য উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের মধ্যেই আলোক শক্তির সিংহভাগ বণ্টিত হয়। আর এই অঞ্চলটি ছড়িয়ে থাকে $\beta = -\pi$ থেকে $\beta = +\pi$ এই অঞ্চলের মধ্যে। কিন্তু আমরা পূর্বেই দেখেছি $\beta = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta$

$$\therefore \frac{b\sin\theta}{\lambda} = \pm 1 \text{ বা } \sin\theta = \pm\frac{\lambda}{b}$$

আবার $b >> \lambda$ বলে $\frac{\lambda}{b}$ খুবই ক্ষুদ্র। অতএব $\sin\theta = \theta$

$$\therefore -\frac{\lambda}{b} \le \theta < \frac{\lambda}{b} \qquad \text{................(7.10)}$$

এই অঞ্চলের মধ্যেই আলোক তরঙ্গের শক্তির সিংহভাগ বণ্টিত হয়। শক্তির সিংহ ভাগ যে ব্যবর্তন কোণের দ্বারা সীমিত তাকে বলে অপসারী কোণ (divergence angle)। যদি $\Delta\theta$ হয় অপসারী কোণ তবে

$$\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{b} \qquad \text{................(7.11)}$$

যদি $b \to 0$, $\Delta\theta$ খুবই বড়, প্রায় $\frac{\pi}{2}$ হবে। সেক্ষেত্রে ব্যবর্তনের ফলে ব্যবর্তিত তরঙ্গ সবদিকে ছড়িয়ে পড়বে। কিন্তু যদি $\lambda \to 0$, কিন্তু b পরিমাপ যোগ্য, তবে $\frac{\lambda}{b} \to 0$ অর্থাৎ $\Delta\theta = 0$ হবে। অর্থাৎ এরূপ ক্ষেত্রে তরঙ্গের কোন ব্যবর্তন হবে না।

সংক্ষিপ্ত উত্তর ভিত্তিক প্রশ্ন 1

অতি সূক্ষ্ম বেধের স্লিটেই কেবল ব্যবর্তন ঘটে কেন? কেন সাধারণ প্রযুক্তিতে প্রস্তুত স্লিটে x রশ্মির বিবর্তন ঘটে না?

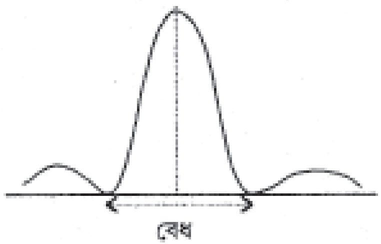
সংখ্যা ভিত্তিক প্রশ্ন

আমরা একক-স্লিটে ফ্রন হফার ব্যবর্তনের কয়েকটি বিষয় সম্পর্কে অবগত হয়েছি : 1) স্লিটের বেধ এবং একবর্ণী আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সঙ্গে ব্যবর্তন কোণের সম্পর্ক। 2) লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থানের সঙ্গে স্লিট বেধের সম্পর্ক এবং 3) তীব্রতার সঙ্গে গরিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থানের সম্পর্ক।

এই সম্পর্কগুলিকে ভিত্তি করে কয়েকটি সংখ্যা ভিত্তিক প্রশ্নের সমাধানের উদাহরণ দেওয়া হল।

উদাহরণ 1 : $6000\,\mathring{A}$ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের একটা সমতল তরঙ্গ 0.6 মিমি. বেধের দীর্ঘ স্লিটের উপর লম্বভাবে আপতিত হল। মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার কৌণিক বেধ নির্ণয় করুন।

সমাধান : আমরা জানি মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার ফ্রিঞ্জের দুপাশে প্রথম লঘিষ্ঠ তীব্রতার কৌণিক ব্যবধানই মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার বেধ।



এখন লঘিষ্ঠ তীব্রতার শর্ত $b\sin\theta = m\lambda,\ m = \pm1,\ \pm2\ldots$

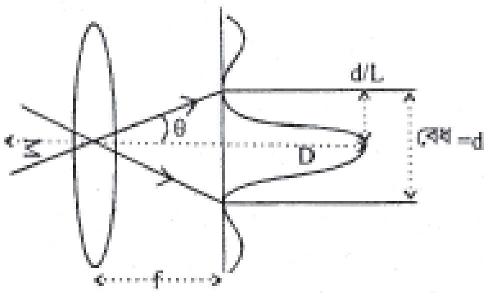
এখানে $m = \pm1$

$$\therefore \sin\theta = \frac{\lambda}{b} = \frac{6000\times10^{-8}}{0.6\times10^{-1}} = \frac{6\times10^{-5}}{6\times10^{-2}} = 0.001$$

যেহেতু $\sin\theta$ খুবই ক্ষুদ্র অতএব $\theta = 0.001$ rad

$$=.001\times\frac{180^0}{\pi} = \frac{0.18}{3.14}\text{deg rec} = 0.057^0$$

অতএব মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার কৌণিক বেধ $2\times0.057^0 = 0.114^0$



উদাহরণ 2 উদাহরণ-1 এ যদি স্লিটের পর 20 সেমি ফোকাস দৈর্ঘ্যের লেন্স ব্যবহার করা হয়, তবে মুখ্য গরিষ্ঠের বেধ কত হবে। যদি বেধ = d সেমি হয় তবে $\frac{d}{2} = f\theta$, θ রেডিয়ানে প্রকাশিত $d = 20\times0.001\times2$ সেমি $= 0.4$মি ।

উদাহরণ 3 : উদাহরণ 1-এ মুখ্য গরিষ্ঠের সঙ্গে প্রথম গৌণ গরিষ্ঠের তীব্রতার তুলনা করুন।

সমাধান : প্রথম গৌণ গরিষ্ঠের অবস্থান $\beta = 1.43\pi$ rad

আমরা জানি

$$I = I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_o} = \left(\frac{\sin 1.43\pi}{1.43\pi}\right)^2 = \left(\frac{-\sin 0.43\times 180^0}{1.43\pi}\right)^2$$

$$= 0.047 = \frac{47}{1000}$$

$$\Rightarrow \frac{I_0}{I_1} \approx 21$$

অর্থাৎ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের তীব্রতা প্রথম গৌণ ফ্রিঞ্জের উজ্জ্বলতার 21 গুণেরও বেশি।

উদাহরণ 4: : $\lambda = 5000\,\mathring{A}$ আলোক তরঙ্গের একগুচ্ছ সমান্তরাল রশ্মি 0.5 মিমি বেধের একটি দীর্ঘ আয়তাকার স্লিটে ব্যবর্তিত হয়। যদি স্লিটের পর ব্যবহৃত অভিসারী লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য হয় 30 সেমি তবে পর পর তিনটি লঘিষ্ঠ তীব্রতার মধ্যে দূরত্ব নির্ণয় করুন।

সমাধান : লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থানের শর্ত $b\sin\theta = m\lambda, m = \pm 1, \ \pm 2 \ldots$

$$\therefore \sin\theta_1 = \frac{\lambda}{b},\ \sin\theta_2 = \frac{2\lambda}{b}, \sin\theta_3 = \frac{3\lambda}{b}$$

আবার $\frac{\lambda}{b} = \frac{5\times 10^{-5}}{5\times 10^{-2}} = 0.001$, খুবই ক্ষুদ্র, অতএব

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{b},\ \theta_2 = \frac{2\lambda}{b},\ \theta_3 = \frac{3\lambda}{b}$$

$$\Rightarrow \theta_1 = 0.001 \text{ rad},\ \theta_2 = 0.002 \text{ rad},\ \theta_3 = 0.003 \text{ rad}$$

যদি মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতার কেন্দ্র থেকে এই লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থানের দূরত্ব d_1, d_2, d_3, হয় এবং লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য হয় f, তবে

$$d_1 = f\theta_1, d_2 = f\theta_2, d_3 = f\theta_3$$

$\therefore$ দূরত্ব $d_2 - d_1 = f(\theta_2 - \theta_1) = 30\times.001 = .03$ সেমি $= 0.3$ মিমি

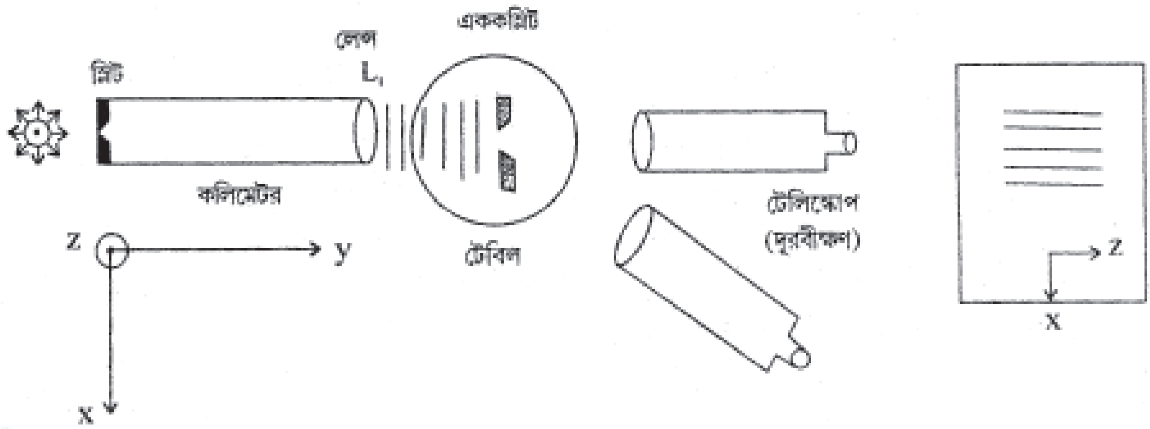
দূরত্ব $d_3 - d_2 = f(\theta_3 - \theta_2) = 30\times.001 = .03$ মিমি

সংক্ষিপ্ত উত্তরধর্মী প্রশ্ন 2

* মুখ্য গরিষ্ঠের বেধ গৌণ গরিষ্ঠের বেধের দ্বিগুণ। প্রমাণ করুন।
* দেখান যে কোন দুটি পর পর লঘিষ্ঠ অবস্থানের ব্যবধান সমান।

7.4 রৈখিক উৎসজাত তরঙ্গের রৈখিক স্লিটে ফ্রন হফার ব্যবর্তন (Diffraction at linear slit : source linear)

একটি দৈর্ঘ্য সাপেক্ষ নগণ্য বেধের স্লিটকে আলোকিত করলে তা একটা রৈখিক উৎস বলে বিবেচিত হতে পারে। কার্যক্ষেত্রে স্পেকট্রোমিটারের কলিমেটর স্লিটকে এরকম একটা রৈখিক স্লিটে পরিণত করা যায়। যেহেতু কলিমেটর স্লিটটা লেন্সের ফোকাসে থাকে অতএব ঐ লেন্স রৈখিক উৎসের তরঙ্গকে সমতল তরঙ্গে রূপান্তরিত করবে। স্পেকট্রোমিটার টেবিলের উপর অপবর্তন পর্দাকে এমনভাবে স্থাপন করতে হবে যেন ওর আয়তাকার স্লিটটা কলিমেটর স্লিটের সমান্তরাল থাকে। উভয় স্লিটকে খাড়াভাবে স্থাপন করা হয়। (চিত্র 7.12)।



চিত্র 7.12 : a) রৈখিক উৎসজাত তরঙ্গের ব্যবর্তন পরীক্ষা ব্যবস্থা। b) দূরবীক্ষণে দৃষ্ট অপবর্তন নকশা

আমরা ইতিমধ্যে বিন্দু-উৎসজাত আলোক তরঙ্গের ব্যবর্তন থেকে উৎপন্ন নকশা কেমন হবে জেনেছি। বিন্দু উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব x অক্ষের সমান্তরাল নিরীক্ষা পর্দার উপর গঠিত হয়। যেহেতু রৈখিক আলোক উৎস z অক্ষের সমান্তরালে অবস্থিত, অতএব তাকে z অক্ষের সমান্তরালে একটা রেখায় সজ্জিত বহু সংখ্যক বিন্দু উৎস ভাবা যেতে পারে। প্রতিটি বিন্দু উৎস তার ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ গঠন করবে পর্দার উপর। এই ফ্রিঞ্জগুলিও z অক্ষের সমান্তরালে পরপর গঠিত হয়ে রৈখিক উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব গঠন করবে। এইরূপে পর্দার উপর অনেকগুলি সমান্তরাল ও খাড়া উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ দেখা যাবে।

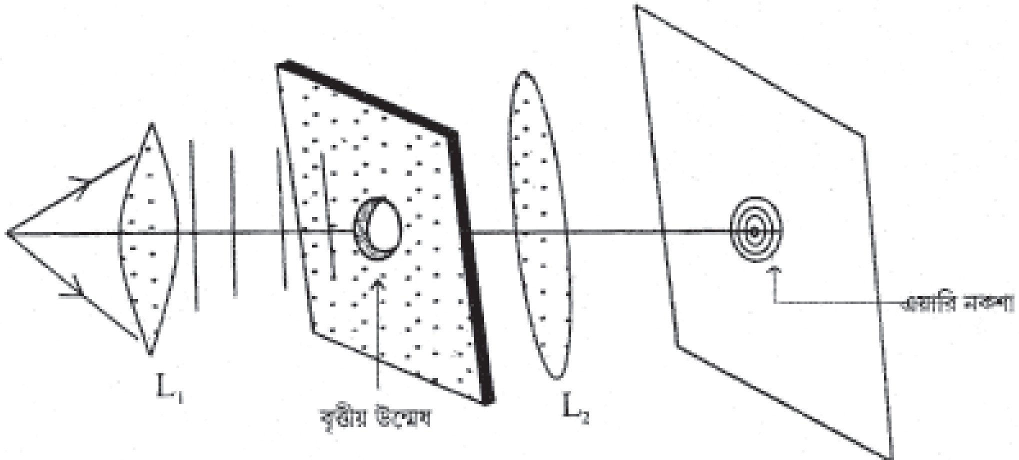
প্রতিটি উজ্জ্বল পটির দৈর্ঘ্য বরাবর তীব্রতা সমান। কিন্তু যে কোন x- অক্ষের সমান্তরাল রেখায় তীব্রতার বণ্টন বিন্দু উৎসের ক্ষেত্রে যেমন, ঠিক তেমনি, অর্থাৎ

$$I = I_o\left(\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}\right)$$

আলোক উৎসের বেধ ক্ষুদ্র না হলে অবশ্য নিরীক্ষাপর্দায় ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে না। এর কারণ, আলোক উৎসের বেধ বেশি হলে তাহার প্রতিবিম্বের বেধও বৃদ্ধি পাবে। ফলে দুটো পর পর গৌণ গরিষ্ঠের ব্যবধান থাকবে না। মনে রাখতে হবে ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ পেতে গেলে স্লিট ও উৎস সমান্তরাল হতে হবে।

7.4.1 বৃত্তাকার উন্মেষে ব্যবর্তন (Diffraction of circular aperture)

চিত্র 7.13-এ বৃত্তাকার উন্মেষে ব্যবর্তন নকশা গঠনের পরীক্ষা ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। উৎস হবে বিন্দুবৎ এবং একবর্ণী আলোকের। ফ্রন হফার ব্যবর্তনের জন্য দরকার এই উৎসকে বৃত্তাকার স্লিট থেকে অসীম দূরত্বে স্থাপন করা। উৎসের সামনে আগের মত লেন্স L_1 উৎস ও বৃত্তাকার স্লিটের কেন্দ্রগামী রেখার উপর সমাক্ষীয়ভাবে রাখতে



চিত্র 6.13 : বৃত্তীয় উন্মেষে ব্যবর্তন পরীক্ষা ব্যবস্থা।

হবে যেন উৎস L_1 এর ফোকাসে অবস্থিত হয়। L_1 থেকে সমান্তরাল রশ্মি গুচ্ছ (অর্থাৎ সমতল তরঙ্গ) বৃত্তাকার স্লিটে আপতিত ও ব্যবর্তিত হবে। স্লিটের তল তরঙ্গতলের সমান্তরাল হতে হবে। ব্যবর্তন পর্দার পর স্লিটের কাছে অন্য একটি অভিসারী লেন্স L_2 সমাক্ষীয়ভাবে স্থাপন করলে তার ফোকাস তলে রক্ষিত নিরীক্ষা পর্দা LM এর উপর ফ্রন হফার ব্যবর্তন নকশা দেখা যাবে। নকশাটি হবে সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার ফ্রিঞ্জ। একে বলে এয়ারি নকশা (Airy pattern) ব্যবস্থাটিতে সুস্পষ্টভাবে একটা বৃত্তীয় প্রতিসাম্য থাকায় ব্যবর্তন নকশাটি হবে একটার পর একটা সমকেন্দ্রিক উজ্জ্বল ও অনুজ্জ্বল বৃত্তাকার ফ্রিঞ্জের সমষ্টি। এই ফ্রিঞ্জের তীব্রতা বণ্টনের রাশিমালা নির্ণয় যথেষ্ট জটিল, কিন্তু আমরা কেবল চূড়ান্ত রাশিমালাটিই বিবেচনা করব। যে কোন ফ্রিঞ্জের তীব্রতা I হলে

$$I = I_o\left(\frac{2J_1(d)}{d}\right)^2 \qquad ....(7.12)$$

যেখানে
$$d = \frac{2\pi}{\lambda}(a\sin\theta) \qquad ....(7.13)$$

$a =$ বৃত্তাকার উন্মেষের ব্যাসার্ধ

$J_1(d) =$ বেসেল অপেক্ষক (Bessel function)

এবং $I_o =$ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের তীব্রতা যা $\theta = 0$ ব্যবর্তন কোণে পাওয়া যায়।

$J_1(d)$ অনেকটা অবমন্দিত সাইন অপেক্ষকের মত এবং $J_1(0) = 0$ অতএব

$$\lim_{d \to 0} \frac{J_1(d)}{d} = 1$$

আবার d= 3.832, 5.136, 7.016........ ইত্যাদিতে $J_1(d)$ শূন্য হবে। অর্থাৎ d-এর এইসব মানের জন্য অনুজ্জ্বল বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। প্রথম যে অনুজ্জ্বল বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে তার কৌণিক ব্যাসার্ধ θ হলে সমীকরণ (7.13) থেকে

$$\sin\theta = \frac{3.832\lambda}{2\pi a} = \frac{1.22\lambda}{D} \qquad \text{...............[7.14(a)]}$$

যেখানে $D = 2a =$ উন্মেষের ব্যাস। অনুরূপে দ্বিতীয় ও তৃতীয় অনুজ্জ্বল বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে যখন

$$\left.\begin{aligned} &\sin\theta = \frac{5.136}{2\pi a} = \frac{1.63\lambda}{D} \\ \text{এবং}\quad &\sin\theta = \frac{7.016}{2\pi a} = \frac{2.23\lambda}{D} \end{aligned}\right\} \qquad \text{...............[7.14(b)]}$$

বিস্তারিত গাণিতিক বিশ্লেষণে দেখা যায় যে ব্যবর্তিত তরঙ্গের শক্তির প্রায় 84% অংশ প্রথম অনুজ্জ্বল বৃত্তীয় ফ্রিঞ্জের অভ্যন্তরে থাকে। সমীকরণ (7.11) এর সঙ্গে তুলনা করে বলা যায় অপসারী কোণ হবে

$$\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{D}$$

অর্থাৎ স্লিটের ব্যাস যত বড় হবে অপসারী কোণ তত ছোট হবে। বিপরীতক্রমে ক্ষুদ্রতর স্লিটের ক্ষেত্রে অপসারী কোণ বৃহত্তর হবে।

এই ঘটনাকে মনে রাখলে আপনি সোজাসুজি বেশি শব্দ প্রেরণ করার জন্য নিশ্চয়ই ক্ষুদ্র ব্যাসের মাইক্রোফোন ব্যবহার করবেন না।

প্রকৃতিতে বৃত্তীয় উন্মেষে ব্যবর্তনের নজির হল হালকা মেঘলা আকাশে চাঁদ বা সূর্যের চারিদিকের জ্যোতির্বলয়। মেঘের জলকণার ফাঁকে ফাঁকে বহু সংখ্যক বৃত্তাকার উন্মেষে আলোর ব্যবর্তনের ফলে এমন জ্যোতির্বলয় সৃষ্টি হয়।

সংখ্যাগত উদাহরণ : $5 - 0.02$ সেমি ব্যাসের একটি উন্মেষযুক্ত পর্দাকে 5000 Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সমতল তরঙ্গ দ্বারা আলোকিত করা হল। পর্দার অপর পার্শ্বে 30 সেমি ফোকাস দৈর্ঘ্যের অভিসারী লেন্স স্থাপন করলে ঐ লেন্সের ফোকাস তলে উৎপন্ন এয়ারি নকশার প্রথম দুটি অনুজ্জ্বল বলয়ের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করুন।

সমাধান : আমরা জানি θ_1 এবং θ_2 যদি অনুজ্জ্বল বলয় দ্বয়ের কৌণিক ব্যাসার্ধ হয় তবে

$$\sin\theta_1 = \frac{1.22\lambda}{D} \quad \text{এবং} \quad \sin\theta_2 = \frac{1.63\lambda}{D}$$

এখানে $\frac{\lambda}{D} = \frac{5000 \times 10^{-8}}{0.02} = \frac{5 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-2}} = 2.5 \times 10^{-3}$

অতএব আমরা লিখতে পারি $\sin\theta_1 = \theta_1$ এবং $\sin\theta_2 = \theta_2$

$\therefore \theta_1 = 1.22 \times 2.5 \times 10^{-3}$ রেডিয়ান

$\therefore \theta_2 = 1.63 \times 2.5 \times 10^{-3}$ রেডিয়ান

যদি বলয় দ্বয়ের ব্যাসার্ধ হয় r_1 এবং r_2 তবে

$$\theta_1 = \tan\theta_1 = \frac{r_1}{f} \text{ or } r_1 = f\theta_1$$

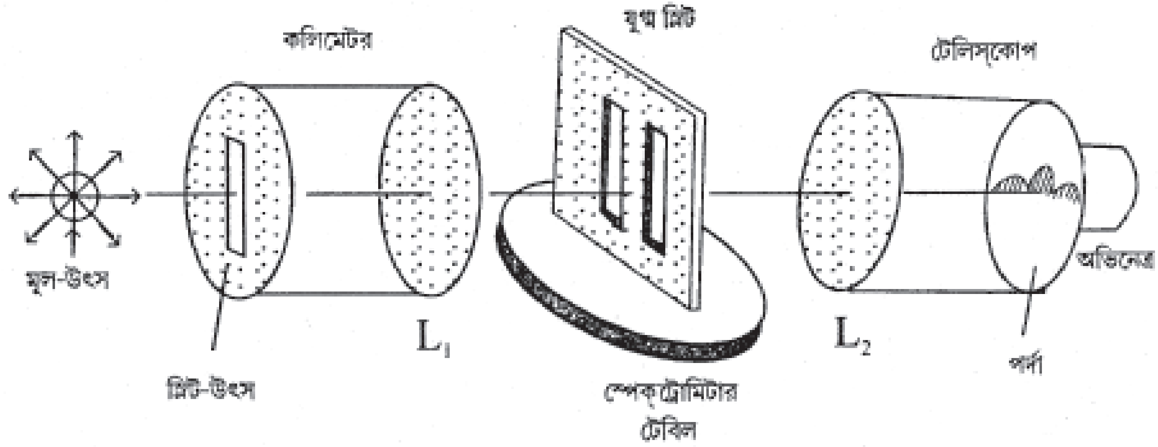
$$r_2 = f\theta_2$$

$\therefore r_1 = 30 \times 1.22 \times 2.5 \times 10^{-3} = 0.91$ মিমি

$\therefore r_2 = 30 \times 1.63 \times 2.5 \times 10^{-3} = 1.22$ মিমি

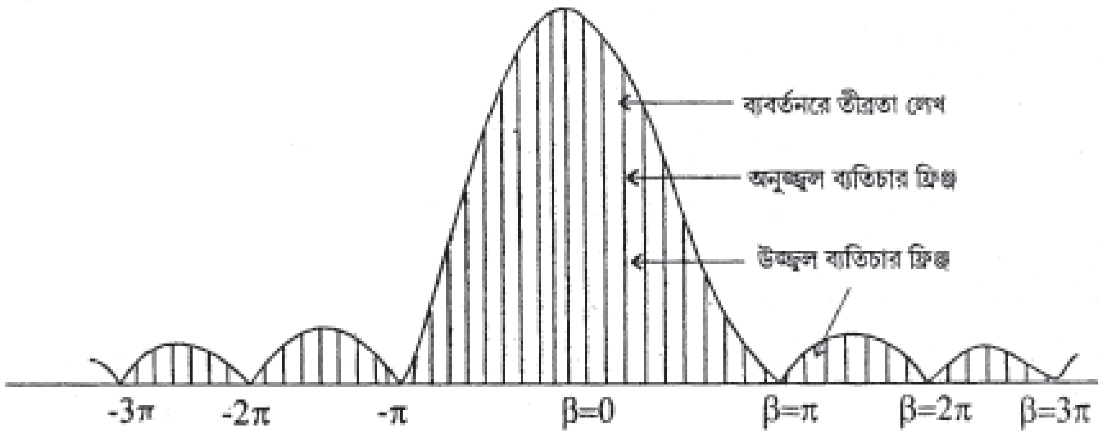
7.5 যুগ্ম স্লিটে ফ্রনহফার ব্যবর্তন (Diffraction at double slit)

পরীক্ষা-ব্যবস্থা ঃ চিত্র 7.14 দেখতে হবে। পরীক্ষাগারে সাধারণত উৎস হিসেবে একটা আলোকিত উল্লম্ব রৈখিক স্লিট ব্যবহার করা হয়। এটা আসল পরীক্ষা ব্যবস্থায় ব্যবহৃত স্পেকট্রোমিটারের কলিমেটর যন্ত্রাংশের স্লিট। এই স্লিটের আলোকে কলিমেটর লেন্স L_1 দ্বারা সমতল তরঙ্গে পরিণত করা হয়। এ জন্য স্লিটটাকে লেন্সের ফোকাসে স্থাপন করা হয়। এরপর স্পেক্ট্রোমিটার টেবিলে একটা উল্লম্ব অপবর্তন পর্দা স্থাপন করা হয়। এই পর্দায় থাকে দুটো উল্লম্ব রৈখিক স্লিট। রৈখিক স্লিটদ্বয়কে দেখার জন্য ব্যবহৃত স্পেক্ট্রোমিটার দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্য লেন্স L_2 তার নিরীক্ষা পর্দা অর্থাৎ ক্রশতারের উপর ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ গঠন করে।



চিত্র 7.14 : যুগ্ম স্লিটে ব্যবর্তন সৃষ্টির পরীক্ষা-ব্যবস্থা

পরীক্ষার শর্ত 1) যে দুটি স্লিট ব্যবহার করা হবে তাদের বেধ সমান হতে হবে, 2) উৎস-স্লিটের সঙ্গে যুগ্ম স্লিটকে সমান্তরালভাবে স্থাপন করতে হবে এবং 3) স্লিট দ্বয়ের মধ্যের দূরত্ব ওদের বেধের সঙ্গে তুলনীয় হবে। প্রশ্ন হল স্লিটের দ্বয়ের বেধ কি রকম হবে? একক স্লিটের ক্ষেত্রে এ প্রশ্নের উত্তর আমরা পেয়েছি। আমরা জেনেছি বেধ বেশি হলে ব্যবর্তন নকশা দেখা যায় না। যুগ্ম স্লিটের যে কোন একটিকে বন্ধ করলে আমাদের পরীক্ষার ব্যবস্থাটি একক-স্লিটের ব্যবর্তন ব্যবস্থাতে পরিণত হবে। স্বভাবতই নিরীক্ষা-পর্দায় একক স্লিটের ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যাবে। আমরা অবশ্যই লক্ষ্য করব যে আমাদের আলোক উৎস বিন্দু-উৎস নয়, রৈখিক উৎস। অতএব ব্যবর্তন নকশাটি হবে রৈখিক-উৎসের ফ্রিঞ্জ-যুক্ত প্রতিবিম্ব — অর্থাৎ রৈখিক প্রতিবিম্ব পাওয়া যাবে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে আয়তাকার স্লিট-উৎসের ফ্রিঞ্জ-ই পাওয়া যাবে। এখন যদি অন্য স্লিট মুক্ত রেখে প্রথম স্লিটটা বন্ধ করা হয় তবে হুবহু একই ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যাবে। উভয় ক্ষেত্রে নকশাদুটি একই অবস্থানেই গঠিত হবে। আপনাদের মনে হতে পারে, যেহেতু স্লিটদ্বয় পাশাপাশি একটা ব্যবধান বজায় রেখে অবস্থিত অতএব ব্যবর্তন নকশাও ব্যবধান বজায় রেখে গঠিত হবে। পরীক্ষার প্রাপ্ত ফল একথা বলে না। এবং এতে আপনাদের অবাক হওয়াও উচিত নয়। কারণ, ইতিমধ্যে জেনেছেন — ফ্রন হফার ব্যবর্তন নকশা উৎসের ফ্রিঞ্জযুক্ত প্রতিবিম্ব। জ্যামিতীয় আলোক বিজ্ঞান থেকে আপনারা জানেন বস্তু ও লেন্সের অবস্থানের পরিবর্তন না হলে প্রতিবিম্বের অবস্থানেরও কোন পরিবর্তন হবে না। উভয় স্লিট উৎস থেকে আগত আলোক তরঙ্গের ভিন্ন ভিন্ন অংশকে ব্যবর্তিত করে মাত্র। সেই জন্য একইস্থানে একই নকশার প্রতিবিম্ব গঠিত হয়।



চিত্র 7.15 : দূরবীক্ষণ অভিনেত্রের দৃষ্টি ক্ষেত্রের যুগ্ম স্লিটের ব্যবর্তন নকশার তীব্রতা বণ্টন।

দুটো স্লিটই মুক্ত করলে কী হবে? আমরা দেখলাম দুটো স্লিট থেকে আসা তরঙ্গ পর্দার উপর একই অবস্থানে আপতিত হয়। অতএব পর্দার উপর উভয় স্লিট থেকে আসা তরঙ্গিকাগুলোর উপরিপাত ঘটবে। আবার যেহেতু দুটো তরঙ্গই একই তরঙ্গের অংশ মাত্র অতএব তারা সুসম্বদ্ধ (coherent) উৎসজাত। এই জন্য উভয় তরঙ্গের মধ্যে ব্যতিচার ঘটবে। আর এজন্য ব্যবর্তন নকশার সঙ্গে আমরা পর্দায় ব্যতিচার নকশাও দেখব। যুগ্ম স্লিটের ব্যবর্তন নকশার বৈশিষ্ট্য :

1) পর্দায় বা দূরবীক্ষণের অভিনেত্রের দৃষ্টিক্ষেত্রে যে ব্যবর্তন নকশায় দেখা যাবে অনেকগুলো ফ্রিঞ্জযুক্ত উজ্জ্বল অঞ্চল যাদের মধ্যে ব্যবধান গড়বে অনুজ্জ্বল বা অন্ধকার অঞ্চল।

2) উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জযুক্ত অঞ্চলগুলির কেন্দ্রে বা মধ্য অবস্থানে যে উজ্জ্বল অঞ্চলটি থাকবে তাকে বলা হবে

কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন পটি (central diffraction band)। এই উজ্জ্বল পটি অনেকগুলি উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের সমাহার। আমরা দেখব — এই ফ্রিঞ্জগুলি দুই স্লিটের তরঙ্গিকার ব্যতিচারের ফলে গঠিত।

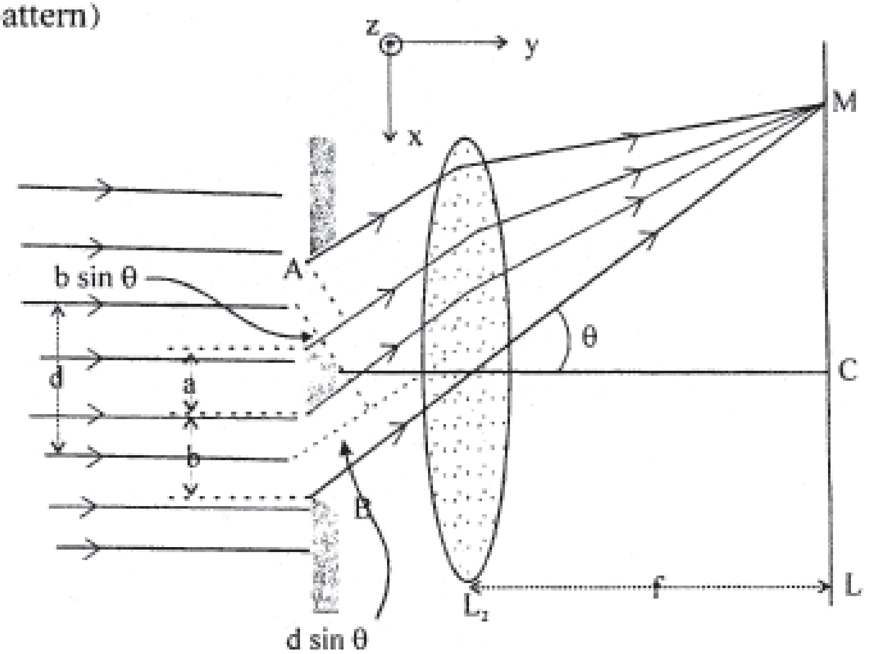
3) কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পটির দুপাশে ক্রমহ্রাসমান উজ্জ্বলতার অনেকগুলো ব্যতিচার ফ্রিঞ্জযুক্ত ব্যবর্তন পটি দেখা যাবে। এগুলিকে বলে গৌণ গরিষ্ঠ ব্যবর্তন পটি। কিছু সংখ্যক গৌণপটির পর এদের উজ্জ্বলতা এত কমে যায় যে আর দৃষ্টিগোচর হয় না।

4) কেন্দ্রীয় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জগুলির উজ্জ্বলতার তীব্রতা গৌণ ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের উজ্জ্বলতার তুলনায় অনেক বেশি।

চিত্র 7.15-এ বিচ্ছিন্ন রেখায় ব্যবর্তন নকশার তীব্রতা বণ্টন দেখানো হয়েছে। কালো রেখাগুলি উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জগুলির মধ্যে অনুজ্জ্বল তীব্রতা সূচক। রেখাগুলির উচ্চতা সংশ্লিষ্ট উজ্জ্বল ব্যাতিচার ফ্রিঞ্জের তীব্রতার সূচক।

আমরা চিত্র 7.15 এ যা দেখছি তার ব্যাখ্যা পেতে চাই। আরো জানতে চাই একক স্লিটের সঙ্গে তুলনায় যুগ্ম স্লিটের উজ্জ্বল পটির তীব্রতা কেমন। পরের অনুচ্ছেদে এই আলোচনা।

7.5.1 যুগ্মস্লিটে ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জের তীব্রতা বণ্টন (Intensity distribution in double slit diffraction pattern)



চিত্র 7.16 : ব্যবর্তিত তরঙ্গের দশা পার্থক্য।

ধরা যাক, উভয় স্লিটের বেধ b এবং মধ্যবর্তী অনচ্ছ পর্দার বেধ a। যদি দুই স্লিটের কেন্দ্র থেকে কেন্দ্র পর্যন্ত দূরত্ব d হয় তবে d=a+b। যদি ব্যবর্তন কোণ θ হয় তবে দুই স্লিটের d দূরত্বের তরঙ্গিকা দুটো থেকে আসা তরঙ্গ দুটোর দশা পার্থক্য হবে (চিত্র 7.16)।

$$T = \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(a+b)\sin\theta \qquad \text{................(7.15)}$$

আমরা একক স্লিটের ক্ষেত্রে জানি উহার সমস্ত তরঙ্গিকা M বিন্দুতে যে লব্ধি তরঙ্গ উৎপন্ন করবে তা হবে (সমীকরণ 7.5a)

$$E_1 = A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\cos(\omega t - \beta) \qquad \text{...............(7.16)}$$

যেখানে $\beta = \dfrac{\pi b \sin\theta}{\lambda}$

দ্বিতীয় স্লিটের সংশ্লিষ্ট তরঙ্গিকাগুলো পরপর Γ দশা পার্থক্যে থাকবে বলে এই স্লিট M বিন্দুতে যে লব্ধি তরঙ্গ উৎপন্ন করবে তা হবে

$$E_2 = A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\cos(\omega t - \beta - \Gamma) \qquad \text{...............(7.17)}$$

অতএব উভয় স্লিট থেকে আগত তরঙ্গের লব্ধি

$$\begin{aligned}
E &= E_1 + E_2 \\
&= A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\left\{\cos(\omega t - \beta) + \cos(\omega t - \beta - \Gamma)\right\} \\
&= 2A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\cos\frac{\Gamma}{2}\cos\left(\omega t - \beta - \frac{\Gamma}{2}\right) \\
&= 2A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\cos\gamma\cos(\omega t - \beta - \gamma) \qquad \text{...............(7.18)}
\end{aligned}$$

যেখানে

$$\gamma = \frac{\Gamma}{2} = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta = \frac{\pi(a+b)}{\lambda}\sin\theta \qquad \text{...............(7.19)}$$

সমীকরণ (7.18) এর জটিল রাশিতে প্রকাশ হবে

$$E = 2A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\cos\gamma \;\; e^{i(\omega t - \beta - \gamma)}$$

অতএব E-এর তীব্রতা

$$I = 4A^2\left(\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}\right)\cos^2\gamma \qquad \text{...............(7.20)}$$

আমরা লক্ষ্য করি যে θ ব্যবর্তন কোণে ব্যবর্তিত তরঙ্গের নিরীক্ষা পর্দার উপর তীব্রতা হল I। তাই I এর পরিবর্তে লেখা যায় $I(\theta)$। আবার একক স্লিটের ক্ষেত্রে

$$I(\theta) = A^2\left(\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}\right)$$

যখন $\theta = 0$, $I(\theta) = I(\theta = 0) = I_o$। আবার $\theta = 0$ হলে $\beta = 0$ অতএব $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2} = 1$

$$\therefore I_0 = A^2$$

এই হিসেবগুলি বিবেচনা করার পর (7.20)কে লেখা যায়

$$I(\theta) = 4I_o\left(\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}\right)\cos^2\gamma \qquad \text{...............(7.21)}$$

এটাই যুগ্ম স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার রাশিমালা। এই রাশিমালায় $\theta = 0$ হলে $\beta = \gamma = 0$

অতএব

$$I(\theta = 0) = 4I_o$$
$= 4 \times$ একক স্লিটের তীব্রতা।

অর্থাৎ কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন নকশার $(\theta = 0)$ তীব্রতা (যুগ্ম স্লিটের ক্ষেত্রে) একক স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন নকশার তীব্রতার চারগুণ। এর কারণ, দুটো স্লিট থেকে আসা তরঙ্গের উপরিপাত জনিত লব্ধি-তরঙ্গের বিস্তার একক স্লিটের থেকে আসা তরঙ্গের বিস্তারের দ্বিগুণ। আর তীব্রতা বিস্তারের বর্গের সমানুপাতী হওয়া যুগ্ম স্লিটের ক্ষেত্রে এই তীব্রতা 4 গুণ। পরীক্ষা-ব্যবস্থায় এইরূপ অভিজ্ঞতাই আমাদের ছিল। তীব্রতার রাশিমালা (7.21) এ $I_0\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$ অংশটি আমাদের চেনা। এটা একক স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার রাশিমালা। যুগ্ম স্লিটের যে কোন একটিকে অবরুদ্ধ করলেই নিরীক্ষা পর্দায় যে নকশাটি গঠিত হবে তাকে এই রাশিমালা দিয়ে ব্যাখ্যা করা যাবে। অতএব যুগ্ম স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার রাশিমালার একটি অংশকে ব্যবর্তন তীব্রতার রাশিমালা রূপে বিবেচনা করতে হবে। অন্য অংশটি $4\cos^2\gamma$। আমরা দেখেছি (7.19) $\gamma = \frac{\pi(a+b)}{\lambda}\sin\theta$, যা কিনা যুগ্ম স্লিট থেকে আসা দুই তরঙ্গের দশা পার্থক্য। যেহেতু দুটো স্লিটের তরঙ্গ দুটো একই আপতিত তরঙ্গের অংশ, তাই সুসম্বদ্ধ তরঙ্গ। এই তরঙ্গ দুটোর ব্যতিচারের ফলে যুগ্ম স্লিটের ব্যবর্তন তীব্রতার রাশিমালায় $4\cos^2\gamma$ অংশটি আছে। আগেই আমরা 4 সংখ্যাটির ব্যাখ্যা পেয়েছি — ব্যতিচারে দ্বিগুণ বিস্তার পাওয়া যায় বলে তীব্রতা 4 গুণ হয়।

আরো লক্ষ্য করার, θ এর মানের উপর মূল ব্যবর্তিত তরঙ্গদ্বয়ের তীব্রতা নির্ভর করে। θ=0 হলে উভয় ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতা সর্বাধিক। আর তাই কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন নকশার তীব্রতাও অনেক বেশি। কিন্তু θ বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে উভয় স্লিটের ব্যবর্তন তরঙ্গের তীব্রতা হ্রাস পায়। ফলে ওদের ব্যতিচার নকশার তীব্রতাও হ্রাস পায়।

আমরা লেখচিত্রের তীব্রতা বন্টনের আলোচনায় ব্যবর্তন ও ব্যতিচার নিয়ে আরো আলোচনা করব। কিন্তু যে কোন আলোচনাতেই আমরা মনে রাখব (1) ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যায় একই তরঙ্গাংশের তরঙ্গিকাগুলির উপরিপাতের ফলে এবং (2) ব্যতিচার নকশা পাওয়া যায় সুসম্বদ্ধ দশাযুক্ত দুটো ভিন্ন উৎসের তরঙ্গের উপরিপাতের ফলে।

7.5.2 গরিষ্ঠ ও লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান (Positions of Maxima and minima)

সমীকরণ (7.21) অর্থাৎ

$$I(\theta) = 4I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 \cos^2\gamma$$

এই রাশিমালার থেকে ব্যবর্তন নকশার কোন্ ব্যবর্তন কোণে গরিষ্ঠ (উজ্জ্বল) এবং লঘিষ্ঠ (অনুজ্জ্বল বা অন্ধকার) ফ্রিঞ্জ (নকশা) অবস্থান করবে তা জানা যায়। এই রাশিমালায় দুটো উৎপাদক বা পদ আছে ঃ 1) ব্যবর্তন উৎপাদক $\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$ এবং 2) ব্যতিচার উৎপাদক $\cos^2\gamma$ $I(\theta)$ এর উৎপাদক বলে এই দুই উৎপাদক factor বা পদের (term) যে কোনটা যদি শূন্য হয় তবে $I(\theta)$ শূন্য হবে, অর্থাৎ নকশায় লঘিষ্ঠ বা অনুজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের অবস্থান তথা ব্যবর্তন কোণ পাওয়া যাবে। এখন $\frac{\sin\beta}{\beta} = 0$ হবে যদি $\beta = n\pi$ হয় যেখানে $n = \pm1, \ \pm2\ldots\ldots$ ইত্যাদি। কিন্তু $\beta = \frac{\pi b\sin\theta}{\lambda}$ অতএব লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থানের সংশ্লিষ্ট ব্যবর্তন কোণ θ হলে

$$\frac{\pi b\sin\theta}{\lambda} = n\pi$$

$$\text{বা } b\sin\theta = n\lambda = 2n\times\frac{\lambda}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7.22)$$

অপরদিকে $\cos^2\gamma = 0$ হলে লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। অর্থাৎ লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের জন্য

$$\gamma = (2m+1)\times\frac{\pi}{2}, \ m = 1,2,3,\ldots\ldots$$

$$\text{বা} \frac{\pi(a+b)\sin\theta}{\lambda} = (2m+1)\frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow (a+b)\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7.23)$$

অতএব (7.22) বা (7.23) এই দুই শর্তের যেকোন একটি পূরণ হলে ব্যবর্তন নকশায় লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান পাওয়া যাবে। (7.22) থেকে আমরা জানতে পারি যে দুটি স্লিটের যে কোনটির দুই প্রান্তীয় রশ্মির আলোকীয় পথ পার্থক্য যদি আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের অর্ধেকের যুগ্ম গুণিতক হয় তবে ব্যবর্তনের লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। অপর পক্ষে (7.23) থেকে আমরা জানতে পারি দুই স্লিটের যে কোন দুটো সংশ্লিষ্ট (corresponding) বিন্দু থেকে আসা আলোক রশ্মি দুটোর মধ্যে যদি আলোকীয় পথপার্থক্য আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের অর্ধেকের বিযুগ্মগুণিতক হয় তবে আমরা ব্যতিচারের লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাবো।

এখন প্রশ্ন হল যুগ্ম স্লিটের ব্যবর্তন নকশায় গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান কোথায় হবে? কোন ব্যবর্তন কোণ θ-এর জন্য আমরা গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাবো? এই প্রশ্নের উত্তরটা একটু জটিল। কারণ ব্যবর্তন উৎপাদক $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$ এবং ব্যতিচার উৎপাদক $\cos^2\gamma$ এদের গুণফলের সর্বোচ্চ মানের জন্যই কেবল গরিষ্ঠ তীব্রতার ফ্রিঞ্জ তৈরি হবে। এই গুণফলের কোন সহজ অপেক্ষক নেই। কিন্তু যদি $(\sin^2\beta/\beta^2)$ পদটি মোটামুটি ধ্রুবক হয় তবে $\cos^2\gamma$ পদ দ্বারা গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান নির্ণয় করা যেতে পারে।

আমরা একক স্লিটের ক্ষেত্রে দেখেছি যখন $\beta \to 0$ তখন $\sin^2\beta/\beta^2 = 1$ অর্থাৎ

$$b\sin\theta = 0$$

হল ব্যবর্তন নকশার কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থানের শর্ত। এই ব্যবর্তন কেন্দ্রীয় নকশায় $\gamma = m\pi,\ m = 0,\ \pm1,\ \pm2\ldots$ হলে $\cos^2\gamma = 1$ হবে। এরূপ ক্ষেত্রে $I(\theta)$ হবে গরিষ্ঠ তীব্রতার জন্য অর্থাৎ

$$(a+b)\sin\theta = m\lambda = 2m\times\frac{\lambda}{2}$$

হলে কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ব্যবর্তন নকশায় ব্যতিচারের জন্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান পাওয়া যাবে। $m = 0$ হলে উজ্জ্বল কেন্দ্রীয় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। $m = \pm1, \pm2$, ইত্যাদির জন্য কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন নকশায় অন্যান্য উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে। mকে বলে ব্যতিচারের ক্রম (order of interference)।

7.5.3 বিলুপ্তক্রম (Missing orders)

আমরা পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে দেখলাম যে ব্যতিচারের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ পাওয়ার শর্ত হল

$$(a+b)\sin\theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm1, \pm2\ldots$$

আবার ব্যবর্তনের অনুজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের শর্ত হল

$$b\sin\theta = n\lambda, \quad n = \pm1,\ \pm2\ldots$$

স্পষ্টতই θ-এর এমন কিছু মান পাওয়া যাবে যেখানে, ব্যতিচারের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ $(n\lambda) = p(m\lambda)$ (ব্যবর্তনের লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ) হতে পারে। এখানে p একটি পূর্ণ সংখ্যা। তেমন ক্ষেত্রে θ এর এই মানের জন্য আমরা ব্যতিচারের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ এবং ব্যবর্তনের লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ একই স্থানে পাবো। যুগ্ম স্লিটের ব্যবর্তনের তীব্রতা বণ্টনের সূত্রানুযায়ী এরূপ ক্ষেত্রে $I(\theta) = 0$ হবে। অর্থাৎ n ক্রমের ব্যতিচার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে না। এই ক্রমকে বলে বিলুপ্ত ক্রম (missing order)।

7.5.4 লেখচিত্রে যুগ্মস্লিটে ব্যবর্তন

$I(\theta)$-এর লেখচিত্র অঙ্কন করতে গিয়ে আমরা প্রথমেই যেটা লক্ষ্য করি – $I(\theta)$ হল β ও γ চলরাশির অপেক্ষক। আবার β এবং γ পরস্পর সম্পর্কযুক্ত, কারণ

$$\beta = \frac{\pi b\sin\theta}{\lambda} \text{ এবং } \gamma = \frac{\pi(a+b)}{\lambda}\sin\theta$$

$$\therefore \frac{\gamma}{\beta} = \frac{a+b}{b} = \frac{d}{b}$$

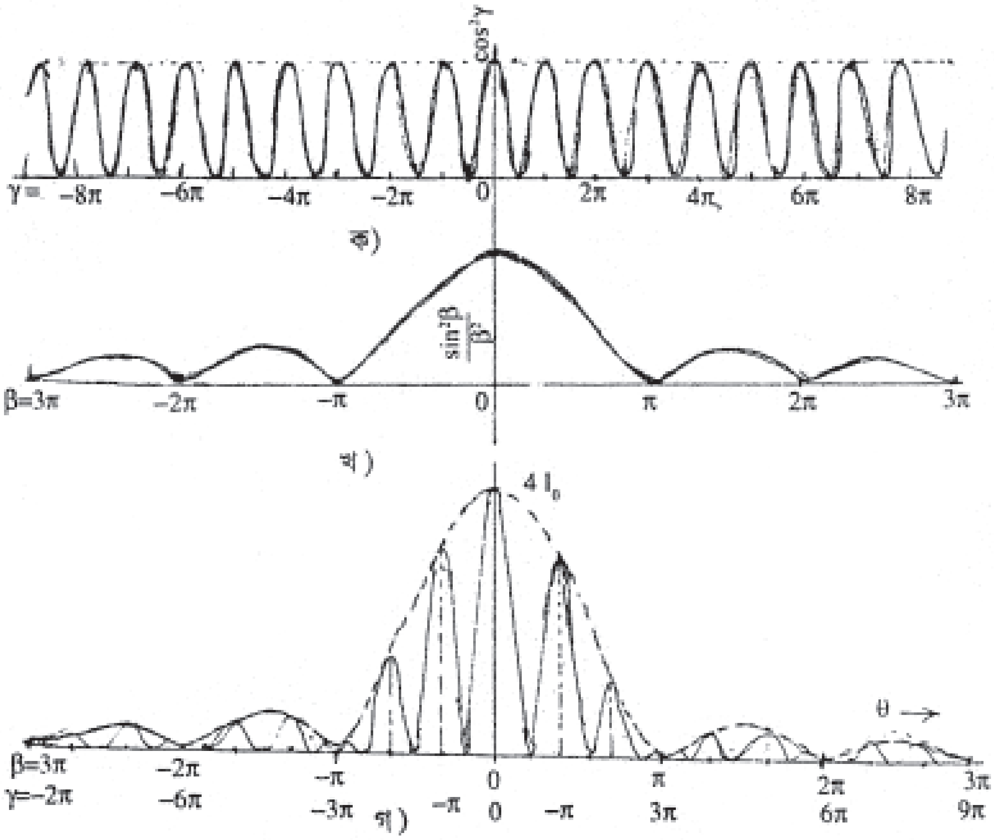
এ ক্ষেত্রে d ও b এর অনুপাতটি ব্যবহৃত যুগ্ম স্লিটের উপর নির্ভর করে। সাধারণভাবে যুগ্ম স্লিটের অনচ্ছ ব্যবধান a স্থির থাকে এবং প্রতিটি স্লিটের বেধ b পরিবর্তন করা যায়। আমরা $b = a,\ b = \frac{a}{2},\ b = \frac{a}{3}$... ইত্যাদিরূপে স্লিট-বেধ স্থির করতে পারি। অনুরূপ ক্ষেত্রে $\frac{\gamma}{\beta} = 2, 3, 4 \ldots$

তাই আমাদের প্রথমেই স্থির করতে হবে γ ও β-এর কোন সম্পর্কটি আমরা প্রয়োগ করব। যদি আমরা ধরি $\gamma = 3\beta$, তবে আমরা এই ভিত্তিতে দুটি লেখ অঙ্কন করতে পারি

γ বনাম $\cos^2\gamma$ (চিত্র 7.17 a)

β বনাম $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$ (চিত্র 7.17 b)

উভয় লেখের সমপতিত লেখচিত্র 7.17(c) এ সম্পূর্ণ তীব্রতা বন্টন পাওয়া যায়।



চিত্র 7.17 : a) γ বনাম $\cos^2\gamma$, b) β বনাম $\sin^2\beta/\beta^2$, এবং c) ব্যবর্তন দ্বারা রূপান্তরিত ব্যতিচার লেখ

চিত্র 6.17 a)-এ আমরা ব্যতিচার তীব্রতার বন্টন পাচ্ছি। দেখা যাচ্ছে $\gamma = 0, \pm\pi, \pm 2\pi \ldots$ অবস্থানে সমতীব্রতার উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জগুলো। আবার চিত্র 7.17 (b) এ $\beta = \pm\pi, \pm 2\pi \ldots$ অবস্থানে ব্যবর্তিত তীব্রতার লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ এবং $\beta = 0$-এ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ব্যবর্তিত তীব্রতা বর্তমান। চিত্র 7.17 (c)-এ a) ও b) এর গুণ ফলকে β ও γ এর সাপেক্ষে রেখাঙ্কিত করা হয়েছে। এখানে যদিও একক স্লিটের ব্যবর্তনের তীব্রতা বন্টন (চিত্র 7.17

b) অনুপস্থিত, কিন্তু দুই স্লিটের ব্যতিচারের তীব্রতা বন্টন রূপান্তরিত আকারে উপস্থিত, এই রূপান্তর অবশ্যই নিয়ন্ত্রিত হয়েছে একক স্লিটের ব্যবর্তন তীব্রতা বন্টন রাশি $\sin^2\beta/\beta^2$ দিয়ে।

$\beta = \gamma = 0$ যখন তখন আমরা পাচ্ছি উজ্জ্বলতম ফ্রিঞ্জ। আবার $\gamma = \pm\pi$ এবং $\pm 2\pi$ এ আমরা অপেক্ষাকৃত কম উজ্জ্বলতার আরো দুটো করে ফ্রিঞ্জ পাচ্ছি। কিন্তু যখন $\gamma = \pm 3\pi$ তখন আমরা কোন উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ পাচ্ছি না যদিও γ বনাম $\cos^2\gamma$ লেখে তা পাচ্ছি। আমরা লক্ষ্য করি যে এইখানে $\beta = \pm\pi$ অর্থাৎ ব্যবর্তন তীব্রতা শূন্য, এখানে $\gamma = 3\beta$। এই হল বিলুপ্ত ক্রম। অর্থাৎ তৃতীয় ক্রমের উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ বিলুপ্ত হবে। আবার $\gamma = \pm 4\pi$ ও $\pm 5\pi$-এ আমরা আরো দুটো করে উজ্জ্বল ব্যতিচার (যদিও উজ্জ্বলতা খুবই কম) ফ্রিঞ্জ পাবো। কিন্তু $\gamma = \pm 6\pi = 3\beta$, $\beta = \pm 2\pi$-এ আবার ষষ্ঠ ক্রমের উজ্জ্বল ব্যাতিচার ফ্রিঞ্জ বিলুপ্ত হবে।

উদাহরণ 6. দুটি সমান্তরাল রৈখিক স্লিটের বেধ 5×10^{-2} সেমি এবং তাদের মধ্যবর্তী দূরত্ব 0.1 সেমি। ওদের ওপর আপতিত একবর্ণী আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 6.328×10^{-5} সেমি। কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন গরিষ্ঠের মধ্যে ব্যতিচার লঘিষ্ঠের ও গরিষ্ঠের সংখ্যা নির্ণয় করুন। যদি স্লিটদ্বয়ের পিছনে রাখা লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য 20 সেমি হয় তবে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জের বেধ নির্ণয় করুন।

সমাধান : ব্যবর্তন লঘিষ্ঠের শর্ত $b\sin\theta = n\lambda$, $n = \pm 1, \pm 2 \ldots$ কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ব্যবর্তনের সীমা $\sin\theta = \pm\dfrac{\lambda}{b}$

অর্থাৎ $\theta = \sin^{-1}\left(-\dfrac{\lambda}{b}\right)$ এবং $\theta = \sin^{-1}\left(\dfrac{\lambda}{b}\right)$ হল দুই পার্শ্বের প্রথম লঘিষ্ঠ। θ ক্ষুদ্র বলে

$$\theta = \frac{\lambda}{b} = \frac{6.328\times10^{-5}}{5\times10^{-2}} = 1.2656\times10^{-3}$$

ব্যতিচার লঘিষ্ঠের শর্ত :

$$d\sin\theta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$\therefore \theta = (2n+1)\frac{\lambda}{2d} = (2n+1)\times\frac{6.328\times10^{-5}}{2\times0.1}$$

$$= (2n+1)\times0.3164\times10^{-3}, n = 0, 1, 2 \cdots$$

$$\therefore \theta = 0.3164\times10^{-3}\ 0.9492\times10^{-3}$$

অর্থাৎ মোট চারটি ব্যতিচার লঘিষ্ঠ পাওয়া যাবে। ব্যতিচার গরিষ্ঠের শর্ত

$$d\sin\theta = n\lambda$$

$$\therefore \theta = n\times\frac{\lambda}{d} = n\times0.6328\times10^{-3}$$

$$\therefore \theta = 0.6328\times10^{-3}$$

অর্থাৎ কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ছাড়া ওর দুপাশে আরো দুটো গরিষ্ঠ পাওয়া যাবে।

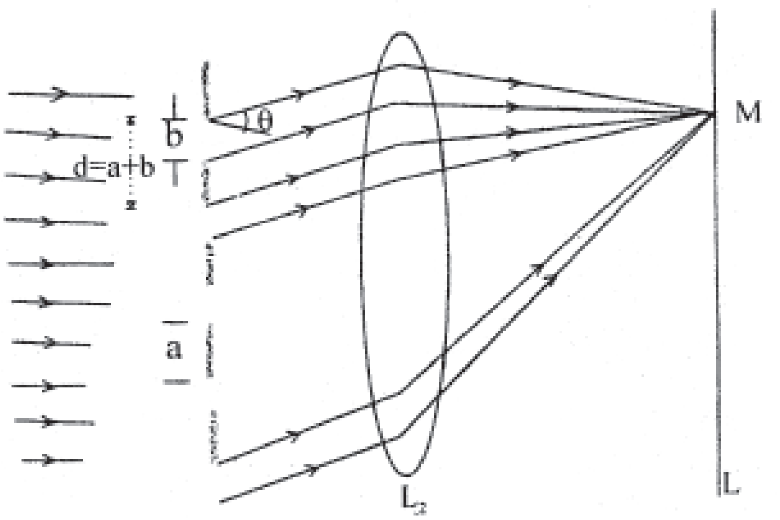
ব্যতিচার লঘিষ্ঠের অবস্থান $x = f\theta$

গরিষ্ঠের বেধ $= x_2 - x_1 = f(\theta_2 - \theta_1) = 10 \times (0.949 - 0.316) \times 10^{-3}$

$= 0.633 \times 10^{-2}$ সেমি $= 0.0633$ মিমি.

সংক্ষিপ্ত উত্তরধর্মী প্রশ্ন 3 : দেখান যে যদি কোন যুগ্ম স্লিটের বেধ (b) ও ব্যবধান (d) সমান হয় তবে ওদের ব্যবর্তন নকশা 2b বেধের একক স্লিটের ব্যবর্তন নকশার অনুরূপ।

7.6 N সংখ্যক অভিন্ন স্লিটে ব্যবর্তন



চিত্র 7.18 বহুসংখ্যক স্লিটে ব্যবর্তন

এবার বিবেচনা করা যাক বহুসংখ্যাক স্লিটের সমস্যাটি। আমরা একটা স্লিট উৎস থেকে আসা তরঙ্গকে সমতল তরঙ্গে পরিণত করে এই স্লিট সমাহারের উপর লম্বভাবে আপতিত করব। ব্যবর্তন পর্দার উপর এই স্লিটগুলি যেমন পরস্পরের সমান্তরাল, তেমনি তারা প্রত্যেকে উৎস-স্লিটের সমান্তরাল হবে। প্রতিটা স্লিট থেকে θ কোণে যে ব্যবর্তিত তরঙ্গ যাবে লেন্স L_2 তাদের ML নিরীক্ষা পর্দার উপর M বিন্দুতে উপরিপাতিত করবে। একক স্লিটের বিবেচনা থেকে আমরা বলতে পারি এই স্লিট সমাহারের প্রথমটা (চিত্র 7.18 এর উপর দিক থেকে) থেকে আসা তরঙ্গিকাগুলোর লব্ধি ক্ষেত্র হবে

$$E_1 = A\frac{\sin\beta}{\beta}\cos(\omega t - \beta)$$

কিন্তু দ্বিতীয় স্লিট থেকে আসা তরঙ্গিকাগুলোর অবদান E_2, E_1 থেকে Γ দশা পার্থক্যে থাকবে। অনুরূপে তৃতীয়, চতুর্থ... N তম স্লিটের অবদানগুলি যথাক্রমে $2\Gamma, 3\Gamma....(N-1)\Gamma$ দশা পার্থক্যে (প্রথম স্লিট সাপেক্ষে) থাকবে।

অতএব N স্লিট থেকে আগত θ কোণে ব্যবর্তিত তরঙ্গগুলির লব্ধি ক্ষেত্রে

$$E = E_1 + E_2 + \dots E_N = \sum_{N=1}^{N} E_N$$

$$= \sum_{N=1}^{N} A \frac{\sin\beta}{\beta} \cos[\omega t - \beta - (N-1)\Gamma]$$

জটিল রাশি রূপে লিখলে

$$E = A\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)\left(\frac{\sin\frac{N\Gamma}{2}}{\sin\frac{\Gamma}{2}}\right) \times e^{i\left[\omega t - \beta - (N-1)\frac{\Gamma}{2}\right]}$$

অতএব M বিন্দুতে আলোকের তীব্রতা $I(\theta)$ হলে,

$$I(\theta) = EE^* = A^2 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \times \frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2\gamma}$$

যেখানে $\gamma = \frac{\Gamma}{2} = \frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}$ [সমীকরণ (7.19)]

$A^2 = I_0$ উজ্জ্বলতম তীব্রতা ধরে লেখা যায়

$$I(\theta) = I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta^2}\right) \times \left(\frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2\gamma}\right) \quad \text{..............(7.24)}$$

এটাই হল N সংখ্যাক সমান্তরাল স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতা বণ্টনের রাশিমালা। আমরা যদি N=1 ধরি তবে

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$$

যা কিনা একক স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার রাশিমালা। আবার যদি N=2 হয় তবে

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \times \frac{\sin^2 2\gamma}{\sin^2\gamma}$$

$$= I_0 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \times \left(\frac{2\sin\gamma\cos\gamma}{\sin\gamma}\right)^2$$

$$= 4I_0 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \cos^2\gamma$$

যা যুগ্ম স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার রাশিমালা।

7.6.1 মুখ্য গরিষ্ঠ সমূহের অবস্থান

$I(\theta)$ বা তীব্রতার বন্টন কি রকম হবে তা সমীকরণ (7.24) দ্বারা বুঝতে পারা যায়। আমরা তীব্রতা বন্টনের সমীকরণ থেকে দেখছি বহু সংখ্যাক স্লিটে ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতা দুটি উৎপাদকের উপর নির্ভর করে : $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$ এবং $\left(\frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2\gamma}\right)$। প্রথম উৎপাদক একক স্লিটের ক্ষেত্রে ব্যবর্তনের তীব্রতার পরিমাপক। অতএব এটি বহুসংখ্যাক স্লিটের ক্ষেত্রে ব্যবর্তন উৎপাদক এবং অন্য রাশিটি স্লিটগুলি থেকে আসা তরঙ্গমালার ব্যতিচার উৎপাদক। যেহেতু তীব্রতা দুটো উৎপাদকের উপর নির্ভর করে তাই এর চরম মান নির্ধারণ করা বেশ জটিল। তবে যেহেতু $\sin^2\beta/\beta^2$ রাশিটিকে খুবই ক্ষুদ্রপ্রেথের স্লিটের ক্ষেত্রে ধ্রুবক ধরা যায় তাই $\sin^2 N\gamma/\sin^2\gamma$ রাশি যখন চরম তখনই তীব্রতার গরিষ্ঠ মান পাওয়া যাবে।

যখন $\gamma \rightarrow n\pi$ হবে তখন $N\gamma \rightarrow nN\pi$। এই উভয় ক্ষেত্রের ব্যতিচার পদের হর বা লব উভয়ই $\rightarrow 0$ হবে। অতএব এল হসপিট্যালের পদ্ধতিতে

$$\gamma \xrightarrow{Lt} n\pi \frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma} = \gamma \xrightarrow{Lt} n\pi \frac{N\cos N\gamma}{\cos\gamma} = \pm N$$

l' Hospital's Rule:

যদি $\underset{x\to a\,or\,\infty}{Lt} \frac{f(x)}{\phi(x)} = \frac{0}{0}$ তাহলে

$$\left.\underset{x\to a\,or\,\infty}{Lt} \frac{f(x)}{\phi(x)} = \underset{x\to a\,or\,\infty}{Lt} \frac{f'(x)}{\phi'(x)}\right]$$

অতএব

$$I(\theta) = N^2 I_0 \frac{\sin^2\beta}{\beta^2} \qquad \text{...............(7.25)}$$

যেহেতু $\frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2\gamma}$ এর চরম মান N^2, তাই সমীকরণ (7.25) তীব্রতার সর্বোচ্চ মান জ্ঞাপক। অতএব আমরা বলতে পারি যখন $\gamma = n\pi$ $(n = 0,1,2...)$ তখনই আমরা ব্যবর্তন তরঙ্গের তীব্রতম উজ্জ্বলতার ফ্রিঞ্জগুলি পাবো। অতএব, গরিষ্ঠ সমূহের অবস্থানের শর্ত হল

$$\gamma = 0,\ \pi,\ 2\pi, \ldots.n\pi$$

অথবা $N\gamma = 0, N\pi, 2N\pi \ldots nN\pi$.

(7.25) থেকে বলা যায় তীব্রতম উজ্জ্বল বিন্দুগুলিতে প্রতিটা স্লিট থেকে আসা তরঙ্গসমূহ সমদশায় মিলিত হবে এবং ঐ বিন্দুতে লব্ধি ক্ষেত্র হবে

$$E = NA\frac{\sin\beta}{\beta}\cos(\omega t - \beta)$$

বা জটিল রাশিতে

$$E = NA\frac{\sin\beta}{\beta}e^{i(wt-\beta)} = Nx \text{ একটি স্লিটের লব্ধি ক্ষেত্র।}$$

অর্থাৎ একটি স্লিটের ব্যবর্তিত তরঙ্গের Nগুণ হবে N স্লিটের ব্যবর্তন তরঙ্গক্ষেত্র। আবার যেহেতু $I(\theta) \to N^2$ অতএব $\sin^2\beta/\beta^2$ নগন্য না হলে $I(\theta)$ খুবই বেশি হবে অর্থাৎ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ সমূহের উজ্জ্বলতা খুব তীব্র হবে। আমরা জানি $\gamma = \frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}$ অতএব গরিষ্ঠ সমূহের কৌণিক অবস্থানের শর্ত হবে

$$d\sin\theta_{max} = n\lambda \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7.26)$$

এটি যুগ্ম স্লিটের ক্ষেত্রেও পাওয়া গেছে। আবার আমরা লক্ষ্য করি যে এই মুখ্য গরিষ্ঠগুলির উজ্জ্বলতা $\sin^2\beta/\beta^2$ দ্বারা সীমিত।

$$\beta = \frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}$$

অতএব $\sin\theta_{max}$ দ্বারা β-এর মান নির্ণীত। এজন্য ব্যবর্তন পদ $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$ দ্বারা মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জগুলির তীব্রতা নিয়ন্ত্রিত হবে। β এর মান বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে $\sin^2\beta/\beta^2$ দ্রুত হ্রাস পাবে। ফলে ব্যতিচার জাত মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জগুলি আর দেখা যাবে না।

আরো লক্ষ্যণীয় $n = \frac{d}{\lambda}\sin\theta_{max}$

যেহেতু $\sin\theta_{max} \le 1, \ngtr \frac{d}{\lambda}$ যেহেতু $\frac{d}{\lambda}$ এর মান সীমিত, অতএব n এর মানও সীমিত। অতএব আমরা সীমিত সংখ্যক মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাবো। $n = 1,2,3,\ldots..$ ইত্যাদি অনুসারে এদের বলে প্রথম, দ্বিতীয়....ইত্যাদি ক্রমের মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ। যদি বিভিন্ন বর্ণের মিশ্রিত আলোক তরঙ্গ থাকে তবে ভিন্ন ভিন্ন বর্ণের জন্য একই ক্রমে ভিন্ন ভিন্ন গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ পাবো। লাল আলোর জন্য বলা হবে প্রথম ক্রমের লাল গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ, ইত্যাদি। যেহেতু $\gamma = \frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}$, অতএব β ও γ এর সম্পর্ক যুগ্ম স্লিটের ক্ষেত্রে যেমন, বহুসংখ্যক স্লিটের ক্ষেত্রেও তাই।

7.6.2 লঘিষ্ঠ অবস্থান ও গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ সমূহ

(7.24) সমীকরণ থেকে বলা যায় যখন ব্যতিচার রাশি $\sin^2 N\gamma / \sin^2 \gamma$ শূন্য হবে তখন ব্যবর্তন নকশায় লঘিষ্ঠ তীব্রতার অবস্থান পাওয়া যাবে। এখন $\sin^2 \gamma$ -এর তুলনায় $\sin^2 N\gamma$ বেশি সংখ্যক বার শূন্য হবে আর যখনই $\sin^2 N\gamma$ শূন্য হবে তখনই $I(\theta) = 0$। কিন্তু আমরা আবার জানি $\sin^2 \gamma = 0$ হলে $\sin^2 N\gamma = 0$ হবে এবং $\sin^2 N\gamma / \sin^2 \gamma$ হবে N^2 অর্থাৎ $I(\theta)$ হবে গরিষ্ঠ। এখন $\sin^2 N\gamma$ শূন্য বলে

$$N\gamma = m\pi$$

$$\text{or } \gamma = \frac{m}{N}\pi$$

যদি m, N এর গুণিতক না হয় তবে $\sin^2 \gamma$ শূন্য হবে না। অতএব লঘিষ্ঠ অবস্থান পাওয়ার শর্ত হল

$$\text{i) } N\gamma = \{\pi, 2\pi, 3\pi \ldots (N-1)\pi\}, \{(N+1)\pi, (N+2)\pi \ldots (2N-1)\pi\}, \{(2N+1)\lambda, (2N+2)\pi \ldots\} \ldots$$

অথবা

$$\text{ii) } \gamma = \left\{\frac{\pi}{N}, \frac{2\pi}{N}, \ldots \left(\frac{N-1}{N}\right)\pi\right\}, \left\{\left(\frac{N+1}{N}\right)\pi, \left(\frac{N+2}{N}\right)\pi \ldots \left(\frac{2N-1}{N}\right)\pi\right\}, \left\{\left(\frac{2N+1}{N}\right)\pi, \left(\frac{2N+2}{N}\right)\pi \ldots\right\} \ldots$$

সম্পর্কিত পথ পার্থক্যের শর্ত হবে

$$\text{iii) } d\sin\theta_{min} = \left\{\frac{\lambda}{N}, \frac{2\lambda}{N}, \ldots \left(\frac{N-1}{N}\right)\lambda\right\}, \left\{\left(\frac{N+1}{N}\right)\lambda, \left(\frac{N+2}{N}\right)\lambda \ldots \left(\frac{2N-1}{N}\right)\lambda\right\}, \left\{\left(\frac{2N+1}{N}\right)\lambda, \left(\frac{2N+1}{N}\right)\lambda \ldots\right\} \ldots \quad \ldots\ldots\ldots(7.26)$$

উপরের শর্তগুলিকে সাধারণ রাশিমালায় এরূপ লেখা যায়

$$\text{i) } N\gamma = p\pi,\ p = 1, 2, \ldots (N-1), (N+1) \ldots (2N-1), (2N+1)$$

অথবা $\text{ii) } \gamma = \dfrac{p\pi}{N},\ p = 1, 2, \ldots N-1, N+1, \ldots 2N-1, 2N+1$

এবং $\text{iii) } d\sin\theta_{min} = \dfrac{p\lambda}{N}, p = 1, 2 \ldots N-1, N+1, \ldots 2N-1, 2N+1 \ldots$

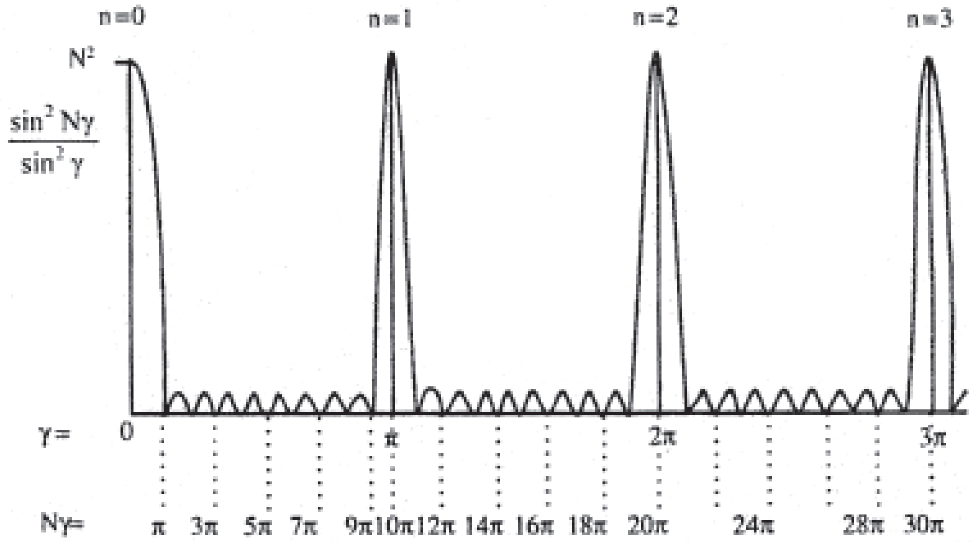
আমরা অবশ্যই লক্ষ্য করতে পারি যে p যে সব পূর্ণসংখ্যাকে বোঝায় তার মধ্যে $p \neq o, N, 2N, \ldots\ldots$ ইত্যাদি।

সংক্ষিপ্ত উত্তর-ধর্মী প্রশ্ন 4 : মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ ও লঘিষ্ঠ অবস্থানের শর্তগুলিকে তালিকাভুক্ত করুন।

এবার লঘিষ্ঠ অবস্থানের শর্তগুলির যে কোন একটিকে পর্যবেক্ষণ করলে আমরা দেখছি দুটি গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের মধ্যে N-1 লঘিষ্ঠ অবস্থান বর্তমান। যে কোন দুটি পরপর লঘিষ্ঠ অবস্থানের ফারাক $\dfrac{\lambda}{N}$। অতএব যদি n তম ক্রমের গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ বিবেচনা করি তবে

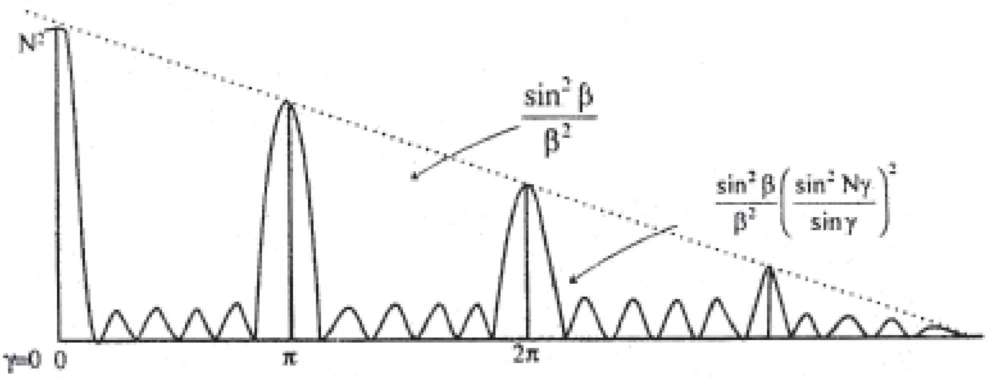
$$\left.\begin{aligned} d\sin\theta_{max} &= n\lambda \\ &\text{এর দুই পাশে লঘিষ্ঠ অবস্থান হবে} \\ d\sin\theta_{min} &= n\lambda \pm \frac{\lambda}{N} \end{aligned}\right\} \quad \text{..............(7.27)}$$

যেহেতু দুটি মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের মধ্যে N-1 লঘিষ্ঠ অবস্থান আছে, অতএব এদের যে কোন পরপর দুটো অবস্থানের মধ্যে একটা করে গরিষ্ঠ উজ্জ্বলতা বর্তমান। এইসব গরিষ্ঠগুলিকে বলে গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ। N-1 লঘিষ্ঠ অবস্থানের মধ্যে, অতএব, N-2 গৌণ গরিষ্ঠ থাকবে। অর্থাৎ পর পর দুটো মুখ্য গরিষ্ঠের মধ্যে N-2 গৌণ গরিষ্ঠ বর্তমান। অতএব যদি আমাদের ব্যবর্তন পর্দায় সমান্তরাল স্লিটের সংখ্যা হয় 10 টা তবে যে কোন পর পর দুটো মুখ্য গরিষ্ঠের মধ্যে ৪টা গৌণ গরিষ্ঠ পাওয়া যাবে। কেন্দ্রীয় মুখ্য গরিষ্ঠের একদিকে তৃতীয় ক্রম পর্যন্ত মুখ্য গরিষ্ঠ চিত্র 7.19 এ দেখানো হল। দেখুন যে দুটো পর পর মুখ্য গরিষ্ঠের মধ্যে 9টা লঘিষ্ঠ অবস্থান ও 8টা গৌণ গরিষ্ঠ বর্তমান।



চিত্র 7.19: মুখ্য ও গৌণ গরিষ্ঠ, 10 টি স্লিট।

যখন চিত্র 7.19 প্রদর্শিত ব্যতিচারে নকশাটিকে একক স্লিটের ব্যবর্তন তীব্রতা বণ্টন রাশি $\sin^2\beta/\beta^2$ এর নিয়ন্ত্রণে আনা হয় তখন লব্ধি তীব্রতা বণ্টন চিত্র হবে চিত্র 7.20 এর মত।



চিত্র 7.20: 6টি স্লিটে অপবর্তন, $\alpha = 4b$

মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের কৌণিক অর্ধ-বেধ (Angular half-width)

আমরা দেখেছি n-তম ক্রমের মুখ্য গরিষ্ঠের ব্যবর্তন কোণ θ_{max} হলে (সমীকরণ 7.27)

$$d\sin\theta_{max} = n\lambda$$

আবার এর দুইপাশের লঘিষ্ঠের অবস্থানের ব্যবর্তন কোণ θ_{min} হলে

$$d\sin\theta_{min} = n\lambda \pm \frac{\lambda}{N}$$

$\theta_{max} \sim \theta_{min}$ রাশিটিকে বলে মুখ্য গরিষ্ঠের কৌণিক অর্ধবেধ $\Delta\theta_{max}$

$$\therefore \theta_{max} \pm \Delta\theta_{max} = \theta_{min}$$

$$\Rightarrow d\sin(\theta_{max} \pm \Delta\theta_{max}) = n\lambda \pm \frac{\lambda}{N}$$

এখন বামপক্ষ $= d\{\sin\theta_{max}\cos\Delta\theta_{max} \pm \cos\theta_{max}\sin\Delta\theta_{max}\}$

$$= d\{\sin\theta_{max} \pm \Delta\theta_{max}\cos\theta_{max}\}$$

$$= n\lambda \pm d(\Delta\theta_{max}\cos\theta_{max})$$

$$\therefore Id(\Delta\theta_{max}\cos\theta_{max}) = \pm\frac{\lambda}{N}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta_{max} = \frac{\lambda}{Nd\cos\theta_{max}} \qquad \text{...............(7.28)}$$

খুব সহজেই বুঝতে পারা যায় অর্ধবেধ $\Delta\theta$, N বৃদ্ধির সংগে হ্রাস পাবে। অর্থাৎ মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের তীব্রতার অঞ্চল তীক্ষ্ণ হবে, সরু হবে।

উদাহরণ 7 : একটি 3 স্লিটের ফ্রনহফার নকশায় গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের আপেক্ষিক উজ্জ্বলতা নির্ণয় করুন। তীব্রতা বণ্টনের লেখচিত্র অঙ্কন করুন যখন a=2b

সমাধান : N স্লিটের ব্যবর্তন তরঙ্গের তীব্রতা বণ্টনের রাশিমালা $I(\theta) = I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2\left(\frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma}\right)^2$

যেখানে $\beta = \frac{\pi b\sin\theta}{\lambda}$ এবং $\gamma = \frac{\pi d\sin\theta}{\lambda}$

$d = a + b$, $b =$ স্লিট বেধ, $a =$ স্লিট ব্যবধান

যখন $\theta = 0$, $\frac{\sin\beta}{\beta} = 1$ এবং $\frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma} = \pm N$

$$\therefore I(o) = I_0 \times 1 \times N^2 \text{ বা } I_o = \frac{I(O)}{N^2}$$

$$\therefore I(\theta) = \frac{I(O)}{N^2}\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2\left(\frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma}\right)^2$$

এখন N=3 হলে লঘিষ্ঠ অবস্থান N-1=2 এবং গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ N-2=1 টি। লঘিষ্ঠ অবস্থানের শর্ত $\gamma = \frac{p\pi}{N}$, $p \neq mN$, $m = 1,2,3\ldots$ অতএব গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের অবস্থান $\frac{p\pi}{N}$ এবং $\frac{(p+1)\pi}{N}$ এই দুই লঘিষ্ঠ অবস্থানের মাঝামাঝি $= \frac{\frac{p\pi}{N} + \frac{(p+1)\pi}{N}}{2} = \frac{(2p+1)\pi}{2N}$ যেহেতু একটাই গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ, অতএব $p = 1$ এবং গৌণ গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের জন্য $\gamma = \frac{3\pi}{2N} = \frac{\pi}{2}$, $N = 3$

$$\therefore I(\theta) = \frac{I(O)}{3^2}\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 \times \left(\frac{\sin 3 \times \frac{\pi}{2}}{\sin\frac{\pi}{2}}\right)^2$$

$$= \frac{I(O)}{9}\frac{\sin^2\beta}{\beta^2}$$

এখন $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2} = 1$ বলে $\frac{I(\theta)}{I(O)} = \frac{1}{9}$

আবার $a = 2b$

আমরা লিখতে পারি $\beta = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta \approx \frac{\pi b}{\lambda}\theta$

এবং $\gamma = \frac{\pi d\sin\theta}{\lambda} \approx \frac{\pi d}{\lambda}\theta = \frac{\pi}{\lambda}(a+b)d = \frac{3\pi}{\lambda}b\theta$

β	O	π	$\pi/2$
θ	O	$\frac{\lambda}{b}$	$\frac{\lambda}{2b}=\frac{\lambda}{a}$

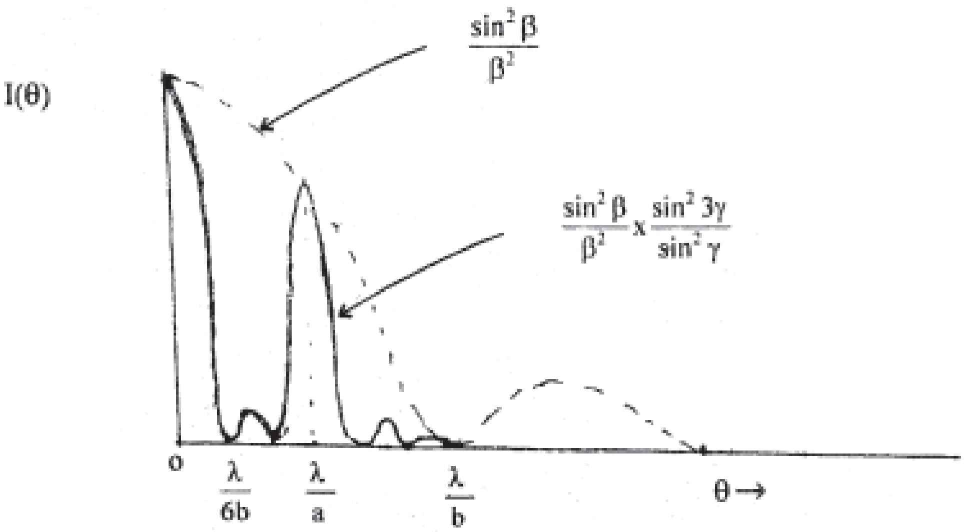
$\therefore$

$\frac{\sin\beta}{\beta}$	1	O	$2/\pi$
β	O	π	$\pi/2$

γ	O	3π	$3\pi/2$	π	$\pi/2$
θ	O	$\frac{\lambda}{b}$	$\frac{\lambda}{2b}=\frac{\lambda}{a}$	$\frac{\lambda}{3b}$	$\frac{\lambda}{6b}$

$\therefore$

$\frac{\sin 3\gamma}{\sin\gamma}$	1	1	+1	1	+1
γ	O	3π ×	$\frac{3\pi}{2}$	π ×	$\pi/2$



চিত্র 7.21 : 3 স্লিটের ব্যবর্তন নকশার তীব্রতা বণ্টন যখন $a = 2b$

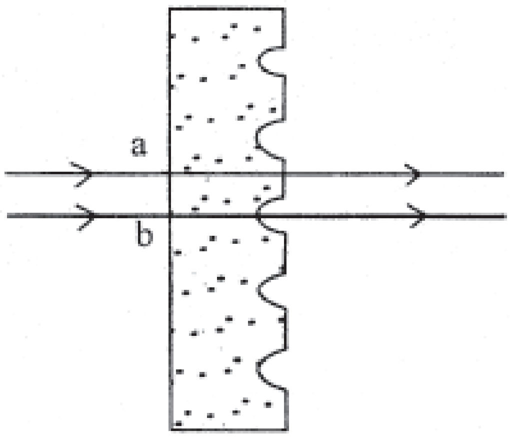
7.7 ব্যবর্তন গ্রেটিং (Diffraction Grating)

ব্যবর্তন পর্দার উপর পর্যায় ক্রমিকভাবে যদি ব্যবর্তন উপাদান সমূহ (হয় উন্মেষ বা প্রতিবন্ধক) এমনভাবে বিন্যস্ত থাকে যে ওরা ব্যবর্তিত তরঙ্গে দশার বা বিস্তারের বা উভয়ের পর্যায়-ক্রমিক পরিবর্তন ঘটায় তবে এই ব্যবস্থাকে বলে ব্যবর্তন গ্রেটিং।

বহু সংখ্যক সমান্তরাল রৈখিক স্লিটযুক্ত ব্যবর্তন পর্দা এরূপ ব্যবর্তন গ্রেটিং-এর একটি দৃষ্টান্ত। আমরা দেখেছি d ব্যবধানে অবস্থিত স্লিটগুলি পরস্পরের মধ্যে $\frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta$ দশা পার্থক্য সৃষ্টি করে পর্যায়ক্রমে। প্রাচীনতম ব্যবর্তন গ্রেটিং তৈরি করেন যোসেফ ভন ফ্রনহফার। তিনি সমান্তরালভাবে দুটি স্ক্রুকে আটকে ওদের খাঁজে খাঁজে সরু রৌপ্যতার পেঁচিয়ে সমান্তরাল তারের ঝাঁঝরি বা গ্রেটিং তৈরি করেন। স্ক্রুর পাশাপাশি খাঁজের দূরত্ব দুই পাশাপাশি তারের মধ্যের স্লিটের উন্মেষের বেধ। ফ্রন হফারের এই গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে প্রায় 200 স্লিট ছিল। ফ্রনহফার কেবলমাত্র গ্রেটিং তৈরির প্রযুক্তির পথ-প্রদর্শক নন, তিনি গ্রেটিং এর তাত্ত্বিক বিশ্লেষণও করেন। কিন্তু এখন আর এই

পদ্ধতিতে গ্রেটিং তৈরি করা হয় না। কারণ গ্রেটিং-এর সাহায্যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পরিমাপ করা যায়। আর এজন্য প্রতি সেন্টিমিটারে গ্রেটিং-এর স্লিট বা প্রতিবন্ধক সংখ্যা 5000 এরও বেশি হওয়া প্রয়োজন।

আমরা লক্ষ্য করি যে ফ্রনহফারের গ্রেটিং-এ অতিক্রমকারী আলোক তরঙ্গের বিস্তারের একটা পর্যায়ক্রমিক পরিবর্তন ঘটে। দুই তারের মধ্যবর্তী উন্মেষে বিস্তার সর্বাধিক। কিন্তু তারের অনচ্ছ প্রতিবন্ধকে এই বিস্তার শূন্য। অতএব এতে ব্যবর্তিত তরঙ্গের বিস্তার মডুলেশন (Amplitude modulation) ঘটে বা বিস্তারকে ছেঁটে মুড়ে দেয়। এই শ্রেণির গ্রেটিংকে বলে উত্তরণ বিস্তার গ্রেটিং (transmission amplitude grating) বা পারগমন বিস্তার গ্রেটিং।



চিত্র 7.22 : উত্তরণ দশা গ্রেটিং

দ্বিতীয় আর এক প্রকার গ্রেটিং অতি উত্তম এক প্রযুক্তির সাহায্যে তৈরি করা হয়। দাগ কাটার জন্য এক ধরণের সূক্ষ্ম ইঞ্জিন আছে — নাম তার রুলিং ইঞ্জিন (ruling engine)। এই ইঞ্জিনের সাহায্যে কোন কাচ বা ধাতব পাতের উপর সমান্তরাল ভাবে দাগ কাটা হয়। হাঁরি অগাস্তাস রোলাঁ (Henry Augustus Rowland) (1848-1901) এই পদ্ধতিতে সর্বপ্রথম সমতল ও অবতল গ্রেটিং প্রস্তুত করেন। তাঁর প্রস্তুত করা গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে 5000 দাগ কাটা হয়েছিল। এই গ্রেটিংকে বলে মূল গ্রেটিং (master grating), এর থেকে নকল গ্রেটিং বা রেপ্লিকা গ্রেটিং (Replica grating) প্রস্তুত করা হয়। মূল গ্রেটিং-এর উপর কলোডিয়ন দ্রবণ (collodion solution — ছবি তোলার ফিল্মের উপর পাতলা পর্দার স্তর গঠনে ব্যবহৃত হয়) ঢেলে শুকিয়ে ফেলা হয়। তারপর কলোডিয়নের পাতলা পর্দাটাকে তুলে নিয়ে কোন কাচের বা স্বচ্ছ মাধ্যমের পাতের উপর আটকে দেয়া হয়। একে বলে নকল গ্রেটিং বা রেপ্লিকা। এই রেপ্লিকা গ্রেটিং মূল গ্রেটিং-এর মতই সমান কার্যকরী। বর্তমানে হলো গ্রাফ পদ্ধতিতে যে গ্রেটিং বানানো হয় তার প্রতি সেন্টিমিটারে এমন কি 50,000 পর্যন্ত দাগ থাকে।

এরূপ একটি মূল বা রেপ্লিকা গ্রেটিং-এর তলের এবং দাগের অভিলম্ব প্রস্থচ্ছেদ চিত্র 7.22-এ অতি বিবর্ধিত আকারে দেখানো হয়েছে। a-রশ্মি ও b-রশ্মির মধ্যে আপাতনের পূর্বে কোন দশা-পার্থক্য না থাকলেও গ্রেটিং থেকে নির্গমনের পর দশাপার্থক্য সৃষ্টি হয়। দাগের অভিলম্বে যদি যাওয়া যায় তবে আলোক রশ্মিগুলির বিস্তারের কোন পরিবর্তন হবে না, বা এই পার্থক্য নিতান্তই নগণ্য।

অতএব রোলাঁর গ্রেটিং উত্তরণ দশা গ্রেটিং। আবার আমরা ভাবতে পারি যে দাগের থেকে যে আলো নির্গত হবে তা হবে বিচ্ছুরিত আলো। অতএব আমরা বহুসংখ্যক একই দশার সমান্তরাল আলোক উৎস পাবো। অন্যদিকে

দুই দাগের মধ্যবর্তী অঞ্চল থেকে নির্গত আলোক আর একগুচ্ছ সমান্তরাল আলোক উৎস সৃষ্টি করবে। দুই শ্রেণির উৎসের মধ্যে দশা-পার্থক্য বর্তমান।

গ্রেটিং-এর বৈশিষ্ট্য

বহুসংখ্যক স্লিটযুক্ত ব্যবর্তন পর্দার যে গ্রেটিং তার ব্যবর্তন নকশার মুখ্য গরিষ্ঠের অবস্থান পাওয়া যায়

$$d\sin\theta = n\lambda,\ n = 0,1,2\ldots$$

সমীকরণ থেকে। কোন বিশেষ ক্রমের $(n = 1,2\ldots)$ ক্ষেত্রে θ এর মান λ-এর উপর নির্ভর করে, কিন্তু এই মুখ্য গরিষ্ঠটির বেধ $\Delta\theta$ বেশি হলে ব্যবর্তন কোণ θ-এর মান সূক্ষ্মভাবে পরিমাপ করা যায় না। তেমন ক্ষেত্রে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ-এর পরিমাপে ভুল থাকবে। আমরা জানি

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd\cos\theta}$$

স্পষ্টতই স্লিট সংখ্যা Nকে বাড়িয়ে $\Delta\theta$কে এত ছোট করা সম্ভব যে গৌণ মুখ্য গরিষ্ঠটি একটা রেখায় পরিণত হবে। একে তখন বলে বর্ণালিরেখা এবং গ্রেটিং-এর ব্যবর্তনজাত নকশাকে বলে গ্রেটিং বর্ণালি (grating spectrum)। অতএব গ্রেটিং-এর সঙ্গে বহু সংখ্যক স্লিটযুক্ত ব্যবর্তন পর্দার পার্থক্য হল এই যে গ্রেটিং-এর ব্যবর্তন উপাদানের (স্লিট বা প্রতিবন্ধক) সংখ্যা তুলনামূলক ভাবে এত বেশি হবে যে λ পরিমাপে ত্রুটি থাকবে না। এই সংখ্যা প্রতি ইঞ্চি তে $\sim 15{,}000$ বা তার বেশি হওয়া আবশ্যক।

আবার ক্রম n এর মান বেশি পেতে গেলে d এর মান অর্থাৎ $\frac{1}{N}$ অনেক কম হওয়া দরকার। তেমন ক্ষেত্রে বিভিন্ন ক্রমের ব্যবর্তন কোণ পরিমাপ দ্বারা একই তরঙ্গ দৈর্ঘ্যকে বারবার পরিমাপ করে পরিমাপগত ত্রুটি কমানো যায়। এছাড়াও প্রতিফলন গ্রেটিং ব্যবহৃত হয়। ধাতব পাতের উপর পূর্বোক্ত পদ্ধতিতে ঘন সন্নিবদ্ধ সমান্তরাল দাগ কেটে প্রতিফলন গ্রেটিং প্রস্তুতি করা হয়। এদের বলে প্রতিফলন দশা গ্রেটিং।

7.7.1 বর্ণালী গঠন

যেহেতু একটি গ্রেটিং কার্যত বহুসংখ্যক সমান্তরাল রৈখিক স্লিটের সমাহার তাই গ্রেটিং-এর ব্যবর্তন নকশায় মুখ্য গরিষ্ঠ-সমূহের অবস্থানের সমীকরণ হবে (যখন আপতিত রশ্মি গ্রেটিং তলে লম্ব)

$$d\sin\theta = n\lambda,\ n = 0,\pm1,\pm2 \qquad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7.29)$$

সমীকরণ (7.29) কে বলে গ্রেটিং সমীকরণ। ইতিপূর্বে এই সমীকরণ সম্পর্কে আলোচনা করা হয়েছে। আমরা আবার লক্ষ্য করব, ব্যবর্তন কোণ θ, ক্রম সংখ্যা n এবং তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ এর উপর নির্ভর করে। যখন $n=0$, তখন λ যাই হোক $\theta=0$ হবে। একে বলে কেন্দ্রীয় মুখ্য গরিষ্ঠের অবস্থান। আমরা যদি সাদা আলোর উৎস ব্যবহার করি তবে $n \neq 0$ হলে, θ এর মান λ-এর উপর নির্ভর করবে। অর্থাৎ বিভিন্ন বর্ণের আলোর ব্যবর্তন কোণ বিভিন্ন হবে। অতএব ব্যবর্তন নকশায় বিভিন্ন বর্ণের উজ্জ্বল রেখা (যদি উৎস রৈখিক হয়) পাওয়া যাবে। এদের সমষ্টিগতভাবে বলে গ্রেটিং বর্ণালি।

অতএব যদি d জানা থাকে তবে ক্রমসংখ্যা জেনে ও θ পরিমাপ করে আমরা λ এর মান নির্ণয় করতে পারি। প্রথমত কোন জানা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোক উৎস ব্যবহার করে আমরা সমীকরণ (7.29) এর সাহায্যে d পরিমাপ করতে পারি। আবার d মাপা গেলে প্রতি সেন্টিমিটারে গ্রেটিং-এ কতগুলো দাগকাটা আছে তাও পরিমাপ করা যায়

$$N = \frac{1}{d}$$

এই সমীকরণ দ্বারা। আবার সমীকরণ (7.29) থেকে অবকলন করে পাওয়া যায়

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{n}{d\cos\theta} \qquad \text{...............(7.30)}$$

$$= \frac{Nn}{\cos\theta} \qquad \text{...............(7.31)}$$

যদি θ খুবই ক্ষুদ্র হয়, তবে $\cos\theta \simeq 1$ এবং নির্দিষ্ট $\Delta\lambda$ এর জন্য $\Delta\theta \propto n$। আবার কোন বিশেষ ক্রমে (অর্থাৎ n ধ্রুবক) $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ = ধ্রুবক। অর্থাৎ দুটি বর্ণালি রেখার মধ্যে যে কৌণিক দূরত্ব তা ঐ দুই রেখার তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পার্থক্যের সমানুপাতী। যেখানে বর্ণালি রেখাগুলির কৌণিক দূরত্ব তাদের সংশ্লিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্যের সমানুপাতী হয় সেই শ্রেণির বর্ণালিকে বলে স্বাভাবিক বর্ণালি (Normal spectrum, এখানে $\theta \simeq 0$ হওয়ায় ব্যবর্তন তরঙ্গ পর্যবেক্ষণ পর্দায় অভিলম্ব ভাবে আগমন করে)। যেহেতু

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = Nn$$

অতএব $\Delta\lambda$ ছোট হলেও যদি N বড় হয় তবে $\Delta\theta$ পরিমাপযোগ্য হবে। আবার যদি θ বড় হয় তবে দেখানো সম্ভব যে বর্ণালির লাল প্রান্তে (red end) $\Delta\theta$ তুলনামূলক ভাবে বেশি হবে।

সমীকরণ (7.29) থেকে আমরা আরো দেখতে পাই যে একই ক্রমে লাল বর্ণের আলোর ব্যবর্তন কোণ θ_r বেগুনি বর্ণের ব্যবর্তন কোণ θ_v থেকে বেশি হবে, কারণ $\lambda_r > \lambda_v$ । কিন্তু দুটো ভিন্ন ক্রমের ক্ষেত্রে λ_v এর ব্যবর্তন কোণ λ_r -এর ব্যবর্তন কোণ অপেক্ষা বেশি হতে পারে। কারণ

$$d\sin\theta_{1r} = n_1\lambda_r$$

$$d\sin\theta_{2v} = n_2\lambda_v$$

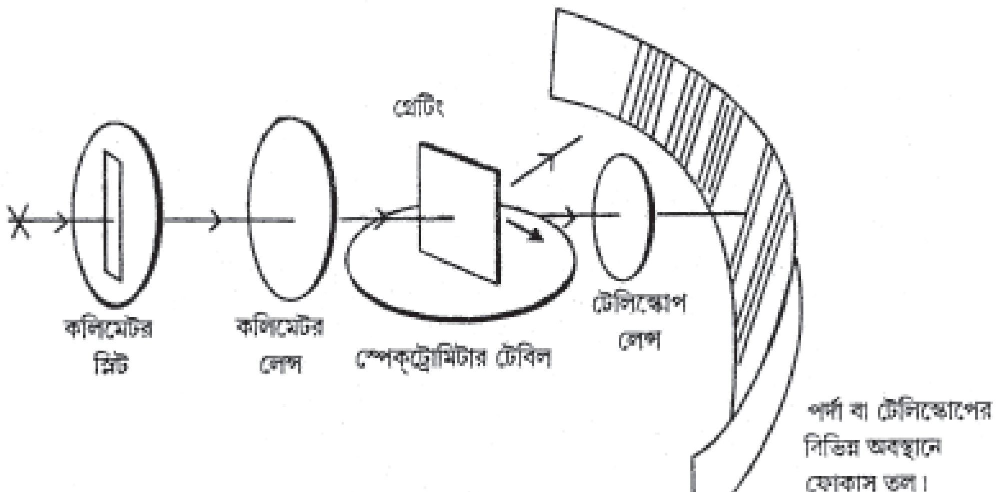
অতএব যদি $n_2\lambda_v > n_1\lambda_r$ হয় তবে θ_{1r} (n_1 ক্রমের লাল বর্ণালি রেখার ব্যবর্তন কোণ) θ_{2v} (n_2 ক্রমের বেগুনি বর্ণালি রেখার ব্যবর্তন কোণ) বৃহত্তর হবে। এরূপ ক্ষেত্রে n_1 ক্রমের বর্ণালির পাল্লা শেষ হওয়ার পূর্বেই n_2 ক্রমের বর্ণালি শুরু হয়ে যাবে। একে বলে বর্ণালির অধিক্রমণ (overlapping of spectra)।

সংক্ষিপ্ত উত্তর ধর্মী প্রশ্ন 5

দেখান যে বর্ণালির লাল প্রান্তে বিচ্ছুরণ বেশি।

7.7.2 গ্রেটিং বর্ণালির পরীক্ষা-ব্যবস্থা

গ্রেটিং-এর বর্ণালির গঠন সম্পর্কে পূর্বানুচ্ছেদে বলা হয়েছে। এই বর্ণালিকে দেখা এবং আলোচিত সিদ্ধান্ত সমূহকে পরীক্ষামূলকভাবে প্রমাণ করা যাবে কীভাবে? যুগ্ম বা একক স্লিটের পরীক্ষার মতই এখানেও আমাদের দরকার একটা স্পেকট্রোমিটার। পরীক্ষাগারে বিন্দু উৎসের পরিবর্তে রৈখিক স্লিট-উৎস ব্যবহার করা হয়। কলিমেটর লেন্সের ফোকাসে রাখা হয় এই স্লিট-উৎসকে। কলিমেটর লেন্স থেকে তৈরি সমতল তরঙ্গ (বা সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ) স্পেকট্রোমিটার টেবিলে রাখা গ্রেটিংতলের উপর লম্বভাবে আপতিত হয়। গ্রেটিং তলকে টেবিলতলের উপর উল্লম্বভাবে রাখা হয় এবং গ্রেটিংয়ের উপর কাটা দাগগুলিকে স্লিট উৎসের সমান্তরাল করা হয়। ব্যবর্তিত তরঙ্গ দূরবীক্ষণের লেন্সের ভিতর দিয়ে গেলে ওর ফোকাস তলে (অর্থাৎ অভিনেত্রের ক্রশ তারের উপর) গ্রেটিং বর্ণালি গঠিত হয়। চিত্র 7.23টিতে উপরে বলা ব্যবস্থাটির একটা ছক দেখানো হয়েছে।



চিত্র 7.23: গ্রেটিং বর্ণালি গঠনের ছক।

অভিনেত্রে চোখ রেখে দূরবীক্ষণের কলিমেটর অক্ষের দুপাশে সরাতে থাকলে আমরা যা দেখতে পাব তা হল

1. কলিমেটর অক্ষ বরাবর স্লিট যে আলোকে আলোকিত সেই আলোকে গঠিত স্লিটের প্রতিবিম্ব দেখা যাবে। এটাই হল কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ (central or zeroth maximum)।
2. এই কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠের উভয় পার্শ্বে বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি দেখা যাবে। উভয় পার্শ্বের বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি শুরু হবে লাল রেখাচিত্রে (red line) এবং শেষ হবে বেগুনি রেখাচিত্রে (violet line)। যদি উৎসাগত আলোকে উভয় বর্ণের তরঙ্গ বর্তমান থাকে।
3. দুটি বা বড়জোর তিনটি ক্রমের বর্ণালি দেখা যাবে। আমরা জানি গ্রেটিং-এর দাগসংখ্যার উপর ক্রম সংখ্যা নির্ভর করে।

4. সাধারণত: দ্বিতীয় ও তৃতীয় ক্রমের অধিক্রমণ (overlapping) ঘটে থাকে।

5. বিভিন্ন বর্ণের বর্ণালি রেখা এবং এক বর্ণের কিন্তু বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি রেখার উজ্জ্বলতা সমান নয়।

দৃষ্টান্তমূলক সংখ্যাভিত্তিক সমস্যা

উদাহরণ ৪ একটি উত্তরণ গ্রেটি-এর উপর সাদা আলো লম্বভাবে আপতিত হল। যদি এতে প্রতিসেন্টিমিটারে 1000 দাগ কাটা থাকে তবে প্রথম ক্রমের লাল আলো ($\lambda = 6.5\times10^{-5}$ সেমি) কত কোণে ব্যবর্তিত হবে?

আমরা জানি গ্রেটিং সমীকরণ

$$d\sin\theta = n\lambda$$
$$\Rightarrow \sin\theta = \frac{n\lambda}{d} = nN\lambda$$
$$\therefore \theta = \sin^{-1}(nN\lambda)$$

এখানে $n = 1, N = 1000, \lambda = 6.5\times10^{-5}$

$$\therefore \theta = \sin^{-1}\left(1000\times6.5\times10^{-5}\right)$$
$$= \sin^{-1}.065 = 3.73^0$$

উদাহরণ 9 : প্রতি সেন্টিমিটারে 12000 দাগের গ্রেটিং-এর উপর $4\times10^{14}\,\mathrm{Hz}$ কম্পাঙ্কের আলো আপতিত হলে গ্রেটিং বর্ণালির সর্বোচ্চ ক্রম কত হবে?

আমরা জানি $d\sin\theta = n\lambda$

$$\therefore \sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$$

$\therefore \frac{n\lambda}{d} \le 1$ হবে

বা $n \le \frac{d}{\lambda}$

এখানে $d = \frac{1}{N} = \frac{1}{12\times10^{-3}}, \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3\times10^{10}}{4\times10^{14}} = 0.75\times10^{-4}$

$$\therefore n \le \frac{1}{12\times10^{3}\times.75\times10^{-4}} \Rightarrow n \le 1.11$$

যেহেতু n পূর্ণসংখ্যা হবে, অতএব কেবলমাত্র প্রথম ক্রমের বর্ণালি দৃশ্যমান হবে।

উদাহরণ 10: প্রতি সেন্টিমিটারে 6000 রেখাযুক্ত একটি গ্রেটিং-এর উপর সাদা আলো লম্বভাবে আপতিত হল। গঠিত গ্রেটিং বর্ণালি ক্রম সংখ্যা কত দৃষ্ট হবে? বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালির অধিক্রমণ ঘটবে কি? যদি সন্নিকটবর্তী দ্বিতীয়ক্রমের দুটি রেখা বর্ণালির তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পার্থক্য হয় $6\,\mathring{A}$ তবে তাদের কৌণিক বিভাজন কত? প্রদত্ত আছে যে $\lambda_v = 4\times10^{-5}$ সে, $\lambda_r = 7\times10^{-5}$ সে. এবং সন্নিকটবর্তী দুই রেখার ক্ষুদ্রতরটির দৈর্ঘ্য $= 6\times10^{-5}$ সেমি।

সমাধান: আমরা জানি $\quad d\sin\theta = n\lambda$

$$\Rightarrow \sin\theta = \frac{n\lambda}{d} = nN\lambda \le 1$$

$$\therefore n \le \frac{1}{N\lambda}$$

স্পষ্টতই বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে দৃষ্ট সর্বোচ্চক্রম সংখ্যা বিভিন্ন হবে। λ_v ও λ_r এর ক্ষেত্রে সর্বোচ্চক্রম গণনা করা যাক।

$$\frac{1}{N\lambda_r} = \frac{1}{6000\times7\times10^{-5}} = \frac{100}{42} = \frac{50}{21} = 2.38$$

$$\frac{1}{N\lambda_v} = \frac{1}{6000\times4\times10^{-5}} = \frac{100}{24} = \frac{25}{6} = 4.16$$

অতএব লাল রেখা বর্ণালি 2 ক্রম ও বেগুনি রেখা বর্ণালি 4 ক্রম পর্যন্ত দৃষ্ট হবে।

যখন n ক্রমের লাল আলোকের ব্যবর্তন কোণ θ_{nr} $n+1$ ক্রমের বেগুনি আলোর ব্যবর্তন কোণ θ_{n+1_v} অপেক্ষা বেশি হবে তখনই অধিক্রমণ ঘটবে। অর্থাৎ $\theta_{nr} > \theta_{n+1\,v}$ হলে অধিক্রমণ হবে।

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d} = Nn\lambda$$

$$\theta_n = \sin^{-1}(Nn\lambda)$$

$$\theta_{1r} = \sin^{-1}(N\times1\times\lambda_r) = \sin^{-1}\left(6000\times7\times10^{-5}\right) = \sin^{-1}0.42$$

$$\theta_{2v} = \sin^{-1}(N\times2\times\lambda_v) = \sin^{-1}\left(6000\times2\times4\times10^{-5}\right) = \sin^{-1}0.48$$

$\therefore \theta_{1r} < \theta_{2v}$, অতএব অধিক্রমন হয়নি।

$$\theta_{2r} = \sin^{-1}\left(2\times6000\times7\times10^{-5}\right) = \sin^{-1}.84$$

$$\theta_{3v} = \sin^{-1}\left(3\times6000\times4\times10^{-5}\right) = \sin^{-1}0.72$$

$$\therefore \theta_{2r} > \theta_{3v}$$

অর্থাৎ দ্বিতীয় ক্রমের বর্ণালি লাল রেখায় শেষ হওয়ার পূর্বেই তৃতীয় ক্রমের বর্ণালি বেগুনি রেখায় শুরু হবে।

$$d\sin\theta = n\lambda$$

$$\therefore d\cos\theta\,\Delta\theta = n\Delta\lambda$$

বা $$\Delta\theta = \frac{n\Delta\lambda}{d\cos\theta} = \frac{nN\Delta\lambda}{\sqrt{1-\sin^2\theta}} = \frac{nN\Delta\lambda}{\sqrt{1-\frac{n^2\lambda^2}{d^2}}}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \frac{nN\Delta\lambda}{\sqrt{1-(nN\lambda)^2}}$$

এখানে $n = 2, \lambda = 6\times10^{-5}$ সেমি $N = 6000, \Delta\lambda = 6\times10^{-8}$ সেমি

$$\therefore \Delta\theta = \frac{2\times6000\times6\times10^{-8}}{\sqrt{1-\left(2\times6000\times6\times10^{-5}\right)^2}}$$

$$= \frac{72\times10^{-5}}{\sqrt{1-(.72)^2}} = 0.00104$$ রেডিয়ান

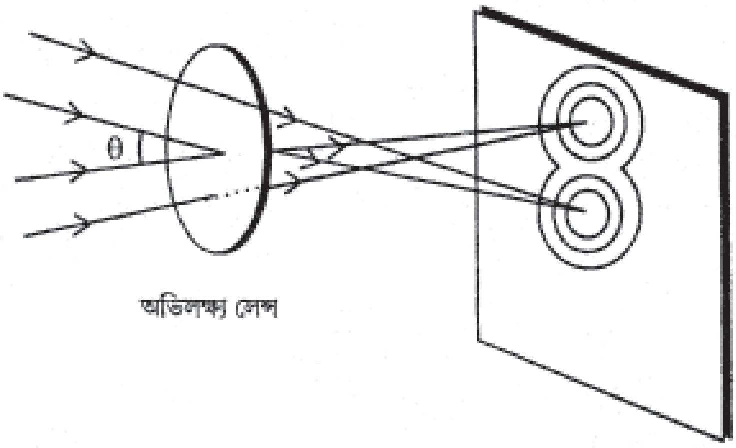
$= 3.58$ মিনিট

7.8 আলোক যন্ত্রের প্রতিবিম্ব গঠন এবং ব্যবর্তন

জ্যামিতীয় আলোক বিজ্ঞান থেকে আমরা জানি যদি যন্ত্রের লেন্স ব্যবস্থা ত্রুটিমুক্ত হয় তবে সেটিএকটি বিন্দু উৎসের বিন্দুবৎ প্রতিবিম্ব গঠন করবে। বাস্তবে কিন্তু এরকম ঘটে না। একটি উত্তমরূপে ত্রুটিমুক্ত লেন্স ব্যবস্থার দূরবীক্ষণে একটি বিন্দু উৎসের (যেমন কোন নক্ষত্র যাকে বিন্দু-উৎস রূপে বাস্তবে বিবেচনা করা চলে) যে প্রতিবিম্ব গঠন করে তা কার্যত একটি বৃত্তাকার পাত রূপে দেখা যায়। প্রকৃতপক্ষে এই প্রতিবিম্ব আমাদের পূর্ব পরিচিত এয়ারি নকশা (7.4 অনুচ্ছেদ) (Fringed Airy Disc)। আমরা 7.4 অনুচ্ছেদে ব্যবর্তন পর্দায় বৃত্তাকার উন্মেষ ব্যবহার করে নিরীক্ষা পর্দায় এই এয়ারি নকশা দেখেছি। কিন্তু প্রশ্ন হল দূরবীক্ষণের পর্দায় কেন গঠিত হল এয়ারি নকশা? এই প্রশ্নের জবাব আপনারা সহজেই পেতে পারেন দূরবীক্ষণে প্রতিবিম্ব গঠন প্রক্রিয়ার সঙ্গে ব্যবর্তন পর্দায় বৃত্তাকার উন্মেষের ব্যবর্তন প্রক্রিয়ার তুলনা করে। এখানে উৎস নক্ষত্র বহুদূরে, কার্যত অসীমে। দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্য লেন্স ব্যবর্তন পর্দার বৃত্তাকার উন্মেষ। স্পষ্টতই দূরবীক্ষণের অভিনেত্র ক্ষেত্রে দূরবর্তী নক্ষত্রের যে প্রতিবিম্ব গঠিত হবে তা হবে একটি এয়ারি নকশা। অর্থাৎ কেন্দ্রস্থ উজ্জ্বল বৃত্তাকার পাত যার উজ্জ্বলতা ধীরে ধীরে প্রান্তের দিকে কমে যায়। একে ঘিরে থাকে ক্রমহ্রাসমান উজ্জ্বলতার একাধিক বলয়। এই বলয়গুলিও প্রান্তের দিকে ক্রম বিলীয়মান। কিন্তু বলয়গুলির মধ্যবর্তী অঞ্চলে থাকে শূন্য তীব্রতার একটি বলয়। বাইরের বৃত্তাকার ফ্রিঞ্জের উজ্জ্বলতা এত কম যে আমরা কেন্দ্রীয় বৃত্তাকার উজ্জ্বলপাতকে দূরনক্ষত্রের প্রতিবিম্ব রূপে বিবেচনা করতে পারি।

প্রশ্ন হল — বিন্দুবৎ উৎসের বিন্দু প্রতিবিম্ব কি সম্ভব নয়? এ প্রশ্নের উত্তর আলোচনার আগে আমরা মনে করব, এয়ারি নকশার কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পাতের কৌণিক ব্যাসার্ধ হল $\frac{1.22\lambda}{D}$, যেখানে λ = তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং D = অপবর্তন উন্মেষের ব্যাস। এক্ষেত্রেও নক্ষত্রের প্রতিবিম্বের কৌণিক ব্যাসার্ধ হবে $\frac{1.22\lambda}{D}$। তবে এক্ষেত্রে λ = নক্ষত্র থেকে আগত আলোকের সর্বাধিক কার্যকর বর্ণের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং D = দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্য লেন্সের ব্যাস। অতএব প্রতিবিম্বের ব্যাস $\left(2 \times \frac{1.22\lambda}{D}\right)$ দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্যের ব্যাসের উপর নির্ভর করে। অভিলক্ষ্যের উন্মেষ ছোট হলে প্রতিবিম্বর ব্যাস বাড়বে এবং উন্মেষ বড় হলে প্রতিবিম্বের ব্যাস কমবে কিন্তু যেহেতু কোন ত্রুটিহীন লেন্স ব্যবস্থার ব্যাসের মান সীমিত, তাই কখনই বিন্দুবৎ প্রতিবিম্ব তৈরি হবে না। অনুবীক্ষণ যন্ত্রের ক্ষেত্রেও এই একই যুক্তি প্রযোজ্য। অর্থাৎ ব্যবর্তনের জন্য কোন আলোকযন্ত্রের পক্ষে বিন্দুর মত প্রতিবিম্ব তৈরি করা সম্ভব নয়।

এই যে কোন আলোকযন্ত্র কোন বিন্দু উৎসের বিন্দু প্রতিবিম্ব গঠন করতে পারে না এর অন্য গুরুত্বও আছে। যদি দুটো বিন্দু উৎস পরস্পরের খুব কাছাকাছি হয় তবে দূর থেকে তাদের আলাদাভাবে বুঝতে পারা যায় না। আবার দূরবীক্ষণে তাদের প্রতিবিম্ব ছড়িয়ে পড়ায় প্রতিবিম্ব দুটিকে আলাদাভাবে নাও বোঝা যেতে পারে যেহেতু

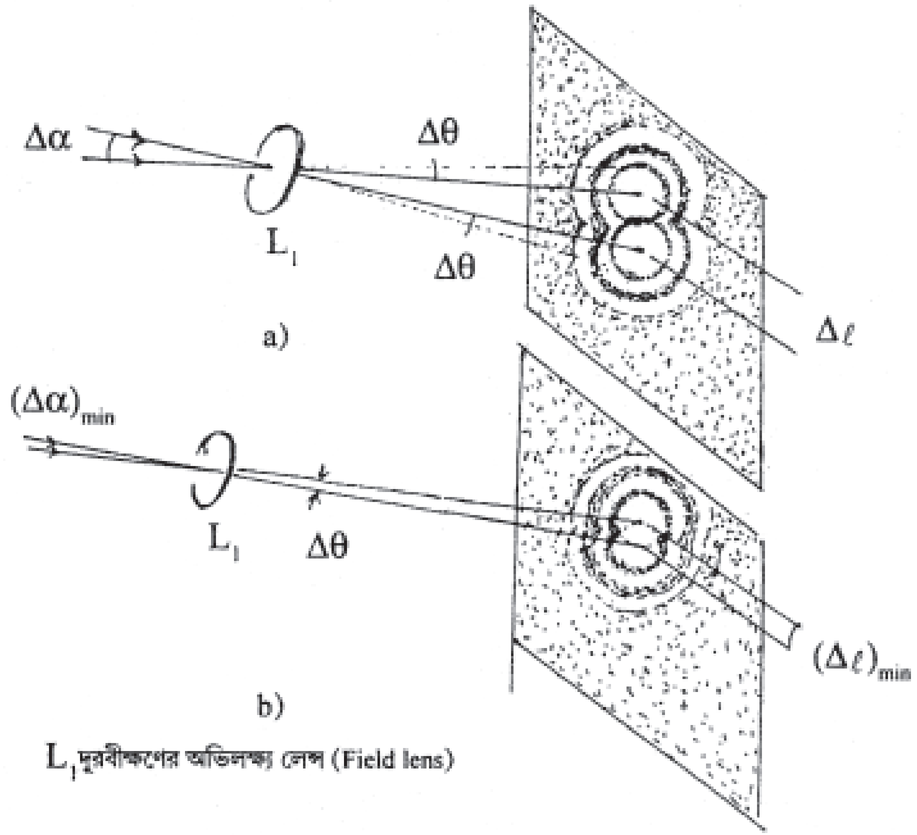


চিত্র 7.24 : দুটি নিকটবর্তী আলোক উৎসের প্রতিবিম্ব গঠনে এয়ারি নকশা

এয়ারি নকশার কেন্দ্রীয় উজ্জ্বলবৃত্তের ব্যাসার্ধ $\frac{1.22\lambda}{D}$ অতএব দূরবীক্ষণের D ছোট হলে এয়ারি নকশা দুটো পরস্পরের উপর অধিক্রমণ (overlapping) ঘটাবে। অতএব দুটো কাছাকাছি বিন্দুকে আলাদা করে বুঝতে গেলে অর্থাৎ দূরবীক্ষণের উন্নততর বিভেদনের জন্য ওর D বড় হতে হবে। এ জন্য কোন দূরবীক্ষণ সম্পর্কে তার অভিলক্ষ্য লেন্সের ব্যাসের পরিমাপ উল্লেখ করা হয়। 50" দূরবীক্ষণ বলতে বুঝায় যে ঐ দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্য লেন্সের ব্যাস 50"।

7.8.1 আলোকযন্ত্রের প্রভেদন ক্ষমতা (Resolving Power of Optical Instrument)

আমরা ইতিমধ্যে দেখেছি যে কোন আলোক যন্ত্র বিন্দু উৎসের বিন্দু-প্রতিবিম্ব গঠন করতে পারে না। বিভিন্ন উৎসের প্রতিবিম্বগুলোর এয়ারি নকশা পরস্পরের উপর অধিক্রমণ করে এবং আমরা প্রতিবিম্বগুলোকে পরস্পর থেকে আলাদাভাবে চিনতে পারি না। অবশ্য এই অধিক্রমণের একটা সীমা পেরিয়ে না যাওয়া পর্যন্ত এয়ারি নকশাগুলিকে আলাদাভাবে চেনা যায়। চিত্র 7.25-এ অধিক্রমণের ঘটনাটি ব্যাখ্যা করা হয়েছে। মনে করা যাক যে দুটো দূরবর্তী নক্ষত্র থেকে আসা আলোক রশ্মি দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্য লেন্স L_1-এ $\Delta\alpha$ কৌণিক বিভাজন উৎপন্ন করে। ফোকাসতলে গঠিত এয়ারি নকশা জ্যামিতীয় প্রতিবিম্ব বিন্দুকে কেন্দ্র করে $\Delta\theta$ কৌণিক অর্ধ-বেধে ছড়িয়ে পড়বে। যদি $\Delta\alpha >> \Delta\theta$ হয় তবে গঠিত প্রতিবিম্ব সুচিহ্নিত হবে এবং সহজেই এটি অন্যের থেকে আলাদা হবে।



চিত্র 7.25 a) অধিক্রমণ হওয়া সত্ত্বেও দুই প্রতিবিম্ব সুস্পষ্টভাবে চেনা যায়, b) অধিক্রমণের সীমা, আরো অধিক্রমণ ঘটলে প্রতিবিম্ব দুটোকে আলাদাভাবে চেনা যাবে না।

নক্ষত্র দুটো যদি কাছাকাছি চলে আসতে থাকে তবে $\Delta\alpha$ কমে যাবে আর এদের এয়ারি নকশার প্রতিবিম্ব দুটো পরস্পরের কাছাকাছি হতে থাকবে এবং একসময় পরস্পরের সঙ্গে মিশে যাবে। যখন

$$(\Delta\alpha)_{min} = \Delta\theta$$

হবে, তখন দুটি এয়ারি নকশা পরস্পর থেকে কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট থাকবে (just resolved) [চিত্র 7.25 (5b)]।

এই সম্পর্কটি পাওয়া যায় প্রভেদন (resolution) সম্পর্কে লর্ড রেলির দেওয়া [জন উইলিয়াম স্ট্রাট (1842-1919), ইংরেজ গণিতজ্ঞ ও পদার্থ বিজ্ঞানী] নির্ণায়ক (Ray!eigh criterion) থেকে। রেলির নির্ণায়কটি হল দুটো এয়ারি নকশার একটার কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ যখন অন্য নকশার প্রথম লঘিষ্ঠের উপর পড়ে তখন উৎস দুটোকে কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট বলা যায়।

$$\text{এখন } \Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad \text{অতএব}$$

$$(\Delta\alpha)_{min} = \frac{1.22\lambda}{D} \qquad \text{...............(7.32)}$$

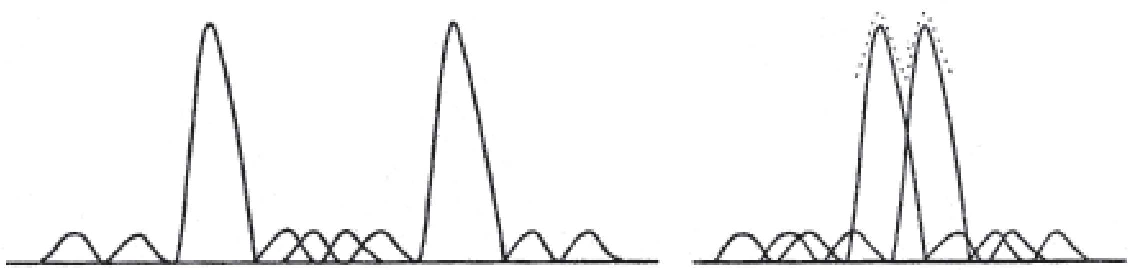
সমীকরণ (7.32) হল লঘিষ্ঠ বিশ্লেষণীয় কৌণিক বিভাজন বা কৌণিক প্রভেদন সীমা (The minimum resolvable anguler separation or angular limit of resolution.)। যদি প্রতিবিম্ব দুটোর দুই কেন্দ্রের দূরত্ব $\Delta\ell$ হয়, তবে এই প্রভেদন সীমা হবে

$$(\Delta\ell)_{min} = \frac{1.22f\lambda}{D} \qquad \text{...............(7.33)}$$

যেখানে f= অভিলক্ষ্য লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য।

প্রতিবিম্ব গঠনকারী যন্ত্রে **প্রভেদন ক্ষমতা** (resolving power) সাধারণভাবে $\frac{1}{(\Delta\alpha)_{min}}$ বা $\frac{1}{(\Delta\ell)_{min}}$ দিয়ে প্রকাশ করা হয়।

লেখচিত্রে রেলি'র নির্ণায়ক



a) b)

চিত্র 7.26 a) সম্পূর্ণরূপ বিশ্লিষ্ট, b) রেলি'র নির্ণায়ক অনুসারে কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট।

দুটি উৎসের যে ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যায় তার তীব্রতা বন্টনের লেখচিত্রে যদি উভয়ের কেন্দ্রীয় তীব্রতার অবস্থান যে কোনটির প্রথম শূন্য তীব্রতার অবস্থান থেকে দূরে থাকে [চিত্র 7.25 (a) তবে উৎসদ্বয় সম্পূর্ণভাবে বিশ্লিষ্ট হবে। কিন্তু যদি একটা কেন্দ্রীয় তীব্রতার গরিষ্ঠ অবস্থান অন্যটার প্রথম লঘিষ্ঠ অবস্থানের উপর পড়ে চিত্র 7.25 b)] তবে রেলির নির্ণায়ক অনুসারে উৎস দুটো কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট হবে। যদিও রেলির নির্ণায়কের কোণ

বৈজ্ঞানিক ভিত্তি নেই, তবুও এই নির্ণায়ক অত্যন্ত সহজ ও কার্যকরী।

উদাহরণ 11 : মাউন্ট পালোমার-এর 200″ "দূরবীক্ষণের একটি 5 মিটার ব্যাসের দর্পণ আছে। 550nm তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে এর কৌণিক বিশ্লেষণ সীমা নির্ণয় করুন।

সমাধান

$$(\Delta\alpha)_{min} = \Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

এখানে $\lambda = 550 \times 10^{-9}\text{m},\ D = 200 \times 2.54 \times 10^{-2} = 5.08\text{m}$

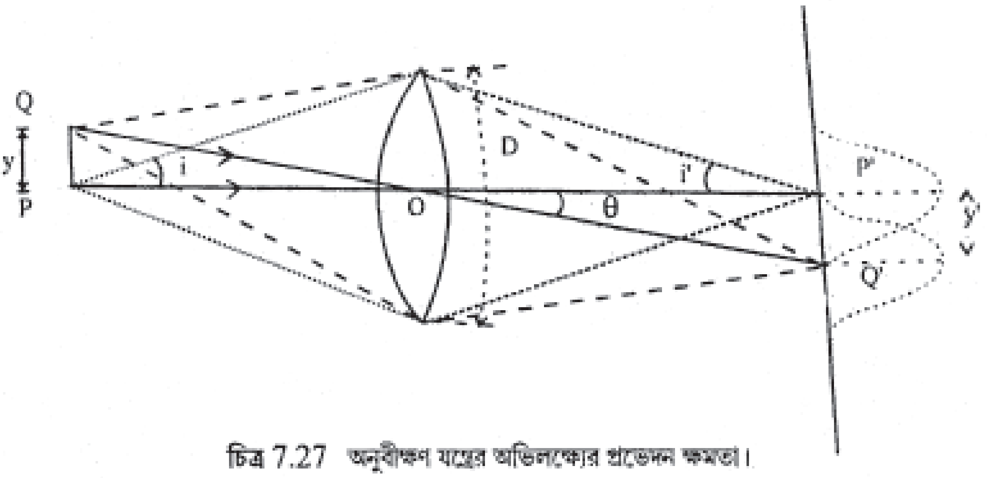
$$\therefore \Delta\theta = \frac{1.22 \times 550 \times 10^{-9}}{5.08}$$

$= 1.32 \times 10^{-7}$ রেডিয়ান

$= 2.72 \times 10^{-2}$ কৌণিক সেকেণ্ড

সংক্ষিপ্ত উত্তরধর্মী প্রশ্ন 6

মহাকাশ পর্যবেক্ষণ করার জন্য আপনাকে দুটো আলাদা ব্যাসের দূরবীক্ষণ দেওয়া হল। অতি নিস্তেজ ও দূরবর্তী নক্ষত্র পর্যবেক্ষণে আপনি কোন দূরবীক্ষণ ব্যবহার করবেন?



চিত্র 7.27 অনুবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্যের প্রভেদন ক্ষমতা।

7.8.2 অনুবীক্ষণ যন্ত্রের প্রভেদন ক্ষমতা

অনুবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্য লেন্সের ব্যাস D। P এবং Q দুটি অতি কাছাকাছি বিন্দু যাদের অনুবীক্ষণের দ্বারা দেখা হচ্ছে। P ও Q বিন্দুতে যদি আলোক উৎস হয় তবে দুটি গোলীয় তরঙ্গ বিন্দু দুটো থেকে ছড়িয়ে পড়বে এবং লেন্স O দিয়ে অভিসৃত হয়ে P' Q' পর্দার উপর সমাক্ষীয় বিন্দু যথাক্রমে P' ও Q'-এ দুটো এয়ারি নকশার প্রতিবিম্ব তৈরি হবে। রেলির নির্ণায়ক অনুসারে P ও Q বিন্দুদ্বয়কে কোনক্রমে প্রভেদ করা যাবে যদি Q' বিন্দুটা P'

কেন্দ্রিক এয়ারি নকশার প্রথম শূন্য তীব্রতার বলয়ের উপর অবস্থান করে বা বিপরীতক্রমে, যদি P' বিন্দুটি Q' কেন্দ্রিক এয়ারি নকশার প্রথম শূন্য তীব্রতার বলয়ের উপর অবস্থান করে। সেক্ষেত্রে যদি $P'Q'=y'$ ব্যবধান O বিন্দুতে θ কোণ উৎপন্ন করে তবে

$$\sin\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{1.22\lambda_0}{\mu' D} \qquad \text{...............(7.34)}$$

সেখানে μ' হল অভিলক্ষ্যের যে পার্শে প্রতিবিম্ব তৈরি হয় সেই পার্শ্বের মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক এবং $\lambda = \frac{\lambda_0}{\mu'}$, λ_0 শূন্য মাধ্যমে উৎসজাত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য। চিত্র 7.27 থেকে

$$\sin\theta = \frac{P'Q'}{OP'} = \frac{y'}{OP'} = \frac{y'\tan i'}{D/2} \approx \frac{2y'\sin i'}{D} \qquad \text{...............(7.35)}$$

ধরা হল যে $\tan i' \approx \sin i'$ (7.34) এর সঙ্গে তুলনা করে পাই

$$y' \approx \frac{0.61\lambda_0}{\mu'\sin i'}$$

কিন্তু জ্যামিতীয় আলোক বিজ্ঞান থেকে আমরা জানি

$$\mu' y' \sin i' = \mu y \sin i$$

μ = আপাতন মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক।

$$\therefore y \approx \frac{0.61\lambda_0}{\mu \sin i} \qquad \text{...............(7.36)}$$

এটাই হল দুটো বিন্দুর মধ্যে ন্যূনতম দূরত্ব যা হল অনুবীক্ষণ যন্ত্রের প্রভেদন সীমা। $\mu\sin i$ কে বলে, আলোকযন্ত্রের সংখ্যাগত উন্মেষ (numerical aperture)। স্পষ্টতই $\mu\sin i$ বাড়লে অনুবীক্ষণ যন্ত্রের প্রভেদন ক্ষমতা বৃদ্ধি পাবে। এইজন্য অনুবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্যকে তেলে ডুবিয়ে রাখা হয় যাতে μ বাড়ে, আবার λ কমলে প্রভেদন ক্ষমতা বাড়ে। এজন্য অভিলক্ষ্য অঞ্চলকে নীল বা অতিবেগুনি রশ্মি দিয়ে আলোকিত করা হয়।

যদিও P ও Q বিন্দু দুটোকে আলোক উৎস হিসেবে ধরা হয়েছে, বাস্তবে অনুবীক্ষণ যন্ত্রে বস্তু পর্যবেক্ষণের জন্য তার উপর আলো ফেলা হয়। যদিও আলোকিত করার উপর প্রভেদন ক্ষমতা নির্ভর করে, তবুও (7.36) সমীকরণ মোটামুটি ভাবে প্রভেদন ক্ষমতার ধারণা দেয়।

7.8.3 ব্যবর্তন গ্রেটিং-এর প্রভেদন ক্ষমতা

আমরা দেখেছি বহুবর্ণী আলোক উৎস দিয়ে যদি কোন রৈখিক স্লিটকে আলোকিত করা যায় তবে ব্যবর্তন গ্রেটিং-এ ব্যবর্তিত তরঙ্গ বিশ্লিষ্ট হয় এবং স্পেকট্রোমিটার দূরবীক্ষণের ফোকাস তলে বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি তৈরি

করে। পরপর রেখা বর্ণালীগুলি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য অনুসারে বিভিন্ন অবস্থান গ্রহণ করে। পাশাপাশি দুটো রেখা বর্ণালিকে পরস্পর থেকে কোনক্রমে প্রভেদ করার ক্ষমতাকে বলে গ্রেটিং-এর প্রভেদন সীমা। যদি λ ও $\lambda + \Delta\lambda$ এ রকম দুটো তরঙ্গের রেখা বর্ণালিকে কোন গ্রেটিং কোনক্রমে পৃথকভাবে উৎপন্ন করতে পারে তবে তার প্রভেদন ক্ষমতা হল

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \qquad \text{...............(7.37)}$$

এক্ষেত্রে রেলি'র নির্ণায়ক প্রয়োগ করে আমরা বলতে পারি যখন $\lambda + \Delta\lambda$ তরঙ্গের কোনক্রমের মুখ্য গরিষ্ঠ তীব্রতা λ তরঙ্গের একই ক্রমের প্রথম লঘিষ্ঠ অবস্থানে পড়বে তখন দুই তরঙ্গের ঐ ক্রমের বর্ণালিদ্বয় কোনক্রমে প্রভেদিত (just resolved) হবে। ধরা যাক n ক্রমের এবং $\lambda + \Delta\lambda$ তরঙ্গের গরিষ্ঠ অবস্থানের ব্যবর্তন কোণ θ। আবার ঐ ক্রমে λ এর প্রথম লঘিষ্ঠ অবস্থানও হবে θ। অতএব গ্রেটিং সমীকরণ থেকে লেখা যায়

$$d\sin\theta = n(\lambda + \Delta\lambda)$$

এবং

$$d\sin\theta = n\lambda + \frac{\lambda}{N}$$

$$\therefore n\Delta\lambda = \frac{\lambda}{N}$$

$$\Rightarrow R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN \qquad \text{...............(7.38)}$$

অতএব গ্রেটিং-এর প্রভেদন ক্ষমতা গ্রেটিং-এর মোট দাগ সংখ্যা এবং ক্রমসংখ্যার উপর নির্ভর করে। অবশ্য আপতিত আলো গ্রেটিং-এর যে ক্ষেত্রটুকুর উপর পড়ে সেই ক্ষেত্রের দাগ সংখ্যাই বিবেচ্য। যদি গ্রেটিং-এর উন্মেষ বেধ D হয় তবে Nd=D। অতএব N বাড়ালে d কমবে, ফলে $d\sin\theta = n\lambda$ অনুসারে n ও কমবে। তাই (7.38) থেকে বলা যাবে না যে N বাড়িয়ে R কে খুশিমত বাড়ানো যাবে।

উদাহরণ 12 : সোডিয়ামের D_1 ও D_2 রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে $5890\,\mathring{A}$ এবং $5896\,\mathring{A}$। প্রথমক্রমেই এই দুই রেখাকে কোন ক্রমে প্রভেদ দেখার জন্য ন্যূনপক্ষে গ্রেটিং-এ দাগের সংখ্যা কত দরকার?

সমাধান : এখানে $\lambda = 5890\,\mathring{A}$ এবং $\Delta\lambda = 6\,\mathring{A}$

$$\therefore \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{5890}{6} = 981.6$$

কিন্তু $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN,\ n = 1$

$\therefore N = 981.6$

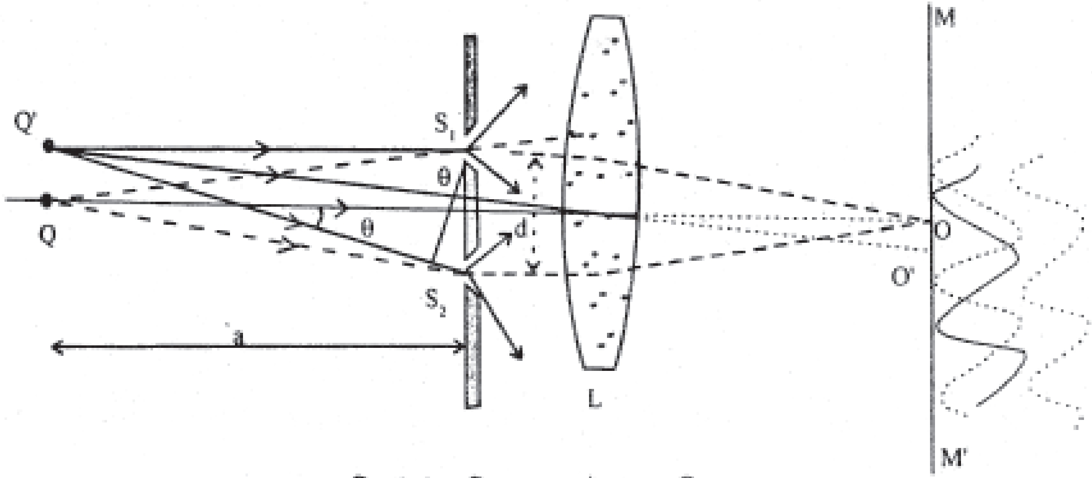
অর্থাৎ গ্রেটিং এ ন্যূনপক্ষে 982 টি দাগ দরকার।

সাধারণত গ্রেটিং-এ 1000, 1500, 2000...ইত্যাদি সংখ্যক দাগ কাটা হয়। অতএব 1000 দাগের গ্রেটিং এর সাহায্যে প্রথমক্রমে D_1 ও D_2 রেখাকে কোনক্রমে বিশ্লিষ্ট দেখা যাবে।

7.8.4 প্রভেদন ক্ষমতার উন্নতি বিধান (Improving resolving power of an optical system)

আপনারা দেখেছেন দূরবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে বহুদূরবর্তী নক্ষত্রের অস্তিত্ব, অতি কাছাকাছি দুটো নক্ষত্রের প্রভেদন এবং তাদের কৌণিক বিভাজন দেখা ও পরিমাপ করা যায়। অবশ্য কোন বিশেষ নক্ষত্রের কৌণিক ব্যাস পরিমাপ করা সম্ভব হয়নি ব্যবর্তন পদ্ধতিতে। এর কারণ, আমরা যে কোন দূরনক্ষত্রকে একটা বিন্দু উৎস তথা সুসম্বদ্ধ উৎস রূপে বিবেচনা করেছি। অতএব নক্ষত্রের ব্যাস পরিমাপ করতে হলে নক্ষত্রকে বিন্দু উৎস বিবেচনা করা চলবে না। এবং তার বিভিন্ন বিন্দু থেকে আগত তরঙ্গ পরস্পরের সঙ্গে সুনির্দিষ্ট দশাসম্পর্ক বজায় রাখবে না। অতএব এরকম উৎস থেকে আগত আলোক তরঙ্গ নিজের নিজের যুগ্মস্লিট ব্যতিচার নকশা গঠন করবে এবং পর্দার উপর আমরা এই নকশাগুলির তীব্রতা জাত লব্ধি-তীব্রতার বণ্টন পাবো। কোন নক্ষত্রের ব্যাস পরিমাপের জন্য তার কোন ব্যাসের দুই বিপরীত প্রান্ত থেকে আগত আলোক রশ্মিগুচ্ছ বিবেচনা করতে হবে।

আমরা চিত্র 7.28 বর্ণিত পরীক্ষাটিকে বিবেচনা করতে পারি।



চিত্র 2.8 দুটি অসুসম্বদ্ধ উৎসের ব্যতিচার

আমরা অভিলক্ষ্য L-এর সামনে একটা এমন যুগ্মস্লিট স্থাপন করি যে স্লিট দুটোর মধ্যেকার দূরত্ব d কে খুশিমত পাল্টানো যায়। Q ও Q' দুটি অসুসম্বদ্ধ আলোক উৎস। উৎস দুটো নাক্ষত্রিক দূরত্বে অবস্থিত এবং সমান উজ্জ্বল। যেহেতু Q ও Q' অসুসম্বদ্ধ, অতএব ওদের একই নক্ষত্রের দুই বিপরীত প্রান্তের বিন্দু হিসেবেও ধরা যেতে পারে। সাধারণভাবে সব নক্ষত্রকে সাদা আলোর উৎসরূপে বিবেচনা করা যায়। কিন্তু বহুদূর থেকে আসার জন্য কোন একটি তরঙ্গের আলোই বেশি প্রকট হবে। তাই নক্ষত্রের আলোকে একবর্ণী বিবেচনা করা যায়। অতএব

MM' পর্দার উপর Q থেকে আসা আলোক ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ উৎপন্ন করবে (s_1 ও s_2 Q থেকে আসা আলোকে আলোকিত হবে এবং সুসম্বদ্ধ উৎসরূপে আচরণ করবে) এখন $S_1O=S_2O$ বলে o বিন্দুতে তীব্র আলোকযুক্ত গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে। একইভাবে Q' বিন্দু থেকে আসা আলোকও MM' পর্দায় ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ তৈরি করবে যার তীব্রতম ফ্রিঞ্জ হবে O' বিন্দুতে। যেহেতু Q ও Q' অসুসম্বদ্ধ, অতএব MM' পর্দার উপর আলোক তীব্রতার বন্টন হবে দুই উৎসের ব্যতিচার তীব্রতার উপরিপাতের লব্ধি। যখন Q ও Q' একই বিন্দু, তখন দুয়ের ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ মিলিতভাবে খুব সুস্পষ্ট ব্যতিচার নকশা গঠন করবে। কিন্তু ওদের দূরত্ব ℓ বাড়াতে থাকলে পরস্পর সাপেক্ষে ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ সরে যাবে। ফলে লব্ধি তীব্রতার বন্টনের বৈপরীত্য (contrast) কমে যাবে এবং যখন Q এর ব্যতিচার নকশার গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ Q' এর ব্যতিচার নকশার লঘিষ্ঠ ফিঞ্জের উপর পড়বে তখন কোন ফ্রিঞ্জ নকশা পাওয়া যাবে না। এটা তখনই ঘটবে যখন

$$Q'S_2 - Q'S_1 = \frac{\lambda}{2}$$

চিত্র 7.28 থেকে $Q'S_2 - Q'S_1 = d\sin\theta = \theta d$ যেখানে $\theta \approx$ স্লিট বা অভিলক্ষ্যে QQ' দিয়ে তৈরি কোণ।

$$\therefore \theta d = \frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \theta = \frac{\lambda}{2d} \qquad \text{..............(7.39)}$$

$$\Rightarrow d = \frac{\lambda}{2\theta}$$

কিন্তু $\theta = \frac{\ell}{a}$, অতএব

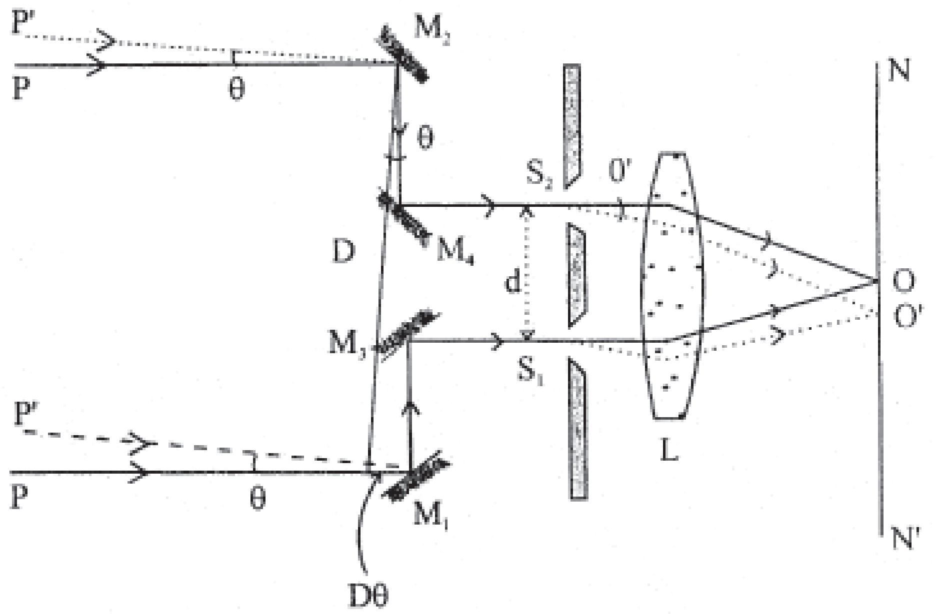
$$\ell \approx \frac{\lambda a}{2d} \qquad \text{..............(7.40)}$$

এখন $QQ' = \ell$ যদি একটা বিস্তৃত উৎস হয় (যেমন একটি নক্ষত্র) এবং যদি $\ell \sim \frac{\lambda a}{d}$ হয় তাহলে ঐ উৎসের উপর যে কোন বিন্দু উৎসের থেকে $\frac{\lambda a}{2d}$ দূরত্বে আরো একটা বিন্দু উৎস থাকবে যার ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ আগের বিন্দুর ফ্রিঞ্জ বেধের অর্ধেক সরে গিয়ে তৈরি হবে। তখন উভয় ফ্রিঞ্জের মিলিত তীব্রতায় ফ্রিঞ্জ তৈরি হবে না, প্রায় সর্বত্র সুষম তীব্রতার আলোক পাওয়া যাবে। d এর মান শূন্য থেকে বাড়াতে থাকলে এক সময় কোন ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে না। তখন $\ell = \frac{\lambda a}{d}$ বা $\theta = \frac{\lambda}{d}$ এই শর্ত পাওয়া যাবে। এই θ কোণই নক্ষত্রের কৌণিক ব্যাস এবং ℓ ওর রৈখিক ব্যাস হবে।

7.8.5 মাইক্‌লসনের নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপক (Michelson Stellar Interferometer)

আমরা জেনেছি (7.8.4) যে দুটি বিন্দু-উৎস থেকে আসা আলোক রশ্মি দুটোর মধ্যে যদি পথ-পার্থক্য λ হয় তবে একটার ব্যতিচার গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ অন্যটার লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের উপর পড়ে এবং সেরকম ক্ষেত্রে পর্দায় একটা সুষম তীব্রতার প্রতিবিম্ব পাওয়া যায় অর্থাৎ কোন ফ্রিঞ্জ তৈরি হয় না। তখন $\frac{\lambda}{d}$ হয় অভিলক্ষ্য সাপেক্ষে ফ্রিঞ্জের কৌণিক বেধ।

যদি কোন নক্ষত্রের দুটো বিপরীত বিন্দু থেকে আসা আলোক রশ্মিদ্বয়ের আলো ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ গঠন না করে তখন আমরা বুঝতে পারব যে একটি বিন্দুর ব্যতিচারের গরিষ্ঠ অন্যটির লঘিষ্ঠের উপর পড়েছে। অর্থাৎ ওদের মধ্যে λ পথ পার্থক্য সৃষ্টি হচ্ছে। এই ধর্মকে কাজে লাগিয়ে মাইকেল্‌সন [আলবার্ট আব্রাহাম মাইকেল্‌সন (1852-1931) জার্মানিতে জন্মান, কিন্তু আমেরিকা যুক্তরাষ্ট্রে চলে আসেন; অতএব আমেরিকার বিজ্ঞানী।] নক্ষত্রের ব্যাস পরিমাপ করেন তাঁর উদ্ভাবিত নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপক (stellar interferometer) যন্ত্র দিয়ে।



চিত্র 7.29 : মাইকেলসনের নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপকের ছক চিত্র।

চিত্র 7.29-এ মাইকেলসনের নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপক যন্ত্রের ছক রেখা চিত্র দেখানো হয়েছে। দূরবীক্ষণ যন্ত্রের অভিলক্ষ্য লেন্সের (L) সামনে একটা যুগ্ম স্লিটযুক্ত পর্দা বসানো হয়। স্লিট দুটো s_1, s_2 স্থির দূরত্বে (d) থাকে। এই যুগ্ম স্লিটের সামনে সমাক্ষীয়ভাবে রাখা দুটো বলয়ের উপর একই রেখায় M_1, M_2 এবং M_3, M_4 দর্পণ আটকানো থাকে। M_1, M_3 পরস্পর সমান্তরাল ও মুখোমুখি আবার M_2, M_4 সমান্তরাল ও মুখোমুখিভাবে অবস্থিত। M_3, M_4 স্থির দূরত্বে থাকলে M_1, M_2-এর দূরত্ব পালটানো যায়।

প্রথমে কোন নক্ষত্রকে (বা ওর একটা প্রান্তকে) দূরবীক্ষণের অক্ষ বরাবর আনা হয়। ঐ নক্ষত্র (বা প্রান্ত) P থেকে সমান্তরাল রশ্মি M_1, M_2 এর উপর আপতিত হয় সমদশায়। ফলে s_1, s_2-এও এরা সমদশায় থাকে এবং অভিলক্ষ্য দিয়ে পর্দার উপর O বিন্দুতে অভিসৃত হয় ও উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ গঠন করে। এই ফিঞ্জের বেধ $= \frac{\lambda}{d}$। এবার

অন্য কোন অসমাক্ষীয় নক্ষত্র বা পুর্বোক্ত নক্ষত্রের বিপরীত বিন্দু P' থেকে আগত আলোক রশ্মি M_1, M_2 দর্পণে সমদশায় থাকবে না। এদের পথ পার্থক্য হবে $D\theta$, যেখানে $D = M_1, M_2$ এর দূরত্ব এবং $\theta =$ দুই নক্ষত্রের কৌণিক দূরত্ব বা বিশেষ নক্ষত্রের কৌণিক ব্যাস। এই একই পথ-পার্থক্যে রশ্মিদ্বয় s_1, s_2-এ পৌঁছাবে। ফলে ওরা O' বিন্দুতে উজ্জ্বল ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ গঠন করবে। যদি O' বিন্দু, O বিন্দুর উজ্জ্বল ব্যতিচারের লঘিষ্ঠ অবস্থান হয় তবে লব্ধি ব্যতিচার পরিলক্ষিত হবে না। OO' কে ফ্রিঞ্জের কৌণিক অর্ধবেধ রূপে প্রকাশ করলে $\theta' = \dfrac{\lambda}{2d}$।

D কে পরিবর্তন করে পথপার্থক্য $D\theta$ কে λ এর সমান করা হলে $\theta' = \dfrac{\lambda}{2d}$ হবে।

$$\therefore \theta = \frac{\lambda}{D}$$

হলে নিরীক্ষা পর্দায় ফ্রিঞ্জ মুছে যাবে। কেবলমাত্র দূরবীক্ষণের সাহায্যে এই কৌণিক ব্যাস $= \dfrac{\lambda}{d}$। অতএব যদি R_T & R_s হয় দূরবীক্ষণ ও নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপকের প্রভেদন ক্ষমতা, তবে

$$\frac{R_s}{R_T} = \frac{D}{d} >> 1$$

ব্যবর্তন তত্ত্বে আরো বিস্তৃত ব্যাখ্যা দ্বারা দেখানো যায়

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

উদাহরণ 13. কোন নক্ষত্র থেকে আসা আলোকের সর্বাধিক প্রকটিত বর্ণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $6000\,\mathring{A}$ যখন কোন নাক্ষত্রিক ব্যতিচার মাপকের বাইরের দর্পণদুটোর দূরত্ব 3 মিটার, তখন দূরবীক্ষণের পর্দায় সূক্ষ্ম আলোক তীব্রতা পাওয়া যায়। নক্ষত্রের কৌণিক ব্যাস কত?

সমাধান $\quad \theta = \dfrac{1.22\lambda}{D} = \dfrac{1.22 \times 6000 \times 10^{-8}}{300}$

$= 2.44 \times 10^{-7}$ রেডিয়ান

$= 0.05$ আর্ক সেকেন্ড

7.9 সারাংশ

* ফ্রনহফার ব্যবর্তন পর্যবেক্ষণের জন্য আলোক উৎস ও নিরীক্ষা-পর্দার অবস্থান ব্যবর্তন পর্দা থেকে অসীম দূরত্বে অর্থাৎ বহুদূরে থাকা চাই। পরীক্ষাগারে ব্যবর্তন পর্দার দুপাশে অভিসারী লেন্স ব্যবহার করে এই শর্ত পূরণ করা যায়।
* যদি একক রৈখিক স্লিট উল্লম্বভাবে অবস্থান করে তবে বিন্দু-উৎসজাত তরঙ্গের ব্যবর্তনে পর্দার উপর

অনুভূমিক ভাবে ছড়ানো বিন্দু-উৎসের প্রতিবিম্বের নকশা পাওয়া যায়। কেন্দ্রীয় প্রতিবিম্ব, যাকে বলে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ সর্বাধিক তীব্রতাযুক্ত। অন্যান্য প্রতিবিম্ব বা উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ যত কেন্দ্র থেকে দূরে ততই কম উজ্জ্বল হয়।

* কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জের বেধ অন্যান্য ফ্রিঞ্জের বেধের দ্বিগুণ। বিভিন্ন ফ্রিঞ্জের তীব্রতা $I(\theta) = I_o \dfrac{\sin^2\beta}{\beta^2}, \beta = \dfrac{\pi b \sin\theta}{\lambda}$ যেখানে $b =$ স্লিটের বেধ এবং $\theta =$ সংশ্লিষ্ট ফ্রিঞ্জের ব্যবর্তন কোণ। লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ অবস্থানের শর্ত $b\sin\theta = \pm n\lambda,\ n = 1.2, ...$

* যদি উৎস রৈখিক এবং একক রৈখিক স্লিটের সমান্তরাল হয়, তবে ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ হবে উল্লম্ব রৈখিক ফ্রিঞ্জের শ্রেণি। কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল রৈখিক ফ্রিঞ্জের তীব্রতা সর্বাধিক। অন্যান্য উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের তীব্রতা ক্রমানুসারে হ্রাস পায়। এক্ষেত্রেও কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জের বেধ অন্যান্য ফ্রিঞ্জের বেধের দ্বিগুণ।

* যদি স্লিট হয় বৃত্তাকার উন্মেষের তবে বিন্দু উৎস থেকে আসা তরঙ্গের ব্যবর্তনের ফলে পর্দার উপর যে ব্যবর্তন নকশা পাওয়া যাবে তার কেন্দ্রে থাকবে একটি উজ্জ্বল বৃত্তাকার পটি এবং তার সমকেন্দ্রীয় অনেকগুলি বলয় যাদের উজ্জ্বলতা ব্যাসার্ধ বাড়লে দ্রুত কমে যায়। প্রথম অনুজ্জ্বল বলয়ের কৌণিক ব্যাসার্ধ θ হলে

$$\sin\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$, $D =$ উন্মেষের ব্যাস।

* যুগ্ম স্লিটে ব্যবর্তন প্রকৃত পক্ষে দুই স্লিটের তরঙ্গের ব্যতিচার যা যে কোন স্লিটের ব্যবর্তন তীব্রতা দ্বারা নিয়ন্ত্রিত।

* কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ বেধের মধ্যে ব্যতিচার জনিত নকশা পাওয়া যায়। এরকম নকশা গৌণ ব্যবর্তন উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের মধ্যে কিছু সংখ্যক ক্রম পর্যন্ত পাওয়া যায়।

* θ ব্যবর্তন কোণে যুগ্মস্লিটের ব্যবর্তন নকশার তীব্রতার রাশিমালা $I(\theta) = 4I_o \dfrac{\sin^2\beta}{\beta^2}\cos^2\gamma$ যেখানে

$\gamma = \dfrac{\lambda d \sin\theta}{\lambda}, d =$ দুই স্লিটের কেন্দ্র থেকে কেন্দ্র দূরত্ব $= a + b$, $a =$ দুই স্লিটের মধ্যবর্তী অনাচ্ছ ব্যবধান।

যখন $\theta = 0$, $I(\theta) = 4I_o, I_o =$ একক স্লিটের ক্ষেত্রে কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জের তীব্রতা।

* যখন স্লিট বেধ b খুবই ক্ষুদ্র, তখন β খুবই ক্ষুদ্র,

$$\therefore I(\theta) = 4I_o \cos^2\gamma$$

যা দুই সুসম্বদ্ধ উৎসের ব্যতিচারের রাশিমালা (ইয়ং-এর ব্যতিচার পরীক্ষা)।

* যুগ্মস্লিটের গরিষ্ঠ ও লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের শর্ত :

গরিষ্ঠ $d\sin\theta = n\lambda, n = 0, \pm 1, +2...$

লঘিষ্ঠ : $d\sin\theta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}, n = 0, \pm 1, \pm 2...$

* ব্যবর্তন নকশার লঘিষ্ঠ তীব্রতার শর্ত $b\sin\theta = n\lambda, n = 1, 2, ...$

* লুপ্তক্রম - যেখানে ব্যবর্তন নকশার শূন্য তীব্রতা, সেই সব ক্রমে যুগ্মস্লিটের ব্যতিচার নকশা লুপ্ত হয়।

* গ্রেটিং বা N-সংখ্যক স্লিটের ব্যবর্তন নকশার তীব্রতার রাশিমালা

$$I(\theta) = I_o \frac{\sin^2\beta}{\beta^2}\frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2\gamma}$$

উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ রেখার সমীকরণ, অর্থাৎ গ্রেটিং সমীকরণ $d\sin\theta = n\lambda, n = 0, \pm 1, \pm 2...$

এবং মুখ্য গরিষ্ঠের বেধ $\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd\cos\theta}$

গরিষ্ঠ উজ্জ্বল রেখার তীক্ষ্ণতা N বাড়ালে বেড়ে যাবে।

প্রভেদন ক্ষমতা

* ব্যবর্তনের জন্য কোন আলোক যন্ত্র বিন্দু উৎসের বিন্দু প্রতিবিম্ব গঠন করতে পারে না।

* দুটি অধিক্রমণকারী প্রতিবিম্বকে প্রভেদ করা যায় রেলির নির্ণায়ক (Rayleigh's Criterion) দিয়ে যখন একটা প্রতিবিম্বের কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ অন্যটির প্রথম লঘিষ্ঠের উপর পাতিত হয় তখন দুটো প্রতিবিম্বকে কোনক্রমে প্রভেদ করা যায়।

* দুটো দূরের বস্তুর সবচেয়ে কম কৌণিক ব্যাস $(\Delta\alpha)_{min} = \frac{1.22\lambda}{D}$

যেখানে $D =$ আলোক যন্ত্রের অভিলক্ষ্যের ব্যাস, এরকম হলে দূরবর্তী বস্তু দুটো কোনক্রমে প্রভেদযোগ্য। একে বলে প্রভেদনের কৌণিক সীমা।

* দূরবীক্ষণের প্রভেদন ক্ষমতা $= \frac{1}{\text{প্রভেদনের কৌণিক সীমা}}$

* দুটি বিন্দু উৎসের মধ্যে যে ন্যূনতম দূরত্ব y একটি অণুবীক্ষণ যন্ত্র প্রভেদ করতে পারে, তাকে বলে তার প্রভেদন ক্ষমতা : $y = \frac{0.61\lambda_o}{\mu\sin i}$

$\mu =$ বস্তু অঞ্চলের প্রতিসরাঙ্ক, $i =$ অভিলক্ষ্য বস্তুতে যে কোণ ধারণ করে তার অর্ধেক।

গ্রেটিং-এর প্রভেদন ক্ষমতা $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN$

যেখানে $n =$ বর্ণালির ক্রম সংখ্যা, $N =$ গ্রেটিং-এর উন্মেষাংশে দাগ সংখ্যা।

7.10 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1 এক গুচ্ছ সমান্তরাল নীল আলোকরশ্মি $\left(\lambda = 4340\overset{0}{A}\right)$ একটা একক স্লিটের উপর পড়ে আর ব্যবর্তিত তরঙ্গকে 85.00 সেমি ফোকাস দৈর্ঘ্যের লেন্স দিয়ে ওর ফোকাস তলে প্রক্ষিপ্ত করা হয়। কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের বেধ 2.45 মিমি হলে স্লিটের বেধ কত?

2. একটা যুগ্ম স্লিটের বেধ b এবং ওদের কেন্দ্র থেকে কেন্দ্রের দূরত্ব d। প্রমাণ করুন যে তার ব্যবর্তন নকশার কেন্দ্রীয় ফ্রিঞ্জে $(2\frac{d}{b})$ সংখ্যক ব্যতিচার উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ তৈরি হবে।

3. 0.25×10^{-3} সেমি গ্রেটিং ধ্রুবকযুক্ত একটি উত্তরণ গ্রেটিং এর উপর লম্বভাবে একগুচ্ছ সমান্তরাল আলোকরশ্মি আপতিত হল। আলোকগুচ্ছের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পাল্লা 4.7×10^{-5} সেমি থেকে 6.4×10^{-5} সেমি পর্যন্ত। দূরবীক্ষণ অভিলক্ষ্যের ফোকাস তলে তৈরি প্রথম ক্রমের বর্ণালির বেধ যদি 3 সেমি হয় তবে ওর ফোকাস দৈর্ঘ্য নির্ণয় করুন।

4. কলিমেটর থেকে একগুচ্ছ সমান্তরাল একবর্ণী রশ্মি গ্রেটিং এর উপর ϕ কোণে আপতিত হল। আপতিত রশ্মির সঙ্গে যদি θ কোণে প্রথম ক্রমের উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ তৈরি হয় তবে প্রমাণ করুন

$$\lambda = d\sin\theta \pm d\phi(1-\cos\theta)$$

যেখানে $d =$ গ্রেটিং ধ্রুবক।

5. ফ্রেনেল ব্যবর্তন ও ফ্রনহফার ব্যবর্তনের তুলনা করুন।

6. একটি বিন্দু উৎস থেকে একটি ব্যবর্তন পর্দার উপর বৃত্তাকার স্লিটের কেন্দ্রের লম্ব দূরত্ব r। যদি উন্মেষের ব্যাসার্ধ a হয় এবং উৎস থেকে উন্মেষের পরিধির দূরত্ব $r + \ell$ হয় তবে দেখান যে বহু দূরে রাখা একটা পর্দার উপর ফ্রনহফার ব্যবর্তন ঘটবে যদি

$$\lambda r >> \frac{a^2}{2} \text{ হয়}$$

7. একটা বিন্দু উৎস জাত তরঙ্গ উল্লম্ব রৈখিক স্লিটে ব্যবর্তিত হলে পর্দার উপর অনুভূমিক রেখায় বিন্দু উৎসের প্রতিবিম্বের ফ্রিঞ্জ পাওয়া যায়। কেন উল্লম্ব রেখা বরাবর এরকম ফ্রিঞ্জ গঠিত হয় না?

8. একটি যুগ্মস্লিট ব্যবর্তনের পরীক্ষায় উৎস স্লিট যদি সাদা আলো দিয়ে বিকিরিত হয় করা তবে নিরীক্ষা পর্দায় ব্যবর্তন নকশা কি রকম দেখাবে?

7.11 উত্তর মালা

সংক্ষিপ্ত প্রশ্নের উত্তর

1. ব্যবর্তন পর্দা থেকে উৎসের বা নিরীক্ষা পর্দার দূরত্বের যেটি ছোট তা r, আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ এবং উন্মেষের ব্যাসার্ধ a হলে ব্যবর্তন তখনই ঘটবে যখন

$$r\lambda >> \frac{a^2}{2}$$

হবে। যেহেতু আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য খুবই ছোট তাই a ছোট না হলে উল্লিখিত শর্ত পূরণ হয় না। সেই জন্য কেবল সূক্ষ্ম বেধের উন্মেষেই ব্যবর্তন হবে। অথবা λ কে ও উৎসের ও পর্দার দূরত্বকে বাড়িয়ে ব্যবর্তনের শর্ত পূরণ সম্ভব। X রশ্মির তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এতই ছোট যে $\lambda \sim a^2$ এই সম্পর্কের বেধের স্লিট সাধারণ প্রযুক্তিতে প্রস্তুত করা যায় না। তাই কেলাস মাধ্যমেই কেবল X রশ্মির ব্যবর্তন লক্ষ্য করা যায়। কেলাসের ল্যাটিস বিন্দু গুলোর ব্যবধান $\lambda > a^2$ শর্ত মেনে চলে।

2. একক স্লিটের লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের শর্ত $b\sin\theta = n\lambda,\ n = \pm1,\ \pm2...$

θ খুবই ছোট বলে $b\theta = n\lambda$, বা $\theta = \dfrac{n\lambda}{b}$

কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের কৌণিক বেধ = ওর দুদিকের প্রথম লঘিষ্ঠদ্বয়ের কৌণিক ব্যবধান।

$$\therefore n=1,\ \theta = \frac{\lambda}{b}$$

$$\therefore \text{বেধ} = 2\theta = \frac{2\lambda}{b}$$

পরপর দুটি লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের কৌণিক ব্যবধান।

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{(n+1)\lambda}{b} - \frac{n\lambda}{b} = \frac{\lambda}{b}$$

অতএব মুখ্য গরিষ্ঠের বেধ গৌণ গরিষ্ঠের বেধের দ্বিগুণ।

যেহেতু $\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{\lambda}{b} =$ ধ্রুবক, অতএব যে কোন দু'টো পর পর লঘিষ্ঠের (n তম ও n+1 তম) ব্যবধান সবসময় সমান।

3. আমরা জানি d=a+b, a= দুই স্লিটের মধ্যবর্তী অনচ্ছ পর্দার বেধ, b= স্লিটের বেধ। যদি b=d হয় তবে a=0 অর্থাৎ দুটি স্লিট জুড়ে যাবে। ফলে বেধ হবে b+b=2b।

এটা দেখানো যায় যে যুগ্ম স্লিটের কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন গরিষ্ঠের মধ্যে $\frac{2d}{b}$ সংখ্যক ব্যতিচার গরিষ্ঠ থাকে।

এক্ষেত্রে তাই ব্যতিচার গরিষ্ঠের সংখ্যা $= \frac{2d}{2b} = \frac{2b}{2b} = 1$ অর্থাৎ মুখ্য ব্যবর্তন গরিষ্ঠের সংখ্যার সমান। অতএব $d = b$ শর্তে যুগ্ম স্লিট 2b বেধের একক স্লিটে পরিণত হবে।

4. দ্রষ্টব্য 7.6.2

5. বিচ্ছুরণ বলতে তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সামান্য পরিবর্তনে ব্যবর্তনের কোণের পরিবর্তন অর্থাৎ কৌণিক ব্যবধান সৃষ্টি। আমরা জানি গ্রেটিং-এর গরিষ্ঠ বর্ণালির সমীকরণ

$$d\sin\theta = n\lambda$$

অপবর্তন কোণ θ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ-এর উপর নির্ভরশীল

$$\therefore d\cos\theta\Delta\theta = n\Delta\lambda$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \frac{n\Delta\lambda}{d\cos\theta}$$

ধরি $\Delta\theta_r =$ লাল বর্ণালির বিচ্ছুরণ কোণ, $\Delta\theta_v =$ বেগুনি বর্ণালির বিচ্ছুরণ কোণ।

$$\Delta\lambda_v = \Delta\lambda_r$$

$$\therefore \frac{\Delta\theta_r}{\Delta\theta_v} = \frac{\cos\theta_v}{\cos\theta_r} > 1$$

কারণ $\theta_r > \theta_v$ অতএব $\Delta\theta_r > \Delta\theta_v$

6. দূরবীক্ষণকে তার অভিলক্ষ্যের ব্যাস দিয়ে চেনা হয়। যখন বলা হয় 40" দূরবীক্ষণ তখন বুঝতে হবে ঐ দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্যের ব্যাস 40" এখন একটি দূরবীক্ষণে কোন নক্ষত্রের প্রতিবিম্বের কৌণিক ব্যাস

$$\Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

যেখানে $D=$ দূরবীক্ষণের অভিলক্ষ্যের ব্যাস এবং $\lambda=$ নক্ষত্র থেকে আসা সবচেয়ে উজ্জ্বল রঙের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য যা মোটামুটিভাবে হলুদ রঙের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সমান। স্পষ্টতই D বড় হলে নক্ষত্রের প্রতিবিম্ব কম ছড়িয়ে পড়বে, ফলে প্রতিবিম্ব অনেক তীক্ষ্ণ প্রান্তরেখায় গঠিত হবে। আবার নক্ষত্র দূরে গেলে নক্ষত্র নিস্তেজ হবে। সে ক্ষেত্রে D বাড়লে নক্ষত্র থেকে আসা বেশি আলোক রশ্মি দিয়ে প্রতিবিম্ব গঠিত হবে এবং প্রতিবিম্ব উজ্জ্বল হবে। অতএব তেমন দূরবীক্ষণই ব্যবহার করা উচিত যার অভিলক্ষ্যের ব্যাস বড়।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলীর উত্তর ও সমাধান

1. কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠের বেধ = ওর পাশের প্রথম দুই লঘিষ্ঠের দূরত্ব।

এখন লঘিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের শর্ত $b\sin\theta = n\lambda$

যেখানে $n = \pm1, \pm2, \ldots\ldots$ ইত্যাদি। যেহেতু θ খুবই ছোট অতএব $b\theta = n\lambda$ । অতএব প্রথম লঘিষ্ঠের কৌণিক ব্যবধান

$$\theta = \pm\frac{\lambda}{b}\text{ ।}$$

$\therefore$ দুই লঘিষ্ঠের কৌণিক ব্যবধান $2\theta = \dfrac{2\lambda}{b}$ । যদি কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের বেধ হয় $\Delta\ell$, তবে

$$2\theta = \frac{\Delta\ell}{f}$$

$$\therefore \Delta\ell = 2\theta \times f = \frac{2\lambda f}{b} = \frac{2\times4.34\times10^{-5}\times85}{0.245} = 0.03011 \text{ সেমি}$$

2. আমরা জানি ব্যবর্তন লঘিষ্ঠের শর্ত $b\sin\theta_n = n\lambda, n = \pm1, \pm2 \ldots$

আবার ব্যতিচার লঘিষ্ঠের শর্ত $d\sin\theta_m = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda, m = 1,2,3,\ldots$

যেহেতু θ খুবই ছোট, অতএব $b\theta_n = n\lambda$ এবং $d\theta_m = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$

কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন গরিষ্ঠের কৌণিক বেধ = দুই প্রথম ক্রমের লঘিষ্ঠের কৌণিক ব্যবধান $=\dfrac{2\lambda}{b}$

ব্যতিচার গরিষ্ঠের বেধ $= \theta_{m+1} - \theta_m = \left(m+1+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} - \left(m+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{d}$

অতএব যদি N সংখ্যক ব্যতিচার গরিষ্ঠ থাকে কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন গরিষ্ঠের ভিতরে তবে

$$N \times \frac{\lambda}{d} = \frac{2\lambda}{b}$$

$$\therefore N = \frac{2d}{b}$$

লক্ষণীয় যে ব্যতিচার লঘিষ্ঠের সংখ্যা হবে $N - 1 = \frac{2d}{b} - 1$.

3. ধরা যাক প্রদত্ত পাল্লায় প্রথম ক্রমের ব্যবর্তন কোণ θ_1 থেকে θ_2 পর্যন্ত বিস্তৃত। গ্রেটিং সমীকরণ

$$d \sin\theta = n\lambda$$

ধরা যাক যখন $\lambda_1 = 4.7 \times 10^{-5}$ সেমি তখন বর্ণালির ব্যবর্তন কোণ θ_1 এবং যখন $\lambda_2 = 6.4 \times 10^{-5}$ সেমি তখন বর্ণালির ব্যবর্তন কোণ $=\theta_2$ এখানে $n = 1$

$$\therefore \theta_1 = \sin^{-1}\frac{\lambda_1}{d}, \text{ এবং } \theta_2 = \sin^{-1}\frac{\lambda_2}{d}$$

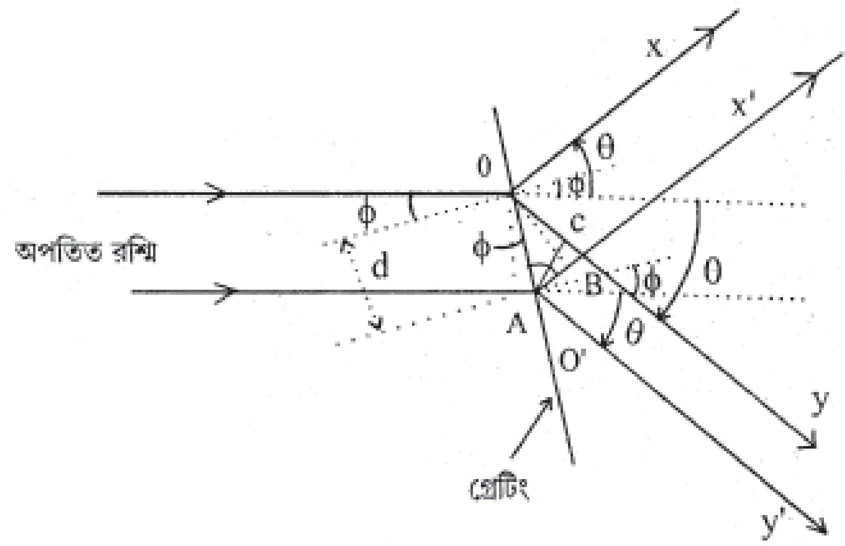
কিন্তু , $\therefore \theta_2 - \theta_1 = \frac{\Delta\ell}{f}$, $\Delta\ell =$ বর্ণালির পাল্লা $= 30$ সেমি এবং $f =$ দূরবীক্ষণের অভিলম্বের ফোকাস দৈর্ঘ্য।

$$\therefore f = \frac{\Delta\ell}{\theta_2 - \theta_1} = \frac{3}{\sin^{-1}\frac{\lambda_2}{d} - \sin^{-1}\frac{\lambda_1}{d}}$$

$$\therefore f = \frac{3}{\sin^{-1}\left(\frac{6.4 \times 10^{-5}}{0.25 \times 10^{-3}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{4.7 \times 10^{-5}}{0.25 \times 10^{-3}}\right)} = \frac{3}{0.259 - 0.189}$$

$$= \frac{3}{.07} = 42.86 \text{ সেমি}$$

4.



x, x' রশ্মি দুটোর মধ্যে পথপার্থক্য $= AO' + O'B,$

y, y' .... $OC - O'A$

এখন $AO' = d\sin\phi,\ O'B = d\sin(\theta - \phi)$

$$OC = d\sin(\theta + \phi)$$

অতএব θ কোণে ব্যবর্তিত পর পর দুটি রশ্মির মধ্যে পথ পার্থক্য $= d\sin\phi \pm d\sin(\theta + \phi)$

অতএব $\quad m\lambda = d\sin\phi + d\sin(\theta - \phi)$

বা $\quad m\lambda = d\sin(\theta + \phi) - d\sin\phi$

এখানে $\quad m = 1 \ \therefore \lambda = d\sin\phi + d\sin\theta\cos\phi - d\cos\theta\sin\phi$

$$= d\sin\theta\cos\phi - d\sin\phi(\cos\theta - 1)$$

আবার $\quad \lambda = d\sin\theta\cos\phi + d\cos\theta\sin\phi - d\sin\phi$

$$= d\sin\theta\cos\phi + d\sin\phi(\cos\theta - 1)$$

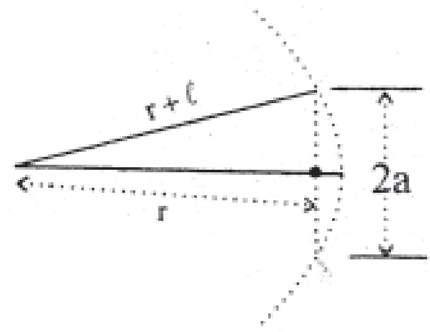
$$\therefore \lambda = d\sin\theta\cos\phi \pm d\sin\phi(\cos\theta - 1)$$

এখন ϕ খুবই ক্ষুদ্র বলে

$$\lambda = d\sin\theta \pm d\phi(\cos\theta - 1)$$

5. অনুচ্ছেদ 7.2.3 দেখুন

6.



চিত্র থেকে $(r+\ell)^2 = r^2 + a^2$

$$\Rightarrow 2r\ell = a^2 - \ell^2 \approx a^2$$

$$\therefore r = \frac{a^2}{2\ell}$$

স্পষ্টতই r খুব বড় হলে গোলীয় তরঙ্গ সমতল তরঙ্গে পরিণত হবে। সেক্ষেত্রে $\ell = \lambda$ হলে

$$r >> \frac{a^2}{2\lambda} \Rightarrow r\lambda >> \frac{a^2}{2}$$

শর্তে ফ্রন হফার ব্যবর্তন হবে। অন্যদিকে যদি $\lambda >> \ell$ হয় তবে $r\lambda >> \frac{a^2}{2}$ শর্তটি ফ্রনহফার ব্যবর্তনের শর্ত পালন করে।

7. রৈখিক স্লিটের বেধ অনুভূমিক বলে এবং বেধ ক্ষুদ্র বলে এই বেধের তরঙ্গের অপবর্তন ঘটে তার সমান্তরাল রেখায়। রৈখিক স্লিটের দৈর্ঘ্য খুবই বেশি বলে $r\lambda >> \frac{\ell^2}{2}$ শর্ত পূরণ হয় না। অথবা বিভিন্ন অংশের গরিষ্ঠ ও লঘিষ্ঠের উপরিপাতের ফলে ফ্রিঞ্জ গঠিত হয় না।

8. কেন্দ্রীয় গরিষ্ঠ ব্যবর্তনের শর্ত হল $\frac{\sin^2\beta}{\beta^2} = 1$ যখন $\theta = 0$. এই অবস্থায় সব বর্ণের আলোক $\theta = 0$ অভিমুখে ব্যবর্তিত হয় বলে কেন্দ্রীয় ব্যবর্তন নকশা সাদা দেখাবে। কিন্তু যখন $\theta \neq 0$, তখন যেহেতু $b\sin\theta = n\lambda$, সেইজন্য একই ক্রমের ক্ষেত্রে λ বিভিন্ন হলে θও বিভিন্ন হবে। অর্থাৎ আলোক তরঙ্গ বিচ্ছুরিত হওয়ায় বর্ণালি গঠন করবে।

একক 8 □ ফ্রেনেল ব্যবর্তন

গঠন

8.1 প্রস্তাবনা

ব্যবর্তন সম্পর্কে সাধারণভাবে আলোচনা, ফ্রেনেল ও ফ্রনহফার ব্যবর্তন, কীভাবে উভয় প্রকার ব্যবর্তন পরীক্ষাগারে উৎপাদন ও পর্যবেক্ষণ করা যায়, ফ্রেনেল থেকে ফ্রনহফার ব্যবর্তনে গমন এবং উভয় প্রকার ব্যবর্তনের বৈশিষ্ট্য নিয়ে আমরা 7.1, 7.2, 7.2.1, 7.2.2 এবং 7.2.3 অনুচ্ছেদগুলিতে বিস্তারিত জেনেছি। আমাদের নিশ্চয়ই মনে পড়ছে যে ফ্রেনেল ব্যবর্তন সম্পর্কে বিস্তারিত অনুসন্ধান ও বিশ্লেষণ করেন। তাঁর বিশ্লেষণের তাত্ত্বিক ভিত্তি ছিল হাইগেন্‌স্ ফ্রেনেল নীতি। কিন্তু আমরা যখন ফ্রনহফার ব্যবর্তন সম্পর্কে আলোচনা করেছি তখন প্রত্যক্ষভাবে কোথাও এই নীতির প্রয়োগ সম্পর্কে কোন উল্লেখ করা হয়নি। যদিও ফ্রন হফার ব্যবর্তনের ক্ষেত্রেও হাইগেন্‌স-ফ্রন

হফার নীতি প্রযুক্ত হয়েছে। এই অনুল্লেখের কারণ হল ফ্রন হফার ব্যবর্তনে উৎস ও নিরীক্ষা পর্দা বহু দূরে এবং সর্বোপরি ব্যবর্তন ব্যবস্থা ছিল তুলনামূলকভাবে খুবই ক্ষুদ্র। এই রূপ অবস্থায় হাইগেন্‌স্‌-ফ্রেনেল নীতির জটিলতার দিকটি এড়িয়ে যাওয়া সম্ভব ছিল। ফ্রেনেল ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে উৎস ও নিরীক্ষা-পর্দা ব্যবর্তন ব্যবস্থার সন্নিকটে এবং ব্যবহৃত তরঙ্গমুখ তুলনায় বৃহৎ। এমত অবস্থায় হাইগেন্‌স্‌-ফ্রেনেল নীতিটিকে আরো একবার আলোচনা করা দরকার। পরবর্তী অনুচ্ছেদে এই আলোচনা করা হবে।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করে আপনারা নিম্নে বিবৃত বিষয়গুলি সম্পর্কে অবহিত হবেন

- হাইগেন্‌স্‌-ফ্রেনেল নীতি এবং বিপরীত তরঙ্গের (back wave) অনুপস্থিতি
- ফ্রেনেলের অর্ধ-পর্যায়কালীন বলয় এবং বলয় পাত (zone plate)
- বৃত্তীয় উন্মেষ ও সরলরৈখিক কিনারায় (straight edge) ব্যবর্তন।

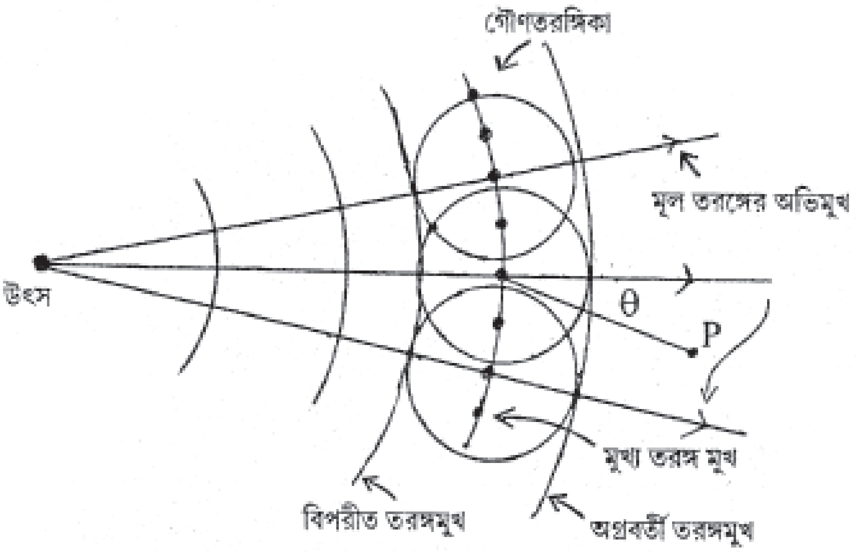
8.2 হাইগেন্‌স্‌-ফ্রেনেল নীতি ও তির্যক-গুণক

আমরা ইতিমধ্যে জেনেছি, আলোক তরঙ্গ কীরূপে সঞ্চারিত হয়। যেকোন মুখ্য তরঙ্গ-মুখের প্রতিটি বিন্দু গোলীয় গৌণ তরঙ্গিকার উৎসরূপে সক্রিয়, কিছুটা সময়াবকাশের পর এই গৌণ তরঙ্গিকাগুলির লব্ধ আবরণই আবার মুখ্য তরঙ্গমুখ রূপে বিবেচ্য। গৌণ তরঙ্গিকাগুলির বেগ ও কম্পাঙ্ক সংশ্লিষ্ট বিন্দুতে মূল তরঙ্গের বেগ ও কম্পাঙ্কের সমান। এই হল হাইগেন্‌সের নীতি। ফ্রেনেল এই নীতিকে ব্যবর্তন ব্যাখ্যা করার জন্য কিছুটা পরিবর্তিত করেন। তিনি বললেন, কোন প্রদত্ত সময়ে একটি তরঙ্গ মুখের অবারিত অংশের (unobstructed portion) যে কোন বিন্দু গোলীয় গৌণ তরঙ্গিকার উৎসরূপে কার্য করে যার কম্পাংক মুখ্য তরঙ্গের কম্পাংকের সমান; বিবেচ্য তরঙ্গমুখ ছাড়িয়ে কোন বিন্দুতে আলোক ক্ষেত্রের বিস্তার হবে এই সমস্ত তরঙ্গিকাগুলির উপরিপাতের লব্ধি যা পাওয়া যাবে তরঙ্গিকাগুলির বিস্তার ও আপেক্ষিক দশা বিবেচনা করে। এই হল হাইগেন্‌স্‌-ফ্রেনেল নীতি।

এই নীতি অনুসারে গোলীয় তরঙ্গিকাগুলি দুটি বিপরীতমুখী মুখ্য তরঙ্গমুখ গঠন করবে। একটি উৎস থেকে বহির্মুখী, অন্যটি উৎসাভিমুখী। কিন্তু পরীক্ষা দ্বারা উৎসাভিমুখী কোন তরঙ্গমুখের সন্ধান পাওয়া যায়নি। বিষয়টি ফ্রেনেলকে ভাবিয়েছিল। কিন্তু তিনি কোন সমাধান প্রস্তাব করেননি। অবশ্য ফ্রেনেল এটা লক্ষ্য করেন যে তরঙ্গের মূল অভিমুখ (তরঙ্গ-অভিলম্ব) থেকে তরঙ্গিকার-গতিমুখ যত কৌণিকভাবে সরে যাবে ততই আলোকের তীব্রতা হ্রাস পাবে। ফির্কফ [গুস্তাভ রবার্ট ফির্কফ (1824–1887) Gustave Robert Kirchhof জার্মান পদার্থ বিজ্ঞানী] তরঙ্গিকার তীব্রতার এই অভিমুখ বিচ্যুতির উপর নির্ভরশীলতাকে সঠিকভাবে খুঁজে পান। কির্কফ প্রস্তাব করেন যে যদি মূল তরঙ্গের বিস্তারকে

$$Q(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \qquad \text{.............(8.1)}$$

দ্বারা গুণ করা যায় তা হ'লে বিপরীত তরঙ্গকে নস্যাৎ করা যায় এবং একই সঙ্গে গৌণ তরঙ্গিকার তীব্রতার অভিমুখ নির্ভরতারও ব্যাখ্যা পাওয়া যায়। এখানে $\theta =$ তরঙ্গিকার উৎস-স্থলে তরঙ্গের মূল অভিমুখের সঙ্গে অন্য কোন তির্যক অভিমুখের উৎপন্ন কোণ (চিত্র ৪.1)।



চিত্র ৪.1 : গৌণ তরঙ্গিকা

সমীকরণ (৪.1)-এ $Q(\theta)$ কে বলা হয় তির্যকগুণক (obliquity or inclination factor)। যদি P বিন্দুটি মূল তরঙ্গমুখের অভিলম্বের উপরে থাকে, তবে $\theta=0$ এবং $Q(\theta)=Q(O)=1$। কিন্তু P বিন্দুটি যদি তরঙ্গের গতির বিপরীত দিকে থাকে তবে $\theta=\pi$ এবং $Q(\theta)=Q(\pi)=0$। অতএব গৌণ তরঙ্গিকার বিস্তারকে তির্যকগুণক $Q(\theta)$ দ্বারা গুণ করলে আমরা যেমন বিপরীত তরঙ্গ থেকে অব্যাহতি পাবো, তেমনি θ বৃদ্ধির সঙ্গে তীব্রতা হ্রাসের ব্যাখ্যাও পাবো।

যদি কোন তরঙ্গ-সমীকরণের গোলীয় সমাধান করা হয় তবে তরঙ্গ অপেক্ষক $\psi(r,t)$ হবে

$$\psi(r,t)=\left(\frac{A}{r}\right)\cos k(r\pm vt) \qquad \text{..................(8.2)}$$

যদি কেবলমাত্র সম্মুখগামী তরঙ্গতল বিবেচনা করা হয় তবে

$$\psi(r,t)=\left(\frac{A}{r}\right)\cos k(r-vt) \qquad \text{..................(8.3)}$$

$$=\frac{A}{r}\cos(\omega t-kr) \qquad \text{..................(8.4)}$$

এখন ধরা যাক t সময়ে একটি মুখ্য তরঙ্গমুখ তার উৎস থেকে R দূরত্বে আছে। এই তরঙ্গ মুখের উপর আমরা একটি ক্ষুদ্র অঞ্চল ds বিবেচনা করি। ds এর উপর সব বিন্দুই সুসম্বদ্ধ এবং প্রত্যেকেই মুখ্য তরঙ্গের দশায় ও বিস্তারে গৌণ তরঙ্গিকা বিকিরণ ঘটায়। এই ds থেকে r দূরে কোন বিন্দুতে সমস্ত গৌণ তরঙ্গিকা একই দশা $\{\omega t - k(R+r)\}$ সহ উপস্থিত হবে। ds এর উপর মুখ্য তরঙ্গের বিস্তার $= \frac{A}{R}$। আবার যদি ds এর উপর একক ক্ষেত্রের উৎস শক্তির পরিমাণ হয় E তবে $E \propto \frac{A}{R}$ বা $E = P\frac{A}{R}$, P= অনুপাতের ধ্রুবক। অতএব ds থেকে θ কোণে নির্গত তরঙ্গিকাগুলির লব্ধি তরঙ্গ হবে

$$d\psi = Q(\theta)\frac{E}{r}\cos[\omega t - k(R+r)]ds \qquad \text{.................(8.5)}$$

এখানে ds এত ক্ষুদ্র যে তার উপর সমস্ত তরঙ্গিকার তির্যক গুণক $Q(\theta)$ কে সমান ধরা যেতে পারে।

8.2.1 ফ্রেনেলের অর্ধ-পর্যায়ী বলয় [Fresnel's Half-Period Zones]

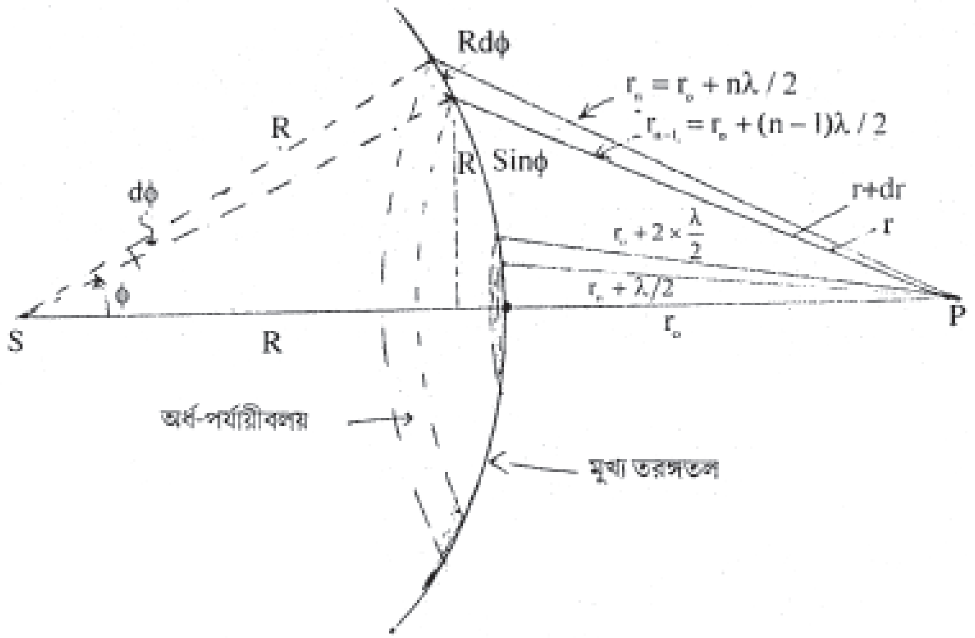
একটা উৎস থেকে কিছু দূরের একটা বিন্দুতে আলোক ক্ষেত্রের প্রাবল্য কত হবে — হাইগেন্‌স্ ফ্রেনেল নীতি দ্বারা তা নির্ণয় করা যায়। যদি হাইগেন্‌স-ফ্রেনেল তত্ত্ব সঠিক হয় তবে একটা উৎস থেকে আলো সরাসরি অভীষ্ট বিন্দুতে পৌছালে তীব্রতার যে রাশিমালা পাওয়া যাবে, এই নীতির ভিত্তিতে সেই রাশিমালা পাওয়া উচিত।

মনে করা যাক একটি উৎস S থেকে আলো সরাসরি P বিন্দুতে পৌঁছাতে পারে। ধরা যাক কোন এক সময় S থেকে তরঙ্গ R ব্যাসার্ধের গোলীয় তলে উপস্থিত হয়েছে। এই তলের উপর উৎপন্ন গৌণতরঙ্গিকাগুলি যখন P বিন্দুতে উপরিপাত ঘটাবে তখন লব্ধি ক্ষেত্র হবে S থেকে সরাসরি P তে পৌঁছে যাওয়া তরঙ্গের সমান।

মুখ্য তরঙ্গমুখ থেকে আগত গৌণ তরঙ্গিকাগুলির লব্ধি নির্ণয় করার জন্য ফ্রেনেল মুখ্য তরঙ্গতলটিকে বহুসংখ্যক ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র বলয়াকার অঞ্চলে ভাগ করেন। তাঁর পদ্ধতিটি হল P বিন্দুকে কেন্দ্র করে $r_o + \frac{\lambda}{2}$, $r_o + 2\frac{\lambda}{2}$, $r_o + 3\frac{\lambda}{2}, \ldots, r_o + (n-1)\frac{\lambda}{2}$, $r_o + n\frac{\lambda}{2} \ldots$ ব্যাসার্ধের গোলক অঙ্কন করতে হবে। গোলকগুলি মুখ্য তরঙ্গ তলকে সমাক্ষীয় বলয়াকৃতির বহু সংখ্যক অঞ্চলে ভাগ করবে। এই বলয়াকৃতির অঞ্চল গুলিকে বলে ফ্রেনেলের অর্ধ-পর্যায়ী বলয় (Fresnel Half period zones), (চিত্র 8.2)।

ধরা যাক P থেকে r দূরত্বে যে বলয়টি আছে তার ক্ষেত্রফল ds. এই তলের উপর সব গৌণ-তরঙ্গিকার উৎসগুলি সুসম্বদ্ধ বিবেচনা করা যেতে পারে এবং আমরা ধরব যে মুখ্য তরঙ্গের বিস্তার ও দশায় গৌণ তরঙ্গিকাগুলি আলোক বিকিরণ ঘটাবে। অতএব সমীকরণ (8.5) দ্বারা ds থেকে আগত গৌণ তরঙ্গিকার মোট অবদানকে সূচিত করা যায়। এখন

$$ds = (2\pi R\sin\phi)Rd\phi = 2\pi R^2 \sin\phi d\phi \qquad \text{................(8.5i)}$$



চিত্র 8.2 : মুখ্যতরঙ্গতলকে অর্ধপর্যায়ী বলয়ে বিভক্তকরণ।

কিন্তু কোসাইন সূত্র থেকে লেখা যায়

$$r^2 = R^2 + (R + r_o)^2 - 2R(R + r_o)\cos\phi \qquad \text{................(8.5ii)}$$

একে অবকল করলে পাওয়া যায়

$$2rdr = 2R(R + r_o)\sin\phi d\phi \qquad \text{................(8.5iii)}$$

ঐ মুহূর্তের জন্য R এবং r_o ধ্রুবক।

(8.5) (iii) থেকে $\sin\phi d\phi$ এর মান বসিয়ে (8.5) (i) থেকে 'ds' কে লেখা যায়

$$ds = 2\pi R^2 \times \frac{2rdr}{2R(R + r_o)} = \left(\frac{2\pi R}{R + r_o}\right) rdr \qquad \text{..................(8.6)}$$

$$\therefore d\psi = \frac{2\pi QER}{R + r_o}\cos[\omega t - k(R + r)]dr$$

অতএব n-তম বলয় থেকে P বিন্দুতে আগত গৌণ তরঙ্গিকা সমূহের মোটপ্রভাব

$$\psi_n = \frac{2\pi Q_n ER}{R + r_o}\int_{r_{n-1}}^{r_n}\cos[\omega t - k(R + r)]dr$$

যেখানে $r_{n-1} = r_0 + (n-1)\frac{\lambda}{2}$, $r_n = r_0 + n\frac{\lambda}{2}$, এবং $Q_n = Q(\theta)$ = n-তম বলয়ের তির্যক গুণক।

$$\therefore \psi_n = -\frac{2\pi Q_n ER}{(R+r_0)k}\left[\sin(\omega t - kR - kr)\right]_{r_{n-1}}^{r_n}$$

$k = |\vec{k}|$, $\vec{k}$ = তরঙ্গাভিমুখ ভেক্টর (wave vector), অতএব $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\therefore \psi_n = \frac{-Q_n ER\lambda}{R+r_0}\left[\sin(\omega t - kR - kr_n) - \sin(\omega t - kR - kr_{n-1})\right]$$

$$= \frac{-2Q_n ER\lambda}{R+r_0}\cos\left[\omega t - kR - \frac{k(r_n + r_{n-1})}{2}\right]\sin\frac{k(r_{n-1} - r_n)}{2}$$

$$= \frac{2Q_n ER\lambda}{R+r_0}\cos\left[\omega t - kR - kr_0 - (2n-1)\frac{\lambda}{4}k\right]$$

$$= \frac{2Q_n ER\lambda}{R+r_0}\cos\left[(2n-1)\frac{\lambda}{2} + \omega t - k(R+r_0)\right]$$

$$= (-1)^{n+1}\frac{2Q_n ER\lambda}{R+r_0}\sin\left[\omega t - k(R+r_0)\right] \qquad \text{.................(8.7)}$$

অতএব n-তম অর্ধপর্যায়ী বলয়ের জন্য n=0, 1, 2,... P বিন্দুতে ψ_n-এর বিস্তার

$$A_n = (-1)^{n+1}\frac{2Q_n ER\lambda}{R+r_0} \qquad \text{.................(8.8)}$$

n-এর মান যুগ্ম বা বিযুগ্ম তার ওপর নির্ভর করে ψ_n-এর বিস্তার হবে যথাক্রমে ঋণাত্মক বা ধনাত্মক। যদি গোলীয় না হয়ে তরঙ্গমুখ সমতল হয় অর্থাৎ যদি S বহুদূরে অবস্থিত হয় তবে $R >> r_0$। সেক্ষেত্রে

$$A_n = (-1)^{n+1} 2Q_n E\lambda \qquad (8.9)$$

$$A_n = (-1)^{n+1} E\lambda(1+\cos\theta) \qquad (7.10)$$

স্পষ্টতই n বৃদ্ধি পেতে থাকলে θ বৃদ্ধি পাবে। ফলে A_n হ্রাস পেতে থাকবে। অতএব বিপরীতদশায় থাকলেও পরপর বলয় থেকে আগত তরঙ্গগুলির অবদান পরস্পরকে সম্পূর্ণ নস্যাৎ করতে পারেনা। আবার আমরা লক্ষ্য করি যে n-তম বলয়ের ক্ষেত্রফল n বৃদ্ধির সঙ্গে সামান্য বৃদ্ধি পায়। (8.6) থেকে

$$S_n = \frac{2\pi R}{R + r_o} \int_{r_{n-1}}^{r_n} r dr$$

$$= \frac{\pi R}{R + r_o}\left[r_n^2 - r_{n-1}^2\right]$$

$$= \frac{\pi R\lambda}{R + r_o}\left\{r_o + \left(n - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}\right\} \qquad \text{.................(8.10)}$$

তরঙ্গতল সমতল হলে

$$S_n = \pi\lambda\left\{r_o + \left(n - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}\right\} \qquad \text{.................(8.11)}$$

S_n বৃদ্ধি পেলে গৌণ তরঙ্গিকার সংখ্যা বৃদ্ধি পাবে। কিন্তু n বৃদ্ধি পেলে Q_n হ্রাস পায়। এইজন্য A_n/Q_n ধ্রুবক [সমীকরণ (8.8) বা (8.9) দ্রষ্টব্য।]

সমগ্র তরঙ্গ তলের মোট আলোক তরঙ্গ বিস্তারের অবদান

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \ldots + A_n$$

$$\text{বা } A = |A_1| - |A_2| + |A_3| - \ldots \pm |A_n| \qquad \text{.................(8.12)}$$

কারণ $A_1, A_2, A_3 \ldots$ পর পর বিপরীত চিহ্নযুক্ত। এখন n যদি বিজোড় হয় তবে আমরা ওপরের শ্রেণিটিকে দু'ভাবে লিখতে পারি। যেমন,

$$A = \frac{|A_1|}{2} + \left(\frac{|A_1|}{2} - |A_2| + \frac{|A_3|}{2}\right) + \left(\frac{|A_3|}{2} - |A_4| + \frac{|A_5|}{2}\right) + \ldots$$

$$+ \left(\frac{|A_{n-2}|}{2} - |A_{n-1}| + \frac{|A_{n-1}|}{2}\right) + \frac{|A_n|}{2} \qquad \text{.................(8.13)}$$

বা $$A = A_1 - \frac{|A_2|}{2} - \left(\frac{|A_2|}{2} - |A_3| + \frac{|A_4|}{2}\right) - \left(\frac{|A_4|}{2} - |A_5| + \frac{|A_6|}{2}\right) - \ldots$$

$$- \left(\frac{|A_{n-3}|}{2} - |A_{n-2}| + \frac{|A_{n-1}|}{2}\right) - \frac{|A_{n-1}|}{2} + |A_n| \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.14)$$

এখন হয় $$|A_n| > \frac{|A_{n-1}| + |A_{n+1}|}{2},$$

বা $$|A_n| < \frac{|A_{n-1}| + |A_{n+1}|}{2}$$

যদি $|A_n| > \dfrac{|A_{n-1}| + |A_{n+1}|}{2}$ হয় তবে

$$0 > \left(\frac{|A_{n-1}|}{2} - |A_n| + \frac{|A_{n+1}|}{2}\right)$$

অর্থাৎ সমীকরণ (8.13)-এর প্রতিটি বন্ধনীভুক্ত পদ ঋণাত্মক। ফলে আমরা সমীকরণটি থেকে পাই

$$A < \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_n|}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.15)$$

এবং (8.13) থেকে পাই

$$A > |A_1| - \frac{|A_2|}{2} - \frac{|A_{n-1}|}{2} + |A_n| \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.16)$$

যেহেতু তির্যক গুণক-এর মান এক থেকে শূন্য পর্যন্ত হতে পারে। যদি বলয়ের সংখ্যা অনেক বেশি হয় সেক্ষেত্রে পাশাপাশি বলয়গুলির মধ্যে প্রভেদটুকু উপেক্ষা করা যেতে পারে। অর্থাৎ

$|A_1| \approx |A_2|$ এবং $|A_{n-1}| \approx |A_n|$ এক্ষেত্রে (8.16) থেকে পাই

$$A > \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_n|}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.17)$$

সমীকরণ (8.15) এবং (8.17) থেকে এই সিদ্ধান্ত নেওয়া চলে যে

$$A \approx \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_n|}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.18)$$

যখন $|A_n| < \frac{|A_{n-1}| + |A_{n+1}|}{2}$, তখনও আমরা (8.18) এর মত একই ফল পাব। m যদি যুগ্ম হয় সেক্ষেত্রেও একই প্রক্রিয়া দ্বারা দেখা যাবে যে

$$A \approx \frac{|A_1|}{2} - \frac{|A_n|}{2} \qquad \text{.................(8.19)}$$

যদি সমগ্র গোলীয় মুখ্য তরঙ্গ তল বিবেচনা করা যায় তবে m তম ফ্রেনেল অর্ধ-পর্যায়ী তলে $\theta = \pi$ এবং । $Q(\theta) = Q(\pi) = 0$. অর্থাৎ $|A_n| = 0$ হবে। তখন

$$A = \frac{|A_1|}{2} \qquad \text{.................(8.20)}$$

অর্থাৎ যখন কোন উৎসের সমগ্র তরঙ্গতল উন্মুক্ত থাকে তখন কোন বিন্দুতে অলোক তরঙ্গের মোট বিস্তার তরঙ্গ তলের প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের অবদানের অর্ধেক।

এখন যদি তরঙ্গ S থেকে সোজাসুজি P বিন্দুতে গমন করে তবে P বিন্দুতে তরঙ্গ [সমীকরণ (8.4) থেকে]

$$\psi = \frac{'A}{R + r_0} \cos[\omega t - k(R + r_o)] \qquad \text{.................(8.21)}$$

গৌণ তরঙ্গিকার ধারণা থেকে আমরা পেয়েছি সমীকরণ (8.7) । অতএব P বিন্দুতে সমগ্র মুখ্যতল জাত গৌণ তরঙ্গিকা যে লব্ধি তরঙ্গ উৎপন্ন করবে তা হবে

$$\psi = \sum \psi_n = \sum A_n \sin[\omega t - k(R + r_o)]$$

যেখানে A_n সমীকরণ (8.8) এ প্রদত্ত।

$$\therefore \psi = (A_1 + A_2 + A_3 + \ldots + A_n) \sin[\omega t - k(R + r_o)]$$

$$= \frac{|A_1|}{2} \sin[\omega t - k(R + r_o)]$$

[সমীকরণ (8.21) থেকে পাই]

(8.8) থেকে

$$|A_1| = \frac{2Q_1 ER\lambda}{R + r_o}$$

$$\therefore \psi = \frac{Q_1 E R \lambda}{R + r_o} \sin\left[\omega t - k\left(R + r_o\right)\right]$$

এখন যেহেতু প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয় থেকে তরঙ্গ $\theta = 0$ অভিমুখে গমন করে তাই $Q_1 = 1$ এবং আমরা জানি $E = P\frac{A}{R}$, যেখানে P ধ্রুবক। অতএব

$$\psi = \frac{AP\lambda}{R + r_o} \sin\left[\omega t - k\left(R + r_o\right)\right]$$

আমরা ধ্রুবক $P = \frac{1}{\lambda}$ ধরতে পারি, যা থেকে আমরা সমীকরণ (8.21) এর তুল্য সমীকরণ পাই যা কিনা $\frac{\pi}{2}$ দশা পার্থক্যে আছে। এই অসংগতিকেও মুছে ফেলা যায় যদি আমরা মনে করি গৌণ তরঙ্গিকাগুলি মুখ্য তরঙ্গের সমদশায় বিকীর্ণ না হয়ে $\frac{\pi}{2}$ দশা পার্থক্যে বিকীরিত হয়।

8.2.2 আলোকের সরলরেখায় গমন

আমরা দেখেছি, যদি কোন উৎস থেকে আলো অবাধে অন্য একটি বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তবে ঐ বিন্দুতে তরঙ্গের লব্ধি বিস্তার হবে

$$A = \frac{|A_1|}{2}$$

এর অর্থ হ'ল, সমগ্র তরঙ্গতল থেকে গৌণতরঙ্গিকা ঐ বিন্দুতে যে তরঙ্গ বিস্তার ঘটায় তা কেবলমাত্র প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী ক্ষেত্রের গৌণ তরঙ্গিকাগুলির মোট বিস্তারের অর্ধেক। এই প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল কত? ধরা যাক কোন একসময়ের মুখ্য তরঙ্গমুখ থেকে অভীষ্ট বিন্দুর দূরত্ব $r = 50$ সেমি, আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda = 6000\,\text{Å}$। বিন্দুটা থেকে বলয়ের পরিধির দূরত্ব $r + \frac{\lambda}{2}$। অতএব যদি বলয়ের ব্যাসার্ধ a_1 হয় তবে

$$a_1^2 = \left(r + \frac{\lambda}{2}\right)^2 - r^2 = r\lambda + \frac{\lambda^2}{4} \approx r\lambda$$

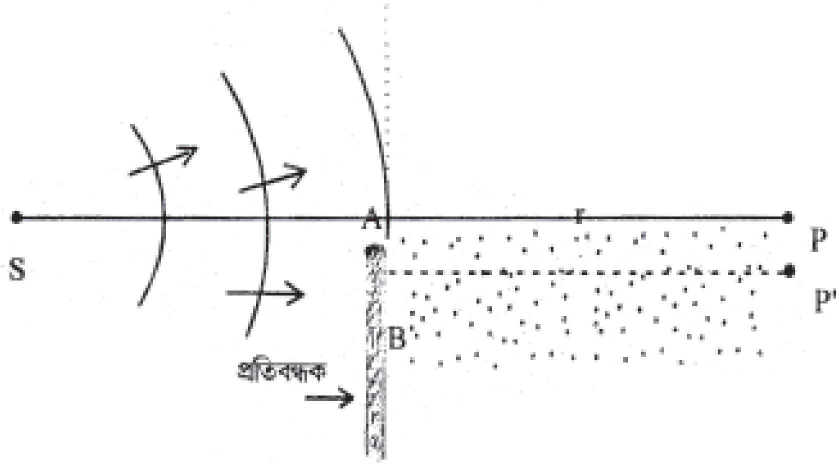
$$\therefore \text{বলয়ের ব্যাস} = 2\sqrt{r\lambda} = 2\sqrt{50 \times 6000 \times 10^{-8}} \text{ সেমি}$$

$$= 1 \text{ মিমি প্রায়}$$

অর্থাৎ উৎস ও বিন্দুর মধ্যে বিন্দুটি থেকে 50 সেমি দূরে সংযোগরেখাকে কেন্দ্র করে কেবল 1 মিমি ব্যাসের ছিদ্রযুক্ত

অস্বচ্ছ পর্দা থাকলে বিন্দুতে যে আলো এসে পৌঁছাবে তা সমগ্র উন্মুক্ত তরঙ্গ মুখ থেকে আগত আলোক থেকে বেশি। তাই বলা যায় আলো সরলরেখায় গমন করে।

অন্য আরো একটি প্রশ্ন বিবেচনার দাবী রাখে। আলোর যখন ব্যবর্তন হয়, অর্থাৎ আলো যখন প্রতিবন্ধককে অতিক্রম করে তার পশ্চাতে যেতে পারে তখন ছায়া কিরূপে সৃষ্টি হয়?



চিত্র 8.3 : কেন ছায়া উৎপন্ন হয়।

আলোকউৎস S ও প্রতিবন্ধকের প্রান্ত বিন্দু A বরাবর রেখার উপর P অবস্থিত। অতএব P বিন্দুতে আলো পৌঁছাবে। কিন্তু P' বিন্দুতে যে আলো ব্যবর্তন হেতু আসবে তা আসবে তরঙ্গ তলের A বিন্দু ও তার উপর থেকে। যদি B বিন্দু সাপেক্ষে (P' বিন্দুর ক্ষেত্রে প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের কেন্দ্র B) A বিন্দুর অবস্থান হয় n তম অর্ধপর্যায়ী বলয়ের পরিধির উপর, তবে $BA = a_n = \sqrt{nr\lambda}$, ধরা যাক P' বিন্দুতে আলোকিত রেখা থেকে 1 সেমি অভ্যন্তরে।

$\therefore a_n = 1$ সেমি $= \sqrt{nr\lambda}$

$$\text{বা} \;\; n = \frac{1}{r\lambda} = \frac{1}{50 \times 6000 \times 10^{-8}} = 333$$

অতএব $a_n = a_{333}$ এবং n তম বলয়ের তরঙ্গ বিস্তারে অবদান $|A_n| = |A_{333}|$। কিন্তু P' বিন্দুতে বিস্তার

$$A' = \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_{333}|}{2}$$

যেহেতু প্রথম বলয় অনুপস্থিত, $|A_1| = 0$ এবং

$$A' = \frac{|A_{333}|}{2}$$

$|A_{333}|$ এতই নগণ্য যে $A' \approx 0$। অর্থাৎ P' বিন্দুতে কোন আলো এসে পৌঁছাবে না। এই কারণেই কোন প্রতিবন্ধকের পশ্চাতে ছায়ার সৃষ্টি হয়।

8.2.3 বলয় ফলক বা জোন প্লেট (Zone plate)

সমীকরণ (8.12) থেকে আমরা দেখতে পাই যে যদি একটি বলয়ান্তর থেকে গৌণ তরঙ্গিকার বিকিরণ বন্ধ করে দেওয়া যায় তবে অভীষ্ট বিন্দুতে আলোক তরঙ্গের বিস্তার বৃদ্ধি পাবে এবং ঐ বিন্দুতে আলোর তীব্রতা বহুগুণ বেড়ে যাবে —

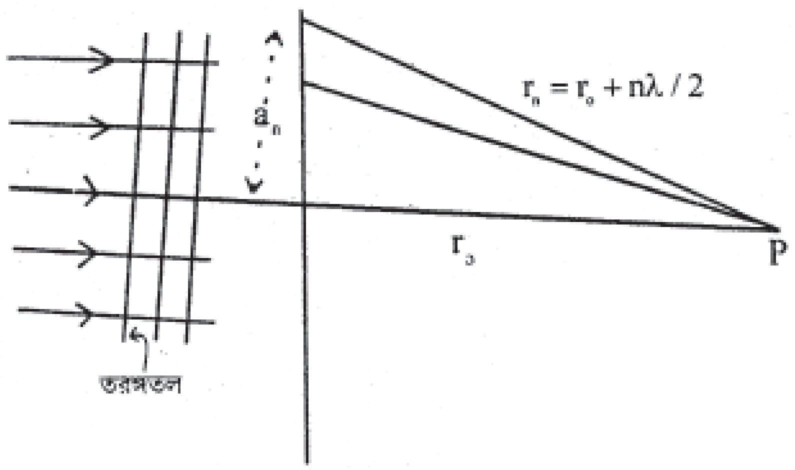
যদি জোড়-সংখ্যক বলয় গুলিকে অবরুদ্ধ করা যায় তবে

$$A = |A_1| + |A_3| + |A_4| + \ldots\ldots + |A_n|,\ n = \text{ বিজোড়}$$

যদি বিজোড়-সংখ্যক বলয় গুলিকে অবরুদ্ধ করা হয় তবে

$$A = -\{|A_2| + |A_4| + \ldots\ldots + |A_n|,\ n = \text{ জোড়}$$

সমীকরণ (8.8) থেকে আমরা দেখতে পাচ্ছি A_n এর মান অভীষ্ট বিন্দুর দূরত্ব (r_o) এর উপর নির্ভর করে। অতএব বলা যায় কোন একটি তরঙ্গমুখের উপর ফ্রেনেল অর্ধ-পর্যায়ী একান্তর বলয়গুলিকে অবরুদ্ধ করে বিভিন্ন বিন্দুতে আলোক তরঙ্গের তীব্রতা বৃদ্ধি করা যায় যেমন অভিসারী লেন্স দ্বারা করা হয়।



চিত্র 8.4 : nতম বলয়ের বহির্ব্যাসার্ধ

একটি সমতল আলোক তরঙ্গকে একটি স্বচ্ছ সমতল পর্দার উপর আপতিত করলে ঐ পর্দাকে মুখ্য তরঙ্গ তল বলা চলে। এই পর্দার উপর ফ্রেনেল অর্ধ-পর্যায়ী বলয় গড়ে যদি একান্তর বলয়গুলিকে কালো করা যায় তবে আমরা ঐ পর্দার বিপরীত পার্শ্বে নির্গত তরঙ্গকে অভিসৃত হতে দেখব।

ধরি $a_n = n$তম বলয়ের ব্যাসার্ধ (বহিস্থ)

r_o = পর্দা থেকে অভীষ্ট বিন্দুর দূরত্ব P

$r_n = r_o + n\dfrac{\lambda}{2} = P$ থেকে বলয়ের পরিধির দূরত্ব।

$$\therefore a_n^2 = r_n^2 - r_o^2 = \left(r_o + n\frac{\lambda}{2}\right) - r_o^2 = n\lambda r_o + \frac{n^2\lambda^2}{4}$$

যেহেতু λ খুবই ক্ষুদ্র, তাই

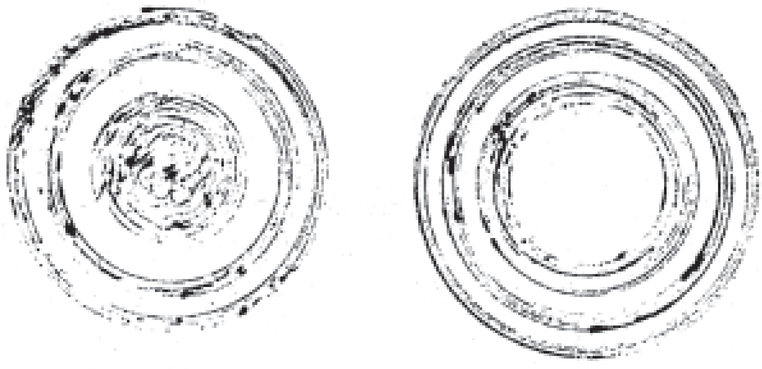
$$a_n = (\lambda r_o)\sqrt{n} \qquad \text{.................(8.22)}$$

$n = 1,2,3,.......$ বসিয়ে যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয়,তৃতীয়... প্রভৃতি বলয়গুলির বহির্ব্যাসার্ধ পাওয়া যায়।

$$a_1 = \sqrt{\lambda r_o},\ a_2 = \sqrt{2}\sqrt{\lambda r_o} = \sqrt{2}a_1,\ a_3 = \sqrt{3}a_1$$

$$a_n = \sqrt{n}a_1$$

অত - ব স্বচ্ছ পর্দার উপর প্রাকৃতিক রাশির বর্গমূলের সমান ব্যাসার্ধ যুক্ত সমকেন্দ্রিক বৃত্ত অঙ্কন করে যে বহু সংখ্যক বলয় শৃঙ্খল গঠন করা যায় তাদের একান্তর বলয়গুলিকে কালো করলে আমরা অভিসারী ফলক গঠন করতে পারি। একে বলে বলয় ফলক (zone plate)।



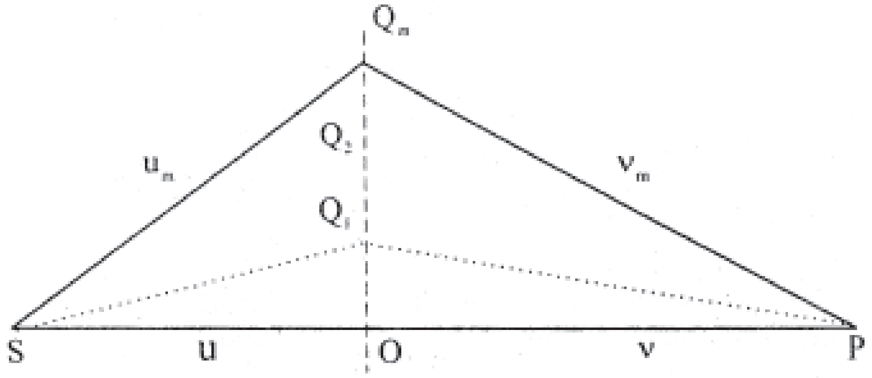
চিত্র 8.5 : বলয়-ফলক নির্মাণ।

একটা সাদা কাগজের উপর এরূপ বৃত্তাঙ্কন করে একান্তর বলয়গুলিকে কালো করা হয়। (চিত্র 8.5)। এরপর এই বলয়ের ক্ষুদ্রায়িত ছবি তোলা হয়।

ছবির নেগেটিভ হল ফ্রেনেলের বলয়-ফলক বা জোন প্লেট। লক্ষ্য করুন হয় বিজোড়-সংখ্যক বা জোড়-সংখ্যক বলয় গুলিকেই কেবল কালো করা হয়েছে।

বলয় ফলক ব্যবহার করা হয় x-তরঙ্গ বা মাইক্রোতরঙ্গের সাহায্যে ছবি তোলার সময়। কেননা সাধারণ লেন্স এই তরঙ্গের প্রতিসরণ ঘটাতে পারে না। [আসলে কাচ x-রশ্মির নিকট অনচ্ছ।]

8.2.4 অভিসারী লেন্সরূপে বলয় ফলক



চিত্র 8.5 : বলয়-ফলক অভিসারী লেন্সের অনুরূপ।

ধরি OQ_m হল একটি বলয়-ফলকের লম্বচ্ছেদ। O এর প্রথম বলয়ের কেন্দ্র এবং $Q_m = m$ তম বলয়ের বহিঃপরিধির উপরিস্থিত একটি বিন্দু। আমরা ধরব যে $(SQ_1 + Q_1P) - (SO + OP) = \frac{\lambda}{2}$;

$$(SQ_2 + Q_2P) - (SO + OP) = 2 \times \frac{\lambda}{2} \ldots$$

$$(SQ_m + Q_mP) - (SO + OP) = m \times \frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow (U_m + v_m) - (U + v) = \frac{m\lambda}{2} \qquad \text{.................(8.23)}$$

যদি $OQ_m = a_m = m$ তম বলয়ের বহিঃব্যাসার্ধ, তবে

$$u_m = \sqrt{a_m^2 + u^2} \qquad v_m = \sqrt{a_m^2 + v^2}$$

$$\text{বা } u_m = u\left(1 + \frac{a_m^2}{u^2}\right)^{\frac{1}{2}} \approx u\left(1 + \frac{a_m^2}{2u^2}\right)$$

কারণ $u >> a_m$, এবং অনুরূপে $v >> a_m$ তাই লেখা যায়

$$u_m = n + \frac{a_m^2}{2u} \text{ এবং } v_m = v + \frac{a_m^2}{2v}$$

(8.21) থেকে লেখা যায়

$$\frac{a_m^2}{2u}+\frac{a_m^2}{2v}=\frac{m\lambda}{2}$$

বা, $$\left(\frac{1}{u}+\frac{1}{v}\right)=\frac{m\lambda}{a_m^2} \qquad \text{.................(8.24)}$$

সমীকরণ (8.24) অভিসারী পাতলা লেন্সের সমীকরণের সমতুল্য। এই অভিন্নতার কারণ আর কিছুই নয়, P বিন্দু S-এর ব্যবর্তিত প্রতিবিম্ব মাত্র। আমরা লেন্সের সমীকরণের সঙ্গে মিলিয়ে লিখতে পারি

$$f_1=\frac{a_m^2}{m\lambda} \qquad \text{.................(8.25)}$$

f_1 কে বলে মুখ্য বা প্রথমক্রমের ফোকাস দৈর্ঘ্য। S এবং P কে বলে অনুবন্ধী ফোকাস (conjugate foci) (8.20) থেকে $a_m^2=mv\lambda \quad (r_o=v)$ বসিয়ে পাই।

$$f_1=v$$

সংশ্লিষ্ট চিত্র (8.4) এ বস্তু বা উৎস অসীমে বলেই $f_1=v$ এবং এজন্যই একে বলে মুখ্য ফোকাস বা প্রথমক্রমের ফোকাস।

$$a_m=\sqrt{mr_o\lambda} \qquad \text{.................(8.26)}$$

এ থেকে আমরা বলতে পারি, যদি বলয় ফলকের উন্মেষ একই থাকে অর্থাৎ a_m = ধ্রুবক হয় তবে কোন বিশেষ বর্ণের আলোর ক্ষেত্রে m বৃদ্ধি পাবে যদি P ফলকের দিকে এগিয়ে আসে অর্থাৎ যদি r_o হ্রাস পায়। এ কথার অর্থ হল অভীষ্ট বিন্দু বলয় ফলকের নিকটতর হলে একই ব্যাসার্ধের ফলকে তরঙ্গমুখের বেশি সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী বলয় অন্তর্ভুক্ত হবে। উদাহরণ স্বরূপ, ধরা যাক P যখন ফলকের দিকে এগিয়ে আসবে তখন যখন $r_o=\frac{f_1}{2}$ হবে, তখন যেহেতু a_m ধ্রুবক, তাই (8.26) থেকে বলা যায় m বৃদ্ধি পেয়ে হবে 2m । কিন্তু এমত অবস্থায় আলোক নিঃসারক অর্ধপর্যায়ী বলয়গুলির প্রতিটিতে তরঙ্গমুখের দুটি করে অর্ধপর্যায় বলয় অন্তর্ভুক্ত হবে। আর যেহেতু পরপর দুটি বলয় বিপরীত দশায় থাকে তাই বর্তমান P বিন্দুতে তারা বিপরীত দশায় মিলিত হবে এবং P বিন্দুর আলোক-তীব্রতা হবে শূন্য। আবার যদি $r_o=\frac{f_1}{3}$ হয় তখন এরূপ অর্ধবলয়ের সংখ্যা হবে 3m। অর্থাৎ ফলকের প্রতিটি আলোকে নিঃসারক অর্ধপর্যায়ী বলয় তিনটি করে তরঙ্গমুখের অর্ধ-পর্যায়ী বলয় ধারণ করবে। পরপর দুটি অর্ধপর্যায়ী বলয়ের আলো বিপরীত দশায় থাকলেও প্রতিটি বলয়ের তৃতীয় অর্ধ-পর্যায়ী বলয়াগত আলো থাকবে সমদশায়। অতএব P বিন্দুর বর্তমান অবস্থানে $\left(r_o=\frac{f_1}{3}\right)$ উজ্জ্বল তীব্রতার আলোক পাওয়া যাবে। অনুরূপে $\frac{f_1}{5},\frac{f_1}{7}\cdots$

প্রভৃতি অবস্থানে S বিন্দুর উজ্জ্বল প্রতিবিম্ব গঠিত হবে। অর্থাৎ বলয় ফলক কেবলমাত্র অভিসারী লেন্সের মত নয়, তার থাকে বহু-সংখ্যক ফোকাস। আমরা লিখতে পারি :

প্রথমক্রমের মুখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্য f_1 এবং $f_3, f_5, f_7 \ldots$ ইত্যাদি হল তৃতীয়, পঞ্চম, সপ্তম.... প্রভৃতি ক্রমের ফোকাস দৈর্ঘ্য। সুতরাং

$$f_1 = \frac{a_m^2}{m\lambda}$$

$$f_3 = \frac{f_1}{3} = \frac{a_m^2}{3m\lambda}$$

$$f_5 = \frac{f_1}{5} = \frac{a_m^2}{5m\lambda} \text{........ইত্যাদি}$$

লক্ষ্যণীয় যে যদি m যুগ্ম হয় তবে $r_o = \frac{f_1}{2}, \frac{f_1}{4} \ldots$ ইত্যাদি অবস্থানে ফলক থেকে ব্যবর্তিত আলোকের তীব্রতা একেবারেই শূন্য। কিন্তু m অযুগ্ম হলে অতি সামান্য আলোক বিম্ব পাওয়া যাবে। অর্থাৎ f_1 থেকে f_3, f_3 থেকে f_5.... ইত্যাদি মধ্যবর্তী অঞ্চলে অতি দুর্নিরীক্ষ্য কিছু কিছু লঘিষ্ঠ ও গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে। সাধারণভাবে বলা যায় যখন P বিন্দুর দূরত্ব

$r_o = \frac{a_n^2}{(2n+1)\lambda}$, তখন P-র অবস্থানে গরিষ্ঠ এবং $r_o = \frac{a_n^2}{2n\lambda}$, তখন P-র অবস্থানে লঘিষ্ঠ উজ্জ্বলতা পাওয়া যাবে।

সংখ্যাভিত্তিক প্রশ্ন

1. 6×10^{-5} সেমি আলোক তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোর ক্ষেত্রে কোন বলয় ফলক থেকে 60 সেমি দূরত্বের বিন্দুর অবস্থান থেকে প্রথম, দ্বিতীয় ও তৃতীয় অর্ধ পর্যায়ী বলয়ের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করুন।

সমাধান : আমরা জানি mতম বলয়ের ব্যাসার্ধ a_m হলে $a_m = \sqrt{mr_o\lambda}$, r_o = প্রদত্ত বিন্দু থেকে বলয় ফলকের দূরত্ব।

$$\therefore a_1 = \sqrt{r_o\lambda} = \sqrt{60 \times 6 \times 10^{-5}} = 0.6 \text{ মিমি}$$

$$a_2 = \sqrt{2r_o\lambda} = \sqrt{2}\sqrt{r_o\lambda} = 1.414 \times 0.6 = 0.924 \text{মিমি}$$

$$a_3 = \sqrt{3r_o\lambda} = \sqrt{3}\sqrt{r_o\lambda} = 1.732 \times 0.6 = 1.0392 \text{ মিমি}$$

2. একটি বলয় ফলকের n-তম বলয়ের ব্যাসার্ধ $a_m = 0.1\sqrt{m}$ সেমি। $\lambda = 6 \times 10^{-5}$ সেমি তরঙ্গের জন্য বলয়-ফলকের ফোকাসগুলির দূরত্ব নির্ণয় করুন।

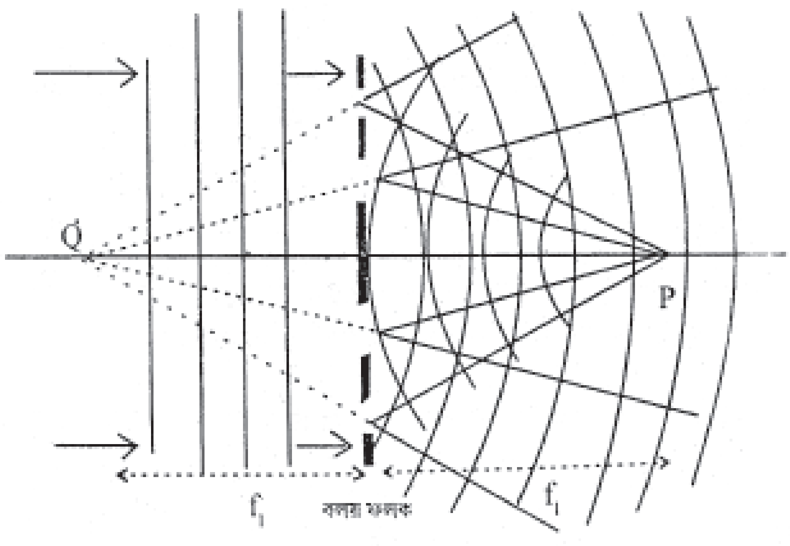
সমাধান : আমরা জানি মুখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্য

$$f_1 = \frac{a_m^2}{m\lambda}$$

$$\therefore f_1 = \frac{(0.1)^2 m}{m\lambda} = \frac{10^{-2}}{6 \times 10^{-5}} = \frac{1000}{6} = \frac{500}{3} \text{ সেমি}$$

অতএব অন্যান্য ফোকাসগুলির অবস্থান হবে $f_3 = \frac{500}{9}$ সেমি, $f_5 = \frac{100}{3}$ সেমি, $f_7 = \frac{500}{21}$ সেমি, ইত্যাদি।

ফ্রেনেল বলয় ফলক কেবলমাত্র অভিসারী লেন্সের ন্যায় ব্যবহার করে না। যদি কোন বলয় ফলকের উপর সমতল তরঙ্গের আপতন ঘটে তবে ঐ তরঙ্গ তলকে ফলকের অক্ষের উপর এবং অপর পার্শ্বে অভিসৃত হতে দেখা যায় এবং যে বিন্দুতে আলোক তরঙ্গ অভিসৃত হয় তা একটি মুখ্য গরিষ্ঠ ফ্রিঞ্জের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট। বলয়ের কেন্দ্র থেকে এই বিন্দুর দূরত্বকেই বলে প্রথমক্রমের ফোকাস দৈর্ঘ্য (চিত্র 8.6)।



চিত্র 8.6 : বলয় ফলক-অপসারী ও অভিসারী

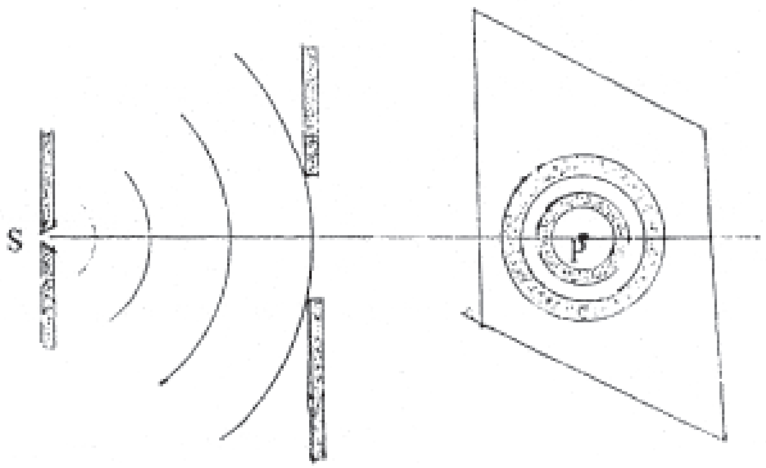
সমতল আলোক তরঙ্গ বলয় ফলকে ব্যবর্তিত হয়ে যেমন P বিন্দুতে মিলিত হয় এবং যদি বলয় ফলক থেকে P-এর দূরত্ব f_1 হয় তবে ওখানে একটি উজ্জ্বল আলোক বিন্দু গঠিত হবে; তেমনি আবার বলয় ফলকে

ব্যবর্তিত তরঙ্গিকাগুলিকে Q বিন্দু থেকে অপসৃত বলে মনে হবে। যেমন বলয় ফলকের অপর পার্শ্বে $\frac{f_1}{3}, \frac{f_1}{5}, \frac{f_1}{7}\ldots$ ইত্যাদি দূরত্বে উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়া যাবে, তেমনি বলয় ফলকের সম্মুখেও $\frac{f_1}{3}, \frac{f_1}{5}, \frac{f_1}{7}\ldots$ ইত্যাদি বিন্দুতে উজ্জ্বল বিন্দু পাওয়া যাবে যেখান থেকে ব্যবর্তিত তরঙ্গমালা অপসৃত হচ্ছে বলে মনে হবে।

8.3 বৃত্তাকার উন্মেষে ফ্রেনেল ব্যবর্তন

i) যখন গোলীয় তরঙ্গ

একটি অস্বচ্ছ পর্দায় একটি ক্ষুদ্র বৃত্তাকার উন্মেষ কেটে পর্দাটিকে কোন বিন্দু-উৎসের সম্মুখে স্থাপন করলে উৎস থেকে আগত আলোক তরঙ্গ গোলীয় তরঙ্গরূপে উন্মেষের তথা অনচ্ছ পর্দার উপর আপতিত হবে। উৎস S ও উন্মেষের কেন্দ্র O সংযোগকারী রেখার উপর P বিন্দুতে ব্যবর্তিত আলোকের তীব্রতা কেমন হবে? (চিত্র 8.7)



চিত্র 8.7 : বৃত্তাকার উন্মেষে ফ্রেনেল ব্যবর্তন।

আমরা ইতিপূর্বে জেনেছি মুখ্য তরঙ্গমুখের উন্মুক্ত অংশে যতগুলি ফ্রেনেল অর্ধ-পর্যায়ী বলয় গঠিত হতে পারে তা নির্ভর করে তরঙ্গমুখ থেকে P এর দূরত্বে উপর। মনে করুন, যদি m সংখ্যক বলয় থাকে তবে a_m তম বলয়ের ব্যাসার্ধ এবং $a_m^2 = mr_0\lambda$। অর্থাৎ r_0 (উন্মেষ এবং বর্তমানে তরঙ্গতল থেকে P-এর দূরত্ব) হ্রাস পেলে m বৃদ্ধি পাবে। যদি পর পর বলয়গুলি থেকে আগত তরঙ্গিকাগুলির মোট তরঙ্গ বিস্তার $A_1, A_2, A_3\ldots$ হয় তবে P বিন্দুতে মোট আলোক বিস্তার

$$A = |A_1| - |A_2| + |A_3| \ldots\ldots\ldots \pm |A_m|$$

যদি m যুগ্ম হয় তবে যেহেতু পাশাপাশি বলয়ের আলোক অবদান প্রায় সমান, তাই $A \approx 0$। অর্থাৎ আলোকের তীব্রতা $I \approx 0$। কিন্তু যদি m অযুগ্ম হয় তবে আমরা লিখতে পারি

$$A = |A_1| - (|A_2| - |A_3|) - (|A_4| - |A_5|) \ldots (|A_{m-1}| - |A_m|)$$

অর্থাৎ $A \approx |A_1|$।

কিন্তু আমরা জানি যখন সমগ্র তরঙ্গতল অবারিত থাকে, তখন $A \approx \frac{|A_1|}{2}$। অর্থাৎ উন্মেষাগত ব্যবর্তিত আলোকের তীব্রতা (I) সমগ্র তরঙ্গতল থেকে আগত ব্যবর্তিত তরঙ্গের তীব্রতার চারগুণ। এই ফলটি বিস্ময়কর। কারণ বেশি আলোকের পথ অনচ্ছ পর্দায় আটকে দিয়ে অতি ক্ষুদ্র বৃত্তাকার উন্মেষ থেকে বেশি আলো পাওয়া গেল। এরকম তখনই হতে পারে যদি অন্যান্য বিন্দুতে আলোক শক্তি হ্রাস পায়। আমাদের বিবৃত পরীক্ষা-ব্যবস্থাটি লক্ষ্য করলে দেখা যাবে SP রেখার সঙ্গে উন্মুক্ত তরঙ্গতল একটি প্রতিসাম্য বজায় রেখেছে। এ থেকে সহজেই অনুমান করা চলে SP বহির্ভূত বিন্দুতে আলোকে তীব্রতা বৃত্তাকারে বণ্টিত হবে।

আমরা আরো লক্ষ্য করি যে যদি P বিন্দুটি উন্মেষের দিকে অগ্রসর হয় তবে r_0 হ্রাস পাবে এবং m অর্থাৎ অর্ধ-পর্যায়ী বলয় সংখ্যা বৃদ্ধি পাবে। এক সময় m-এর মান অনেক বড় হলে আমরা লিখতে পারব $A = \frac{|A_1|}{2}$। অর্থাৎ যেন সমগ্র তরঙ্গতলই P বিন্দুর নিকট উন্মুক্ত। P বিন্দুকে একই অবস্থানে (দূরে) রেখে যদি উন্মেষের ব্যাসার্ধ বৃদ্ধি করা যায় তখনও m বৃদ্ধি পাবে এবং P বিন্দুতে উজ্জ্বলতা হ্রাস পাবে, অর্থাৎ $A = \frac{|A_1|}{2}$ হবে। এরূপ ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ তরঙ্গতল P-এর নিকট অবারিত ভাবা যেতে পারে।

অন্য আর একটি বিষয় বিবেচনা করা যাক। পর্দা সরিয়ে উন্মেষের স্থলে একটি বৃত্তাকার অবরোধ/অনচ্ছ বস্তু রাখলে P বিন্দুতে তীব্রতা বণ্টন কেমন হবে? ধরা যাক অনচ্ছ বাধার ব্যাসার্ধ প্রথম ফ্রেনেল বলয়ের ব্যাসার্ধের সমান। তা হলে P বিন্দুতে প্রথম বলয় ব্যতীত অন্য বলয় থেকে তরঙ্গিকা এসে পৌঁছাবে। আমরা লিখতে পারি

$$A = -|A_2| + |A_3| - |A_4| + \ldots\ldots$$

$$\approx -\frac{|A_2|}{2}$$ [সমীকরণ 8.12, 8.13, 8.14 দেখুন]

কিন্তু $|A_1| \approx |A_2|$, অতএব P বিন্দুতে আলোকের উজ্জ্বলতা একই থাকবে। এই তত্ত্বগত সিদ্ধান্ত বিজ্ঞানী অ্যারাগো (Arago) পরীক্ষাদ্বারা প্রমাণ করেন। [পোয়াসোঁ (Poisson)] এই তত্ত্বগত সিদ্ধান্ত দ্বারা আলোকের তরঙ্গতত্ত্বকে নস্যাৎ করতে চেয়েছিলেন।]

ii) সমতল তরঙ্গ

গোলীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে আমরা যে গুণগত বিশ্লেষণ করেছি এক্ষেত্রেও একই ধারায় বিশ্লেষণ করা চলে। এবং আমরা একই সিদ্ধান্তে আসব।

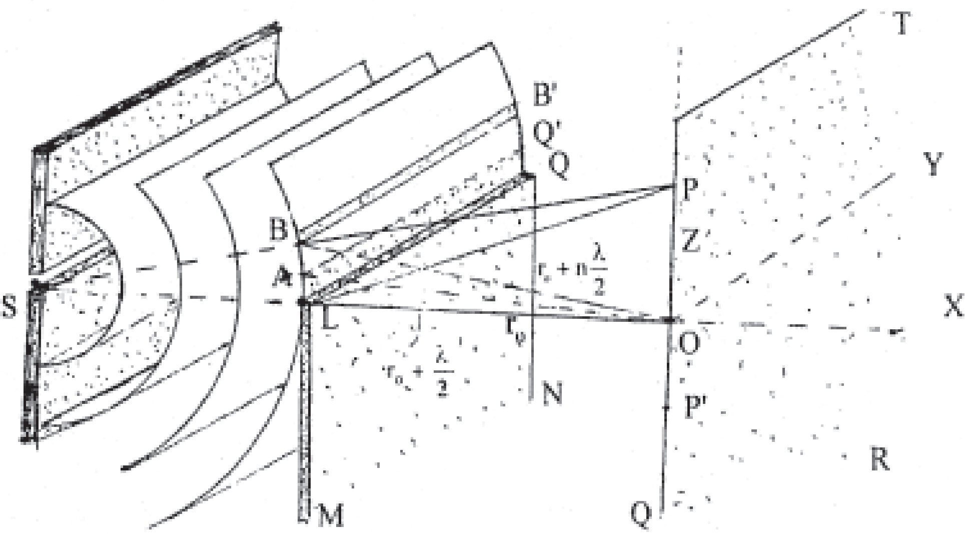
সংক্ষিপ্ত উত্তরধর্মী প্রশ্ন

1. কোন তরঙ্গমুখের কিছুটা অংশ একটি চক্রাকার অনচ্ছ পর্দায় আটকালো হল। চক্রাকার পর্দার অক্ষের অভিলম্বে একটি পর্দায় উপর বলয়াকার নকশা পাওয়া যাবে। এই নকশার কেন্দ্রে উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জ পাওয়া যাবে কি?

৪.৩.১ সরল কিনারায় ব্যবর্তন (Diffraction at straight edge)

চিত্র ৪.৪ দ্রষ্টব্য।

LMNQ একটি অনচ্ছ প্রতিবন্ধক পর্দা যার LQ প্রান্ত সরলরৈখিক এবং এটি রৈখিক স্লিট S এর দৈর্ঘ্যের সমান্তরাল। S রৈখিক স্লিট থেকে যে তরঙ্গ নির্গত হবে তা হবে চোঙাকার (cylindrical)। এই বিকীর্ণ তরঙ্গ প্রতিবন্ধক LMNQ-এ আংশিকভাবে বাধাপ্রাপ্ত হবে এবং এর কিনারা LQ-এ তরঙ্গের ব্যবর্তন সংঘটিত হবে। PQRT পর্যবেক্ষণ পর্দা।



চিত্র ৪.৪ : প্রতিবন্ধকের সরল কিনারায় ব্যবর্তন

এই পর্দার উপর P বিন্দুতে আলোক তরঙ্গের তীব্রতা কী হবে?

ইতিপূর্বে আমরা ফ্রেনেল অর্ধ-পর্যায়ী ফলকের অক্ষের উপর অথবা কোন গোলীয় তরঙ্গের জন্য কোন বিন্দুতে তরঙ্গের তীব্রতা নির্ণয় করতে গিয়ে অর্ধ-পর্যায়ী বলয় কল্পনা করেছি। এক্ষেত্রে তরঙ্গ চোঙাকার বলে গোলীয় প্রতিসাম্য নেই। এ জন্য আমরা সরল কিনারা LQ এর সমান্তরাল অর্ধপর্যায়ী সরু লম্বা ফালি বিবেচনা করব।

ধরা যাক LQ স্লিট S এর দৈর্ঘ্যের সমান। S স্লিটের এক প্রান্তের বিন্দু। এই বিন্দু থেকে নির্গত আলো পর্যবেক্ষণ পর্দার উপর প্রতিবন্ধকের L বিন্দুর ছায়া উৎপাদন করবে। অনুরূপে S স্লিটের সমগ্র অংশ থেকে নির্গত আলো প্রতিবন্ধকের যে ছায়া পর্দার উপর ফেলবে তার প্রান্তরেখা হবে OY। অর্থাৎ OY থেকে নীচের দিকে প্রতিবন্ধকের জ্যামিতীয় ছায়া উৎপন্ন হবে। এ থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে ব্যবর্তনের জন্য পর্দার উপর যে নকশা তৈরি হবে তা OY -এর সমান্তরালভাবে ন্যস্ত হবে। (মনে রাখতে হবে এই নকশা S স্লিটেরই প্রতিবিম্ব।)

অর্ধপর্যায়ী ফালি অঙ্কন করার জন্য OY-কে অক্ষ করে $r_o + \frac{\lambda}{2}, r_o + 2 \times \frac{\lambda}{2}, \ldots . r_o + n\frac{\lambda}{2}$ ব্যাসার্ধের-

চোঙ অঙ্কন করলে চোঙগুলি মুখ্য তরঙ্গতল LAB-কে n-সংখ্যক ফালিতে বিভক্ত করবে। যেমন, প্রথম ফালি LAQ'Q এবং n তম ফালি BB'। অর্ধপর্যায়ী বলয়ের ক্ষেত্রে আমরা দেখেছিলাম বলয়গুলির ক্ষেত্রফল প্রায় ধ্রুবক। কিন্তু এই ফালিগুলির ক্ষেত্রফল n বৃদ্ধির সঙ্গে হ্রাস পায়। ফলে বিভিন্ন অর্ধ-পর্যায়ী ফালি থেকে আগত আলোর পরিমাণ বিভিন্ন হবে। এক্ষেত্রে যদিও পর্দার উপর আলোকের তীব্রতার বণ্টনের বিশ্লেষণ বেশ জটিল, কিন্তু তবুও আমরা এভাবে ভাবতে পারি :

1. O বিন্দুতে মুখ্য তরঙ্গতলের অর্ধাংশ থেকে আলো পৌঁছায়, বাকি অর্ধাংশ প্রতিবন্ধক দ্বারা প্রতিহত হয়।

আমরা জানি সমগ্র তরঙ্গতল থেকে মোট যে বিস্তার তা হ'ল $A = \dfrac{|A_1|}{2} = A_o$ (ধরি)

তা হলে অর্ধাংশ থেকে O বিন্দুতে আলোর বিস্তার $A(O) = \dfrac{A_o}{2}$

এবং তীব্রতা $I(O) = \dfrac{A_o^2}{4} = \dfrac{1}{4} I_o$ ....(8.27)

2. আমরা যদি P বিন্দুকে এমনভাবে গ্রহণ করি যে SP কেবল মুখ্য তরঙ্গতলের প্রথম অর্ধপর্যায়ী ফালিকে বিচ্ছিন্ন করে তবে P বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার

A(P)= প্রথম অর্ধপর্যায়ী ফালির থেকে বিস্তার + তরঙ্গতলের অপর অংশের থেকে বিস্তার।

এখন আমরা জানি প্রথম অর্ধপর্যায়ী ফালির বিস্তার হবে $\dfrac{|A_1|}{2}$, কারণ তরঙ্গমুখ কেবল অর্ধাংশ মুক্ত।

তরঙ্গের বাকি অংশের বিস্তার $\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{|A_1|}{2}\right) = \dfrac{|A_1|}{4}$

$$\therefore A(P) = \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_1|}{4} = A_o + \frac{A_o}{2} = \frac{3}{2} A_o$$

অতএব তীব্রতা হবে

$$I(P) = \frac{9}{4} I_o \qquad ....(8.28)$$

3. যদি P এমন বিন্দু হয় যে SP দুটি অর্ধপর্যায়ী ফালিকে বিচ্ছিন্ন করে তবে

A(P)= প্রথম দুই অর্ধপর্যায়ী ফালি থেকে বিস্তার + তরঙ্গের বাকিঅংশ থেকে বিস্তার।

$$= \left(\frac{|A_1|}{2} - \frac{|A_2|}{2}\right) + \frac{|A_1|}{4}$$

$\dfrac{|A_2|}{2}$ ঋণাত্মক কারণ প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী ফালি সাপেক্ষে দ্বিতীয় ফালি বিপরীত দশায় বর্তমান। স্পষ্টতই এই বিস্তার সর্বনিম্ন এবং P-এর এই অবস্থান সর্বনিম্ন তীব্রতার অবস্থান।

4. আমরা বুঝতে পারছি S'Pযদি অযুগ্ম সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী ফালিকে বিচ্ছিন্ন করে তবে P বিন্দু হবে সর্বোচ্চ তীব্রতার অবস্থান। SP তখনই অযুগ্ম সংখ্যক অর্ধ-পর্যায়ী ফালি বিচ্ছিন্ন করবে যখন

$$LP - BP = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

হবে, যেখানে $n = 0,1,2,.....$

কিন্তু $LP - BP = SL + LP - (SL + BP)$

$$= SL + LP - (SB + BP)$$

$$= SL + LP - SP$$

$$\therefore SL + LP - SP = (2n+1)\frac{\lambda}{2} \qquad ....(8.29)$$

ধরি $SL = d,\ LP = \left(z^2 + r_o^2\right)^{\frac{1}{2}} = r_o\left(1 + \frac{z^2}{r_o^2}\right)^{\frac{1}{2}}$

$$\therefore LP = r_o\left(1 + \frac{1}{2}\frac{z^2}{r_o^2}\right)$$

আবার $SP = \left(SO^2 + OP^2\right)^{\frac{1}{2}} = \left\{(d + r_o)^2 + z^2\right\}^{\frac{1}{2}}$

$$= (d + r_o)\left\{1 + \frac{z}{(d + r_o)^2}\right\} = (d + r_o)\left\{1 + \frac{z^2}{2(d + r_o)^2}\right\}$$

$\therefore$(8.27) থেকে পাই

$$d + r_o + \frac{z^2}{2r_o} - (d + r_o) - \frac{z^2}{2(d + r_o)} = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{z^2}{2}\left\{\frac{1}{r_o} - \frac{1}{d + r_o}\right\} = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow z^2\left(\frac{d}{r_o(d + r_o)}\right) = (2n+1)\lambda$$

$$\therefore z^2 = \frac{r_o(d+r_o)}{d}(2n+1)\lambda$$

অর্থাৎ P বিন্দুতে চরম তীব্রতা পাওয়া যাবে যদি

$$z = \sqrt{\frac{r_o(d+r_o)}{d} \times (2n+1)\lambda} \qquad \text{.................(8.30)}$$

অবম তীব্রতার জন্য

$$z = \sqrt{\frac{2r_o(d+r_o)n\lambda}{d}} \qquad \text{.................(8.31)}$$

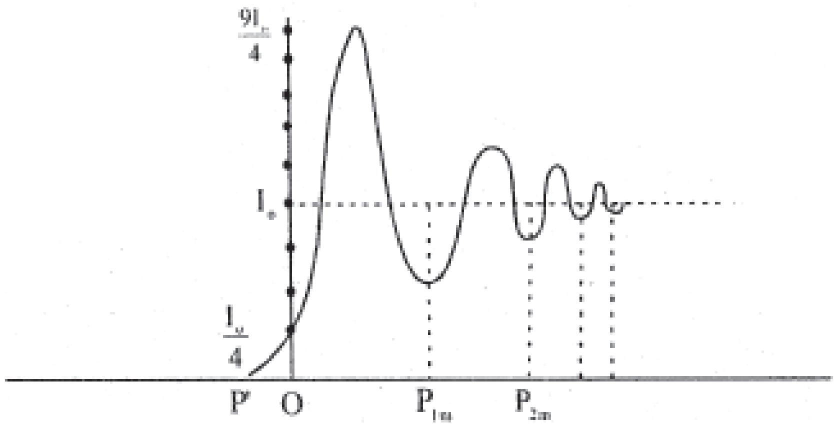
অর্থাৎ সরল কিনারা থেকে অবম তীব্রতার দূরত্ব ধণাত্মকপূর্ণ সংখ্যার বর্গমূল। এর অর্থ অবম তীব্রতাগুলির ব্যবধান ক্রমহ্রাসমান হবে।

তীব্রতা বন্টনের লেখ চিত্র

আমরা দেখেছি O বিন্দুতে তীব্রতা (সমীকরণ 8.25)

$$I(O) = \frac{1}{4}I_o$$

অর্থাৎ প্রতিবন্ধকের ছায়ার কিনারায় তীব্রতার মান সমগ্র উন্মুক্ত তরঙ্গতলের তীব্রতার এক চতুর্থাংশ। কিন্তু ছায়ার মধ্যে তীব্রতা সম্পূর্ণ শূন্য নয়। কিছু দূর পর্যন্ত সামান্য আলোক পাওয়া যায়। এর কারণ অবারিত তরঙ্গতল থেকে কিছু আলো ব্যবর্তন হেতু ছায়ার মধ্যে গমন করে। আবার ছায়ার উপর $z > 0$ হলে, তীব্রতা বৃদ্ধি পেয়ে $\frac{9}{4}I_o$ হয়। আবার তীব্রতা হ্রাস পেয়ে $\left\{\left(\frac{A_1}{2} - \frac{A_2}{2}\right) + \frac{A_1}{4}\right\}^2$ হয় যা $\frac{9}{4}I_o$ থেকে অনেকটা কম। আবার আমরা দেখেছি এই অবম মানগুলির মধ্যে দূরত্ব হ্রাস পেতে থাকে।



চিত্র 8.9 : সরল কিনারায় ব্যবর্তনের তীব্রতা বন্টন

P_{1m}, P_{2m} ...ইত্যাদি অবম তীব্রতাগুলি ক্রমশ নিকটতর।

সংখ্যাগত প্রশ্ন

2. যদি উৎস থেকে প্রতিবন্ধকের দূরত্ব 50 সেমি এবং পর্দার দূরত্ব 100 সেমি হয়, তবে $\lambda = 6 \times 10^{-5}$ সেমি হলে ছায়ার প্রান্ত থেকে প্রথম তিনটি অবম অবস্থান নির্ণয় করুন।

সমাধান। (8.31) সমীকরণ থেকে অবম অবস্থানের দূরত্ব $z = \sqrt{\dfrac{2(r_o + d)r_o n\lambda}{d}}$ এখানে d=50 সেমি, $r_o = 100$ সেমি। অতএব

$$z_1 = \sqrt{\frac{2 \times 150 \times 100 \times 1 \times 6 \times 10^{-5}}{50}} \approx 0.2 \text{ সেমি } = 2 \text{ মিমি}$$

$$z_2 = \sqrt{2}z_1 = 2.83 \text{মিমি}$$

$$z_3 = \sqrt{3}z_1 = 3.46 \text{মিমি}$$

$z_2 - z_1 = 0.83$ মিমি, $z_3 - z_2 = 0.63$ মিমি অর্থাৎ অবমগুলির ব্যবধান ক্রমহ্রাসমান।

সংক্ষিপ্ত উত্তরধর্মী প্রশ্ন

2. একটি রৈখিক আলোক উৎসের সমান্তরালে একটি সরু তার সেটির সম্মুখে রাখা হল। অপর পার্শ্বে পর্দার উপর আলোর তীব্রতা বন্টন কীরূপ হবে?

8.4 সারাংশ

এই এককে আপনারা যা জেনেছেন :

* হাইগেনস-ফ্রেনেল নীতি : প্রতিটি মুখ্য তরঙ্গমুখ থেকে একই দশায় গৌণ তরঙ্গিকা নির্গত হয় এবং তরঙ্গ মুখের সম্মুখে কোন বিন্দুতে আলোক ক্ষেত্রের বিস্তার ঐ সমস্ত গৌণ তরঙ্গিকার উপরিপাতের ফলে গঠিত হয়।

* তির্যকগুণক- আলোক ক্ষেত্রের কোন বিন্দুতে তীব্রতা তরঙ্গমুখের লম্বের সঙ্গে বিন্দুটির অভিমুখ যে কোণ করে তার উপর নির্ভর করে। তির্যক গুণক $Q(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta)$ দ্বারা মূল অভিমুখের বিস্তারকে গুণ করলে তির্যক কোণ θ অভিমুখের বিস্তার পাওয়া যাবে।

* ফ্রেনেল অর্ধপর্যায়ী বলয় অঙ্কনের দ্বারা তরঙ্গের সম্মুখের কোন বিন্দুতে বিস্তার নির্ণয় করেন। যদি $A_1, A_2, A_3 \ldots\ldots A_n$ হয় যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয়, প্রভৃতি অর্ধপর্যায়ী বলয় থেকে আগত গৌণ তরঙ্গিকাগুলির বিস্তার তবে ঐ বিন্দুর লব্ধিবিস্তার হবে

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \ldots\ldots\ldots\ldots + A_n$$
$$= |A_1| - |A_2| + |A_3| + \ldots\ldots\ldots\ldots \pm |A_n|$$

কারণ পরপর বলয়ের গৌণ তরঙ্গিকা বিপরীত দশায় থাকে।

* বলয় ফলক বা জোন প্লেট যার উপর প্রতিটি অর্ধপর্যায়ী বলয়ের ক্ষেত্রফল প্রায় ধ্রুবক এবং $\sqrt{\pi r_0 \lambda}$ এর সমান।

* ব্যবর্তন সত্ত্বেও আলোকের সরলরেখায় গমনের ব্যাখ্যা।

* গোলীয় উন্মেষে ফ্রেনেল ব্যবর্তন এবং জেনেছেন সম্মুখস্থ বিন্দুর দূরত্বের উপর নির্ভর ক'রে একই ক্ষেত্রফলযুক্ত উন্মেষ বিভিন্ন সংখ্যক অর্ধ-পর্যায়ী বলয় অতিক্রম করায়,

* সরলকিনারায় ফ্রেনেল ব্যবর্তন ব্যাখ্যা করার জন্য অর্ধ-পর্যায়ী ফালির ধারণা। জ্যামিতিক ছায়ার প্রান্ত থেকে সর্বনিম্ন তীব্রতার কোন বিন্দুর দূরত্ব $z = \sqrt{\dfrac{2r_0(d + r_0)n\lambda}{d}}$ যা থেকে ধারণা করা যায় যে সর্বনিম্ন তীব্রতার বিন্দু বা রেখাগুলি ক্রমাগত নিকটতর হয়।

8.5 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

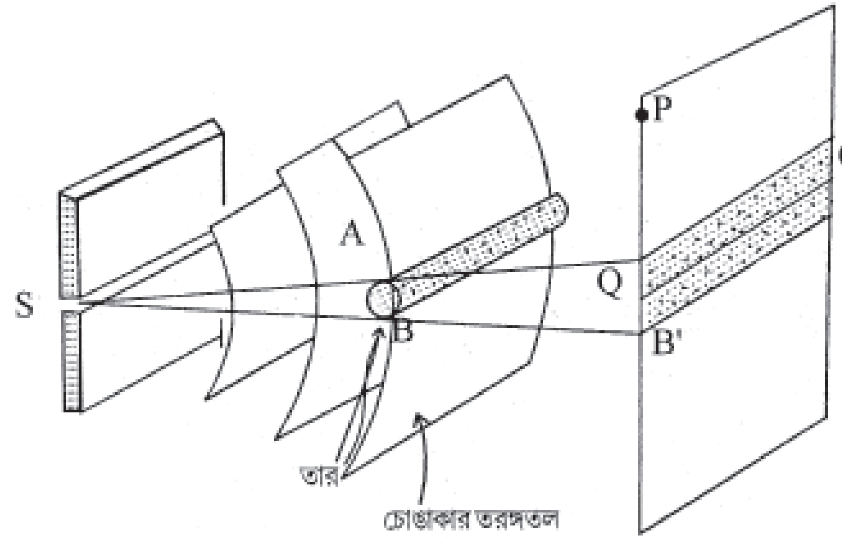
1. যদি কোন তরঙ্গতল m সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী বলয়ে বিভক্ত হয় তবে প্রমাণ করা যায় কোন বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার হবে

$$A = \frac{|A_1|}{2} + \frac{|A_m|}{2}$$

যখন m অযুগ্ম। প্রমাণ করুণ যখন m যুগ্ম তখন $A = \dfrac{|A_1|}{2} - \dfrac{|A_m|}{2}$

2. ক্রিপটন আয়রণের একগুচ্ছ সমান্তরাল তরঙ্গের দৈর্ঘ্য ($\lambda = 568.19\text{nm}$) লম্বভাবে একটি বৃত্তীয় উন্মেষের উপর আপতিত হয়। সমাক্ষীয় একটি 1 মিটার দূরের বিন্দু থেকে দেখা গেল যে উন্মেষের মধ্য দিয়ে কেবল প্রথম অর্ধপর্যায়ী বলয় নির্গত হয়। উন্মেষের ব্যাস নির্ণয় করুন।

3. যদি কোন বলয় ফলকের (zone plate) মুখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্য $\lambda = 6000\,\text{Å}$ আলোর ক্ষেত্রে 6 মিটার হয় তবে বিভিন্ন বলয়ের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করুন। $\lambda = 5000\,\text{Å}$ আলোর ক্ষেত্রে এই ফোকাস দৈর্ঘ্য কত হবে? প্রথম গৌণ ফোকাস দৈর্ঘ্যই বা কত হবে?



S উৎসের জন্য PQ পর্দার উপর AB তারের জ্যামিতিক ছায়া A'B'। অতএব সরল কিনারায় ব্যবর্তনের মত এখানেও A'B' ছায়ার উপরে এবং নীচে ব্যবর্তন নকশা গঠিত হবে যার ফালি গুলি AB তারের দৈর্ঘ্যের সমান্তরাল হবে। আবার A'B' ছায়ার কেন্দ্রীয় রেখা QQ' এর উপর মুখ্য তরঙ্গতল থেকে সমান দশায় আলোক তরঙ্গ এসে পৌছাবে। তাই এখানে উজ্জ্বলরেখা পাওয়া যাবে। এবং এই রেখার উভয় পার্শ্বে ব্যবর্তন ফ্রিঞ্জ গঠিত হবে।

8.6 উত্তরমালা

1. যদি $A_1, A_2, A_3 \ldots\ldots\ldots A_n$ কোন বিন্দুতে মুখ্য তরঙ্গতলের প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয়...m তম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের জন্য বিস্তার হয় তবে ঐ বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \ldots\ldots\ldots + A_m$$

$$= |A_1| - |A_2| + |A_3| - \ldots\ldots\ldots \pm |A_m|$$

পর পর বিস্তারগুলি বিপরীত দশায় বলে এরা বিপরীত চিহ্নযুক্ত। m যুগ্ম হলে

$$A = |A_1| - |A_2| + |A_3| \ldots\ldots\ldots - |A_m|$$

$$= a_1 - a_2 + a_3 - \ldots\ldots\ldots - a_m$$

যেখানে $a_1 = |A_1|$, $a_2 = |A_2|$... ইত্যাদি।

$$\therefore A = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2}\right) + \left(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2}\right) + \ldots\ldots + \left(\frac{a_{m-3}}{2} - a_{m-2} + \frac{a_{m-1}}{2}\right) + \frac{a_{m-1}}{2} - a_m$$

এখন $\frac{a_1+a_3}{2} \simeq a_2,\ \frac{a_3+a_5}{2} \approx a_4,$ ইত্যাদি।

1. আমরা জানি কোন উৎসের সম্মুখে কোন বিন্দুতে আলোক ক্ষেত্রের বিস্তার

$$A = \frac{|A_1|}{2} \pm \frac{|A_n|}{2}$$

যেখানে $A_n = n$ অর্ধ-পর্যায়ী বলয়াগত তরঙ্গের বিস্তার, যেখানে $n = 1, 2, 3 \ldots$ যদি n খুব বড় হয় তবে $|A_1| >> |A_n|$ অতএব লেখা যায়

$$A = \frac{|A_1|}{2}$$

অর্থাৎ কোন বিন্দুতে আলোকক্ষেত্রের বিস্তার উন্মুক্ত প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের বিস্তারের অর্ধেক। তাই যদি কোন বৃত্তীয় প্রতিবন্ধক কোন উৎসের সম্মুখে স্থাপন করা হয় এবং সেটি তরঙ্গতলের P সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী বলয় আবৃত করে তবে প্রথম উন্মুক্ত বলয়ের বিস্তার অবদান $|A_{p+1}|$। অতএব বৃত্তাকার প্রতিবন্ধকের সমাক্ষীয় যে বিন্দু সাপেক্ষে প্রতিবন্ধক P সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী বলয় আবৃত করবে সেই বিন্দুর তরঙ্গ বিস্তার হবে $\frac{|A_{p+1}|}{2}$। অতএব ঐ বিন্দুতে উজ্জ্বল তীব্রতা আশা করা যায়।

একটি গুণগত পর্যালোচনা

ধরা যাক অক্ষের উপর দুটি বিন্দুর দূরত্ব r_p ও r_q এবং অনচ্ছ বৃত্তাকার পর্দা ঐ বিন্দুদ্বয়ের সাপেক্ষে p ও q সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী বলয় আবৃত করে। এখন p ও q তম বলয়ের ব্যাসার্ধ

$$a_p^2 = pr_p\lambda \quad \text{এবং} \quad a_q^2 = qr_q\lambda$$

কিন্তু $a_p^2 = a_q^2$ অতএব $pr_p\lambda = qr_q\lambda$

বা $\frac{p}{q} = \frac{r_q}{r_p}$

যদি $r_q > r_p$ হয় তবে $p > q$ অর্থাৎ $A_{q+1} > A_{p+1}$ অতএব যে বিন্দুর দূরত্ব বেশি সেই বিন্দুর উজ্জ্বলতা বেশি।

$$\therefore A = \frac{a_1}{2} + \frac{a_{m-1}}{2} - a_m$$

$$= \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_{m-1}}{2} - \frac{a_m}{2}\right) - \frac{a_m}{2}$$

$$\simeq \frac{a_1}{2} - \frac{a_m}{2}$$

$$\therefore A = \frac{|A_1|}{2} - \frac{|A_m|}{2}$$

2. n তম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের ব্যাসার্ধ a_n হলে

$$a_n^2 = \left(r_o + n\frac{\lambda}{2}\right)^2 - r_o^2$$

$$\approx n r_o \lambda$$

অতএব প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়ের ব্যাস

$$d = 2a_1 = 2\sqrt{r_o\lambda}, \quad r_o = 1 \text{ মি}$$

$$= 2\sqrt{1 \times 568.19 \times 10^{-9}} \text{ মি.}$$

$$= 15 \times 10^{-4} = 1.5 \text{ মিমি}$$

যেহেতু বৃত্তীয় উন্মেষের মধ্য দিয়ে কেবলমাত্র প্রথম অর্ধ-পর্যায়ী বলয়কে অতিক্রম করতে পারে তাই, উন্মেষের ব্যাস =1.5 মিমি।

3. কোন অর্ধ-পর্যায়ী বলয়-ফলকের n তম বলয়ের ব্যাসার্ধ $a_n = \sqrt{n r_o \lambda}$, r_o = মুখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্য =6 মি.

$$\therefore a_n = \sqrt{6 \times 6000 \times 10^{-8}}\sqrt{n} = 6\sqrt{n} \times \sqrt{10^{-5}}$$

$$= 1.9 \times 10^{-2}\sqrt{n} \text{ সেমি}$$

$$= 0.19\sqrt{n} \text{ মিমি}$$

$\therefore a_1 = 0.19$ মিমি $a_2 = 0.269$ মিমি, $a_3 = 0.329$ মিমি, $\lambda = 5 \times 10^{-5}$ সেমি হলে মুখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্য

$$f_1 = r_0 = \frac{a_n^2}{n\lambda} = \frac{0.19 \times 10^{-1}}{1 \times 5 \times 10^{-5}} \text{ সেমি}$$

$=.038 \times 10^4$ সেমি $= 38$ মি

প্রথম গৌণ ফোকাস দৈর্ঘ্য $= \frac{f_1}{3} = 12.67$ মি

8.7 পাঠ নির্দেশ

1. Optics, 2nd edition, Ajoy Ghatak, Tata Megraw-Hill Publishing Company Ltd. New Delhi.
2. Optics, 2nd edition, by Engene Hecht, Addison Wesley Publishing Company.
3. Light - R.W. Ditchburn, Blackie & Son Ltd. London.
4. Geometrical and Physical Optics R.S. Longhurst, Orient Longman

পর্যায়—২

একক 9 ❑ আলোকের সমবর্তন

9.1 প্রস্তাবনা

এই পাঠক্রমের প্রথম পর্যায়ে আপনি আলোকের ব্যতিচার ও ব্যবর্তন সম্বন্ধে বিশদ্‌ভাবে পড়েছেন। এই ঘটনাগুলি আলোকের তরঙ্গ প্রকৃতিকে প্রতিষ্ঠিত করলেও এগুলি থেকে আলোকতরঙ্গ অনুদৈর্ঘ্য না অনুপ্রস্থ তা বোঝা যায় না। অথচ আপনি জানেন যে ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী আলোকতরঙ্গ আসলে তড়িৎক্ষেত্রের তরঙ্গ এবং এই তরঙ্গে তড়িৎক্ষেত্রটি সঞ্চারের দিকের সঙ্গে অভিলম্ব থাকে। তড়িৎক্ষেত্রটি যখন কোন নির্দিষ্ট তলে আবদ্ধ থাকে বা তড়িৎক্ষেত্রের নির্দেশক ভেকটরটি যখন একটি বৃত্ত বা উপবৃত্ত রচনা

করে, তখনই পরীক্ষার মাধ্যমে আলোকতরঙ্গের অনুপ্রস্থ রূপটি ধরা পড়ে এবং ঐ ঘটনাকে আমরা আলোকের সমবর্তন বলি। আপনি হয়ত অনুমান করতে পারছেন যে আলোকের মত অন্যান্য তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গেরও সমবর্তন ঘটতে পারে। এটি সত্য হলেও এখানে আমরা কেবলমাত্র দৃশ্যমান আলোকের সমবর্তনের মধ্যেই আমাদের আলোচনা সীমাবদ্ধ রাখব।

সমবর্তিত আলোর উৎপাদন ও বিশ্লেষণের নানা পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে। সমবর্তিত আলোর বেশ কিছু প্রয়োগও আমাদের চোখে পড়ে। এই এককে আপনি সমবর্তিত আলোর কিছু প্রয়োগের সঙ্গেও পরিচিত হবেন।

এর পরের এককে আপনি আলোকীয় ঘূর্ণন (optical rotation) সম্বন্ধে পড়বেন। ঐ বিষয়টি বুঝতেও বর্তমান এককটি অপরিহার্য।

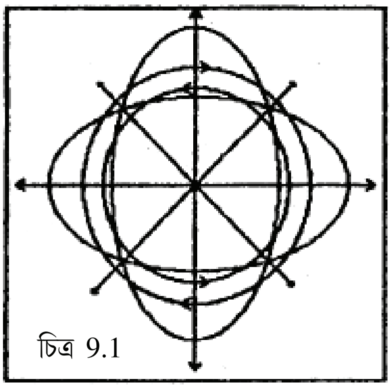
উদ্দেশ্য

এই এককটি পড়ার পর আপনি যে কাজগুলি করতে সমর্থ হবেন সেগুলি হল ঃ

- আলোকের সমবর্তন কী এবং রৈখিক, বৃত্তীয় ও উপবৃত্তীয় সমবর্তন কাকে বলে তা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বিভিন্ন ধরনের সমবর্তনের গাণিতিক রূপ লিখতে পারবেন এবং কোন একটি আলোকতরঙ্গের গাণিতিক রূপ থেকে তার সমবর্তনের প্রকৃতি চিনে নিতে পারবেন।
- রৈখিক সমবর্তিত আলোক উৎপাদনের তিনটি নির্দিষ্ট পদ্ধতি বর্ণনা করতে পারবেন।
- রৈখিক সমবর্তিত আলোককে বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয় সমবর্তিত আলোকে রূপান্তরণের উপায় ব্যাখ্যা করতে পারবেন এবং
- যে কোন আলোকে বিশ্লেষণ করে তার সমবর্তনীয় প্রকৃতি কীভাবে নিরূপণ করা যায় তা বিবৃত করতে পারবেন।

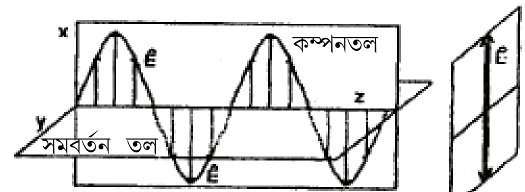
9.2 সমবর্তন কাকে বলে?

আপনি আগেই জেনেছেন যে আলোক তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। আলোকতরঙ্গের প্রকৃতি অনুপ্রস্থ। অর্থাৎ কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্র $(\vec{E})$ এবং চৌম্বকক্ষেত্র $(\vec{B})$ ভেক্টরদুটি তরঙ্গের গতিপথের সঙ্গে অভিলম্বে থাকে।

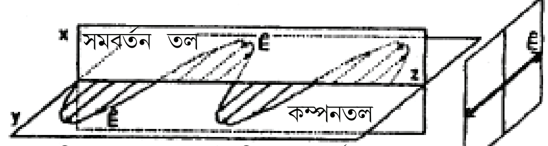


চিত্র 9.1

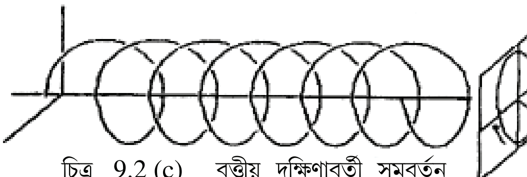
এই ভেক্টরদুটি নিজেরাও পরস্পর সমকোণে থাকে। আলোকের উৎস অগণিত অনু-পরমাণু দিয়ে গঠিত এবং সেগুলি পৃথক পৃথক অসম্পর্কিত উৎস হিসাবে কাজ করে। এই উৎসগুলি থেকে বিকীর্ণ আলোতে কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্র ক্ষণে ক্ষণে দিক পরিবর্তন করে। ফলে পরীক্ষার দ্বারা এই তরঙ্গের অনুপ্রস্থ চরিত্র বোঝা যায় না। এজন্য সাধারণ উৎস থেকে নির্গত আলোকে অসমবর্তিত (unpolarised) বলা হয়। আপনি যদি একটি অসমবর্তিত আলোকরশ্মির তড়িৎক্ষেত্রটিকে সামনে থেকে পর্যবেক্ষণ করতে পারতেন তবে লক্ষ্য করতেন যে তড়িতীয় ভেক্টরের প্রান্তবিন্দুটি কখনও একটি উপবৃত্ত, কখনও বৃত্ত আবার কখনও একটি সরলরেখা রচনা করছে। 9.1 চিত্রে আপনি প্রান্তবিন্দুটির কয়েকটি পথরেখা দেখতে পারেন।



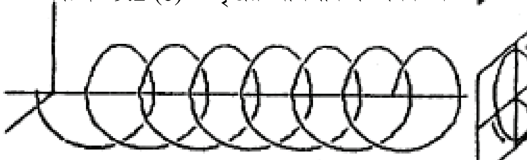
চিত্র 9.2 (a) রৈখিক সমবর্তন



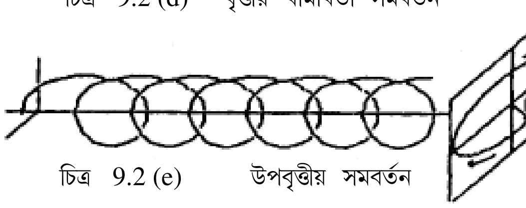
চিত্র 9.2 (b) রৈখিক সমবর্তন



চিত্র 9.2 (c) বৃত্তীয় দক্ষিণাবর্তী সমবর্তন



চিত্র 9.2 (d) বৃত্তীয় বামাবর্তী সমবর্তন



চিত্র 9.2 (e) উপবৃত্তীয় সমবর্তন

নানাপ্রকার ভৌত উপায়ে অসমবর্তিত আলোকের তড়িৎক্ষেত্রের উপর কিছু শর্ত আরোপ করে ঐ আলোকে সমবর্তিত আলোকে রূপান্তরিত করা যায়। দেখা যাক কতভাবে তড়িৎক্ষেত্রটির উপর শর্ত আরোপ করা যায়।

(ক) তড়িৎক্ষেত্রটি যদি একটি নির্দিষ্ট তলে আবদ্ধ থাকে তবে আলোকরশ্মির গতপথের অভিলম্ব তলে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরের প্রান্তবিন্দুটিকে সর্বদাই একটি নির্দিষ্ট সরলরেখায় থাকতে দেখা যাবে। 9.2(a) ও (b) চিত্রে আপনি এই অবস্থাটি দেখতে পাবেন। এখানে Z-অক্ষ বরাবর সঞ্চরমান তরঙ্গে কোন মুহূর্তে তড়িতীয় ভেক্টরের প্রান্তবিন্দুগুলি যে বক্ররেখার উপর থাকে সেটিকেই দেখানে হয়েছে। আলোকরশ্মিটির এখন

রৈখিক সমবর্তন (linear polarization) ঘটেছে বলা হয়। তড়িৎক্ষেত্র যে তলে আবদ্ধ থাকে তাকে কম্পনতল (plane of vibration) এবং তার লম্বতলকে সমবর্তন তল (plane of polarization) বলা হয়।

(খ) তড়িতীয় ভেক্টরের প্রান্তবিন্দুটি যদি একটি বৃত্ত রচনা করে তবে আলোকরশ্মির সমবর্তনকে বৃত্তীয় (circular) বলা হয়। বৃত্তীয় সমবর্তনের ক্ষেত্রে দর্শক উৎসের দিকে তাকালে তিনি যদি তড়িতীয় ভেক্টরকে ঘড়ির কাঁটার মত ঘুরতে দেখেন, তবে ঐ আলোকের দক্ষিণাবর্তী বৃত্তীয় (right circular) ও ঘড়ির কাঁটার বিপরীতে ঘুরতে দেখলে বামাবর্তী বৃত্তীয় (left circular) সমবর্তন ঘটেছে বলে ধরা হয়। 9.2 (c) ও (d) চিত্র দুটিতে এই দুই অবস্থা দেখতে পাবেন।

(গ) প্রান্তবিন্দুর পথরেখাটি সরলরেখা বা বৃত্ত না হয়ে একটি উপবৃত্তও হতে পারে। 9.2(e) চিত্রে এই অবস্থাটি দেখানো হয়েছে। এক্ষেত্রে আলোকের সমবর্তনকে আমরা উপবৃত্তীয় (elliptical) বলি।

সমবর্তিত তরঙ্গের রূপটি বোঝার জন্য আপনি একটি সহজ পরীক্ষা করে দেখতে পারেন। একটি লম্বা মোটা দড়ির একপ্রান্ত হাতে ধরে অন্য প্রান্তটি ঝুলিয়ে দিন। আপনাকে এর জন্য সিঁড়িতে বা বারান্দায় দাঁড়াতে হতে পারে। এবার দড়ির উপরের প্রান্তটি দ্রুত ডাইনে বাঁয়ে আন্দোলিত করলে দড়িটি বেয়ে উপর থেকে নীচে রৈখিকভাবে সমবর্তিত তরঙ্গ যেতে দেখবেন।

এবার আমরা দেখব সমবর্তিত আলোকতরঙ্গকে কীভাবে গাণিতিক রূপে প্রকাশ করা যায়।

9.3 সমবর্তিত তরঙ্গের গাণিতিক রূপ

ধরে নিন একটি আলোকতরঙ্গ সমকোণী কার্টেজীয় নির্দেশতন্ত্রে z-অক্ষ বরাবর অগ্রসর হচ্ছে। তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্রটি অনুপ্রস্থ হওয়ায় সেটি x-y তলে আবদ্ধ থাকবে। তবে কোন z-উপাংশ থাকবে না। তড়িৎক্ষেত্রের x-y উপাংশগুলি লেখা যায় ঃ

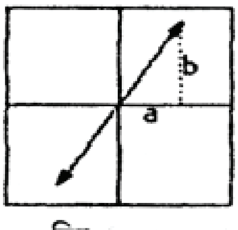
$E_x(z, t) = a \cos(kz - \omega t)$ 9.1

ও $Ey(z, t) = b\cos(kz - \omega t + \varphi)$ 9.2

লক্ষ্য করুন E_x ও E_y দুটির রাশিমালাই $+z$ দিকে সঞ্চারিত তরঙ্গ বোঝাচ্ছে। উভয়ের ক্ষেত্রেই কম্পাঙ্ক $v = \omega/2\pi$ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda = 2\pi/k$, অর্থাৎ আমরা একবর্ণী আলোর তরঙ্গই বিবেচনা করছি যার বেগ $v = v\lambda = \omega/2\pi \times 2\pi/k = \omega/k$ ......9.3 তবে তড়িৎক্ষেত্রের উপাংশদুটির বিস্তার a ও b ভিন্ন এবং তাদের মধ্যে দশার প্রভেদ φ। এখন আমরা দেখব a, b ও φ এর বিভিন্ন মানের জন্য যে কোন x-y তলে $\vec{E}$ ভেক্টরটি কী ধরণের লেখ রচনা করে।

(i) $\phi = 0$;

এক্ষেত্রে $E_y / E_x = b/a$ অর্থাৎ $\hat{E}$ ভেক্টরটি এমন একটি সরলরেখায় থাকবে যেটি x অক্ষের সঙ্গে $\tan^{-1}\frac{b}{a}$ কোণ রচনা করে। সহজেই বোঝা যায় যে আলোকরশ্মিটি এক্ষেত্রে রৈখিকভাবে সমবর্তিত হয়েছে (চিত্র 9.3 (a))। ϕ এর মান π এর যুগ্ম গুণিতক, অর্থাৎ $2n\pi$ ($n=$ পূর্ণসংখ্যা) হলে সমবর্তনের প্রকৃতি একই থাকে।



চিত্র **9.3 (a)**

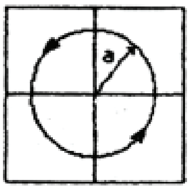
তবে $\varphi = (2n+1)\pi$ হলে $E_y = -b\cos(k_z - \omega t)$ হবে। সেক্ষেত্রে $E_y / E_x = -b/a$। অর্থাৎ $\hat{E}$ ভেক্টরের রেখা x অক্ষের সঙ্গে $-\tan^{-1}\frac{b}{a}$ কোণে আনত থাকবে।

(ii) $\varphi = 90^0$; $a = b$;

অর্থাৎ $E_y(z,t) = -b\sin(k_z - \omega t) = -a\sin(k_z - \omega t)$ 9.4

9.1, 9.4 সমীকরণ দুটির মধ্যে সময় t কে অপনয়ন করলে,

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2$$



চিত্র **9.3 (b)**

এই সমীকরণটি আপনি নিশ্চই a ব্যাসার্ধের বৃত্তের সমীকরণ বলে চিনতে পারছেন। অর্থাৎ $\hat{E}$ ভেক্টরের প্রান্ত বিন্দুটি এক্ষেত্রে বৃত্ত রচনা করছে এবং আলোকরশ্মির বৃত্তীয় সমাবর্তন ঘটেছে (চিত্র 9.3 (b))

এখন প্রশ্ন, 9.1 ও 9.2 সমীকরণ দুটি যে বৃত্তীয় সমবর্তন নির্দেশ করছে তা দক্ষিণাবর্তী না বামাবর্তী? এটি গাণিতিকভাবে নির্ণয় করা যাক।

আমরা লিখতে পারি : $\hat{E} = \hat{i}E_x + \hat{j}E_y = \hat{i}a\cos(k_z - \omega t) - \hat{j}a\sin(k_z - \omega t)$

সুতরাং $\frac{d}{dt}\hat{E} = \hat{i}a\omega\sin(k_z - \omega t) + \hat{j}a\omega\cos(k_z - \omega t)$

এবং $\hat{E} \times \frac{d}{dt}\hat{E} = \hat{k}a^2\omega\left[\cos^2(k_z - \omega t) + \sin^2(k_z - \omega t)\right] = \hat{K}a^2\omega$

(এখানে আমরা $\hat{i}\times\hat{i} = \hat{j}\times\hat{j} = 0,$ এবং $\hat{i}\times\hat{j} = -\hat{j}\times\hat{i} = \hat{k},$ নিয়মগুলি ব্যবহার করেছি।)

লক্ষ্য করুণ $\hat{E}\times\frac{d}{dt}\hat{E}$ ক্রস গুণফলটি $\hat{k}$ অর্থাৎ z অক্ষ অভিমুখী। এর অর্থ $\hat{E}$ ভেক্টরটি x অক্ষ থেকে y অক্ষের দিকে ঘুরে যাচ্ছে এবং আলোকের বামাবর্তী সমাবর্তন ঘটেছে। আপনি $\varphi = -90^\circ$ ধরে দেখাতে পারেন যে সেক্ষেত্রে আলোক রশ্মির সমবর্তন বৃত্তীয় এবং দক্ষিণাবর্তী হবে।

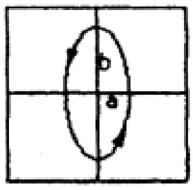
(iii) $\varphi = 90^\circ, a \neq b;$

এক্ষেত্রে 9.4 সমীকরণের পরিবর্তে আমরা পাই

$E_y(z,t) = -b\sin(kz - \omega t)$ 9.5

9.1 ও 9.5 সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$E_x^2/a^2 + E_y^2/b^2 = 1$



চিত্র **9.3 (c)**

যেটি একটি উপবৃত্তের সমীকরণ। a ও b এই উপবৃত্তের দুই অর্ধাক্ষ । এক্ষেত্রে সমবর্তনটি উপবৃত্তীয় এবং তার প্রকৃতি বামাবর্তী। **চিত্র** 9.3 ।

iv) ϕ এর মান অনির্দিষ্ট, $a \neq b$ ।

এখন আমরা 9.1 ও 9.2 সমীকরণ থেকে সরাসরি t কে অপনীত করব। ধরে নেওয়া যাক $z = 0$।

$\therefore E_x = a\cos\omega t$
$E_y = b\cos(\omega t - \varphi) = b[\cos\omega t\cos\varphi + \sin\omega t\sin\varphi]$

$$= \frac{E_x}{a}b\cos\varphi + \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{a}\right)^2}\,b\sin\varphi$$

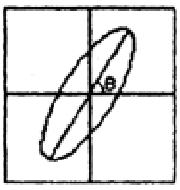
$$\therefore \left[E_y - \frac{E_x}{a} b\cos\varphi\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{E_x}{a}\right)^2\right] b^2 \sin^2\varphi$$

বা সরল ক'রে $\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} - 2\frac{E_x E_y}{ab}\cos\varphi = \sin^2\varphi$ 9.6

9.6 সমীকরণটির লেখচিত্র কেমন হবে বলে আপনার মনে হয়? এটি আসলে একটি উপবৃত্তের সমীকরণ, যার অক্ষগুলি x ও y অক্ষের সঙ্গে একটি কোণে আনত রয়েছে। এই কোণটি যদি θ হয়, তবে

$$\tan 2\theta = \frac{2ab\cos\theta}{a^2 - b^2} \qquad \text{... 9.7}$$

9.3 (d) চিত্র থেকে আপনি লেখচিত্রের চরিত্রটি বুঝতে পারবেন।



চিত্র 9.3(d)

বিভিন্ন ধরণের সমবর্তিত আলোকের গাণিতিক রূপগুলি জানতে পারলেন। এবার একটি সহজ অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী 1. ধরা যাক x ও y অক্ষ বরাবর তড়িৎক্ষেত্রের উপাংশগুলি যথাক্রমে $E_x = E_0 \sin(\omega t + k_z)$, $E_y = E_0 \cos(\omega t + k_z)$ আলোক তরঙ্গের সমবর্তন কী ধরণের হবে?

9.4 রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোক উৎপাদনের পদ্ধতি

যে কোন সাধারণ উৎস থেকে আমরা যে আলো পাই তা অসমবর্তিত আলো। সমবর্তিত আলোক উৎপাদন করতে হলে প্রথমে অসমবর্তিত আলোকরশ্মিকে রৈখিকভাবে সমবর্তিত রশ্মিতে রূপান্তরিত করতে হয়। এজন্য একটি নির্দিষ্ট তলে আলোকরশ্মির তড়িৎক্ষেত্রকে অপরিবর্তিত রেখে তড়িৎক্ষেত্রের অভিলম্ব উপাংশটিকে কোন উপায়ে শোষিত বা বিচ্যুত করতে হয়। রৈখিকভাবে সমবর্তিত রশ্মিকে সহজেই বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত রশ্মিতে রূপান্তরিত করা যায়। আগের অনুচ্ছেদের (i) অংশে আপনি দেখেছেন যে রৈখিক সমবর্তনের ক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্রের দুই বাষ্পনশীল উপাংশের মধ্যে যে দশা প্রভেদ থাকে তা π এর গুণিতক হয়। এই দুই উপাংশের মধ্যে একটি বাড়তি দশাপ্রভেদ সৃষ্টি করে আলোকরশ্মির রৈখিক সমবর্তনকে বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয় সমবর্তনে পরিণত করা যায়।

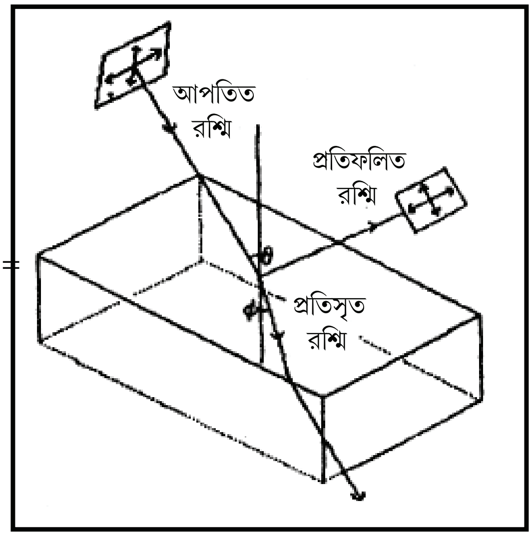
আমরা এই অনুচ্ছেদের রৈখিক সমবতর্ন উৎপাদনের পদ্ধতিগুলি আলোচনা করব। অসমবর্তিত আলোকে রৈখিকভাবে সমবর্তিত করতে প্রধানত তিনটি উপায় অবলম্বন করা যায়। এগুলি হল ঃ

- প্রতিফলনের দ্বারা
- দ্বৈধ প্রতিসরনের (double refraction) দ্বারা,
- দ্বিবর্ণী (dichroic) কেলাসের সাহায্যে।

দেখা যাক এই তিনটি পদ্ধতির মূলনীতিগুলি কি।

9.4.1 প্রতিফলনের দ্বারা রৈখিক সমবর্তন ঃ

ধরা যাক অসমবর্তিত আলোর একটি রশ্মি বায়ু থেকে n প্রতিসরাঙ্কের একটি অন্তরক (dielectric) পদার্থের উপর আপতিত হল (চিত্র 9.4)। চিত্রে θ এবং φ যথাক্রমে আপতন কোণ ও প্রতিসরণ কোণ। আপতন তলে এবং তার অভিলম্ব দিকে আপতিত রশ্মির তড়িৎক্ষেত্রের উপাংশগুলি গড়ে সমমান বলে ধরা যায়। প্রতিফলিত রশ্মির ক্ষেত্রে একথা বলা যায় না। তড়িৎক্ষেত্রের দুই উপাংশের জন্যই অন্তরক পদার্থের প্রতিফলন গুণাঙ্ক, অর্থাৎ আপতিত তীব্রতার কত অংশ প্রতিফলিত হয়, সেটি আপতন কোণের উপর নির্ভর করে।



চিত্র 9.4

ব্রুস্টারের সূত্র অনুযায়ী আপতন কোণের ট্যানজেন্ট যখন প্রথম মাধ্যমের সাপেক্ষে অন্তরক পদার্থের প্রতিসরাঙ্কের সমান হয় তখনই প্রতিফলিত রশ্মির রৈখিক সমবর্তন সম্পূর্ণ হয়। আপনি হয়ত এর তাত্ত্বিক ব্যাখ্যাটি জানতে চাইবেন।

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তত্ত্ব থেকে গাণিতিকভাবে দেখানো যায় যে আপতন তলের অভিলম্বে ও সমান্তরালে তড়িৎক্ষেত্রের দুই উপাংশের যে অংশগুলি (r) প্রতিফলিত হয় সেগুলি হল ঃ

সমান্তরাল উপাংশেরক্ষেত্রে .... 9.8 (a)

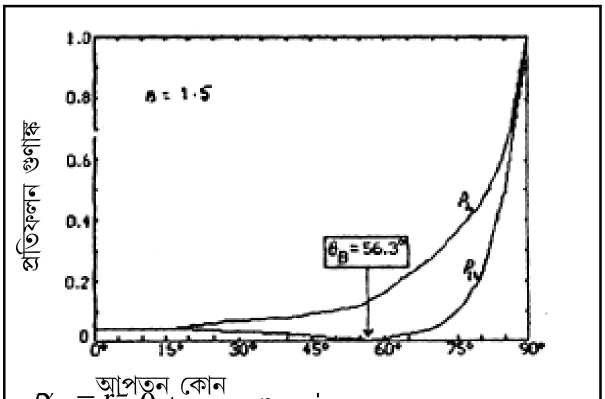
এবং অভিলম্ব উপাংশের ক্ষেত্রে .... 9.8 (b)

প্রতিফলিত তীব্রতা ও আপতিত তীব্রতার অনুপাতকে আমরা প্রতিফলন গুণাঙ্ক বলি। এই রাশিটির মান 9.8 (a) ও (b)-এর রাশিদুটির বর্গের সমান অর্থাৎ সমান্তরাল উপাংশের প্রতিফলন গুণাঙ্ক

.... 9.9(a)

এবং অভিলম্ব উপাংশের প্রতিফলন গুণাঙ্ক $\rho_1 = r_1^2 \; \frac{\cos\theta - n\cos\varphi}{\cos\theta + n\cos\varphi} \; {}^{2}$ ....9.9 (b) বলি।

9.5 চিত্রে লেখচিত্রের সাহায্যে আপতন কোণের সঙ্গে তড়িৎক্ষেত্রের আপতন তলের অভিলম্ব উপাংশ ও সমান্তরাল উপাংশর প্রতিফলন গুণাঙ্কের পরিবর্তন দেখানো হয়েছে।



$\rho_n = \frac{\cos\theta + n\cos\varphi}{n\cos\theta + \cos\varphi}$

লেখচিত্র থেকে আপনি নিশ্চয়ই বুঝতে পারছেন যে অভিলম্ব উপাংশের জন্য প্রতিফলন গুণাঙ্কটি আপতন কোণের সঙ্গে ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেলেও, সমান্তরাল উপাংশের প্রতিফলন গুণাঙ্ক কোনও একটি নির্দিষ্ট আপতন কোণে শূন্য হয়ে যায়। এই বিশেষ আপতন কোণের মানটি আপনি নির্ণয় করতে পারেন কি?

9.9(a) সূত্র থেকে দেখা যায়

যদি $n\cos\theta = \cos\varphi$ হয় তবে $\rho n = \theta$ হয়।

স্নেলের সূত্র থেকে, $\sin\theta = n\sin\varphi$

$\therefore n \cos\theta\sin\theta = \cos\varphi . n\sin\varphi.$

বা $\sin 2\theta = \sin 2\varphi$

যেহেতু θ ও φ কোণ দুটি অসমান এবং এক সমকোণ অপেক্ষা বড় নয়। $2\theta = \pi - 2\varphi$, বা

$\theta + \varphi = \frac{\pi}{2}$। এর অর্থ যখন প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত রশ্মি দুটি পরস্পর সমকোণে থাকে তখনই প্রতিফলিত রশ্মিতে কেবলমাত্র অভিলম্ব উপাংশটি উপস্থিত থাকে।

এই অবস্থায় $\sin\theta = n\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = n\cos\theta$, বা, $\tan\theta = n$

$\therefore \theta = \tan^{-1} n$

আপতন কোণ θ এর এই বিশেষ মানের জন্য প্রতিফলিত রশ্মিটি সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত হয়। এটিই ব্রুষ্টারের সূত্র। এখানে আপতন তলটিই হয় সমবর্তন তল এবং কম্পনতল. সেটির সঙ্গে অভিলম্বভাবে থাকে।

9.10 সূত্রের $\tan^{-1} n$ কোণটিকে ব্রুস্টার কোণ θ_B (Breuster angle) বলা হয়। 9.5 চিত্রে n=1.5 ধরা হয়েছে। এখানে ব্রুষ্টার কোণ $\theta_B = \tan^{-1} 1.5 = 56.3^0$ এবং এই আপতন কোণে $\rho_{\parallel}$ এর মান শূন্য হয়েছে।

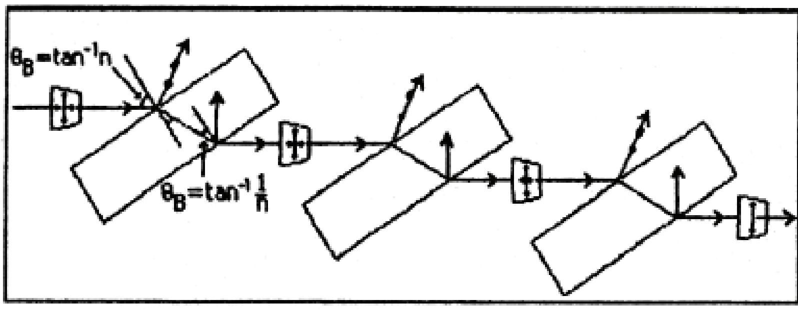
এতক্ষণ আমরা প্রতিফলিত রশ্মির সমবর্তন সম্বন্ধে আলোচনা করলাম। ব্রুষ্টার কোণে আপতনের ফলে আলোকরশ্মির প্রতিসৃত অংশেরও আংশিক রৈখিক সমবর্তন ঘটে কেননা প্রতিসৃত রশ্মিতে আপতন তলের সমান্তরাল তড়িৎক্ষেত্র অভিলম্ব তড়িৎক্ষেত্রের তুলনায় বেশী থাকে। লক্ষণীয় বিষয় এই, যে একটি সমান্তরাল অন্তরক পাতের উপর কোন আলোকরশ্মি ব্রুষ্টার কোণে আপতিত হলে আপতন কোণের সাইনের

মান হয় $\sin\theta_B = \sin(\tan^{-1} n) = \frac{n}{\sqrt{1+n^2}}$

তখন প্রতিসরণ কোণ θ_B হলে, $\sin\theta_B = \frac{1}{n}\sin\theta_B = \frac{1}{\sqrt{1+n^2}}$

অর্থাৎ, $\tan\varphi_B = \frac{1}{n}$ 9.11

প্রতিসৃত রশ্মিটি অন্তরক পাতের পিছনের তলে φ_B কোণে আপতিত হবে (চিত্র 8.6) এবং 8.11 সূত্র অনুযায়ী এই আপতন কোণ অন্তরক পদার্থ থেকে বায়ুতে প্রবেশ করার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য ব্রুষ্টার কোণের



চিত্র 9.6

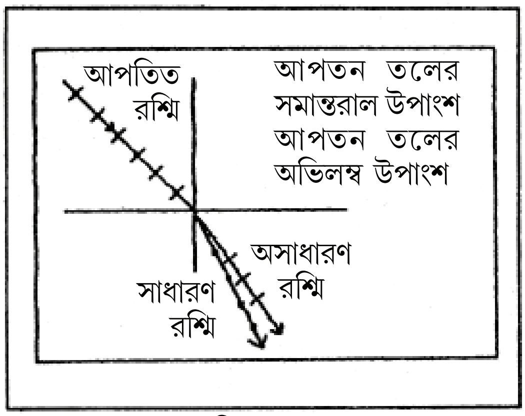
সমান। সুতরাং প্রতিফলিত রশ্মিটি পুনরায় রৈখিকভাবে সমবর্তিত হবে এবং প্রতিসৃত রশ্মিটি আরও বেশী অনুপাতে আপতন তলের সমান্তরাল তড়িৎক্ষেত্রে সমৃদ্ধ হয়ে অন্তরক পাত থেকে নির্গত হবে। এইভাবে রশ্মিটি পরপর কয়েকটি অন্তরক পাতের মধ্য দিয়ে যাওয়ার পর প্রায় সম্পূর্ণরূপে রৈখিকভাবে সমবর্তিত রশ্মিতে পরিণত হয়।

9.4.2 দ্বৈধ প্রতিসরণের দ্বারা রৈখিক সমবর্তন

আপনি বায়ু, জল, কাঁচ প্রভৃতি যে সব স্বচ্ছ পদার্থের সঙ্গে বেশী পরিচিত সেগুলির উপর একটি রশ্মি আপতিত হলে একটিমাত্র প্রতিসৃত রশ্মি উৎপন্ন হয়। ক্যালসাইট, কোয়ার্স প্রভৃতি কোন কোন কেলাসের উপর অসমবর্তিত আলোকরশ্মি আপতিত হলে সম্পূর্ণ ভিন্ন একটি অবস্থায় সৃষ্টি হয়। এর বৈশিষ্ট্যগুলি আগে দেখে নেওয়া যাক।

● আপতিত আলোকরশ্মিটি কেলাসের মধ্যে সাধারণভাবে দুটি প্রতিসৃত রশ্মিতে বিভক্ত হয় এবং রশ্মিদুটির পৃথক ও সুনির্দিষ্ট চরিত্র থাকে (চিত্র 9.7)।

● দুটি রশ্মির একটি সবদিকে সমগতিবেগে সঞ্চারিত হলেও অন্যটির বেগ সঞ্চরণের দিকের উপর নির্ভর করে। অবশ্য কেলাসের মধ্যে এমন একটি দিক থাকে, যে দিক বরাবর দুই রশ্মি একই বেগে চলে। এই দিকটিকে কেলাসের আলোকীয় অক্ষ (optic axis) বলা হয়। যে কোন বিন্দু থেকে উৎপন্ন দুটি তরঙ্গমুখের একটি গোলকাকৃতি এবং অন্যটি উপগোলকাকৃতি (spheroidal) হয়। দুটি তরঙ্গমুখ আলোকীয় অক্ষের দিকে পরস্পরকে স্পর্শ করে। গোলকাকৃতি



চিত্র 9.7

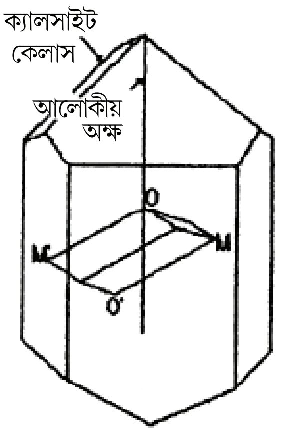
তরঙ্গমুখের রশ্মিটিকে সাধারণ রশ্মি (ordinary ray) এবং অন্যটিকে অসাধারণ রশ্মি (extraordinary ray) বলা হয়।

● সাধারণ ও অসাধারণ দুই রশ্মিই সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত হয়। সাধারণ রশ্মিটিতে কম্পনশীল

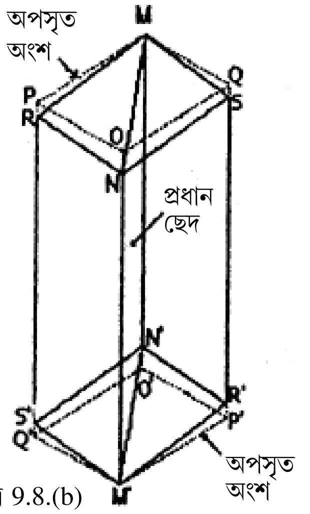
তড়িৎক্ষেত্রটি আপতন তলের অভিলম্বে থাকে এবং অসাধারণ রশ্মিটিতে তড়িৎক্ষেত্রটি আপতন তলের সমান্তরাল থাকে।

- অসাধারণ রশ্মির ক্ষেত্রে সাধারণভাবে শক্তির প্রবাহ তরঙ্গমুখের অভিলম্ব দিকে হয় না।

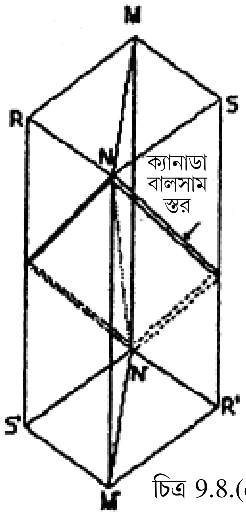
9.7 চিত্র থেকে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির এই ধর্মগুলি বোঝা যাবে। ক্যালসাইট বা কোয়ার্জ কেলাসে একটিমাত্র আলোকীয় অক্ষ থাকে তাই এ জাতীয় কেলাসকে একাক্ষ (uniaxial) কেলাস বলা হয়। অভ্র (muscoite), পটাসিয়াম নাইট্রেট প্রভৃতি কোন কোন কেলাসে দুটি আলোকীয় অক্ষ থাকে, অর্থাৎ কেলাসের মধ্যে এমন দুটি দিক থাকে যে দিকে সাধারণ ও সাধারণ রশ্মি একই বেগে চলে। এ ধরণের দ্বি-অক্ষ (biaxial) কেলাসে আলোর প্রতিসরণ অপেক্ষাকৃত জটিল এবং এটি আমরা আলোচনার বাইরে রাখব। আসুন এবার দ্বৈধ প্রতিসরণকে কীভাবে রৈখিক সমবর্তন ঘটনোর কাজে লাগানো যায় সেটি দেখা যাক।



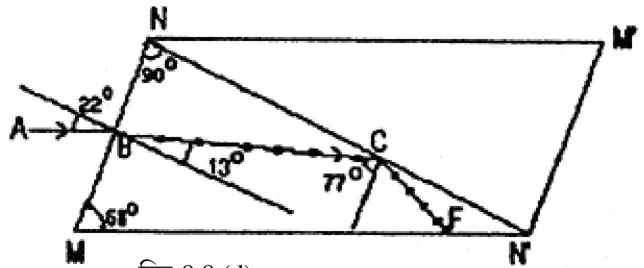
চিত্র 9.8.(a)



চিত্র 9.8.(b)



চিত্র 9.8.(c)



চিত্র 9.8.(d)

নিকল প্রিজম : স্কটল্যান্ডের বিজ্ঞানী নিকল (William Nicol) 1828 সালে ক্যালসাইট কেলাস থেকে নিকল প্রিজম্ তৈরী করার পদ্ধতি আবিষ্কার করেন। এটির সাহায্যে আপনি অসমবর্তিত আলো থেকে সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলো পেতে পারেন। এর নির্মাণ প্রণালী ও গঠন 9.8(a-d) চিত্রে দেখানো হয়েছে। নিকল প্রিজম্ তৈরী করতে হলে প্রথমে ক্যালসাইটের একটি স্বচ্ছ কেলাস থেকে প্রস্থের তিনগুণ দীর্ঘ একটি রম্বোহেড্রন (rhombohedron) আকৃতির খন্ড কেটে নেওয়া

হয় (চিত্র 9.8.a)। রম্বোহেড্রনের দুটি বিপরীত শীর্ষবিন্দু, 0 এবং 0' পাওয়া যায় যেগুলির সন্নিহিত তিনটি কোণই স্থূলকোণ। এ দুটির মধ্য দিয়ে রম্বাস তলের সঙ্গে অভিলম্ব যে তলটি কল্পনা করা যায় (OMO'M') সেটিকে আমরা কেলাসের প্রধান ছেদ (principal section) বলি। প্রধান ছেদটি আকৃতিতে একটি সামান্তরিক, যার $\angle OMO'$ ও $\angle OM'O'$ কোণদুটির মান 71^0। কেলাসটির OPMQ এবং O'P'M'Q' তলদুটিকে (চিত্র 9.8) ঘর্ষণের দ্বারা কেলাসের কিছু অংশ অপসৃত করা হয়, যাতে NRMS এবং N'R'M'S' তলদুটি হয় কেলাসের নূতন প্রান্ততল এবং প্রধান ছেদের $\angle NMN'$ ও $\angle NM'N'$ কোণগুলি হয় 68^0। এর ফলে NM ও N'M' বাহুগুলি প্রধান ছেদের NN' কর্ণের সঙ্গে সমকোণে থাকে। এবার কেলাসটিকে প্রধান ছেদের সঙ্গে লম্বভাবে NN' কর্ণের মধ্য দিয়ে যাওয়া তল বরাবর কাটা হয় এবং দুটি খন্ডের মধ্যে ক্যানাডা বালসাম আঠার স্তর দিয়ে দুটিকে আবার জুড়ে দেওয়া হয়। প্রান্ততল ব্যতীত অন্য তলগুলিতে কালো রং মাখানো হয় যাতে সেগুলি যে কোন আপতিত আলো সম্পূর্ণ শোষণ করতে পারে। নিকল প্রিজমটি এখন ব্যবহারের জন্য তৈরী।

9.8 (d) চিত্র থেকে আপনি নিকল প্রিজমের কার্যপদ্ধতি বুঝতে পারবেন। এখানে অসমবর্তিত আলোকরশ্মি AB প্রিজমের NM' বা N'M প্রান্তগুলির সমান্তরালে NM তলে আপতিত হয়েছে। দ্বৈধ প্রতিসরণের ফলে কেলাসের মধ্যে রশ্মিটি সাধারণ রশ্মি BC এবং অসাধারণ রশ্মি BD তে বিভক্ত হয়ে যায়। সোডিয়ামের হলুদ আলোর ক্ষেত্রে ক্যালসাইট ও ক্যানাডা বালসাম আঠার প্রতিসরাঙ্কগুলি হল :

ক্যালসাইটের প্রতিসরাঙ্ক (সাধারণ রশ্মি) $\mu_0 = 1 \cdot 65836$

ক্যালসাইটের প্রতিসরাঙ্ক (অসাধারণ রশ্মি BD দিকে), $\mu_e = 1 \cdot 48641$

ক্যানাডা বালসাম আঠার প্রতিসরাঙ্ক, $\mu_c = 1 \cdot 55$

অসাধারণ রশ্মির ক্ষেত্রে ক্যালসাইটের প্রতিসরাঙ্ক ক্যানাডা বালসাম আঠার তুলনায় কম হওয়ায় ঐ রশ্মিটি সোজাসুজি N'M' প্রান্ততলের মধ্য দিয়ে আপতিত রশ্মির সমান্তরালে DE বরাবর নির্গত হয়। কিন্তু সাধারণ রশ্মির ক্ষেত্রে একটি ভিন্ন ঘটনা ঘটে। এই রশ্মির জন্য ক্যালসাইট ও ক্যানাডা বালসামের মধ্যবর্তী তলে পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলনের জন্য সঙ্কট কোন $\sin^{-1}(1.55/1.65836) = 69°$ ।

কিন্তু ক্যালসাইটের প্রান্ততলে এই রশ্মির আপতন কোণ $= 90° - 68° = 22°$ । $\therefore$ প্রতিসরণ কোণ $= \sin^{-1}(\sin 22°/1 \cdot 65836) = \sin^{-1} 0 \cdot 225 = 13°$

সুতরাং ক্যানাডা বালসাম স্তরে সাধারণ রশ্মির আপতন কোণ $= 90° - 13° = 77°$

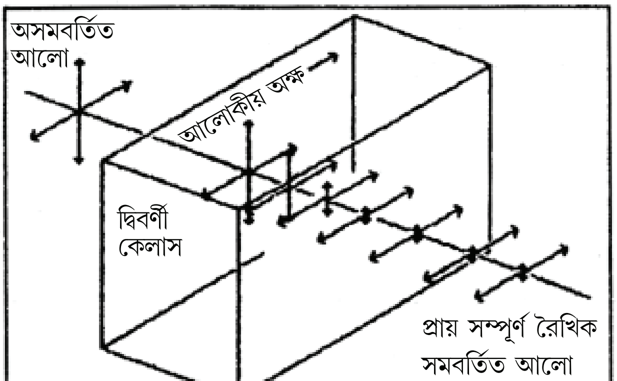
যেটি সঙ্কট কোণ 69° এর চেয়ে বড়। এর ফলে পূর্ণ প্রতিফলিত CF রশ্মিটি পূর্বের পথ থেকে বিচ্যুত হয় এবং প্রিজমের কালো রঙের তলে শোষিত হয় (চিত্র 9.8 (e)। অন্যদিকে নির্গত রশ্মিটি কেবলমাত্র অসাধারণ রশ্মি দ্বারা গঠিত হওয়ায় সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত হয়।

আপতিত রশ্মি AB এর আপতন কোনটি 22° থেকে 14° পর্যন্ত কমবেশী হলেও নিকল প্রিজম্‌টি ঠিকমত কাজ করতে পারে। তবে আপতন কোণ 36° এর চেয়ে বেশী হলে সাধারণ রশ্মির পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ঘটে না, সেটিও প্রিজ্‌ম্‌ থেকে সোজাসুজি নির্গত হয়। আবার আপতন কোণ 8° অপেক্ষা কম হলে অসাধারণ রশ্মির দিক বরাবর ক্যালসাইটের প্রতিসরাঙ্ক এত বৃদ্ধি পায় যে অসাধারণ রশ্মিটিরও পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ঘটে।

মোটের উপর, দ্বৈধ প্রতিসরণের উপর নির্ভরশীল নিকল প্রিজ্‌ম বিশুদ্ধ রৈখিক সমবর্তন সৃষ্টির একটি কার্যকরী ব্যবস্থা। তবে এটির কাচামাপ, অর্থাৎ উপযুক্ত মাপের নিখুঁত ক্যালসাইট কেলাস কিছুটা দুর্লভ এবং এটির নির্মান পদ্ধতিও বেশ দুরূহ। যার ফলে নিকল প্রিজ্‌মের মূল্যও বেশী। এবার আমরা রৈখিক সমবর্তন উৎপাদনের একটি অপেক্ষাকৃত সহজ ও সুলভ পদ্ধতি বর্ণনা করব।

9.4.3 দ্বিবর্ণী (dichrioc) কেলাসের সাহায্যে রৈখিক সমবর্তন

দ্বিবর্ণী কেলাসের বৈশিষ্ট্য এই যে এগুলিতে যে শুধু দ্বৈধ প্রতিসরণ ঘটে তাই নয়, পরস্পর সমকোণে কম্পনতল বিশিষ্ট দুটি রশ্মির একটি অন্যটির তুলনায় অনেক বেশী মাত্রায় শোষিত হয়। টুরম্যালিন (tourmaline) এ জাতীয় একটি কেলাস। ধরুন এই কেলাসের একটি পাত এমনভাবে কেটে নেওয়া হল যাতে কেলাসের আলোকীয় অক্ষ প্রান্ততলে থাকে। এবার অসমবর্তিত আলোর একটি রশ্মি ঐ তলে লম্বভাবে আপতিত হলে রশ্মিটি সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিতে ভেঙে যাবে, যদিও দুটি রশ্মিই সোজাসুজি



একই পথে চলতে থাকবে (চিত্র 9.9)। আপতিত রশ্মি ও আলোকীয় অক্ষের মধ্য দিয়ে একটি সমতল কল্পনা

করলে সাধারণ রশ্মির তড়িৎক্ষেত্র তার অভিলম্ব বরাবর এবং অসাধারণ রশ্মির তড়িৎক্ষেত্র তার সমান্তরালে থাকবে। কেলাসটির মধ্যে সাধারণ রশ্মিটি অসাধারণ রশ্মির তুলনায় অনেক দ্রুত শোষিত হয়। পাতের বেধটি ঠিকমত নির্বাচন করলে কেলাস থেকে নির্গত আলো প্রায় সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত হয়। টুরম্যালিন কেলাসের মধ্য দিয়ে নির্গত আলোর রং সবুজ, কেননা অন্য রংগুলি এই কেলাসে শোষিত হয়। এজন্য সমবর্তন হিসাবে টুরম্যালিন কেলাস বিশেষ ব্যবহৃত হয় না। অপর পক্ষে রৈখিকভাবে সমবর্তিত সাদা আলোয় কেলাসটি ধরলে কেলাসের আলোকীয় অক্ষের দিক অনুযায়ী সেটিকে কখনও সবুজ, কখনও কালো দেখায়, যার জন্য এটিকে দ্বিবর্ণী বলা হয়।

দ্বিবর্ণী কেলাসের এই ধর্মটি পোলারয়েড (polaroid) নামের সমবর্তক পাত তৈরী করতে ব্যবহৃত হয়। হেরাপ্যাথাইট (herapathite) নামের একটি রাসায়নিক বস্তুর মধ্যে দ্বিবর্ণী কেলাসের ধর্ম দেখতে পাওয়া যায়। এটির রাসায়নিক নাম কুইনাইন সালফেট পেরিআয়োডাইড। এর কেলাসগুলি আকারে অত্যন্ত ক্ষুদ্র হওয়ায় এগুলিকে সরাসরি সমবর্তক হিসাবে ব্যবহার করা যায় না। পোলারয়েড পাতে একটি স্বচ্ছ প্লাস্টিক পর্দার মধ্যে হেরাপ্যাথাইটের অসংখ্য আনুবীক্ষনিক কেলাস তাদের অক্ষগুলিকে একমুখী রেখে সাজানো থাকে। হেরাপ্যাথাইটের পরিবর্তে আয়োডিনের কেলাসও ব্যবহৃত হয়। পোলারয়েড পাত ইচ্ছামত আকার ও আকৃতিতে ব্যবহার করা যায় এবং এটি দামেও নিকল প্রিজমের তুলনায় সস্তা। এজন্য রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোক উৎপাদনে পোলারয়েড পাতই সবচেয়ে বেশী ব্যবহৃত হয়।

রৈখিক সমবর্তন ঘটানোর পদ্ধতিগুলি জানতে পারলেন। এবার এ সম্বন্ধে একটি অনুশীলনীর উত্তর দিন।

অনুশীলনী 2

(i) একটি অসমবর্তিত আলোকরশ্মি 1.5 প্রতিসরণ গুণাঙ্কের কাচের উপর বায়ু থেকে 60° কোণে আপতিত হল। প্রতিফলিত রশ্মিতে আপতন তলের সমান্তরাল ও অভিলম্ব উপাংশগুলির তীব্রতার অনুপাত কত হবে?

(ii) সংক্ষিপ্ত উত্তর দিন ঃ

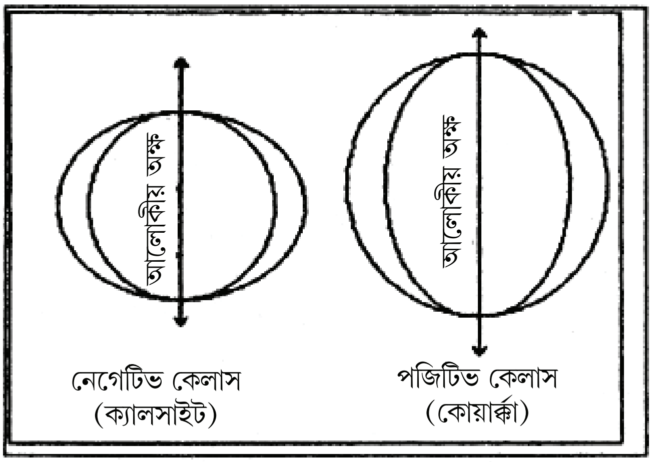
(a) নিকল প্রিজমে ক্যানাডা বালসাম স্তরের কাজ কী?

(b) নিকল প্রিজমের তুলনায় পোলারয়েডের সুবিধা কী?

(c) একাক্ষ কেলাসে কোন দিকে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির বেগ সর্বাপেক্ষা পৃথক হয়?

9.5 একাক্ষ কেলাসে আলোক তরঙ্গের সঞ্চার

সমবর্তন সংক্রান্ত অন্য বিষয়গুলি পড়ার আগে একাক্ষ কেলাসে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিগুলি



চিত্র 9.10a চিত্র 9.10b

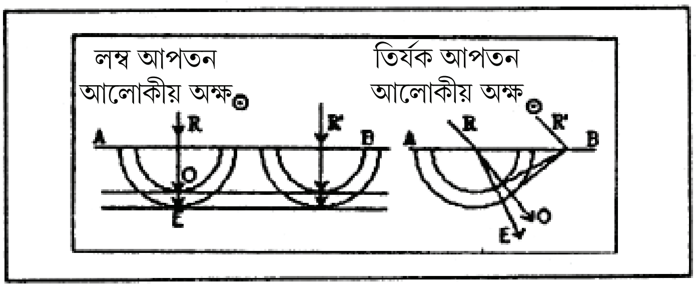
কীভাবে সঞ্চারিত হয় সেটি আপনার জানা প্রয়োজন। এই পাঠক্রমের প্রথম এককে আপনি তরঙ্গসঞ্চারের প্রসঙ্গে হাইগেন্স্এর নীতিটি পড়েছেন। এখানে আমরা সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির ক্ষেত্রে হাইগেন্সএর নীতি প্রয়োগ করে এই দুই রশ্মির দিক নির্ণয় করব।

আপনি আগেই জেনেছেন যে একাক্ষ কেলাসের মধ্যে সাধারণ রশ্মির তরঙ্গমুখ গোলকের আকৃতি হলেও, অসাধারণ রশ্মির তরঙ্গ মুখ উপগোলাকাকৃতি হয়। ক্যালসাইট কেলাসের ক্ষেত্রে উপগোলকটি আলোকীয় অক্ষ বরাবর চাপা (oblate) হয়, সাধারণ রশ্মির গোলকাকার তরঙ্গমুখ আলোকীয় অক্ষের উপর দুই বিন্দুতে উপগোলকটি স্পর্শ করা ছাড়া সম্পূর্ণ উপগোলকের ভিতরে থাকে (চিত্র 9.10a)। এজাতীয় কেলাসকে নেগেটিভ কেলাস বলা হয়। কোয়ার্জ কেলাসের ক্ষেত্রে এর বিপরীত ঘটে। উপগোলকটি আলোকীয় অক্ষের দিকে দীর্ঘায়িত (prolate) হয়, এবং ঐ অক্ষের উপর সাধারণ রশ্মির গোলকাকৃতি তরঙ্গমুখকে স্পর্শ করা ব্যতীত সেটির ভিতরে থাকে (চিত্র 9.10b)। এজন্য কোয়ার্জ কেলাসকে পজিটিভ কেলাস বলা হয়। এখানে আমরা ক্যালসাইটের মত নেগেটিভ কেলাস নিয়ে আলোচনা করব। তবে পজিটিভ কেলাসের ক্ষেত্রে কী ঘটবে তা আপনি নিজেই অনুসন্ধান করতে পারবেন।

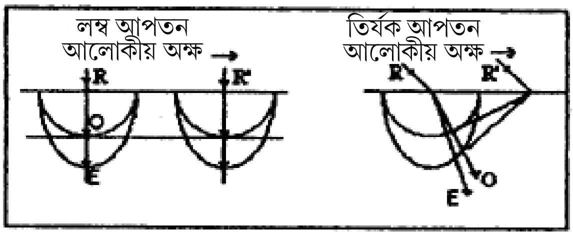
আলোকীয় অক্ষের অবস্থান এবং আপতন কোণ অনুযায়ী কয়েকটি পৃথক অবস্থা কল্পনা করা যায় ঃ

আলোকীয় অক্ষ দুই মাধ্যমের বিভেদতলে আপতন তলের সঙ্গে অভিলম্ব ঃ

9.11.(a) ও 9.11.(b) চিত্রে এই অবস্থাটি দেখানো হয়েছে। (a) চিত্রে দুটি আলোকরশ্মি R ও R′ বায়ু ও একাক্ষ কেলাসের বিভেদতল AB এর উপর লম্বভাবে আপতিত হয়েছে। এক্ষেত্রে তরঙ্গ মুখের ছেদগুলি উভয়ই গোলাকার এবং তাদের সাধারণ স্পর্শকগুলি AB এর সমান্তরাল। ফলে প্রতিসৃত সাধারণ রশ্মি O এবং অসাধারণ রশ্মি E ভিন্ন বেগে কিন্তু



চিত্র 9.11.(a) চিত্র 9.11.(b)

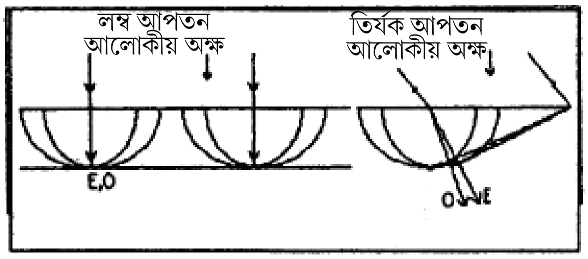


চিত্র 9.12.(a) চিত্র 9.12.(b)

একই দিকে, অর্থাৎ বিভেদতলের সঙ্গে লম্বভাবে গমন করছে। অন্যদিকে R ও R′ রশ্মি যখন তির্যকভাবে আপতিত হয় তখন হাইগেন্‌সের পদ্ধতিতে প্রতিসৃত তরঙ্গমুখগুলি অঙ্কন করে (চিত্র (b)) দেখা যায় যে O এবং E রশ্মিগুলি কেবল ভিন্ন বেগেই নয়, ভিন্ন দিকেও সঞ্চারিত হয়।

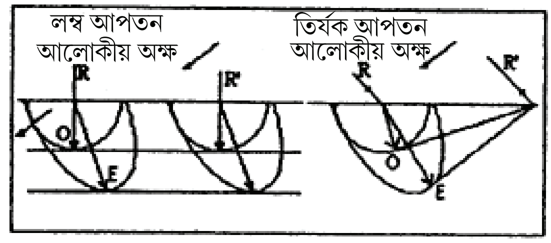
আলোকীয় অক্ষ দুই মাধ্যমের বিভেদতলে এবং আপতন তলে অবস্থিত ঃ

এই অবস্থাটি 9.12 (a) ও (b) চিত্রে দেখানো হয়েছে। (a) চিত্রে লম্ব আপতনের অবস্থাটি আসলে 9.11(a) চিত্রের অনুরূপ, দৃষ্টিকোণটি যদিও ভিন্ন। তির্যক আপতনের ক্ষেত্রে এখানেও E এবং O রশ্মিগুলি ভিন্নদিকে সঞ্চারিত হয়েছে।



চিত্র 9.13.(a) চিত্র 9.13.(b)

আলোকীয় অক্ষ বিভেদতলের অভিলম্ব ঃ 9.13 চিত্রে লম্ব আপতনের অবস্থাটি দেখতে পাবেন। এখানে E ও O রশ্মিদুটি আলোকীয় অক্ষ বরাবর একই বেগে অগ্রসর হওয়ায় এই বিশেষ ক্ষেত্রে কোন দ্বৈধ প্রতিসরণ ঘটে না। তির্যক আপতনের ক্ষেত্রে (চিত্র 9.13b) রশ্মিদুটির প্রতিসরণ কোণ ভিন্ন হয় এবং দ্বৈধ প্রতিসরণটি স্পষ্ট দেখা যায়।



চিত্র 9.14.(a) চিত্র 9.14.(b)

আলোকীয় অক্ষ বিভেদতলের সঙ্গে আনত ঃ 9.14 চিত্রে লম্ব আপতনের অবস্থাটি দেখানো হয়েছে। এখানে O রশ্মিটি বিভেদতলের লম্ব অভিমুখে প্রতিসৃত হলেও অসাধারণ E রশ্মিটি তির্যকভাবে প্রতিসৃত হয়েছে এবং এর দিকটি বিভেদতলের সমান্তরাল তরঙ্গমুখের সঙ্গেও আনত রয়েছে। তির্যক আপতনের ক্ষেত্রে 9.14 (b) চিত্রের মত অবস্থা ঘটে এবং O রশ্মি ও E রশ্মি বিভিন্ন দিকে সঞ্চারিত হয়। নিকল প্রিজমের ক্ষেত্রে এই জাতীয় দ্বৈধ প্রতিসরণ আপনি আগেই লক্ষ্য করেছেন।

এবার একটি অনুশীলনীর মাধ্যমে হাইগেন্‌স্‌-এর পদ্ধতির প্রয়োগ অভ্যাস করে নিন।

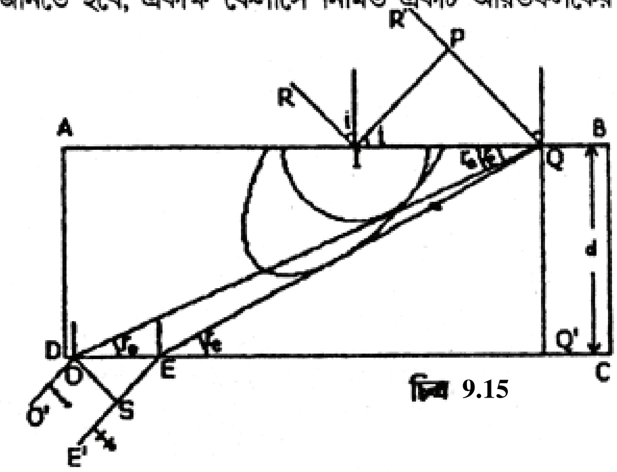
অনুশীলনী 3

একটি পজিটিভ কেলাসের ক্ষেত্রে 9.14 (a) ও (b) চিত্রদুটির অনুরূপ অবস্থায় সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির গতিপথ নির্ণয় করুন।

9.5.1 সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির মধ্যে দশাপার্থক্য

আগের অংশ থেকে আপনি নিশ্চয়ই বুঝতে পেরেছেন যে একটি কক্ষ কেলাসের মধ্যে দ্বৈধ প্রতিসরণের ফলে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিগুলি কীভাবে প্রতিসৃত হয় তা আপতন কোণ ছাড়াও আলোকীয় অক্ষের কৌণিক অবস্থানের উপর নির্ভর করে। এখন আমাদের জানতে হবে, একাক্ষ কেলাসে নির্মিত একটি আয়তফলকের উপর একটি অসমবর্তিত আলোকরশ্মি আপতিত হলে নির্গত সাধারণ ও অসাধারণ আলোকরশ্মির মধ্যে আলোকীয় পথের পার্থক্য ও দশা পার্থক্য কত হবে।

9.15 চিত্রে হাইগেন্‌স-এর পদ্ধতিতে একাক্ষ কেলাসের আয়তফলকের মধ্যে এবং সেটি থেকে নির্গত হওয়ার পরে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিগুলির তরঙ্গমুখ দেখানো হয়েছে।



চিত্র 9.15

এই চিত্রে R এবং R′ রশ্মিদুটি ABC আয়তফলকের AB তলে i কোণে আপতিত হয়েছে। R রশ্মির আপতনের মুহূর্তে IP এই রশ্মিগুলির তরঙ্গমুখ। হাইগেনস্‌-এর পদ্ধতিতে প্রতিসৃত তরঙ্গমুখগুলি অঙ্কন করে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির প্রতিসৃত তরঙ্গমুখ, যথাক্রমে QO এবং QE পাওয়া যায়। r_0 এবং r_e এগুলির প্রতিসরণ কোণ। আয়তফলকের CD তলে আপতনের পর সেগুলি আবার প্রতিসৃত হয়ে OD′ EE′ রূপে নির্গত হয়। স্পষ্টতই OO′ এবং EE′ আপতিত তরঙ্গমুখ IP এর সমান্তরাল এবং সেগুলির মধ্যে আলোকীয় পথের পার্থক্য OS-এর সমান, যেখানে $OS \perp EE'$ । এখন আমাদের OS এর মান নির্ণয় করতে হবে।

লক্ষ্য করুন যে $\angle OES = \angle QIP = i$ । সুতরাং যদি $QQ' \perp CD$, এবং QQ' দৈর্ঘ্য = আয়তফলকের বেধ d হয় তবে

$$OS = OE\sin i = (OQ' - EQ')\sin i = (d\cot r_0 - d\cot r_e)\sin i$$
$$= d\left(\cos r_0 \frac{\sin i}{\sin r_0} - \cos r_e \cdot \frac{\sin i}{\sin r_e}\right)$$

বা, $OS = d(\mu_0 \cos r_0 - \mu_e \cos r_e)$

যেখানে μ_0, μ_e যথাক্রমে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির ক্ষেত্রে কেলাসের প্রতিসরাঙ্ক।

দুই রশ্মির মধ্যে দশাপার্থক্য $\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(\mu_0 \cos r_0 - \mu_e \cos r_e)$, যেখানে $\lambda =$ বায়ুতে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য। এখানে μ_0 আলোকীয় অক্ষের কৌণিক অবস্থান এবং আপতন কোণের উপর নির্ভরশীল না হলেও μ_e রাশিটি অসাধরণ রশ্মিটি আলোকীয় অক্ষের সঙ্গে যে কোণ রচনা করে তার উপর নির্ভর করে।

যখন আলোকীয় অক্ষটি আলো কেলাসের যে তলে আপতিত হয় সেইতলে (অর্থাৎ AB অথবা CD তলে) অবস্থিত হয় এবং R-R′ রশ্মি লম্বভাবে আপতিত হয় [চিত্র 9.11 (a) দেখুন], তখন $i = r_0 = r_e = 0$ হয়। সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিগুলি একই দিকে ভিন্ন বেগে সঞ্চারিত হয়। আলোকীয় অক্ষ এবং আপতিত রশ্মি যে সমতল রচনা করে সাধারণ রশ্মির তড়িৎক্ষেত্রে তার লম্বভাবে এবং অসাধারণ রশ্মি তার সমান্তরালে থাকে। উপরন্তু অসাধারণ রশ্মিটি আলোকীয় অক্ষের সঙ্গে সমকোণে সঞ্চারিত হয় এবং এই দিকে ক্যালসাইট কেলাসের ক্ষেত্রে μ_e সর্বনিম্ন এবং কোয়ার্জ কেলাসের ক্ষেত্রে μ_e সর্বোচ্চ হয়। এই সর্বোচ্চ বা সর্বনিম্ন প্রতিসরাঙ্ককে প্রধান অসাধারণ প্রতিসরাঙ্ক (extraordinary principal refractive index) μ_E বলা হয়। কেলাস থেকে নির্গত হওয়ার পর সাধারণ রশ্মি অসাধারণ রশ্মির তুলনায় যে দশাকোণে পিছিয়ে থাকে তার মান 9.12 সূত্র থেকে পাওয়া যায়।

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(\mu_0 - \mu_E)$$

আপনাকে যদি দ্বৈধ প্রতিসরাঙ্ক কেলাস থেকে এমন একটি আয়তফলক তৈরী করতে হয় যার মধ্য দিয়ে যাওয়ার ফলে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির মধ্যে একটি নির্দিষ্ট দশাপার্থক্য সৃষ্টি হবে তার 9.13 সূত্রটি আপনার খুবই কাজে লাগবে। এখানে আমরা দুটি উদাহরণ বিবেচনা করব।

অর্ধতরঙ্গ পাত (half wave plate)

এই পাত লম্বভাবে আপতিত কোন নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোকের সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিদুটির মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অর্ধেকের সমান পথ পার্থক্য সৃষ্টি করে। রশ্মিদুটির মধ্যে দশাপার্থক্য হবে $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2} = \pi$।

বলুন, এই পাতের বেধ কত হবে? 9.13 সূত্র থেকে $\delta = \pi$ বসিয়ে,

$$d = \frac{\lambda}{2\pi(\mu_0 - \mu_E)}\pi = \frac{\lambda}{2(\mu_0 - \mu_E)}$$

ধরা যাক আমরা ক্যালসাইট কেলাস থেকে 508nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপযুক্ত একটি অর্ধতরঙ্গ পাত তৈরী করতে চাই। এই তরঙ্গদৈর্ঘ্যে ক্যালসাইটের প্রতিসরাঙ্ক $\mu_0 = 1\cdot66527$, $\mu_E = 1\cdot48956$। এই মানগুলি 9.14 সূত্রে ব্যবহার করে পাওয়া যায়

$$d = \frac{508\text{nm}}{2(1.66527 - 1.48956)} = 1.446\mu\text{m}$$

সিকি তরঙ্গ পাত (quater wavc plate):

এই পাতের উপর নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো লম্বভাবে আপতিত হলে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিদুটির মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক চতুর্থাংশের সমান পথপার্থক্যের সৃষ্টি হয়। এক্ষেত্রে রশ্মিদুটির মধ্যে যে দশাপার্থক্যের সৃষ্টি হয় তার মান $\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$ আগের মত 8.13 সূত্রে $\delta = \frac{\pi}{2}$ বসালে আপনি সিকিতরঙ্গ পাতের বেধ পাবেন ঃ

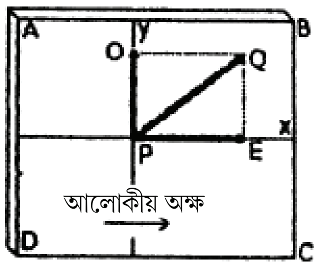
$$d = \frac{\lambda}{2\pi(\mu_0 - \mu_E)}\cdot\frac{\pi}{2} = \frac{\lambda}{4(\mu_0 - \mu_E)} \qquad \text{.......} \quad 9.15$$

এখন আপনি নিজেই দেখে নিতে পারেন যে ক্যালসাইট কেলাস থেকে 508nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপযুক্ত সিকি তরঙ্গ পাত নির্মাণ করলে তার বেধ হবে 0.723µm অর্থাৎ অর্ধতরঙ্গ পাতের বেধের অর্ধেক।

9.6 বৃত্তীয় ও উপবৃত্তীয় সমাবর্তনের উৎপাদন

9.4 অনুচ্ছেদে আপনি রৈখিক সমবর্তন উৎপাদনের বিভিন্ন পদ্ধতির সঙ্গে পরিচিত হয়েছেন। সেখানে আপনি জেনেছেন যে বৃত্তীয় অথবা উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলো উৎপাদন করতে প্রথমে রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলো থেকেই শুরু করতে হয়। এই অনুচ্ছেদে রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোকে কীভাবে বৃত্তীয় অথবা উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলোতে রূপান্তরিত করতে হয় সেটি আমরা আলোচনা করব।

ধরা যাক ABCD কোন এক দ্বৈধ প্রতিসারক কেলাস থেকে তৈরী একটি সিকি তরঙ্গ পাত। তীরচিহ্নগুলি পাতের তলে অবস্থিত আলোকীয় অক্ষের দিক নির্দেশ করছে। পাতটি পজিটিভ বা নেগেটিভ, যে কোন ধরণের কেলাস থেকে নির্মিত হতে পারে। তবে আমরা ধরে নেব এক্ষেত্রে সেটি ক্যালসাইট জাতীয় কোন নেগেটিভ কেলাসের তৈরী। আমরা আলোকীয় অক্ষ বারবর x অক্ষ এবং তার সঙ্গে সমকোণে y অক্ষ কল্পনা করব (চিত্র 9.16)।



চিত্র 9.16

এবার ধরুন রৈখিকভাবে সমবর্তিত একটি একবর্ণী আলোকরশ্মি পাতটির উপর লম্বভাবে আপতিত হল, যার কম্পন PQ অভিমুখী এবং x অক্ষের সঙ্গে θ কোণে আনত। এই কম্পনের সমীকরণ

$$E = E_0 \sin\omega t$$

x ও y অক্ষ বরাবর এই কম্পনের উপাংশগুলি হবে (θ = **কম্পনের নতিকোণ**) x অক্ষ বা আলোকীয় অক্ষ বরাবর $x = E_0 \cos\theta \sin\omega t$ (অসাধারণ রশ্মি) y অক্ষ বা আলোকীয় অক্ষের লম্ব বরাবর $Y = E_0 \sin\theta \sin\omega t$ (সাধারণ রশ্মি)

আলোকীয় অক্ষ বরাবর উপাংশটি অসাধারণ রশ্মি এবং ঐ অক্ষের সঙ্গে লম্ব উপাংশটি সাধারণ রশ্মি হিসাবে আচরণ করবে। আপনি আগেই দেখেছেন যে অসাধারণ রশ্মিটি সাধারণ রশ্মির চেয়ে দ্রুত কেলাসটি অতিক্রম করবে এবং সিকি তরঙ্গ পাত থেকে নির্গত হওয়ার পর $\frac{\pi}{2}$ দশাকোণে এগিয়ে থাকবে। সুতরাং সিকি তরঙ্গ পাত থেকে নির্গত হওয়ার পর আলোর কম্পনের উপাংশগুলি হবে

$$X = E_0 \cos\theta \sin(\omega t + \alpha) \text{ (অসাধারণ রশ্মি)} \qquad \text{.................... 9.16(a)}$$

$$Y = E_0 \sin\theta \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) \text{(সাধারণ রশ্মি)}$$

$$= -E_0 \sin\theta \cos(\omega t + \alpha) \qquad \text{.................... 9.16(b)}$$

(a) ও (b) সমীকরণ দুটি থেকে t কে অপনয়ন করা যাক।

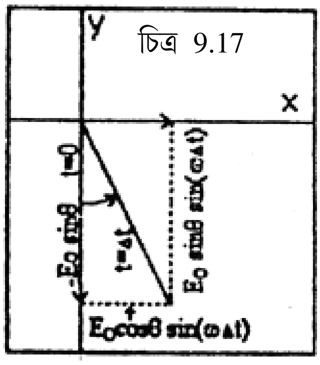
$$\left(\frac{x}{\cos\theta}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sin\theta}\right)^2 = E_0^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + E_0^2 \cos^2(\omega t + \alpha)$$

$$= E_0^2$$

বা, $$\frac{x^2}{(E_0 \cos\theta)^2} + \frac{y^2}{(E_0 \sin\theta)^2} = 1 \qquad \text{......................} \quad 9.17$$

9.17 সমীকরণটি একটি উপবৃত্তের সমীকরণ, যার অর্ধপরাক্ষ ও অর্ধউপাক্ষ $E_0 \cos\theta$ ও $E_0 \sin\theta$। আপনি নিশ্চই বুঝতে পারছেন যে এক্ষেত্রে সিকি তরঙ্গ পাতটি রৈখিক সমবর্তনকে উপবৃত্তীয় সমবর্তনে পরিণত করেছে।

এখন প্রশ্ন, সিকি তরঙ্গ পাতের সাহায্যে কীভাবে আমরা বৃত্তীয় সমবর্তন পেতে পারি? পাতটি যদি এমনভাবে বসানো যায় যে আপতিত রৈখিকভাবে সমবর্তিত তরঙ্গের কম্পনের দিকটি পাতের আলোকীয় অক্ষের সঙ্গে $\theta = 45^0$ কোণ রচনা করে তবে 9.17 সমীকরণে $\theta = 45^0$ বসিয়ে পাওয়া যায়।

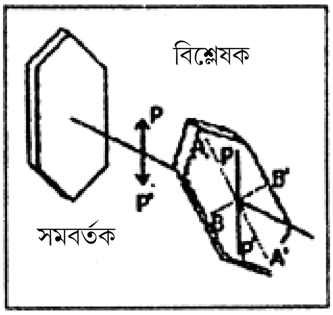


চিত্র 9.17

$$\frac{x^2}{E_0^2} + \frac{y^2}{E_0^2} = 1, \quad \text{বা,} \quad x^2 + y^2 = E_0^2 \qquad \text{.........} \; 9.18$$

এটি নিঃসন্দেহে একটি বৃত্তের সমীকরণ। সুতরাং সিকিতরঙ্গ পাতটি যদি সঠিক কৌণিক অবস্থানে রাখা হয় তবে রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলো থেকে বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলো পাওয়া যেতে পারে।

আপনার মনে হতে পারে যে 9.17 ও 9.18 সমীকরণগুলিতে যে উপবৃত্তীয় বা বৃত্তীয় সমবর্তন বোঝাচ্ছে সেগুলিতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরটির গতি দক্ষিণাবর্তী না বামাবর্তী। এর উত্তর পেতে আপনাকে 9.16 (a) ও (b) সমীকরণদুটি লক্ষ্য করতে হবে। ধরে নিন $\alpha = 0$। t এর মান যখন শূন্য তখন $x = 0, Y = -E_0 \sin\theta.$। এর অব্যবহিত পরে যখন $t = \Delta t$,



চিত্র 9.18

$$X = E_0 \cos\theta \sin(\omega\Delta t)$$

$$Y = -E_0 \sin\theta \cos(\omega\Delta t)$$

অর্থাৎ তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরটি Δt সময় বামাবর্তে অর্থাৎ ঘড়ির কাঁটার বিপরীতে ঘুরে গিয়েছে। তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরের গতি এখানে স্পষ্টত বামাবর্তী। আপতিত রশ্মিটি যদি x অক্ষের সঙ্গে $-\theta$ কোণে আনত হত তবে আলোকীয় অক্ষের লম্ব বরাবর তড়িৎক্ষেত্রের উপাংশ হত $Y = -E_0 \sin\theta \sin\omega t$ । অসাধারণ রশ্মির তুলনায় এই সাধারণ রশ্মি $\frac{\pi}{2}$ কোণে পেছিয়ে পড়ার পর 9.16 সমীকরণে 9.16 (b) স্থানে আপনি পাবেন

$$Y = -E_0 \sin\theta \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= E_0 \sin\theta \cos(\omega t + \alpha)$$

আগের যুক্তি ব্যবহার করে আপনি দেখাতে পারবেন যে এক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরটি দক্ষিণাবর্তী। কাজেই সিকিতরঙ্গ পাত ব্যবহার করে আপনি রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোকে বামাবর্তী অথবা দক্ষিণাবর্তী বৃত্তীয় সমবর্তনে রূপান্তরিত করতে পারেন।

এবার দেখা যাক উপবৃত্তীয় সমবর্তনের আলোর উপর সিকি-তরঙ্গ পাতের প্রভাব কী হবে। আপনি আগেই দেখেছেন এই ধরনের সমবর্তনের ক্ষেত্রে উপবৃত্তের দুই অক্ষ বরাবর আলোকের কম্পনের উপাংশগুলি হল ঃ

$$X = E_0 \cos\theta \sin(\omega t + \alpha)$$

$$Y = \pm E_0 \sin\theta \cos(\omega t + \alpha)$$

এখন যদি আলোকরশ্মিটিকে একটি সিকি তরঙ্গপাতের মধ্য দিয়ে এমনভাবে পাঠানো যায় যাতে X উপাংশটির কম্পনের দিক পাতের আলোকীয় অক্ষ বরাবর থাকে তবে X উপাংশ অসাধরণ রশ্মি এবং Y উপাংশ সাধারণ রশ্মি হিসাবে আচরণ করবে। এবং আগের মত অসাধারণ রশ্মিটি সিকি তরঙ্গ পাত অতিক্রম করার পর সাধারণ রশ্মির তুলনায় $\frac{\pi}{2}$ দশাকোণে এগিয়ে যাবে। ফলে নির্গত উপাংশগুলি হবে।

$$X = E_0 \cos\theta \sin\left(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2}\right) = E_0 \cos\theta \cos(\omega t + \beta)$$

$$Y = \pm E_0 \sin\theta \cos(\omega t + \beta)$$

দুই সমীকরণ থেকে সময় t-কে অপনয়ন করে,

$$Y = \pm x \tan\theta$$

এটি একটি সরলরেখার সমীকরণ। আপনি প্রমাণ করতে পারেন যে Y উপাংশের কম্পন সিকিতরঙ্গ পাতের আলোকীয় অক্ষ বরাবর থাকলেও পাত থেকে নির্গত কম্পন একটি সরলরেখায় থাকবে। সুতরাং, সিকি তরঙ্গপাত যেমন রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোকে বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলোতে পরিবর্তিত করতে পারে, তেমনই বিপরীতভাবে এই পাতের দ্বারা বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয় সমবর্তনকে রৈখিক সমবর্তনে পরিণত করাও সম্ভব।

আমারা অধাতব পাতের উপযোগিতা সম্বন্ধে কোন আলোচনা করিনি। নীচের অনুশীলনী থেকে আপনি এই পাত কোন কাজে লাগে তা বুঝতে পারবেন।

অনুশীলনী 4

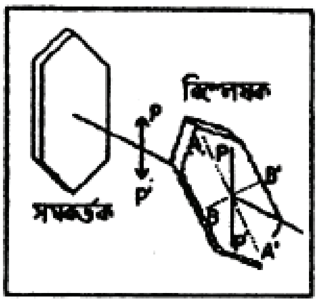
রৈখিকভাবে সমবর্তির্ত একটি আলোকরশ্মি একটি অর্ধতরঙ্গ পাতের উপর লম্বভাবে আপতিত হল। পাত থেকে নির্গত আলোকরশ্মির সমবর্তনগত অবস্থা কী হবে?

9.7 সমবর্তিত আলোকের বিশ্লেষণ (Analysis of polarised light)

9.4 ও 9.6 অনুচ্ছেদগুলি থেকে আপনি বিভিন্ন সমবর্তনগত অবস্থার আলোকরশ্মি উপাদানের উপায় জেনেছেন। কিন্তু কোন একটি আলোকরশ্মির সমবর্তনের প্রকৃতি অজ্ঞাত থাকলে আপনি রশ্মি আদৌ সমবর্তির্ত কি না এবং সমবর্তির্ত হলে সেটি রৈখিক বৃত্তীয় বা উপবৃত্তীয় এর কোন ধরনের সমবর্তির্ত রশ্মি তা কীভাবে নির্ণয় করবেন? এই অনুচ্ছেদে আমরা এর পদ্ধতিটি আলোচনা করব।

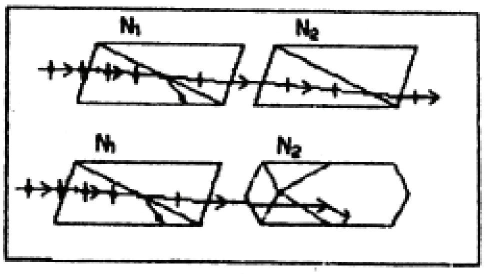
9.7.1 সমবর্তক ও বিশ্লেষক (Polariser and analyser)

আপনি আগেই দেখেছেন, নিকল প্রিজ্ম বা পোলারয়েড অসমবর্তিত আলোর একদিকের তড়িৎক্ষেত্র-উপাংশকে মূল রশ্মি থেকে বিচ্যুত করে অথবা শোষণ করে একটি নির্দিষ্ট কম্পনতলে তড়িৎক্ষেত্র বিশিষ্ট রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোতে পরিণত করে। ঐ নিকল প্রিজম্ বা পোলারয়েডকে আমরা সমবর্তক (polariser) বলি। এখন ঐ সমবর্তিত আলোকে যদি আর একটি সমাক্ষ নিকল প্রিজম বা পোলারয়েডের মধ্য দিয়ে চালনা করা যায় তবে তার ফল কি হবে?



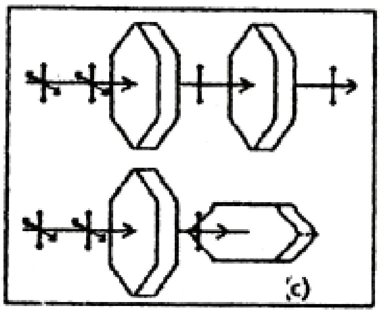
চিত্র 9.18 (a)

ধরুন সমবর্তক থেকে নির্গত আলোর তড়িৎক্ষেত্র PP' বরাবর (চিত্র 9.18) কম্পনশীলতার বিস্তার E এবং যেহেতু তীব্রতা বিস্তারের বর্গের সমানুপাতী, লেখা যায় যে আলোর তীব্রতা KE^2, যেখানে K = সমানুপাত ধ্রুবক।



চিত্র **9.18 (b)**

দ্বিতীয় নিকল প্রিজম্ বা পোলারয়েডটি AA' বরাবর কম্পনকে সঞ্চারিত হতে দেয় কিন্তু তার সমকোণে BB' বরাবর কম্পনের উপাংশকে নির্গত হতে দেয় না। ধরুন PP' ও AA'-এর মধ্যে কোণ θ। সমবর্তক থেকে আসা কম্পনকে উপাংশে ভাগ করলে, দ্বিতীয় নিকল প্রিজম্ বা পোলারয়েড থেকে নির্গত উপাংশের বিস্তার হবে $E\cos\theta$। যেহেতু আলোর তীব্রতা I বিস্তারের বর্গের সমানুপাতী, এক্ষেত্রে নির্গত আলোর তীব্রতা



চিত্র **9.18 (c)**

$$I = KE^2 \cos^2\theta \quad \text{.......... 9.19}$$

8.19 সূত্র থেকে সহজেই বোঝা যায় যে যখন $\theta = 0$, তখনই নির্গত আলোর তীব্রতা সর্বাধিক, I_0 হবে যেখানে $I_0 = KE^2$; এখন আপনি 9.19 সূত্রের পরিবর্তে লিখতে পারেন

$$I = I_0 \cos^2\theta \quad \text{.......... 9.20}$$

এই সূত্রটি ম্যালাস-এর সূত্র (Malus Law) নামে পরিচিত।

এখানে আমরা যে দ্বিতীয় নিকল প্রিজম্ বা পোলারয়েডের উল্লেখ করেছি সেটি সমবর্তক থেকে আসা আলোর সমবর্তনগত অবস্থা বিশ্লেষণে সাহায্য করে। এজন্য সেটিকে বিশ্লেষক (analyser) বলা হয়।

সমবর্তক ও বিশ্লেষকের আলোকীয় অক্ষগুলি যখন সমান্তরাল থাকে, অর্থাৎ $\theta = 0^\circ$ হয় তখন সমবর্তক ও বিশ্লেষক সমান্তরাল অবস্থায় আছে বলা হয়। আলোকীয় অক্ষগুলি যখন লম্ব অবস্থায় থাকে অর্থাৎ $\theta = 90^\circ$ হয়, তখন সমবর্তক ও বিশ্লেষক লম্বাবস্থায় crossed আছে বলা হয়। 9.20 সূত্র থেকে সহজেই বুঝতে পারেন যে এই অবস্থায় নির্গত আলোর তীব্রতা $I_0 \cos^2 90^\circ$ বা শূন্য হবে। অর্থাৎ কোন আলোই নির্গত হবে না। সমবর্তককে স্থির রেখে বিশ্লেষকটিকে যদি তাদের সাধারণ অক্ষের উপর ঘোরানো যায় তবে প্রতি আবর্তনে

বিশ্লেষক থেকে নির্গত আলোর তীব্রতা দুবার সর্বোচ্চ (যখন $\theta = 90°$, $180°$) এবং দুবার শূন্য (যখন $\theta = 90°$ ও $270°$) হবে। 9.18 (b) চিত্রে দুটি নিকল প্রিজমের এবং 9.18 (c) চিত্রে দুটি বিবর্ণী কেলাসের সমান্তরাল ও লম্ব অবস্থাগুলি দেখানো হয়েছে।

9.7.2 সমবর্তনের বিশ্লেষণ পদ্ধতি

এবার দেখা যাক, কীভাবে আমরা কোন একটি আলোকরশ্মির সমবর্তনগত অবস্থা নির্ণয় করতে পারি। এ কাজে আমাদের বিশ্লেষক ও সিকি-তরঙ্গ পাত ব্যবহার করতে হবে। পরীক্ষার বিভিন্ন ধাপগুলি আমরা একটি সারণীর সাহায্যে আলোচনা করব।

সারণী 9.1-সমবর্তিত আলোকের বিশ্লেষণ

পরীক্ষা	পর্যবেক্ষণ	সিদ্ধান্ত
1. আলোকের রশ্মিটি একটি বিশ্লেষকের মধ্য দিয়ে চালিত হল এবং বিশ্লেষকটি তার অভিলম্ব অক্ষের উপর ঘোরানো হল।	(a) বিশ্লেষকের একটি পূর্ণ আবর্তনে আলোকরশ্মিটি সম্পূর্ণ নির্বাপিত হল।	(a) আলোকরশ্মিটি রৈখিকভাবে সমবর্তিত।
	(b) বিশ্লেষকের একটি পূর্ণ আবর্তনে নির্গত আলোর তীব্রতা দুবার সর্বোচ্চ এবং দুবার সর্বনিম্ন হল, কখনই শূন্য হল না।	(b) আলোকরশ্মিটি নীচের যে কোনটি হতে পারে। (i) উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত, (ii) অসমবর্তিত রৈখিক ভাবে,সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ, (iii) অসমবর্তিত ও উপবৃত্তীয় ভাবে সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ।
যদি 1 নং পরীক্ষার পর্যবেক্ষণ (b) হয় তবে	(c) বিশ্লেষকের সব কৌণিক অবস্থানে নির্গত আলোর তীব্রতা সমান দেখা গেল।	(c) আলোকরশ্মিটি নীচের যে কোনটি হতে পারে। (i) অসমবর্তিত (ii) বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত (iii) অসমবর্তিত ও বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ।
2. আলোকরশ্মিটি প্রথমে একটি সিকি-তরঙ্গ-পাতের মধ্য দিয়ে	(a) সিকি তরঙ্গপাতের কোণ এব অবস্থানের জন্য বিশ্লেষকটি 1(a)	(a)আলোকরশ্মিটি উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত। উপবৃত্তের তথা দুটি

পরীক্ষা	পর্যবেক্ষণ	সিদ্ধান্ত
পাঠানো হল এবং পাতটির বিভিন্ন কৌণিক অবস্থানের জন্য পাতের মধ্য দিয়ে নির্গত আলো বিশ্লেষকের সাহায্যে আগের মত পরীক্ষা করা হল।	পর্যবেক্ষণের মত আলোকের রশ্মিটিবে সম্পূর্ণ নির্বাপিত করে।	সিকি তরঙ্গ পাতের আলোকীয় অক্ষের সমান্তরাল ও অভিলম্ব।
	(b) সিকি তরঙ্গ পাতের কোন অবস্থানের জন্যই বিশ্লেষককে আবর্তিত করে আলোকরশ্মিটিকে নির্বাপিত করা যায় না। কিন্তু (b) (i) পাতের দুটি পরস্পর বিপরীত অবস্থানে নির্গত রশ্মির তীব্রতা বিশ্লেষকটি আবর্তিত হলেও সর্বদা সমান থাকে।	b) (i) আলোক রশ্মিটি অসমবর্তিত ও রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ। এক্ষেত্রে রৈখিক সমবর্তন বৃত্তীয় সমবর্তনে পরিণত হওয়ায় বিশ্লেষক থেকে নির্গত রশ্মি সমান তীব্র থাকে।
যদি 1 নং পরীক্ষার (c) হয় তবে	(b) (ii) পাতের সব অবস্থানেই নির্গত রশ্মির তীব্রতা বিশ্লেষকের আবর্তনের সঙ্গে ওঠানামা করে।	(b) (ii) আলোকরশ্মিটি অসমবর্তিত ও উপবৃত্তীয় ভাবে সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ।
3. এক্ষেত্রেও 2নং পরীক্ষার মত আলোকরশ্মিটিকে সিকি-তরঙ্গপাতের মধ্য দিয়ে পর্দায়ে সেটির বিভিন্ন কৌণিক অবস্থানের জন্য নির্গত আলো বিশ্লেষকের সাহায্যে আগের মত পরীক্ষা করা হল।	(a) সিকি তরঙ্গপাতের যে কোন অবস্থানের জন্য বিশ্লেষকের দুই বিপরীত অবস্থানে আলো সম্পূর্ণ নির্বাপিত হয়।	(a) আলোকরশ্মিটি বৃত্তীয় ভাবে সমবর্তিত এবং সিকি তরঙ্গ পাতটি তার যে কোন কৌণিক অবস্থানে সেটিকে রৈখিক সমবর্তনে পরিণত করে।
	(b) বিশ্লেষকটির আবর্তনের সঙ্গে নির্গত আলোকের তীব্রতা (1b) পর্যবেক্ষণের মত সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন মানের মধ্যে ওঠানামা করে।	(b) আলোকরশ্মিটি অসমবর্তিত ও বৃত্তীয় ভাবে সমবর্তিত আলোর মিশ্রণ।

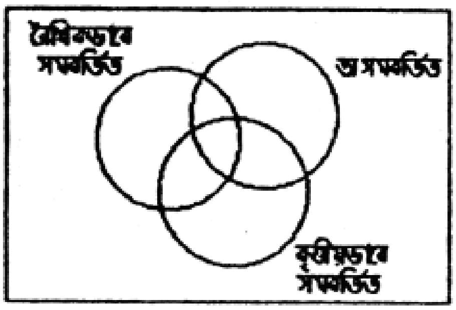
পরীক্ষা	পর্যবেক্ষণ	সিদ্ধান্ত
	(c) বিশ্লেষকের আবর্তনের সঙ্গে নির্গত আলোর তীব্রতার কোন পরিবর্তন হয় না।	(c) আলোকের রশ্মিটি সম্পূর্ণ অসমবর্তিত।

আপনি নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে উপরের সারণীতে আমরা রৈখিক, বৃত্তীয় ও উপবৃত্তীয় আলোকের সংমিশ্রণের কথা আলোচনা করিনি। এর কারণ এই তিন ধরণের সমবর্তিত আলোকের যে কোন দুটির মিশ্রণে উপবৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলোক উৎপন্ন হয়। এজন্য এই মিশ্রণগুলিকে আলাদাভাবে বিবেচনা করার প্রয়োজন হয় না।

এবার একটি অনুশীলনীর সাহায্যে যা পড়লেন সেটির চর্চা করে নিন।

অনুশীলনী 5

কেবলমাত্র রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোকরশ্মিকেই বিশ্লেষক দ্বারা সম্পূর্ণভাবে নির্বাপিত করা যায়। পাশের চিত্রে বৃত্তগুলি অসমবর্তিত, রৈখিকভাবে সমবর্তিত ও বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলো এবং সেগুলির সমপতিত অঞ্চলগুলি দুই বা তিন ধরণের আলোর মিশ্রণ বোঝাচ্ছে। যে সব ক্ষেত্রে একটি সিকি তরঙ্গ পাতের সাহায্যে আলোকরশ্মিটিকে রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোতে রূপান্তরিত করা সম্ভব সেখানে [✓] চিহ্ন এবং যেখানে তা সম্ভব নয় সেখানে [×] চিহ্ন দিন।



চিত্র 9.19

9.8 সমবর্তনের ব্যবহারিক প্রয়োগ

সমবর্তিত আলোক এবং সমবর্তক ও বিশ্লেষকের ব্যবহারিক প্রয়োগের অনেক উদাহরণ দেখা যায়। এখানে আমরা কয়েকটি প্রয়োগ সংক্ষেপে আলোচনা করব।

(ক) পোলারয়েড রোদ চশমা ঃ রৌদ্রালোকিত পিচের রাস্তা, জলাশয় প্রভৃতি থেকে প্রতিফলিত হয়ে যে আলো আমাদের চোখে আসে তার অনেকটাই রৈখিকভাবে সমবর্তিত থাকে। 9.4.1 অংশের আলোচনা থেকে এর কারণ বোঝা যাবে। এই সমবর্তিত আলোকের কম্পন অনুভূমিক থাকে। পোলারয়েড রোদ-চশমায় কাচের পরিবর্তে দ্বিবর্ণী পোলারয়েড পাত ব্যবহার করা হয়, যেটি অনুভূমিক কম্পনকে শোষণ করে এবং উল্লম্ব কম্পনের আলোকে সঞ্চারিত হতে দেয়। এর ফলে আমাদের চোখ প্রতিফলিত আলোর ঝকমকানি থেকে রক্ষা পায় এবং চারিদিকের দৃশ্যের প্রকৃত বর্ণ দেখতে পাওয়া যায়।

(খ) **আলোর তীব্রতা নিয়ন্ত্রক ফিল্টার ঃ** আপনি আগেই জেনেছেন যে একজোড়া সমবর্তক যদি এমনভাবে রাখা যায় যে তাদের আলোকীয় অক্ষগুলি সমান্তরাল অবস্থা থেকে θ কোণে বিচ্যুত থাকে তবে দুটির মধ্য দিয়ে সঞ্চারিত আলোকর তীব্রতা $\cos^2\theta$এর সমানুপাতী হয়। এই নীতির উপর ভিত্তি করে একজোড়া রৈখিক সমবর্তক পেলারয়েড পাত্র ব্যবহার করে বিশেষ ধরণের চশমা, ট্রেনের কামরা ও জাহাজের জানালা প্রভৃতি তৈরী করা হয়। একটি পোলারয়েড পাতকে স্থির রেখে ও অন্যটি ঘুরিয়ে আলোকের সঞ্চারণ সর্বোচ্চ মান থেকে 10^4 গুণ পর্যন্ত কমানো সম্ভব হয়।

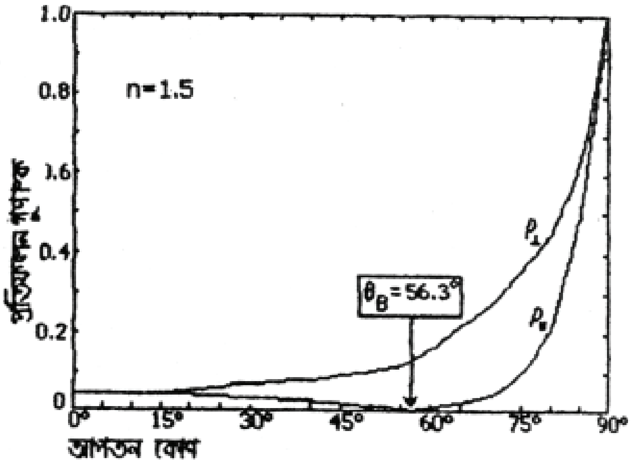
(গ) কার-সেল Kercell আলোকদ্বার ঃ

নাইট্রোবেনজিনের মত কোন কোন বস্তু সাধারণভাবে দ্বৈধ প্রতিসারক না হলেও তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে দ্বৈধ প্রতিসারকে পরিণত হয়। ধরা যাক দুটি নিকল প্রিজ্‌ম বা পোলারয়েড লম্বাবস্থায় আছে এবং উভয়ের মধ্যে একটি স্বচ্ছ পাত্রে নাইট্রোবেনজিন রাখা আছে। এই অবস্থায় কোন আলোকরশ্মি সমবর্তক ও বিশ্লেষকের মধ্য দিয়ে নির্গত হতে পারবে না। এখন যদি দুইপাশে রাখা দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে নাইট্রোবেনজিনকে দ্বৈধ প্রতিসারকে পরিণত করা হয় তবে সমবর্তক থেকে আসা রৈখিক সমবর্তন বিশিষ্ট রশ্মি নাইট্রোবেনজিনের মধ্যে উপবৃত্তীয় সমবর্তন লাভ করবে এবং ঐ আলোর কিছু অংশ লম্বাবস্থায় রাখা বিশ্লেষকের মধ্য দিয়ে নির্গত হবে। তড়িৎদ্বারে যদি রেডিও কম্পাঙ্কের পরবর্তী বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয় তবে যখনই ঐ বিভবের মান শূন্য হবে তখন কোন আলো নির্গত হবে না কিন্তু বিভব পজিটিভ বা নেগেটিভ হলেই আলো নির্গত হবে। এইবাবে নির্গত আলোর তীব্রতা রেডিও কম্পাঙ্কের মত উচ্চ কম্পাঙ্কে ওঠানামা করবে। তড়িৎদ্বার সমেত নাইট্রোবেনজিন কোষটি কার অভিক্রিয়াকে Kerr effect ভিত্তি করে ক্রিয়া করে এবং এটি কার সেল নামে পরিচিত। আলোকের গতিবেগ সূক্ষ্মভাবে নির্ণয় করতে কার-সেল আলোকদ্বার বহুক্ষেত্রে ব্যবহৃত হয়েছে।

9.9 সারাংশ

আলোকতরঙ্গে কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্রটিকে যদি একটি ভেক্টর হিসাবে দেখা যায় তবে সাধারণ আলোকে সেকটরের প্রান্তবিন্দুটি কোন নির্দিষ্টবক্ররেখার উপর থাকে না; যখন ঐ প্রান্তবিন্দু একটি সরলরেখা অথবা উপবৃত্ত অথবা বৃত্তের উপর থাকে তখনই ঐ আলোকে যথাক্রমে রৈখিক, উপবৃত্তীয় ও বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলো বলা হয় এবং আলোর ঐ বিশেষ ধর্মকেই বলা হয় সমবর্তন। সমবর্তিত তরঙ্গকে বিশেষ গাণিতিক সমীকরণ দিয়ে নির্দেশিত করা যায়।

এই এককে রৈখিক সমবর্তন উৎপাদনের তিনটি উপায় বর্ণিত হয়েছে। এগুলি হল প্রতিফলনের দ্বারা বৈধ প্রতিসরণের দ্বারা এবং বিবর্ণী কেলাসের সমবর্তন। একথা কেলাসে যখন আলোকতরঙ্গ প্রবেশ করে তখন সাধারণভাবে সেটি সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিতে ভেঙে যায়। সাধারণ রশ্মিটি স্নেলের সূত্র অনুযায়ী প্রতিসৃত হলেও অসাধারণ রশ্মিটির আবরণে আপাতদৃষ্টিতে কিছু বৈষম্য দেখা যায়। তবে কেলাসের মধ্যে একটি বিশেষ দিক বরাবর দুটি রশ্মিই একই বেগে গমন করে এবং এই দিকটিকে আমরা আলোকীয় অক্ষ বলি। হাইগেন্সএর পদ্ধতিতে তরঙ্গমুখ অঙ্কন করে দুটি রশ্মির প্রতিসরণ সম্পূর্ণরূপে ব্যাখ্যা করা যায়।



চিত্র 9.5

একক কেলাস থেকে সিকি-তরঙ্গ-পাত নির্মান করা যায়। কেলাসের আলোকীয় অক্ষটি এই পাতের দুই তলের সমান্তরাল থাকে এবং পাতটির বেধ এমন হয় যাতে আলোকরশ্মি পাতের মধ্য দিয়ে সঞ্চারিত হলে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক চতুর্থের সমান আলোকীয়, পরের পার্থক্য থাকে। এই পাতের সাহায্যে রৈখিকভাবে সমবর্তিত তরঙ্গকে উপবৃত্তীয় বা বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত তরঙ্গে রূপান্তরিত করা যায়।

সমবর্তনকারী কোন বস্তুকে সমবর্তিত আলোকের বিশ্লেষণেও ব্যবহার করা যায়। যে আলোর সমবর্তনের অবস্থা অজ্ঞাত সেটির বিশ্লেষণের পদ্ধতি এবং সমবর্তনের ব্যবহারিক প্রয়োগও এই এককে আলোকিত হয়েছে।

9.10 সর্বশেষ প্রশ্নাবলী

১। সমবর্তিত ও অসমবর্তিত আলোর মধ্যে প্রভেদ কী? আলোকের সমবর্তনকে কখন রৈখিক, উপবৃত্তীয় বা বৃত্তীয় বলা হয়?

২। আলোকের রৈখিক সমবর্তন ঘটানোর উপায়গুলি লিখুন। সম্পূর্ণ রৈখিক সমবর্তন ঘটাতে এই পদ্ধতিগুলি কতটা কার্যকরী?

৩। একটি একবর্ণী আলোকরশ্মি একটি একক্ষ কেলাসের সমতল পৃষ্ঠে তির্যকভাবে আপতিত হল। প্রতিসরণের পর সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মিগুলি হাইগেনস্রে পদ্ধতি অঙ্কন করুন, যখন আলোকীয় অক্ষটি (১) কেলাসের পৃষ্ঠের সঙ্গে লম্বভাবে (২) কেলাসের পৃষ্ঠতলে, আপতনতলের সঙ্গে সমান্তরালভাবে এবং (৩) কেলাসের পৃষ্ঠতলে, আপতনতলের অভিলম্বে রয়েছে।

৪। সিকি তরঙ্গ পাত ও অর্ধতরঙ্গ পাত কী? এগুলি কীভাবে নির্মিত হয়? এ ধরনের কোন একটি পাত কি সব তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্যই কার্যকরী হয়?

৫। রৈখিকভাবে সমবর্তিত আলোকে উপবৃত্তীয় বা বৃত্তীয়ভাবে সমবর্তিত আলোতে রূপান্তরিত করার পদ্ধতি বর্ণনা করুন।

৬। কোন একটি একবর্ণী আলোকরশ্মির সমবর্তনগত অবস্থা কীভাবে নির্ণয় করবেন?

৭। নিচের সারণীর প্রথম স্তম্ভে যে ধরনের সমবর্তনের উল্লেখ করা হয়েছে, সেটিকে দ্বিতীয় স্তম্ভে উল্লিখিত সমবর্তনে রূপান্তরিত করতেহবে। এজন্য আপনি (ক) সমবর্তক নিকল প্রিজম বা পোলারয়েড (খ) সিকিতরঙ্গপাত ও (গ) অর্ধতরঙ্গপাত — এগুলির কোনটি বা কোনগুলি ব্যবহার করবেন?

৮। সমবর্তকের একটি ব্যবহারিক প্রয়োগের বর্ণনা দিন।

9.11 উত্তরমালা

অনুশীলনী

1. $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$, যেটি একটি বৃত্তের সমীকরণ। সুতরাং আলোকতরঙ্গের সমবর্তন বৃত্তীয়। এছাড়া,

$$\hat{E} = \hat{i}\,E_0 \sin(\omega t + kz) + \hat{j}\,E_0 \cos(\omega t + kz)$$

$$\frac{d\hat{E}}{dt} = \hat{i}\,\omega E_0 \cos(\omega t + kz) - \hat{j}\,\omega E_0 \sin(\omega t + kz)$$

$$\therefore \hat{E} \times \frac{d\hat{E}}{dt} = -\hat{k}\,\omega E_0^2$$

9.3 (ii) এর আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে এটি দক্ষিণাবর্তী বৃত্তীয় সমবর্তন নির্দেশ করছে।

2.i) আপতন কোণ $\theta = 60^\circ$, সুতরাং $\cos\theta = 0\cdot 5$ এবং প্রতিসরণ কোণ $= \varphi$ হলে,

$$\sin\varphi = \sin 60^\circ \div \frac{3}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{2}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \varphi = 35\cdot 3^\circ,\ \cos\varphi = 0\cdot 816$$

9.8 (a), (b) সূত্র ব্যবহার করে,

$$\rho_{11} = \left(\frac{1\cdot5\times0\cdot5-0\cdot816}{1\cdot5\times0\cdot5+0\cdot816}\right)^2 = \cdot0018$$

$$\rho_1 = \left(\frac{0\cdot5-1\cdot5\times0\cdot816}{0\cdot5+1\cdot5\times0\cdot816}\right)^2 = 1\cdot76$$

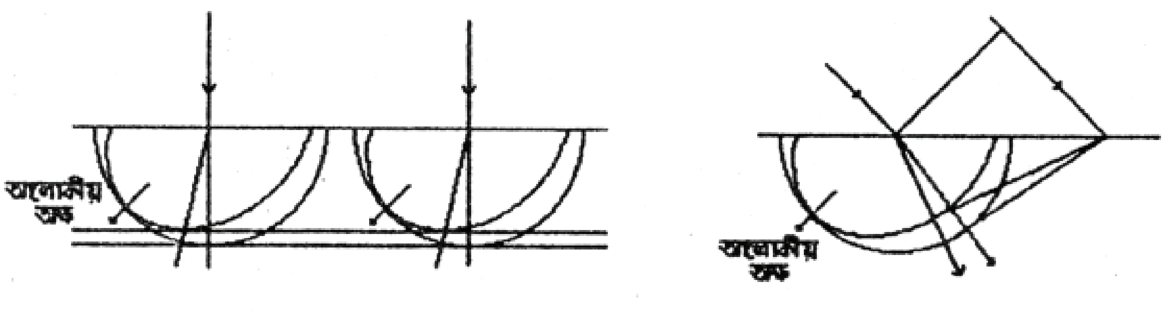
লক্ষ্য করুন যে এক্ষেত্রে আপতন কোণটি ব্রুস্টার কোণ ($\tan^{-1}1.5$ ও $56\cdot3^\circ$)এর কাছাকাছি হওয়ায় ρ_{11} প্রায় শূন্য। অর্থাৎ প্রতিফলিত রশ্মিটি প্রায় সম্পূর্ণ রৈখিকভাবে সমবর্তিত।

2. (a) ক্যানাডা বালসাম স্তরটি সাধারণ রশ্মিটিকে পূর্ণ প্রতিফলিত করে ও মূল রশ্মি থেকে বিচ্যুত করে।

(b) নিকল প্রিজমের তুলনায় পোলারয়েড পাত আকারে ছোট, আকৃতিতে সুবিধাজনক এবং যে কোনও মাপে পাওয়া যায়। কোন যন্ত্রের মধ্যে পোলারয়েড পাত সহজে বসানো যায়। এটি কারখানায় যে কোনও পরিমাণে উৎপাদন করা যায় এবং নিকল প্রিজমের চেয়ে এটি অনেক সুলভ।

(c) আলোকীয় অক্ষের লম্ব অভিমুখে সাধারণ রশ্মি ও অসাধারণ রশ্মির বেগ সর্বাপেক্ষা পৃথক হয়।

3. 9.20 (a), (b) চিত্রে পজিটিভ কেলোসের ক্ষেত্রে সাধারণ ও অসাধারণ রশ্মির গতিপথ দেখানো হল।



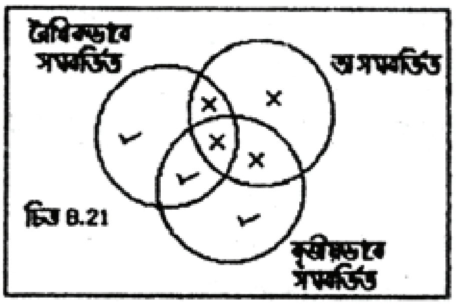
চিত্র **9.20** (a) ও (b)

4. 9.16 (a) ও (b) সমীকরণ দুটির সঙ্গে তুলনা করলে দেখা যাবে অর্ধতরঙ্গ পাত থেকে নির্গত হওয়ার পর অসাধারণ ও সাধারণ রশ্মির সমীকরণগুলি হবে:

$$X = E_0 \cos\theta \sin(\omega t + \alpha)$$

$$Y = E_0 \sin\theta \sin(\omega t + \alpha - \pi) = -E_0 \sin\theta \sin(\omega t + \alpha)$$

সময় t কে অপনয়ন করে, $Y = -x\tan\theta$ এটিও একটি সরলরেখার সমীকরণ, তবে এটির নতিকোণ $-\theta$ অর্থাৎ মূল কম্পনের বিপরীত।



চিত্র **9.21**

একক 10 ❑ আলোকীয় ঘূর্ণন

গঠন

10.1 প্রস্তাবনা

পূর্বের এককে আলোকের সমবর্তন সম্বন্ধে বিস্তারিত তথ্য জেনেছেন। বর্তমান এককে তলীয় সমবর্তিত আলোর একটা গুরুত্বপূর্ণ ধর্ম সম্পর্কে অলোচনা করা হবে।

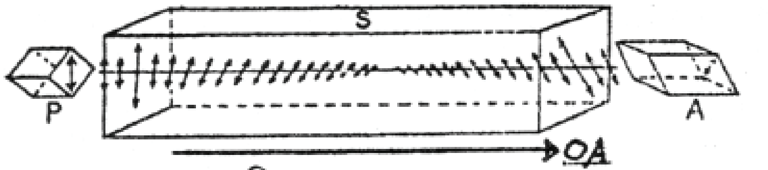
কোনও তলীয় সমবর্তিত আলোকরশ্মি যখন কোন আলোক-সক্রিয় মাধ্যমের (যথা চিনির দ্রবণ) মধ্য দিয়া যায় তখন উহার সমবর্তন তলের ঘূর্ণন হয়। কঠিন পদার্থেও (যেমন কোয়ার্টর্স কেলাসে) এই ধরনের ঘূর্ণন দেখা যায়। পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে দ্রবণে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন এতে সক্রিয় দ্রাবের সমানুপাতিক। সুতরাং সমবর্তন তলের ঘূর্ণন মেপে দ্রাবের পরিমাণ নির্ণয় করা যায়। শিল্পক্ষেত্রে দ্রবণে চিনির পরিমাণ এই পদ্ধতিতে মাপা যায়। ইহাকে বলা হয় শর্করামিতি (Saccharimetry)।

উদ্দেশ্য ঃ বর্তমান একক পাঠের পরে আপনারা

- আলোক সক্রিয় মাধ্যমের একটি গুরুত্বপূর্ণ ধর্ম এবং আলোকীয় ঘূর্ণন মাপার পদ্ধতি জানতে পারবেন।
- আপনি কোন অজানা আলোক সক্রিয় দ্রবণে দ্রাবের পরিমাণ স্থির করতে পারবেন।

10.2 আলোকীয় ঘূর্ণনের প্রকৃতি ও বৈশিষ্ট্য

যখন কোন বিশ্লেষককে (চিত্র 10.2.1 তে 'A') সমবর্তক P এর সাপেক্ষে ক্রমিত অবস্থায় রাখা হয়, তখন 'A' এর ভিতর দিয়ে কোন আলো যায় না এবং দৃষ্টিক্ষেত্র অন্ধকারাচ্ছন্ন বলে মনে হয়। প্রকৃতিতে কিছু আলোক-সক্রিয় পদার্থ (s) আছে (যেমন কোয়ার্টস্ কেলাস বা চিনির দ্রবণ) যা দুটি ক্রসিত P এবং A নিকলের মধ্যে রাখলে, উহা বিশ্লেষক A এর ভিতর দিয়ে কিছু আলো পাঠাতে পারে। A কে কিছুটা ঘুরিয়ে A থেকে নির্গত আলো সম্পূর্ণ নির্বাপিত করা যায়।



চিত্র নং 10.2.1

P-সমবর্তক, A-বিশ্লেষক, S-আলোক সক্রিয় পদার্থ, OA-আলোকাক্ষ।

P ও A-ক্রসিত নিকল।

পদার্থ S এর এই ধর্মকে বলে আলোক সক্রিয়তা এবং যে সব পদার্থে এই ধর্ম দেখা যায়, তাদের বলে আলোক সক্রিয়। যেহেতু আলোক সক্রিয় পদার্থের ভিতর দিয়ে যাওয়া আলো বিশ্লেষককে ঘুরিয়ে সম্পূর্ণ নির্বাপিত করা যায়, কাজেই আলোক সক্রিয় মাধ্যম আলোর তলীয় সমবর্তিত প্রকৃতি ধ্বংস করেনি। আলোক সক্রিয় মাধ্যম শুধুমাত্র তলীয় সমবর্তিত আলোর কম্পন তলকে কিছুটা ঘুরিয়ে দিয়েছে। এই ঘটনাকে বলে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন, অথবা সংক্ষেপে একে বলে ঘূর্ণনী সমবর্তন। কম্পন তলের ঘূর্ণন বামদিকে অথবা ডানদিকে হতে পারে। কোন দর্শক বিশ্লেষক থেকে নির্গত আলোক রশ্মির দিকে তাকালে, যদি ঘূর্ণন ঘড়ির কাঁটার ঘোরার দিকে হয়, তবে ঘূর্ণনকে ধনাত্মক অথবা দক্ষিণাবর্তী বলে। যে আলোক সক্রিয় পদার্থ এই ধরনের ঘূর্ণন ঘটায় তাকে দক্ষিণাবর্তনী পদার্থ বলে। ঘড়ির কাঁটা ঘোরার বিপরীতে হলে ঘূর্ণনকে ঋণাত্মক বা বামাবর্তী বলে এবং পদার্থকে বামাবর্তনী বলে।

কিছু কেলাস (যেমন কোয়ার্টস্), তরল পদার্থ (যেমন টারপেন্টাইন) এবং কিছু জৈব যৌগিক পদার্থের দ্রবণ (যেমন চিনির দ্রবণ) তলীয় সমবর্তিত আলোর সমবর্তন তলের এইরূপ ঘূর্ণন ঘটায়। কোয়ার্টস্ কেলাস দক্ষিণাবর্তনী এবং বামাবর্তনী উভয় প্রকারই দেখা যায়। কোয়ার্টস এর ক্ষেত্রে আলো আলোকাক্ষ বরাবর যাওয়া প্রয়োজন, নচেৎ দ্বিপ্রতিসরণের জন্য পর্যবেক্ষণে জটিলতা দেখা যায় (চিত্র নং 10.2.1 দেখুন)।

Biot অত্যন্ত যত্নের সঙ্গে পদার্থের আলোক সক্রিয়তা পরীক্ষা করেন এবং পরীক্ষার ফলে দেখতে পান যে (i) নির্দিষ্ট উষ্ণতায় এবং নির্দিষ্ট রং এর আলোর ক্ষেত্রে, সমবর্তন তলের ঘূর্ণন অতিক্রান্ত আলোক সক্রিয়

মাধ্যমের বেধের সমানুপাতিক।

(ii) দুই বা একাধিক আলোক সক্রিয় মাধ্যমের জন্য উৎপন্ন মোট ঘূর্ণন ইহাদের প্রত্যেকের ঘূর্ণনের বীজগাণিতিক সমষ্টির সমান।

(iii) ঘূর্ণনের পরিমাণ আলোক সক্রিয় মাধ্যমের উষ্ণতা ও আপতিত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উপর নির্ভরশীল এবং ঘূর্ণন প্রায় তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হয়।

আপেক্ষিক ঘূর্ণন ঃ

আপেক্ষিক ঘূর্ণন (α) দ্বারা কোন পদার্থের আলোক সক্রিয়তা মাপা হয়। এক মিলিমিটার বেধ বিশিষ্ট কোন কঠিন আলোক সক্রিয় পদার্থ ডিগ্রির মাপে যে ঘূর্ণন ঘটায় তাকে আলোক সক্রিয় পদার্থের আপেক্ষিক ঘূর্ণন বলে। দ্রবণের ক্ষেত্রে α এর সংজ্ঞা নিম্নরূপ ঃ

$$\alpha = \frac{\text{দ্রবণের প্রতি এক ডেসিমিটার দৈর্ঘ্যের জন্য ঘূর্ণন}}{\text{প্রতি এক ঘন সেন্টিমিটার দ্রবণে গ্রাম এককে উপস্থিত সক্রিয় পদার্থ}}$$

আপেক্ষিক ঘূর্ণন ধ্রুবক নয়; নির্দিষ্ট পদার্থের ক্ষেত্রে ইহা উষ্ণতা এবং আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে, ইহা প্রায় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বর্গের ব্যস্তানুপাতী হয়। কাজেই দৃশ্যমান আলোর ক্ষেত্রে, α এর মান বৃহত্তম হয় বেগুনী আলোর ক্ষেত্রে এবং ক্ষুদ্রতম হয় লাল আলোর ক্ষেত্রে। আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উপর আপেক্ষিক ঘূর্ণনের নির্ভরতাকে বলে ঘূর্ণনী বিচ্ছুরণ।

দ্রবণের ঘনত্বের উপর নির্ভর করে বলে, সমবর্তন তলের ঘূর্ণন মেপে কোন দ্রবণের ঘনত্ব অর্থাৎ দ্রবণে কি পরিমাণ আলোক সক্রিয় পদার্থ আছে তা নির্ণয় করা যায়।

আলোক সক্রিয় কেলাস দুভাগে ভাগ করা যায় ঃ

(i) কেলাস আলোক সক্রিয়, কিন্তু ইহার দ্রবণ অথবা গলিত অবস্থায় আলোক সক্রিয় নয় (যেমন, কোয়ার্টস্, সোডিয়াম্ ক্লোরেট্, জিঙ্ক সালফেট্ ইত্যাদি); এবং (ii) কঠিন পদার্থ ও উহার দ্রবণ অথবা গলিত অবস্থায় উভয়েই আলোক সক্রিয় (ইক্ষুচিনি, টারটারিক অ্যাসিড ইত্যাদি)।

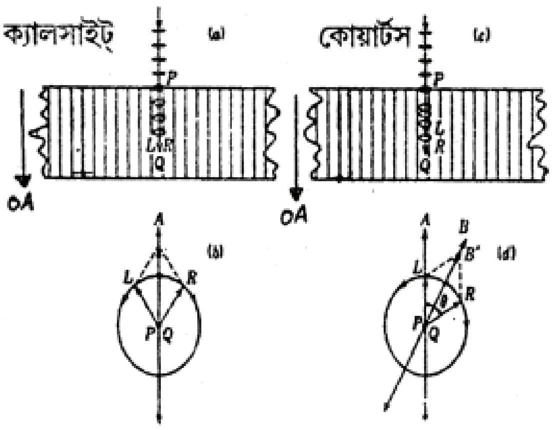
প্রথমোক্ত ক্ষেত্রে কেলাসে পরমাণুগুলো কুন্ডলিত অবস্থায় সাজানো (helical distribution) থাকে পরমাণুগুলোর এই বিশেষ ধরণের বিন্যাস আলোক সক্রিয়তার জন্য দায়ী। দ্রবণে পরমাণুগুলোর বিন্যাস নষ্ট হয়ে যায়, ফলে দ্রবণের আলোক সক্রিয়তা থাকে না।

দ্বিতীয়ক্ষেত্রে, অণুর মধ্যে পরমাণুগুলোর অপ্রতিসম বিন্যাসই আলোক সক্রিয়তার জন্য দায়ী।

10.3 Fresnel এর ঘূর্ণনের তত্ত্ব

আলোকাক্ষের দিকে (যেদিকে আপতিত আলোর দ্বিপ্রতিসরণ হয় না) পদার্থের আলোক সক্রিয়তার

প্রথম ব্যাখ্যা দেন Fresnel। যখন কোন তলীয় সমবর্তিত আলো আলোকাক্ষের দিকে কোন আলোক সক্রিয় মাধ্যমে প্রবেশ করে তখন উহা দুটি সমান কম্পাংক বিশিষ্ট বিপরীত বৃত্তীয় সমবর্তিত কম্পনে বিভক্ত হয়। ইহাদের একটি ঘড়ির কাঁটার দিকে (R) এবং অপরটি বিপরীত দিকে L ঘোরে। আলোক সক্রিয় নয়।



চিত্র **10.3.1** OA-আলোকাক্ষ

এমন কোন মাধ্যমে (যেমন ক্যালসাইট্ কেলাসে) দক্ষিণাবর্তী (R) ও বামাবর্তী বৃত্তীয় কম্পন দুটি একই গতিবেগে যায় (চিত্র নং 10.3.1 (a) দেখুন)। কাজেই গতিপথের কোন বিন্দুতে উভয় বৃত্তীয় কম্পন একই সময়ে উপস্থিত হয় এবং উহাদের লব্ধি কম্পন প্রাথমিক আপতন তলেই থাকে (চিত্র নং 10.3.1 (b) দেখুন। অর্থাৎ এক্ষেত্রে সমবর্তন তলের কোন ঘূর্ণন হয় না।

কিন্তু কোন আলোক সক্রিয় মাধ্যমে, যথা কোয়ার্টস্ কেলাসে, R এবং L বৃত্তীয় কম্পন দুটি সামান্য পৃথক গতিবেগে সামনের দিকে অগ্রসর হয়। দক্ষিণাবর্তনী কোয়ার্টস্ কেলাসে দক্ষিণাবর্তী (আলোর গতির বিপরীত দিকে দেখলে) কম্পন অপেক্ষাকৃত দ্রুতবেগে যায় এবং বামাবর্তনী কোয়ার্টসে বামাবর্তী কম্পন অপেক্ষাকৃত দ্রুতবেগে যায়।

কোন দক্ষিণাবর্তনী কোয়ার্টস কেলাসে আপতিত তলীয় সমর্তিত আলোর গতিপথে কোন বিন্দু Q ধরা যাক (চিত্র নং 10.3.1 (c) দেখুন)। 10.3.1 (d) নং চিত্রে AP আপতিত কম্পন তল ও কম্পনের বিস্তার নির্দেশ করে। দক্ষিণাবর্তী উপাংশ R প্রথমে Q বিন্দুতে উপস্থিত হয় এবং বামাবর্তী উপাংশ (L) আসার আগে (R) এর কৌণিক সরণ হয় θ। এই মুহূর্তে বৃত্তীয় গতিদুটির একটি R বিন্দু থেকে এবং অপরটি L বিন্দু থেকে সমান কম্পাংক নিয়ে বিপরীত দিকে যাত্রা শুরু করে। ফলে B' বিন্দু নির্দিষ্ট সরলরেখা BQ বরাবর

কাঁপতে থাকে এবং এই কম্পনের বিস্তার ও কম্পাংক প্রাথমিক কম্পন AP এর ন্যায় হয়। ইহা বিন্দুতে আলোর কম্পন নির্দেশ করে। অর্থাৎ আলো কেলাসের তলে অবস্থিত P বিন্দু থেকে Q বিন্দুতে যাবার সময়ে সমবর্তন তল AP থেকে BQ তে ঘোরে (চিত্র নং 10.3.1 (d)) বা তলের ঘূর্ণন হয় $\frac{\theta}{2}$ পরিমাণ। উপরের আলোচনায় আপনারা নিশ্চয়ই বুঝতে পারছেন যে আলো যত কেলাসের ভিতর অগ্রসর হবে ততই কম্পন তলের ঘূর্ণন বাড়তে থাকবে, অর্থাৎ ঘূর্ণন কেলাসের বেধের সমানুপাতী হবে। গাণিতিকভাবে θ এর মান নিম্নরূপে বার করা যায়।

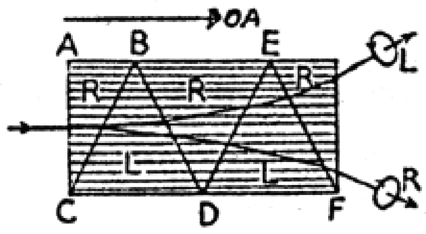
ধরা যাক μr ও μl যথাক্রমে, দক্ষিণাবর্তী ও বামাবর্তী আলোর ক্ষেত্রে কেলাসের প্রতিসরাংক এবং d হোল অতিক্রান্ত কেলাসের বেধ। অতএব, কেলাস থেকে নির্গত বৃত্তীয় কম্পনদ্বয়ের মধ্যে দশাকোণের পার্থক্য θ হলে, $\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(\mu r. \sim \mu l.)d$ .... (10.3.1)

λ = আপতিত তরলীয় সমবর্তিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য।

আলোক সক্রিয় কেলাস থেকে নির্গত বৃত্তীয় কম্পনদ্বয় (বিপরীতমুখী) সমবেগে যায় এবং তারা সংযোজিত হয়ে একটি রৈখিক কম্পন (যার কম্পন তল BQ বরাবর) সৃষ্টি করে, ইহা আপতিত (AP) কম্পন তলের সঙ্গে $\frac{\theta}{2}$ কোণ করে।

Fresnel তত্ত্বের সত্যতা যাচাই পরীক্ষা।

নিজের তত্ত্বের অঙ্গীকার যাচাই করার জন্য Fresnel কতকগুলি দক্ষিণাবর্তী (R) ও বামাবর্তী (L) কোয়ার্টস্ প্রিজম একান্তররূপে (alternately) সাজিয়ে একটি আয়তাকার ব্লক তৈরি করেন (চিত্র নং 10.3.2 দেখুন)।



চিত্র **10.3.2** OA-আলোকাক্ষ

প্রতিটি প্রিজমের ক্ষেত্রে আলোকাক্ষ ভূমির সঙ্গে সমান্তরাল। ধরা যাক প্রথম প্রিজমের (AC) তলে

কোন তলীয় সমবর্তিত আলো লম্বভাবে আপতিত। এই আলো ABC প্রিজমের মধ্যে দুটি বিপরীতমুখী দক্ষিণাবর্তী (R) ও বামাবর্তী (L) বৃত্তীয় কম্পনে বিভাজিত হয় এবং ABC দক্ষিণাবর্তী বলে R কম্পনজাত আলো অপেক্ষাকৃত দ্রুতগামী হয় এবং AB ভূমির বিপরীত দিকে বিচ্যুত হয়। BC তল অতিক্রম করার পর R কম্পনের গতিবেগ L কম্পনের গতিবেগ অপেক্ষা কম হয়, ফলে R কম্পন ভূমির দিকে ও L কম্পন ভূমি CD এর বিপরীত দিকে বিচ্যুত হয়। এভাবে পরবর্তী সংযোগতল (BD,DE ইত্যাদি) অতিক্রমের পর (R) ও L বৃত্তীয় কম্পনদ্বয়ের ব্যবধান আরও বৃদ্ধি পায়। পরীক্ষার সাহায্যে প্রমাণ করা যায় যে আয়তাকার ব্লক থেকে নির্গত আলোকরশ্মিদ্বয়ের একটি দক্ষিণাবর্তী R এবং অপরটি বামাবর্তী (L)। এভাবে Fresnel তার তত্ত্বের সত্যতা যাচাই করেন।

10.4 সমবর্তন ঘূর্ণনমাপী বা পোলারিমিটার (Polarimeter)

যে যন্ত্রের সাহায্যে কোন সমবর্তন তলের ঘূর্ণন মাপা হয় তাকে সমবর্তন ঘূর্ণনমাপী বলে। এর প্রয়োজনীয় অংশগুলো হোল : একটি সমবর্তক, একটি বিশ্লেষক এবং তরল আলোক সক্রিয় পদার্থ রাখার জন্য একটি নল। কোন নির্দিষ্ট অবস্থা থেকে বিশ্লেষককে যে কোণে ঘোরালে, বিশ্লেষক থেকে নির্গত আলোর প্রাবল্য সর্বাপেক্ষা কম হয় অথবা বিশ্লেষক থেকে নির্গত আলো সম্পূর্ণ নির্বাপিত হয় তাহাই সমবর্তন তলের ঘূর্ণন নির্দেশ করে।

যখন কোন চিনির দ্রবণের ঘনত্ব মাপার জন্য ব্যবহার করা হয়, তখন উপরোক্ত যন্ত্রকে বলা হয় শর্করামাপী।

উপরোক্ত যন্ত্রের সহজ ব্যবস্থায় যদি কেবলমাত্র একটি আলোক সমবর্তক ও একটি বিশ্লেষক রাখা যায় তবে দেখা যায় যে বিশ্লেষককে বেশ কিছু পরিমাণ ঘোরালেও নির্গত আলোর নিম্নতম প্রাবল্যের অবস্থার বিশেষ তারতম্য হয় না। অর্থাৎ যন্ত্রটি সুবেদী হয় না। সমবর্তন ঘূর্ণন সূক্ষ্মভাবে মাপার জন্য নিম্নলিখিত তিনপ্রকার বিশেষ ব্যবস্থার সাহায্য নেওয়া হয় : (i) Laurent এর অর্ধছায়া সমবর্তন ঘূর্ণনমাপী, (ii) Lippich এর সমবর্তন ঘূর্ণনমাপী এবং (iii) যুগ্ম কোয়ার্টস।

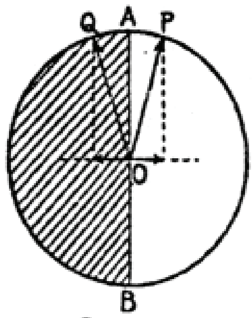
(i) Laurent এর অর্ধছায়া ঘূর্ণনমাপী।

ইহা আলোকাক্ষের সঙ্গে সমান্তরাল ভাবে কাটা একটি অর্ধবৃত্তাকার কোয়ার্টস্ প্লেট্ এবং ইহার বেধ এমন হয় যাহাতে সাধারণ ও অসাধারণ আলোক রশ্মির (যাহারা কোয়ার্টস্‌কে আলোকাক্ষের লম্বভাবে অতিক্রম করে) মধ্যে $\frac{\lambda}{2}$ পথ পার্থক্যের সৃষ্টি হয়। এখানে λ হলো আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য। উপরোক্ত কোয়ার্টস

পাতটি সমবেধবিশিষ্ট অর্ধবৃত্তাকার একটি কাচের পাতের সঙ্গে ব্যাস বরাবর আটকানো হোল, যাহাতে পাতদ্বয়ের বিন্যাস বৃত্তাকার হয়। কাচের পাতটি কোয়ার্টসের মত সমপরিমাণে আলো শোষণ করে। বৃত্তাকার বিন্যাসটি সমবর্তকের পিছনে এমন ভাবে রাখা হয় যাহাতে প্রতিটি অর্ধবৃত্ত দৃষ্টিক্ষেত্রের অর্ধেক অংশ ঢেকে রাখে।

ধরা যাক APB কাচের অর্ধবৃত্তাকার পাত, AQB কোয়ার্টসের পাত, AB আলোকাক্ষের দিক (চিত্র নং 10.4.1 দেখুন)। যদি আপতিত আলোর কম্পনের দিক OP এর সমান্তরাল হয়, তবে ইহা কাচের মধ্য দিয়ে অপরিবর্তিত ভাবে যাবে। কিন্তু কোয়ার্টসে ইহা দুটি উপাংশে, একটি OA-এর সমান্তরাল ও অপরটি ইহার লম্বভাবে বিভক্ত হয়।

কোয়ার্টসের ভিতর দিয়ে যাবার ফলে একটা উপাংশের সাপেক্ষে অপরটির দশা বিপরীত হয়। এর ফলে নিঃসৃত আলোর কম্পনের দিক AB এর সঙ্গে $\angle AOQ(=\angle AOP)$ কোণ করে। কাজেই দৃষ্টিক্ষেত্রের দুটি অর্ধাংশে কম্পন যথাক্রমে OP এবং OQ বরাবর থাকে। বিশ্লেষকের ভিতর দিয়ে যাবার সময়ে, উহার দুটি অর্ধাংশ অসমানভাবে উজ্জ্বল হবে যতক্ষণ না বিশ্লেষকের নিঃসরণ তল AB এর সঙ্গে সমান্তরাল অথবা লম্বভাবে থাকে। উপরোক্ত দুটির প্রত্যেক ক্ষেত্রে, দৃষ্টিক্ষেত্রের দুটি অর্ধাংশ সমান উজ্জ্বল মনে হয়, কিন্তু একটি ক্ষেত্রে আলোর তীব্রতা অন্যটির তুলনায় বেশী মনে হয়। যদি অর্ধ-ছায়া কোণ $\angle POQ$ ছোট হয় (যেটা সাধারণত হয়), তবে যখন বিশ্লেষকের নিঃসরণ তল AB এর লম্বভাবে থাকে তখন আলোর তীব্রতা অপেক্ষাকৃত কম হয়।



চিত্র 10.4.1

প্রাথমিক আলোক তীব্রতা কম হলে, আমাদের চোখ আলোক তীব্রতার সামান্য পরিবর্তন ও (প্রায় 1%) ধরতে পারে। এই কারণে আমরা কম তীব্রতার অবস্থানকে (অর্থাৎ যখন বিশ্লেষকের নিঃসরণ তল অর্ধ-তরঙ্গপাতের আলোকাক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে থাকে) পছন্দ করি।

সমবর্তন তলের ঘূর্ণন মাপার জন্য বিশ্লেষককে এমনভাবে রাখা হয়, যাহাতে দৃষ্টিক্ষেত্রের দুটি অর্ধাংশ সমান উজ্জ্বল মনে হয় (বিশ্লেষকের নিঃসরণ তল অর্ধ-তরঙ্গপাতের আলোকাক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে রাখা)।

এর পর আলোক সক্রিয় পদার্থ বিশ্লেষক ও অর্ধছায়া পাতের মধ্যে রাখা হয়। তারপর বিশ্লেষককে ঘোরানো হয় যতক্ষণ না দৃষ্টিক্ষেত্রের দুটি অর্ধাংশ সমান উজ্জ্বল হয়। উপরোক্ত সমোজ্জ্বলতার জন্য বিশ্লেষককে যে ক্ষুদ্রতম পরিমাণ কৌণিক ঘূর্ণন দিতে হয় তাহাই সমবর্তক তলের ঘূর্ণন নির্দেশ করে।

উপরের আলোচনা থেকে আপনারা নিশ্চয়ই বুঝতে পারছেন যে অর্ধ ছায়া পাত (বা অর্ধ তরঙ্গপাত) কেবলমাত্র নির্দিষ্ট রংয়ের আলোর (যাহা সাধারণতঃ সোডিয়ামের হলুদ আলো) ক্ষেত্রে ব্যবহার করা যায়।

(ii) Lippich এর সমবর্তন ঘূর্ণনমাপী

বর্তমানে সকল আধুনিক সমবর্তন ঘূর্ণনমাপক যন্ত্রে অর্ধ তরঙ্গপাত সমেত কোন প্রকার "অর্ধছায়া নীতি" ব্যবহার করা হয়। বহুলভাবে ব্যবহার করা হয় Lippich সমবর্তক।

Lippich যন্ত্রে ক্ষুদ্রতর নিকল N_3 সমবর্তক নিকল N_1 এর পিছনে রাখা হয় (চিত্র নং 10.4.2 দেখুন)। N_3 দৃষ্টিক্ষেত্রের অর্ধেক ঢেকে রাখে এবং ইহার ছোট কর্ণটি N_1 এর ছোট কর্ণের সঙ্গে একটি ক্ষুদ্র কোণ করে থাকে। অতএব, N_1 এবং N_3 থেকে নির্গত আলোর কম্পনের অভিমুখ

চিত্র **10.4.2**

চিত্র **10.4.3**

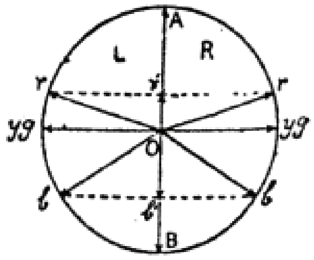
দুটি পরস্পরের সঙ্গে একটি ক্ষুদ্র কোণ করে। যখন বিশ্লেষকের ছোট কর্ণটি উপরোক্ত ক্ষুদ্র কোণের সমদ্বিখন্ডকের উপর লম্ব হয় তখন দৃষ্টিক্ষেত্রের দুটি অর্ধাংশ সমোজ্জ্বল মনে হয়।

সমবর্তন কোণের ঘূর্ণন আরো সূক্ষ্মভাবে মাপার জন্য, দুই অর্ধাংশ দৃষ্টিক্ষেত্রের বদলে তিনটি এক তৃতীয়াংশ দৃষ্টিক্ষেত্রের তন্ত্র ব্যবহার করা হয় (চিত্র নং 10.4.3 দেখুন)। এক্ষেত্রে দুটি ছোট নিকল N_3 ও N_4 সমবর্তক নিকল N_1এর পিছনে রাখা হয়। N_3 ও N_4 এর ক্ষুদ্র কর্ণদ্বয় পরস্পরের সঙ্গে সমান্তরাল হয় এবং N_1 এর ছোট কর্ণের সঙ্গে ক্ষুদ্র কোণ করে থাকে। এর ফলে দৃষ্টিক্ষেত্র তিনভাগে বিভক্ত হয় (চিত্র নং 10.4.3)। বাইরের এক তৃতীয়াংশদ্বয়ের ঔজ্জ্বল্য সবসময় একই থাকে। পরীক্ষা কালে মাঝের এক তৃতীয়াংশের আলোর তীব্রতা বাইরের এক তৃতীয়াংশদ্বয়ের তীব্রতার সঙ্গে সমান করা হয়। এই পদ্ধতিতে ঘূর্ণন মাপার ত্রুটি $0.01°$ এর বেশী হয় না। Lippich সমবর্তক যে কোন এক বর্ণের আলোর ক্ষেত্রে ব্যবহার করা যায়।

(iii) যুগ্ম-কোয়ার্টস।

এই প্রকার সংযুক্তি সাদা অলোর ক্ষেত্রে (গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 5600 Å) ব্যবহার করা যায়। ইহা দুটি সমান বেধের অর্ধবৃত্তাকার কোয়ার্টস পাত দ্বারা গঠিত হয়। একটি পাত দক্ষিণাবর্তী এবং অপরটি বামাবর্তী হয়, পাতদুটি আলোকাক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে কাটা হয় (চিত্র নং 10.4.4)। যখন একতলীয় সমবর্তিত আলো পাতদুটির ভিতর দিয়ে যায়, তখন একটি পাত সমবর্তন তলকে ডানদিকে এবং অপর পাতটি বামদিকে ঘোরায়। ঘূর্ণনের পরিমাণ অর্ধবৃত্তাকার পাতের বেধ এবং আপতিত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে। 3·75m.m.

বেধবিশিষ্ট পাত এবং হলুদাভ সবুজ আলোর (তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 5600 Å)ক্ষেত্রে ঘূর্ণনের পরিমান 90° হয়।

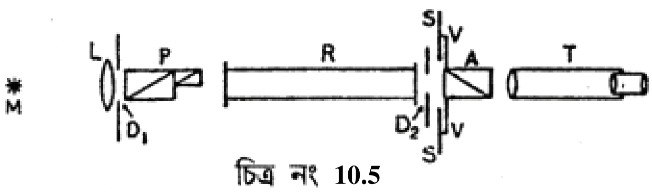


চিত্র 10.4.4

ধরা যাক যুগ্ম-কোয়ার্টসে আপতিত আলোর কম্পন AB এর সমান্তরাল (চিত্র নং 10.4.4 দেখুন)। প্রতি অর্ধাংশে হলুদাভ সবুজ আলো (yg) AB এর সাপেক্ষে 90° ঘোরে। লাল (r) আলো নীল (b) আলোর চেয়ে কম ঘোরে। বিশ্লেষক নিকলের ছোট কর্ণটি AB এর সমান্তরাল করে রাখা হলে, হলুদাভ-সবুজ আলো বিশ্লেষক দিয়ে যেতে পারে না, কিন্তু অন্যান্য রংয়ের আলো সমপরিমাণে বিশ্লেষক দিয়ে নির্গত হয়। ফলে দৃষ্টি ক্ষেত্রে আলোর রং ধূসরাভ-বেগুনী এবং এই অবস্থাকে টিন্ট্ অফ্ প্যাসেজ বলে। উপরোক্ত অবস্থা থেকে বিশ্লেষককে সামান্য ঘোরালে দৃষ্টিক্ষেত্রের অর্ধাংশ গোলাপী এবং অপর অর্ধাংশ গাঢ় নীল রংয়ের হয়, কারণ অর্ধাংশে অপেক্ষাকৃত অধিক পরিমাণে লাল আলো এবং অপর অর্ধাংশে অধিক পরিমাণে নীল আলো পৌঁছায়। পরীক্ষার জন্য কোন আলোক সক্রিয় পদার্থ সমবর্তক এবং বিশ্লেষকের মধ্যে রাখা হয়। আলোক সক্রিয় পদার্থ আনার আগে ও পরে বিশ্লেষককে টিন্ট্ অফ্ প্যাসেজে রাখা হয় এবং দুই অবস্থার পাঠের ব্যবধান থেকে সমবর্তক তলের ঘূর্ণন মাপা যায়।

উপরে আলোচিত তিনটি সংযুক্তির মধ্যে Lippich সমবর্তক সর্বাপেক্ষা অধিক সুবেদী। ইহার একটি সুবিধা হোল ইহা একবর্ণী আলোর ক্ষেত্রে ব্যবহার করা যায়।

10.5 সমবর্তন ঘূর্ণনমাপীর সাহায্যে চিনির দ্রবণের ঘনত্ব নির্ণয়



চিত্র নং 10.5

M = একবর্ণী আলোক উৎস, D_1= একটি ডায়াফ্রাম যাহা L লেন্স থেকে নির্গত আলোর উন্মেষ নিয়ন্ত্রণ করে, P = Lippich সমবর্তক, R = পোলারিমিটার নল, A =বিশ্লেষক, V,V = বিশ্লেষকের সঙ্গে আটকানো ভার্নিয়ারদ্বয় যারা চক্রাকার S স্কেলের উপর দিয়ে ঘুরতে পারে। S এবং (V,V) দ্বারা বিশ্লেষক A-এর ঘূর্ণন

মাপা হয়। T টিন্ট্ অফ্ প্যাসেজ দেখার জন্য প্রয়োজনীয় টেলিস্কোপ D_2 = ডায়াফ্রাম যাহা R নল থেকে নির্গত আলোর উন্মেষ নিয়ন্ত্রণ করে।

চিত্র নং 10.5 এ চিনির দ্রবণের ঘনত্ব নির্ণয়ের জন্য প্রয়োজনীয় পোলারিমিটার যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট আলো এবং t °C উষ্ণতায় জলীয় দ্রবণে চিনির আপেক্ষিক ঘূর্ণন, $[\alpha]_t^{\lambda}$ নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা লেখা যায়ঃ

$$[\alpha]_t^{\lambda} = \frac{10\theta}{lm} \quad \text{.........................(10.5.1)}$$

যেখানে,

θ = ডিগ্রী মাপে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন (λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট আলোর ক্ষেত্রে)

l= সেন্টিমিটার মাপে আলো দ্বারা অতিক্রান্ত দ্রবণ পথের দৈর্ঘ্য।

m =t° C উষ্ণতায় প্রতি ঘন সেন্টিমিটার দ্রবণে গ্রাম এককে উপস্থিত আলোক সক্রিয় পদার্থের ভর।

m এর মান নির্ণয় করতে গেলে α-র মান জানা প্রয়োজন। α-র মান কোন জানা ঘনত্বের (ধরা যাক্ m_0) চিনির দ্রবণে ঘূর্ণন θ_0 মেপে নির্ণয় করা যায়। অতঃপর কোন অজানা ঘনত্বের (ধরা যাক m) দ্রবণে ঘূর্ণন θ হলে, নিম্নলিখিত সমীকরণ

$$\frac{\theta}{m} = \frac{\theta_0}{m_0} \quad \text{........................... (10.5.2)}$$

থেকে m এর মান বাহির করা যায়।

θ পরিমাপের জন্য, প্রথমে পোলারিমিটার নলটি জলে ভর্তি করে সমবর্তক ও বিশ্লেষকের মধ্যে রাখা হয় এবং বিশ্লেষককে টিন্ট্ অফ্ প্যাসেজে রেখে পাঠ নেওয়া হয়। তারপর পোলারিমিটার নলে চিনির দ্রবণ ভরে পুনরায় পাঠ নেওয়া হয়। দুই পাঠের পার্থক্য থেকে θ-র মান পাওয়া যায়।

10.6 সারাংশ

(a) প্রকৃতিতে কিছু পদার্থ (যেমন কোয়ার্টস্ কেলাস, চিনির দ্রবণ ইত্যাদি) আছে যার ভিতর দিয়ে তলীয় সমবর্তিত আলো গেলে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন হয়—ইহাকে আলোক সক্রিয়তা বা আলোকীয় ঘূর্ণন বলে। উপরোক্ত পদার্থগুলিকে আলোক সক্রিয় পদার্থ বলে।

(b) Fresenel এর ঘূর্ণনের তত্ত্বানুসারে যখন কোন তলীয় সমবর্তিত আলো আলোকাক্ষের দিকে কোন আলোক সক্রিয় মাধ্যমে প্রবেশ করে তখন উহা দুটি সমান কম্পাংক বিশিষ্ট বিপরীত বৃত্তীয় সমবর্তিত কম্পনে বিভক্ত হয়। দক্ষিণাবর্তী ও বামাবর্তী বৃত্তীয় কম্পনদ্বয় বিভিন্ন গতিবেগে আলোক সক্রিয় মাধ্যমে অগ্রসর হয়—ইহার ফলে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন হয়।

(c) কোন আলোক সক্রিয় দ্রবণে (যথা চিনির দ্রবণ) সমবর্তন তলের ঘূর্ণন দ্রবণে উপস্থিত আলোক সক্রিয় পদার্থের সমানুপাতিক। সুতরাং সমবর্তন তলের ঘূর্ণন মেপে দ্রবণে দ্রাবের পরিমাণ নির্ণয় করা সম্ভব। শিল্পক্ষেত্রে দ্রবণে চিনির পরিমাণ এই পদ্ধতিতে নির্ণয় করা হয়—ইহাকে শর্করামিতি বলে।

10.7 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. আলোক সক্রিয়তা কাহাকে বলে? একটি আলোক সক্রিয় পদার্থের উদাহরণ দিন। আলোকীয় ঘূর্ণন প্রসঙ্গে ফ্রেনেলের তত্ত্ব সংক্ষেপে আলোচনা করুন।

2. আপেক্ষিক ঘূর্ণন কাহাকে বলে? ইহা কি কি বিষয়ের উপর নির্ভর করে?

আলোকাক্ষ তলের অভিলম্বে অবস্থিত এইরূপ একটি কোয়ার্টস্ পাতের সাহায্যে প্রতি এক ঘন সেন্টিমিটারে 0·1 gm. সক্রিয় দ্রাব বর্তমান, এইরূপ ল্যাকটোস্ দ্রবণের 26·7cm. দৈর্ঘ্যে যে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন সৃষ্টি হয় তাহা সম্পূর্ণরূপে নাকচ করতে হবে। পাতের বেধ কত হবে? [দেওয়া আছে ঃ— ল্যাকটোসের আপেক্ষিক ঘূর্ণন = 52·5°, কোয়ার্টস পাতে সংশ্লিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ=7660 Å এর জন্য μ_r.=1.53914, μ_e.=1·53920]

3. চিনির দ্রবণ সমেত 200 m.m. লম্বা একটি পোলারিমিটার নল যখন শর্করামিতি যন্ত্রে রাখা হোল তখন 11° আলোকীয় ঘূর্ণন পাওয়া গেল। যদি পরীক্ষাধীন অবস্থায় চিনির আপেক্ষিক ঘূর্ণন 66° হয়, তবে দ্রবণের ঘনত্ব কত?

4. আলোক সক্রিয়তা বিষয়ে Biot এর পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি আলোচনা করুন।

10.8 সর্বশেষ উত্তরমালা।

1. অনুচ্ছেদ নং 10.2 এর প্রথমাংশ দেখুন।

10.3 অনুচ্ছেদে ফ্রেনেলের তত্ত্ব দেখুন।

2. 10.2 অনুচ্ছেদের মাঝের অংশ দেখুন. ল্যাকটোস দ্রবণে সমর্বতন তলের ঘূর্ণন θ হলে

$$\theta = \frac{\alpha lm}{10} \quad \text{(9.5.1 সমীকরণ দেখুন)}$$

$$= \frac{52 \cdot 5 \times 26 \cdot 7 \times 0 \cdot 1}{10} = 14 \cdot 02^{\circ}$$

'd' বেধের কোয়ার্টস্ পাতের জন্য ঘূর্ণন (θ_2)

প্রকৃতপক্ষে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন পেতে হলে 10.3.1 সমীকরণে দেওয়া θ কে 2 দিয়ে ভাগ করতে হবে।

$$\theta_q = \frac{2\pi}{\lambda}(\mu_r \sim \mu_l)d \text{ radian}$$ (10.3.1 সমীকরণ দেখুন)

$$= \frac{2\pi}{\lambda}(\mu_r \sim \mu_l)d \times \frac{180}{\pi}$$

$$= \frac{2}{\lambda}(\mu_r \sim \mu_l)d \times 180$$

$$= \frac{2 \times 0 \cdot 00006d \times 180}{7 \cdot 660 \times 10^{-5}} \quad \left[\because 7660 \text{ Å} = 7660 \times 10^{-8}\text{cm}\right]$$

$$= 281 \cdot 98 \text{ d degree}$$

$$\therefore 281 \cdot 98d = 14 \cdot 02^{\circ}$$

$$\therefore d = \frac{14 \cdot 02}{281 \cdot 98} = 0 \cdot 0497\text{cm}$$

[প্রকৃতপক্ষে সমবর্তন তলের ঘূর্ণন পেতে হলে 10.3.1 সমীকরণে দেওয়া θ কে 2 দিয়ে ভাগ করতে হবে।]

3. $\theta = \frac{\alpha l m}{10}$ (10.5.1 সমীকরণ দেখুন)

$$= \frac{66 \times 20 \times m}{10}; \quad l = 200\text{mm}$$

$$= 20\text{cm}$$

$$= 0.0833^{\circ}$$

4. 10.2 অনুচ্ছেদে Biot এর পরীক্ষালব্ধ ফল দেখুন।

একক ❑ 11 লেজার ও হলোগ্রাম

গঠন

11.1 প্রস্তাবনা

এ পর্যন্ত আপনি আলোর বিভিন্ন ধর্ম সম্পর্কে জেনেছেন। এ-বিষয়ে ধারণা করার জন্য এই সব তথ্য খুবই জরুরী। কিন্তু এর পরেও আধুনিক কালে আলোর বিচিত্র প্রকৃতি এবং তার বিবিধ প্রয়োগ নিয়ে এক নূতন দিগন্ত উন্মোচিত হয়েছে। একক 10এ আপনি সাম্প্রতিক কালে আলোক সম্পর্কিত দু'টি যুগান্তকারী আবিষ্কারের

সঙ্গে পরিচিত হবেন । এই দু'টি আবিষ্কারের প্রথমটি হ'ল লেজার (Laser) এবং দ্বিতীয়টি হ'ল হলোগ্রাম (Hologram) ও হলোগ্রাফ পদ্ধতি (Holography)। বৈজ্ঞানিক গবেষণার আঙ্গিনার বাইরে এই দুই অভিনব আবিষ্কার নানাবিধ প্রয়োগের জন্য আমাদের দৈনন্দিন জীবনের সঙ্গেও যুক্ত হয়ে পড়েছে । লেজার কথাটি হল - 'light amplification by stimulated emision of radiation' (বাংলায় উদ্দীপিত; বিকিরণের সাহায্যে আলোকের বিবর্ধন) এই ইংরাজি শব্দগুচ্ছের আদ্যক্ষর দিয়ে গঠিত । সাধারণ আলোক উৎস, যেমন বিজলী বাতি (Incamdesecent lamp) থেকে যে আলো পাওয়া যায় সেই আলো সবদিকে ছড়িয়ে পড়ে, এর কোন সুসম্বদ্ধতা (Coherence) নেই এবং সাধারণত এই আলোয় অনেক তরঙ্গদৈর্ঘ্যও থাকে । কিন্তু লেজার এমন একটি অভিনব আলোক উৎস যা' প্রায় একবর্ণী, অতি সমান্তরাল, একমুখী, অত্যন্ত শক্তিশালী ও সুসম্বদ্ধ (coherent) আলোক রশ্মি সৃষ্টি করতে পারে।

লেজার অবিষ্কারের পিছনে এক ঐতিহাসিক পটভূমিকা আছে। গত শতাব্দীর চতুর্থ দশকের শেষের দিকে মাইক্রো তরঙ্গের সঙ্গে অণু পরমাণুর পারস্পরিক ক্রিয়া নিয়ে গবেষণা করেছিলেন মার্কিন পদার্থ বিজ্ঞানী চার্লস্ টাউনস্ (Charles Townes)। ১৯১৭ সালেই আইনস্টাইন তাপগতিবিদ্যার সাহায্য নিয়ে বলেছিলেন যে স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণ (spontaneous emission) ছাড়াও অণু বা পরমাণু থেকে ফোটন নির্গত হওয়ার আর একটি উপায় হ'ল - উদ্দীপিত বিকিরণ (Stimulated emission) যা' পরে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার মাধ্যমেই ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়েছে । ১৯৫৪ সালে টাউনস্ উদ্দীপিত বিকিরণের ধারণাকে প্রয়োগ করে মাইক্রো তরঙ্গের বিবর্ধক তৈরি করতে সফল হয়েছিলেন। রশিয়ার প্রখোরভ (Prochorov) এবং বাসভ (Basov) প্রায় একই সময়ে অনুরূপ যন্ত্র তৈরি করেন । এর বৈশিষ্ট্য হল যে এই যন্ত্র দিয়ে উচ্চক্ষমতা সম্পন্ন সুসম্বদ্ধ মাইক্রো তরঙ্গের সৃষ্টি করা যায় । টাউনস্ এই যন্ত্রের নাম দেন মেজার (Maser) যা হ'ল Microwave Amplification by stimulated Emission of Radiation শব্দগুচ্ছের আদ্যক্ষর দিয়ে সৃষ্টি । এই সাফল্যের পরে পদার্থ বিজ্ঞানীদের মনে স্বাভাবিকভাবেই এই প্রশ্ন এসেছিল যে মাইক্রোতরঙ্গ থেকে অনেকটা ক্ষুদ্রতর দৈর্ঘ্যের আলোক তরঙ্গের ক্ষেত্রে এই প্রচেষ্টা সফল হবে কিনা। ১৯৫৮ সালে টাউনস্ ও আর্থার শ্যালো (Arthur Schawlow) আলোর ক্ষেত্রে বিবর্ধক তৈরির জন্য কি কি শর্ত পালন করতে হবে তা নির্ণয় করেন । কিন্তু সাফল্য এলো আরও পরে। ১৯৬০ সালে থিয়োডোর মেইম্যান (Theodore Maiman) সর্বপ্রথম সার্থক আলোকীয় মেজার বা লেজার তৈরি করতে সক্ষম হন। আলোক বিজ্ঞানের ইতিহাসে এই সাফল্য এক যুগান্তকারী ঘটনা হিসাবে চিরকাল বিবেচিত হবে। এখানে বিশেষভাবে উল্লেখ্য যে মেজার ও লেজার আবিষ্কারের বিশেষ অবদানের জন্য টাউনস্, প্রঘোরভ ও বাসভ কে পদার্থ বিজ্ঞানে ১৯৬৪ সালে নোবেল পুরস্কার প্রদান করা হয়।

লেজারের কার্যপ্রণালী ও অন্যান্য তথ্য আমরা 11.2 – 11.4 এ আলোচনা করেছি।

আমাদের আলোচ্য দ্বিতীয় যুগান্তকারী আবিষ্কার হ'ল হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতি । ক্যামেরা দিয়ে যখন গাছপালা, জীবজন্তু, মানুষ, ঘরবাড়ি বা কোন প্রাকৃতিক দৃশ্যের ছবি তোলা হয় তখন ত্রি-মাত্রিক বস্তু থেকে নির্গত আলো ফিল্মে দ্বিমাত্রিক পর্দায় ফেলা হয় । লক্ষ্যবস্তু থেকে যে আলো আসে তা' ফটো ফিল্মের নেগেটিভে আলোর তীব্রতা অনুযায়ী অভিলেখন সৃষ্টি করে । আলোর ক্ষেত্রের সঙ্গে যুক্ত আলোক তরঙ্গের বিস্তার ও দশাকে নথিভুক্ত না করে তা তরঙ্গের তীব্রতাকে নথিভুক্ত করে । নেগেটিভ ফিল্ম থেকে পজিটিভ প্রিন্ট নেওয়ার পর যে ছবি আমরা দেখি তা' ত্রি-মাত্রিক কোন বস্তুর দ্বিমাত্রিক পর্দার ওপরে লিখিত একটি নথি । আলোকচিত্রে বস্তুর ত্রিমাত্রিক অবস্থা সংরক্ষিত হয় না। এর ফলে চোখের অবস্থানের পরিবর্তন করে অলোকচিত্রের বস্তুর অবস্থানগত কোন পরিবর্তন করা যাবে না। হলো গ্রাম তৈরি করে হলোগ্রাফ পদ্ধতির মাধ্যমে আলোকচিত্রের সীমাবদ্ধতা অতিক্রম করা সম্ভবপর হয়েছে । হলোগ্রামের সাহায্যে প্রকৃত ত্রি-মাত্রিক প্রতিবিম্ব গঠন করা সম্ভব হয়েছে যা' দ্রষ্টার অবস্থানের পরিবর্তনের সঙ্গে সঙ্গে এমনভাবে পরিবর্তিত হয় যে মনে হবে আমরা প্রকৃত কোন ত্রিমাত্রিক লক্ষ্য বস্তু খালি চোখে দেখছি।

হলোগ্রাফ পদ্ধতি উদ্ভাবনের ইতিহাস বেশ চিত্তার্কষক। ১৯৪৭ সালে ব্রিটিশ পদার্থ বিজ্ঞানী ডেনিস গেবর (Dennis Gabor) ইলেকট্রন মাইক্রোস্কোপ দিয়ে যে প্রতিবিম্ব পাওয়া যায় তার উন্নতি বিষয়ে গবেষণা করছিলেন। প্রতিবিম্বের বিভেদনের (Resolution) কি ভাবে উন্নতি করা যায় সে বিষয়ে চিন্তা করতে করতে হলোগ্রাফ পদ্ধতির ধারণা তাঁর মাথায় আসে। ১৯৪৮ থেকে ১৯৫১ সনের মধ্যে এ বিষয়ে তাঁর একধিক বিস্তারিত গবেষণাপত্র প্রকাশিত হয় । কিন্তু সেই সময়ে আলোক উৎসের সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্য (coherence length) খুব কম হওয়ায় হলোগ্রাফ পদ্ধতির সার্থক প্রয়োগ খুবই কঠিন ছিল । সেইজন্য প্রথমে এই পদ্ধতি বিশেষ দৃষ্টি আকর্ষণ করেনি । কিন্তু ১৯৬০ সালে লেজার আবিষ্কারের পর এ পদ্ধতির ব্যাপক বিকাশ ঘটে কারণ লেজার থেকে নির্গত অলোর সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্য অনেক বেশী। কয়েক বছরের মধ্যেই বৈজ্ঞনিক গবেষণায় কারিগরী শিল্পে এবং দৈনন্দিন জীবনেও হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির ব্যাপক ব্যবহার শুরু হয়।

ত্রিমাত্রিক লেন্স বিহীন আলোকচিত্র বা হলোগ্রাফ পদ্ধতির অসাধারণ আবিষ্কারের জন্য ডেনিস গেবরকে ১৯৭১ সালে পদার্থ বিজ্ঞানের নোবেল পুরস্কারে সম্মনিত করা হয়। বর্তমানে হলোগ্রাফ পদ্ধতির ওপর গবেষণা ও তার প্রয়োগ নিয়ে বিশ্বের বিভিন্ন গবেষণাগারে বহু বিজ্ঞানী নিযুক্ত আছেন।

10.5 এ আমরা হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতি নিয়ে আলোচনা করেছি।

উদ্দেশ্য ঃ

এই একক পাঠ করে আপনি

আধুনিক আলোক বিদ্যার দুই যুগান্তকারী আবিষ্কার লেজার ও হলোগ্রাফ পদ্ধতি সম্পর্কে জানতে পারবেন। লেজারের কার্যপ্রণালীর ভিত্তি হিসাবে উদ্দীপিত বিকিরণ আইনস্টাইন গুণাংক, জনসংখ্যার বিপরীত, ক্রমতা আলোর বিবর্ধন, অনুনাদগহ্বর ইত্যাদি মৌলিক বিষয়গুলি সম্পর্কে সঠিক ধারণা করতে পারবেন ।

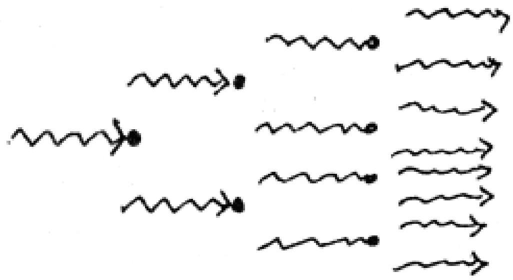
- বিবিধ লেজার ও লেজারের ব্যবহারিক প্রয়োগ সম্পর্কে জানতে পারবেন ।
- হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির তাত্ত্বিক ভিত্তি সম্পর্কে উপযুক্ত জ্ঞানলাভ করবেন।
- হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির নানা ব্যবহার সম্পর্কে জানবেন

11.2 লেজার কার্যপ্রণালী

11.2.1 ভূমিকা

লেজার কিভাবে কাজ করে সে সম্পর্কে সঠিক ধারণা করার জন্য আমাদের কয়েকটি বিষয় জানতে হবে। একটি হ'ল অণু পরমাণু ফোটন বিকিরণ ও শোষণ। কোয়ান্টাম তত্ত্ব থেকে আমারা জানি যে অণু বা পরমাণু বিভিন্ন পৃথক শক্তিস্তরে থাকতে পারে। অণু বা পরমাণু থেকে ফোটন নির্গত হওয়ার একটা উপায় হ'ল অণু বা পরমাণু উচ্চতর শক্তি অবস্থা E_2 থেকে নিম্নতর শক্তি অবস্থা E_1 স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে (spontaneous emission) নেমে আসা। ফোটনের কম্পাংক ν হলে $h\nu = E_2 - E_1$ (h প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক) বিপরীতভাবে E_1 শক্তি স্তরে অবস্থিত কোন অণু বা পরমাণু $h\nu$ শক্তির কোন ফোটন শোষণ করলে ঐ বস্তুকণা E_2 শক্তিস্তরে উন্নীত হবে । স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের ফলে যে সব ফোটন পাওয়া যায় তাদের পরস্পরের দশার (phase) মধ্যে কোন নির্দিষ্ট সর্ম্পক থাকেনা। এই কারণে এভাবে যে আলো পাওয়া যায় তার প্রকৃতি হ'ল অসম্বদ্ধ (Incoherent) । অণু পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে ওঠা নামার এই দুই উপায় ছাড়াও তৃতীয় আর একটি পদ্ধতি হ'ল উদ্দীপিত বিকিরণ (stimulated emission) প্রক্রিয়া। কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাহায্যে এই প্রক্রিয়া বুঝতে পারা যায়। কিন্তু তার আগেই আইনস্টাইন ১৯১৭ সালে এই তৃতীয় প্রক্রিয়ার কথা বলেন যার বিশেষত্ব হ'ল এই যে $h\nu = E_2 - E_1$ শক্তির কোন ফোটন থাকলে তা' অণু বা পরমাণুকে E_2 শক্তিস্তর থেকে E_1 শক্তির স্তরে নেমে আসতে উদ্দীপিত করতে পারে। এভাবে একটি $h\nu$ ফোটন আর একটি $h\nu$ ফোটন সৃষ্টি করতে সাহায্য করে এবং এভাবে একটি $h\nu$ ফোটনের জায়গায় দু'টি $h\nu$ ফোটন পাওয়া যাবে। এই প্রক্রিয়ার বিশেষভাবে লক্ষনীয় বৈশিষ্ট্য হ'ল এই যে উদ্দীপক ফোটন ও নির্গত ফোটন সম্পূর্ণভাবে সদৃশ। উভয় ফোটনেরই একই দিক নির্দেশ, একই সমাবর্তন ও একই দশা থাকে। এভাবে দুটি সুসম্বদ্ধ ফোটন

পাওয়া যায়। এই দুটি ফোটন যদি E_2 স্তরে আছে এমন আরও দু'টি অণু বা পরমাণুর ওপর আপতিত হয় তা হলে উদ্দীপিত বিকিরণ প্রক্রিয়ায় আরও দুটি সুসম্বদ্ধ ফোটন পাওয়া যাবে এবং এভাবে ফোটনের সংখ্যা দাঁড়াবে চার। এই চারটি ফোটন যদি আবার আরও চারটি অণু বা পরমাণুকে E_2 স্তর থেকে E_1 স্তরে নিয়ে যেতে উদ্দীপিত করে তা'হলে মোট আটটি একমুখী সুসম্বদ্ধ ফোটন পাওয়া যাবে। এই প্রক্রিয়া বারংবার প্রয়োগ করে অল্প সময়ের মধ্যে বিপুল সংখ্যায় সুসম্বদ্ধ ফোটন পাওয়া সম্ভব হতে পারে এবং এভাবে একমুখী তীব্র শক্তি সম্পন্ন সুসম্বদ্ধ আলোকরশ্মি সৃষ্টি করা যেতে পারে। (চিত্র 11.1)



(চিত্র 11.1)

লেজার রশ্মি সৃষ্টিতে উদ্দীপিত বিকিরণ প্রক্রিয়া নিঃসন্দেহে গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা নিচ্ছে। কিন্তু এই প্রক্রিয়া সাফল্যের সঙ্গে কাজ করতে পারে তখনই যখন নিম্নতর শক্তিস্তর E_1এ থাকা অণু বা পরমাণুর তুলনায় উচ্চতর শক্তিস্তর E_2-তে বেশী সংখ্যায় অণু বা পরমাণু থাকবে। এই চাহিদা কিন্তু সাধারণ অবস্থার বিপরীত। E_1 স্তরে n_1 এবং E_2 স্তরে n_2 অণু বা পরমাণু থাকলে সাধারণ অবস্থায় $n_1>n_2$ হবে। কিন্তু লেজার তৈরী করতে হলে প্রয়োজন $n_2>n_1$। এই বিশেষ অবস্থাকে বলা হয় 'জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা' (Population inversion)। এই শর্ত পালন করার জন্য কি বিশেষ ব্যবস্থা নেওয়া হয় তা' আমরা পরে আলোচনা করব।

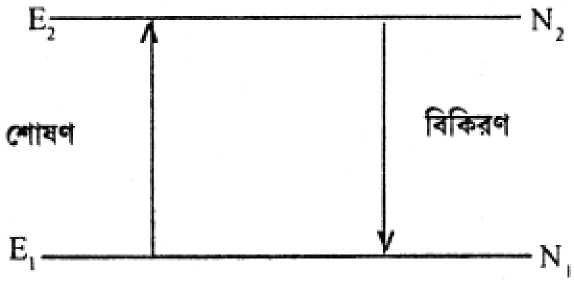
এই সংক্ষিপ্ত সাধারণ ভূমিকার পরে আমরা তত্ত্বের সাহায্য নিয়ে আরও বিশদভাবে লেজারের কার্যপ্রণালী সম্পর্কে আলোচনা করব।

11.2.2 আইনস্টাইন গুণাংক (Einstein Coefficients) ও আলোর বিবর্ধন

আমরা প্রথমে স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণ ও উদ্দীপিত বিকিরণ সম্পর্কে আইনস্টাইনের তত্ত্ব আলোচনা করে আলোর বিবর্ধন গণনা করব।

মনে করি দু'টি শক্তিস্তর আছে 1 নং ও 2 নং যাদের শক্তির মান যথাক্রমে E_1 ও E_2 এবং একক আয়তনে N_1 পরমাণু 1নং শক্তিস্তরে ও N_2 পরমাণু 2নং শক্তিস্তরে অবস্থান করছে। কোন পরমাণু নিম্নতর শক্তিস্তর E_1 থেকে বিকিরণ শোষণ করে উচ্চতর শক্তিস্তর E_2-তে চলে যেতে পারে। এই উত্তরণের হার

নির্ভর করছে ঐ দুই শক্তিস্তরের শক্তি পার্থক্যের সঙ্গে যুক্ত কম্পাংক ν এবং বিকিরণ শক্তির ঘনত্ব $u(\nu)$ এর ওপর। $u(\nu)d\nu$ হ'ল ν ও $\nu+d\nu$ কম্পাংকের মধ্যে একক আয়তনে যে বিকিরণ শক্তি আছে তার মান। এই উত্তরণের হার N_1 ও $u(\nu)$ এর সঙ্গে একই সাথে সমানুপাতিক। একক আয়তনে একক সময়ে যে সব পরমাণু শক্তি শোষণ করে 1নং স্তর থেকে 2নং স্তরে উত্তীর্ণ হয় সেই সংখ্যা হ'ল $B_{12}N_1U(\nu)$। এখানে B_{12} সমানুপাতিক গুণক।



চিত্র **11.2**

শোষণের বিপরীত প্রক্রিয়াতে পরমাণু উত্তেজিত স্তর E_2 থেকে E_1 স্তরে নেমে আসে ও ν কম্পাঙ্কের ফোটন ত্যাগ করে। এই প্রক্রিয়ার বিষয় ব্যাখ্যা করতে আইনস্টাইন সর্বপ্রথম উদ্দীপিত বিকিরণের ধারণার সূত্রপাত করেন। তাঁর মত হ'ল এই যে কোন পরমাণু উচ্চতর শক্তিস্তর থেকে নিম্নস্তর স্তরে দু'ভাবে নেমে আসতে পারে। একটি উপায় হ'ল স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণ এবং দ্বিতীয় উপায় হ'ল উদ্দীপিত বিকিরণ। স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের সময় কোন পরমাণুর নিম্নতর শক্তি স্তরে নেমে আসার সম্ভাব্যতা সম্পূর্ণভাবে নির্ভর করে যে দুটি শক্তিস্তরের মধ্যে এই পরিবর্তন হচ্ছে তার ওপর কিন্তু কোনভাবেই বিকিরণ শক্তির ঘনত্বের ওপর নয়। তাই স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের হার অর্থাৎ একক সময় ও একক আয়তনে স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের সংখ্যা হবে N_2A_{21}। এখানে A_{21} হ'ল সমানুপাতিক গুণক। উদ্দীপিত বিকিরণের ক্ষেত্রে নিম্নতর স্তরে পরিবর্তনের হার ν কম্পাংকে বিকিরণ শক্তির ঘনত্বের ওপর সরাসরি সমানুপাতিক। এই কারণে উদ্দীপিত বিকিরণের হার হবে $N_2B_{21}.U(\nu)$। এখানে B_{21} হল উদ্দীপিত বিকিরণের ক্ষেত্রে সমানুপাতিক গুণক। A_{21}, B_{12}, ও B_{21} এই তিন সমানুপাতিক গুণক আইনস্টাইন গুণাংক (Einstein coefficients) নামে পরিচিত। এদের মান পরমাণু নির্ভর। কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাহায্যে যে কোন পরমাণুর ক্ষেত্রে আইনস্টাইন গুণাংক গননা করা সম্ভব। আইনস্টাইন কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সূত্রপাতের আগেই সঠিকভাবে উদ্দীপিত বিকিরণের ধারণা দেন।

তাপীয় সাম্য অবস্থায় E_1 থেকে E_2 স্তরে ওঠার হার বিপরীত প্রক্রিয়ায় E_2 থেকে E_1 স্তরে নামার হারের

সমান হবে অর্থাৎ

$$N_1B_{12}U(\nu) = N_2A_{21} + N_2B_{21}U(\nu)$$

অথবা $$U(\nu) = \frac{A_{21}}{\frac{N_1}{N_2}B_{12} - B_{21}} \quad \text{.....................} (11.1)$$

বোলৎস্‌মান সূত্র অনুযায়ী T পরম তাপমাত্রায় দুই স্তরে থাকা পরমাণুর সংখ্যার অনুপাত হবে

$$N_1/N_2 = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{KT}\right) = \exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) \text{...} (11.2)$$

K বোলৎস্‌মান ধ্রুবাংক।

সুতরাং (10.1) কে লেখা যায়,

$$U(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - B_{21}}$$

$$= \frac{A_{21}}{B_{21}\left[\frac{B_{12}}{B_{21}}\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1\right]} \quad \text{............................} (11.3)$$

প্ল্যাঙ্কের সূত্রানুযায়ী বিকিরণ শক্তির ঘনত্বের পরিমাপ হল,

$$U(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1} \quad \text{................................}(11.4)$$

(10.3) ও (10.4) তুলনা করে আমরা পাই,

$$A_{21}/B_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \text{ এবং } B_{12} = B_{21} \text{..........} (11.5)$$

(11.5) থেকে দেখা যাচ্ছে যে উদ্দীপিত বিকিরণ ও উদ্দীপিত শোষণের সম্ভাব্যতা সমান। এখানে লক্ষণীয় যে উদ্দীপিত বিকিরণের ধারণা বাদ দিলে $U(\nu)$ এর গাণিতিক রূপ কখনই প্ল্যাঙ্কের সূত্রের মত হবে না।

তাপীয় সাম্য অবস্থায় স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণ ও উদ্দীপিত বিকিরণের সংখ্যার অনুপাত হ'ল,

$$\frac{A}{BU(\nu)} = \exp(h\nu/KT) - 1 \qquad \text{..} \; (11.6)$$

যদি $h\nu/KT << 1$ অর্থাৎ $\nu << \frac{KT}{h}$ তা হ'লে $\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1 << 1$ এবং $A/BU(\nu) << 1$ হবে অর্থাৎ উদ্দীপিত বিকিরণের সংখ্যা স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের সংখ্যা থেকে অনেক বেশী হবে। পক্ষান্তরে $h\nu/KT >> 1$ বা $\nu >> \frac{KT}{h}$ হলে, বিপরীত অবস্থা দেখা যাবে অর্থাৎ স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের সংখ্যা উদ্দীপিত বিকিরণের সংখ্যা থেকে অনেক বেশী হবে। সাধারণ আলোক উৎসের জন্য তাপমাত্রা মোটামুটি $T \sim 10^3\ K^{\circ}$ ধরা যেতে পারে।

এক্ষেত্রে $\frac{KT}{h} = \frac{1.3807 \times 10^{-23} (J/K^{\circ}) \times 10^{3} (K^{\circ})}{6 \cdot 62618 \times 10^{-34} (J\ \ sec)}$

$= 2 \cdot 08 \times 10^{13}\ sec^{-1}$

সাধারণ আলোক তরঙ্গের কম্পাংক $\nu \sim 6 \times 10^{14}\ sec^{-1}$ ধরা যেতে পারে। অর্থাৎ এখানে $\nu << \frac{KT}{h}$ এই শর্ত পালিত হচ্ছে অতএব আলোর কম্পাংকে আলোক উৎস থেকে মূলতঃ স্বতঃস্ফূর্ত বিকিরণের মাধ্যমে আলো পাওয়া যাবে। এই কারণে সাধারণ আলোক উৎস থেকে সুসম্বদ্ধ আলো পাওয়ার সম্ভাবনা নেই।

লেজারের কার্যপ্রণালী অনুধাবন করার জন্য আমাদের জানতে হবে আলোর বিবর্ধন কীভাবে করা যেতে পারে। এতক্ষণ পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরকে আমরা E_1, E_2 ....ইত্যাদি দ্বারা চিহ্নিত করেছি। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে কোন শক্তিস্তরের শক্তির একটি মান না হয়ে তার একটি বিস্তার থাকে। এর পিছনে কয়েকটি কারণ আছে ঃ

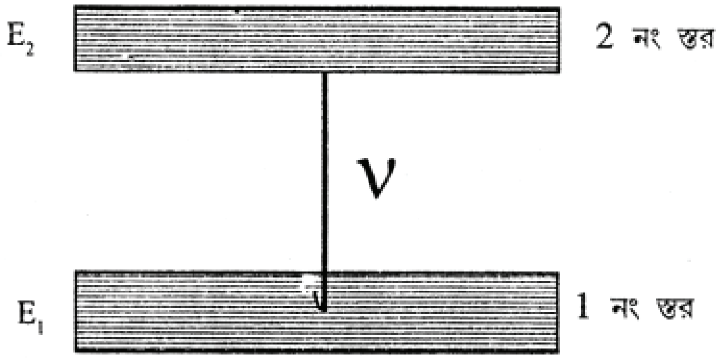
(১) উষ্ণতার জন্য পরমাণুদের গতি আছে এবং সেই কারণে তাদের মধ্যে সংঘর্ষের ফলে স্থির অবস্থায় পরমাণু যে শক্তিস্তরে থাকতে পারে সেই মান থেকে কিছুটা বিচ্যুতি ঘটে।

(২) হাইসেন বার্গের অনির্দেশ্যনীতির জন্য ফোটনের কম্পাংক $\nu = \left(E_2 - E_1\right)/h$ একটি না হয়ে তার একটি বিস্তার থাকে।

৩) ডপলার ক্রিয়ার জন্যও ফোটনের কম্পাংকের বিস্তার হতে পারে।

চিত্র 11.3 এ 1নং ও 2 নং শক্তিস্তরের বিস্তার দেখান হয়েছে। পরমাণুর শক্তিস্তরের বিস্তারের জন্য

2 নং স্তর থেকে 1 নং স্তরে পরিবর্তনের ফলে যে বর্ণালি রেখার সৃষ্টি হয় তা কম্পাংক ν এর ওপর নির্ভরশীল এবং এই বিষয়টি প্রকাশ করা হয় পরিমিত বর্ণালি রেখা আকৃতির অপেক্ষক (Normalized line shape function) $g(\nu)$ দিয়ে।



চিত্র **11.3**

$g(\nu)$ এর সংজ্ঞা অনুসারে $\int g(\nu)d\nu = 1$ প্রতি একক আয়তনে প্রতি একক কম্পাংক ব্যবধানে 1 নং ও 2 নং স্তরে পরমাণু সংখ্যা যথাক্রমে $n_1(\nu)$ ও $n_2(\nu)$ হলে, $g(\nu)$ এর সাহায্যে আমরা লিখতে পারি

$n_1(\nu) = N_1 g(\nu)$ এবং $n_2(\nu) = N_2 g(\nu)$

1নং ও 2নং শক্তিস্তরের মধ্যে প্রতি একক আয়তনে একক সময়ে ν ও $\nu + d\nu$ কম্পাংকের ফোটন শোষিত হওয়ায় শক্তি ব্যয়ের পরিমাপ হল: $h\nu B_{12} n_1(\nu) d\nu U(\nu)$

এবং উদ্দীপিত বিকিরণের মাধ্যমে ν ও $\nu + d\nu$ কম্পাংকের ফোটন নির্গত হওয়ার শক্তিবৃদ্ধির পরিমাপ হল $h\nu B_{21} n_2(\nu) d\nu U(\nu)$

তা'হলে মাধ্যমে একক আয়তনে একক সময়ে ν ও $\nu + d\nu$ কম্পাংকের শক্তির ঘনত্বের পরিবর্তনের হারকে লেখা যায় $\frac{d}{dt}[u(\nu)d\nu] = h\nu Bu(\nu)[n_2(\nu) - n_1(\nu)]d\nu$ .... (11.7)

এখানে $B = B_{12} = B_{21}$

dt সময়ে আলো মাধ্যমের মধ্যে dx দূরত্ব অতিক্রম করতে পারে।

সুতরাং $dx = vdt$, v হল মাধ্যমে আলোর গতিবেগ।

$v = C/\mu$, C = শূন্যস্থানে আলোর গতিবেগ এবং

μ মাধ্যমের প্রতিসরণ গুণাংক। ν কম্পাংক আলোর তীব্রতা ও শক্তির ঘনত্বের মধ্যে সম্পর্ক হ'ল $I(\nu) = \nu U(\nu)$

সুতরাং (11.7) থেকে পাওয়া যায়,

$$\frac{d}{dx}\left[u(\nu)d\nu\right] = \frac{h\nu}{v}Bu(\nu)\left[n_2(\nu) - n_1(\nu)\right]$$

উভয়পক্ষ ν দিয়ে গুণ করে আমরা পাই,

$$\frac{d}{dx}\left[u(\nu)d\nu\right] = \frac{h\nu}{v}Bu(\nu)\left[n_2(\nu) - n_1(\nu)\right]d\nu$$

অথবা $\frac{dI(\nu)}{I(\nu)} = -\alpha(\nu)dx$ .... (11.9)

এখানে $\alpha(\nu) = \frac{\mu}{c}h\nu B\left[n_1(\nu) - n_2(\nu)\right]$

$$= \frac{\mu}{c}h\nu B\left[N_1 - N_2\right]g(\nu) \qquad \text{.........................(11.10)}$$

(11.9) থেকে সমাকলনের সাহায্যে পাওয়া যায়,

$I(\nu) = I_\nu(x=0)e^{-\alpha(\nu)x}$ .... (11.11)

(11.11) সমীকরণ নির্ণয় করছে মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে x দূরত্বে অগ্রসর হওয়ার সময় আলোক রশ্মির তীব্রতা কিভাবে পরিবর্তিত হয়। তাপীয় সাম্যাবস্থায় নিম্নতর শক্তি অবস্থার পরমাণু সংখ্যা উচ্চতর শক্তি অবস্থার পরমাণু সংখ্যা থেকে বেশী হবে। সুতরাং $N_1 > N_2$ (11.10) থেকে আপনি লক্ষ্য করবেন যে $\alpha\nu$ এক্ষেত্রে একটি ধনাত্মক রাশি এবং সেই কারণে আলোক রশ্মির তীব্রতা মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে আলোক রশ্মি অগ্রসর হওয়ার সময়ে নিম্নতর শক্তিস্তরে অবস্থিত পরমাণুকে উচ্চতর শক্তিস্তরে অবস্থিত পরমাণুতে নিয়ে যেতে ক্ষয়প্রাপ্ত হয় এবং এভাবে আলোকরশ্মি থেকে শক্তি শোষিত হয়। কিন্তু যদি কোনভাবে এমন অবস্থা সৃষ্টি করা যায় যে $N_2 > N_1$ তা'হলে $\alpha\nu$ ঋণাত্মক রাশি হবে এবং (11.11) অনুসারে আলোকরশ্মি মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে অগ্রসর হওয়ার সময়ে আলোকরশ্মির শক্তি বৃদ্ধি পাবে। এই বিশেষ অবস্থাকে বলা হয় আলোর বিবর্ধন। এ-অবস্থা পেতে গেলে প্রয়োজনীয় নিম্নতর শক্তি স্তরের তুলনায় উচ্চতর শক্তিস্তরে অধিক সংখ্যায় পরমাণুর অবস্থান করার শর্ত। এই অবস্থার নামকরণ করা হয়েছে 'জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা' (Population Inversion)।

11.2.3 লেজার কার্যকরী করতে প্রয়োজনীয় ব্যবস্থা

আলোর বিবর্ধন ও জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা সম্পর্কে আপনি জেনেছেন। এখন আমরা আপনাকে সরাসরি লেজারের কার্যপ্রণালীর একটি বিবরণ দেব যা' থেকে এ-বিষয়ে আপনি একটি সঠিক ধারনা করতে পারবেন।

যে কোন লেজার যন্ত্রের তিনটি মূল অংশ আছে

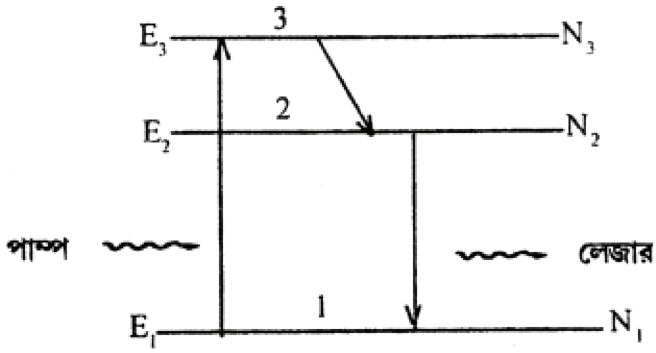
১। একটি সক্রিয় মাধ্যম ২। আলোক অনুনাদক (Optical resonator) ৩। আলোক বা অন্য পাম্পিং ব্যবস্থা।

সক্রিয় মাধ্যম ঃ

সক্রিয় মাধ্যম হ'ল অণু, পরমাণু বা আয়নের সমবায়ে সৃষ্ট কোন কঠিন, তরল বা বায়বীয় পদার্থ। এই মাধ্যম আলোর বিবর্ধক হিসাবে কাজ করে। আপনি আগেই জেনেছেন যে বিবর্ধক হিসাবে সফল হতে গেলে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতার অবস্থা সৃষ্টি করতে হবে।

কিভাবে তা' করা যায়? দু'টি শক্তিস্তরের মধ্যে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা সৃষ্টি করার জন্য তিনস্তর এবং চারস্তর ব্যবস্থার সাহায্য নেওয়া হয়।

চিত্র 10.4 এ তিনস্তর লেজার ব্যবস্থা প্রদর্শিত হয়েছে।

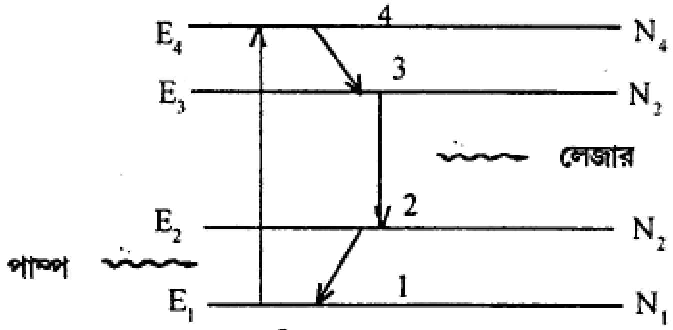


চিত্র 11.4

1 নং স্তর ভূমিস্ত স্তর। 2 নং ও 3 নং স্তর উত্তেজিত স্তর। আলোক পাম্পের সাহায্যে 1 নং স্তর থেকে পরমাণুদের 3 নং উত্তেজিত স্তরে উত্তোলিত করা হয়। সেখান থেকে পরমাণুরা অতি দ্রুত অবিকিরণ প্রক্রিয়ায় 2 নং স্তরে নেমে আসে । এভাবে পাম্পের সাহায্যে পরমাণুকে 1 নং স্তর থেকে 3 নং স্তরের মধ্যে দিয়ে 2 নং স্তরে নিয়ে আসা হয়। 2 নং স্তরটি মিতস্থায়ী (Metastable) হতে হবে। (জীবনকাল~10^{-3}sec) 3 নং স্তর থেকে 2 নং স্তরে নেমে আসা অতিদ্রুত হ'লে অধিকাংশ পরমাণুই 3নং থেকে 1নং স্তরের বদলে 2 নং

স্তরে নেমে আসবে। 2 নং এবং 1 নং স্তরের মধ্যে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা সৃষ্টি হয় এবং লেজার প্রক্রিয়া এই দুই স্তরের মধ্যে নিবদ্ধ থাকে।

চিত্র 11.5 এ চারস্তর লেজার ব্যবস্থা দেখান হয়েছে।

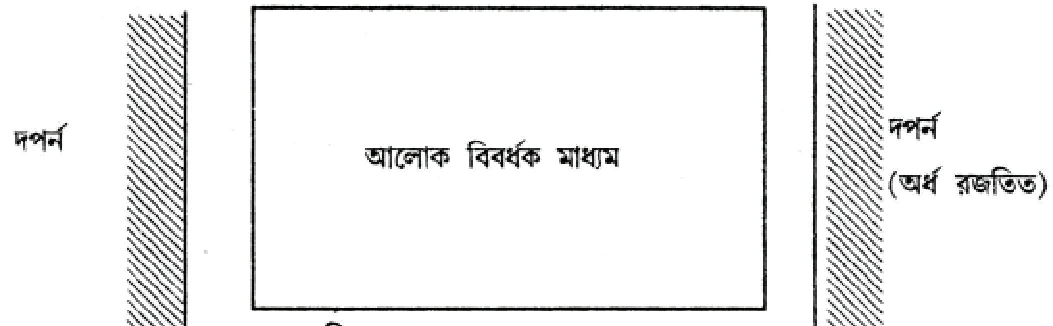


(চিত্র নং 11.5)

1 নং স্তর ভূমিস্থ স্তর ও 2, 3, 4 নং স্তরগুলি পরমাণুর উত্তেজিত স্তর। আলোক পাম্পের সাহায্যে পরমাণুকে 1 নং স্তর থেকে 4নং স্তরে নিয়ে যাওয়া হয়। সেখান থেকে অতি দ্রুত অবিকিরণ প্রক্রিয়ার দ্বারা পরিবর্তনের মাধ্যমে ৩নং স্তরে নেমে আসে। 3 নং স্তর মিতস্থায়ী স্তর (জীবনকাল $\sim 10^{-3}$ sec) এই স্তরটি লেজারের উচ্চতর স্তর ও 2 নং স্তরটি লেজারের নিম্নতর স্তর। নিম্নতর স্তরটির স্বল্প জীবনকাল হওয়া প্রয়োজন কারণ পরমাণু 2 নং স্তর থেকে 1 নং স্তরে যাওয়ার পরে পাম্পের সাহায্যে আবার 4 নং স্তরে উত্তোলিত হতে পারে 2 নং স্তর থেকে 1 নং স্তরে যাওয়ার পরে পাম্পের সাহায্যে আবার 4 নং স্তরে উত্তোলিত হতে পারে। 2 নং স্তর থেকে 1 নং স্তরে যাওয়ার হার যদি 2 নং স্তরে পরমাণুর অবস্থানের হার থেকে বেশী হয় তবে স্বল্প পাম্প শক্তিতেই 2-3 স্তরের মধ্যে জনসংখ্যার বিপরীতক্রমতা সৃষ্টি করা সম্ভবপর। 2 নং স্তর ও 3 নং স্তরের মধ্যে জনসংখ্যার ক্রমতার পরিবর্তন কি হারে পাম্প করা হচ্ছে তার উপর নির্ভর করে।

সাধারণভাবে বলা যায় যে তিন স্তর ব্যবস্থার তুলনায় চারস্তর ব্যবস্থায় অনেকটা সহজেই জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা অবস্থাটি সৃষ্টি করা যায়।

আমরা আগেই দেখেছি যে কোন মাধ্যমে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা সৃষ্টি করতে পারলে আলোক বিবর্ধন করা সম্ভব। প্রায় একবর্ণী ও তীব্র শক্তিসম্পন্ন লেজার রশ্মি পেতে গেলে মাধ্যমকে কম্পক (Oscillator) হিসাবে কাজ করতে হবে এবং তার জন্য উৎপাদিত বিকিরণশক্তির একটি অংশকে পুনরায় উৎপাদন প্রক্রিয়ায় ব্যবহারের জন্য ফেরত পাঠাতে হবে। এই ফেরত পাঠানোর কাজটি করা হয় সক্রিয় মাধ্যমের দুই প্রান্তে দু'টি প্রতিফলক বা দর্পন বসিয়ে। দর্পন দুটি সমতলীয় বা বক্রতলীয় হতে পারে। এই ব্যবস্থাকে বলা হয় আলোক অনুনাদক (optical resonator) বা আলোক অনুনাদ গহ্বর (Optical resonant cavity)



চিত্র **11.6** আলোকঅনুনাদ গহ্বর

লেজার ব্যবস্থায় আলোক অনুনাদ গহ্বরই মূল অংশ। লেজার চালু করার পর প্রথমে বিভিন্ন দিকে স্বতঃস্ফূর্ত ফোটনের বিকিরণ হয় এবং একই সঙ্গে উদ্দীপিত ফোটনও সৃষ্টি হয়। গহ্বরের অক্ষরেখার প্রায় সমান্তরাল দিকে যেসব ফোটন ধাবমান তারা ছাড়া বাকী সমস্ত ফোটনই অল্প সময়ের মধ্যে অনুনাদ গহ্বরের পার্শ্বদেশ দিয়ে বেরিয়ে যায়। এদিকে অক্ষরেখার কাছাকাছি যে সব ফোটন ধাবমান তাদের তৈরী আলোকরশ্মি দুই দপর্ণে প্রতিফলিত হয়ে অসংখ্যবার কার্যকরী মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যাতায়াত করে এবং যেহেতু কার্যকরী মাধ্যমে আলোক বিবর্ধনের শর্ত পালিত হয় সেই কারণে এই অসংখ্যবার যাতায়াতের ফলে রশ্মির তীব্রতা বহুগুণে বৃদ্ধি পায়। শেষ পর্য্যন্ত অর্ধ-রজতিত দপর্ণের মধ্যে দিয়ে অতি সমান্তরক (collimating) তীব্র লেজার রশ্মির নির্গমন হয়। দুই প্রতিফলকের মধ্যে কার্যকরী মাধ্যম অনুনাদ গহ্বরের মত কাজ করে। এখানে দুই প্রতিফলকে নিস্পন্দ বিন্দু (Nodal points) সৃষ্টি হবে এবং স্থির তরঙ্গের অনুনাদ হবে এমনভাবে যে দুই প্রতিফলকের মধ্যে পূর্ণসংখ্যার অর্ধতরঙ্গ থাকবে। L দুই প্রতিফলকের মধ্যে দূরত্ব হ'লে

$$m.\frac{\lambda}{2} = L \qquad \therefore \lambda = \frac{2L}{m} \qquad \text{..................} \quad (11.12)$$

এখানে $\lambda =$ মাধ্যমে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $= \lambda_0/\mu$

μ মাধ্যমের প্রতিসরণ গুণাংক। $\lambda_0 =$ শূন্যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য

কম্পাংক $\nu_m = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{(2L/m)} = \frac{mv}{2L}$ .... (11.13)

m একটি পূর্ণসংখ্যা। বিভিন্ন m এর জন্য গহ্বরের ভিতরে বিভিন্ন কম্পনের ধরণ (mode) সৃষ্টি হবে। দু'টি পরপর কম্পনের ধরণের মধ্যে কম্পাংকের অন্তর হ'ল

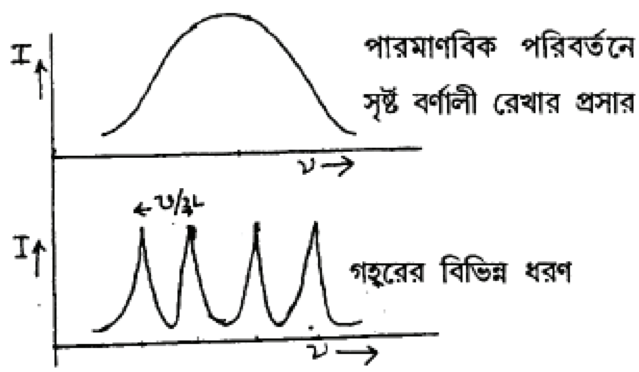
$$\Delta\nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{v}{2L} \dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

গ্যাস লেজারের ক্ষেত্রে লেজারের দৈর্ঘ্য 1 মিটার ধরা হ'লে

$\Delta\nu = 150MH_3$

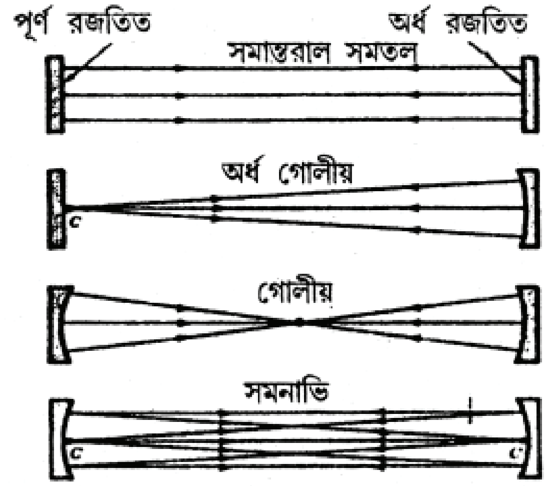
আমরা আগেই উল্লেখ করেছি যে লেজার থেকে যে আলো পাওয়া যায় তা' বিশেষভাবে একবর্ণী। এটা কিভাবে ঘটে? আমরা জানি স্বাভাবিক স্বতঃস্ফূর্ত পারমাণবিক পরিবর্তনের ফলে বর্ণালী রেখার সৃষ্টি হয়। বর্ণালী রেখা এক বিস্তৃত কম্পাংকের মধ্যে প্রসারিত থাকে যার নাম ব্যান্ড। এই ব্যান্ডের কম্পাংকের প্রসারের মধ্যেই অনুনাদ গহ্বরে বিভিন্ন স্থায়ী ধরণের সৃষ্টি হয়। কিন্তু প্রত্যেকটি ধরণের যে কম্পাংকের প্রসার আছে তা' বর্ণালী রেখার প্রসারের তুলনায় নগন্য। লেজারের অনুনাদ গহ্বর থেকে এক বা একাধিক স্থায়ী ধরণ অনুযায়ী একটি বা কয়েকটি সরু ব্যান্ডের আলোর নির্গত হবে। চুনি লেজার উদাহরণ হিসাবে নেওয়া যাক। এই লেজারের বর্ণালীরেখার ব্যান্ড হ'ল 330 $GH_3 (1GH_3 = 10^9 H_3)$ কিন্তু লেজার গহ্বরের ব্যান্ডের প্রসার কম্পাংকের হিসাবে মাত্র 30 MH_3।

চিত্র 11.7 এতে কম্পাংক অনুসারে সাধারণ বর্ণালী রেখার আকৃতি প্রদর্শিত হয়েছে এবং সেই সঙ্গে অনুনাদ গহ্বরে সৃষ্ট সূচিমুখ সদৃশ বিবিধ ধরণের কম্পাংকের প্রসারও দেখানো হয়েছে।



চিত্র 11.7

আমরা এতক্ষণ লেজার গহ্বর আলোচনায় গহ্বরের দুই প্রান্তে দু'টি সমান্তরাল সমতলীয় দর্পনের কথা বলেছি। এ-ছাড়া আরও কার্যকরী বিভিন্ন ব্যবস্থা আছে। চিত্র 11.8 এ চার প্রকার দর্পণের অবস্থানে দেখান হয়েছে।



চিত্র 11.8 লেজারে ব্যবহার হয় এমন চাররকম প্রান্তদর্পণ

আলোক ও অন্য পাম্পিং ব্যবস্থা ঃ

লেজার চালু রাখার জন্য কার্যকরী মাধ্যমের অণু পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরে অবস্থানের সময়ে 'জনসংখ্যা বিপরীত ক্রমতা' অবস্থা সৃষ্টি করতে হবে। একাধিক প্রক্রিয়ায় এটা করা হয়ে থাকে। প্রথমে আমরা বলছি আলোক পাম্পিং ব্যবস্থার কথা। এখানে ফোটনের সাহায্যে পরমাণুকে নিম্নতর শক্তিস্তর থেকে উচ্চতর শক্তিস্তরে নিয়ে যাওয়া হয়। ফোটনের কম্পাংক $\nu = (E_1 - E_0)/h$ হ'লে, বই কম্পাংকের আলো শোষণ করে পরমাণু E_0 স্তর থেকে E_1 স্তরে উন্নীত হবে। আলোক পাম্পিং ব্যবস্থা কঠিন পদার্থের লেজার অথবা তরল রঞ্জক লেজারের (Liquid dye Laser) ক্ষেত্রে বেশি উপযুক্ত। কোন শক্তিশালী আলোক উৎস থেকে আলো কার্যকরী মাধ্যমে শোষিত হলে মাধ্যমের পরমাণুরা উচ্চতর শক্তিস্তরে চলে যায়। আলোক উৎস হ'ল লেজার রড বা সিলিন্ডারের চারপাশে জড়ানো চমক বাতি (Flash lamp)।

গ্যাস ও অর্ধপরিবাহী লেজারে বৈদ্যুতিক পাম্পিং ব্যবস্থা ব্যবহৃত হয়। যখন গ্যাসীয় মিশ্রণে বৈদ্যুতিক মোক্ষণ (Electric discharge) চালানো হয় তখন কিছু আয়ন ও মুক্ত ইলেকট্রন সৃষ্টি হয়। আয়নের তুলনায় ইলেকট্রনের অধিক গতিশক্তির জন্য ইলেকট্রনই চার্জহীন পরমাণুকে সংঘর্ষের মাধ্যমে উচ্চতর শক্তিস্তরে নিয়ে যায়।

11.2.4 কাল ও দেশ সম্পর্কীয় সুসম্বদ্ধতা (Temporal and spatial coherence)

লেজার সম্পর্কে আলোচনায় আমরা বিশেষভাবে উল্লেখ করেছি যে এর আলো খুবই সুসম্বদ্ধ ও প্রায়

একবর্ণী। আলোর সুসম্বদ্ধতা বিষয়ে একটি সহজ ধারণা দেওয়ার জন্য একটি সংক্ষিপ্ত আলোচনা এখানে সংযোজিত হ'ল।

+x অক্ষরেখায় অসীম দৈর্ঘ্যের একটি সমতল তরঙ্গমালার সমীকরণ হল---

$$\psi(x,t) = A\cos(kx - \omega t + \varphi) \quad \text{.......................................} (11.15)$$

যে কোন x-এ ψ এর মান সর্বদাই $(-\infty<t<\infty)$ সাইনবক্রীয় (sinusoidal) থাকবে। এটি একটি আদর্শ অবস্থা। এখানে তরঙ্গের একটিই কম্পাংক $(\nu = \frac{\omega}{2\pi})$ । যে কোন দু'টি নির্দিষ্ট বিন্দুর মধ্যে দশার অন্তর সর্বদাই কাল নিরপেক্ষ। আবার কোন নির্দিষ্ট x এর মানে কোন নির্দিষ্ট সময়ের ব্যবধানে দশার অন্তর t এর ওপর নির্ভর করবে না। তরঙ্গের দশার এই বিশেষ ধর্মকে বলা হচ্ছে **নিখুঁত কাল সুসম্বদ্ধতা** (Perfect temporal coherence) । তরঙ্গের রশ্মির দিক নির্দেশের লম্বতলে অবস্থিত যে কোন দু'টি বিন্দুর মধ্যে দশার অন্তর কাল নিরপেক্ষ। এই ধর্মকে বলা হয় **নিখুঁত দেশ সুসম্বদ্ধতা** (Perfect spatial coherence)। সাধারণ আলোক উৎসের ক্ষেত্রে এই আদর্শ তরঙ্গের ধর্ম পালিত হয় না। কারণ এখানে যে আলোর বিকিরণ হয় তা হল সসীমদৈর্ঘ্যের তরঙ্গমালা। পরমাণু থেকে আলো বিকিরণ করার সময় পরমাণু উত্তেজিত অবস্থা থেকে নিম্নতর অবস্থায় যেতে সময় নেয় আনুমানিক 10^{-9} sec । এই সময়ে আলো 3 মিটার মত পথ অতিক্রম করে। এটা হল পরমাণু থেকে যে আলোর বিকিরণ হয় তার সঙ্গে যুক্ত তরঙ্গমালার দৈর্ঘ্য। এই সসীম দৈর্ঘ্যের তরঙ্গমালার ফুরিয়ে বিশ্লেষণ করলে কম্পাংকের একটি বিস্তার পাওয়া যাবে যাকে বলা হয় **বর্ণালী রেখার স্বাভাবিক বিস্তার** (Natural spectral line width)। এছাড়া তাপীয় আলোক উৎসে পরমাণুদের এলোমেলো গতি এবং আলোর অনিয়মিত বিকিরণের জন্য বর্ণালী রেখা আরও চওড়া হয়ে যায়। এ ছাড়া আছে ডপলার ক্রিয়া এবং এই কারণে যে বিস্তার হয় তাকে বলা হয় ডপলার বিস্তার। এভাবে বর্ণালী রেখার ব্যান্ডের প্রসার $\Delta\nu$ সৃষ্টি হয়। আমরা লিখতে পারি

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau_c} \quad \text{........................} (11.16)$$

এখানে τ_c-কে বলা হয় আলোক তরঙ্গের **সুসম্বদ্ধ সময়** (Coherence time)। এই সময়ে আলো যে দূরত্ব অতিক্রম করে তাকে বলা হয় সুসম্বদ্ধ দৈর্ঘ্য L (Coherence length) ।

$$L = C\tau_c = \frac{C}{\Delta\nu} \quad \text{.............} (11.17)$$

সাধারণ আলোক উৎসের ক্ষেত্রে বর্ণালী রেখার বিস্তার $\Delta\nu \sim 10^{10} H_z$ । এই আলোক উৎসের তুলনায় লেজারের

বিষয়টি পৃথক। লেজার যখন চালু করা হয় তখন তার আলোক অনুনাদ গহ্বরে বিভিন্ন অনুদৈর্ঘ্য ধরণ উদ্দীপিত হয় যার প্রত্যেকটির সাথে যুক্ত আছে নির্দিষ্ট কম্পাংক। লেজার যদি একটি ধরণে অনুনাদিত হয় তা' হলে যে আলো পাওয়া যাবে তা হবে মূলতঃ একটি সাইন তরঙ্গ। কিন্তু এর সাথে অনিয়মিত স্বতঃস্ফূর্ত উদ্দীপনের জন্য আলো যুক্ত হয়ে লেজার আলোর কম্পাংকের একটা বিস্তার দেখা যায় যদিও সাধারণ আলোক উৎসের তুলনায় তা' নগন্য।

একটি সুনিয়ন্ত্রিত লেজারে $\Delta\nu \sim 500H_z$ হতে পারে। তাহলে $\tau_c \sim 2\times10^{-3}\,\text{sec}$ হবে এবং সুসম্বন্ধ দৈর্ঘ্য হবে $C\tau_c \sim 6\times10^7\,\text{cm} = 600\ \text{Km}$

লেজারের আলোর সুসম্বন্ধ দৈর্ঘ্য খুব বেশী হওয়ার জন্য জোর ব্যবহার করে সুদীর্ঘ পথান্তর (path difference) নির্ভর আলোর ব্যতিচার পরীক্ষা করা হয়েছে। দুটি লেজার আলোক উৎসের সাহায্যে সাফল্যের সঙ্গে আলোক স্বরকম্প (Optical beat) প্রদর্শন করা সম্ভব হয়েছে। এই কারণে এই আলোর দুটি ধর্ম আমরা উল্লেখ করতে পারি ঃ (১) এই আলোর দেশ সুসম্বদ্ধতা নিখুঁত না হলেও তার কাছাকাছি। পরীক্ষায় এটা প্রদর্শিত হয়েছে। (২) আলোকরশ্মির দিক নির্দেশ খুবই নির্দিষ্ট।

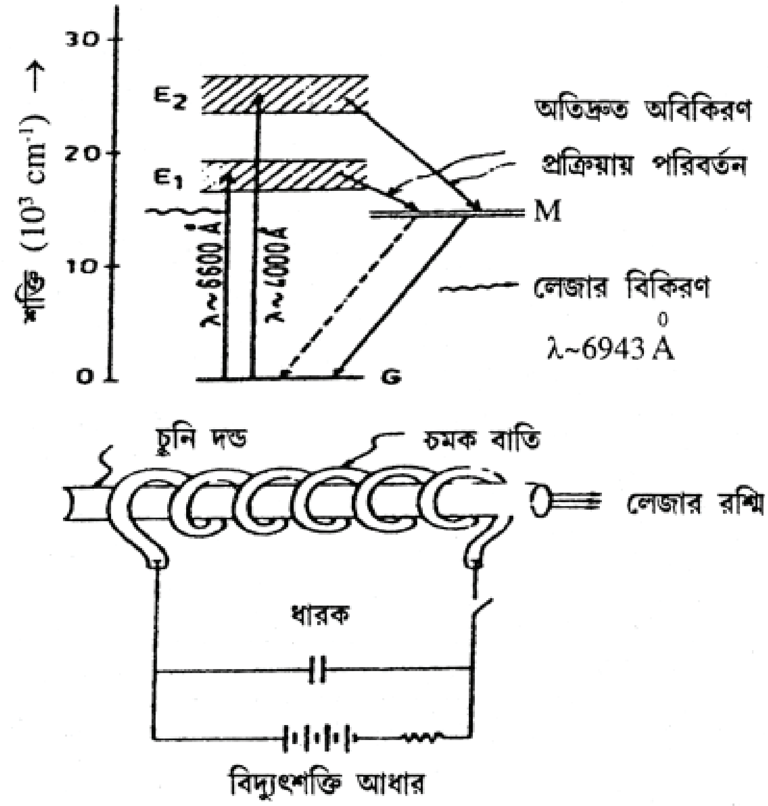
11.3 বিবিধ লেজার

১৯৬০ সালে প্রথম চুনি লেজারের অবির্ভাবের পর নানা প্রয়োজনে গত কয়েক দশকে বিভিন্ন ধরণের বহু লেজার তৈরী হয়েছে। এই লেজার তৈরীতে কঠিন, গ্যাসীয়, তরল এই তিন অবস্থার বিভিন্ন সক্রিয় মাধ্যমই ব্যবহার করা হয়েছে। এ সম্পর্কে বিস্তারিত আলোচনা এখানে সম্ভব নয়। আমরা আপনার জন্য প্রধানতঃ দুটি সুপরিচিত লেজারের কার্যপ্রণালী বিষয়ে একটি প্রাথমিক বিবরণ দেব।

11.3.1-তে চুনি লেজার ও 11.3.2-তে হিলিয়াম-নিয়ন লেজার নিয়ে আলোচনা করা হয়েছে। 11.3.3 -তে খুব সংক্ষেপে আরও কয়েকটি লেজারের উল্লেখ করা হয়েছে।

11.3.1 চুনি লেজার (Ruby laser)

১৯৬০ সালে সর্বপ্রথম সার্থকভাবে যে লেজারটি তৈরী হয়েছে তা হল টি. এইচ মেইমেনের চুনি লেজার। এর মধ্যে আছে চুনির একক ক্রিস্টাল (Single Crystal) যার দুই প্রান্ত সমতল। একটি প্রান্ত সম্পূর্ণভাবে রজতিত (Silvered) এবং অপর প্রান্ত অর্ধরজতিত করা হয়েছে এই দুটি প্রান্ত নিয়ে একটি অনুনাদী গহ্বর (Resonant cavity) তৈরী হয়েছে। চুনির মধ্যে আছে এল্যুমিনিয়াম অক্সাইড এবং অন্ততঃ পক্ষে 0.05% এল্যুমিনিয়াম পরমাণুর পরিবর্তে ক্রোমিয়াম পরমাণু। চিত্র 11.9 এ চুনি ক্রিস্টালে অবস্থিত ক্রোমিয়াম আয়নের বিভিন্ন শক্তিস্তরের অবস্থান দেখান হয়েছে।



চিত্র 11.9 চুনি লেজার

চমক বাতি (Flas lamp) থেকে নির্গত আলো শোষণ করে ক্রোমিয়াম আয়ন E_1, E_2 শক্তিব্যান্ডের অন্তর্ভুক্ত শক্তিস্তরে পৌছায়। সেখান থেকে অতি দ্রুত অবিকিরণ পরিবর্তনের মাধ্যমে মিতস্থায়ী স্তর M এ চলে যায়। E1, E2 শক্তিব্যান্ডে অবস্থিত শক্তিস্তরের আয়ু খুবই সীমিত ($\angle 10^{-9}$ sec) মিতস্থায়ী স্তর M-এর আয়ু তুলনামূলকভাবে অনেক বেশী 10^{-3} sec এর মত। চুনি ক্রিস্টালটি একটি দন্ডের আকারে থাকে যার দৈর্ঘ্য সাধারণতঃ 2 মিমি থেকে 10 মিমি হয়। দন্ডটির চারপাশ জেনন (Xenon) চমকবাতি দিয়ে জড়ানো থাকে। চমকবাতিটি একটি ধারকের সঙ্গে যুক্ত থাকে। ধারকটি কয়েক হাজার জুলের শক্তি কয়েক মিলি সেকেন্ডের মধ্যে ক্ষরিত করে। এই প্রক্রিয়ায় চমকবাতিটি কয়েক মেগাওয়াটের শক্তি বিকিরণ করে। এই শক্তির একটি অংশ ভূমিস্তরে অবস্থিত ক্রোমিয়াম আয়ন শোষণ করে এবং E_1 বা E_2 শক্তিস্তরে আরোহণ করে। E_1 ও E_2 Å শক্তিস্তরে আরোহণ করার জন্য যথাক্রমে 6600Å ও 4000Å এর আলো দরকার হয়। ক্রোমিয়াম আয়ন খুব দ্রুত অবিকিরণ প্রক্রিয়ার মাধ্যমে উত্তেজিত স্তর থেকে মিতস্থায়ী স্তর M এ নেমে আসে। মিতস্থায়ী

স্তরের আয়ু দীর্ঘ হওয়ায় এই স্তরে থাকা পরমাণুর সংখ্যা বাড়তে থাকে এবং এইভাবে শেষে M ও G স্তরের মধ্যে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা (population inversion) সৃষ্টি হয়। এই অবস্থায় স্বতঃস্ফূর্ত ফোটন বিকিরণের দ্বারা লেজার প্রক্রিয়া শুরু হয়। ক্রোমিয়াম পরমাণু মিতস্থায়ী স্তর M থেকে ভূমিস্থ স্তর G তে স্বতঃস্ফূর্ত পরিবর্তনের দ্বারা 6943 Å দৈর্ঘ্যের লাল আলো বিকিরণ করে।

চুনি দন্ডের দুই প্রান্তের প্রতিফলক দিয়ে বারবার প্রতিফলনের সাহায্যে 6943Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো দন্ডের ভিতরে অনেকটা পথ যায়। এর ফলে দন্ডের মধ্যে M স্তরে বর্তমান অন্য ক্রোমিয়াম পরমাণুর সঙ্গে এই সব ফোটনের মিথস্ক্রিয়া (Interaction) অনেকটা বেড়ে যায়। এখানে যে আলোকরশ্মি দুই প্রান্ততলের ওপর লম্বভাবে আপতিত হয় সেই রশ্মিই কেবলমাত্র বারে বারে প্রতিফলিত হতে পারে। সুতরাং চুনিদন্ডের অক্ষের সমান্তরালভাবে যে রশ্মি গমন করে তার শক্তি উদ্দীপিত বিকিরণের কারণে অনেকটাই বিবির্ধিত হয়। এই রশ্মির একটি অংশ লেজার রশ্মি হিসাবে অধরজতিত তল দিয়ে নির্গত হয়। আলোক পাম্প হিসাবে চমকবাতি কাজ করার জন্য লেজার রশ্মি অবিচ্ছিন্নভাবে নির্গত না হয়ে ঝলকে ঝলকে নির্গত হয়। চুনি লেজারে খুব উচ্চ ক্ষমতার লেজার রশ্মির ঝলক তৈরী করা সম্ভব।

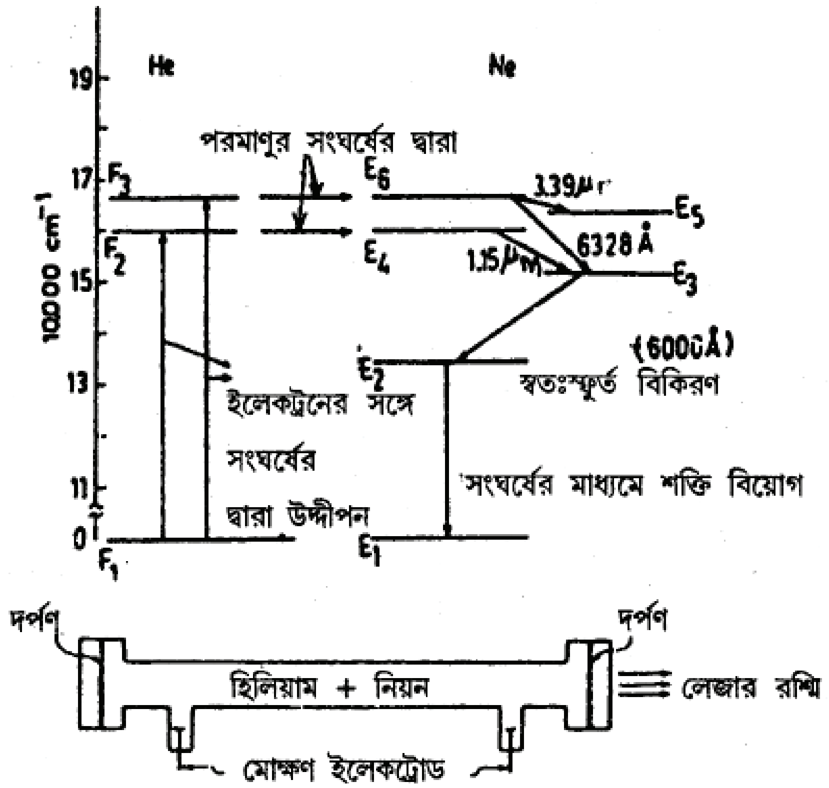
11.3.2 হিলিয়াম-নিয়ন লেজার (Helium-Neon Laser)

গ্যাস মাধ্যম ব্যবহার করে প্রথম যে লেজারটি তৈরী হয়েছিল তা হল হিলিয়াম-নিয়ন-লেজার। আমেরিকার বেল টেলিফোন পরীক্ষাগারে ১৯৬১ সালে আলী জাভান ও তাঁর সহকর্মীরা এই লেজার তৈরী করেন।

কঠিন বস্তুর লেজার-এ চমকবাতির সাহায্যে আলোক পাম্প পদ্ধতি প্রয়োগ করে লেজার মাধ্যমে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতা সৃষ্টি করা হয়। গ্যাস লেজারের ক্ষেত্রে আলোক পাম্প পদ্ধতি একেবারেই কার্যকরী নয় কারণ গ্যাসের পরমাণু খুব সুনির্দিষ্ট শক্তিস্তরে থাকে অপর পক্ষে কঠিন বস্তুর লেজারে শক্তিস্তরগুলি সুনির্দিষ্ট না হয়ে এক একটি গুচ্ছ তৈরী করে। গ্যাস লেজারের ক্ষেত্রে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতার জন্য বিদ্যুৎ ক্ষরণ হল একটি বিশেষ কার্যকরী পদ্ধতি।

হিলিয়াম-নিয়ন-লেজারে আছে একটি লম্বা ও সরু ক্ষরণ নল (1 cm ব্যাস ও 80 cm দীর্ঘ) যার মধ্যে 1 mm পারদ চাপযুক্ত হিলিয়াম গ্যাস ও তার সঙ্গে 0·1 mm পারদ চাপযুক্ত নিয়ন গ্যাস প্রবেশ করানো হয়েছে। এই গ্যাস মিশ্রণটি হল লেজার মাধ্যম যার দুপাশে দর্পণ বসানো আছে। এভাবে একটি অনুনাদী গহ্বর তৈরী করা হয়েছে। একটি দর্পণ সম্পূর্ণভাবে ও অন্য দর্পণটি আংশিকভাবে আলো প্রতিফলিত করে। কোন গ্যাস মিশ্রণের মধ্যে ডিসচার্জ পাঠালে ইলেকট্রনরা ত্বরণের ফলে নলের মধ্যে দিয়ে চলে যায় এবং হিলিয়াম পরমাণুদের সঙ্গে সংঘর্ষে লিপ্ত হয়ে সেই পরমাণুদের উচ্চতর শক্তিস্তরে উন্নীত করে।

চিত্র 11.10 হিলিয়াম ও নিয়নের কিছু শক্তিস্তরের অবস্থান দেখান হয়েছে।



চিত্র 11.10 হিলিয়াম নিয়ন লেজার

হিলিয়াম পরমাণুদের সহজেই F_2, F_3 উত্তেজিত স্তরে উন্নীত করা যায়। এই স্তরগুলি মিতস্থায়ী এবং সেইজন্য হিলিয়াম পরমাণু নিম্নতরস্তরে অবরোহণের পূর্বে এই সব স্তরে তুলনামূলকভাবে অধিকতরস্থায়ী ভাবে অবস্থান করে। নিয়নের কিছু উত্তেজিত স্তর হিলিয়ামের F_2, F_3 স্তরের অনুরূপ। এর ফলে F_2, F_3 স্তরে অবস্থান করছে এমন হিলিয়াম পরমাণু E_1 স্তরে নিয়ন পরমাণুর সঙ্গে সংঘর্ষে শক্তির বিনিময় করে। নিয়ন পরমাণু E_4, E_6 ইত্যাদি স্তরে উন্নীত হয় এবং হিলিয়াম পরমাণু ভূমিস্থ স্তরে ফিরে যায়। হিলিয়াম পরমাণু F_2, F_3 স্তরে বেশী সময় থাকে বলে এই ধরণের প্রক্রিয়ার উচ্চ সম্ভাব্যতা আছে। গ্যাস মিশ্রণে ক্রমাগত ক্ষরণ পাঠিয়ে নিয়নের উত্তেজিত স্তর E_4 এবং E_6 এ অবস্থানের সংখ্যা ক্রমাগতই বাড়ানো হয়। এই উপায়ে E_4 (বা E_6) শক্তিস্তর এবং নিম্নতর শক্তিস্তর E_5 E_3-র মধ্যে জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমতার অবস্থার সৃষ্টি করা সম্ভব হয় বিভিন্ন স্তরে সংক্রমণের (Transimssion) ফলে 3.39 μm, 1.15 μm এবং 6328 Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ফোটন নির্গত হয়। প্রথম দুটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য অবলোহিত অঞ্চলের অন্তর্ভুক্ত এবং তৃতীয় তরঙ্গ দৈর্ঘ্য হল হিলিয়াম নিয়ন লেজারের সুপরিচিত লাল আলো।

E_3 স্তর থেকে নিয়ন পরমাণু স্বতঃস্ফূর্তভাবে E_2 স্তরে নেমে যায় 6000Å এর একটি ফোটন নির্গত করে। এরপর নলের গাত্রে সংঘর্ষের ফলে নিয়ন পরমাণু E_1 স্তরে নেমে আসে।

5 থেকে 10 ওয়াট ক্ষমতা জোগান দিয়ে হিলিয়াম-নিয়ন লেজার থেকে 1-50 মিলিওয়াট ক্ষমতা পাওয়া যায়।

কঠিন বস্তুর লেজারের তুলনায় গ্যাস লেজার থেকে যে আলো পাওয়া যায় তা আরও একবর্ণী ও একদিক নির্দেশক। এই ধরণের লেজারে নিরবচ্ছিন্ন আলো পাওয়া যায়।

11.2.3 আরও কয়েকটি লেজার

চুনি লেজারের পর আরও নানা কঠিন বস্তুর লেজার তৈরী হয়েছে। এসব লেজারের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বিস্তার 170 nm থেকে 3900 nm। মূল বস্তু কাচ বা ইট্রিয়াম অ্যালিউমিনিয়াম গার্নেট (Yttrium Aluminium Garnet সংক্ষেপে-YAG) এর সঙ্গে নিওডাইমিয়াম (Neodymium) আয়ন Nd^{3+} যুক্ত করে যথাক্রমে Nd-doped glass ও Nd-doped YAG লেজার তৈরী হয়েছে। লেজার রশ্মি ঝলকে বা অবিচ্ছিন্নভাবে নির্গত হতে পারে। তরংগ দৈর্ঘ্য 1060nm.

হিলিয়াম-নিয়ন গ্যাস লেজার ছাড়া কার্বন-ডাই-অক্সাইড(CO_2), নাইট্রোজেন(N_2), আগর্ন(Ar) ক্রিপটন(Kr) ইত্যাদি গ্যাস লেজার তৈরী হয়েছে ।

অর্ধপরিবাহী লেজার বা ডায়োড লেজার আয়তনে খুব ছোট হয়। এই ধরনের লেজারের নানা প্রয়োজনে ব্যাবহার আছে।

উদাহরণঃ গ্যালিয়াম আরসেনাইড (Ga As) লেজার। ডাই লেজার (Dye Laser) তৈরী করা হয়েছে রঞ্জক পদার্থের দ্রবণ ব্যবহার করে। এ ধরনের লেজার নির্গত লেজার রশ্মির তরঙ্গ দৈর্ঘ্য নিয়ন্ত্রিত করা যায়।

11.4 লেজারের নানা ব্যবহারিক প্রয়োগ

লেজার রশ্মির দিকনির্দেশ খুবই নির্দিষ্ট হওয়ার জন্য কোন দীর্ঘ সুড়ঙ্গপথের দিশা ঠিক করতে লেজার ব্যবহার করা হয়েছে। স্ট্যানফোর্ড বিশ্ববিদ্যালয়ে দু মাইল দীর্ঘ রৈখিক ত্বরায়কের বিভিন্ন অংশের সঠিক অবস্থান ঠিক করতে লেজার ব্যবহৃত হয়েছে।

লেজার রশ্মি খুবই সমান্তরাল হওয়ায় এই রশ্মিকে খুব ছোট জায়গায় ফোকাস করা যায়। এর ফলে অনেকটা আলোকশক্তি খুব ক্ষুদ্র আয়তনের মধ্যে কেন্দ্রীভূত করা সম্ভবপর হয়েছে। এভাবে বিভিন্ন পদার্থে অতিসূক্ষ্ম ছিদ্র করতে বা উচ্চগলনাংকের বিভিন্ন ধাতুর পাতকে কাটতে লেজার ব্যবহার করা হয়।

লেজার রশ্মির সাহায্যে কোন দূরত্ব খুব সঠিকভাবে মাপা সম্ভব। মার্কিন মহাকাশচারীরা চাঁদে অবতরণের পর সেখানে প্রতিফলক স্থাপন করেছিলেন। পৃথিবী থেকে লেজার রশ্মি চাঁদের প্রতিফলকে প্রতিফলিত হয়ে আবার পৃথিবীতে ফিরে আসার সময়ের ব্যবধান থেকে পৃথিবী থেকে চাঁদের দূরত্ব এক মিটারের মধ্যে মাপা সম্ভবপর হয়েছে যা' অন্য উপায়ে মাপলে দূরত্বের অনিশ্চয়তা অন্ততঃপক্ষে 80 km এর কম হত না।

লেজারের সাহায্যে গতিশীল কোন বস্তুর যেমন বিমান বা রকেটের যাত্রাপথকে খুব নিখুঁত ভাবে নিয়ন্ত্রণ করা যায়। এভাবে ক্ষেপণাস্ত্রের গতিপথ নিয়ন্ত্রিত করে অনেক দূরের লক্ষ্যবস্তুকে ঠিকমত আঘাত করা যায়।

লেজারের সঙ্গে আলোক তন্তু ব্যবহার করে যোগাযোগ প্রযুক্তিতে বৈপ্লবিক পরিবর্তন আনা সম্ভব হয়েছে। বাহক আলোক তরঙ্গের অতিউচ্চ কম্পাংকের জন্য (10^{14} -10^{15} H_3) বহু বাক্ সংকেত (speech signals) সংখ্যা 10^{11}-10^{12} একই সঙ্গে পাঠানো সম্ভব হয়েছে।

আর একটি বিশেষ উল্লেখযোগ্য বিষয় হ'ল ত্রিমাত্রিক ছবি তৈরীর ক্ষেত্রে হলোগ্রাফ প্রযুক্তিতে লেজারের ব্যবহার লেজারের সাহায্যে সংযোজন রিঅ্যাকটার তৈরী ও আইসোটোপ পৃথকীকরণ সম্পর্কে নানাভাবে চেষ্টা করা হচ্ছে।

লেজার অত্যন্ত তীব্র শক্তি সম্পন্ন আলোক রশ্মি হওয়ায় সংশ্লিষ্ট বিদ্যুৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের বিস্তারও খুব বেশী হবে। এই কারণে লেজার রশ্মির সাহায্যে বিভিন্ন পদার্থের অরৈনিক আলোক সংক্রান্ত ধর্মকে (Non-linear Optical properties) অনুসন্ধান করা সম্ভবপর হয়েছে।

বিশুদ্ধ গবেষণায় লেজারের নানা প্রয়োগ আছে। সাম্প্রতিককালের দু'টি খুব উল্লেখযোগ্য গবেষণা ক্ষেত্র আমরা উল্লেখ করব যেখানে লেজার ব্যবহার করা হয়েছে। পদার্থবিজ্ঞানের 1997 সনের নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়েছিল লেজার শীতলীকরণ ও নিস্তড়িৎ পরমাণুকে ধরার বিষয়ে (Laser cooling & trapping of neutral atoms)। লেজার রশ্মির সাহায্যে পরমাণুর গতিকে নিয়ন্ত্রণে এনে গতিশক্তি নির্ভর পরমাণুর তাপমাত্রা চরম শূন্যের খুবই কাছে মাইক্রো কেলভিন তাপমাত্রায় (10^{-6} k°) আনা সম্ভব হয়েছে।

1999 রসায়নের নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়েছে ফেমটো সেকেন্ড বর্ণালীর (Femto second spectoscopy) সাহায্যে অতি দ্রুত রাসায়নিক বিক্রিয়ার বিভিন্ন পরিবর্তিত অবস্থাকে পরিমাপ করার জন্য। এই গবেষণায় অতি উচ্চ কম্পাংকের ঝলক লেজার ব্যবহার করা হয়েছে।

চিকিৎসা বিজ্ঞানে লেজারের ব্যবহার নিয়ে নানা গবেষণা হচ্ছে। আমরা এখানে একটি প্রয়োগের উল্লেখ করব। এক্সাইমার লেজার (Excimer laser) দিয়ে কর্নিয়ার আকৃতির সূক্ষ্ম পরিবর্তন ঘটিয়ে স্বল্প দৃষ্টি বা দীর্ঘদৃষ্টি জনিত দৃষ্টির ত্রুটিকে সংশোধন করা হয়েছে।

11.5 হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতি

11.5 ভূমিকা

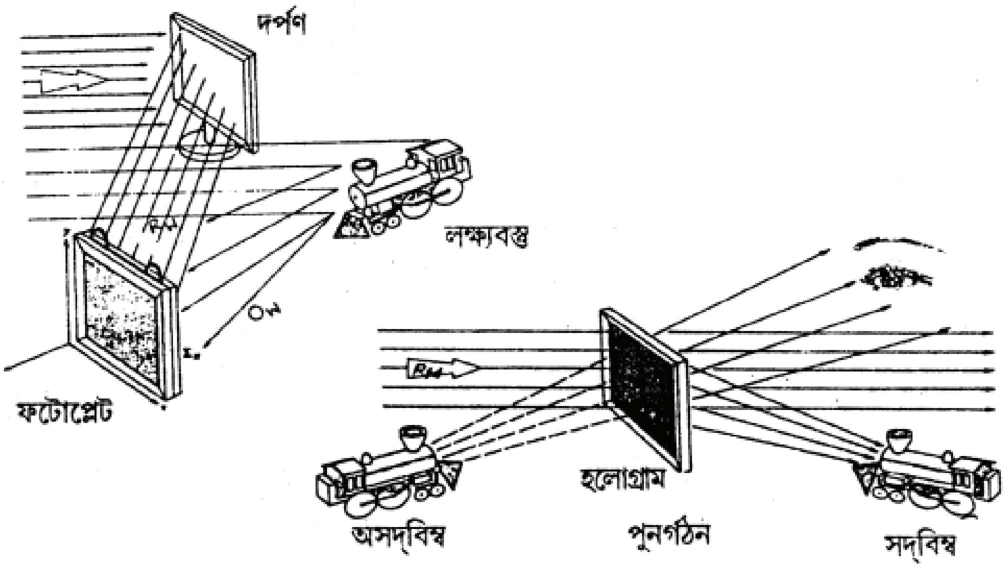
প্রস্তাবনায় হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির পরিচয় দিতে আমরা উল্লেখ করেছিলাম যে এ-হল ত্রিমাত্রিক প্রতিবিম্ব গঠনের একটি বিশেষ কার্যকরী উপায় যেখানে লেন্সের কোন ব্যবহার নেই।

এখানে সাধারণভাবে এই পদ্ধতির কার্যপ্রণালী আপনার অবগতির জন্য উপস্থাপিত করছি।

এই পদ্ধতির দুটি পর্যায় আছে।

1. প্রথমে কোন লক্ষ্যবস্তু থেকে একবর্ণ বা প্রায় সেইমত আলো বিচ্ছুরণ করিয়ে সেই আলোর সঙ্গে নজির হিসাবে ব্যবহৃত একটি সুসম্বদ্ধ তরঙ্গের সঙ্গে ব্যাতিচার ঘটিয়ে যে ব্যাতিচার ফ্রিজের সৃষ্টি হয় তার আলোকচিত্র নেওয়া। অলোকচিত্রে এই ব্যাতিচার ফ্রিজের যে নকশা সৃষ্টি হয় তাকে ডেনিস গেবর নাম দিয়েছিলেন 'হলোগ্রাম' (Hologram)। এই নামকরণের তাৎপর্য আপনি ক্রমেই বুঝতে পারবেন।

2. দ্বিতীয় পর্যায় হল আলোক ক্ষেত্রে বা প্রতিবিম্বের পুর্নগঠন (Reconstruction) । এবার 1 নং পদ্ধতিতে যে হলোগ্রাম তৈরী হয়েছে তার মধ্যে কোন সুসম্বদ্ধ আলোর রশ্মিগুচ্ছ পাঠান হয়। এবার যে বিবর্তন সৃষ্টি হয় তার সাহায্যে প্রতিবিম্বের পুর্নগঠন হয়।

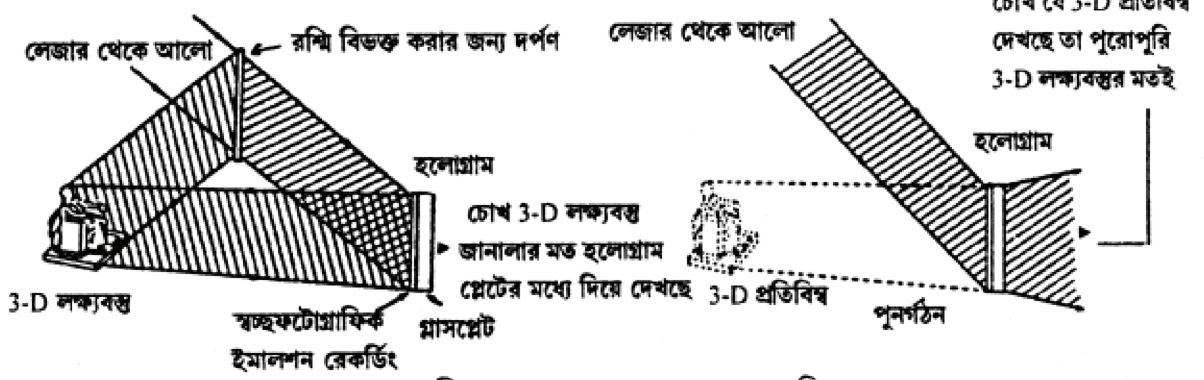


চিত্র 11.11 হলোগ্রাফ পদ্ধতিতে অভিলেখন (Recording) ও প্রতিবিম্বের পুনর্গঠন (Reconstruction)

চিত্র 11.11-এ এই দুই পর্যায় একটি উদাহরণের সাহায্যে দেখানো হয়েছে।

প্রথম পর্যায়ে হলোগ্রাম কিভাবে তৈরী হচ্ছে আমরা দেখব। একটি পশ্চাদ্‌পট বা নজির আলোক তরঙ্গ ব্যবহার করা হয়েছে। এটি উপযুক্ত উৎস থেকে নেওয়া সুসম্বদ্ধ আলোক তরঙ্গ যা সাধারণতঃ সমতল তরঙ্গ হিসাবে দর্পনে প্রতিফলিত হয়ে তির্যকভাবে Σ_H তলে (এখানে xy তল) ফটোপ্লেটের ওপর আপতিত হচ্ছে। একই সঙ্গে লক্ষ্যবস্তু (এখানে একটি খেলনা রেল ইঞ্জিন) থেকে বিক্ষিপ্ত আলো O_w ফটোপ্লেটে এসে পড়ছে। নজির আলোক তরঙ্গ ও লক্ষ্যবস্তু থেকে বিক্ষিপ্ত আলো ব্যাতিচারের মাধ্যমে ফটোপ্লেটে ব্যাতিচার ফ্রিঞ্জ তৈরী করছে। এভাবে ফটোপ্লেটে লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলোর বিস্তার ও দশা পূর্ণভাবে সঞ্চিত হচ্ছে। ফটোপ্লেটকে রাসায়নিক উপায়ে তৈরী করে যে স্থায়ী অভিলেখন সৃষ্টি হয় তাকে ডেনিস গেবর **হলোগ্রাম** নাম দিয়েছিলেন। গ্রীক শব্দ 'হলো'র (Holo) অর্থ হল 'সমগ্র বা সম্পূর্ণ'। এখানে ফটোপ্লেটে লক্ষ্যবস্তু সম্পর্কিত পূর্ণতথ্য সঞ্চিত থাকে। এই তাৎপর্য স্মরণ করেই গেবর এই হলোগ্রাম নামটি রেখেছিলেন। এবার আপনি হলোগ্রাম কথাটির বিশেষ ব্যবহারের কারণ উপলব্ধি করছেন।

দ্বিতীয় পর্যায়কে বলা হয় পুনর্গঠন (Reconstruction)। কারণ এ পর্যায়ে হলোগ্রাম থেকে লক্ষ্যবস্তুর পূর্ণ চিত্রগ্রহণ করা হয়। হলোগ্রামকে যে আলোক তরঙ্গ দিয়ে আলোকিত করা হয় তাকে বলে পুনর্গঠন আলোক তরঙ্গ। এই আলোক তরঙ্গ প্রথম পর্যায়ে ব্যবহৃত নজির তরঙ্গ বা অনুরূপ আলোক তরঙ্গ। চিত্র 11.11 এই আলোক তরঙ্গ R_w দিয়ে হলোগ্রামকে আলোকিত করা হয়েছে। হলোগ্রামের মধ্যে দিয়ে বিবর্তনের ফলে যে যে আলোক তরঙ্গ পাওয়া যাবে তার মধ্যে একটি হ'ল লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলোক তরঙ্গ। হলোগ্রামে চোখ রাখলে সেই আলোক তরঙ্গ চোখে পড়বে এবং দ্রষ্টার মনে হবে যেন প্রকৃত লক্ষ্যবস্তুকেই সে দেখছে। এই আলোকতরঙ্গ হল কল্পিত প্রতিবিম্বের সাথে যুক্ত। অপর আলোক তরঙ্গ বাস্তব প্রতিবিম্ব তৈরী করছে। চিত্র 11.11 দুটি অবস্থাই দেখানো হয়েছে। 3-D হলোগ্রাফ পদ্ধতির আর একটি উদাহরণ চিত্র 11.12 এ দেওয়া হয়েছে।



চিত্র 11.12 3-D হলোগ্রাফ পদ্ধতি

11.5.2 তত্ত্ব

সাধারণভাবে হলোগ্রাম তৈরী ও পুনর্গঠনের বিষয়টি আমরা এতক্ষণ আলোচনা করলাম। সেই বিষয়টি আর একটু বিশদভাবে এবার গণিতের সাহায্য নিয়ে আপনার সামনে উপস্থাপিত করছি।

পশ্চাদ্‌পট আলোকতরঙ্গ বা নজির আলোকতরঙ্গ যা' সাধারণত: Σ_H তলে তির্যকভাবে আপতিত সমতল তরঙ্গ তার গাণিতিক রূপ হল:

$$R\ (x,y,t) = A\ \cos\ \left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right) \qquad (11.18)$$

ν হ'ল তরঙ্গের কম্পাংক। সমতল তরঙ্গ হওয়ার জন্য তরঙ্গের বিস্তার A একটি ধ্রুবক কিন্তু Σ_H তলে তির্যকভাবে আপতিত হওয়ার জন্য দশা $\phi(x,y)$ অবস্থান (x,y) এর ওপর নির্ভর করে। এবার লক্ষ্যবস্তু থেকে যে আলোক তরঙ্গ Σ_H তলে আসছে তার গাণিতিক রূপ লেখা যায়

$$O(x,y,t) = B(x,y)\cos\left[2\pi\nu t + \psi(x,y)\right] \qquad (11.19)$$

এখানে তরঙ্গের বিস্তার ও দশা দুইই (x,y)-এর জটিল অপেক্ষক। কারণ $O(x,y,t,)$ একটি অনিয়মিত তরঙ্গ ফ্রন্ট নির্দেশ করছে। লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা এই তরঙ্গ ফ্রন্টের পরিমাপ যেভাবে অবস্থানের ওপর নির্ভর করে তার দ্বারাই লক্ষ্যবস্তু সম্পর্কে যাবতীয় তথ্য এখানে যেন কোন সাঙ্কেতিক ভাষায় লিপিবদ্ধ করা আছে। এখন দুই আলোক তরঙ্গ $R(x,y,t)$ ও $O(x,y,t)$ Σ_H তলে উপরিপাত করে। এর ফলে যে ব্যাতিচার হয় তা' দিয়ে Σ_H তলে আলোক দীপ্তির বন্টন $I(x,y)$ নিয়ন্ত্রিত হয়। ফটোপ্লেটের ইমালশনের মাধ্যমে এই আলোকদীপ্তির বন্টন যে ভাবে লিপিবদ্ধ হয় তা $I\ (x,y)$-এর সমানুপাতিক ধরা যেতে পারে।

এখন $I(x,y) = \langle (R+O)^2 \rangle$ .... (11.20) $\langle\ \rangle$ চিহ্ন সময়ের গড় বুঝায়।

$$I(x,y) = \langle (R+O)^2 \rangle$$

$$= \left\langle \left\{ A\cos\left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right) + B(x,y)\cos\left(2\pi\nu t + \psi(x,y)\right) \right\}^2 \right\rangle$$

$$= A^2\left\langle \cos^2\left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right)\right\rangle + B^2(x,y)\left\langle \cos^2\left(2\pi\nu t + \psi(x,y)\right)\right\rangle$$

$$+ 2AB(x,y)\left\langle \cos\left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right)\cos\left(2\pi\nu t + \psi(x,y)\right)\right\rangle$$

$$= \frac{1}{2}A^2 + \frac{1}{2}B^2(x,y) + AB(x,y)\left\{\left\langle \cos\left(4\pi\nu t + \phi(x,y) + \psi(x,y)\right)\right\rangle + \left\langle \cos\left(\phi(x,y) - \psi(x,y)\right)\right\rangle\right\}$$

$$= \frac{A^2}{2} + \frac{B^2}{2}(x, y) + AB(x, y)\cos(\phi(x, y) - \psi(x, y))..........(10.21)$$

অনুশীলনী

প্রমাণ করুন যে

$$\left\langle \cos^2(2\pi\nu t + \phi(x, y)) \right\rangle = \frac{1}{2}$$

$$\left\langle \cos^2(2\pi\nu t + \psi(x, y)) \right\rangle = \frac{1}{2}$$

$$\left\langle \cos(4\pi\nu t + \phi(x, y) + \psi(x, y)) \right\rangle = 0$$

(11.21) এর প্রথম দু'টি পদে লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলোর দশা $\psi(x, y)$ অনুপস্থিত ও সেই কারণে এই দু'টি পদ আকর্ষণীয় নয়। কিন্তু তৃতীয় পদটিতে আপনি লক্ষ্য করবেন যে ফটোগ্রাফিক প্লেট আলোর তীব্রতার অভিলেখনে লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলোক তরঙ্গের বিস্তার $B(x,Y)$ ও দশা $\psi(x, y)$ বিশেষভাবে উপস্থিত আছে। যদিও এই অভিলেখন ও লক্ষ্যবস্তুর মধ্যে প্রকৃত কোন সাদৃশ্য নেই কিন্তু অভিলেখনে লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলোর বিস্তার ও দশা পূর্ণভাবে সঞ্চিত আছে। এই কারণে ডেনিস গেবর এই ফটোপ্লেটের নাম দিয়েছিলেন হলোগ্রাম। এই নামকরণের তাৎপর্য আপনি আগেই জেনেছেন।

কোন তৈরী (Processed) হলোগ্রামের মধ্যে আলো যাওয়ার পরিমাণ I (x,y) এর সঙ্গে সমানুপাতিক করা সম্ভবপর। এই কারণে হলোগ্রামের মধ্যে আলোর উত্তরণাংক (Transmittance) ধ্রুবক বাদ দিলে লেখা যায়, $t(x, y) = I(x, y)$ এখন এই হলোগ্রামকে ν কম্পাংকের পুনর্গঠন আলোক তরঙ্গ $R_w(x, y, t)$ দিকে আলোকিত করা হ'ল।

এখানে $R_w(x, y, t) = R_{ow}(x, y)\cos(2\pi\nu t + \phi(x, y))..........(10.22)$

হলোগ্রাম থেকে যে আলো পাওয়া যাবে তা' হ'ল $t(x,y)\, R_w(x,y,t)$

$$= \left\{\frac{A^2}{2} + \frac{B^2}{2}(x, y) + AB(x, y)\cos(\phi(x, y) - \psi(x, y))\right\} \times R_{ow}(x, y)\cos(2\pi\nu t + \phi(x, y))$$

$$= \frac{1}{2}\left(A^2 + B^2(x,y)\right) R_{ow}(x,y)\cos\left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right)$$

$$+AB(x,y)R_{ow}(x,y)\cos\left(2\pi\nu t + \phi(x,y)\right) \times \cos\left(\phi(x,y) - \psi(x,y)\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(A^2 + B^2(x,y)\right)R_w(x,y,t) + \frac{1}{2}AB(x,y)R_{ow}\cos\left(2\pi\nu t + 2\phi(x,y) - \psi(x,y)\right)$$

$$+\frac{1}{2}AB(x,y)R_{ow}(x,y)\cos\left(2\pi\nu t + \psi(x,y)\right) \quad \text{.................................} (11.23)$$

(11.23) তিনটি আলাদা পদে বিভক্ত। প্রত্যেকটি পদ হ'ল হলোগ্রাম থেকে যে আলো আসছে তার একটি অংশ। হলোগ্রামকে একটি জটিল গ্রেটিং হিসাবে মনে করা যায়। $\frac{1}{2}\left(A^2 + B^2(x,y)\right)R_w(x,y,t)$ পদটি হ'ল পুনর্গঠন আলোক তরঙ্গের বিস্তার মডলুন (Amplitude modulated) রূপ যা' সরাসরি অবিচ্যুত অবস্থায় চলে এসেছে। এই পদটিকে বিবর্তন গ্রেটিং-এর শূন্যক্রম বিবর্তন ফ্রিঞ্জ হিসাবে ধরা যায়।

তৃতীয় পদটি হলোগ্রাম তৈরী করার সময় লক্ষ্যবস্তু থেকে যে আলো এসেছিল তারই মতন। যখন হলোগ্রাম থেকে আসা এই আলোর দিকে তাকানো যায় তখন লক্ষ্যবস্তুর একটি পুনর্গঠিত ত্রি-মাত্রিক ছবি চোখের সমানে ভেসে উঠবে। চোখ সরালে এই ত্রিমাত্রিক লক্ষ্যবস্তুরও স্থান পরিবর্তন হবে।

দ্বিতীয় পদটি হ'ল পুনর্গঠন প্রক্রিয়ার দ্বারা সৃষ্ট অপর একটি প্রতিবিম্ব। এটি একটি বাস্তব প্রতিবিম্ব যার আলোকচিত্র নেওয়া সম্ভব।

হলোগ্রাম তৈরী করতে হলে একটি বিশেষ সাবধানতা অবলম্বন করতে হয়। যদি স্থায়ী অবস্থার লেজার ব্যবহার করে হলোগ্রাম তৈরী করা হয় তা' হলে যতক্ষণ হলোগ্রাম তৈরী করা হচ্ছে সে সময়ে অপটিক্যাল যন্ত্রপাতি যে টেবিলে রাখা হয় সেখানে কোন কম্পনই হতে দেওয়া চলবে না। সেইজন্য একেবারেই কাঁপবে না এ-ধরণের ভারী গ্রেনাইট টেবিল বা স্টীলের টেবিল ব্যবহার করা হয়। এই সাবধানতার কারণ আলোক তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের একচতুর্থাংশের সমান কম্পন হলেও হলোগ্রাম পুরোপুরি নষ্ট হয়ে যাবে। বর্তমানে উন্নত ফটোগ্রাফিক ফিল্ম ও চমক লেজার যেমন চুনি লেজার ব্যবহার করে তাৎক্ষণিক হলোগ্রাম তৈরী সম্ভব হয়েছে।

আমাদের এই আলোচনা শেষ করার আগে হলোগ্রামের একটি বিশেষ বৈশিষ্ট্যের কথা এখানে উল্লেখ করা প্রয়োজন। কোন বস্তু থেকে আলো যদি প্রতিফলনের পর চারিদিকে ছাড়িয়ে যায় তা হ'লে ঐ বস্তুর প্রতি বিন্দু থেকে আলো হলোগ্রামের সর্বত্র পৌঁছে যাবে। এই কারণে হলোগ্রামের প্রতি অংশ সমগ্র বস্তু থেকে আলো পাবে। সুতরাং এ ধরণের তৈরী হলোগ্রামকে নানা অংশে ভাঙলেও প্রতি অংশই লক্ষ্য বস্তুকে সম্পূর্ণভাবে

পুর্নগঠন করতে পারবে। তবে একটা সীমাবদ্ধতা আছে। হলোগ্রামের অংশ যত ছোট হবে ততই পুনর্গঠিত প্রতিবিম্বে বিভাজন কম হবে।

11.5.3 ব্যবহারিক প্রয়োগ

হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির বহু ব্যবহার আছে যা' ভবিষ্যতে আরও বাড়বে। এখানে স্থানাভাবে কয়েকটি মাত্র ব্যবহারের কথাই আমরা সংক্ষেপে বলব। গত দু-তিন দশক ধরেই বিভিন্ন বাণিজ্যিক পণ্যে, ক্রেডিট কার্ড ইত্যাদিতে হলোগ্রামের বিপুল ব্যবহারের সাথে অনেকেই পরিচিত। কিন্তু এই ব্যবহার মূলতঃ ছবি হিসাবে।

হলোগ্রাফ পদ্ধতির একটি বিশেষ প্রয়োগ শিল্পে হয়েছে। এটি হ'ল কোন ক্ষতি না করে বস্তু সামগ্রীর পরীক্ষা করা। এভাবে খুব সূক্ষ্ম ত্রুটি ধরা সম্ভব। যেমন বিমানের পাখার গঠনে কোন সূক্ষ্ম ত্রুটি আছে কিনা হলোগ্রাফ পদ্ধতিতে তা দ্রুত পর্যবেক্ষণ করা যায়।

কোন আয়তনের মধ্যে গভীরতা অনুযায়ী তথ্য হলোগ্রামে সঞ্চিত রাখা সম্ভবপর হয়েছে। এই ক্ষমতার জন্য অতি সূক্ষ্ম কণিকা নিয়ে ক্ষণিক কোন ঘটনাকে অনুসন্ধান করতে হলোগ্রাম ব্যবহার করা যায়। সাধারণ অনুবীক্ষণ যন্ত্রে অতি সূক্ষ্ম কণিকার অবস্থান নির্ণয় করে তাকে পর্যবেক্ষণ করা খুবই কঠিন। কিন্তু হলোগ্রামে যদি ঐ ঘটনার একটি অভিলেখ সঞ্চিত রাখা যায় তা'হলে পরে কোন সুবিধামত সময়ে পুনর্গঠনের সাহায্যে পুরো ঘটনা ভালভাবে পর্যবেক্ষণ করা যায়।

ব্যাতিচারমিতির (Interferometry) সাহায্যে হলোগ্রাফ পদ্ধতিকে বিশেষ কার্যকরী করা সম্ভব হয়েছে। দু'বার আলোকসম্পাত হলোগ্রাফ ব্যাতিচারমিতির প্রযুক্তি অনুযায়ী প্রথমে বস্তু থেকে আসা আলোক তরঙ্গ এবং নজির আলোক তরঙ্গ দিয়ে ফটোগ্রাফ প্লেটে আলোকসম্পাত করা হয়। তারপর বস্তুর পীড়নের পর ফটোগ্রাফ প্লেটকে আবার বস্তু থেকে আসা আলোক তরঙ্গ ও নজির আলোকতরঙ্গের প্রভাবে রাখা হয়। ফটোগ্রাফ প্লেট থেকে হলোগ্রাম তৈরী করার পর পুনর্গঠন আলোক তরঙ্গ দিয়ে হলোগ্রামকে আলোকিত করলে দুই বস্তু তরঙ্গের সৃষ্টি হবে। একটি বস্তু তরঙ্গ বস্তুর অপীড়িত অবস্থাকে প্রকাশ করবে এবং অপর বস্তু তরঙ্গ বস্তুর পীড়িত অবস্থাকে প্রকাশ করবে। এই দুই বস্তু তরঙ্গ ব্যাতিচারের মধ্যে দিয়ে ব্যাতিচার ফ্রিঞ্জ তৈরী করবে। এই ব্যাতিচার ফ্রিঞ্জের চেহারা থেকে বস্তুর পীড়নের পরিমাপ করা যায়।

হলোগ্রামকে তথ্য সঞ্চয়ের একটি ভাল উপায় হিসাবে ধরা যায়। 8mm পুরু হলোগ্রাম 550 পৃষ্ঠার তথ্য সঞ্চয় করে রাখা সম্ভব হয়েছে। হলোগ্রাফ পদ্ধতির আর একটি সম্ভাব্য প্রয়োগ হল ত্রি-মাত্রিক চলচ্চিত্র ব্যবস্থার রূপায়ণে।

11.6 সংক্ষিপ্তসার

একক 11 পাঠ করে আপনি জেনেছেন যে লেজার এক অভিনব আলোক উৎস যা' প্রায় একবর্ণী, অতিসমান্তরাল, একমুখী, শক্তিশালী ও সুসম্বদ্ধ আলোকরশ্মি সৃষ্টি করতে পারে।

● লেজার কথাটি 'light amplification by stimulated emission of radiation' এই ইংরাজি শব্দগুচ্ছের

● আদ্যক্ষর দিয়ে গঠিত।

● আপনি উদ্দীপিত বিকিরণ, আইনস্টাইন গুণাংক, জনসংখ্যার বিপরীত ক্রমজ, আলোক বিবর্ধন ইত্যাদি মৌলিক

● ধারণাগুলি জেনেছেন এবং লেজার গঠনে এই ধারণাগুলির গুরুত্ব অনুধাবন করেছেন।

● লেজারের তিনটি মূল অংশ আছে

1. সক্রিয় মাধ্যম
2. আলোক অনুবাদ গহ্বর
3. পাম্পিং ব্যবস্থা

● লেজারের কার্যপ্রণালী বিষয়ে জেনেছেন

● বিভিন্ন ধরনের লেজারের বিষয়ে জেনেছেন

● লেজারের নানা ব্যবহারিক প্রয়োগ বিষয়ে জ্ঞান লাভ করেছেন

● হলোগ্রাম ও হলোগ্রাফ পদ্ধতির মূল ধারণার সঙ্গে পরিচিত হয়েছেন

● হলোগ্রাফ পদ্ধতির দুই পর্যায় হল ১। রেকর্ডিং ২। পুনর্গঠন

● হলোগ্রাফ পদ্ধতির বিভিন্ন প্রয়োগ সম্পর্কে জেনেছেন।

11.7 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. বর্ণালী রেখার কম্পাংকের বিস্তারের সঙ্গে সুসম্বদ্ধ সময় (τ_c) এর মধ্যে সম্পর্ক হল বিসমানুপাতিক (Inversly proportional)

একটি একমাত্রিক সমতল তরঙ্গ যার অস্তিত্ব স্বল্প সময়ের জন্য উদাহরণ হিসাবে নিয়ে ফুরিয়ে বিশ্লেষণের সাহায্যে তরঙ্গের এই ধর্ম প্রমাণ করুন।

11.8 উত্তরমালা

সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. একটি একমাত্রিক সমতল তরঙ্গ x অক্ষরেখায়। তরঙ্গটির অস্তিত্ব $-\frac{\tau_c}{2} < t < \frac{\tau_c}{2}$ সময়ের জন্য $x = 0$

বিন্দুতে তরঙ্গের সমীকরণ হল

$$\psi(x=0,t)=Ae^{iw_0t},\ -\frac{\tau_c}{2}<t<\frac{\tau_c}{2}=0,\ |t|>\frac{\tau_c}{2}$$

এই সসীম তরঙ্গমালাকে প্রকাশ করা যায় বিভিন্ন কম্পাংকের ($\nu=w/2\pi$) অসীম সমতল তরঙ্গের উপরিপাতের দ্বারা।

সাধারণভাবে আমরা লিখতে পারি, $\psi(x=0,t)=\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)e^{i\omega t}d\omega$ .... (11.8.1)

আবার ফুরিয়ে সমাকল উপপাদ্যের সাহায্যে আমরা লিখতে পারি,

$$F(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\psi(x=0,t)e^{-i\omega t}dt \quad .... (11.8.2)$$

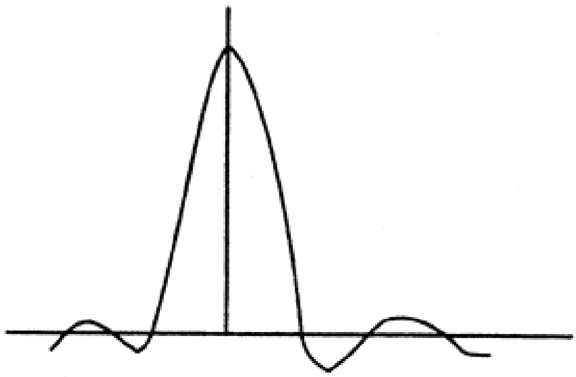
$F(\omega)$ হল ω কম্পাংকের সমতল তরঙ্গের বিস্তার তে $\psi(x=0,t)$ প্রতিস্থাপিত করে

$$F(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\tau_c}{2}}^{\frac{\tau_c}{2}}Ae^{i(\omega_o-\omega)t}dt$$

$$\therefore F(\omega)=\frac{1}{2\pi}.A.\frac{e^{i(\omega_o-\omega)\tau_{c/2}}-e^{-i(\omega_o-\omega)\tau_{c/2}}}{i(\omega_o-\omega)}=\frac{A}{\pi}\frac{\sin\left\{(\omega_o-\omega)\frac{\tau_c}{2}\right\}}{(\omega_o-\omega)}$$

$$=\frac{A\tau_c}{2\pi}\frac{\sin\left\{(\omega_o-\omega)\frac{\tau_c}{2}\right\}}{\left\{(\omega_o-\omega)\frac{\tau_c}{2}\right\}}$$

$F(\omega)$এর বিপরীতে ω এর লেখচিত্র অঙ্কন করা হয়েছে। (চিত্র 11.13)। এখানে লক্ষ্যণীয় যে $F(\omega)$এর শীর্ষমান ω_o কে ঘিরে তীক্ষ্ণভাবে উপস্থিত।



চিত্র **11.13**

ω_o এর দু'পাশে $F(\omega)$ এর বিস্তৃতির পরিমাপ করতে হলে প্রয়োজনীয় শর্ত হ'ল

$$\sin\left\{(\omega_o - \omega)\frac{\tau_c}{2}\right\} = 0$$

$$\therefore (\omega_o - \omega)\frac{\tau_c}{2} = \pi,\ \Delta\omega = \omega - \omega_o, \quad \Delta\omega\frac{\tau_c}{2} = \pi, \quad \Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$$

$\therefore 2\pi\Delta\nu = \frac{2\pi}{\tau_c} \quad \therefore \Delta\nu = \frac{1}{\tau_c}$ কম্পাংকের প্রসার $\Delta\nu$ সুসম্বদ্ধ সময় τ_c এর বিসমানুপাতিক ।

একক 12 ❑ আলোকীয় তন্তু

গঠন

12.1 প্রস্তাবনা

এর আগে আপনারা অলোকের প্রতিসরণ সম্পর্কে জেনেছেন। আলো ঘন মাধ্যম দিয়ে চলার পথে যদি লঘু মাধ্যমে আপতিত হয় আর সেই আপতন কোণ উভয় মাধ্যমের অন্তর্গত সংকট কোণের থেকে বেশি হলে আলো পূর্ণ আভ্যন্তরীণ প্রতিফলনের ফলে প্রথম মাধ্যমে চলে আসে। এই ঘটনার ব্যবহারিক প্রয়োগ আলোকীয় তন্তুর সাহায্যে যোগাযোগ ব্যবস্থায় আমরা দেখতে পাই। বর্তমান অধ্যায়ে আমরা আলোকীয় তন্তু সম্পর্কে বিশদ বিবরণ পাবো। আলোকীয় তন্তুর প্রকার ভেদ জানার সাথে সাথে আমরা ওই তন্তুর ব্যবহারিক প্রয়োগও জানতে পারবো। আলোকীয় তন্তুর যোগাযোগ ব্যবস্থা ছাড়াও অন্যান্য ক্ষেত্রে বিশেষ প্রয়োগ সম্পর্কে আমরা অবহিত হবো। সর্বশেষে যে কোনো স্টেপইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার সম্বন্ধে আমরা ধারণা পাবো।

উদ্দেশ্য : বর্তমান পাঠের উদ্দেশ্য হল আধুনিক যোগাযোগ ব্যবস্থায় আলোকীয় তন্তু ও অপটো ইলেকট্রনিক্স যে

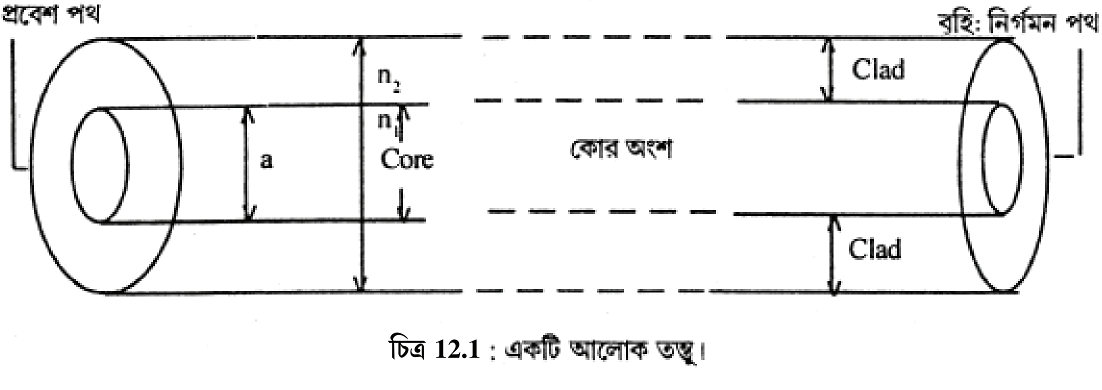
গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে তার সম্পর্কে কিছু জানা।

12.2 আলোকীয় তন্তু কি?

আলোকীয় তন্তু হল এক ধরনের অত্যন্ত সরু চুলের মত নিরেট কাচের নল। যে নলের ব্যাস 125 থেকে 150 মাইক্রন (মাইক্রোমিটার)। আলোকীয় তন্তু বা optical fibre-এর ব্যাস সমগ্র দৈর্ঘ্য জুড়ে একই থাকে। আর এই তন্তুর দৈর্ঘ্য কয়েক মিটার থেকে কয়েক শ পা কিলোমিটার পর্যন্ত হতে পারে। এই আলোক তন্তুকে আমরা একটি সুন্দর ওয়েভ গাইড (wave guide) হিসেবেও ভাবতে পারি। আলোক রশ্মিকে যদি উপযুক্তভাবে এই তন্তুর মধ্যে প্রবেশ করানো হয়, তাহলে অতি স্বচ্ছন্দে সেই রশ্মি আলোক তন্তুকে মাধ্যম করে বহুদূর পর্যন্ত তন্তুর সরলরৈখিব পথে বা বক্ররৈখিক পথে এগিয়ে যেতে পারে। প্রতি কিলোমিটার যাওয়ার জন্য আলোক রশ্মির এই তন্তু পথে শোষণও অত্যন্ত কম হয়। বিভিন্ন পলিমার দিয়েও তন্তু তৈরি করা যায়।

12.3 আলোকীয় তন্তু গঠন কি রকম ?

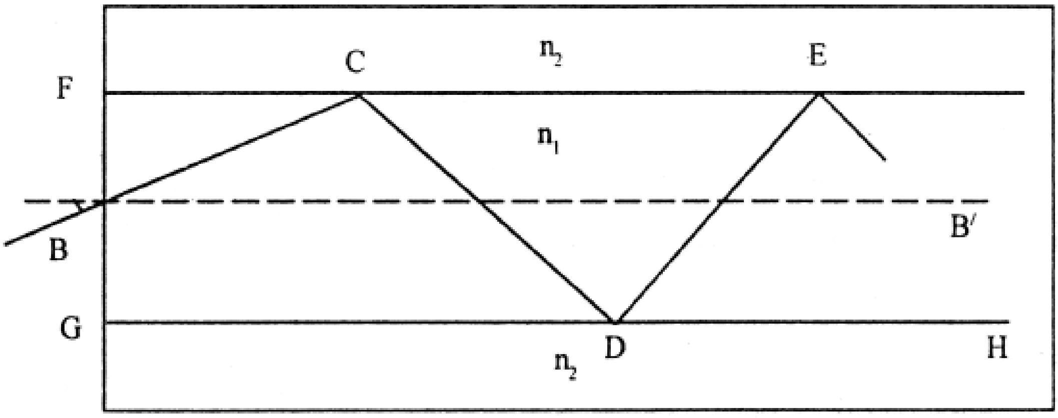
আলোকীয় তন্তুর গঠন কিন্তু অদ্ভুত। এই তন্তুর মাধ্যম তৈরি হয় দুটি ভিন্ন ভিন্ন প্রতি সরাংক (refractive index) - বিশিষ্ট একই মাধ্যম দিয়ে। অর্থাৎ যদি কাচ মাধ্যম দিয়ে তন্তু তৈরি করা হয় তাহলে দুটি ভিন্ন প্রতিসরাংকের কাচ দরকার হবে একটি আলোক তন্তু তৈরি করতে। একই ভাবে যদি পলিমার মাধ্যম হয় তাহলে দুটি ভিন্ন প্রতি সরাংকের একই পলিমার প্রয়োজন হবে একটি আলোকীয় তন্তু তৈরি করতে। 12.1 চিত্রে আমরা একটি আলোকীয় তন্তুর দ্বিমাত্রিক ব্যবচ্ছেদ দেখাচ্ছি।



চিত্র **12.1** : একটি আলোক তন্তু।

এই চিত্রে আমরা দেখতে পাচ্ছি আলোক তন্তুর অন্তস্থল বা কোর (core) অংশটি n_1 প্রতিসরাংকের কাঁচ দিয়ে তৈরী এবং বহিরাংশটি (cladding part) n_2 প্রতিসরাংকের কাঁচ দিয়ে তৈরি। কোরের ব্যাস যদি a হয় তবে কোর সমেত ক্লাডের ব্যাস b । এই ধরনের আলোক তন্তুকে বলা হয় স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু (step index optical fibre)। কোর অংশের ব্যাস যেমন সমগ্র তন্তু বরাবর একই থাকে তেমনই কোর সমেত ক্লাডের ব্যাস সমগ্র তন্তু জুড়ে একই থাকে বা সমান থাকে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে সমগ্র তন্তু বরাবর কোর সমেত ক্লাডের ব্যাস 'b' হবে এবং কেবলমাত্র কোরের ব্যাস সমগ্র তন্তু বরাবর 'a' ই থাকবে।

এখানে একটি বিষয় বলা অত্যন্ত জরুরি। সেটি হল 'b' যেমন 'a'র তুলনায় বড় অর্থাৎ $b > a$, তেমনি 'n_1' কিন্তু 'n_2'র তুলনায় বড় হবে। অর্থাৎ অর্থাৎ $n_1 > n_2$ স্টেপ ইনডেক্স আলোক তন্তুর ক্ষেত্রে কোরের প্রতিসরাংক অবশ্যই ক্লাডের প্রতি সরাংকের বেশি হতে হবে। আমরা 12.2 চিত্রে কিভাবে আলোকরশ্মি আলোকীয় তন্তুকে মাধ্যম করে প্রবাহিত হয় তা দেখাচ্ছি। তবে অবশ্যই স্টেপ আলোকীয় তন্তুর ক্ষেত্রে। এই ধরনের একটি স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু দেখানো হয়েছে ২নং চিত্রে। এই তন্তুতে ডট্ চিহ্ন দেওয়া রেখাটি (dotted line) এই



চিত্র **12.2** : আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে আলোর প্রবাহ। তন্তুটিকে একটি দ্বিমাত্রিক তলে দৈর্ঘ্য বরাবর ব্যবচ্ছেদ দেখান হয়েছে।

আলোক মাধ্যমের মাঝ-বরাবর গিয়েছে। এই রেখাটিই হল আলোকীয় অক্ষ রেখা। অর্থাৎ আলোকীয় তন্তু বা অপটিক্যাল ফাইবারটি যে নিরেট ঘন সিলিন্ডার দিয়ে তৈরি তার অক্ষটিই হল এই রেখাটি। 12.2 চিত্রে তন্তুর একটি দৈর্ঘ্য বরাবর ব্যবচ্ছেদ দেখানো হয়েছে। এই তন্তুর কোরটি 'n_1' প্রতিসরাংকের কাচ মাধ্যম এবং ক্ল্যাড বা কভার (cover) টি 'n_2' প্রতি সরাংকের কাচ মাধ্যম। ধরা যাক AB একটি আলোক রশ্মি, যা তন্তুর প্রবেশ পথে কোরের আলোক অক্ষের B বিন্দুতে পতিত হয়। এর পর আলোক রশ্মিটি প্রতিসরিত হয়ে BC রেখা ধরে কোর ও ক্ল্যাডের বাউন্ডারী (boundary) সম্বলিত বক্রতলের C বিন্দুতে পড়ে। এখানে AB রশ্মিকে এমনভাবে এবং এমন দিকে ফেলা হয় অর্থাৎ θ কোণের এমন একটি মানে AB কে পতিত করা হয়; যাতে BC রশ্মি FCE রেখা সূচিত কোর ও ক্ল্যাডের বাউন্ডারীর বক্রতল থেকে অভ্যন্তরীন পূর্ণ প্রতিফলন (Total internal reflection) হতে পারে। এইভাবে আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন হলে BC রশ্মির সমগ্র অংশটি কোর থেকে ক্ল্যাডে না প্রতিসরিত হয়ে আবার কোরে

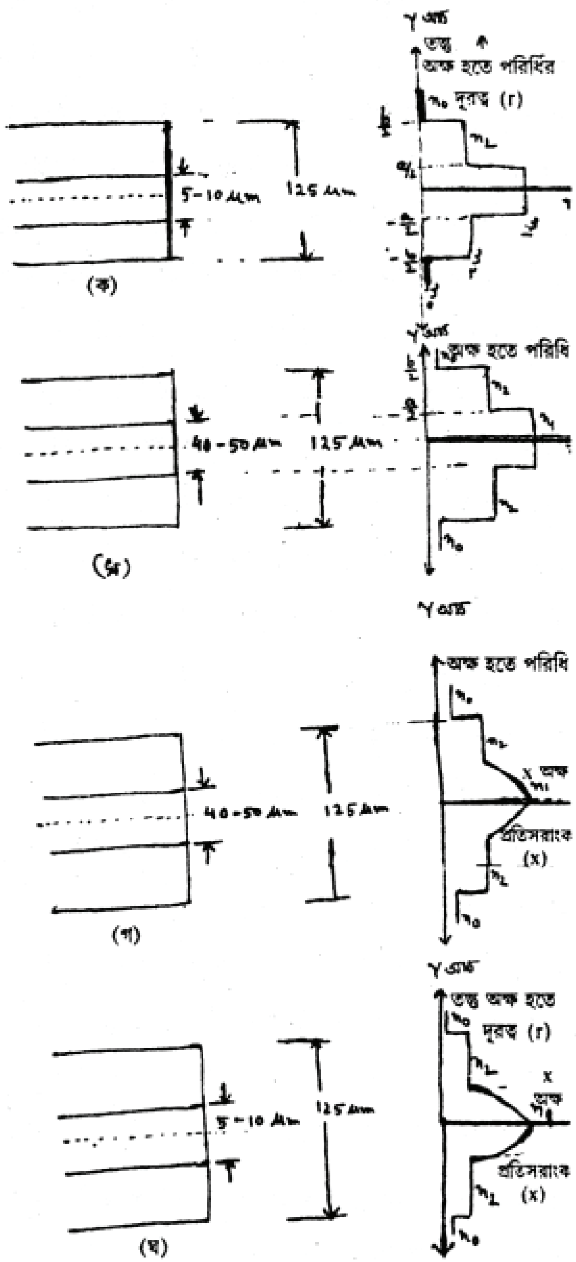
ফিরে আসে এবং CD পথে প্রবাহিত হয়। CD রশ্মি এবার GDH রেখা দ্বারা সূচিত বক্রতলের (এই বক্রতলটিও কোর ও ক্ল্যাডের বাউন্ডারীর বক্রতল) D বিন্দু থেকে পুনরায় অভ্যন্তরীন পূর্ণ প্রতিফলন হয় এবং DE পথে রশ্মিটি এগিয়ে যায়। দ্বিতীয় অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের কারন FCE রেখা ও GDH রেখা সম্পূর্ণ সমান্তরাল। এইভাবে কোর ও ক্ল্যাডের মিলনস্থল (Boundary) থেকে বার বার অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন হয়ে রশ্মিটি বহুদূর এগিয়ে যায় এবং সবশেষে তন্তুর বহির্মুখ থেকে নির্গমন হয়। যেহেতু অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের দ্বারা রশ্মিটি কোরের মধ্যেই অন্তর্নিহিত থাকে সেই কারণে আলোক রশ্মিটির তীব্রতার পরিমাণও খুব কম হয় না, যখন এটি তন্তু মাধ্যমে প্রবাহিত হয়।

12.4 আলোকীয় তন্তু কত প্রকার?

এবার আমরা আলোচনা করব যে আলোকীয় তন্তু সাধারণত কত প্রকার হয়। উত্তরটি হল চার প্রকার। 3 নং চিত্রে এই চার ধরনের তন্তু বা optical fibre দেখানো হয়েছে।

৩ (ক) চিত্রে আমরা যে ধরণের আলোকীয় তন্তু দেখতে পাচ্ছি তার নাম এক মোড বিশিষ্ট স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু (single mode step index optical fibre) । এই তন্তুর কোরের ব্যাস 5 মাইক্রোমিটার (μm) থেকে 10 মাইক্রোমিটার (μm) পর্যন্ত হয়। কিন্তু কোর সমেত সমগ্র তন্তুর ব্যাস 125 মাইক্রোমিটার। এই ৩ (ক) চিত্রের ডান দিকে এই ধরনের তন্তুর প্রতিসরাংক প্রোফাইল (refractive index profile) দেখানো হয়েছে। এখানে তন্তুর আলোকীয় অক্ষরেখা থেকে তন্তুর পরিধির উভয় দিকে $\frac{a}{2}$ দূরত্ব পর্যন্ত n_1 প্রতিসরাংক (অর্থাৎ সমগ্র কোর মাধ্যম জুড়ে n_1 প্রতিসরাংক) বিশিষ্ট মাধ্যম এবং উভয় দিকে (Y অক্ষে) $\frac{a}{2}$ দূরত্ব থেকে $\frac{b}{2}$ দূরত্ব পর্যন্ত মাধ্যমের প্রতিসরাংক n_2 (অর্থাৎ সমগ্র ক্লাড বা কভার জুড়ে n_2 প্রতিসরাংকের মাধ্যম) এবং Y অক্ষ উভয়দিকে $\frac{b}{2}$ দূরত্ব হতে সমগ্র ক্ল্যাডের বাইরের অংশ n_o প্রতি সরাংকের মাধ্যম। এই n_o প্রতিসরাংকের মাধ্যমটিকে আমরা বায়ু মাধ্যম হিসেবেও ভাবতে পারি যদি ক্ল্যাড বা কভারের পরের মাধ্যমটি বায়ু থাকে। কিছু কিছু তন্তুর এই কভারের পরের মাধ্যম টি থাকে একটি প্লাস্টিক বা পলিমার। অর্থাৎ আলোকীয় তন্তুটি একটি প্লাস্টিক বা পলিমার আবরণ (জ্যাকেট) দ্বারা আবৃত থাকে। সেক্ষেত্রে n_o হবে ওই প্লাস্টিকের প্রতিসরাংক। এই ৩(ক) এবং ৩ (খ) চিত্রের ডানদিকে অঙ্কিত ওই আলোকীয় তন্তুগুলির প্রতিসরাংক প্রোফাইল (refractive index profile)-টিকে দেখতে অনেকটা সিঁড়ি বা স্টেপের (step) মত, সেই কারণে এই ধরনের আলোকীয় তন্তুকে স্টেপ ইনডেক্স তন্তু (step index optical fibre) বলে। এক মোড বিশিষ্ট স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু তার ধর্ম অনুযায়ী কেবল একটিমাত্র মোডের আলো পরিবহণ করতে সক্ষম। নিখুঁত যোগাযোগ ব্যবস্থার (communication system), তা যে অ্যানালগ যোগাযোগ ব্যবস্থাই (analog communication system) হোক বা ডিজিট্যাল যোগাযোগ ব্যবস্থা (digital communication system) হোক এই এক মোড বিশিষ্ট তন্তু খুবই উপযোগী।

এবার আমরা আসি 12.3(খ) চিত্রের বেলায়। এই চিত্রে একটি বহু মোড বিশিষ্ট স্টেপ ইনডেক্স (multimode optical fibre) দেখানো হয়েছে। এই আলোকীয় তন্তুর কোরের ব্যাস ৩ (ক) চিত্রে দেখানো আলোকীয় তন্তুর কোরের ব্যাসের তুলনায় অনেকটা বেশি। কিন্তু প্রতিসরাংক সম্পর্কিত অন্যান্য ধর্ম বহু মোড বিশিষ্ট স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু উভয় ক্ষেত্রে একই। **অর্থাৎ** দুটিই স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু। এই তন্তু এক সংঙ্গে অনেকটা আলোক পরিবহনে সক্ষম। কারণ আলোকের অনেক মোড পরিবহন করতে পারে এই তন্তু। এই তন্তুর ব্যবহারও অনেক। যেখানেই বেশি আলোক পরিবহনের দরকার সেখানেই এই তন্তু ব্যবহার করা হয়। যেমন ধরা যাক এন্ডোস্কোপিতে সেখানে যে আলোকীয় তন্তু ব্যবহার করা হয় তা এই ধরনের তন্তু। প্রতিবিম্ব (image) পরিবহনেও এই তন্তুর খুব ব্যবহার হয়। এরকম আরও অনেক ক্ষেত্র আছে যেখানে বহু মোড বিশিষ্ট আলোকীয় তন্তুর ব্যবহার হয়। কিন্তু নিঁখুত উচ্চপলিস্ কম্পাংকের ডিজিট্যাল যোগাযোগ ব্যবস্থায় (high pulse frequency based digital communication system) বহু মোড বিশিষ্ট স্টেপ-ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর তুলনায় এক মোড বিশিষ্ট স্টেপ-ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর প্রয়োগ অনেক বেশি। এই বহু মোড বিশিষ্ট তন্তুর কোরের ব্যাস 40 থেকে 50 মাইক্রোমিটার। কিন্তু সমগ্র তন্তুর ব্যাস 125 মাইক্রোমিটারই থাকে।



চিত্র **12.3** : বিভিন্ন প্রকারের আলোকীয় তন্তু

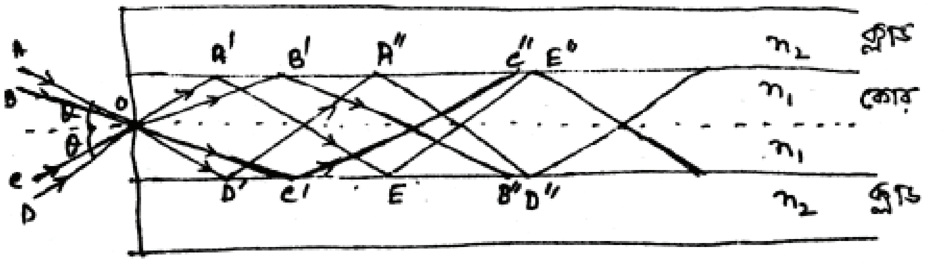
এবার আমরা আসব 12.3 (c) চিত্রের ক্ষেত্রে। এখানে যে ধরনের আলোকীয় তন্তু দেখানো হয়েছে তার নাম বহু মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু। এই তন্তুর কোরের ব্যাস 40 থেকে 50 মাইক্রোমিটার থাকে এবং সমগ্র তন্তুর ব্যাস 125 মাইক্রোমিটার হয়। 12.3 (c) চিত্রের ডান দিকে এই ধরনের তন্তুর প্রতিসরাংক প্রোফাইল দেখানো হয়েছে। এর প্রতিসরাংক প্রোফাইল স্টেপ ইনডেক্সের প্রতিসরাংক প্রোফাইল থেকে আলাদা। এই বহু মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর (multimode graded index optical fibre) অক্ষে প্রতিসরাংক সব থেকে বেশি (n_1)। তারপর তন্তু অক্ষ থেকে পরিধির দিকে ব্যাস বরাবর প্রতিসরাংক ধীরে ধীরে তন্তু অক্ষের উভয় দিকেই কমতে থাকে। এইভাবে কমতে কমতে কোর এবং ক্লাডের সংযোগকারী তল (Boundary level) পর্যন্ত প্রতিসরাংক কমে। n_2-ই হল ক্লাড মাধ্যমের প্রতিসরাংক। ক্লাডের বাইরে থাকে বায়ু বা প্লাস্টিক জ্যাকেটের আবরণের প্রতিসরাংক n_0। এই তন্তুর কোর মাধ্যমের প্রতিসরাংক আলোক অক্ষ থেকে আলোক অক্ষের উভয় দিকে ধীরে ধীরে বা একটি গ্রেড (grade) অনুসরণ করে কমে বলে এই ধরনের তন্তুর নাম গ্রেডেড ইনডেক্স বহু মোড বিশিষ্ট তন্তু (graded index multimode fibre)। এই ধরনের তন্তু তৈরি করা খরচ সাপেক্ষ। কিন্তু যোগাযোগ ব্যবস্থা থেকে প্রতিবিম্ব পরিবহণ পর্যন্ত সমস্ত ক্ষেত্রেই এই তন্তুর ব্যবহার অত্যন্ত উপযোগী।

এবার আমরা সর্বশেষ ধরনের আলোকীয় তন্তুর কথা বলব। সেটি দেখানো হয়েছে 3(d) চিত্রে। এই আলোকীয় তন্তুটি হল এক মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু (single mode graded index optical fibre)। এই তন্তুটির প্রতিসরাংক প্রোফাইল 3(c) চিত্রে দেখানো বহু মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুটির মতই। পার্থক্য হল এই এক মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুটির কোর ব্যাসার্ধ 4 থেকে 5 মাইক্রোমিটার পর্যন্ত। এবং এই ধরনের তন্তু কেবলমাত্র একটি মোড বহন করতে সক্ষম। তার ফলে এই তন্তু বেশি ক্ষমতার আলোক পরিবহণ করতে পারে না। কিন্তু ডিজিট্যাল যোগাযোগে অসাধারণ ব্যবহারিক সুবিধা পাওয়া যায় এই তন্তু দ্বারা। এই তন্তু অতি উচ্চ কম্পাংকের ডিজিট্যাল পালস (high frequency digital pulse) পরিবহণ করতে পারে অনেক দূর পর্যন্ত। আবার অতি উচ্চ ক্ষমতার আলোক পালসও পাঠানো যায় এই তন্তুর মাধ্যমে। একটা কথা এই প্রসঙ্গে বলতেই হবে, যে এক মোড বিশিষ্ট গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তু তৈরি করা বেশ খরচ সাপেক্ষ।

এবার আমরা 4 নং চিত্র দ্বারা দেখাব স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু ও গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুতে কিভাবে আলোক রশ্মি প্রবাহিত হয়। 4ক চিত্রে স্টেপ ইনডেক্স তন্তুতে ও 4(B) চিত্রে গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুতে আলোক প্রবাহ দেখানো হয়েছে। স্টেপ ইনডেক্স তন্তুতে আলোক প্রবাহের বিষয়টি আগেও (2নং চিত্রে) বলা হয়েছে। তাই প্রথমে আমরা 4(B) চিত্রে গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুতে কিভাবে আলোক রশ্মি প্রবাহিত হয় তার বর্ণনা করব।

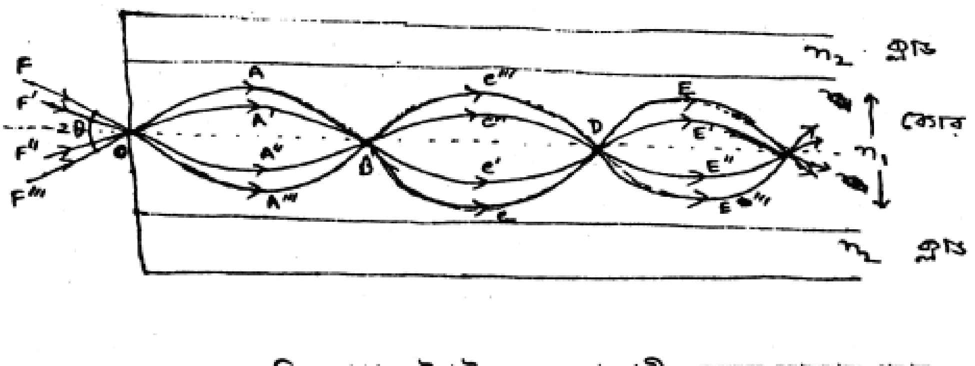
এই 4(B) চিত্রে আমরা দেখতে পাচ্ছি FO, F'O, F"O, F"O চারটি আলোক রশ্মি গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুর প্রবেশ

পথে O বিন্দুতে পতিত হচ্ছে। FO এবং F'O দুটি রশ্মি কোণে তন্তুর মুখে পতিত হচ্ছে। FO রশ্মি OA''' B C'''



12.4 (A)

DE''' পথে প্রবাহিত হয়। FO রশ্মি তন্তুতে প্রবেশ করে একটি দিকে প্রবাহিত না হয়ে ক্রমশ তন্তুর আলোক অক্ষের দিকে বেঁকতে থাকে। এইভাবে বেঁকতে বেঁকতে A''' বিন্দুতে রশ্মিটি আলোক অক্ষের সমান্তরাল হয় এবং আরও বেঁকতে বেঁকতে B বিন্দুতে তন্তুর আলোক অক্ষকে স্পর্শ করে এবং অতিক্রম করে। তার পর ওই রশ্মি আবারও বেঁকতে শুরু করে ও একইভাবে C''' D E''' পথে প্রবাহিত হয়। এইরকম ভাবে FO, F'O, F''O, 3 F'''O প্রত্যেকেই প্রবাহিত হয়। F'O রশ্মি প্রবাহিত হয় O A''B C''D E'' পথে। F''O রশ্মি প্রবাহিত হয় O A' B C' DE'



12.4 নং চিত্র : (A) স্টেপ্ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুতে আলোক প্রবাহ

(B) গ্রেডেড ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুতে আলোক প্রবাহ

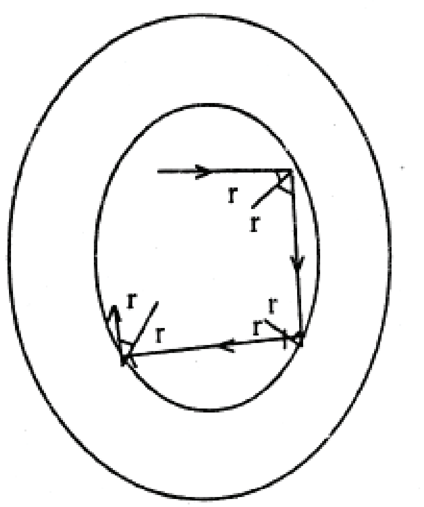
পথে। আর F'''O রশ্মি প্রবাহিত হয় O A B C D E পথে। রশ্মিগুলি তন্তুর মধ্যে প্রবেশ করে ক্রমশই তন্তুর

আলোক অক্ষের দিকে বেঁকতে থাকার কারণ হল তন্তু কোরের প্রতিসরাংক তন্তুর আলোক অক্ষে সর্বোচ্চ এবং তা ক্রমশ কমে একটি গ্রেড অনুযায়ী সমে ওই অক্ষ থেকে তন্তুটির পরিধির দিকে তার ব্যাসার্ধ নির্দেশিত পথে এগোন যায় এবং সবথেকে কম হয় কোর ও ক্লাডের মিলনস্থলে (Boundary)। তারপর ক্লাডে একটি নির্দিষ্ট প্রতিসরাংক থাকে। তাই প্রতিসরণের সরল নিয়মানুযায়ী তন্তুর কোরের মধ্যে আলোক রশ্মির এই বেঁকে যাওয়ার ঘটনাটি ঘটে। কিন্তু এখানে একটি বিষয় বিশেষ উল্লেখযোগ্য যে O বিন্দুতে যদি রশ্মিগুলি একসংগে পতিত হয়, তাহলে একটি আদর্শ গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুতে ওই রশ্মিগুলি বিভিন্ন পথ ধরে যাওয়ার পর B বিন্দুতে আবার একইসংগে মিলিত হয় এবং আবার যাত্রা শুরু করে বিভিন্ন পথ ধরে রশ্মিগুলি যাওয়ার পর আবার একই সংগে D বিন্দুতে মিলিত হয় এইভাবে রশ্মিগুলি তন্তুর কোরের মধ্যে এগিয়ে যায়। এখানে O, B, ইত্যাদি মিলন বিন্দুগুলি তন্তুর আলোক অক্ষের ওপর অবস্থিত। আরও একটি কথা এখানে বেশ গুরুত্বপূর্ণ। সেটি হল যে কোনো রশ্মিই এই গ্রেডেড ইনডেক্স তন্তুর মধ্যে এইভাবে প্রবাহিত হবে না। কেবলমাত্র সেই রশ্মিগুলিই তন্তুর মধ্য দিয়ে এইভাবে যাবে যারা তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার (Numerical aperture) নির্দেশিত ঘন কোণ (solid angle) এর মধ্যে পতিত হয়েছে। যদি θ তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার (numerical aperture) নির্দেশিত ঘন কোণ হয় তাহলে 2θ ঘনকোণের মধ্যে যে সব রশ্মি পড়বে তারাই তন্তুর মধ্য দিয়ে ঐ ভাবে প্রবাহিত হবে। কিন্তু ঐ 2θ ঘন কোণের বাইরের O বিন্দুতে পতিত রশ্মিগুলি তন্তু মধ্যে প্রবেশ করলেও, প্রবেশের পরেই তন্তু থেকে বেরিয়ে যাবে। তারা 12.4(B) চিত্রে দেখান পথে কোরের মধ্যে প্রবাহিত হবে না।

এবার আমরা 12.4(A) চিত্রে আলোক রশ্মি প্রবাহ সম্বন্ধে দু-চার কথা বলব। এটি একটি স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তু। এই তন্তুর প্রবেশ মুখে AO, BO, CO এবং DO চারটি আলোক রশ্মি পতিত হচ্ছে দেখানো হয়েছে। এই রশ্মিগুলি তন্তুর কোর মাধ্যমের মধ্য দিয়ে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের নিয়মানুযায়ী প্রবাহিত হয়। এই রশ্মিগুলি তন্তুর মধ্যে প্রবেশ করে তন্তুর কোর ও ক্লাডের সংযোগকারী বক্রতল হতে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন হতে গেলে রশ্মিগুলিকে তন্তুর প্রবেশ-মুখে তন্তুর আলোক অক্ষের সাথে একটি নির্দিষ্ট ও সর্বোচ্চ কোণের কম হতে হবে। ধরা যাক, এই সর্বোচ্চ কোণটি θ। অর্থাৎ তন্তুর আলোক অক্ষ 4(A) চিত্রে ...... ডটেড (dotted) রেখা দ্বারা দেখানো হয়েছে। 1) কে ঘিরে $\theta + \theta = 2\theta$ ঘন কোণের (solid angle) মধ্যে যে সমস্ত আলোক রশ্মি পড়ে কেবল মাত্র সেই রশ্মিগুলিই তন্তুর কোর ও ক্লাডের সংযোগকারী বক্রতল থেকে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের সুযোগ পাবে। এর বাইরে অর্থাৎ তন্তুর আলোক অক্ষের সংগে θ কোণের বেশী কোণে আপতিত রশ্মিগুলি ওই বক্রতল থেকে কোনোভাবেই অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলনের সুযোগ পাবে না এবং তার ফলে 2θ ঘনকোণটির মধ্যস্থ আপতিত আলোকরশ্মিগুলি তন্তুর কোর মাধ্যম অবলম্বন করে আলোকীয় তন্তুর প্রবেশ মুখ থেকে বহির্মুখে ধাবিত হবে তন্তুর দৈর্ঘ্য বরাবর। আর যে সমস্ত রশ্মি ওই 2θ ঘনকোণটির বাইরে তন্তুঅক্ষের সংগে θ কোণের বেশি কোণে আপতিত

হয় তারা এইভাবে প্রবাহিত হবে না। অর্থাৎ আলোকীয় তন্তু দ্বারা ওই রশ্মিগুলি প্রবাহের ক্ষেত্রে প্রত্যাখ্যাত হবে। এই 2θ কোণটিই তন্তুর অ্যাপারচার কোণ (aperture angle) এবং $\sin\theta$ কে বলা হয় আলোকীয় তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার (numerical aperture)। আমরা পরবর্তী কালে দেখাব $\sin\theta = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$, যেখানে n_1 হল তন্তুর কোর মাধ্যমের প্রতিসরাংক এবং n_2 হল তন্তুর ক্লাড মাধ্যমের প্রতিসরাংক। এখানে ধরা হয়েছে তন্তুর বাইরে বায়ু অবস্থিত, যার প্রতিসরাংক $n_0=1$। একটি আলোকীয় তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার জানা অত্যন্ত জরুরি। কারণ নিউম্যারিকাল অ্যাপারচারই বলে দেবে তন্তুর অ্যাপারচার কোণ কত বেশি বা কম এবং অ্যাপারচার কোণ (aperture angle) বেশি হলে আলোকীয় তন্তুটি বেশি আলো বহন করে নিয়ে যাবে এবং অ্যাপারচার কোণ কম হলে তন্তুটি কম আলো বহন করে নিয়ে যাবে।

আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে আরও এক ধরনের আলোক রশ্মি প্রবাহিত হয়। এই রশ্মিগুলি তন্তুর আলোক অক্ষকে স্পর্শ না করে তন্তুর প্রবেশ মুখ দিয়ে প্রবেশ করে তার কোর ও ক্লাডের সংযোগকারী বক্রতলে আপতিত হয় ও অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন হয়। এইভাবে একবার অভ্যন্তরীণ পূর্ণ ফলিত হয়ে আবারও উল্টো দিকের তলে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলিত হয় এবং তারপর বারে বারে ওই সংযোগকারী তলে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলিত হয়ে তন্তুর কোরের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। এইভাবে তন্তুর কোর মাধ্যমের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়ে আলোকীয় তন্তুর বহির্মুখ থেকে নির্গমণ হয়। এই রশ্মিগুলির নাম স্কিউ রশ্মি (skew rays)। স্কিউ রশ্মির অ্যাপারচার কোণ (aperture angle) পূর্বোক্ত রশ্মিগুলির অ্যাপারচার কোণের তুলনায় বেশি হয়। আগের রশ্মিগুলিকে (যেগুলি তন্তুর আলোক অক্ষকে স্পর্শ করে বারেবারে তন্তুর কোর ও ক্লাডের সংযোগকারী বক্রতল থেকে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলিত হয়ে তন্তুর প্রবেশ মুখ থেকে বহির্মুখের দিকে এগিয়ে যায়) বলা হয় মেরিডিওন্যাল রশ্মি (meridional rays)। 12.5 চিত্রে এই স্কিউ রশ্মির প্রবাহ দেখানো হয়েছে। 12.2 এবং 12.4 চিত্রে দেখানো রশ্মিগুলি মেরিডিওন্যাল রশ্মি।



চিত্র 12.5 : স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর প্রস্থচ্ছেদে স্কিউ রশ্মি প্রবাহটি দেখান হয়েছে।

এখানে প্রবেশ মুখে এই স্কিউ রশ্মির প্রস্থ বরাবর প্রবাহটি অঙ্কিত করা হয়েছে। এই স্কিউ রশ্মির প্রবাহটি তুলনামূলক ভাবে জটিল তত্ত্ব দ্বারা প্রতিষ্ঠিত হয়। যেখানে - মেরিডিওন্যাল রশ্মির প্রবাহের তত্ত্ব অনেক সরল তত্ত্ব (theory) দ্বারা প্রতিষ্ঠিত।

এবার আমরা আলোচনা করব আলোকীয় তন্তুকে সংকেত পরিবহণের ক্ষেত্রে ব্যবহার করে যোগাযোগ ব্যবস্থায় কি কি সুযোগ-সুবিধা পাওয়া যায়।

12.5 আলোকীয় তন্তুর ব্যবহারিক সুযোগগুলি কি কি?

ব্যবহারের ক্ষেত্রে আলোকীর তন্তুর ব্যবহার অনেক অনেক সুবিধাজনক। প্রচলিত তড়িৎ পরিবাহী মাধ্যম (electrically conducting media) গুলির তুলনায় আলোকীয় তন্তু সংকেত পরিবহন (signal carrying) ও যোগাযোগ (communication) ব্যবস্থায় অনেক উপযোগী। আমরা এবার এক এক করে এই বিষয়গুলি বলব।

12.5.1 যোগাযোগে আলোকীয় তন্তু

(1) আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত সংকেতের প্রবাহজনিত ক্ষতির (মাধ্যম দ্বারা শোষণ, স্ক্যাটারিং বা ছড়িয়ে যাওয়া জনিত ক্ষয়, মাধ্যম থেকে বেরিয়ে যাওয়া বা লিকেজ leakage জনিত ক্ষয়) অত্যন্ত কম। অর্থাৎ তন্তুর প্রবেশ মুখে ঢোকা সংকেত দূরত্বের সংঙ্গে অনেক অনেক কম হারে ক্ষয়প্রাপ্ত হয়। তাই আলো তন্তুর মধ্য দিয়ে অনেক দূর পর্যন্ত অনেক কম বাধায় যেতে পারে।

(2) তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত সংকেতটি যেহেতু আলোক সংকেত তাই তন্তুকে কোনও তড়িৎ বিভব (electric potential) যুক্ত বা তড়িৎ প্রবাহ (electric current) যুক্ত স্থানের মধ্য দিয়ে নিয়ে গেলে তন্তুর মধ্যস্থ সংকেতটি ওই তড়িৎ বিভব বা প্রবাহ দ্বারা কোনওভাবে প্রবাহিত বা ক্ষতিগ্রস্ত হয় না। এই ধরনের স্থানের মধ্য দিয়ে কোনো তড়িৎ পরিবাহী তারের মধ্যস্থ পাঠান সংকেত অবশ্যই প্রভাবিত বা ক্ষতিগ্রস্ত হয়।

(3) তেমনই কোনো চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে আলোকীয় তন্তুকে নিয়ে গেলে তার মধ্যস্থ সংকেত কোনওভাবে ক্ষতিগ্রস্ত হয় না। বিনা দ্বিধায় আলোক রশ্মি তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়।

(4) একটি পরিবাহী কত ভাল তথ্য পরিবহণে সক্ষম তা বিচার করার একটি বড় উপায় হল পরিবাহিটি কত উচ্চ কম্পাংকের সংকেত ভালভাবে পরিবহণ করতে পারে। এই বিষয়টিকে বলা হয় পরিবাহিটির চ্যানেল ব্যান্ড উইডথ্ (channel band width)। প্রচলিত তড়িৎ পরিবাহী তারের তুলনায় আলোকীয় তন্তুর ব্যান্ড উইডথ্ (band width) কয়েক লক্ষগুণ বেশি। তন্তু যেহেতু আলোক পরিবহন করে এবং আলোকের কম্পাংক প্রায় 10^{15} হার্জ (10^{15} Hartz) তাই এই আলোকীয় তন্তুর চ্যানেল ব্যান্ড উইডথ্ প্রায় 10^{15} কে।

(5) একটি পরিবাহী কত ভাল সংকেত পরিবহন করতে পারে তা বিচার করার আরও একটি বড় উপায় হল পরিবাহিটির মধ্য দিয়ে একসংগে কত বেশি সংকেত পাঠানো যাচ্ছে। প্রচলিত তড়িৎ পরিবাহী তারের মধ্য দিয়ে বৈদ্যুতিক, ইলেকট্রনিক বা ইলেকট্রিক্যাল (electronic or electrical) সংকেত একসংগে পাঠানো যায় আলোক

তন্তুর মধ্য দিয়ে তার তুলনায় অনেক অনেক গুণ সংকেত একসঙ্গে পাঠানো হয়। কারণ সংকেতগুলি এখানে যেহেতু আলোক রশ্মি দ্বারা গঠিত তাই তারা কেউ কারোর সঙ্গে মিশে যায় না। তারা প্রত্যেকে নিজেদের স্বতন্ত্রতা বজায় রেখে আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। কিন্তু তড়িৎপ্রবাহী তারের মধ্য দিয়ে এরকম ভাবে একই সংঙ্গে অনেক সংকেত পাঠাতে গেলে সংকেতগুলি মিশে যায় এবং তারা পরস্পরের স্বতন্ত্রতা নষ্ট করে দেয়।

(6) আলোক তন্তুর মধ্য দিয়ে পাঠানো সংকেতগুলিকে বিভিন্ন মাল্টিপ্লেক্সিং করা যায়। এই মাল্টিপ্লেক্সিং সময় বিভাগীয় (টাইম ডিভিশন-time division), তরংগ দৈর্ঘ্য বিভাগীয় (wave length division). ইত্যাদি হতে পারে। এই সব মাল্টিপ্লেক্সি (multiplexing) অত্যন্ত সহজে করা যেতে পারে আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে পাঠানো সংকেতগুলির মধ্যে। প্রচলিত তড়িৎপরিবাহী তারের মধ্য দিয়ে যত বেশি চ্যানেল মাল্টিপ্লেক্সিং করা যায় আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে আরও অনেক অনেক বেশী চ্যানেল মাল্টিপ্লেক্সিং করা যায়। একটি যোগাযোগ ব্যবস্থা (communication system) কত উন্নত তা উন্নত মাল্টিপ্লেসিং ব্যবস্থার নিরিখে বিচার করা যায়। মাল্টিপ্লেক্সিং করতে গেলে স্যাম্পলিং ব্যবস্থা একটি অত্যন্ত প্রয়োজনীয় বিষয়। আলোকীয় তন্তুতে এই স্যাম্পলিং (sampling) ব্যবস্থা খুব সহজেই করা যায়।

(7) আলোকীয় তন্তু তৈরির বিষয়টি অত্যন্ত কম খরচ সাপেক্ষ। কারণ এই তন্তুর কাঁচামাল হল সিলিকা (SiO_2)। বালি (sand) এই সিলিকার উৎস। বালি প্রকৃতিতে অনেক বেশি পাওয়া যায়। তাই আলোকীয় তন্তুর কাঁচামাল পাওয়ার খরচও অত্যন্ত কম। যদি প্লাস্টিক বা পলিমার দিয়ে এই তন্তু তৈরি হয় তাহলেও খরচ খুব কম। তন্তু তৈরির যন্ত্রটি নির্মাণ করতে যা ব্যয় হয় সেটিই প্রধান ব্যয়।

(8) আলোকীয় তন্তু ওজনেও খুব হালকা। এই তন্তু ভেঙে গেলে প্রতিস্থাপনযোগ্য। দুটি তন্তুকে জুড়ে দেওয়ারও ভাল ব্যবস্থাও আছে।

(9) আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে মডিউলেটেড সংকেত (modulated signal) সহজেই পাঠানো যায়। সেটা অ্যামপ্লিটিউড্ মডিউলেশন (amplitude modulation), কম্পাংক মডিউলেশন (frequency modulation) এবং ফেজ মডিউলেশন (phase modulation) যাই হোক না কেন।

(10) আলোকীয় তন্তুর মধ্য দিয়ে সংকেত পাঠানোর জন্য যে আলোক উৎস দরকার হয় তাও অত্যন্ত কম খরচ সাপেক্ষ। এই উৎসগুলি হল লাইট্ এমিটিং ডায়োড্ (light emitting diode) বা সংক্ষেপে এল.ই.ডি. (L.E.D), ইনজেকশন লেজার ডায়োড (injection laser diode) বা সংক্ষেপে আই.এল.ডি. (I.L.D.), সাধারন আলোক উৎস ইত্যাদি। এল.ই.ডি. বা আই. এল. ডি. থেকে আসলে খুব কম তড়িৎশক্তি লাগে। এই তড়িৎশক্তি মিলিওয়াট (milli-watt) হারে।

(11) আলোকীয় তন্তুর বহির্মুখ থেকে নির্গমন হওয়া আলোক শক্তি ও প্রবেশ মুখে ঢোকা আলোক শক্তির অনুপাত হল ইনপুট-আউটপুট অনুপাত। যেকোনও যোগাযোগ ব্যবস্থায় এই অনুপাত যত বেশি হয় ততই কাম্য। আলোকীয় তন্তুতে এই অনুপাত (ratio) অত্যন্ত বেশি অন্যান্য যোগাযোগ ব্যবস্থার তুলনায়।

(12) আলোকীয় তন্তু থেকে নির্গমন হওয়া আলোকে চিহ্নিতকরণ (detection) ব্যবস্থাটিও ভাল এবং কম খরচ সাপেক্ষ। ফোটো ডায়োড (photo diode), ফোটো ডিটেকটর (photo detector), ফোটো ট্রানসিস্টার (Photo transistor), পি. আই. এন. ফোটো ডায়োড (PIN Photodiode) ইত্যাদি অপটোইলেকট্রনিক ব্যবস্থার দ্বারা খুব সহজেই আলোকীয় তন্তু দ্বারা পরিবাহিত ও বহির্মুখে আগত আলোক সংকেতকে সনাক্ত করা যায়।

(13) যোগাযোগ ব্যবস্থার (communication system) সিগ্‌ন্যাল টু নয়েজ রেসিও (signal to noise ratio) একটি খুবই গুরুত্বপূর্ণ বিষয়। যোগাযোগ ব্যবস্থায় যোগাযোগের চ্যানেল থেকে বেরন সংকেতের মধ্যে প্রকৃত সংকেত কত আছে এবং গোলমাল সৃষ্টিকারী সংকেত (noise) কতটা আছে তাদের অনুপাতই হল ওই সিগ্‌ন্যাল টু-নয়েজ রেসিও (signal to noise ratio)। যোগাযোগ ব্যবস্থায় এই রেসিও বা অনুপাতটি বেশি হওয়াই কাম্য। আলোকীয় তন্তুতে এই অনুপাতটি স্বভাবতই প্রচলিত ব্যবস্থার তুলনায় অনেক বেশি। এটি বেশি হলে আলোকীয় তন্তুর আউটপুটে (output) প্রকৃত সংকেত অনেক বেশি হবে এবং গোলমাল সৃষ্টিকারী সংকেত অনেক কম থাকবে।

আলোকীয় তন্তুকে যোগাযোগের ব্যবহারে উপরিউক্ত সুবিধাগুলি আমরা একের পর এক বললাম। এছাড়াও আরও অনেক সুবিধা আছে। আলোকীয় তন্তুকে যোগাযোগ ব্যবহারের সুবিধা এতই বেশি যে সব সুবিধা আমরা এখনও কাজে লাগাতে পারিনি। এবার আমরা অন্যান্য ক্ষেত্রে আলোকীয় তন্তুকে ব্যবহারের সুবিধাগুলি বলব।

12.5.2 যোগাযোগ ছাড়া অন্যান্য ক্ষেত্রে আলোকীয় তন্তু

(14) আলোকীয় তন্তুকে সনাক্তকারী বা চিহ্নিতকারী ব্যবস্থা (detection system) বা সেনসর (sensor) হিসেবেও ব্যবহার করা যায় এবং খুব ভালভাবে অন্য সংকেতকে সনাক্তকরণের (detection) কাজ করতে পারে এই আলোকীয় তন্তু। কোনও তড়িৎ বিভব (electric potential), চাপ (pressure), অতি ক্ষুদ্র দূরত্ব (very small distance), তাপমাত্রা (temperature), ঘনত্ব, গতিবেগ ইত্যাদি সনাক্তকরণ ও মাপার কাজে আলোক তন্তুকে ভালভাবে ব্যবহার করা যায়।

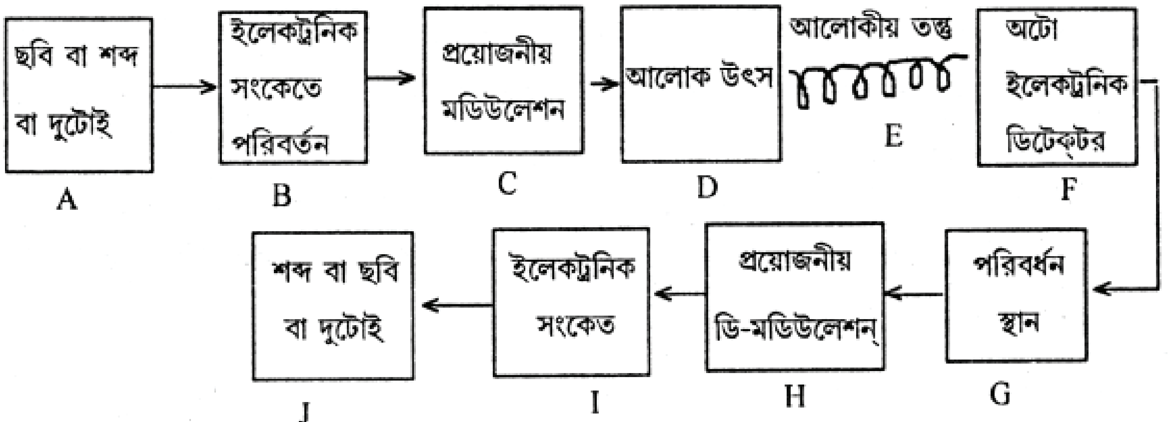
(15) বিভিন্ন বিনোদনমূলক ব্যবস্থা (amusement system), খেলনা (toys) ইত্যাদিতে আলোকীয় তন্তুকে ভালভাবে ব্যবহার করা যায়।

(16) যেসব স্থান সাধারণভাবে আলোকিত করা অসুবিধাজনক সে সমস্ত স্থান আলোকীয় তন্তু দ্বারা আলোকিত করা যায়। চিকিৎসাশাস্ত্রে অপারেশনের আগে শরীরের অভ্যন্তরে কোনও-কোনও স্থান আলোকিত করে দেখার প্রয়োজন হয় বাইরে থেকে। সে-সব ক্ষেত্রে একটি মাল্টিমোড আলোকীয় তন্তুকে মুখগহ্বর বা অন্যান্য কোনও স্থান দিয়ে ঢুকিয়ে দেওয়া হয় এবং তারপর তন্তু দ্বারা আলো পাঠিয়ে অভ্যন্তরটি আলোকিত করা হয় এবং অন্য একটি আলোক তন্তু দিয়ে সেই স্থান দেখা হয়। তাই চিকিৎসাশাস্ত্রে আলোক তন্তুর ব্যবহার খুবই গুরুত্বপূর্ণ।

(17) কোনো প্রতিবিম্বকে একস্থান থেকে অন্যস্থানে নিয়ে যাওয়া যেতে পারে এই তন্তু দ্বারা।

12.5.3 আলোকীয় তন্তুর সাহায্যে একটি সম্পূর্ণ যোগাযোগ ব্যবস্থা

6নং চিত্রে আমরা একটি সম্পূর্ণ যোগাযোগ ব্যবস্থার চিত্র দেখাচ্ছি। 6নং চিত্রে 'A' ইউনিটে যে তথ্যটি পাঠাতে হবে সেটি নেওয়া হল। তথ্যটি শব্দ বা ছবি বা দুটোই হতে পারে। এর পর 'B' ইউনিটে 'A' ইউনিটের তথ্যটিকে ইলেকট্রনিক সংকেতে রূপান্তরিত করা হয়। 'C' ইউনিটে 'B' ইউনিট থেকে আগত সংকেতকে প্রয়োজন অনুসারে মডিউলেট করা হয়। মডিউলেটেড সংকেতটিকে 'D' ইউনিটে আলোক উৎসের মধ্যে পাঠিয়ে আলোক সংকেত পরিবর্তন করা হয়। 'B' ইউনিটের পাওয়া আলোক সংকেতকে 'E' ইউনিটে আলোকীয় তন্তুর মধ্যে পাঠানো হয়। অপর পারে আলোকীয় তন্তু থেকে পাওয়া সংকেতকে '৮' ইউনিটে বৈদ্যুতিন বা ইলেকট্রনিক সংকেতে পরিবর্তন করা হয়। সেই C ইউনিটের সংকেতকে 'G' ইউনিটে পরিবর্ধন বা অ্যামপ্লিফিকেশন (amplification)।

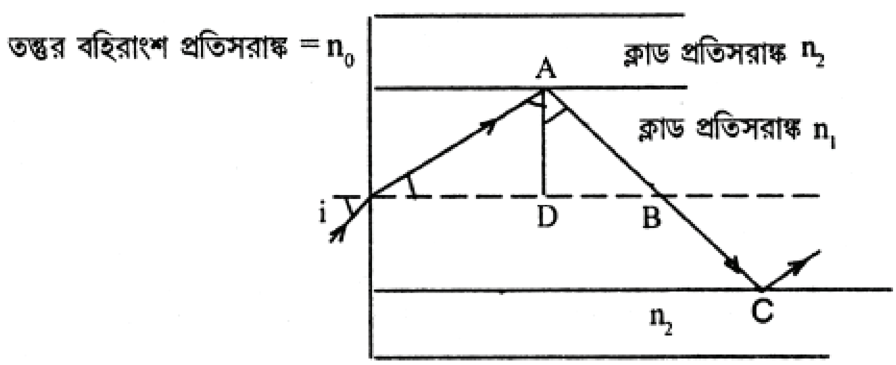


6 নং চিত্র :

আলোকীয় তন্তুকে ব্যবহার করে যোগাযোগ করা হয়। বর্ধিত বৈদ্যুতিন সংকেতকে 'H' ইউনিটে ডিমডিউলেশন (Demodulation) করা হয়। 'I' -ইউনিটে ডিমডিউলেটেড সংকেত থেকে প্রয়োজনীয় ইলেকট্রনিক সংকেত বা বৈদ্যুতিন সংকেতকে উদ্ধার করা হয়। এই প্রয়োজনীয় ইলেকট্রনিক সংকেত থেকে A-ইউনিটের ছবি বা শব্দ বা

দুটোই উদ্ধার করা হয়। উদ্ধার হওয়া শব্দ বা ছবি 'J' ইউনিটে পাওয়া যাবে। এখানে একটা কথা বলা বিশেষভাবে বলা দরকার 'A , B, C, D' এই চারটি ইউনিট প্রেরক ব্যবস্থা (sending system) এবং 'F, G, H, I, J ' এই পাঁচটি ইউনিট গ্রাহক ব্যবস্থা (receiving system) নামে পরিচিত। 'E' ইউনিটটি যোগাযোগ চ্যানেল। একটি সম্পূর্ণ যোগাযোগ ব্যবস্থায় যোগাযোগ চ্যানেলের (communication channel) উভয় প্রান্তেই একটি করে প্রেরক ব্যবস্থা ও গ্রাহক ব্যবস্থা থাকবে। এই ধরনের যোগাযোগকে বলে ডুপ্লেক্স (duplex) যোগাযোগ (communication)।

12.6 স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার কত?



চিত্র 12.7

ধরা যাক FO একটি আলোক রশ্মি একটি স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর O বিন্দুতে আপতিত হয়। $\angle i$ হল ওই আলোক রশ্মির আপতন কোণ। অর্থাৎ তন্তুটির আলো অক্ষের সাথে FO রশ্মির উৎপন্ন কোণ। $\angle\theta$ হল প্রতিসরণ কোণ। OA হল কোরের মধ্যে প্রতিসরিত রশ্মি যা পুনরায় A বিন্দুতে (A বিন্দু কোণ ও ক্ল্যাডের সংযোগকারী বক্রতলে অবস্থিত) আপতিত হয় ও অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটে। তারপর অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলিত রশ্মি AC পথ ধরে এগোয়। এখানে আমাদের $\angle i$ কোণের সর্বোচ্চ মান বার করতে হবে, যতক্ষণ পর্যন্ত এইভাবে আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটবে।

আমরা স্নেলস সূত্র থেকে পাই

$$\frac{\sin i}{\sin\theta} = \frac{n_1}{n_0}$$

আবার যেহেতু A বিন্দুতে অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটছে তাই লেখা যায়।

$\sin\phi > \frac{n_2}{n_1} < \phi$ অর্থাৎ এর সর্বনিম্ন মান $\sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ বা ϕ এর মান $\sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ এর বেশী হলে আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটবে এবং $\phi \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ কম হলে A বিন্দুতে প্রতিসরণ ঘটবে।

অতএব A বিন্দুতে আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটতে গেলে $\text{Cos }\theta > \frac{n_2}{n_1}$, যেহেতু $\text{Cos }\theta$, Δ OAD ত্রিভুজ থেকে পাওয়া যায়।

$$\text{বা, } \text{Sin}\theta < \left[1-\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{বা, } \text{Sin } i < \frac{n_1}{n_0}\left[1-\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{1 নং সমীকরণ থেকে}$$

$$\text{বা, } \text{Sin } i < \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

এখানে n_0 বায়ুর প্রতিসরাংক ধরা হয়। অর্থাৎ যদি তন্তুর বাইরে বায়ু বা ফাঁকা স্থান বর্তমান তাহলে $n_o = 1$, হবে।

অর্থাৎ $\sin i < \left(n_1^2 - n_2^2\right)^{1/2}$

বা $i < \sin^{-1}\left(n_1^2 - n_2^2\right)^{1/2}$ বা,

$< i$ কোণের সর্বোচ্চ মান $\sin^{-1}\left(n_1^2 - n_2^2\right)^{1/2}$

অর্থাৎ আলোক রশ্মি যদি আলোকীয় তন্তুর অক্ষরেখাকে ঘিরে তন্তুর প্রবেশ মুখে $\angle 2L$ ঘন কোণের (solid angle) মধ্যে আপতিত হয় তাহলেই কেবল ওই রশ্মিগুলি অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটিয়ে তন্তুর কোর মাধ্যম ধরে বহির্মুখের দিকে এগিয়ে যাবে। ওই ঘনকোণের বাইরে পড়লে তা হবে না।

এখন $\sin i_m (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$

[যেখানে i_m হল $\angle i$ $\sin i_m$ কোণের ঐ সর্বোচ্চ মান]

$\sin i_m$ কে বলা হয় নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার (Numerical aperture)।

একটি আলোক তন্তুর $n_1 = 1.472$, $n_2 = 1.458, 3$, $n_0 = 1$ হলে নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার হবে 0.2 এর মত প্রায়। আর $\angle i_m$ বা সর্বোচ্চ আপাতন কোণ হবে 11.5° এবং $\angle 2i_m = 23^\circ$ । অর্থাৎ 23° ঘন কোণের মধ্যে পড়লে আলোক অভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন ঘটিয়ে তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হবে।

12.7 সারাংশ

আলোচ্য অধ্যায়টি পাঠ করে আপনারা জেনেছেন আলোকীয় তন্তু কি এবং তার গঠন কিরকম। আলোকীয় তন্তুর প্রকার ভেদ জানার সাথে সাথে ওই তন্তুর ব্যবহারিক সুযোগ সম্পর্কে আপনাদের ধারণা হয়েছে। মূলত, যোগাযোগ বিজ্ঞান আর তা ছাড়া অন্যান্য বৈজ্ঞানিক ক্ষেত্রে আলোকীয় তন্তুর ব্যবহার সম্পর্কে আপনারা জেনেছেন। আলোকীয় তন্তুকে ব্যবহার করে একটি আধুনিক যোগাযোগ ব্যবস্থা কিভাবে কাজ করে সেটি জানা গেছে। স্টেপ ইনডেক্স আলোকীয় তন্তুর নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার হিসাব করতে শেখা গেছে।

12.8 প্রশ্নাবলি

বড় প্রশ্ন (Long Question)

(1) আলোকীয় তন্তুর ব্যবহার কোথায় এবং কেন এই তন্তু যোগাযোগে একটি উৎকৃষ্ট মাধ্যম?

(2) বিভিন্ন ধরনের আলোর তন্তুর গঠন পদ্ধতি নিয়ে আলোচনা কর।

(3) 'স্টেপ ইনডেক্স' ও 'গ্রেডেড ইনডেক্স' আলোক তন্তুতে কিভাবে আলোক রশ্মি প্রবাহিত হয় তা বর্ণনা কর।

সংক্ষিপ্ত প্রশ্ন (Short Question)

(4) স্কিউ রশ্মি (Skew rays) কি?

(5) নিউম্যারিক্যাল আলোচনা কাকে বলে?

(6) যোগাযোগ ছাড়া আর কোথায় আলোকীয় তন্তুকে ব্যবহার করা হয়?

(7) আলোকীয় তন্তু কাকে বলে?

(8) একটি আলোকীয় তন্তুর কোরের প্রতিসরাংক 1.453 ও ক্লাডের প্রতিসরাংক 1.432 হলে তন্তুটির নিউম্যারিক্যাল অ্যাপারচার কত হবে?

(9) একটি আলোক তন্তুর কোর ও ক্লাডের প্রতিসরাংক যথাক্রমে 1.431 এবং 1.420 হলে, এই তন্তু কত ঘন কোণের আলো তার মধ্যে প্রবাহের জন্য গ্রহণ করবে?

অতি সংক্ষিপ্ত প্রশ্ন (Objective Question)

(10) তন্তুর কোর ও ক্লাডের সংযোগকারী বক্রতল থেকে তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত আলোক রশ্মির কি ধরনের প্রতিফলন হয়?

(11) এল.ই.ডি. (L.E.D.) আলোক তন্তুকে কি কাজে ব্যবহৃত হয়?

(12) কোন আলোক তন্তুর কোণ মাধ্যমে অনেক প্রতিসরাংকের মাধ্যম দেখা যায়?

(13) একটি আলোক তন্তুকে চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে পাঠানো হল। তার মধ্যকার প্রবাহিত আলো ওই চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হবে কি?

(14) একমোড বিশিষ্ট আলোকীয় তন্তু কোন ধরনের যোগাযোগে বিশেষ ভাবে কাজে লাগে?

12.9 কিছু বই-এর নাম

(1) 'Optical Electronics' by Ajoy Ghatak and K. Thyagrajan, Cambridge University Press, 1993.

(2) 'Fibre Optics' by Ajoy Ghatak.

(3) Optoelectronics an Introduction' by J. Wilson and J.F.B. Hawkes, Prentice/Hall of India Private Limited 1996.

(4) 'Optical Fibre Communication, Principles and Practice' by John M. Senior, Prentice, Hall of India Private Limited, 1996.

(5) 'Semi Conductor Optoelectronic Devices', by Pallab Bhattacharya Prentice, Hall of India Private Limited, 1995.

(6) 'Optoelectronics and Fibre Optics Communication' by C. K. Sarkar and D. C. Sarkar, New Age International Publishers, 2001.

একক ❑ 13 আলোকের বিচ্ছুরণ

গঠন

13.1 প্রস্তাবনা

আলোক সংক্রান্ত অনেকগুলি পরিঘটনার সঙ্গে আমরা এই পর্যায়ের বিভিন্ন এককে পরিচিত হয়েছি। আপনারা নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে কতগুলি পরিঘটনা আমরা অতি অনায়াসেই প্রত্যক্ষ করতে পারি কিন্তু বাকি কতকগুলির ক্ষেত্রে বিশেষ ধরনের যান্ত্রিক ব্যবস্থার প্রয়োজন হয়। দর্পণে প্রতিফলণের মাধ্যমে যে প্রতিবিম্ব সৃষ্টি হয় কিংবা উত্তল লেন্সের যে বিশেষ ধর্মের জন্য তাকে বিবর্ধক কাঁচ হিসেবে ব্যবহার করা যায়, সেই পরিঘটনাগুলি আমাদের খুবই পরিচিত, কিন্তু ব্যতিচার ফ্রিঞ্জ সৃষ্টি তথা প্রত্যক্ষ করার জন্য যে বিশেষ ব্যবস্থার প্রয়োজন তা আমরা জানি।

এখন পর্যন্ত আমরা আলোক সংক্রান্ত দুটি পরিঘটনার কথা আলোচনা করিনি অথচ এই দুটি পরিঘটনাজনিত কিছু আকর্ষণীয় পর্যবেক্ষণের সঙ্গে অপনারা সকলেই পরিচিত। যেমন একটা প্রশ্ন প্রায়শই আমাদের সামনে রাখা হয় — 'আকাশের রং নীল কেন' এবং এক কথায় এর উত্তর হিসেবে বলা হয় সূর্যালোকের বিক্ষেপণের জন্যই আমরা আকাশের রং নীল দেখি। আবার আলোর বিক্ষেপণের সুযোগ না থাকায় চন্দ্রপৃষ্ঠে উপস্থিত কোনো পর্যবেক্ষকের কাছে আকাশ নীল নয় — ধূসর। অর্থাৎ আলোর বিক্ষেপণ এমন একটি পরিঘটনা যার ফলের সঙ্গে আমাদের অতি ঘনিষ্ঠ পরিচয় রয়েছে। এই এককে আমাদের অন্যতম আলোচ্য বিষয় — আলোর বিক্ষেপণ (Scattering of Light)।

বৃষ্টির পরে সময় সময় আকাশে যে চমৎকার সাত রঙের রামধনু দেখা যায় কিংবা কাঁচের প্রিজমের মধ্যে দিয়ে সূর্যের আলো চলে গেলে যে সাতটি রঙের হদিস পাওয়া যায় তার কারণ সম্ভবত আপনারা জানেন। সূর্যের আলো বা সাদা আলো যে আমাদের দৃশ্য আলো (visible light) সবকটি তরঙ্গদৈর্ঘ্য তথা বর্ণ দিয়ে গঠিত তা আমরা জানি। সাদা রং সেই অর্থে সাতটি রঙের সমষ্টি। যে বিশেষ পরিঘটনার ফলে সাদা আলো সাত রঙে বিশ্লিষ্ট হয়ে যায় তাকে বলা হয় আলোর বিচ্ছুরণ (Dispersion of light)।

এই এককে আমরা আলোর বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণ বিষয়ে আলোচনা করব। বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণের বিভিন্ন বৈশিষ্ট্য ও প্রকারভেদগুলি পর্যালোচনা করলে দেখা যাবে আপাতদৃষ্টিতে এই দুটি অতি পরিচিত ঘটনার মধ্যে দিয়ে আলোক তরঙ্গের অনেকগুলি বিশেষ ধর্ম উন্মোচিত হচ্ছে। প্রসঙ্গত বলা দরকার আমরা যে আলো চোখে দেখতে পাই তা অর্থাৎ দৃশ্য আলো প্রকৃতপক্ষে সুবৃহৎ তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ পরিবারের একটি ক্ষুদ্র সদস্য। তাই আলোর বিক্ষেপণ বা বিচ্ছুরণ বলতে সাধারণভাবে তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির বিক্ষেপণ বা বিচ্ছুরণকে বোঝানো হয়। সঙ্গে সঙ্গে এটাও উল্লেখ করা দরকার যে বিক্ষেপণ বা বিচ্ছুরণের সমস্ত বৈশিষ্ট্যগুলি কিন্তু আমাদের খালি চোখে ধরা দেয় না — সেখানেও প্রয়োজন হয় বিভিন্ন ধরনের যন্ত্র-ব্যবস্থা। এই এককে আমরা প্রথমে আলোর বিক্ষেপণ ও পরে আলোর

বিচ্ছুরণ নিয়ে আলোচনা করব।

উদ্দেশ্য

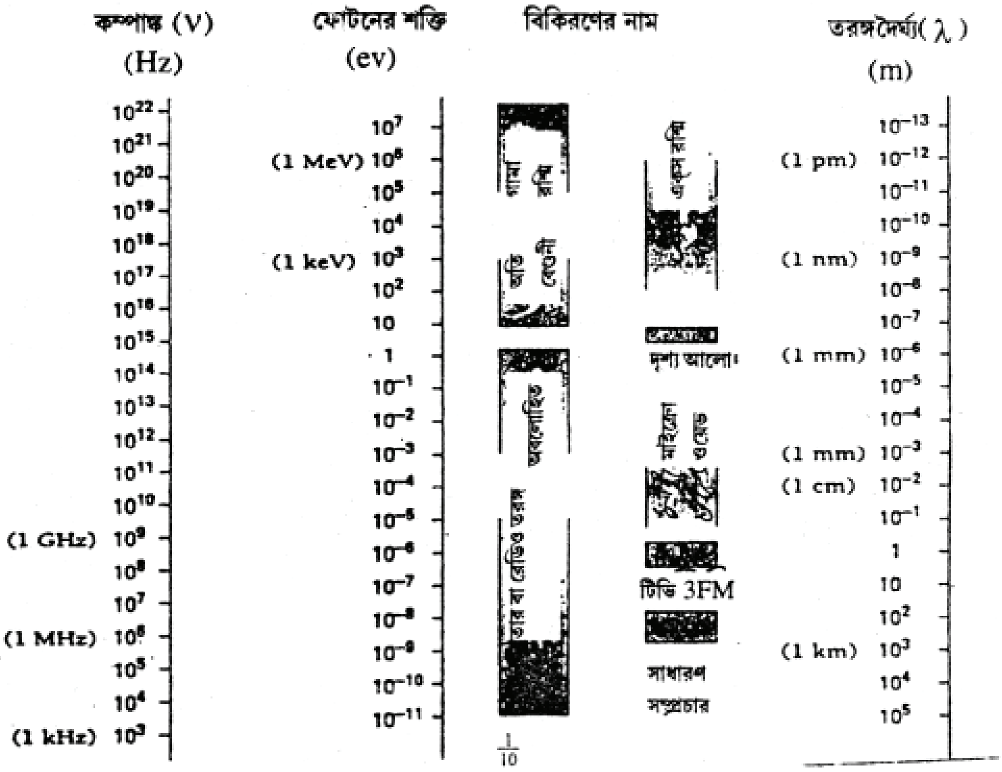
এই এককটি পাঠ করার পর আপনি

- তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ পরিবারটির সঙ্গে পরিচিত হবেন।
- আলোর বিক্ষেপণের বৈজ্ঞানিক ব্যাখ্যা দিতে পারবেন ও তার বৈশিষ্ট্যসমূহ জানতে পারবেন।
- আলোর বিক্ষেপণের বিভিন্ন শ্রেণী বিভাগ সম্পর্কে অবগত হবেন।
- আলোর বিচ্ছুরণ ও তার শ্রেণী বিভাগ সম্পর্কে অবহিত হবেন।
- আলোর বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণজনিত কারণে যে সব প্রাকৃতিক ঘটনার সঙ্গে আপনি পরিচিত, তার বৈজ্ঞানিক ব্যাখ্যা দিতে পারবেন।

13.2 তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ (Electromagnetic radiation)-এর সংক্ষিপ্ত পরিচয়

চোখ খুললে চারদিকের অজস্র অসংখ্য জিনিস তথা ঘটনাবলী যে আমরা দেখতে পাই তার জন্য আমাদের চোখ এবং আলো উভয়েরই অনন্য ভূমিকা রয়েছে। একদিকে যেমন চোখ বন্ধ রাখলে কোনো কিছু দেখা সম্ভব নয়, তেমনই অন্যদিকে অন্ধকারে চোখ খোলা রাখলেও কিছু দেখা যায় না। কোনো বস্তু থেকে আলো এসে আমাদের চোখে প্রবেশ করলে আমরা বস্তুটিকে দেখতে পাই।

আমরা সাধারণত আলো বলতে যা বোঝাই, বৈজ্ঞানিক দৃষ্টিকোণ থেকে তাকে বলা হয় দৃশ্য-আলো (visible light)। প্রকৃতপক্ষে এই আলো তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ (electromagnetic radiation)। পরিবারের একটি ছোট অংশ দখল করে রয়েছে। তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ পরিবারটি সুবৃহৎ। সেখানে অত্যন্ত ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সময় রশ্মি (gamma radiation) যেমন রয়েছে, রয়েছে দৃশ্য-আলো, রয়েছে অবলোহিত রশ্মি (infrared radiation) মাইক্রোতরঙ্গ (microwaves) বা সুবৃহৎ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট রেডিও তরঙ্গ ও মিটার তরঙ্গ। এই শ্রেণীভুক্ত সমস্ত অঞ্চলের বিকিরণের নিজস্ব কিছু বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করা যায়। যেমন ওই বিকিরণের একটি অতি ক্ষুদ্র অংশ যাদের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য মোটামুটিভাবে 400 cm বা 4000A° (400×10^{-9} m বা 4000×10^{-8} cm) থেকে 800 cm বা 8000Å (800×10^{-9} m বা 8000×10^{-8} cm) আমাদের চোখে ধরা দেয় তার বাইরের বিকিরণকে ধরার জন্য অন্য যান্ত্রিক ব্যবস্থা বা বিশেষ ধরনের ফটোগ্রাফিক প্লেট প্রয়োজন হয়।



চিত্র 13.1 তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের বিভিন্ন অংশ

[ওপরের এই **13.1** নং চিত্রে সমগ্র তড়িচ্চুম্বকীয় পরিবারের চেহারাটি তুলে ধরা হয়েছে।]

খুব স্বাভাবিকভাবেই প্রশ্ন উঠবে যে এত ভিন্ন ধরনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট বিকিরণকে কেবল এক পরিবারভুক্ত বলা হচ্ছে কেন? তাছাড়া বিভিন্ন অংশের বিকিরণের নিজস্ব কিছু ধর্ম রয়েছে যা অন্য অংশের বিকিরণের মধ্যে পাওয়া যায় না। হ্যাঁ, এত কিছু সত্ত্বেও এরা সকলেই এক শ্রেণীভুক্ত মূলতঃ কয়েকটি কারণে। এগুলি হল;

(i) সমস্ত রকমের তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মি প্রকৃতপক্ষে দুটি পরস্পর লম্ব ও পরিবর্তনশীল তড়িৎ ও চুম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা সৃষ্ট তরঙ্গ।

(ii) শূন্য মাধ্যমে এই শ্রেণীভুক্ত সমস্ত রশ্মিরই গতিবেগ সমান। এই গতিবেগ সেকেন্ডে 2.99792458 x 10^8 m/s। আমরা প্রায়ই এর আসন্ন মান 3 x 10^8 m/s বা 3 x 10^5 km/s বা সেকেন্ডে তিন কিলোমিটার ধরে নিয়ে কাজ করি।

(iii) আলোক বিষয়ক অতি পরিচিত পরিঘটনাগুলি যেমন প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যববর্তন, ব্যতিচার, সমবর্তন বা বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণ সমস্ত রকম তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের ক্ষেত্রেই সম্ভব। তবে বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে এই পরিঘটনাগুলির পর্যবেক্ষণের জন্য বিভিন্ন ধরনের যন্ত্র ব্যবস্থার প্রয়োজন। অর্থাৎ দৃশ্য আলোর জন্য যে তল প্রতিফলক হিসেবে কাজ করে সেই তল ধরা যাক এক্সরশ্মির প্রতিফলনে উপযুক্ত না-ও হতে পারে।

(iv) সব রকম তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির ক্ষেত্রে $c = \nu\lambda$ সম্পর্কটি প্রয়োগ করা যায়। এখানে ν রশ্মিটির কম্পাঙ্ক, λ কোনো মাধ্যমে তার তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং c ওই মাধ্যমে রশ্মিটির গতিবেগ। খেয়াল রাখতে হবে যে আমাদের চোখ, আরও বহু যন্ত্রের মতই সীমিত ক্ষমতাসম্পন্ন একটি যন্ত্র। তাই চোখে তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ পরিবারের এক অতি ক্ষুদ্র অংশই ধরা দেয়। যদি আমাদের সামনে রাখা একটি বস্তুর ওপর কেবলমাত্র অতি বেগুনী রশ্মি আপতিত হয় আমরা কিন্তু বস্তুটিকে খালি চোখে দেখতে পাব না। জায়গাটি সম্পূর্ণ অন্ধকার বলেই মনে হবে। অবশ্য বিশেষ যন্ত্র ব্যবস্থার সাহায্যে অতিবেগুনী রশ্মিতে আলোকিত ঐ বস্তুর ছবি তোলা সম্ভব এবং আমরা তখন দৃশ্য আলোতে ঐ ছবি দেখতে পাব। এই পদ্ধতিতে পরোক্ষভাবে আমরা আমাদের দৃষ্টির অগোচর তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের অস্তিত্ব ও তার প্রভাব ধরতে পারি। এক্স রশ্মি দ্বারা চিকিৎসাকার্যের জন্য প্রয়োজনীয় যে সব ছবি তোলা হয় তা আমাদের দৃশ্য আলোর পক্ষে সম্ভবপর নয়, একথা আমরা সকলেই জানি।

আপনারা নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে আমরা যখন আলোক বিষয়ক কোনো পরিঘটনার কথা উল্লেখ করি তখন আমরা আলো বলতে দৃশ্যআলোই বুঝিয়ে থাকি। বর্তমান পর্যায়ে আমাদের আলোর বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণ বিষয়ক যে আলোচনা হবে তা হবে ওই দৃশ্য আলোকে কেন্দ্র করে।

ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণের ক্ষেত্রে যে বিশেষ ধরনের বিক্ষেপণ দেখা যায়, যেমন এক্স রশ্মির ক্ষেত্রে অতি পরিচিত কম্পটন বিক্ষেপণ (Compton Scattering) কিংবা রামন বিক্ষেপণ বা রামন ক্রিয়া (Raman Scattering বা Raman effect) আমাদের এই আলোচনার অন্তর্ভুক্ত হচ্ছে না। বস্তুত, বিক্ষেপণের বিষয়টি যথেষ্ট বৃহৎ। আমরা বিক্ষেপণ বা বিচ্ছুরণ বিষয়ে এখানে যে আলোচনা করব সেখানে সমস্ত রকমের তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ অন্তর্ভুক্ত হচ্ছে না। তবে বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণ বিষয়ক বর্তমান এককের আলোচনা আপনাকে বিষয় দুটি সম্পর্কে অবশ্যই কিছু প্রাথমিক ধারণা পেতে সাহায্য করবে। এই অনুচ্ছেদের আলোচনার ওপর ভিত্তি করে নিচের অনুশীলনীটি আপনি চেষ্টা করুন।

অনুশীলনী 1 : তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণে উপস্থিত বিভিন্ন ধরনের বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং কম্পাঙ্কের পাল্লা উল্লেখ করে তাদের নামগুলি দিয়ে একটি তালিকা প্রস্তুত করুন।

13.3 তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের বিক্ষেপণ (Scattering)-এর তাৎপর্য

প্রথমে আমরা দেখি তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির বিক্ষেপণ বলতে কী বোঝায়। কঠিন তরল বা গ্যাসীয় কোনো মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যখন তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ গমন করে তখন সেই বিকিরণের শক্তির অংশবিশেষ বহুক্ষেত্রেই মাধ্যমের উপাদানের অণুতে স্থানান্তরিত হয়। এই শক্তি অবশ্য মাধ্যম ধরে রাখে না তা আবার নিঃসারিত হয়। এই পুনঃনিঃসারিত বিকিরণের অভিমুখ, দশা বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য কিন্তু মূল বিকিরণের থেকে ভিন্ন হয় এবং পরিঘটনাটিকে **তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির বিক্ষেপণ** হিসেবে উল্লেখ করা হয়।

আপনারা জানেন যে তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের পরিবারটি যথেষ্ট বড়। এখানে যেমন একদিকে রয়েছে অত্যন্ত শক্তিশালী এবং অতি উচ্চ কম্পাঙ্ক তথা অতি ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট গামা-রশ্মি অন্যদিকে রয়েছে তুলনায় অনেক কম কম্পাঙ্ক এবং বৃহৎ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বেতার তরঙ্গ। দৃশ্য আলোক অর্থাৎ যে আলোতে আমাদের চোখ দেখতে পায় তার অবস্থান এই পরিবারের মাঝের অঞ্চলে একটি ক্ষুদ্র অংশ জুড়ে। তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির এই দৃশ্যমান আলোর বিক্ষেপণের ফলে যে ঘটনাগুলো আমরা দেখতে পাই তার মধ্যে রয়েছে আকাশের নীল রং, রক্তিম সূর্যাস্ত বা সাদা মেঘ অন্যতম। এগুলির যে বিশেষ বর্ণ আমরা দেখতে অভ্যস্ত তার মূলে রয়েছে আলোর বিক্ষেপণ।

তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের বিভিন্ন অংশ যখন কোনো কঠিন তরল বা গ্যাসীয় মাধ্যমে আপতিত হয় তখন ওই মাধ্যমের উপাদানের অণুর সঙ্গে যে মিথস্ক্রিয়া (interaction) হয় সমস্ত রকম বিক্ষেপণের মূলে তার গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রয়েছে।

কোনো তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ কঠিন, তরল বা গ্যাসীয় মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় ওই মাধ্যমের অণুগুলির দ্বারা বিক্ষেপিত হয়। উচ্চ শক্তিসম্পন্ন তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ যেমন গামা রশ্মি বা এক্স রশ্মির ক্ষেত্রে বিকিরণকে কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুযায়ী সহজেই কণিকাগুচ্ছ বলে ধরে নেওয়া যায়। এই বিকিরণ যখন কোনো মাধ্যমের অণুর ওপর আপতিত হয় তখন মাধ্যমের অণুর সঙ্গে ফোটন কণার সংঘর্ষ ঘটে। এই ঘটনাকে সহজেই ফোটন বিক্ষেপণ (photon scattering) বলে উল্লেখ করা যায়। উচ্চশক্তি তথা উচ্চ কম্পাঙ্ক ও ক্ষুদ্র তরঙ্গ দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট এই বিকিরণের বিক্ষেপণের কতগুলি ব্যবহারিক প্রয়োগ রয়েছে। যেমন এক্সরশ্মির ক্ষেত্রে ফোটন বিক্ষেপণের মধ্যে দিয়ে কেলাসের গঠন নির্ণয় করা সম্ভব। এক্স রশ্মির বিক্ষেপণের ফলে যে কম্পটন ক্রিয়া দেখা যায় তার ব্যাখ্যাও এখান থেকে দেওয়া সম্ভব।

অপেক্ষাকৃত কম শক্তি বিশিষ্ট বিকিরণে যেমন আমাদের পরিচিত দৃশ্য আলোর ক্ষেত্রে বায়ুতে ভাসমান ধূলিকণা তথা বাতাসের বিভিন্ন গ্যাসের অণুদের দ্বারা বিক্ষেপণ ঘটে। সূর্যরশ্মি এভাবেই বায়ুমণ্ডলে বিক্ষেপিত হয়

এবং এর ফলে আকাশের রং নীল দেখায়। চাঁদে বায়ুমণ্ডল না থাকায় সূর্যরশ্মি সেখানে বিক্ষেপণের সুযোগ পায় না এবং এর ফলে চন্দ্রপৃষ্ঠে উপস্থিত কোনো দর্শকের কাছে চাঁদের আকাশ নীল নয়। ধূসর মনে হয়।

আমরা এই এককে কেবল বিক্ষেপণের বিষয়টি নিয়ে আলোচনা করব। কিন্তু কোনো মাধ্যমের অণু কর্তৃক আলোর শোষণ ও তার পুনঃ নিঃসারণের ফলে কেবল বিক্ষেপণ নয়, আরও কয়েকটি পরিঘটনা লক্ষ্য করা যায়। প্রতিটির জন্যই আলো এবং মাধ্যমের অণুর মিথস্ক্রিয়া দায়ী। আমরা এখানে ঐ মিথস্ক্রিয়াজনিত এমন কয়েকটি পরিঘটনার সংক্ষিপ্ত পরিচয় দেবো যেগুলি বিক্ষেপণ না হলেও তার নিকটাত্মীয় বলা যায়।

13.3.1 বিক্ষেপণ সংশ্লিষ্ট কয়েকটি পরিঘটনা

বিক্ষেপণের বেশ কয়েকটি শ্রেণী বিভাগ করা সম্ভব। সেই আলোচনায় আমরা পরে যাবো। তার আগে কয়েকটি পরিঘটনার সঙ্গে পরিচিত হওয়া দরকার যেগুলি বিক্ষেপণের খুবই কাছাকাছি হলেও প্রকৃতপক্ষে ভিন্ন।

বিক্ষেপণের সময় মাধ্যমের অণুর ওপর আপতিত বিকিরণের থেকে অণুটি প্রথমে শক্তি গ্রহণ করে। এরপর অণুটি সেই শক্তি পুনঃনিঃসারিত করে তার অবমশক্তির অবস্থায় (ground state) ফিরে আসে। বস্তুত, অণুর এই শক্তির গ্রহণ করে উত্তেজিত অবস্থায় (excited state) গমন এবং শক্তি পুনঃনিঃসারণের মাধ্যমে অবমশক্তির অবস্থায় প্রত্যাবর্তনের মধ্যে সময়ের পার্থক্যটুকুর ওপর নির্ভর করে বিক্ষেপণ ছাড়া অন্য কয়েকটি পরিঘটনা লক্ষ্য করা যায়, যাদের প্রতিটিই নিজস্ব বৈশিষ্ট্যে অপরের থেকে ভিন্ন।

যেমন বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যে যদি পরিমাপযোগ্য সময়ের পার্থক্য না থাকে অর্থাৎ পরিঘটনাটিকে যদি তাৎক্ষণিক (instanteneous) বলা যায় তাহলে তাকে বিশুদ্ধ বিক্ষেপণ বলা হয়। এই এককে আমাদের আলোচ্য বিষয় এই শ্রেণীভুক্ত পরিঘটনা। মনে রাখতে হবে যান্ত্রিক ব্যবস্থার সাহায্যে মাইক্রোসেকেন্ড (10^{-6} সেকেন্ড) পর্যায়ের থেকেও অনেক ছোট সময় পার্থক্য পরিমাপ করা সম্ভব এবং যদি সেই পরিমাপের সুযোগও না পাওয়া যায় তাহলে পরিঘটনাটি বিক্ষেপণ হিসেবে স্বীকৃত হয়, কারণ ধরে নেওয়া হয় যে বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণ হয়েছে তাৎক্ষণিক।

আবার যদি বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যে 1 মাইক্রোসেকেন্ডের (1 μs) থেকে কম অথচ পরিমাপযোগ্য সময় থাকে তাহলে পরিঘটনাটির বৈশিষ্ট্যসমূহ বিক্ষেপণ থেকে ভিন্ন হয় এবং তাকে সচরাচর আলোক সংদীপ্তি (photo luminescence) বা সংদীপ্তি (luminescence) বলা হয়।

যখন বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যেকার সময়ের পার্থক্য বেড়ে এক মাইক্রোসেকেন্ড অর্থাৎ 10^{-6} সেকেন্ড বা তার কিছু বেশি হয় তখন আরেকটি ভিন্ন পরিঘটনা ধরা দেয়। এই পরিঘটনাটির বৈশিষ্ট্যসমূহ

আগেরটির থেকে কিছুটা ভিন্ন এবং একে বলা হয় প্রতিপ্রভা (fluorescence)। আর বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যে সময়ের পার্থক্য যদি কয়েক সেকেন্ড বা সেকেন্ড ক্রমের (of the order of a second) হয় তাহলে যে পরিঘটনাটি পাওয়া যায় তাকে বলা হয় অনুপ্রভা (phosphorescence)। দেখুন বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যেকার সময়ের পার্থক্য সামান্য পরিবর্তিত হলেও কীভাবে ভিন্ন ভিন্ন বৈশিষ্ট্যসহ নানা ধরনের পরিঘটনা লক্ষ্য করা যায়। অবশ্য এই এককে আমাদের আলোচনা কেবল বিক্ষেপণের মধ্যেই সীমাবদ্ধ রাখব।

আগেই উল্লেখ করা হয়েছে যে বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যে পরিমাপযোগ্য সময়ের ব্যবধান না থাকলে ঘটনাটিকে বিক্ষেপণ বলা হয়। এই ঘটনার মধ্যেও দুটি শ্রেণীবিভাগ থাকে। যেমন বিকিরণের সঙ্গে মাধ্যমের অণুর সংঘর্ষ স্থিতিস্থাপক (elastic) বা অস্থিতিস্থাপক (inelastic) দু-রকমই হতে পারে। স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষের ফলে আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোনো পরিবর্তন বা তরঙ্গ-সরণ (wavelength shift) হয় না কেবল তরঙ্গের দশার (phase) পরিবর্তন ঘটে। বিকিরণ ও অণুর সঙ্গে অস্থিতিস্থাপক সংঘর্ষের ফলে অবশ্য তরঙ্গ সরণ ঘটে থাকে। ভারতীয় পদার্থবিদ স্যার সি. ভি. রামন তাঁর যে আবিষ্কারের জন্য ১৯৩০ সালে নোবেল পুরস্কার পেয়েছিলেন তা কোনো মাধ্যমের অণুর দ্বারা ঘটে যাওয়া এক বিশেষ ধরনের অস্থিতিস্থাপক বিক্ষেপণ (inelastic scattering)। এখন এই পরিঘটনাটি আবিষ্কারকের নামানুসারে রামন ক্রিয়া (Raman effect) বলা হয়। এই ধরনের অস্থিতিস্থাপক বিক্ষেপণের ফলে অবশ্য বিক্ষেপিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে ভিন্ন হয় এবং একটি তরঙ্গসরণ (wavelength shift) লক্ষ্য করা যায়।

আমাদের বর্তমান আলোচনায় রামন ক্রিয়া অন্তর্গত হচ্ছে না। আমরা অন্যদুটি গুরুত্বপূর্ণ অস্থিতিস্থাপক বিক্ষেপণ বিষয়ে আলোচনা করব। সেই আলোচনায় যাওয়ার আগে আপনি বরং এই অনুশীলনীটি চেষ্টা করুন।

অনুশীলনী - 2 : মাধ্যমের অণু কর্তৃক আপতিত বিকিরণের শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের মধ্যে সময়ের পার্থক্যের ওপর নির্ভর করে কী কী পরিঘটনার সৃষ্টি হতে পারে?

13.4 ব্রিলোয়াঁ (Brillouin), র‍্যালে (Rayleigh) ও মেঈ (Mie) বিক্ষেপণ

তরল এবং গ্যাসের মধ্যে দুটি শ্রেণীর বিক্ষেপণের ঘটনা তুলনায় অনেক বেশি লাভ করা যায়। দুটিই অস্থিতিস্থাপক বিক্ষেপণ এবং এই বিক্ষেপণের মধ্যে দিয়ে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সরণ ঘটে থাকে। এদের প্রথমটি তার আবিষ্কারকের নামানুসারে ব্রিলোয়াঁ (Brillouin) বিক্ষেপণ নামে পরিচিত এবং বিষয়টিতে আমরা সংক্ষিপ্ত আলোচনা করব। দ্বিতীয় বিক্ষেপণটির আবিষ্কর্তা লর্ড র‍্যালে (Lord Rayleigh) এবং র‍্যালে বিক্ষেপণ (Rayleigh Scattering) নামে পরিচিত এই পরিঘটনার ফলে আমরা আকাশের রং নীল দেখতে পাই। সকাল ও সন্ধ্যার আকাশের লাল

রংয়ের জন্য এই বিক্ষেপণ দায়ী। এই বিক্ষেপণটির বিষয়ে কিছুটা বিস্তৃত আলোচনা আমরা করব। মেঙ্গ বিক্ষেপণ প্রসঙ্গে প্রাসঙ্গিক উল্লেখ থাকবে।

13.4.1 ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ (Brillouin Scattering) ঃ

আমরা জানি যে কোনো মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যখন কোনো শব্দতরঙ্গ প্রবাহিত হয় তখন মাধ্যমটিতে ঘনীভবন (compression) ও তনুভবন (rarefaction) লক্ষ্য করা যায়। এর ফলে মাধ্যমটিতে পর্যায়ক্রমে উচ্চতর ঘনত্বের অঞ্চল ও লঘুতর ঘনত্বের অঞ্চল সৃষ্টি হয়। কোনো শব্দতরঙ্গ এই পরিবর্তনশীল ঘনত্বের মধ্যে বিক্ষেপিত হয় এবং তার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সামান্য পরিবর্তন ঘটে থাকে পরিভাষায় বলা হয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য সরণ। পরপর দুটি ঘনীভবনীকৃত বা তনুভবনীকৃত অঞ্চলের মধ্যে এক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য পাওয়া যায়।

আলো বা তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের ক্ষেত্রে এই ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ ঘটে থাকে যখন আপতিত বিকিরণ যে মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যাচ্ছে সেই মাধ্যমের আলোক উৎসের সাপেক্ষে একটি গতি থাকে। ঘটনাটিকে আলোকের ক্ষেত্রে এক ধরনের ডপলার ক্রিয়ার (Optical Doppler effect) মত বলা যায়। উৎসের সাপেক্ষে মাধ্যমের গতিবেগের অভিমুখের ওপর নির্ভর করে এই বিক্ষেপণের ফলে প্রাপ্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য সরণ ধনাত্মক বা ঋণাত্মক হয়। অর্থাৎ এই বিক্ষেপণের ফলে প্রাপ্ত বিক্ষেপিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য আপতিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের থেকে কিছু বেশি বা কিছু কম হতে পারে।

লক্ষ্য করা দরকার যে ডপলার ক্রিয়া আলো বা শব্দের ক্ষেত্রে উৎস এবং শ্রোতা বা দর্শকের আপেক্ষিক গতির জন্য ঘটে থাকে। মাধ্যমের গতিবেগের ঐ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা কম্পাঙ্ক পরিবর্তনে কোনো ভূমিকা নেই এবং মনে রাখতে হবে যে তড়িচ্চুম্বকীয় বা আলোক তরঙ্গ কোনো মাধ্যম ছাড়াই উৎস থেকে দর্শকের দিকে গমন করতে পারে। তাই ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ আলোকীয় ডপলার ক্রিয়া থেকে ভিন্ন। কারণ এখানে মাধ্যমের গতির জন্য এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য সরণের ঘটনাটি ঘটে। ডপলার ক্রিয়া সম্পর্কে বিশদ জানতে হলে EPHO3-র দ্বিতীয় পর্যায় (Block 1, 2) দেখুন।

প্রাকৃতিক ঘটনার দৃষ্টিকোণ থেকে অবশ্য র‍্যালে বিক্ষেপণ ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণের তুলনায় অধিক গুরুত্বপূর্ণ।

13.4.2 র‍্যালে বিক্ষেপণ (Rayleigh Scattering) ও মেঈ বিক্ষেপণ (Mie Scattering) :

আমরা দেখলাম যে মাধ্যমের ঘনত্বের ওঠা-নামার (fluctuations) ফলে ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ ঘটে। অন্যদিকে র‍্যালে বিক্ষেপণের জন্য দায়ী মাধ্যমের তাপমাত্রা বা এনট্রপির (entropy) ওঠা-নামা। কোনো মাধ্যমে অসমসত্ত্বতা (inhomogenity) ও অন্যান্য কারণে বিভিন্ন অংশের তাপমাত্রা ও এনট্রপি ভিন্ন হয়। তবে মাধ্যমের অংশে চাপ ভিন্ন হওয়ার ফলে মাধ্যমে যে শব্দতরঙ্গ প্রসারের সুযোগ থাকে, এনট্রপির তারতম্য কিন্তু সাধারণত সেরকম কোনো

তরঙ্গের সৃষ্টি করে না। তাই ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণের মত অত্যন্ত সুস্পষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সরণ র‍্যালে বিক্ষেপণে ঘটে না। বরং এখানে বিক্ষেপিত তরঙ্গে আপতিত তরঙ্গের দুপাশে বিস্তৃত তরঙ্গটি পাওয়া যায়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যেন সরণ ঘটে না, ঘটে তার বিস্তার (broadening of wavelength)।

এনট্রপি বা তাপমাত্রার তারতম্যের জন্য যে র‍্যালে বিক্ষেপণ ঘটে তা কঠিন পদার্থের ক্ষেত্রে খুব ভালো ধরা যায় না। কারণ কঠিন পদার্থের মধ্যে আলোর বিক্ষেপণের জন্য কঠিনের ত্রুটি (defects) অর্থাৎ তার গঠনের যেখানে ধারাবাহিকতা নষ্ট হয়েছে সেরকম অঞ্চল এবং তার মধ্যে উপস্থিত অবিশুদ্ধি (impurity) অনেক গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। তাই র‍্যালে বিক্ষেপণজনিত প্রভাব বা ফল প্রবাহী অর্থাৎ তরল বা গ্যাসের ক্ষেত্রে সুস্পষ্টভাবে লক্ষ্য করা যায়।

1871 সালে লর্ড র‍্যালে তাঁর বিক্ষেপণ সংক্রান্ত বিশ্লেষণে ধরে নেন যে গ্যাসীয় বা তরল মাধ্যমে আলোর বিক্ষেপণ যে ধরনের অণুর সঙ্গে মিথস্ক্রিয়ার ফলে ঘটে থাকে সেই অণুর আকার আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক কম। বস্তুত, র‍্যালে ধরে নিয়েছিলেন মাধ্যমের যে অণুগুলি বিক্ষেপণের জন্য দায়ী তাদের আকার আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক দশমাংশ বা তারও কম ($< \frac{1}{10}\lambda$)। দৃশ্য আলো থেকে ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো যেমন অতিবেগুনী বা এক্স রশ্মির ক্ষেত্রে মাধ্যমের অণুর আকারের সঙ্গে আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এই সম্পর্ক বজায় না থাকায় সেক্ষেত্রে র‍্যালে বিকিরণ সম্ভব নয়।

লর্ড র‍্যালে তাঁর বিশ্লেষণে আরেকটি অনুমান (assumption) করেছিলেন। তিনি ধরে নিয়েছিলেন যে কোনো মাধ্যমের অণুগুলি প্রতিটিই স্বাধীন তথা বিচ্ছিন্ন। অর্থাৎ মাধ্যমের অণুগুলির যেন পরস্পরের সঙ্গে কোনো সম্পর্ক নেই। দেখা গেছে র‍্যালের দুটি অনুমানই ক্ষেত্র বিশেষে খাটে না। বিশেষ করে দ্বিতীয়টিতে যথেষ্ট ত্রুটি রয়েছে। তবু তাঁর বিশ্লেষণের মধ্যে দিয়ে আপতিত বিকিরণের তীব্রতা I_0 এবং θ কোণে বিক্ষেপিত বিকিরণের তীব্রতার $[I(\theta)]$ মধ্যে যে সম্পর্ক পাওয়া যায় তা বিক্ষেপণের বিষয়টিকে যথেষ্ট সন্তোষজনকভাবে ব্যাখ্যা করে। র‍্যালে তাঁর তাত্ত্বিক বিশ্লেষণের ওপর ভিত্তি করে যে সমীকরণটি দেন তা হল :

$$I(\theta) = I_0 \frac{\pi N v^2}{r^7 \lambda^4}(1+\cos^2\theta)(n-1)^2 \qquad \text{..........................} (13.1)$$

I_0 ➔ আপতিত আলোর তীব্রতা

$I(\theta)$ ➔ θ কোণে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা

N ➔ বিক্ষেপণে ব্যবহৃত কণার (বা অণুর) সংখ্যা

r ➔ বিক্ষেপণ বিন্দু থেকে দর্শকের দূরত্ব

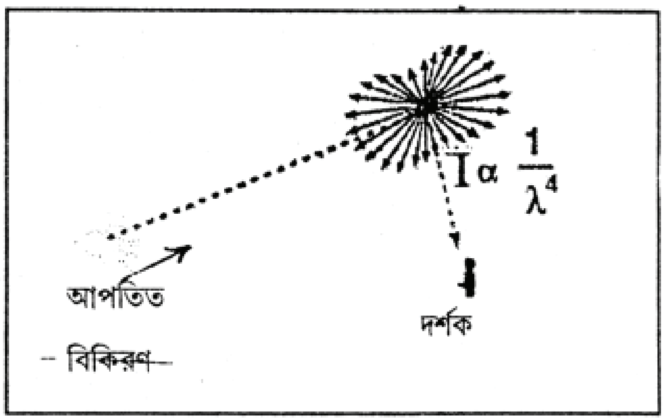
n ➔ মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক

θ ➔ বিক্ষেপণ কোণ

v ➔ বিক্ষেপণের জন্য দায়ী কণার আয়তন

λ ➔ আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য

নিচের চিত্রে [চিত্র 13.2] পরিঘটনাটি তুলে ধরা হয়েছে —



চিত্র 13.2 [র‍্যালে বিক্ষেপণে আপতিত বিকিরণ ও বিক্ষেপিত বিকিরণের অভিমুখ যখন $\theta = 90^0$। বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের চতুর্থ ঘাতের ব্যাস্তানুপাতে পরিবর্তিত হয়।]

(13.1) সমীকরণটিতে দেখা যাচ্ছে যে যে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘের চতুর্থ ঘাতের (λ^4) সঙ্গে ব্যস্তানুপাতে পরিবর্তিত হয়। তাই একটি মাধ্যমে (n ধ্রুবক) একটি নির্দিষ্ট কোণে (θ স্থির) যখন আমরা বিক্ষেপিত আলোকে দেখি তখন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের হ্রাসের সঙ্গে সঙ্গে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা ব্যাপকভাবে বৃদ্ধি পায়। কারণ —

$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$ যখন অন্য বিষয়গুলি স্থির রয়েছে আমরা জানি যে দৃশ্য — আলোর ক্ষেত্রে সবচেয়ে ছোট তরঙ্গ দৈর্ঘ্য হচ্ছে বেগুনী এবং নীল আলোর। তাই সূর্যালোকের এই অংশটি সবচেয়ে বেশি বিক্ষেপিত হয় এবং আমাদের চোখে যে বিক্ষেপিত আলো এসে পৌঁছায় সেখানে নীল অঞ্চলের আলোর তীব্রতা থাকে অনেক বেশী। তাই আকাশের রং নীল দেখায়। দেখানো যায় যে একইরকম তীব্রতা বিশিষ্ট আপতিত রশ্মির ক্ষেত্রে দৃশ্য বর্ণালীর (visible spectrum) নীল অঞ্চলের 400 nm. তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো তার লাল অঞ্চলের 740 nm আলোর তুলনায় প্রায় 9.4 গুণ তীব্রতা নিয়ে বিক্ষেপিত হয়।

সূর্যোদয় এবং সূর্যাস্তের সময় আপতিত আলো ভিন্ন কোণে বিক্ষেপিত হয় এবং তা বায়ুমণ্ডলের মধ্যে দিয়ে দীর্ঘতর পথ অতিক্রম করে দর্শকের চোখে পৌঁছায়। এই সময় আলোর কেবল বিক্ষেপণ নয় বায়ুমণ্ডলে তার প্রতিসরণও গুরুত্বপূর্ণ ঘটনা। এগুলির সম্মিলিত প্রভাবে সকাল বা সন্ধ্যায় আকাশের রং ভিন্ন হয়।

প্রসঙ্গত উল্লেখ্য যে যখন মাধ্যমের কণার আকার আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মতো কিংবা তার থেকে বড় হয়ে যায় তখন আরেকটি ভিন্ন ধরনের বিক্ষেপণ দেখা যায়। একে বলা হয় মেঈ বিক্ষেপণ (Mie Scattering) এবং এটি র‍্যালে বিক্ষেপণ থেকে ভিন্ন। বিজ্ঞানী মেঈ যে এই বৃহত্তর কণিকায় বিক্ষেপণের জন্য যে তত্ত্ব দেন সেখানে দেখা যায় যে এক্ষেত্রে আলোর দশা সরণ খুব গুরুত্বপূর্ণ হয়ে যায় এবং তা বেশি ঘটে থাকে। মেঈ বিক্ষেপণের ক্ষেত্রে বিক্ষেপিত আলো একটি বিশেষ দিকে অপেক্ষাকৃত বেশি মাত্রায় ছড়িয়ে পড়ে র‍্যালে বিকিরণের মতো একই θ-র জন্য সবদিকে সমানভাবে ছড়ায় না। নিচের চিত্রে (চিত্র 13.3) বিষয়টি দেখানো হয়েছে। মেঈ বিক্ষেপণ আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ওপর বিশেষ নির্ভর করে না বরং বাতাসে যথেষ্ট ধূলিকণা উপস্থিত থাকলে তা সূর্যের চারদিকে সাদা এক চকচকে ভাবের সৃষ্টি করে। কুয়াশার মধ্যে সাদা আলোও মেঈ বিক্ষেপণের জন্য দেখা যায়।

চিত্র 13.3
র‍্যালে ও মেঈ বিক্ষেপণে আপতিত ও বিক্ষেপিত আলোর অভিমুখ

আমরা এবার পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোর বিচ্ছুরণ বিষয়ক আলোচনায় যাব।

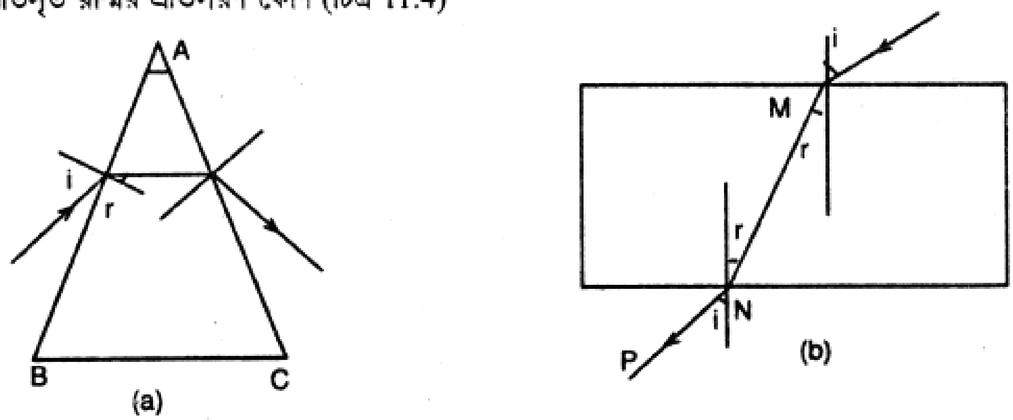
13.5 আলোর বিচ্ছুরণ (Dispersion of light)

সূর্যের আলো প্রিজমের মধ্যে দিয়ে গেলে যে কতগুলি বিভিন্ন রঙে বিশ্লিষ্ট হয়ে পড়ে তা আমাদের একটি অত্যন্ত পরিচিত ঘটনা। সাদা আলো যে প্রকৃতপক্ষে কতগুলি ভিন্ন বর্ণের আলোর সমন্বয়ে গঠিত তা নিউটন প্রিজমের সাহায্যে পরীক্ষা করে দেখান। আমরা চলিত কথায় দৃশ্যমান আলোকে সাতটি রং দেখতে পাই এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে এই রংগুলিকে আমরা যথাক্রমে বেগুনী, নীল, আকাশী, সবুজ, হলুদ, কমলা ও লাল (সংক্ষেপে বেনীঅসহকলা বা VIBGYOR) বলে থাকি। সূর্যালোক বা সাদা আলোকে সাতটি রংয়ের সমষ্টি বলে উল্লেখ করা হয়—প্রকৃতপক্ষে সাদা আলো বলতে অনেকগুলি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমন্বয়ে গঠিত আলোকে বোঝায়। বৃষ্টির পরে বায়ুমণ্ডলে ভাসমান জলকণার মধ্যে দিয়ে আগত 'সাদা' সূর্যালোক প্রতিসরণের জন্য বিশ্লিষ্ট হয়ে গিয়ে 'সাতরঙের' রামধনু তৈরি করে।

স্নেলের সূত্রানুযায়ী আমরা জানি যে কোনো মাধ্যমের চরম প্রতিসরাঙ্ক μ হলে লেখা যায় যে

$$\mu = \frac{\text{Sin}\, i}{\text{Sin}\, r} \qquad \text{(13.2)}$$

যেখানে i হচ্ছে শূন্য বা বায়ু মাধ্যম থেকে আগত রশ্মির আপতন কোণ এবং r হচ্ছে মাধ্যমটিতে প্রতিসৃত রশ্মির প্রতিসরণ কোণ (চিত্র 11.4)



চিত্র 13.4 [প্রিজমের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় আলোক রশ্মির কৌণিক বিচ্যুতি ঘটে কিন্তু আয়তকার ব্লকের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় তা ঘটে না। এক্ষেত্রে আপতিত ও নির্গত রশ্মি পরস্পর সমান্তরাল।]

যখন বায়ু মাধ্যম থেকে সাদা আলো কোনো প্রিজমের একটি প্রতিসারক তলে আপতিত হয় ঐ আলোক

রশ্মিতে উপস্থিত সব বর্ণের আলোর জন্য আপতন কোণ 'i' একই থাকে। কিন্তু বিভিন্ন বর্ণের জন্য প্রতিসরণ কোণ 'r' ভিন্ন হয়। দ্বিতীয় প্রতিসারক তল থেকে যখন এই বিভিন্ন বর্ণের আলো নির্গত হয় তখন সেই রশ্মিগুলির কৌণিক বিচ্যুতি (angular deviation) লক্ষ্য করা যায় এবং বিভিন্ন বর্ণের আলোর ক্ষেত্রে চ্যুতি কোণ (angle of deviation) ভিন্ন হয়। ফলে সাদা রংয়ের আলোতে উপস্থিত ভিন্ন বর্ণের আলোগুলি আবার একত্রিত হয়ে সাদা আলো গঠনের সুযোগ পায় না এবং আমরা ভিন্ন বর্ণের আলোগুলি আলাদাভাবে দেখতে পাই। এই ঘটনাটিকে আলোর বিচ্ছুরণ হিসেবে উল্লেখ করা হয়। প্রিজমের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার ফলে সাদা আলো এভাবে বিশ্লিষ্ট হওয়ার কারণ আলোর কৌণিক বিচ্যুতি যা ভিন্ন ভিন্ন বর্ণের জন্য আলাদা। প্রিজমের পরিবর্তে যদি একই উপাদানে তৈরি স্বচ্ছ ব্লকের (যেমন কাচের তৈরি ব্লক চিত্র 13.4[b) মধ্যে দিয়ে সাদা আলোক রশ্মি গমন করে তাহলে আলোর বিচ্ছুরণ দেখা যায় না। কারণ, আপতিত ও নির্গত রশ্মি পরস্পরের সমান্তরাল থাকে, এবং সেখানে কোনো কৌণিক চ্যুতি পাওয়া যায় না। প্রিজমের দুটি প্রতিসারক তলের মধ্যে একটি কোণ থাকায় রশ্মির কৌণিক বিচ্যুতি ঘটে কিন্তু আয়তাকার ব্লকের দুটি প্রতিসারক তল পরস্পর সমান্তরাল (অর্থাৎ মধ্যবর্তী কোণ $0°$) হওয়ার ফলে সেখানে আলোর কৌণিক বিচ্যুতি তথা বিচ্ছুরণ ঘটে না।

প্রতিসরাঙ্কের আরেকটি সংজ্ঞার দিকে আমাদের দৃষ্টি দিতে হবে। আমরা জানি যে বায়ু মাধ্যমে বা শূন্য মাধ্যমে আলোর গতিবেগ C এবং অন্য কোনো মাধ্যমে ওই গতিবেগ u হলে মাধ্যমের চরম প্রতিসরাঙ্ক μ কে লেখা যায় যে

$$\mu = \frac{C}{v} \qquad \text{..................} (13.3)$$

বস্তুত কোনো মাধ্যমে আলো লম্বভাবে আপতিত হলে স্নেলের সূত্রে প্রয়োগ করা যায় না, সেক্ষেত্রে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক এই সূত্রের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। বস্তুত এটি প্রতিসরাঙ্কের সাধারণীকৃত (generalised) সংজ্ঞা।

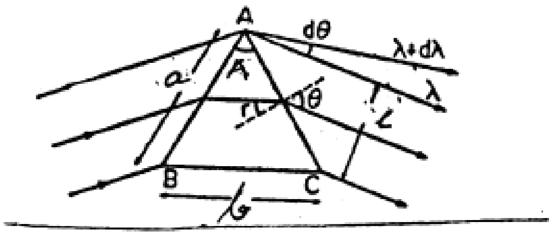
এখান থেকে দেখা যাচ্ছে যে বিভিন্ন মাধ্যমে আলোর গতিবেগ ভিন্ন হওয়ায় বিভিন্ন মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক আলাদা হয়। আমরা জানি যে $v = \nu\lambda$ অর্থাৎ কোনো মাধ্যমে আলোর গতিবেগ, আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং কম্পাঙ্কের (ν) গুণফল। তাই আলো এক মাধ্যম থেকে অন্য মাধ্যমে গেলে তার গতিবেগের যে পরিবর্তন হয় তার জন্য কম্পাঙ্ক (ν) এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) যে কোনো একটি অথবা দুটি ই পরিবর্তন হওয়া স্বাভাবিক। বাস্তব ক্ষেত্রে অবশ্য দেখা যায় যে $v = (\nu\lambda)$ -র পরিবর্তনের জন্য কেবলমাত্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন হয়। আলোকরশ্মির কম্পাঙ্ক উভয় মাধ্যমেই অপরিবর্তিত থাকে।

তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা λ -র পরিবর্তনের সঙ্গে সঙ্গে কোনো মাধ্যমে আলোর গতিবেগ পরিবর্তিত হয়। ফলত ওই

মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্কেরও পরিবর্তন ঘটে। তাই ভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা ভিন্ন বর্ণের আলোর জন্য একটি মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক আলাদা হয়। এই কারণেই সাদা আলোতে উপস্থিত সব তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর প্রিজমের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় কৌণিক চ্যুতি ঘটলেও এই চ্যুতি আলোর বর্ণনির্ভর। সুতরাং প্রিজমের দ্বিতীয় প্রতিসারক তল থেকে নির্গত বিভিন্ন বর্ণের আলো পর্দার ওপর ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় আপতিত হয়। আমরা দেখি সাদা আলো 'সাতরঙে ভেঙে' গেছে। পদার্থবিদ্যার পরিভাষায় আলোর বিচ্ছুরণ ঘটে গেছে।

13.6 কৌণিক বিচ্ছুরণ (Angular dispersion) ও বিচ্ছুরণ (dispersion) -এর তাৎপর্য

আলোর বিচ্ছুরণের বিষয়টি পরিমাণগতভাবে বুঝতে গেলে দুটি বিষয় সংজ্ঞায়িত করা বিশেষ প্রয়োজন। এই দুটি বিষয় হচ্ছে কৌণিক বিচ্ছুরণ (angular dispersion) এবং বিচ্ছুরণ (dispersion)। এই দুটি রাশি গণনা করে বোঝা যায় যে কোনো মাধ্যম দিয়ে যাওয়ার সময় একটি বহুবর্ণী আলো কেবল সংশ্লিষ্ট বর্ণে ভেঙে যাবে না, সেটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোন অঞ্চলে কতটা ছড়িয়ে যাবে, এই দুটি বিষয়ের ব্যঞ্জনা নির্ণয়ের জন্য আমরা নিচের চিত্রটির সাহায্য নেব।



চিত্র 13.5

চিত্র 13.5 : [A কোণ ও b ভূমিবিশিষ্ট প্রিজমের মধ্যে দিয়ে আলোর বিচ্ছুরণ। লক্ষ্য করুন λ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর কৌণিক বিচ্যুতি θ কিন্তু (λ+dλ) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর কৌণিক বিচ্যুতি (θ – dθ)।]

এখানে দেখানো হয়েছে ABC প্রিজমের প্রথম প্রতিসারক তলে (AB) আপতিত সমান্তরাল আলোকরশ্মি প্রিজমের মধ্যে দিয়ে প্রতিসরণের পরে দ্বিতীয় প্রতিসারক তল (AC) দিয়ে নির্গত হয়। যদি এই আলোকরশ্মি একবর্ণী হয় তবে রশ্মির কৌণিক চ্যুতি সত্ত্বেও আপতিত ও নির্গত রশ্মি সমান্তরাল থাকে। কারণ একটি বিশেষ বর্ণের আলো আপতন কোণ, প্রিজমের উপাদান ও প্রিজম কোণ (∠A বা ∠BAC) এবং আপতন কোণ ও নির্গমণ কোণের ওপর নির্ভর করে একটি নির্দিষ্ট কৌণিক চ্যুতি লাভ করে। তবে বহুবর্ণী বা একাধিক বর্ণ তথা তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ সমন্বিত আলোর ক্ষেত্রে ভিন্ন বর্ণের আলোর কৌণিক বিচ্যুতি ভিন্ন হয়। এর ফলেই বহুবর্ণী আলো নানা বর্ণে বিশিষ্ট হয়ে পড়ে। 13.5 চিত্রে যেমন দেখা যাচ্ছে যে λ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোর কৌণিক বিচ্যুতি θ কিন্তু (λ+dλ) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের

আলোর ক্ষেত্রে এই বিচ্যুতি $(\theta - d\theta)$। বস্তুত, λ র পরিবর্তনের ফলে θ এর পরিবর্তন অর্থাৎ $\frac{d\theta}{d\lambda}$ কে বলা হয় কৌণিক বিচ্ছুরণ (angular dispersion), অন্যভাবে বলা যায় যে $\frac{d\theta}{d\lambda}$ র সাহায্যে কৌণিক বিচ্ছুরণকে পরিমাপ করা হয়।

আমরা এবার কয়েকটি ধাপ গণনার মধ্যে দিয়ে $\frac{d\theta}{d\lambda}$-র সঙ্গে আরেকটু ভালভাবে পরিচিত হবো।

আপনারা জানেন যে $\frac{dz}{dx}$ কে আমরা এইভাবে লিখতে পারি ঃ-

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dz}{dy}$$

ঠিক একইভাবে আমরা $\frac{d\theta}{d\lambda}$ কে লিখব

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\mu} \cdot \frac{d\mu}{d\lambda} \qquad \text{.........................} \quad (13.4)$$

সমীকরণের দ্বিতীয় গুণকটি অর্থাৎ $\frac{d\mu}{d\lambda}$ কে বলা হয় বিচ্ছুরণ যেখানে μ হচ্ছে মাধ্যমটির (এক্ষেত্রে প্রিজমের উপাদানের) প্রতিসরাঙ্ক যা λ–র ওপর নির্ভরশীল।

12.5 চিত্রানুযায়ী লেখা যায় যে

$$\mu = \frac{\text{Sin } \theta}{\text{Sin } r}$$

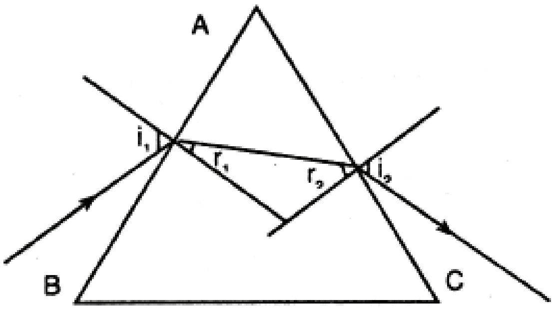
$$\therefore \frac{d\theta}{d\mu} = \frac{\text{Sin } r}{\text{Cos } \theta} \qquad \text{.......................} \quad (13.5)$$

(ধরে নেওয়া হচ্ছে r কোণটি স্থির রাখা হল)

লক্ষ্য করুন 13.5 সমীকরণটি লেখার সময় আমরা কেবল দ্বিতীয় প্রতিসারক তল অর্থাৎ AC তলে প্রতিসরণের দিকেই দৃষ্টি দিয়েছি। কিন্তু আলোক রশ্মির যে কৌণিক চ্যুতির কথা আমরা বলেছি তা কিন্তু দুটি

প্রতিসারক তল AB ও AC উভয়ক্ষেত্রেই ঘটেছে।

আমরা দুই তলের সম্মিলিত চ্যুতির বিষয়টি বিবেচনা করার জন্য যদি প্রিজমটিকে তার ন্যূনতম চ্যুতির অবস্থানে (minimum deviation position) রাখা যায় তাহলে প্রিজমে আলোক রশ্মির আপতন ও নির্গমণ



চিত্র 13.6 ন্যূনতম চ্যুতির অবস্থানে $i_1 = i_2$ এবং $r_1 = r_2 = A/2$ হয়। ন্যূনতম চ্যুতির অবস্থানে আপতিত ও নির্গত রশ্মি প্রতিসম হয়।

কোন সমান হয় এবং চিত্র 13.6 এ $i_1 = i_2$ হয়। এই অবস্থায় আপতিত ও নির্গত রশ্মিদ্বয় প্রতিসম (symmetrical) হয়। অতএব আলোক রশ্মির মোট কৌণিক চ্যুতি দ্বিতীয় তলে (বা প্রথম তলে) যে চ্যুতি ঘটেছে তার দ্বিগুণ হয়। সুতরাং 13.5 সমীকরণকে পরিবর্তন করে লেখা যায় যে,

$$\frac{d\theta}{d\mu} = \frac{2\text{Sin } r}{\text{Cos}\theta} \quad \text{......................} \quad (13.6)$$

এখন চিত্র এবং প্রিজমের ধর্ম থেকে লেখা যায় যে প্রিজম কোণ $A = r_1 + r_2 = 2r$

যেহেতু এখানে $r_1 + r_2 = r$

$\therefore r = A/2$

অতএব $$\frac{d\theta}{d\mu} = \frac{2\text{Sin}\frac{A}{2}}{\text{Cos}\theta} \quad \text{......................} \quad (13.7)$$

এখন যদি প্রিজমের প্রতিসারক তলের প্রস্থচ্ছেদের দৈর্ঘ্য a হয় এবং 11.5 চিত্রানুযায়ী দ্বিতীয় তল থেকে নির্গত আলোক রশ্মিগুচ্ছের প্রস্থ l হয় তবে লেখা যায় যে

$$\frac{d\theta}{d\mu} = \frac{2\,a\text{Sin}\frac{A}{2}}{a\,\text{Cos}\theta} = \frac{b}{l} \quad \text{.................} \quad (13.8)$$ [13.5 চিত্রানুযায়ী]

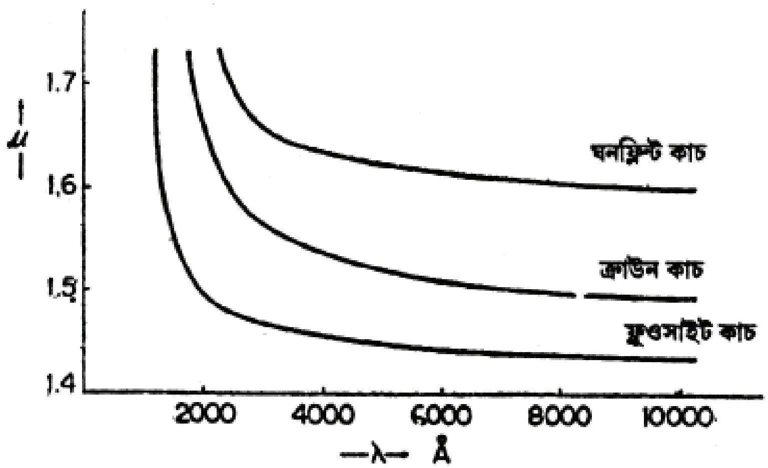
এখানে b প্রিজমের ভূমির দৈর্ঘ্য সূচিত করছে। সাধারণত যে সব প্রিজম ব্যবহার করা হয় সেগুলি প্রায় অধিকাংশ ক্ষেত্রেই সমবাহু প্রিজম হয়ে থাকে। ফলে প্রিজমের প্রতিসারক তলের ও ভূমির প্রস্থচ্ছেদের মান সমান হয় এবং $\frac{b}{\ell}$ এর মান 1 এর খুব কাছাকাছি হয়ে থাকে। যেখানে ব্যতিক্রম দেখা যায় সেখানেও $\frac{b}{\ell}$ এর মান 1-এর থেকে খুব বেশি ভিন্ন হয় না। তবে সাধারণভাবে বলা যায় যে 12.4 সমীকরণে $\frac{d\theta}{d\lambda}$-এর মান যে দুটির গুণক অর্থাৎ $\frac{d\theta}{d\mu}$ এবং $\frac{d\mu}{d\lambda}$ তাদের প্রথমটি $(\frac{d\theta}{d\mu})$ প্রিজমের মাপের (dimension) ওপর নির্ভর করে। অন্য গুণকটি $\frac{d\mu}{d\lambda}$ নির্ভর করে প্রিজমের বা প্রতিসারক মাধ্যমের আলোকীয় ধর্মের (optical property) ওপর। তাই $\frac{d\mu}{d\lambda}$কে বিচ্ছুরণ হিসেবে উল্লেখ করা হয়েছে এবং এই রাশিটি নির্ণয়ের মাধ্যমে জানা সম্ভব যে তরঙ্গদৈর্ঘের কোনো অঞ্চলে λ -র পরিবর্তনের সঙ্গে μ এর পরিবর্তন কীরকম হয়ে থাকে।

সুতরাং আমরা পাই $$\frac{d\theta}{d\lambda} = (\frac{d\mu}{d\lambda})(\frac{b}{\ell}) \qquad \text{................} \quad (13.9)$$

এরপরের দুটি অনুচ্ছেদে আমরা দুটি শ্রেণীভুক্ত বিচ্ছুরণের বিষয়ে আলোচনা করব। উভয় ক্ষেত্রেই আমরা $\mu-\lambda$ লেখাচিত্রের বিভিন্ন অংশে $\frac{d\mu}{d\lambda}$-র মান শুধু ভিন্নই নয় এই মান কীভাবে পরিবর্তিত হচ্ছে, তার পর্যালোচনাও আলোর বিচ্ছুরণ বোঝার জন্য অত্যন্ত জরুরি। এইজন্য $\frac{d\mu}{d\lambda}$ রাশিটির গুরুত্ব অত্যন্ত বেশি এবং কেবলমাত্র ওই রাশিটির নাম আলাদাভাবে বিচ্ছুরণ বলে অভিহিত করা হয়েছে।

13.7 প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণ (Normal dispersion)

কোনো একটি মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক (μ) যে ওই মাধ্যমে আলোর গতিবেগ তথা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভরশীল তা আমাদের পূর্ববর্তী আলোচনা থেকে দেখা গেছে। পরীক্ষামূলকভাবে মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক বিভিন্ন তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের আলোর জন্য নির্ণয় করে λ-র সঙ্গে তার পরিবর্তন লেখচিত্রের সাহায্যে প্রকাশ করলে নিচের লেখচিত্রটি (চিত্র 13.7) পাওয়া যায়।



চিত্র 13.7 : [প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণের ক্ষেত্রে μ–λ লেখচিত্র। বিভিন্ন ধরনের কাচ দিয়ে নির্মিত প্রিজমের জন্য এই বিচ্ছুরণ দেখানো হয়েছে। লক্ষ্য করুন কম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে λ-র সঙ্গে μ অনেক দ্রুত পরিবর্তিত হয়। সব কাচের ক্ষেত্রেই সামান্য কিছু অংশ অতিবেগুনী ও অবলোহিত সহ মূলত দৃশ্য আলোর λ-র জন্যই এই লেখচিত্র আঁকা হয়েছে।]

অন্যদিকে কোনো স্বচ্ছ মাধ্যমে আলোর গতিবেগ যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে বেড়ে যায় পরীক্ষামূলকভাবে তা নির্ধারণ করা সম্ভব হয়েছে। এই দুটি পরীক্ষামূলক তথ্য কিন্তু একই ঘটনার দিকে অঙ্গুলী নির্দেশ করে। কারণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে আলোর গতিবেগ বৃদ্ধির অর্থ ঐ মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্কের হ্রাস, কারণ 13.3 সমীকরণ অনুযায়ী আমরা জানি $\mu = \frac{c}{v}$, ফলতঃ বলা যায় যে আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির জন্য কোনো মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক হ্রাস পায়।

তবে 13.7 চিত্রে নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে λ র সঙ্গে μ র এই পরিবর্তন যে দেখানো হয়েছে সেখানে 13.9 সমীকরণে প্রাপ্ত $\frac{d\mu}{d\pi}$-র মাত্র প্রত্যাশা মতই বিভিন্ন বিন্দুতে (বা বিভিন্ন μ য়) ভিন্ন এবং ধনাত্মক কারণ আমরা দেখেছি যে প্রিজমের মধ্যে দিয়ে বিচ্ছুরণের সময় $\frac{d\mu}{d\lambda}$ ধনাত্মক তাই বলা যায় যে λ বৃদ্ধির সঙ্গে μ হ্রাস পায়। আলোর বিচ্ছুরণে এই আচরণ লক্ষ্য করা গেলে সেটিকে প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণ (normal dispersion) বলা হয়।

1836 সালে বিজ্ঞানী ক্যশি (cauchy) μ–λ লেখার চেহারাটি বা λ সঙ্গে μ-এর পরিবর্তনের বিষয়টি

ব্যাখ্যা করেন। তিনি তার বিশ্লেষণে ধরে নেন যে মাধ্যম দিয়ে আলোকতরঙ্গ গমণ করছে সেই কঠিন স্বচ্ছ মাধ্যমের আচরণ স্থিতিস্থাপক মাধ্যমের মত। তিনি ধরে নেন যে স্থিতিস্থাপক মাধ্যম দিয়ে কোনো অনুপ্রস্থ (transverse) তরঙ্গ প্রবাহিত হলে ঐ মাধ্যমে তরঙ্গের গতিবেগ v মাধ্যমের স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক ও ঘনত্বের ওপর নির্ভরশীল ($v = \sqrt{\frac{k}{p}}$ যেখানে k হচ্ছে স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক ও P ঘনত্ব)। লক্ষ্য করবেন এই সম্পর্ক আমরা কোনো মাধ্যমে শব্দতরঙ্গে গতিবেগের জন্য আমরা এরকম ব্যঞ্জনা পেয়েছি। ক্যশি তার তাত্ত্বিক বিশ্লেষণে এই ধারণাগুলি ব্যবহার করে প্রতিসরাঙ্ক (μ) ও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) সম্পর্ক প্রকাশ করে নিচের সূত্রটি দেন

$$\mu = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \qquad \text{.......................} (13.10)$$

এটিকে প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণ বিষয়ক ক্যশির সূত্র বলা হয়।

এই (13.10) সমীকরণে A, B, C তিনটি ধ্রুবক, যেগুলির মান স্বচ্ছ মাধ্যমের বৈশিষ্ট্যের ওপর নির্ভরশীল। অর্থাৎ ঘন ফ্লিন্ট কাচের ক্ষেত্রে A, B, C -র যা মান পাওয়া যাবে তা ক্রাউন কাচে পাওয়া ওই ধ্রুবকগুলির মান থেকে ভিন্ন।

ক্যশির এই সূত্রে প্রাথমিকভাবে তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির সঙ্গে প্রতিসরাঙ্কের হ্রাসের বিষয়টি ধরা পড়েছে। প্রশ্ন হচ্ছে যে, λ -র সঙ্গে μ ঠিক যেভাবে পরিবর্তিত হচ্ছে তা কি এই সম্পর্কটিতে প্রতিফলিত হয়েছে? এর উত্তরে বলা যায় যে বিষয়টি A, B, C তিনটি ধ্রুবকের ওপর নির্ভরশীল, এবং পরিচিত বিচ্ছুরণের ঘটনাটি ক্যশির সূত্রের সাহায্যে ভালোভাবে গণনা করা সম্ভব।

(13.10) সমীকরণ থেকে আরও দেখা যায় যে যদি তিনটি জানা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য কোনো মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক পরীক্ষামূলকভাবে নির্ণয় করা যায় তাহলে ওই মাধ্যমের জন্য A, B, C নির্ণয় করা সম্ভব। তারপর যে কোনো তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য A, B, C -র ওই মানগুলি ব্যবহার করে দেখা যেতে পারে ক্যশির এই সূত্র থেকে প্রাপ্ত একটি λ -র জন্য μ এর যে তাত্ত্বিক মান গণনা করা হচ্ছে তা পরীক্ষালব্ধ মানের সঙ্গে কতখানি মিলছে। প্রকৃতপক্ষে পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচিত ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের পরিঘটনা আবিষ্কারের আগে পর্যন্ত ক্যশির সূত্রই বিচ্ছুরণ ব্যাখ্যা করার একমাত্র সূত্র ছিল।

বাস্তব ক্ষেত্রে অবশ্য বহু সময়ই লক্ষ্য করা যায় যে (13.10) সমীকরণের তিনটি পরিবর্তে ডানদিকের দুটি মাত্র রাশিকে ব্যবহার করে যথেষ্ট ভালো ফল পাওয়া যায়। সেক্ষেত্রে (13.10) সমীকরণে প্রাপ্ত ক্যশির সূত্রটি পরিবর্তিত হয়ে দাঁড়ায়।

$$\mu = A + \frac{B}{\lambda^2} \qquad \text{.......................} \quad (13.11)$$

এই (12.11) সমীকরণটিকে অন্তরকলন (differentiate) করে আমরা পাই

$$\frac{d\mu}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3} \qquad \text{.......................} \quad (13.12)$$

এই সম্পর্কটি থেকে দেখা যাচ্ছে যে প্রত্যাশামতই $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের গতি ঋণাত্মক। এই প্রসঙ্গে উল্লেখ করা দরকার যে B একটি ধনাত্মক ধ্রুবক। অতএব আমরা যদি (13.12) সমীকরণে প্রকাশিত কিছুটা সরলীকৃত ক্যশির সম্পর্ক ব্যবহার করি তাহলে বলা যায় যে $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের গতি λ^3 এর ব্যস্তানুপাতে পরিবর্তিত হয়। $\mu - \lambda$ লেখচিত্র লক্ষ্য করলে বিষয়টি বোঝা যায়। ক্ষুদ্রতর λ -র ক্ষেত্রে গতি ঋণাত্মক এবং বৃহত্তর মানের। λ-র বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে গতির চরম মান $\left(\left|\frac{B}{\lambda^3}\right|\right)$ ছোট হতে থাকে যদিও তার ঋণাত্মক চিহ্ন অপরিবর্তিত থাকে। $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের যে কোনো বিন্দুতে স্পর্শক টেনে ওই তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা λ-র জন্য গতি গণনা করা সম্ভব। এর ওপর ভিত্তি করে নিচের অনুশীলনীটি আপনি চেষ্টা করুন।

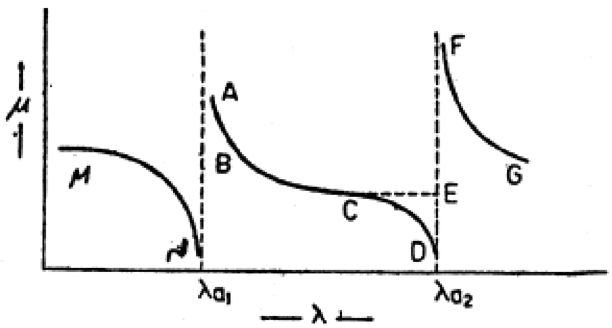
অনুশীলনী 3 : (13.11) সমীকরণে প্রকাশিত ক্যশির সূত্রের পরিবর্তিত রূপটির সাহায্য নিয়ে দৃশ্য আলোর দুই প্রান্তের বিকিরণের জন্য একটি উপাদানের বিচ্ছুরণের তুলনা করুন।

13.8 ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ (Anomalous dispersion)

ক্যশির সূত্র থেকে [সমীকরণ 13.10] প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণের সন্তোষজনক ব্যাখ্যা পাওয়া গেলেও 1870-71 সাল নাগাদ অপর দুই বিজ্ঞানী ক্রিশ্চিয়ানসেন (Christiansen) এবং কুন্ড (Kundt) এমন একটি বিচ্ছুরণের ঘটনা পরীক্ষামূলকভাবে প্রত্যক্ষ করেন যেখানে বিচ্ছুরণের ফলে প্রাপ্ত $\mu - \lambda$ লেখচিত্র ক্যশির সূত্র অনুসরণ করেন না। প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণের থেকে ভিন্ন ধরনের এই বিচ্ছুরণকে বলা হয় ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ (Anomalous dispersion) ।

এই বিজ্ঞানীদ্বয় সাদা আলোর বিচ্ছুরণের জন্য দুটি বিশেষ ধরনের মাধ্যম ব্যবহার করেছিলেন। এদের একটি হচ্ছে বেগুনী বর্ণের আইওডিন বাষ্প এবং অপরটি ফুকসিন (fuchsin) নামের বিশেষ একটি রাসায়নিকের সবুজ রঙের জলীয় দ্রবণ। এই দুটি মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে প্রেরিত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বৃদ্ধির সঙ্গে মাধ্যমের μ ক্যশির সূত্রানুযায়ী নিরবচ্ছিন্নভাবে কমে না, বিশেষ অঞ্চলে তা ভিন্ন আচরণ দেখায়। অর্থাৎ μ–র সঙ্গে μ এর পরিবর্তন

আংশিকভাবে ক্যশির সূত্র অনুসরণ করে। কিছুটা অংশে μ এর পরিবর্তন ক্যশির সূত্র থেকে কেবল বিচ্যুত হয় না তা সম্পূর্ণ বিপরীত আচরণ প্রদর্শন করে। এই পর্যবেক্ষণকে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ আখ্যা দেওয়া হয়। দেখা যায় ওই দুটি উপাদানের $\mu - \lambda$ লেখচিত্রে অংশবিশেষে ছেদ (discontinuity) রয়েছে এবং ঐ ছেদের নিকটবর্তী অঞ্চলে ক্যশির সূত্র প্রয়োগ করা যায় না। এই ঘটনার কারণ হিসেবে দেখা যায় যে ওই দুটি মাধ্যমের এমন একটি বৈশিষ্ট্য রয়েছে যা আমাদের পরিচিত স্বচ্ছ, বর্ণহীন মাধ্যম থেকে ভিন্ন এবং তার ফলেই ওই ছেদ এবং ক্যশির সূত্র থেকে বিচ্যুতি লক্ষ্য করা যায়।



[চিত্র 13.8 : ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের ক্ষেত্রে λ-র সঙ্গে μ এর পরিবর্তন λa_1 ও λa_2 অঞ্চলে মাধ্যমটির দুটি বরণাত্মক শোষণপটি রয়েছে। শোষণপটির মধ্যে μ সংজ্ঞায়িত নয়।]

যে সব মাধ্যমে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ দেখা যায় সেগুলির ক্ষেত্রে $\mu - \lambda$ লেখচিত্র কেমন হয় তা (13.8) চিত্রে দেখানো হয়েছে। লক্ষ্য করুন এই চিত্রের দুটি বিশেষ λ-র নিকটে (λa_1এবং λa_2) λ-র সঙ্গে μ-এর পরিবর্তন ক্যশির সূত্র মেনে হচ্ছে না। কেবল তাই নয় এখানে (λa_1এবং λa_2) অঞ্চলে $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের একটি ছেদ (discontinuity) দেখা যাচ্ছে যা প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণের ক্ষেত্রে আমরা দেখিনি। তাছাড়া λa_1 ও λa_2 মধ্যবর্তী ABC অংশটি ক্যশির সূত্র মেনে চললেও যখন λ-র মান λa_2 নিকটবর্তী হচ্ছে তখন λ-র সঙ্গে μ-এর অনেক দ্রুত পরিবর্তন ঘটছে। এই অঞ্চলে CD পরীক্ষালব্ধ লেখচিত্র সূচিত করছে। যদি $\mu - \lambda$ লেখচিত্র ক্যশির সূত্র এই অঞ্চলেও মেনে চলত তাহলে সেই চিত্র হত CE রেখা (ভাঙা রেখা) বরাবর। কিন্তু এখানে তা হচ্ছে না।

আরও লক্ষ্য করবেন যে λa_1এবং λa_2-র সন্নিহিত অঞ্চলে ক্যশির সূত্র থেকে $\mu - \lambda$ রেখাচিত্রের বিচ্যুতি ব্যাপক। যেমন λa_1 ও λa_2 তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অব্যবহিত আগে MN বা CD অঞ্চলে λ-র সঙ্গে μ হ্রাস পায় ঠিকই তবে তা ক্যশির সূত্রানুযায়ী ঘটে না, ঘটে অনেক দ্রুততর। আবার λa_1 ও λa_2 তরঙ্গদৈর্ঘ্যে অঞ্চল অতিক্রম করার অব্যবহিত পরেই (F বিন্দুতে) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বৃদ্ধি সত্ত্বেও μ এর মান এক আকস্মিক বৃদ্ধি দেখায়। এই অংশটিও ক্যশির সূত্র অনুযায়ী ব্যাখ্যা করা যায় না, যদিও তারপর থেকে আবার তা ক্যশির সূত্র অনুসরণ করে। এছাড়া λa_1

ও λa_2 অঞ্চলে উপস্থিত $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের দুটি ছেদের মধ্যে তো μ এর মাত্র জানাই যায় না।

আসলে 13.8 চিত্রে যে $\mu - \lambda$ -র লেখচিত্র দেখানো হয়েছে সেখানে λa_1 ও λa_2 দুটি বিশেষ অঞ্চল যেখানে বর্ণালীতে অন্ধকার পটি (dark land) পাওয়া যায়। আমরা যে আলো ব্যবহার করে এই বর্ণালী পাই ও দেখি তা আমাদের পরিচিত দৃশ্য আলো। এই আলোতে প্রাপ্ত বর্ণালী অবশ্যই মাধ্যমের উপাদান ও যে উৎস থেকে আলো নির্গত হচ্ছে তার বৈশিষ্ট্যের ওপর নির্ভরশীল। তবে যদি সায়ং সম্বলিত সাদা আলো ব্যবহৃত হয় তখন প্রাপ্ত বর্ণালী কেবল প্রতিসারক মাধ্যমের বৈশিষ্ট্যের ওপর নির্ভর করে।

ফুকসিন ও আয়োডিন বাষ্প নিয়ে বিচ্ছুরণের এই পরীক্ষায় ক্যশির সূত্রের বিচ্যুতি লক্ষ করার জন্য একটি বিশেষ ঘটনা দায়ী। এই দুটি উপাদানের এক বা একাধিক বরণাত্মক (selective) শোষণপটি (absorption land) দৃশ্য আলোর মধ্যে বর্তমান। এই শোষণপটির জন্য এদের $\mu - \lambda$ লেখচিত্রে ছেদ দেখা যায় আর শোষণপটির নিকটবর্তী অঞ্চলে ক্যশির সূত্র খাটে না।

আমরা এই বিষয়টি এখানে একটু বিশদভাবে আলোচনা করব। আমরা বিভিন্ন উপাদান বা মাধ্যমকে স্বচ্ছ অথবা অস্বচ্ছ হিসেবে চিহ্নিত করি। স্বচ্ছ মাধ্যম, যেমন কাঁচ ইত্যাদির মধ্যে দিয়ে আলো কোনোরকম তীব্রতার হ্রাস ছাড়াই চলে যেতে পারে। এখানে এই আলো বলতে দৃশ্য আলো বোঝানো হচ্ছে। কাঁচ আমাদের দৃশ্য আলোর জন্য স্বচ্ছ কিন্তু তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ পরিবারের অন্য সব সদস্যদের জন্য সেটি স্বচ্ছ নাও হতে পারে। সেরকম বিকিরণ কাঁচের ওপর আপতিত হলে তা শোষিত (absorbed) হবে। অন্যদিকে আমাদের শরীরের চামড়া বা মাংস দৃশ্য আলোর কাছে অস্বচ্ছ। কাঠের মত উপাদান ও দৃশ্য আলোকে তার মধ্যে দিয়ে যেতে দেয় না। কিন্তু এই সমস্ত ধরনের বস্তুর মধ্যে দিয়ে এক্স রশ্মি চলে যেতে সক্ষম তা আমরা জানি — অর্থাৎ এক্স রশ্মির ক্ষেত্রে উপাদানগুলি স্বচ্ছ মাধ্যমের মত ব্যবহার করে। মাধ্যম স্বচ্ছ হলে আপতিত ও নির্গত বিকিরণের তীব্রতা প্রায় অপরিবর্তিত থাকে।

প্রকৃতপক্ষে বিভিন্ন উপাদানের নিজস্ব বৈশিষ্ট্যের ওপর নির্ভর করে কিছু বিশেষ অঞ্চলের বিকিরণকে শোষণের ক্ষমতা থাকে। এই বিকিরণ দৃশ্য আলোর অন্তর্গত হতে পারে আবার নাও হতে পারে। যেমন কাচের মধ্যে দৃশ্য আলোর পাল্লায় উপস্থিত কোনো তরঙ্গই শোষিত হয় না। অন্যদিকে ফুকাসিনের দ্রবণ বা আয়োডিন বাষ্পের মধ্যে দৃশ্য আলোর খানিকটা অংশ শোষিত হয়। এইজন্য ঘটনাগুলিকে বলা হয় বরণাত্মক শোষণ (Elective absorption)। খুব স্বাভাবিকভাবেই আপতিত বিকিরণের অংশবিশেষ শোষিত হলে নির্গত বিকিরণের তীব্রতা আপতিত বিকিরণের তীব্রতার তুলনায় কম হয়।

ফুকাসিন দ্রবণ বা আয়োডিনের বাষ্পের মধ্যে দিয়ে দৃশ্য আলো যাওয়ার সময় সেই আলোর কিছু তরঙ্গদৈর্ঘ্য

মাধ্যমে শোষিত হয়ে শোষণপটি (absorption land) গঠন করে। আসলে মাধ্যমের বিশেষ অভ্যন্তরীণ গঠন তথা ধর্মের কারণে ওই অঞ্চলের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণকে এই মাধ্যম তাপশক্তিতে রূপান্তরিত করে · – কখনও তা ওই বিকিরণের সমপরিমাণ শক্তি মাধ্যমটির অণুগুলিতে সঞ্চিত হয়। তাই ঠিক ওই শোষণ পটিতে অবস্থিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান আলো দিয়ে যদি এই মাধ্যমগুলিকে আলোকিত করা যায় তাহলে মাধ্যমগুলি সম্পূর্ণ অস্বচ্ছ দেখাবে কেননা আপতিত তরঙ্গের সবটুকুই সেখানে শোষিত হবে, কিছুই মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে নির্গত হতে পারবে না।

13.8 চিত্রে λa_1 ও λa_2 অঞ্চলে $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের যে ছেদ রয়েছে তার জন্য মাধ্যমের শোষণ পটির অবস্থানই দায়ী। এজন্য অন্য $\mu - \lambda$ লেখচিত্রের ছেদ দেখা যায়। শুধু তাই নয় এই শোষণপটির নিকটবর্তী অঞ্চলে যে সব λ রয়েছে এবং যেগুলি শোষিত হচ্ছে না এবং মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে চলে যাচ্ছে তাদের ক্ষেত্রে মাধ্যমের μ অন্য যেসব λ -র জন্য যে ক্যশির সূত্র মেনে চলে তা পাওয়া যায় না।

13.8 চিত্রে তাও দেখানো হয়েছে। শোষণ পটি থেকে বহুদূরের λ -র জন্য ক্যশির সূত্র চমৎকার কাজ করে এবং যত শোষণপটির নিকটবর্তী হওয়া যায় তত ঐ সূত্র থেকে বিচ্যুতির বিষয়টি ধরা পড়ে।

খুব স্বাভাবিকভাবেই প্রশ্ন উঠবে যে তাহলে ক্যশি তার সূত্রটি কীভাবে পেয়েছিলেন? লক্ষ্য করবেন যে ক্যশি যেসব উপাদান নিয়ে কাজ করেছিলেন বা যেসব উপাদানের প্রতিসরাঙ্কের সঙ্গে আপতিত বিকিরণের পরিবর্তনের বিশ্লেষণ তিনি করেছিলেন সেগুলির কোনোটিতেই দৃশ্য আলো পাল্লার মধ্যে শোষণ পটি অবস্থিত ছিল না। বরং পুরো দৃশ্য আলো অঞ্চলটিই ছিল শোষণ পটি থেকে বহুদূরে, ফলে ক্যশির সূত্রটি প্রয়োগে বাধা ছিল না। ফুকসিন দ্রবণ ও আয়োডিন বাষ্পে প্রথম দৃশ্য আলো পাল্লার মধ্যে শোষণ পটির হদিশ পাওয়া গেলে ক্যশির সূত্রের বিচ্যুতি ধরা পড়ে। পরবর্তীকালে আরও বিশেষ মাধ্যমে একই ঘটনা পাওয়া গেছে।

শোষণপটির পার্শ্ববর্তী অঞ্চলে ক্যশির সূত্রের ব্যর্থতার মুলে রয়েছে ক্যশি যে অনুমান ভিত্তিক বিশ্লেষণ করেছিলেন তার সীমাবদ্ধতা, বস্তুত: সমস্তরকম আলোর জন্যই মাধ্যমের অণুগুলি স্থিতিস্থাপক ধর্ম দেখায় না। তাছাড়া ক্যশি যেহেতু $\mu - \lambda$ লেখর সেই অঞ্চলটি নিয়ে কাজ করেছিলেন যা শোষণপটি থেকে বহু দূরে অবস্থিত তাই তার সূত্রটিকে একটি সীমিত অঞ্চলে প্রয়োগের উপযোগী সূত্র হিসেবেই দেখা উচিত। আসলে প্রথমে আবিষ্কৃত হওয়ার ফলে ক্যশির প্রত্যক্ষ করা পরিঘটনা প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণ আখ্যা পেয়েছিল যদিও ব্যাপকতর বিকিরণের ক্ষেত্রে কোনো মাধ্যমে শোষণপটি উপস্থিত থাকাই স্বাভাবিক। কিন্তু পরবর্তী পর্যায়ে আবিষ্কৃত শোষণপটি সম্বলিত বিচ্ছুরণ এখন ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ হিসেবে চিহ্নিত হয়ে আছে। ঐতিহাসিক দৃষ্টিকোণ থেকে প্রত্যাশিত ও ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ

নামে পরিচিত দুটি পরিঘটনার এই নামগুলি আমরা এখনও ব্যবহার করছি। কিন্তু বৈজ্ঞানিক দৃষ্টিকোণ থেকে প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণকে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের একটি বিশেষ ক্ষেত্র (Special Case) হিসেবেই দেখা উচিত।

ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা দিয়ে যে গাণিতিক সূত্র দেওয়া হয়েছে আমরা অবশ্য সেই আলোচনাকে বর্তমান পাঠ্যসূচির অন্তর্গত করছি না। তবে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ আবিষ্কৃত হওয়ার পরে ক্যশির সূত্র সম্পূর্ণ মূল্যহীন হয়ে যায়নি, কেবল তাঁর সীমাবদ্ধতা চিহ্নিত হয়েছে। পদার্থবিদ্যায় এটি একটি সুপরিচিত ঘটনা। অন্য বহু ক্ষেত্রেও এরকম ঘটেছে।

13.9 সারাংশ

1. আমাদের পরিচিত কতগুলি প্রাকৃতিক ঘটনার মূলে রয়েছে আলোর বিক্ষেপণ ও বিচ্ছুরণ। আলোর বিক্ষেপণের ফলে আকাশের রং নীল দেখায় আর রামধনুর সাতটি রং দেখা যায় আলোর বিচ্ছুরণের ফলে।

2. তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের একটি ক্ষুদ্র অংশের সাহায্যে আমরা দেখতে পাই। পরিভাষায় একে বলা হয় দৃশ্য আলো। এছাড়া এই পরিবারভুক্ত সদস্যদের মধ্যে রয়েছে গামা রশ্মি, এক্স রশ্মি, অতিবেগুনী, অবলোহিত রশ্মি, রেডিও তরঙ্গ প্রভৃতি।

3. আলোকরশ্মি যখন কোনো মাধ্যমের অণুর দ্বারা বিক্ষেপিত হয়, তখন অণু কর্তৃক আলোর শোষণ ও পুনঃনিঃসারণের সময় পার্থক্যের ওপর নির্ভর করে কেবল বিক্ষেপণ নয় আরও কয়েকটি পরিঘটনা লক্ষ্য করা যায়।

4. ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ ও র‍্যালে বিক্ষেপণ দুটি গুরুত্বপূর্ণ বিক্ষেপণ প্রক্রিয়া। র‍্যালে বিক্ষেপণের জন্যই আকাশের রং নীল দেখায়।

5. যখন মাধ্যমের কণার রং অণুর আকার আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষা বড় বা তার সমান হয়ে যায় তখন র‍্যালে বিক্ষেপণের পরিবর্তে মেঈ বিক্ষেপণ ঘটে।

6. আলোর বিচ্ছুরণে প্রতিসারক মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় সাদা বা অন্য বহুবর্ণী আলো সংশ্লিষ্ট কতগুলি বর্ণের আলোতে বিভক্ত হয়ে যায়। বিচ্ছুরণের পরিমাণগত হিসেবের জন্য $\frac{d\mu}{d\lambda}$ রাশিটির গণনা প্রয়োজনীয়।

7. আলোর বিচ্ছুরণ দু'রকম হয়ে থাকে — প্রত্যাশিত ও ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ। প্রকৃতপক্ষে প্রত্যাশিত বিচ্ছুরণ হচ্ছে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের এক বিশেষ শর্তসাপেক্ষ রূপ।

13.10 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের সাধারণ বৈশিষ্ট্যগুলি লিপিবদ্ধ করুন।

2. আলো যখন কোনো মাধ্যমে আপতিত হয় তখন সেই মাধ্যমের অণুতে আলোর মিথস্ক্রিয়ার ফলে বিক্ষেপণের যেসব পরিঘটনাগুলি লক্ষ করা যায় সে বিষয়ে সংক্ষেপে লিখুন।

3. র‍্যালে বিক্ষেপণের ফলে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর কীভাবে নির্ভর করে?

4. বিচ্ছুরণ ও কৌণিক বিচ্ছুরণ কাকে বলে?

5. প্রত্যাশিত বিকিরণ ও ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণের পার্থক্য নির্দেশ করুন। আলোচনার মাধ্যমে দেখান যে ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণই প্রকৃতপক্ষে স্বাভাবিক ঘটনা।

13.11 উত্তরমালা

অনুশীলনী 1

নিচের তালিকায় বিভিন্ন তড়িচ্চুম্বকীয় রশ্মির নাম ও তাদের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য ও কম্পাঙ্কের পাল্লা দেওয়া হল। এই তালিকাটি 13.1 চিত্রের ওপর ভিত্তি করে তৈরি করা হয়েছে এবং এখানে ধরে নেওয়া হয়েছে যে শূন্য মাধ্যমে আলোর গতিবেগ $3 \times 10^8\ ms^{-1}$ । শক্তির পাল্লার স্তম্ভটি 13.1 চিত্রের সাহায্যে পূরণ করুন।

বিকিরণটির পরিচয় বা নাম	তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের (λ) পাল্লার(মোটামুটি) (m)	কম্পাঙ্কের (ν) পাল্লা (মোটামুটি) (H_2)	ফোটনের শক্তি $E = h\nu$ (ev)
গামা রশ্মি	$10^{-13} - 10^{-12}$	$10^{22} - 10^{20}$	
এক্স রশ্মি	$10^{-12} - 10^{-8}$	$10^{20} - 10^{16}$	
অতি বেগুনী রশ্মি	$10^{-8} - 10^{-7}$	$10^{16} - 10^{15}$	
দৃশ্য আলো	$4 \times 10^{-7} – 18 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{15} - 8 \times 10^{15}$	
অবলোহিত রশ্মি	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{14} - 10^{11}$	
মাইক্রোওয়েভ বা মাইক্রোতরঙ্গ	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{11} - 10^{9}$	

টেলিভিশন ও এফএম সম্প্রচার	$10^0 - 10^1$	$10^8 - 10^7$
সাধারণ সম্প্রচার	$10^2 - 10^3$	$10^6 - 10^5$
বেতার বা রেডিও তরঙ্গ (এই বৃহৎ গোষ্ঠীর মধ্যে টিভি ও সাধারণ সম্প্রচার তরঙ্গ অর্ন্তভুক্ত)	$10^{-1} - 10^5$	$10^9 - 10^3$

অনুশীলনী 2

এই পরিঘটনাগুলি আলোক সংদীপ্তি, প্রতিপ্রভা ও অণুপ্রভা রামন ক্রিয়া এই পরিঘটনাগুলি থেকে আবার ভিন্ন 13.3.1 অনুচ্ছেদের সাহায্য নিয়ে প্রথম তিনটি পরিঘটনা সম্পর্কে আরও কিছু তথ্য সংযোজন করুন।

অনুশীলনী 3

ক্যশির মূল সূত্রটি হল $\mu = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$ (11.11) সমীকরণে $\frac{C}{\lambda^4}$ অংশটি বাদ দেওয়া হয়েছে। A, B, C তিনটি ধ্রুবকই মাধ্যমের ওপর নির্ভরশীল এবং $\frac{C}{\lambda^4}$ পদটি বাদ দেওয়ার ফলে μ এর মানের বিশেষ পরিবর্তন ঘটে না তাই (12.11) সমীকরণ অনুযায়ী

$$\mu = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

$$\frac{d\mu}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3}$$

দৃশ্য আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য মোটামুটিভাবে 400 nm থেকে 800 nm পর্যন্ত বিস্তৃত

$$\left(\frac{d\mu}{d\lambda}\right)_{400nm} = -\frac{2B}{(400)^3}, \left(\frac{d\mu}{d\lambda}\right)_{800nm} = -\frac{2B}{(800)^3}$$

$$\therefore \frac{\left(\frac{d\mu}{d\lambda}\right)_{400nm}}{\left(\frac{d\mu}{d\lambda}\right)_{800nm}} = \frac{(800)^3}{(400)^3} = 2^3 = 8$$

অর্থাৎ দৃশ্য আলোর নিম্নতর তরঙ্গ প্রান্তে বিচ্ছুরণের মান উচ্চতর তরঙ্গ প্রান্তে বিচ্ছুরণের মান অপেক্ষা 8 গুণ বেশি।

সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

1. এই এককের 13.2 অনুচ্ছেদ দেখুন।

2. এই এককের 13.4, 13.4.1 এবং 13.4.2 অনুচ্ছেদের সাহায্য নিয়ে ব্রিলোয়াঁ বিক্ষেপণ, র‍্যালে বিক্ষপণ ও মেঈ বিক্ষেপণের বৈশিষ্ট্যগুলি উল্লেখ করে তাদের পার্থক্য নির্দেশ করুন।

3. র‍্যালে বিক্ষেপণের ফলে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা বেশ কয়েকটি বিষয়ের ওপর নির্ভর করে [সমীকরণ 13.1 দ্রষ্টব্য] তবে এর মধ্যে আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ওপর এই নির্ভরশীলতা বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য, কারণ বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের চতুর্থ ঘাতের সঙ্গে ব্যস্তানুপাতে পরিবর্তিত হয়। অর্থাৎ θ কোণে বিক্ষেপিত আলোর তীব্রতা $I(\theta)$ হলে লেখা যায়।

$$I(\theta)\ \lambda\ \frac{1}{\lambda^4}$$

4. এই এককের 13.6 অনুচ্ছেদ দেখুন।

5. এই এককের 13.8 অনুচ্ছেদের দ্বিতীয়াংশে বিষয়টি বিস্তৃতভাবে আলোচিত হয়েছে।

একক 14 ❑ দৃষ্টি

গঠন

14.a.1প্রস্তাবনা

এই অধ্যায়ে আমাদের আলোচ্য বিষয় হোল পদার্থবিদ্যার অন্তর্গত আলোক শাখার এক উপশাখা-দৃষ্টি (VISION)বা বীক্ষণ। এই উপশাখায় ব্যবহৃত প্রধানতম ও সূক্ষ্মতম যন্ত্র হোল চক্ষু ইন্দ্রিয় (eye)। অন্যান্য ইন্দ্রিয় যেমন জীবকে তার বহির্জগৎ সম্পর্কে অভিজ্ঞ করে তোলে, তেমনি এই বিশেষ ইন্দ্রিয় চোখও দৃষ্টিশক্তির সাহায্যে দৃশ্যবস্তুর রূপ, বর্ণ, আকার, গতিশীলতা ও তার আপেক্ষিক দূরত্ব সম্পর্কে খুঁটিনাটি তথ্য জুগিয়ে দর্শককে পরিবেশ সম্পর্কে সচেতন করে তোলে। তাই যে কোন ইন্দ্রিয় ঘটিত প্রতিবন্ধকতার চেয়ে দৃষ্টিহীনতা বা অন্ধত্ব (blindness) প্রাণীদের ক্ষেত্রে অনেক বেশি অসুবিধা বা অক্ষমতার সৃষ্টি করে।

দৃষ্টি বা বীক্ষণের আলোচনার সময় সাধারণ বিজ্ঞানের অপর এক শাখা শারীরবিজ্ঞানের (Physiology) সাহায্য প্রাসঙ্গিকভাবে এত ঘনঘন নিতে হয়, যার ফলে এই উপশাখাকে শুধুমাত্র পদার্থ বিজ্ঞানে সীমাবদ্ধ না রেখে বৃহত্তরভাবে শারীর বিজ্ঞানীয় দৃষ্টিবিজ্ঞান (Physiological vision) বলাটা বোধহয় আমাদের পক্ষে অধিকতর যুক্তিযুক্ত হবে।

উদ্দেশ্য

এই অধ্যায়ে আমরা চোখ সম্পর্কে নিম্নলিখিত বিষয়গুলি জানতে পারবো।

অন্যসব প্রাণীদের মতো স্তন্যপায়ী জীবের চোখ হোল প্রকৃতির সৃষ্টি এক অত্যাশ্চর্য আলোক যন্ত্র — যা মানুষের তৈরি সব রকম যন্ত্র অপেক্ষা অনেক বেশি জটিল ও বহুমুখী।

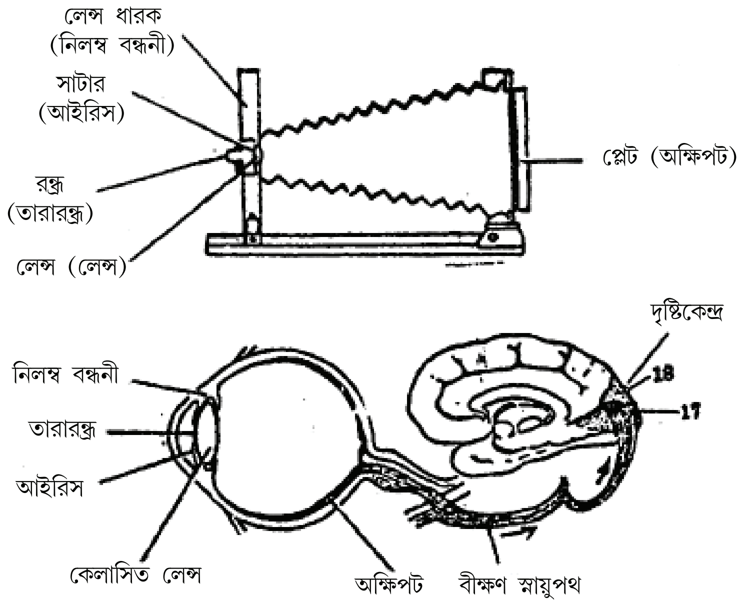
চোখের সামনে কোনো বস্তু থাকলে অক্ষিপটে তার খর্ব, অবশীর্ষ প্রতিবিম্বের সৃষ্টি হয়। বস্তু থেকে নিঃসৃত আলোক রশ্মি অক্ষিপটে শোষিত হয়ে তাপীয়, রাসায়নিক ও তড়িৎশক্তিতে রূপান্তরিত হয় এবং স্নায়ুপ্রবাহের সৃষ্টি করে। সেই স্নায়ু প্রবাহ দর্শন স্নায়ুর মাধ্যমে প্রাণীর পশ্চাদ্ মস্তিষ্কের দৃষ্টি অঞ্চলে প্রেরিত হয়। সেখানে অনুষ্ঠিত কিছু জটিল ক্রিয়া-কলাপের ফলে প্রাণীরা দৃশ্যবস্তুর সমশীর্ষ, খর্ব ও অবিকল প্রতিরূপ দেখতে পায়।

আলোচনার সুবিধার জন্য আমরা এখানে স্তন্যপায়ী শ্রেণীর অন্তর্ভূক্ত সবচেয়ে বুদ্ধিমান জীব মানুষের চোখ নিয়ে আলোচনা করবো। — কারন, মানুষের চোখ সবচেয়ে সুগঠিত এবং তার সম্পর্কে আমাদের অভিজ্ঞতাও প্রচুর। তার চোখের গঠন, সেই চোখে সে কিভাবে দেখে? সেই দেখা আলোকে বা অন্ধকারে কেমন হয়? কিভাবে সে বর্ণবিচার করে? দৃষ্টি-যন্ত্র হিসাবে চোখের ত্রুটিগুলি কি কি? কিভাবে সেই ত্রুটিগুলির প্রতিকার করা হয়? এবং সবশেষে নিম্ন বা অনুন্নত শ্রেণীর প্রাণীদের চোখের গঠনের কথাও এই আলোচনায় থাকবে।

14a.2 ক্যামেরা ও চোখের তুলনা

প্রাণীদের চোখ হোল প্রাকৃতিক স্বয়ংক্রিয় ক্যামেরা বিশেষ। মানুষের তৈরি ক্যামেরা যন্ত্রের সঙ্গে তুলনা করলে দেখা যায় ক্যামেরার মতো চোখেও রয়েছে কেলাসাকার লেন্স ব্যবস্থা। (crystalline lens)

লেন্স ধারকের (lens holder) মতো চোখেও রয়েছে প্রলম্বিত বন্ধনী (suspensory ligaments)। এই বন্ধনী চোখের কেলাসাকার জৈব লেন্সকে দৃঢ়ভাবে ধরে রাখে। চক্ষুমণির (pupil)-র মতো পরিবর্তনযোগ্য রন্ধ্রপথ, সাটারের মতো কণীনিকা (IRIS) এবং ক্যামেরার চিত্রগ্রাহী প্লেটের মতো চোখেও রয়েছে এক ধরনের আলোক সংবেদী পর্দা বা অক্ষিপট (Retina)। এতে রয়েছে পুনঃ পুনঃ ব্যবহারযোগ্য এক অভিনব, প্রাকৃতিক, স্বয়ংক্রিয় পুনর্নবীকরণের ব্যবস্থা যার ফলে একই পটকে বারংবার অবিকৃতভাবে ব্যবহার করা যায়। প্লেট থেকে আলোকচিত্রকে পরিস্ফুট করার জন্য যেমন রাসায়নিক পদার্থ ব্যবহার করা হয়, অক্ষিপটে শোষিত আলোক শক্তির দ্বারা আলোক রাসায়নিক ক্রিয়ায় স্বতঃস্ফূর্তভাবে দৃশ্যবস্তুর প্রতিরূপও তেমনি অক্ষিপটে ফুটে ওঠে।

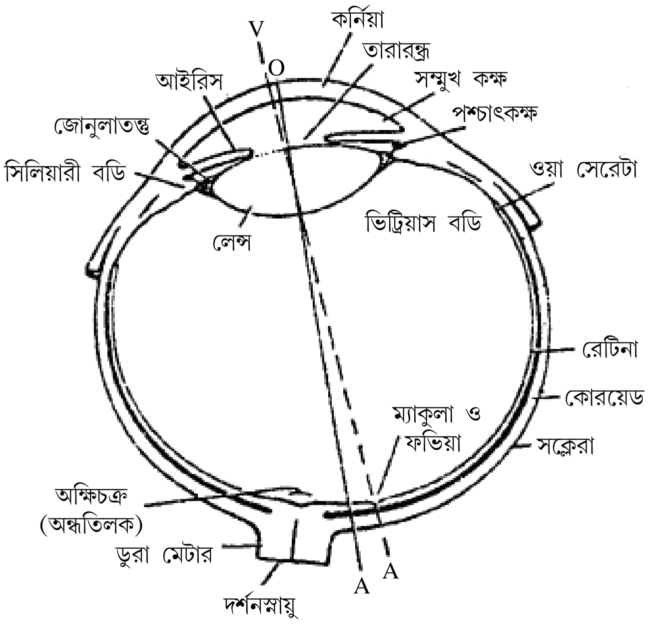


চিত্র 14.1 : প্রস্থচ্ছেদে ক্যামেরা ও মানুষের চোখ।

14a.3 চোখের গঠন (anatomy of eye)

পাশের ছবিতে মানুষের ডান অক্ষিগোলকের প্রায় পূর্ণ আকারের একটি অনুভূমিক ছেদ দেখানো হয়েছে। অক্ষিগোলক (eye ball) হোল প্রায় 1" ব্যাসের গোলকীয় বস্তু। কয়েকটি মাংসপেশির সাহায্যে অক্ষিকোটরের (eye socket) সঙ্গে এটি এমনভাবে আটকানো থাকে যাতে সে বিভিন্ন দিকে সহজেই ঘুরতে পারে। অক্ষিগোলকের প্রাচীর তিনটি সমকেন্দ্রিক স্তরে বিভক্ত 1) সবচেয়ে বাইরে তন্তুময় স্তর শ্বেতমন্ডল (Sclera) , 2) মাঝে রক্তনালিকাযুক্ত স্তর কৃষ্ণমন্ডল (Choroid) এবং 3) সব চোখের ভিতরের স্তর হল অক্ষিপট (Retina)।

(1) শ্বেতমন্ডল (Sclera) হোল অক্ষিগোলকের সর্ব বহিঃস্থ আবরণ। এটি একটি দৃঢ়, অস্বচ্ছ, সাদা পর্দা দিয়ে তৈরি।



চিত্র 14.2 : মানুষের দক্ষিণ চোখের মধ্যরেখা বরাবর ছেদ। VA–বীজণঅক্ষ। OA–আলোকঅক্ষ।

বাইরের আঘাত থেকে চোখের কোমল অংশকে রক্ষা করা হোল এর কাজ।

শ্বেতমন্ডলের সামনের অংশের নাম অচ্ছোদপটল (Cornea)। অচ্ছোদপটলের বেধ (Thickness) প্রায় 0.5 মিমি এবং তার সম্মুখতলের ব্যাসার্ধ প্রায় 7.8 মি.মি.। সাধারণভাবে অক্ষিগোলকের গোলীয় আকৃতি বজায় রাখার জন্য ভিতর থেকে 2 বা 3 সেমি উচ্চ পারদস্তম্ভের চাপের সমান এক আভ্যন্তরীণ চাপের ব্যবস্থা রয়েছে।

(2) **কৃষ্ণমন্ডল** (Choroid) শ্বেতমন্ডলের ভিতরের গায়ে গাঢ় কালো রঙের আস্তরণ হোল কৃষ্ণমন্ডল। এই কালো রঙের জন্য চোখের ভিতরে অবাঞ্ছিত অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন হয় না। এই কৃষ্ণমন্ডলের সামনের অংশ চোখের সামনে এসে মধ্যছিদ্রযুক্ত গোলাকার প্রায় স্বচ্ছ রঙিন পর্দায় রূপান্তরিত হয়। এই রঙিন পর্দাকে বলা হয় চক্ষুতারকা (IRIS) এবং মধ্যছিদ্রকে বলা হয় তারারন্ধ্র (Pupil)। তারারন্ধ্র সহ চক্ষুতারকা অচ্ছোদপটলের ঠিক নিচে থাকে। চক্ষু বা তারা কণীনিকার রং সাধারণত হাল্কা নীল, গাঢ় বাদামী বা কালো রঙের হয়। সাম্প্রতিক গবেষণায় জানা গেছে একজনের বুড়ো আঙ্গুলের টিপছাপ যেমন অপরের টিপছাপের সঙ্গে মেলে না কিংবা একটা জেব্রার গায়ের ডোরা দাগ যেমন অন্য জেব্রার ডোরা দাগের চেয়ে ভিন্ন, ঠিক তেমনি চক্ষুতারার রং, বিস্তৃতি ও গঠন প্রত্যেক মানুষের চোখের এক অনন্য বৈশিষ্ট্য। এতে মেলানিন নামে এক ধরনের রঞ্জক পদার্থ থাকে যার কাজ হোল চক্ষুতারার উপরে পড়া সবটুকু আলোকেই শোষণ করে

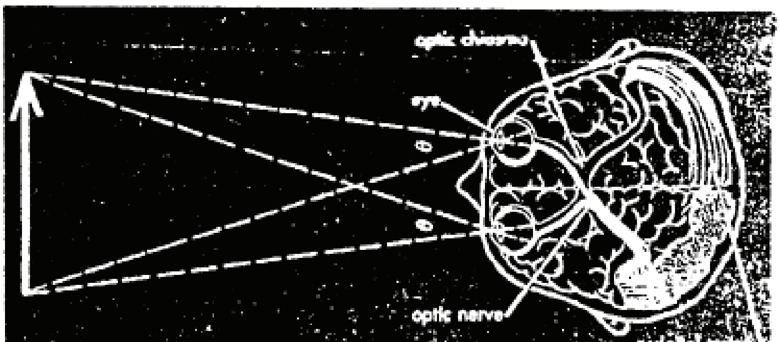


Diagram showing the eyes and visual projection system

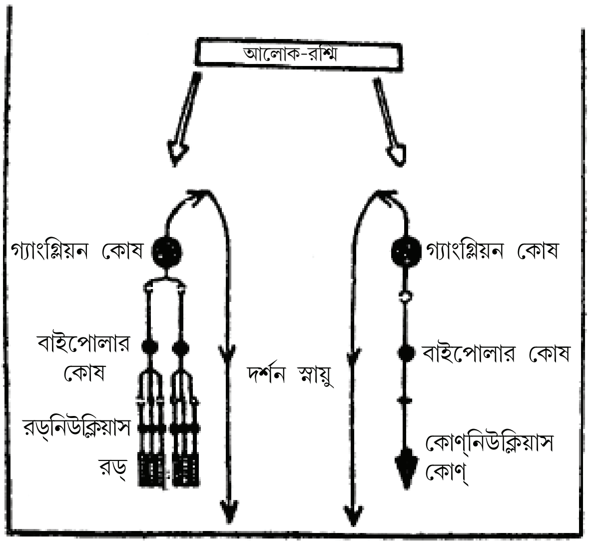
চিত্র 14.3

নেওয়া। ফলে চক্ষুতারার বিস্তৃত অংশ থেকে আপতিত আলোর কোণ প্রতিফলন না হওয়ায় চক্ষুতারার রং এত গাঢ়! চোখে কি পরিমাণ আলো ঢুকবে চক্ষুতারকা স্বয়ংক্রিয়ভাবে তা' নিয়ন্ত্রণ করে। তীব্র আলোকে তারারন্ধ্রের ব্যাস কমে 2 মিলিমিটার হলেও অন্ধকারে বা কম আলোয় বেশি করে আলো নেবার জন্য তা' বেড়ে প্রায় 4 মিমির মতো হয়।

কৃষ্ণমন্ডলের পিছনের অংশের সঙ্গে কিছু অপ্রসারণীয়, প্রলম্বিত সন্ধিবন্ধনী রয়েছে (inelastic suspensory ligamentt) যার সাহায্যে কেলাসাকার (crystalline) চক্ষু লেন্স (eye lens) আটকানো থাকে।

(3) **অক্ষিপট** (Retina)

অক্ষি গোলকের পিছনের অংশে একেবারে ভিতরের দিকে প্রায় সমস্ত জায়গা জুড়ে হাল্কা গোলাপী রঙের আলোকগ্রাহী পর্দা হোল অক্ষিপট। এতে রয়েছে দন্ড (rod) এবং শংকু (cone) নামে দু-রকমের অজস্র আলোকগ্রাহী স্নায়ুপ্রান্ত। সরু সূতার মতো এদের দিয়ে তৈরি এক জটিল নক্সা সারা রেটিনা জুড়ে ছড়িয়ে রয়েছে। দৃশ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব অক্ষিপটেই গঠিত হয়। গোটা অক্ষিপট দশটি স্তরে বিন্যস্ত। অক্ষিপটের ঠিক নিচের স্তরটি হোল কৃষ্ণমন্ডল — এতে রয়েছে অসংখ্য সূক্ষ্মাতিসূক্ষ্ম রক্তজালিকা (blood vessels)। এর পরেই রয়েছে পরপর 7 টি স্নায়ুময় স্তর। বাকি দুটি হোল স্নায়ুময় স্তর এবং কৃষ্ণমন্ডলের সীমা নির্দেশক স্তর। অক্ষিপটে আলোকসুবেদী দন্ড এবং শংকু গ্রাহক কোষের মোট সংখ্যা প্রায় 21 মিলিয়নের মতো।



চিত্র 14.4 : রেটিনাতে নিহিত স্নায়ুউপাদান। আপতিত রশ্মিকে গ্যাংগ্লিয়ন কোষ বাইপোলার কোষের ভর অতিক্রম করে রড ও কোণের গ্রাহক স্তরে পৌছতে হয়।

তারা আলোক সংকেত গ্রহণ করে দর্শন-স্নায়ুসূত্রের (optic nerves) সাহায্যে গুরু মস্তিষ্কের দৃষ্টি অঞ্চলে পাঠায়। দন্ড কোষের আকার লম্বাটে । তার ডগায় রয়েছে রডোপসিন বা ভিসুয়াল পার্পল (visual purple) নামে গাঢ় রক্তবর্ণের এক ধরনের ক্রোমো প্রোটিন। তার উপর আলো পড়লে আলোক রাসায়নিক ক্রিয়ায় রক্তবর্ণের ভিসুয়াল পার্পল ভেঙে বিবর্ণ হতে থাকে, ফলে দর্শন উদ্দীপনার সৃষ্টি হয়। দন্ডকোষ ক্ষীণ আলোক সংবেদী অর্থাৎ ক্ষীণ আলোকে দন্ডকোষ দেখতে সাহায্য করে, তীব্র আলোতে সেগুলি অকর্মণ্য হয়ে পড়ে। অন্যদিকে শংকুকোষ তীব্র আলোতে বস্তুকে দেখতে সাহায্য করে। বস্তুর আকারের খুঁটিনাটি ও রঙ সম্পর্কে সুষ্ঠু ধারণার সৃষ্টি করে। 3

মিলিয়নের মতো শংকুকোষ, প্রায় 18 মিলিয়নের মতো দন্ডকোষ এবং প্রায় 1 মিলিয়নের মতো দর্শন স্নায়ু সূত্র, কিছু কিছু শর্তে পরস্পরের সঙ্গে কাটাকুটি করে এক জটিল বুনুনি দিয়ে সারা অক্ষিপটকে ছেয়ে ফেললেও ক্ষীণ আলোক নিঃসরণকারী কোনো বিস্তৃত উৎস থেকে আলো এসে অক্ষিপটে পড়লে, তখন গোটা পর্দাই একটি সংস্থা হিসাবে কাজ করে তাকে 'দেখতে' থাকে।

অক্ষিপটের মাঝখানে 2 মিলিমিটার ব্যাসের একটি অংশ কিছুটা চাপা, তাকে পীতবিন্দু (Macula বা Yellow Spot) বলে। ম্যাকুলার কেন্দ্রে 0.3 মি.মি. ব্যাস বিশিষ্ট আরও একটি অতি ক্ষুদ্র অংশ রয়েছে তাকে বলা হয় ফোভিয়া সেন্ট্রালিস (Fovea Centralis)। এই অংশটি অক্ষিপটের সর্বাপেক্ষা সুবেদী অংশ ম্যাকুলার সুবেদীতম জায়গা। ম্যাকুলা অঞ্চলে শুধু শংকুকোষই ঘন সন্নিবদ্ধ অবস্থায় রয়েছে। ফোভিয়া থেকে যতদূরে যাওয়া যাবে ততই শংকু কোষের পরিমাণ কমতে থাকবে। পাল্লা দিয়ে বাড়তে শুরু করবে দন্ডকোষ। অবশেষে অক্ষিপটের প্রান্তদেশে শুধুই দন্ডকোষ।

অক্ষিপটের যে জায়গা দিয়ে দর্শন স্নায়ুসূত্রগুচ্ছ চোখের মধ্যে ঢুকেছে, সেখানে দন্ড বা শংকু কোষের কোনোটিই উপস্থিত না থাকায়, ওই জায়গায় আলো পড়লে কোন দর্শনানুভূতি হয় না। সেজন্য এই জায়গাটিকে বলা হয় অন্ধবিন্দু (blind spot)। এই অন্ধবিন্দুর জন্য দৃষ্টিক্ষেত্রের (field of view) অনুভূমিক দিকে প্রায় 6° এবং উল্লম্ব দিকে প্রায় 8° পরিমিত স্থানকে চোখ দেখতে পায় না।

যাতে আপতিত আলোক-রশ্মির পথে কোনরূপ বাধা সৃষ্টি করতে না পারে, সেজন্য টেলিভিশনে ব্যবহৃত আলোক কোষের জটিল বুনুনি (mosaic) থেকে সংযোগ-তার টেলিভিশন যন্ত্রের পিছন দিকে আপতিত আলোক রশ্মির বিপরীতে যায়। চোখের ক্ষেত্রে এর বিপরীত ঘটনাটি ঘটে। আলোক সংবেদী দন্ড ও শংকু কোষের খোলা প্রান্তগুলি আপতিত আলোক রশ্মির দিক বরাবর বাইরে যায়। স্নায়ুসূত্রগুলি এত স্বচ্ছ!

কেলাসাকার চক্ষুলেন্স (crystalline eye lens)

তারারন্ধ্রের (pupil) এর পিছনে অবস্থিত কেলাসাকার চক্ষুলেন্স চোখের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ অংশ। উভোত্তল (bi convex) এই প্রাকৃতিক লেন্সটি জেলির মতো নরম, স্বচ্ছ, সংকোচনশীল তন্তুময় স্তর দিয়ে তৈরি। এর সামনের এবং পিছনের বক্রতলের ব্যাসার্ধ যথাক্রমে 10 মিমি এবং 6 মিমি। অক্ষ বরাবর এটির বেধ প্রায় 3.6 মিমি। রোমশ মাংসপেশি দিয়ে গঠিত পেশিবন্ধনী লেন্সকে একদিকে যেমন অক্ষিগোলকের সঙ্গে দৃঢ়ভাবে আটকে রাখে অপরদিকে প্রয়োজনে লেন্সের বক্রতারও পরিবর্তন ঘটায়। স্তরগুলির প্রতিসরাংক বাইরের দিক থেকে ভিতরের দিকে ক্রমশ বাড়তে বাড়তে একেবারে মাঝখানে 1.42 এ দাঁড়ায়। অর্থাৎ লেন্সের মধ্যাংশ কঠিন হলেও বাইরের দিকে ক্রমশ কোমল হতে থাকে। প্রান্তদেশের চাইতে কেন্দ্রীয় অংশের প্রতিসরণ ক্ষমতা বেশি হওয়ায় লেন্সটিতে গোলীয় অপেরন ত্রুটি (spherical abenation) সংশোধিত হয়। চোখের প্রতিসরণ ক্ষমতা প্রধানত চক্ষু লেন্সের জন্য হলেও (+500), তাতে কর্ণিয়ার অবদানও আছে (+39D)।

জলীয় নেত্ররস (aqueous humour) এবং কাচীয় নেত্ররস (vitreous humour) কর্ণিয়া (অচ্ছোদপটল) ও লেন্সের মধ্যে অবস্থিত তথাকথিত অগ্রকক্ষে (anterior chamber) জলের মত স্বচ্ছ "জলীয় নেত্ররস" রয়েছে, আর লেন্স ও অক্ষিপটের (রেটিনা) মধ্যে অবস্থিত (posterior chamber) পশ্চাদ্‌কক্ষে স্বচ্ছ জেলির মতো "কাচীয় নেত্ররস" রয়েছে। এদের প্রতিসরাংক প্রায় 1.336। এদের কাজ হলো আলোক প্রতিসরণে অংশগ্রহণ করা এবং লেন্সকে যথা সম্ভব সুরক্ষা দেওয়া।

চোখের কর্ণিয়া (অচ্ছোদপটল) জলীয় নেত্ররস, কাচীয় নেত্ররস ও তাদের মাঝখানে থাকা লেন্স একত্রে অভিসারী (convex) লেন্সের মতো কাজ করে।

বীক্ষণ অক্ষ (Visual axis) **ও আলোক অক্ষ** (optic axis)

চক্ষুতারকা ও ফোভিয়া সেন্ট্রালিসের মধ্যবিন্দু সংযোগকারী সরলরেখাকে বীক্ষণ অক্ষ এবং কর্ণিয়া ও অক্ষিলেন্সের কেন্দ্রবিন্দু সংযোজী সরল রেখাকে আলোক অক্ষ বলা হয়। এরা পরস্পর 5° থেকে 7° কোণে ছেদ করে।

কেলাসাকার চক্ষুলেন্সের অসমসত্ত্ব গঠনের জন্য চোখের আলোকতন্ত্র (optical system) বেশ জটিল। যদি এমন কোন লেন্স তৈরি করা হোত যার বাইরের স্তরের প্রতিসরাংক 1.36 থেকে বাড়তে বাড়তে একেবারে মাঝখানে 1.406 এর মতো হোত। এবং কর্ণিয়ার (অচ্ছোদপটল) পরিবর্তে বাতাস ও জলীয় নেত্ররসের মাঝখানে এক প্রতিসরণীয় মাধ্যম ও চক্ষু লেন্সের পরিবর্তে নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যসহ একটি সাধারণ লেন্স-সমন্বয় তৈরি করতে পারলে তা প্রকৃত চোখের সমধর্মী হোত।

মাধ্যম	বক্রতা ব্যাসার্ধ	প্রতিসরাঙ্ক (প্রায়)	ক্ষমতা ডায়োপটার এককে	মন্তব্য
অচ্ছোদপটল	r_1=0.78 cm	1.38	+39	প্রতিসারকতলের প্রতিসরণ ক্ষমতাকে
বা কর্ণিয়া	d_1=0.36 cm			ডায়োপটার (dioptre) এককে প্রকাশ
চক্ষুলেন্স	r_2=1.00 cm	1.413	+50	করাহয়। যে উত্তল লেন্স সমান্তরাল
	r_3=-0.60 cm.			আলোকরশ্মিকে 1 মিটার ফোকাস দূরত্বে
	d_2=0.36 cm			কেন্দ্রীভূত করতে পারে তার প্রতিসরণ
বাতাস	—	1.00	—	ক্ষমতাকে (+)1D বলে
জলীয় নেত্ররস		1.336	– 05	অর্থাৎ 1D = (–) 1
কাচীয় নেত্ররস		1.34	+ 05	মিটারে প্রকাশিত কোন
				লেন্সের ফোকাস দূরত্ব

অক্ষিগোলকের বিভিন্ন প্রতিসরণ ক্ষমতা ভিন্ন ভিন্ন হওয়ার দরুন বর্ণ-অপেরন (chromatic abervation) অংশতঃ সংশোধিত হয়। বর্ণ অপেরণের বাকি অংশটুকু মানুষের মস্তিষ্ক নাকচ করে দেয়।

14.a.4 দ্বিনেত্র দৃষ্টি ও তার সুবিধা (Stereoscopic visions & its advantages)

স্তন্যপায়ী প্রানীদের চোখ হোল একাধারে চেষ্টীয় (motor) এবং সংজ্ঞাবহ (sensory) অঙ্গের সমাহার। অর্থাৎ কোন বস্তুকে দেখতে হলে চোখ সরাসরি তার দিকে ঘুরে যায়। স্তন্যপায়ী প্রাণীদের দুটো চোখ, দুটো দর্শন স্নায়ু, এবং মস্তিষ্কে দুটো দৃষ্টিকেন্দ্র থাকলেও তারা একটি মাত্র বস্তুকে একসঙ্গেই দেখতে পায়। দুটি চোখ ব্যবহার করে কোন প্রাণীর একটিমাত্র বস্তু-দর্শনের ঘটনাকে বলা হয় দ্বিনেত্র দর্শন (binocular vision)

লক্ষ্যবস্তু থেকে নিঃসৃত আলোক রশ্মি দুটি চোখের অক্ষিপটে যে স্নায়ু প্রবাহের সৃষ্টি করে তা' স্বতঃস্ফূর্তভাবে দর্শকের পশ্চাদ্ গুরুমস্তিষ্কে অবস্থিত দৃষ্টিকেন্দ্রে একটিমাত্র প্রতিবিম্বে একীভূত হয়।

এই দ্বিনেত্র দর্শনের প্রাক্ শর্ত হোল

1) দুটো বীক্ষণ ক্ষেত্রকে (field of view) আবশ্যিকভাবে পরস্পরের সঙ্গে মিলিত হতে হবে।
2) উভয় অক্ষিপটেই প্রায় সদৃশ প্রতিবিম্বের সৃষ্টি হতে হবে।
3) উভয় অক্ষিপটেই অনুরূপ বিন্দুর (corresponding points) উপস্থিতি একান্ত বাঞ্ছনীয়।
4) উভয় চোখের অক্ষিপেশির (ocular muscle) এমনভাবে সংকুচিত হওয়া দরকার যাতে দুটো অক্ষিগোলকই নির্দিষ্ট লক্ষ্যবস্তুতে নিবদ্ধ হতে পারে।

উপরের শর্তগুলি পালিত হলে তবেই একমাত্র দর্শকের দ্বিনেত্র দর্শন হয়।

দ্বিনেত্র দর্শনের সুবিধা :

(1) লক্ষ্যবস্তুর সাপেক্ষে দর্শকের দুটি চোখের অবস্থান এক না হওয়ায় তাদের মধ্যে কিছুটা ব্যবধান থাকে। সেজন্য প্রতিবিম্ব দুটি সর্বাংশে অভিন্ন হয় না। কারণ ডান চোখ বস্তুর ডান পাশ এবং বাম চোখ বস্তুর বামপাশ দেখে। ফলে মস্তিষ্কে বিম্বদুটির একীকরণের সময় এক চোখের ত্রুটিকে অপর চোখ সংশোধন করে দেয়।

(2) উভয় চোখের বীক্ষণ ক্ষেত্র একটি চোখের বীক্ষণ ক্ষেত্রের চেয়ে অধিকতর বিস্তৃত হয়।

(3) এ জাতীয় দর্শনের দ্বারা লক্ষ্যবস্তুর আকৃতি, দূরত্ব, ত্রিমাত্রিক গভীরতা, বর্ণ সম্পর্কে সঠিক মূল্যায়ণ করা সম্ভবপর হয়।

14.a.5 উপযোজন (accommodation).

দূরের বা কাজের বস্তুকে অক্ষিপটে ফোকাস করে দৃষ্টি গোচরে আনার ক্ষমতাকে চোখের উপযোজন বলে। এই প্রক্রিয়ায় সিলিয়ারী মাংসপেশির সাহায্যে চক্ষু লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য প্রয়োজনমত পরিবর্তিত হয় এবং অক্ষিপটে লক্ষ্যবস্তুর সদ্‌বিম্ব গঠিত হয়। চশমা হোল উপযোজন প্রক্রিয়ার অন্যতম উপকরণ। উপযোজন ব্যাখ্যা করার সময় আমরা নিচের বিষয়গুলি সম্পর্কে বিশদভাবে জানবো। নিকট বিন্দু (Near Point) চোখকে ক্লান্ত না করে উপযোজনের সাহায্যে কিংবা সাহায্য না নিয়ে নিকটতম যে অবস্থানে কোনো বস্তুকে রাখলে চোখ স্পষ্টভাবে

দেখতে পায়, তাকে নিকট বিন্দু বলে। চোখ থেকে নিকট বিন্দুর দূরত্বকে স্পষ্টদর্শনের ন্যূনতম দূরত্ব (least distance of distinct vision) বলা হয়। এই দূরত্বের পরিমাণ স্বাভাবিক চোখের ক্ষেত্রে 25 cm বা 10 ইঞ্চি।

দূর বিন্দু (Far Point) বিনা উপযোজনে চোখ সর্বাপেক্ষা দূরত্বে যে বিন্দুতে লক্ষ্যবস্তুকে স্পষ্টভাবে দেখতে পায়, চোখ থেকে সেই বিন্দুর দূরত্বই হোল চোখের দূরবিন্দু। সুস্থ চোখের কাছে এই দূর বিন্দু অসীমে অবস্থিত।

দৃষ্টি সীমা (Range of the eye) নিকটবিন্দু থেকে দূরবিন্দু পর্যন্ত দূরত্ব হোল দৃষ্টিসীমা। এই সীমার মধ্যে লক্ষ্যবস্তু যেখানেই থাকুক না কেন স্বাভাবিক চোখ স্বয়ংক্রিয়ভাবে চক্ষুলেন্সের ফোকাস পরিবর্তিত করে তাকে স্পষ্ট দেখতে পায়।

দৃষ্টি ক্ষেত্র (field of view) = যতটুকু জায়গা জুড়ে চোখ অভিনিবেশ সহকারে দেখে, তাই হোল দৃষ্টি ক্ষেত্র।

14.a.6 অভিযোজন (adaptation)

কোনো বস্তুকে দেখবার সময় মানুষ নিজের অজ্ঞাতসারে স্বয়ংক্রিয়ভাবে চক্ষুছিদ্রের ব্যাস ক্ষীণ বা তীব্র আলোকে যথাক্রমে বড় বা ছোট করে প্রয়োজনমত চোখের ভিতরে বেশি বা কম আলো প্রবেশ করায়। চোখের এই ধরনের সহজাত ক্ষমতাকে অভিযোজন বলা হয়। চোখের পাতা বাঁচিয়ে চোখের খুব কাছে একটা মোমবাতির শিখা নিয়ে গেলে, কিংবা দূরে সরিয়ে নিয়ে গেলে চোখের ছিদ্র কেমন ছোট বা বড় হয়ে যায় পাঠক তা নিজে করে দেখতে পারেন।

14.a.7 চোখের ত্রুটি ও তার প্রতিকার (Defects of vision and its rectification)

স্বাভাবিক চোখের দৃষ্টিসীমা 25 cm থেকে অসীম পর্যন্ত বিস্তৃত। যদি কোনো চোখের দৃষ্টি-সীমা এর থেকে কম হয়, তবে সেই চোখকে ত্রুটিযুক্ত হিসাবে গণ্য করা হবে।

এই ত্রুটি প্রধানত:

(1) স্বল্প দৃষ্টি (myopia)

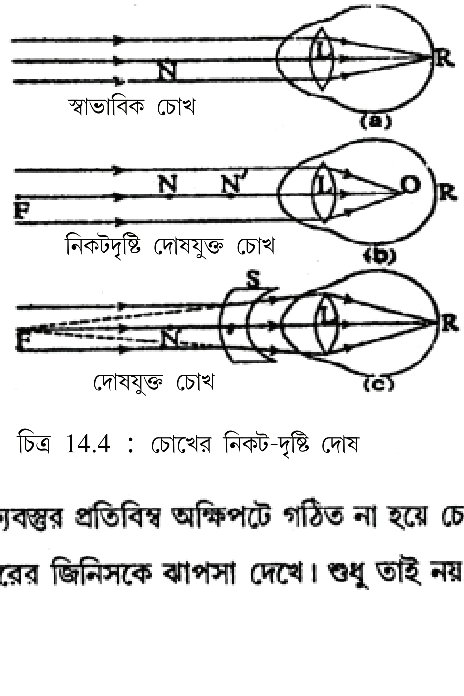
(2) দীর্ঘ দৃষ্টি (hypermetropia)

(3) ক্ষীণ দৃষ্টি (presybopia)

(4) বিষম দৃষ্টি (astigmatism)

(5) ছানি (cataract)

(6) অচ্ছোদ স্ফীতি (keratoconus)



চিত্র 14.4 : চোখের নিকট-দৃষ্টি দোষ

হ্রস্বদৃষ্টি : হ্রস্বদৃষ্টি সম্পন্ন চোখের ক্ষেত্রে অসীমে অবস্থিত লক্ষ্যবস্তুর প্রতিবিম্ব অক্ষিপটে গঠিত না হয়ে চোখ থেকে সীমিত দূরত্বে গঠিত হয় ফলে এই ধরনের ত্রুটিযুক্ত চোখ দূরের জিনিসকে ঝাপসা দেখে। শুধু তাই নয়, চোখের

নিকট বিন্দুর দূরত্বও স্বাভাবিকের চেয়ে কম হয়।

ক্রুটির কারণ : (1) কোনো কারণে অক্ষিগোলকের আকার স্বাভাবিকের চেয়ে বেড়ে গেলে বা

(2) চক্ষু লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য স্বাভাবিকের চেয়ে কম হলে অথবা

দুইই হলে, এই ধরনের ত্রুটি চোখে দেখা যায়।

প্রতিকার : অসীমে অবস্থিত লক্ষ্যবস্তু থেকে আগত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ ত্রুটিযুক্ত চক্ষুলেন্সের দ্বারা প্রতিসৃত হয়ে অক্ষিপটের সামনে P বিন্দুতে প্রতিবিম্ব গঠন করে। এই ত্রুটি দূর করতে হলে চোখের সামনে উপযুক্ত ফোকাস দৈর্ঘ্যের অবতল লেন্স L_1 রাখা দরকার। এক্ষেত্রে লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য ত্রুটিযুক্ত চোখের দূরবিন্দুর সমান হওয়া উচিত। তখন দূরাগত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ লেন্সের দ্বারা প্রতিসরণের পর F বিন্দু থেকে আসছে বলে মনে হবে। F বিন্দুটি চোখের দূরবিন্দু বলে চক্ষু লেন্সে প্রতিসরণের পর প্রতিবিম্ব অক্ষিপটেই গঠিত হবে।

গণনা

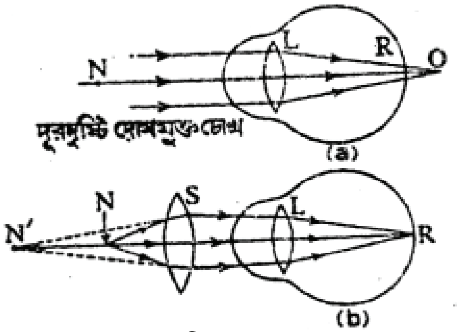
ধরি d = চোখ থেকে দূরবিন্দুর দূরত্ব=বিম্ব দূরত্ব (v)

$f = L_1$ অবতল লেন্সের ফোকাস দূরত্ব।

এক্ষেত্রে বস্তু দূরত্ব $u=\alpha$

লেন্স সমীকরণ প্রয়োগ করে

$$\therefore \frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{d}-\frac{1}{\alpha}=\frac{1}{d} \quad \therefore f = d$$



চিত্র 14.6

∴ অবতল লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য চোখের দূরবিন্দুর দূরত্ব।

দীর্ঘদৃষ্টি : বিভিন্ন কারণে কোনো কোনো দর্শকের অক্ষিগোলকের আকার ছোট হয়ে যায় বা চক্ষুলেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য বেড়ে যায়, ফলে ওই দর্শক দূরের বস্তু দেখতে পেলেও, কাছের বস্তুকে ভালো দেখতে পায় না। চোখের এই ত্রুটিকে বলা হয় **দীর্ঘদৃষ্টি**। এই ত্রুটির জন্য ত্রুটিযুক্ত চোখের নিকটবিন্দু স্পষ্ট দর্শনের ন্যূনতম দূরত্ব 25 সেমির অপেক্ষা বেশি দূরত্বে থাকবে। এই ত্রুটি থেকে প্রতিকারের জন্য চোখের সামনে উপযুক্ত ফোকাস দৈর্ঘ্যের **উত্তল লেন্স** রাখতে হবে।

প্রতিকার ঃ ধরা যাক N বিন্দু স্বাভাবিক সুস্থ চোখের নিকট বিন্দু। দীর্ঘদৃষ্টি ত্রুটির জন্য N বিন্দুতে অবস্থিত কোনো বস্তুর প্রতিবিম্ব অক্ষিপটে গঠিত না হয়ে তার পিছনে গঠিত হবে। তাই N বিন্দুতে অবস্থিত বস্তুকে দীর্ঘদৃষ্টি ত্রুটিযুক্ত চোখ ঝাপসা দেখবে। এক্ষেত্রে নিকট বিন্দু N এ না থেকে N' বিন্দুতে থাকে।

উপযুক্ত ফোকাস দৈর্ঘ্যের একটি উত্তল লেন্স এই ধরনের ত্রুটিযুক্ত চোখের সামনে রাখলে N বিন্দু থেকে আগত রশ্মিগুচ্ছ উত্তল লেন্সে প্রতিসরণের পর N' বিন্দু থেকে আসছে বলে মনে হবে এবং প্রতিবিম্ব অক্ষিপটে

গঠিত হবে। সুতরাং N বস্তু-বিন্দু হলে পরিবর্তিত ক্ষেত্রে N' বিন্দু হবে উত্তল লেন্স দ্বারা গঠিত অসদ্‌বিম্ব।

গণনা

যদি D = সুস্থ চোখের স্পষ্ট দর্শনের ন্যূনতম দূরত্ব হয়

এবং d = ত্রুটিপূর্ণ চোখের স্পষ্ট দর্শনের ন্যূনতম দূরত্ব হয়

এবং f = ব্যবহৃত উত্তল লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য হয়

তবে লেন্স সমীকরণ প্রয়োগ করে লিখতে পারি

$$\frac{1}{d}-\frac{1}{D}=\frac{1}{f} \quad \therefore \quad \frac{1}{f}=\frac{1}{d}-\frac{1}{25} \text{ বা } f=\left(\frac{25d}{25-d}\right) \text{ একক}$$

যেহেতু $d>25$, সুতরাং f ঋনাত্মক। তাই এই ত্রুটির জন্য উপযুক্ত f দৈর্ঘের **উত্তল-লেন্স** ব্যবহার করতে হবে।

ক্ষীণদৃষ্টি বা চালশে (Presybopia)

বয়স বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে চোখের মাংসপেশি শিথিল হয় এবং অক্ষিলেন্সও শক্ত হয়ে যায়। ফলে বয়স্ক চোখের স্বাভাবিক উপযোজন ক্ষমতা কমে যায়। তখন স্পষ্ট দর্শনের ন্যূনতম দূরত্বের পরিমাণ বেড়ে যায়। সুতরাং এই ত্রুটি দীর্ঘ দৃষ্টি ত্রুটির অনুরূপ। ক্ষীণ দৃষ্টি সম্পন্ন চোখ বিনা শ্রান্তিতে দূরের জিনিস অপেক্ষাকৃত ভালো দেখলেও, কাছের জিনিস ভালো দেখে না।

প্রতিকার : এক্ষেত্রে উপযুক্ত ফোকাস দৈর্ঘ্যের **বাই ফোকাল লেন্স** ব্যবহার করতে হয়। **বাই ফোকাল লেন্সের** চশমায়, চশমার গোলাকার ফ্রেমের দুই অর্ধে দু ধরনের লেন্স আটকানো থাকে — দূরের জিনিস দেখবার জন্য চশমার উপরের অংশ **অবতল-লেন্স** এবং কাছের জিনিস দেখবার জন্য চশমার নিচের অংশে **উত্তল লেন্স** ব্যবহার করা হয়।

বিষমদৃষ্টি বা নকুলান্ধতা (Astigmatism)

এই ধরনের ত্রুটিযুক্ত চোখ কোনো নির্দিষ্ট সমতলে রাখা দৃশ্যবস্তুর অনুভূমিক এবং উল্লম্বরেখা বা অংশকে একই সঙ্গে স্পষ্টভাবে দেখতে পায় না, কর্ণিয়ার (অচ্ছোদপটলের) কোনো এক তলের বক্রতা অন্য তলের তুলনায় বেশি হলে এই ধরনের ত্রুটি দেখা যায়।

প্রতিকার : দৃষ্টির এই ত্রুটি দূর করার জন্য চশমা হিসেবে এমন এক ধরনের লেন্স ব্যবহার করতে হয় যার একদিকের বক্রতা তার অভিলম্ব দিকের বক্রতার অপেক্ষা বেশি। টরিক লেন্সে (toric) এই ধরনের কৌশল ব্যবহার করে চশমায় লাগানো হয়। এই লেন্সের একটা পিঠ গোলীয় এবং অপর পিঠটি চোঙাকৃতি (cylindrical)।

ছানি (Cataract)

ক্যাটারাক্ট শব্দটির অর্থ হোল জলপ্রপাত। জলপ্রপাতের একদিকে দাঁড়িয়ে কোনো দর্শক তার বিপরীত পাশের দৃশ্যাবলী যেমন অস্পষ্ট দেখে, বয়স বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে জলীয় নেত্ররসের দ্বারা সরবরাহ করা জৈবিক পুষ্টির অভাবে চোখের লেন্স অস্বচ্ছ হয়ে পড়ে। যে স্বচ্ছ **তন্তুময়** স্তর দিয়ে চোখের লেন্স তৈরি সেই স্তরগুলি অস্বচ্ছ হয়ে পড়লে কোনো জিনিসকেই তখন স্পষ্ট দেখা যায় না। একমাত্র **শল্য চিকিৎসার** দ্বারা এ ধরনের ত্রুটি দূর করা সম্ভব।

কর্ণিয়া বা অচ্ছোদপটলের ত্রুটি

কর্ণিয়া বাইরের আঘাত, রাসায়নিক বিক্রিয়া বা অন্য কোনো কারণে ক্ষতিগ্রস্ত হলে, শল্য চিকিৎসার দ্বারা অসুস্থ কর্ণিয়ার পরিবর্তে প্রতিস্থাপন পদ্ধতিতে সুস্থ কর্ণিয়া বসিয়ে এই ধরনের ত্রুটি দূর করা যায়।

অচ্ছোদস্ফীতি বা কেরাটোকোনাস

ক্ষত বা জন্মগত কোনো ত্রুটি থেকে কর্ণিয়া বা অচ্ছোদপটলের তন্তুগুলি দুর্বল হয়ে পড়ে। অক্ষিগোলকের (eye ball) অভ্যন্তরীণ চাপের ফলে কোনো কোনো অংশ সামনের দিকে ঠেলে বেরিয়ে আসে। সাধারণভাবে কর্ণিয়ার প্রতিসরণ ক্ষমতা যেখানে 39D এর মতো, সেখানে এই অবস্থায় তা বেড়ে 60 এমন কি 100D হয়ে যায়। ফলে অক্ষিপটে বা রেটিনায় প্রতিবিম্ব নির্মাণ সম্পূর্ণভাবে ব্যাহত হয়। এই ত্রুটিসম্পন্ন চোখ দৃশ্যবস্তুকে খুবই ঝাপসা দেখে।

প্রতিকার : এ ধরনের চোখে অস্ত্রোপচারের সাহায্যে বা কনট্যাক্ট বা সংলগ্ন লেন্স প্রতিস্থাপন করে এ ধরনের ত্রুটি দূর করা সম্ভব।

চশমা কি বীক্ষণ যন্ত্র ? (Optical instrument)

যে সকল বস্তু বা যন্ত্রের সাহায্যে দেখার ব্যাপারে চোখকে সাহায্য করা হয় তারাই বীক্ষণ যন্ত্র। সে দিক দিয়ে বিচার করলে চশমা বস্তুতই বীক্ষণ যন্ত্র।

14a.8 উদাহরণ

একজন দীর্ঘদৃষ্টি বিশিষ্ট দর্শক 40 cm অপেক্ষা নিকটের লেখা পড়তে পারে না। সে 25 cm দূর থেকে পড়তে চাইলে তার চশমার কাচের ক্ষমতা (power) কত হওয়া উচিত।

এক্ষেত্রে লেন্স ফর্মুলায় ব্যবহৃত চিহ্ন সমূহের প্রচলিত অর্থ ধরে

বিম্ব দূরত্ব v=40cm , বস্তু দূরত্ব u=25cm, ফোকাস দূরত্ব f হলে

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{40}-\frac{1}{25}=\frac{5-8}{200}=\frac{-3}{200}$$

$\therefore\ f = \frac{-200}{3}$ ক্ষমতা $(P) = -\frac{100}{f} = \frac{100x3}{200} = \frac{3}{2} = 1.5D$

এখানে লেন্সটি উত্তল এবং লেন্সের ক্ষমতা ধনাত্মক (+)

(2) কোনো ছাত্রের দৃষ্টিশক্তি ত্রুটিপূর্ণ বলে সে 50cm দূরবর্তী কোনো বস্তুকে সঠিক দেখতে পায় না। কী ধরনের লেন্স ব্যবহার করলে সে দূরের বস্তু স্পষ্ট দেখবে? সেই লেন্সের ক্ষমতা কত ?

আগের সমস্যার মতোই, এক্ষেত্রে $u = \propto$ (অসীম), $v = 50m\ f=?$

লেন্স ফর্মুলায় এই মান বসিয়ে

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u} \text{ বা } \frac{1}{f} = \frac{1}{50} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{50} - D = \frac{1}{50}\ cm$$

$\therefore\ f = +50\ cm$

ফোকাস দৈর্ঘ্য ধনাত্মক বলে ব্যবহৃত লেন্স অবতল, লেন্সের ক্ষমতা ঋনাত্মক (–)। কারণ

$$P = -\frac{100}{f} = -\frac{100}{50} = -2D$$

(3) কোন ব্যক্তির স্পষ্ট দর্শনের ন্যূনতম দূরত্ব (নিকট বিন্দু) 8ft. 16 ইইতে দূরে রাখা কোনো বই পড়তে হলে কী ধরনের লেন্সের প্রয়োজন ?

এক্ষেত্রে লোকটির দীর্ঘ-দৃষ্টি জনিত ত্রুটি আছে। $u = 16$ ইইতে

$v = 8ft = (8x12)$ ইইতে $= 96$ ইইতে,

লেন্স ফর্মুলায় মান বসিয়ে পাই $\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$ $\therefore\ \frac{1}{f} = \frac{1}{96} - \frac{1}{16} = \frac{-5}{46}$

$\therefore\ f = -19.2$ ইইতে

ফোকাস দৈর্ঘ্য ঋনাত্মক হওয়ায় এক্ষেত্রে উত্তল লেন্সের ব্যবহার করতে হবে।

(4) কোনো লোক 50 cm ফোকাস দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট অবতল লেন্সের চশমা ব্যবহার করে 25cm দূরে রাখা বই পড়তে পারেন। চশমা ছাড়া বইটি পড়তে হলে তাঁকে বইটি কত দূরে রাখতে হবে?

প্রশ্নানুসারে $u = 25\ cm,\ f = 50\ cm$ লেন্সের সমীকরণ অনুযায়ী

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

$$\therefore \quad v = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{1}{50}} = \frac{50}{3} = 16.67\text{cm}$$

সুতরাং বইটিকে 16.67 cm দূরে রাখা উচিত।

(5) $\frac{f}{2.8}$ সংখ্যার একটি লেন্সের ফোকাস দৈর্ঘ্য (focal length) ৪ cm হলে তার উন্মেষের (apperture) ব্যাস কত? এই অবস্থায় আলোক প্রক্ষেপ বা আলোকসম্পাত (exposure) কাল 0.005 second হলে $\frac{f}{5.6}$ অবস্থায় আলোক প্রক্ষেপ কাল কত ?

লেন্সের ব্যাস $d = \frac{f}{2.8} = \frac{8}{2.8} = 2.86$ cm

এখন, আমরা জানি আলোক প্রক্ষেপকাল $t \alpha \frac{1}{\left(\frac{f}{n}\right)^2}$

$$\therefore \quad t = \frac{k \cdot}{\left(\frac{f}{n}\right)^2} \qquad k = \text{একটি ধ্রুবক}$$

$$\therefore \quad \frac{f}{5} \qquad \text{.............. (I)}$$

$\frac{f}{5.6}$ অনুপাতের ক্ষেত্রে আলোক প্রক্ষেপকাল t_1 sec হলে

$$t_1 = \frac{k}{\left(\frac{f}{5.6}\right)^2} \qquad \text{.............. (II)}$$

সমীকরণ (I) এবং (II) থেকে $200xt_1 = \left(\frac{5.6}{2.8}\right)^2 = 4$

আলোক প্রক্ষেপ তথা আলোক সম্পাত কাল $\therefore \; t = \frac{4}{200} = 0.02$ sec

14a.9 সারাংশ

মানুষের চোখ প্রকৃতির সৃষ্ট এক অত্যাশ্চর্য আলোক যন্ত্র। এই যন্ত্রের সাহায্যে শুধু উন্নত শ্রেণীর প্রাণীরা নয়, উপরন্তু নিম্ন শ্রেণীর প্রাণীরাও নিজের চারপাশের জিনিস দেখে পরিবেশ সম্পর্কে ধারণা গড়ে তোলে। সকলের চোখ যে মানুষের মতো সুগঠিত তা নয়, নিম্নশ্রেণীর প্রাণীদের কারুর কারুর বিন্দু বা দাগের মতোও দর্শনেন্দ্রিয় আছে।

চোখের সম্মুখে কোনো বস্তু থাকলে অক্ষিপটে দৃশ্যবস্তুর প্রতিরূপের সৃষ্টি হয়।

যে ক্ষমতার জন্য বিভিন্ন দূরত্বে অবস্থিত বস্তুকে স্বয়ংক্রিয়ভাবে ফোকাসের পরিবর্তন করে চোখ দেখে, সেই ক্ষমতাকে চোখের অভিযোজন বলে।

আবার যে পদ্ধতিতে ত্রুটিপূর্ণ চোখ যন্ত্রের সাহায্য নিয়ে দূরের বা কাছের জিনিস দেখতে পায়, তাকে চোখের উপযোজন বলে। চোখের ত্রুটি নানা প্রকার (1) হ্রস্ব দৃষ্টি (2) দীর্ঘ দৃষ্টি (3) চালশে বা ক্ষীণ দৃষ্টি (4) বিষম দৃষ্টি। এছাড়াও কর্ণিয়া সংক্রান্ত ত্রুটি চোখে দেখতে পাওয়া যায়।

স্বাভাবিক চোখ বিনা শ্রান্তিতে ও বিনা উপযোজনে সর্বাপেক্ষা কাছে 25cm দূরে আর সবচেয়ে দূরে অসীমে থাকা বস্তুকে দেখতে পায়।

এ দুটি বিন্দুকে স্বাভাবিক চোখের ক্ষেত্রে যথাক্রমে নিকটবিন্দু ও দূরবিন্দু বলে।

14a.10 প্রশ্নাবলি

(1) বীক্ষণ বা দৃষ্টি কি? কোন যন্ত্রের সাহায্যে তা নিষ্পন্ন হয় ?

(2) চোখ কেমন করে দেখে? নিকট ও দূর বিন্দু কি? স্বাভাবিক চোখের দৃষ্টিসীমা কত ?

(3) চোখের সঙ্গে ক্যামেরা তুলনা করলে কোন কোন বিষয়ে ক্যামেরার চেয়ে চোখকে বেশি বা কম দক্ষ বলে মনে হয়?

(4) চোখের বিভিন্ন অংশ ও তাদের কাজ সম্পর্কে যা জানেন তার ভিত্তিতে অক্ষিপটের গঠন এবং তার কাজে তাদের ভূমিকা সম্বন্ধে আলোচনা করুন।

(5) চোখের ত্রুটিগুলি কি কি? কিভাবে এই ত্রুটিগুলির প্রতিকার করা যায়?

(6) $\frac{f}{5}$ বলতে কি বোঝেন? আলোকসম্পাতকালের সঙ্গে এই অনুপাতের কি সম্পর্ক?

14b.1 অভিযোজন ক্ষমতা (Adaptability)

আগের অধ্যায়ে বলা হয়েছে চোখের সিলিয়ারি পেশির সহজাত ক্ষমতার সাহায্যে চক্ষুরন্ধ্রের ব্যাস এবং কেলাসাকার

অক্ষিলেন্সের আকৃতি এমনভাবে পরিবর্তিত হয়, যার ফলে অতিরিক্ত অন্য কোনো সাহায্য ছাড়াই **পরিমিত আলোকে, যে কোনো দূরত্বে** অবস্থিত (নিকটবিন্দু 25 সেমি থেকে দূরবিন্দু অসীম দূরত্বের মধ্যে) বস্তুর প্রতিবিম্ব স্বতঃস্ফূর্তভাবে অক্ষিপটেই গঠিত হয়। চোখের এই বিশেষ ক্ষমতাকে **অভিযোজন ক্ষমতা** বলে।

বেড়াল বা নিশাচর প্রাণীর চোখ এমন বিশিষ্টভাবে তৈরি যাতে তারা ন্যূনতম আলোতে বা অন্ধকারে যে কোনো বস্তুকে সহজে দেখতে পায়। এ ধরনের দৃষ্টিকে বলা হয় অন্ধকার বীক্ষণ (Scotopic vision বা dark vision)। আবার মেঠো কাঠবিড়ালী কিংবা পায়রার মতো জীবেরা প্রখর দিনের আলোয় ভালো দেখতে পায়। তাদের এ ধরনের দৃষ্টিকে বলা হয় আলোক বীক্ষণ (Light vision বা Photopic vision)। আলোক বীক্ষণে কোনো বস্তুকে দেখার জন্য চোখের যেমন প্রচুর আলোর প্রয়োজন হয়, তেমনি এই ধরনের বীক্ষণে লক্ষ্যবস্তুর আকার, রং, জ্যামিতিক গঠনের পরিপাট্য এবং তার অবস্থান সম্পর্কে সঠিক অনুভূতি জন্মায়। সৌভাগ্যক্রমে মানুষের চোখের ক্ষেত্রে এরকম দুধরণের বীক্ষণই দেখা যায়। তবে সেক্ষেত্রে কোনো এক নির্দিষ্ট উদ্দীপনা সবসময় একই ধরনের অনুভূতির সৃষ্টি করে না। যেমন, ধরা যাক অন্ধকার থেকে কোনো লোক হঠাৎ মধ্যমমাত্রায় বা ক্ষীণ আলোকে আলোকিত ঘরের মধ্যে ঢুকে পড়লে, তার কাছে সেই ঘরের উজ্জ্বলতা অত্যন্ত তীব্র বলে মনে হবে। আবার সেই ঘর থেকে বেরিয়ে সে যদি তীব্রতর আলোকে আলোকিত অন্য এক ঘরে ঢুকে পড়ে, তবে তার কাছে পূর্বের আলোকিত ঘরটি বেশ অনুজ্জ্বল বলে মনে হবে।

অবশ্য কিছু সময় বাদে এই উজ্জ্বলতা ও অনুজ্জ্বলতার ভেদরেখা ধীরে ধীরে অদৃশ্য হয়ে যায়। এই ঘটনাকে আমরা এই বলে ব্যাখা করি দর্শকটির চোখ সেই উজ্জ্বলতার মাত্রায় অভ্যস্ত বা সহিষ্ণু হয়ে উঠেছে। এই ধরনের অভ্যস্ততা বা সহিষ্ণুতাকে (adaptation) আমরা দু'ভাগে ভাগ করতে পারি —

(1) আলোক সহিষ্ণুতা (Photopic adaptation)

(2) আঁধার সহিষ্ণুতা (Dark or scotopic adaptation)

নিচের তালিকা থেকে মানুষদের এরকম দু'ধরণের দৃষ্টি বা বীক্ষণের প্রধান প্রধান তুলনামূলক বৈশিষ্ট্যগুলির ওপর একবার চোখ বুলিয়ে নেওয়া যাক —

বৈশিষ্ট্য	আঁধার বীক্ষণের জন্য	আলোক বীক্ষণের জন্য
আলোক রাসায়নিক বস্তু হিসাবে (Photo Chemical Substance)	দন্ড কোষের রডোপসিন নামক গাঢ় লাল রঙের ক্রোমো প্রোটিন।	শংকু কোষের আয়োড্‌পসিন নামক রঞ্জক পদার্থ।
গ্রাহক কোষ (Receptor Cells)	দন্ড কোষ (Rod Receptor Cells)	শংকু কোষ (Cone Receptor Cells)
অভ্যস্ততা বা সহিষ্ণুতার দ্রুতি (Speed of adaptation)	ধীরে (30 মিনিট বা তারও বেশি সময় পরে) সহিষ্ণুতা সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়	দ্রুত (8 মিনিট বা তারও কম) সময়ে সহিষ্ণুতা সর্বোচ্চ মানে পৌঁছে যায়।

বৈশিষ্ট্য	আঁধার বীক্ষণের জন্য	আলোক বীক্ষণের জন্য
বর্ণ বিভেদন করার ক্ষমতা (Colour discrimination)	নেই	রয়েছে
অক্ষিপটে অংশগ্রহণকারী অঞ্চল (Region of Retina)	প্রান্তীয় অঞ্চল যেখানে দন্ডকোষে সংখ্যাধিক্য	কেন্দ্রীয় অঞ্চল যেখানে শংকু কোষের ঘনত্ব সর্বাপেক্ষা বেশি
স্থানিক পরিমাণ (Spacial Summation)	অধিক	স্বল্প
বীক্ষণ সূক্ষ্মতা (Visual acuity)	নিম্ন মানের	উচ্চ মানের
প্রতি চোখে গ্রাহক কোষের সংখ্যা (Number of Receptors)	120,000,000	7,000,000
মস্তিষ্কের অংশগ্রহণ (Cortical representation)	কম	বেশি
বর্ণালী সংবেদনশীলতার সর্বোচ্চমান (Spectral Sensitivity Peak)	505mμ বর্ণালীর নীল অঞ্চলে	553mμ বর্ণালীর হলুদ অঞ্চলে

বর্ণ	তরঙ্গ দৈর্ঘ্য	বর্ণ	তরঙ্গ দৈর্ঘ্য
লাল	6800Å= 6800×10^{-8} cm	কমলা	6300Å
হলুদ	5800Å	সবুজ	5300Å
নীল	4800Å	বেগুনী	4300Å

14b.2 আঁধার বীক্ষণ (Scotopic vision)

আঁধার বীক্ষণ হোল অন্ধকারে বা ক্ষীণ আলোকে চোখের দেখার ক্ষমতা। অক্ষিপটের দন্ড-গ্রাহক কোষ এই ধরনের বীক্ষণে প্রধান ভূমিকা পালন করে। দন্ড গ্রাহক কোষের বাইরের অংশে রডোপসিন বা ভিসুয়াল পার্পল (visual purple) নামে এক ধরনের গাঢ় লালরঙের আলোক সুবেদী ক্রোমোপ্রোটিন থাকে। অক্ষিপটে তীব্র আলো পড়লে, তারা আলোক রাসায়নিক বিক্রিয়ায় দ্রুত বিয়োজিত হয়ে বিবর্ণ হতে থাকে। সেজন্য দিনের বেলায় আঁধার-বীক্ষণ ব্যবস্থা কার্যত ''অন্ধ'' বা অকর্মণ্য হয়ে পড়ে। অন্ধকারে অক্ষিপটে অবস্থিত অসংখ্য রক্তজালক রক্তের মাধ্যমে ভিটামিন A বহন করে আনলেও সেখানে, রডোপসিনের পুনঃসৃজন প্রক্রিয়া দ্রুততর হয় এবং পুনর্গঠিত রডোপসিনের ঘনত্ব বাড়তে থাকে। তাদের বর্দ্ধিত ঘনত্বের সঙ্গে সঙ্গে আঁধার-বীক্ষণের উদ্দীপনাও বাড়তে থাকে। এইভাবে অক্ষিপটে রডোপ্সিনের পুনঃসৃজন এবং আপতিত আলোকে তাদের রাসায়নিক বিয়োজন — এই দুয়ের ভিতর যতক্ষণ না সমতা আসে ততক্ষণ পর্যন্ত আঁধার-বীক্ষণের সুবেদিতা বাড়তে থাকে। দিনের আলোতে রক্তের দ্বারা অক্ষিপটে ভিটামিন A বাহিত হলেও, বিয়োজনের তুলনায় পুনঃসৃজন ক্রিয়া এত ধীর গতিতে হয় যে যার জন্য সে সময় আঁধার বীক্ষণের জন্য প্রয়োজনীয় পরিমাণে রডোপসিন তৈরি হয় না ফলে দিনের তীব্র আলোতে আঁধার বীক্ষণ হয় না।

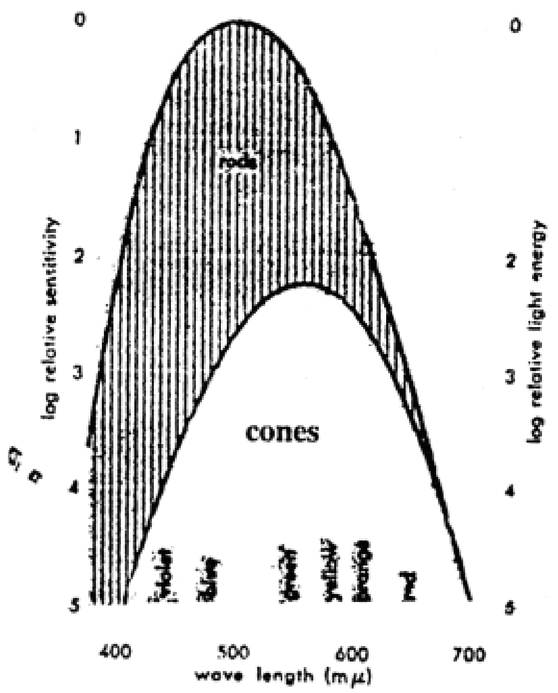


Fig. 14.7 Spectral sensitivity curves for human vision. The rod curve shows that scotopic vision, based on rhodopsin, is most sensitive to light of about 505 mμ. The cone curve shows that photopic vision is generally less sensitive than scotopic vision, except for light at the red end of the spectrum.

অক্ষিপটে দন্ড গ্রাহক কোষের পর্যাপ্ত অনুপস্থিতি এবং খাদ্যে ভিটামিন A - র স্বল্পতা ''রাতকানা'' রোগের জন্য দায়ী। এই দুর্লভ রোগের রোগীরা তীব্র কৃত্রিম আলো ছাড়া রাতে ভালো দেখতে পায় না বা চলাচল করতে

পারে না। পাশের লেখচিত্রটিতে কিভাবে আপতিত আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সঙ্গে আঁধারবীক্ষণ উদ্দীপনার পরিবর্তন ঘটে তা দেখানো হয়েছে।

আপতিত আলোক উদ্দীপনার বিভিন্ন মাত্রার সঙ্গে সঙ্গতি রেখে চোখের আঁধার সহিষ্ণুতার অসংখ্য স্তর রয়েছে। আলোকিত জায়গা থেকে অন্ধকার জায়গায় হঠাৎ ঢুকে পড়লে দর্শকের প্রাথমিক অবস্থা হল কিছুই দেখতে না পাওয়া।

যতই অন্ধকারে তার চোখ অভ্যস্ত হয়ে উঠতে থাকে, ততই তার আঁধার বীক্ষণ ব্যবস্থা গড়ে উঠতে থাকে। ঘরের ভিতরে থাকা জিনিসপত্রগুলি প্রাথমিকভাবে অদৃশ্য থাকলেও, সেগুলির অবয়ব তার চোখের সামনে ধীরে ধীরে ফুটে উঠতে থাকে। আঁধার বীক্ষণে দর্শক কোনো রং দেখতে পায় না। দন্ডকোষ সংবেদী লেখচিত্রটির সর্বোচ্চ শীর্ষ 505 mμ

তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে রয়েছে অর্থাৎ নীল আলোতে আঁধার বীক্ষণ সবচেয়ে ভালোভাবে কাজ করে। "তাই রাতের বেলায় সব বেড়ালই ধূসর" এই প্রবাদ বাক্যটি আঁধার বীক্ষণের ক্ষেত্রে খুবই প্রযোজ্য (IN THE NIGHT ALL CATS APPEAR GRAY) । এবার আমরা তীব্র আলোতে চোখের বীক্ষণ ব্যবস্থা বা আলোক বীক্ষণ (Photopic vision) নিয়ে আলোচনা করবো।

স্বাভাবিক আলোক বীক্ষণ (Normai photopic vision)

তীব্র আলোতে অনুষ্ঠিত স্বাভাবিক আলোক বীক্ষণের বৈশিষ্ট্যাবলী আঁধার বীক্ষণের সঙ্গে আগের সারণীতে আমরা দিয়েছি। এ ধরনের বীক্ষণে অক্ষিপটে কেন্দ্রে অতি অল্প জায়গা জুড়ে অবস্থিত ফোভিয়া সেন্ট্রালিসের গুরুত্ব অপরিসীম। কারণ, এই জায়গায় তীব্র আলোক সংবেদী খর্বাকার শংকু কোষগুলি এত ঠাসাঠাসি অবস্থায় থাকে, যার জন্য প্রতি বর্গ মিলিমিটার ক্ষেত্রফলে সেখানে শংকু গ্রাহক কোষের সংখ্যা প্রায় এক লক্ষের মতো। এই গ্রাহক কোষেরাই আলোক বীক্ষণে অংশগ্রহণ করে।

দিনের বেলায় লক্ষ্যবস্তুর দিকে সরাসরি তাকালে বা তাকিয়ে থাকলে এ ধরনের বীক্ষণ অনুভূতি হয়। প্রতিটি শংকু গ্রাহক কোষের **নিজস্ব** সংযোগ সূত্র রয়েছে। তারা মস্তিষ্কের দৃষ্টি অঞ্চলের প্রতিটি কোষের সঙ্গে "একের সঙ্গে এক' অবস্থায় যুক্ত। ফলে দিনের বেলায় লক্ষ্যবস্তু থেকে আগত আলো যখন সরাসরি ফোভিয়া অঞ্চলে পড়ে, তখন সেখানে উপস্থিত শংকু গ্রাহক কোষেরা তাদের নিজস্ব সংযোগ ব্যবস্থায় মস্তিষ্কের দৃষ্টি অঞ্চলে লক্ষ্যবস্তুর রং, আকার, অবস্থান সম্পর্কে নিখুঁত তথ্যাবলী সরবরাহ করে ফলে দর্শকের চোখে বস্তুটি তার সমস্ত বৈশিষ্ট্যসহ ভেসে ওঠে। ফোভিয়া বীক্ষণের পর অক্ষিপটের প্রান্তীয় বীক্ষণ (Peripheral vision) শুরু হয়।

14b.3 প্রান্তীয়বীক্ষণ

ফোভিয়া অঞ্চল ছাড়িয়ে অক্ষিপটের প্রান্তীয় অঞ্চলের দিকে যতই যাওয়া যায়, শংকু গ্রাহক কোষের পরিমাণ ততই কমতে থাকে এবং একেবারে প্রান্তীয় অঞ্চলে কোন শংকু কোষ থাকে না তার পরিবর্তে সেখানে শুধুই দন্ডগ্রাহক কোষের ছড়াছড়ি এবং সেই দান্ড কোষের সংখ্যাও যথেষ্ট কম। লক্ষ্যবস্তু থেকে আসা আলো অক্ষিপটের প্রান্তীয় অঞ্চলে পড়লে বা প্রান্তীয় অঞ্চল দিয়ে কোনো বস্তুকে দেখলে সেই বীক্ষণ ক্রিয়াকে বলা হয় প্রান্তীয় বীক্ষণ।

ফোভিয়া অঞ্চলে উপস্থিত প্রতিটি শংকু গ্রাহক কোষ যেরকম নিজস্ব সংযোগ ব্যবস্থায় মস্তিষ্কের দৃষ্টি অঞ্চলের সঙ্গে যোগাযোগ রেখেছে প্রান্তীয় অঞ্চলে উপস্থিত দন্ড গ্রাহক কোষেরা সে রকম ব্যবস্থা রাখেনি। তারা একক সংযোগ ব্যবস্থার পরিবর্তে শতশত গ্রাহক কোষ একসঙ্গে মিশে একটি মাত্র দর্শন স্নায়ু রজ্জুতে পরিণত হয়েছে।

এদের সম্মিলিত ক্রিয়ার ফলে প্রান্তীয় অঞ্চলের বীক্ষণ-প্রক্রিয়া রাতে বা ক্ষীণ আলোতে বিশেষ উপযোগী হলেও, ফোভিয়া অঞ্চলের মতো সেখানে বীক্ষণ সূক্ষ্মতা কিংবা লক্ষ্য বস্তুর স্পষ্ট জ্যামিতিক আকার বা রং দেখার ক্ষমতা লোপ পায়।

ছাপা কাগজের কোনো একটি অক্ষরের দিকে চোখ না নড়িয়ে সরাসরি তাকালে, সেই বিশেষ অক্ষরটি ও তার অব্যবহিত কাছের কয়েকটি অক্ষরকে দর্শক স্পষ্ট দেখলেও, কাছাকাছি ও দূরের লেখাগুলি তার চোখে ধূসর রেখার সমষ্টি বলে মনে হবে। কারণ প্রথম ক্ষেত্রে সে ফোভিয়া বীক্ষণের সাহায্য নিয়েছে, দ্বিতীয় ক্ষেত্রে প্রান্তীয় বীক্ষণের বৈশিষ্ট্যই তাকে এধরনের বীক্ষণ করিয়েছে। তাহলে কি প্রান্তীয় বীক্ষণের কোনো উপযোগিতা নেই? আছে। নিশ্চয়ই আছে।

অভিজ্ঞ জ্যোতির্বিদেরা প্রায়ই নবীন পর্যবেক্ষকদের একটি পরামর্শ দিয়ে থাকেন। সেটি হোল রাত্রে আকাশ পর্যবেক্ষণ করার সময় যুগ্মতারা (binary stars) সংগীতারা বা সুদূরবর্তী নীহারিকার অতি ক্ষীণ ও অস্পষ্ট বস্তুকে দেখবার সময় তাদের দিকে সরাসরি না তাকিয়ে একপেশে দৃষ্টি বা চোখের কোন দিয়ে তাদের দেখেন। কারণ, এই ধরনের একপেশে দৃষ্টিতে (adverted eye)-র প্রান্তীয় অঞ্চলে সংখ্যাগুরু দন্ডকোষের সম্মেলক ক্রিয়ায় ক্ষীণ আলোকে আলোকিত বস্তুকে ভালোভাবে দেখা যায়। কারণ, দন্ড গ্রাহক কোষেরা ক্ষীণ আলোক সংবেদী।

এছাড়া গতিশীলতার প্রতি বিশেষ সংবেদনশীলতাও প্রান্তীয় অঞ্চলের বৈশিষ্ট্য।

মানুষের চোখের কেন্দ্র থেকে দুপাশে প্রায় 90° করে বিস্তৃত দৃষ্টি ক্ষেত্রের (field of view) যে কোনো প্রান্ত দিয়ে গতিশীল অতি ক্ষুদ্র বস্তুও তার চোখ এড়ায় না। ভিতরে যে কোনো প্রান্ত দিয়ে পিঁপড়ের মতো ক্ষুদ্র গতিশীল বস্তুও তার নজর এড়ায় না। প্রান্তীয়বীক্ষণ গতিশীলতার প্রতি এতই -অনুভূতি প্রবণ।

পারকিনজি ক্রিয়া (Purkinje-effect)

আগেই বলেছি দন্ড ও শংকু গ্রাহক কোষের প্রত্যেকেরই যে যার নিজস্ব, স্বাধীন ও পৃথক পৃথক বীক্ষণ ব্যবস্থা রয়েছে। শংকুকোষের তুলনায় দন্ডকোষের প্রারম্ভিক বা সূচনা উদ্দীপনা (Threshold stimuli) অনেক কম হলেও, অন্ধকারে যত সময় যায় ধীরে ধীরে তারা আলো দেখার ক্ষমতা অর্জন করতে থাকে। এমনও দেখা গেছে একলক্ষ ভাগের এক ভাগের মতো উদ্দীপনার পরিবর্তনও তারা অনায়াসে বুঝতে পারে। উদ্দীপনার মান একেবারে শূন্য থেকে ধীরে ধীরে বাড়তে থাকলে প্রথমে দন্ডকোষ, পরে শংকু কোষ সক্রিয় হতে থাকে। উদ্দীপনার একটি বিশেষ সীমা পর্যন্ত উভয়েই বীক্ষণ ক্রিয়ায় যে যার মতো অংশগ্রহণ করলেও, পরে উচ্চতর উদ্দীপনায় বা উজ্জ্বলতায় শংকু কোষেরা এত বেশি সক্রিয় হয়ে ওঠে যে, তখন দন্ডকোষের সক্রিয়তা বা নিষ্ক্রিয়তা ধর্তব্যের মধ্যে আসে না।

এইভাবে উজ্জ্বলতা বাড়ার সাথে সাথে বীক্ষণ ক্রিয়া দন্ডকোষ থেকে শংকু কোষে স্থানান্তরিত হতে থাকে। এ ধরনের হস্তান্তরের সময় পরপর যে সব চিত্তাকর্ষক পর্যায়গুলি ঘটতে থাকে তার প্রথম পর্যায়ে কোনো রং দেখা যায় না, পরের পর্যায়গুলিতে ধীরে ধীরে বিভিন্ন বর্ণযুক্ত পদার্থের ক্ষেত্রে আপেক্ষিক উজ্জ্বলতার পার্থক্য অনুভূত হতে থাকে। দন্ডকোষগুলি এভাবে নীল আলোতে ভালো দেখলেও শংকু কোষেরা নীল রং অপেক্ষা লাল রঙে বেশি সক্রিয় হয় বা ভালো দেখে। একই দৃশ্য বর্ণালীর বিভিন্ন অংশে বিভিন্ন গ্রাহক কোষের এ ধরনের আপেক্ষিক সক্রিয়তার পার্থক্যকে (relative responsed) পারকিনজি ক্রিয়া বলে (Purkinje effect)। পারকিনজি দেখিয়েছেন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ভিত্তিতে নিরূপিত আপেক্ষিক উজ্জ্বলতার লেখতে কিভাবে একই চোখ আঁধার বীক্ষণের তুলনায় ক্ষুদ্রতর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে অধিকতর সক্রিয়তা দেখায়।

দৈনন্দিন জীবনে নানা সাধারণ ঘটনায় এদের উদাহরণ ছড়িয়ে আছে। যেমন লাল ও নীল রং-এর দুটি পৃথক কাগজ টুকরাকে প্রখর আলোয় রাখলে লাল কাগজটিকে নীল রং-এর তুলনায় অনেক বেশি উজ্জ্বল দেখায়। আবার সেই কাগজ দুটিকেই অন্ধকার ঘরে নিয়ে গেলে অন্ধকারে লাল রঙকে কালো দেখাবে এবং নীল রঙের কাগজটিকে তখন লালের চেয়ে উজ্জ্বলতর বলে মনে হবে। বৈমানিকেরা রাত উড়ানের সময় লাল আলোর প্রতি চরম অসংবেদী দন্ডকোষীয় বীক্ষণ এড়াবার জন্য লাল রঙের গগল্‌স পরেন।

দূরবীক্ষণ যন্ত্রে ক্যামেরা লাগিয়ে আকাশ পর্যবেক্ষকেরা সুদূর নীহারিকার সাদা কালো আলোক চিত্র তোলেন। সেই সব আলোক চিত্র ভালো করে খুঁটিয়ে দেখলেও তাদের কোনো রং আছে বলে মনে হয় না। এ ধরনের দুটি আলোকচিত্র বেছে নিয়ে মাউন্ট উইলসন এবং পালোমার কর্মরত জ্যোতির্বিদ ডবলিউ.সি.মিলার আংটি নীহারিকা [Ring Nebula বীণা বা Lyra নক্ষত্র মন্ডলে আংটির মতো দেখতে এই নীহারিকা আছে। মেসিয়ারের তৈরি অস্পষ্ট আকাশীয় বস্তুর তালিকায় এর ক্রমসংখ্যা M-45] এবং কর্কট নীহারিকার [এই নীহারিকার নাম crabnebula, M-1 বৃষ নক্ষত্র মন্ডলে অবস্থিত] আলোকচিত্র দুটিতে আপেক্ষিক উজ্জ্বলতার ভিত্তিতে বিভিন্ন অংশে রং করতে শুরু করেন। একাজ যথেষ্ট পরিশ্রমসাধ্য এবং ধৈর্য সাপেক্ষ।

রং করার পর দেখা গেল আংটি নীহারিকার ভিতরের অংশ চমৎকার নীল রংয়ের — বাইরের অংশটি উজ্জ্বল লাল আলোর চক্র। আর কর্কট নীহারিকাতে দেখা গেল নীল রঙের কুয়াশার মতো অস্পষ্ট। কেন্দ্রীয় অঞ্চল থেকে উজ্জ্বল লাল ও কমলা রঙের প্রবর্ধক অংশ এলোমেলোভাবে বেরিয়ে রয়েছে।

আধুনিককালে ডেভিড মালিন (MALIN) তাঁর নিজস্ব পদ্ধতিতে বিভিন্ন আকাশীয় বস্তুর ছবি তুলে দেখিয়েছেন মিলারের ছবি দুটি প্রায় তাদেরই মতো সঠিকভাবে রঙীন।

14b.4

(a) **দৃষ্টি নির্বন্ধ** (Persistence of the eye)

(b) **বর্ণক্লান্তি** (Colour faligue) এবং

(c) **বর্ণানুবেদন** (after image)

দৃষ্টি নির্বন্ধ (Persistence of vision**)**

বস্তু থেকে আলো এসে অক্ষিপটে যে প্রতিবিম্বের সৃষ্টি করে তার স্থায়িত্বকাল প্রায় $\frac{1}{10}$ সেকেন্ড, কারণ আলোর উজ্জ্বলতা কম হলে অক্ষিপটে অবস্থিত দন্ডকোষগুলির ভিসুয়াল পার্পলে (রডোপসিন নামক গাঢ় লাল রঙের ক্রোমোপ্রোটিন) যে আলোক রাসায়নিক বিক্রিয়া ঘটে তার স্থায়িত্বকালও অনুরূপ অক্ষিপটে গঠিত, প্রতিবিম্বের এই স্থায়িত্বকালকে বলা হয় দৃষ্টি নির্বন্ধ। কারণ ওই সময়ের মধ্যে অন্য কোনো প্রতিবিম্ব অক্ষিপটে গঠিত হয় না। চোখের এই ধর্মকে কাজে লাগিয়ে চলচ্চিত্রে ব্যবহৃত ছবিতে গতিশীলতা আনা হয়।

(b) **বর্ণক্লান্তি** এবং (c) **বর্ণানুবেদন**

ধরা যাক, কোনো দর্শক টানা $\frac{10}{12}$ সেকেন্ড থেকে $\frac{20}{21}$ সেকেন্ড ধরে সাদা বা ধূসর পটভূমিকায় রাখা উজ্জ্বল রঙে চিত্রিত-ধরা যাক লাল রঙের কোনো বস্তুর দিকে এক দৃষ্টে তাকিয়ে আছে। হঠাৎ সেই বস্তুকে তার চোখের সামনে থেকে সরিয়ে নিলে কি হবে?

বস্তুটিকে এভাবে সরিয়ে নিলে দর্শকের চোখ সেই একই জায়গায় একই আকারের নীলাভ সবুজ রঙের বস্তু দেখতে পাবে। বস্তুকে সরিয়ে নিলেও চোখে এভাবে তার রেশ লেগে থাকার ঘটনাকে বলা হয় **অনুবেদন** (after image) । এখানে লাল রঙের বস্তুর অনুবেদন হিসেবে নীলাভ সবুজ রঙের অনুভূতি হয়েছে।

এ ধরনের অনুভূতির কারণ হোল লাল রঙের প্রতি সংবেদনশীল শংকু গ্রাহক কোষগুলি প্রাথমিকভাবে লাল রঙে সাড়া দিলেও (Response) একটানা অনেকক্ষণ ধরে সাড়া দিতে দিতে তারা ক্লান্ত হয়ে পড়ে এবং পশ্চাদ্‌পটের সাদা বা ধূসর আলোয় ক্ষীণভাবে সাড়া দিতে থাকে চোখের এই ঘটনাকে বলা হয় বর্ণক্লান্তি। এই অবস্থায় লাল রঙের বস্তুকে হঠাৎ সরিয়ে নিলে এতক্ষণ নিষ্ক্রিয় হয়ে থাকা এবং নীল রঙের প্রতি সংবেদন শংকু গ্রাহক কোষেরা তখন সক্রিয় হয়ে ওঠে এবং সাড়া দিতে থাকে। ফলে লাল রঙের বস্তুর পরিবর্তে নীলচে সবুজ রঙের বর্ণ বিভ্রম বা অনুবেদনের (after image) সৃষ্টি হয়।

অনুবেদন দু-রকমের (1) অবার্ণ অনুবেদন (Negative afterimage) এবং 2 সবর্ণ অনুবেদন (Positive afterimage)।

(১) উপরের উদাহরণটি হোল অবার্ন অনুবেদনের। এই ধরনের অনুবেদনে সাদা বা ধূসর পটভূমিকায় রাখা কোনো রঙিন বস্তুর দিকে বেশ কিছুক্ষণ একটানা তাকিয়ে থেকে হঠাৎ সাদা পটভূমিকায় চোখ সরিয়ে নিলে বস্তুর প্রতিবিম্বের রেশ এরপরও চোখে কিছুক্ষণ লেগে থাকে কিন্তু দ্বিতীয় ক্ষেত্রে প্রতিবিম্বের বর্ণ পূর্ব বর্ণের পরিপূরক (complimentary) বর্ণে রূপান্তরিত হয়। যেমন বস্তু সাদা, লাল বা হলুদ হলে তাদের **অবার্ন অনুবেদন** হবে যথাক্রমে কালো, সবুজ বা নীল। কারণ সাদার সঙ্গে কালো, লালের সঙ্গে সবুজ এবং হলুদের সঙ্গে নীল মেশালে **সাদা রঙের অনুভূতি** হয়।

সবর্ণ অনুবেদনে বস্তুর দিকে নিবদ্ধ চোখকে হঠাৎ বন্ধ করলে বা সরিয়ে নিয়ে অন্ধকার পটভূমিকায় নিবদ্ধ করলে **বর্ণসহ** বস্তুর প্রতিবিম্ব চোখে কিছুক্ষণ লেগে থাকে। এর কারণ হল উদ্দীপক উৎসকে সরিয়ে নেবার পরও অক্ষিপটের দন্ড ও শঙ্কু গ্রাহক কোষগুলিতে যে আলোক রাসায়নিক বিক্রিয়া চলছিল সেগুলি আরও কিছুক্ষণ অব্যাহত থাকে। ফলে বর্ণসহ বস্তুর প্রতিবিম্ব উদ্দীপনা বিরতির পরও কিছুক্ষণ বজায় থাকে।

14b.5 বীক্ষণ সূক্ষ্মতা (visual acuity)

এবার আমরা বীক্ষণ সূক্ষ্মতা নিয়ে আলোচনা করবো।

বীক্ষণ সূক্ষ্মতা হল মানুষের চোখের এক বিশেষ ক্ষমতা যার সাহায্যে কোনো বস্তুতে অবস্থিত দুটি স্বতন্ত্র ভৌত উদ্দীপনাকে সে পৃথকভাবে চিহ্নিত করতে পারে অর্থাৎ কোনো বস্তুর অংশাতিত অংশকে সূক্ষ্মভাবে সে দেখতে পায় চোখের আদর্শ বীক্ষণ সূক্ষ্মতার ব্যাখ্যায় বলা হয়েছে, এটি চোখের এমন এক বিশেষ ক্ষমতা যার প্রয়োগে সে বৃত্তচাপের। 1মিনিট বা $\frac{1}{60}$ ডিগ্রি বীক্ষণ কোনো উৎপন্নকারী অতি ক্ষুদ্র বস্তুকেও সঠিকভাবে শনাক্ত করতে পারে। লক্ষ্যবস্তুর শীর্ষ বিন্দুও পাদ বিন্দু থেকে নির্গত দুটি কাল্পনিক সরলরেখা মিলিত হয়ে অক্ষিপটে যে কোন উৎপন্ন করে তাকে বীক্ষণ কোণ (visual angle) বলে।

একটা উদাহরণ দিলে ব্যাপারটা বোঝা যাবে :

ধরুন 20 ফুট দূরে অবস্থিত কোনো পরীক্ষাধীন বস্তুর উচ্চতা 0.07 ইঞ্চি বা 1.75 মিমি. সেই বস্তুটি যদি চোখে $\frac{1}{60}$ ডিগ্রী বীক্ষণ কোণ উৎপাদন করে তবে ফোভিয়ায় গঠিত তার প্রতিবিম্বের আকার হবে মাত্র .005 মিমি বা 5 ইঞ্চি যা কিনা ফোভিয়া অঞ্চলে অবস্থিত ক্ষুদ্রতম শঙ্কু গ্রাহক কোষের ব্যাসের দ্বিগুণ।

অতএব আমরা এই সিদ্ধান্তে আসতে পারি যে স্বাভাবিক বীক্ষণ সূক্ষ্মতা ফোভিয়া অঞ্চলে উপস্থিত গ্রাহক কোষগুলির ঘনত্ব, আকার এবং তাদের পারস্পরিক অবস্থানের দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হয়। এছাড়াও নিয়ন্ত্রক বিষয়গুলি হোল (১) উদ্দীপনার প্রকৃতি (যেমন লক্ষ্যবস্তুর (Surface) দেহতলের উজ্জ্বলতা ও তার আপেক্ষিক পার্থক্য এবং আলোক সম্পাতের স্থায়িত্বকাল) (২) চোখের প্রতিসরণ ক্ষমতা (যা একবর্ণী আলোর ক্ষেত্রে বাড়লেও , অপেরন (alteration) ব্যবর্তন (diffraction) এবং চোখের নানান ধরনের ত্রুটির জন্য পরিশ্রান্ত হয়) ফোভিয়া অঞ্চল থেকে যত প্রান্তীয় অঞ্চলের দিকে যাওয়া যাবে ততই সূক্ষ্মতা কমবে।

এখন চোখকে না সরিয়ে বা স্থির রেখে কোনো দর্শক যদি পাশাপাশি থাকা দুটি স্বতন্ত্র বিন্দু উৎসকে বিশ্লিষ্ট বা পৃথক ভাবে দেখতে চায়, তবে নিচের দুটি শর্তকে আবশ্যিকভাবে পালন করতে হয়।

প্রথমত, চোখের আলোকীয় ব্যবস্থা এমন হবে যাতে লক্ষ্যবস্তুর প্রতিটি অংশ অক্ষপটে যে যার নিজস্ব বিম্ব প্রস্তুত করতে পারে এবং দ্বিতীয়ত, অক্ষিপটে অবস্থিত গ্রাহক কোষের বিন্যাস কাঠামো এমন হবে, যাতে সেই কাঠামো বিশ্লিষ্ট বিম্বগুলি সঠিকভাবে গ্রহণ করতে পারে।

প্রথম শর্তের আলোচনায় দেখতে পাই বৃত্তাকার তারা রন্ধ্রের ব্যাসের গড় মান 4 মিমি হলে কোনো দর্শকের চোখে বিশ্লেষণী ক্ষমতার (power of resolution) কোণিক সীমা বৃত্তচাপের $\frac{1}{2}$ মিনিট কোণে পৌঁছায়। এই অবস্থায় অপেরনজনিত ত্রুটিও ন্যূনতম হয় এবং দ্বিতীয় শর্তের আলোচনায় যুক্তিপূর্ণভাবে স্বীকার করে নেওয়া হয়েছে যে কোনো চোখ যদি অক্ষিপটে গঠিত দুটি নিকটবর্তী বিম্বকের বিশ্লেষণ করতে চায়, তবে সেই বিম্ব দুটির মাঝখানে একটি অনুত্তেজিত (unstimulated) গ্রাহক কোষের উপস্থিতি প্রয়োজন।

বীক্ষণ-সূক্ষ্মতা পরিমাপের সময় দেখা গেছে পরীক্ষাধীন (test) বস্তুর বিভিন্ন আকারের জন্য প্রাপ্ত ফলাফলও বিভিন্ন হচ্ছে। বিশেষ বিশেষ অবস্থায় বীক্ষণ কোণ θ-র পরিমাণ এত কমিয়ে ফেলা যায় যাতে পরীক্ষাধীন বস্তুকে স্বাভাবিক খালি চোখে দেখতে পাওয়া যায় না বললেই চলে।

কালো পর্দার পরিপ্রেক্ষিতে কোনো সাদা বিন্দুকে দেখার সময় তার কৌণিক আকার যে অসীমভাবে ক্ষুদ্র করা হয়। রাতের কালো আকাশের বুকে আলোক বিন্দুর মতো তারারা হোল এর চমৎকার উদাহরণ। এইসব তারা

পৃথিবী থেকে এতদূরে থাকে যার ফলে দর্শকের চোখে তাদের বীক্ষণকোণের মান বাস্তবিক লক্ষ্যে প্রায় শূন্য হয়। আবার দিনের বেলায় রঙীন আকাশের পটভূমিকায় মাটিতে পোঁতা পতাকাদন্ডের মতো উজ্জ্বল পটভূমিকায় রাখা দীর্ঘ কালোরেখা যদি দর্শকের চোখে বৃত্তচাপের। সেকেন্ড বা $\frac{1}{60}$ মিনিট বীক্ষণ কোণ উৎপন্ন করে তবেই তাদের চিহ্নিত করা যাবে নচেৎ নয়।

একদিকে একক বিন্দু বা রেখার বীক্ষন-সূক্ষ্মতা, অন্যদিকে জটিল থেকে জটিলতর আকারের লক্ষ্যবস্তুর বীক্ষণ-সূক্ষ্মতার মধ্যে যে আপাত বৈষম্য (apparent discrimination) দেখা যায়, আলোকীয় ব্যবর্তন ক্রিয়ার (optical diffraction) সাহায্যে তা ব্যাখ্যা করা যায়।

আলোকের তরঙ্গ ধর্মের জন্য ব্যবর্তন ক্রিয়ার সৃষ্টি হয়। এর অর্থ হোল কোন বিম্বকেই কখনও সম্পূর্ণভাবে লক্ষ্যবস্তুর মতো পরিষ্কার ও তীক্ষ্নধার বিশিষ্ট হতে দেখা যায় না। আলোর এই ধর্মের জন্য অক্ষিপটে গঠিত যে কোন তারার প্রতিবিম্বই বিন্দুবৎ না হয়ে অস্ফুট আলোক চাকতির মতো দেখায় এবং এই অবস্থায় বীক্ষণ কোণের মান যত ক্ষুদ্রই হোক না কেন সেই অস্পষ্ট প্রতিবিম্বের ব্যাসের মান কখনই বৃত্ত চাপের 1 মিনিট পরিমাণ থেকে কম হয় না। হলে বীক্ষণ সূক্ষ্মও অকার্যকির হয়ে পড়বে। যদি পরীক্ষাধীন তারাটি তার পটভূমিকার তুলনায় উজ্জ্বলতর হয় এবং তার প্রতিবিম্ব ব্যাস 1 মিনিটের মতো হয় তবেই আমরা সেই তারাকে দেখতে পাবো।

এরকম সরল আলোচনার সাহায্যে চোখের বিশ্লেষণী ক্ষমতার সঙ্গে সংশ্লিষ্ট সমস্ত ঘটনাকে সুষ্ঠুভাবে ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়, আলোচনা করার সময় আমরা ধরে নিয়েছিলাম চোখকে স্থির রাখতে হবে। কিন্তু বাস্তব ক্ষেত্রে চোখ লক্ষ্য বস্তুর উপর সবসময় কম-বেশি নড়াচড়া করতেই থাকে। এইভাবে কোনবস্তুকে অবিরাম নিরীক্ষণ করার মতো ব্যাপারটা ভার্ণিয়ার-সূক্ষ্মতা পর্যবেক্ষণের ক্ষেত্রে এক গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা নিয়ে থাকে। ভার্নিয়ার পাঠের সময় মূলস্কেলের রৈখিক দাগকে ভার্নিয়ার স্কেলের রৈখিক দাগের সঙ্গে একই সরলরেখায় বিন্যস্ত করার ক্ষেত্রে চোখ তার অসাধারণ দক্ষতার পরিচয় দেয়। এই দক্ষতায় চোখ 1 মিমি $\frac{1}{50}$ ভাগের সরনও খালি চোখে পড়ে দিতে পারে। এমনকি এসময় বীক্ষণ কোণের মান বৃত্ত চাপের কয়েক সেকেন্ড হলেও চোখ তাও অগ্রাহ্য করে।

আগেই বলা হয়েছে দৃষ্টিক্ষেত্রের (field of view) প্রান্তীয় অঞ্চলে কোনো বস্তুর সামান্যতম নড়াচড়াও চোখ বুঝতে পারে। ফোভিয়া অঞ্চল থেকে প্রান্তীয় সীমার দিকে যতই যাওয়া যাবে, ততই চোখের বিশ্লেষণী ক্ষমতা কমে যাবে এ ধারণা সর্বাংশে ঠিক নয়। এভাবে চোখের বিশ্লেষণী ক্ষমতাও সহসা কমে যায় না। প্রান্তীয় অঞ্চলে অবস্থিত দণ্ডগ্রাহক কোনো স্বল্প উদ্দীপনায় সংবেদনশীল হলেও পরীক্ষা করে দেখা গেছে কম্পমান আলোক উৎসের বা আলোক স্পন্দনের প্রতি কেন্দ্রীয় অঞ্চলের তুলনায় তারা অধিকতর সংবেদনশীল।

14b.6 বর্ণ বীক্ষণ (Colour Vision)

বর্ণের সংজ্ঞা হচ্ছে এক বিশেষ দর্শন-অনুভূতি যা অক্ষিপটে আপতিত আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বা কম্পাংকের উপর নির্ভরশীল। উন্নত শ্রেণীর সাধারণ দর্শকের ক্ষেত্রে বর্ণ-দর্শন অনুভূতি 0.4μ থেকে 0.75μ [1 মাইক্রন 1μ (মিউ)

= 10^{-6} সেমি]। তরঙ্গ দৈর্ঘ্যযুক্ত তড়িৎ-চুম্বকীয় তরঙ্গের জন্য হয়ে থাকে। পৃথক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পৃথক বর্ণ-দর্শনের অনুভূতি জাগায়।

বর্ণানুভূতি উজ্জ্বল আলোকে, আলোক সহিষ্ণু চোখে, এবং শংকু গ্রাহক কোণের সহযোগিতায় সম্পন্ন হয়। শংকু গ্রাহক কোণ নিজে কোনো বর্ণানুভূতির সৃষ্টি করে না। দৃশ্য বর্ণালীর বিভিন্ন বর্ণকে বিভিন্ন তীব্রতার স্নায়ু প্রবাহে পরিণত করে মস্তিষ্কের বীক্ষণ কেন্দ্রে পাঠায়। যেখানে মস্তিষ্কের এই কেন্দ্র বিভিন্ন বর্ণের মধ্যে সীমারেখা টানে। দর্শক তখন বর্ণ দেখতে পায় এবং বর্ণ পার্থক্য বুঝতে পারে। কোন বস্তু থেকে নিঃসৃত আলো (transmitted) আমাদের চোখে এ ধরনের বর্ণানুভূতি সৃষ্টি করে এই ধরনের বর্ণ সংবেদন ব্যক্তি নিরপেক্ষ বা ব্যক্তিভিত্তিক হতে পারে। ব্যক্তি নিরপেক্ষতার অর্থ হোল যা ব্যক্তি বিশেষের দর্শন শক্তির মতো অন্য কোন ক্ষমতার উপর নির্ভরশীল নয়। ব্যক্তিভিত্তিক শব্দটি ব্যবহার করার অর্থ হোল একই বর্ণের আলো বিভিন্ন লোকের চোখে বর্ণান্ধতার মতো বিভিন্ন বর্ণের অনুভূতি জাগায়।

আবার বর্ণ বলতে কোন কোন রঞ্জক পদার্থের (coloured pigment or dye) রংকেও বুঝায়।

বর্ণের তিনটি বৈশিষ্ট্য

গানের সুরের মতো বর্ণেরও তিনটি বৈশিষ্ট্য আছে (1) বিশুদ্ধ বর্ণ (hue) (2) ঔজ্জ্বল্য (brightness) (3) সংপৃক্তি (staturation)।

বিশুদ্ধ বর্ণ : শব্দ বিজ্ঞানে একটি মাত্র কম্পাংকযুক্ত শব্দ যেমন শুদ্ধ ধ্বনি (tone) তেমনি বীক্ষণ-বিজ্ঞানে একটি মাত্র তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে বিশিষ্ট বা একবর্ণী আলোকে বিশুদ্ধ বর্ণ বলা হয়।

ঔজ্জ্বল্য : ঔজ্জ্বল্য যেন আপতিত আলোকের প্রতি অক্ষিপটের সাড়া দেওয়ার আপেক্ষিক মাত্রা। এ ধরনের আপেক্ষিক বেশি হলে বুঝতে হবে উৎসের ঔজ্জ্বল্য বেশি। শব্দ বিজ্ঞানে এর তুলনা শব্দ প্রাবল্য (loudness)

বর্ণসংপৃক্তি : বিশেষ কোনো রঙের সাদা আলোর সঙ্গে মিশে যাবার প্রবণতা বা স্বাধীনতার মাত্রাকে বলা হয় বর্ণসংপৃক্তি। সে হিসাবে একবর্ণী আলোর সংপৃক্তি শতকরা একশো ভাগ। বর্ণ বললে কিছু পরিমাণ সাদা আলোর সঙ্গে একটি বা দুটি একবর্ণী আলোর মিশ্রণকে বোঝায়। আরো পরিষ্কার করে বলতে গেলে সম উজ্জ্বলতা সম্পন্ন কোনো বর্ণহীন সাদা বা ধূসর বর্ণ থেকে কোনো একটি বিশুদ্ধ বর্ণের পার্থক্য যতটুকু বর্ণ-সংপৃক্তি তারই পরিমাপক। শব্দ বিজ্ঞানে এর তুলনা ভারের (weight) বা গুণের সঙ্গে (quality)।

14b.7 বর্ণানুভূতি

এখন আমরা ব্যক্তি নিরপেক্ষ বর্ণানুভূতির কথা আলোচনা করবো। বর্ণবীক্ষণ হোল অক্ষিপটের শংকু গ্রাহক কোষের সবচেয়ে উল্লেখযোগ্য বৈশিষ্ট্য। সাধারণভাবে সাদা আলো গ্রেটিং বা প্রিজমে পড়লে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য অনুযায়ী পৃথক পৃথক বর্ণে ভেঙে যায়। এই বর্ণসমষ্টি দৃশ্যমান বর্ণালী নামে পরিচিত। বর্ণালীতে বিভিন্ন বর্ণের বন্টন (distribution) দর্শকের চোখে বিভিন্ন বর্ণের অনুভূতি তৈরী করে। বিভিন্ন বর্ণের প্রতি স্বাভাবিক চোখের সংবেদনশীলতা এবং সংশ্লিষ্ট তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পরিবর্তন নিয়ে লেখচিত্র আঁকলে দেখা যায় চোখ 5550Å বা 5550µ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট সবুজাভ হলুদ বর্ণের প্রতি সবচেয়ে বেশি সংবেদনশীল। এই সমশক্তি দীপ্তি লেখ বা সংবেদনশীলতা লেখের প্রান্তীয় অঞ্চলের একদিকে লাল রং অপর দিকে বেগুনী রং রয়েছে। সে সব জায়গায় চোখের সংবেদনশীলতা মধ্যাঞ্চলের তুলনায় বেশ কম।

[প্রমাণ প্রতিক্রিয়া উৎপাদনে λ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট নিঃসৃত আলোক শক্তি বা দীপ্তি $e\lambda$ হলে, সংবেদিতা $1/e\lambda$ । সংবেদিতা ও তরঙ্গ দৈর্ঘ্য নিয়ে প্রস্তুত লেখকে সমশক্তি দীপ্তি লেখ বলে, কারণ উৎস থেকে নিঃসৃত হবার সময় সমস্ত রকম দীপ্তি প্রবাহের একই পরিমাণ শক্তির অধিকারী এবং এই আলোক বা দীপ্তি বিভিন্ন রং-এ বিশ্লিষ্ট হবার সময় প্রত্যেকেই সমানভাবে শক্তি ভাগ করে নেয়।]

এখন একটা প্রশ্ন মনে জাগে ঃ বর্ণালীতে বর্ণ বন্টনের সময় কোন বৈশিষ্ট্যের উপর বিভিন্ন বর্ণানুভূতি নির্ভর করে? সবুজ আলো পেতে হলে আমাদের কি করতে হবে?

এর উত্তরে বলতে পারি ঃ বর্ণালীর যে অংশ সবুজ, সেই অংশকে বেছে নিলেই হবে অর্থাৎ 5300Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো চোখে যে উদ্দীপনা সৃষ্টি করে তা হোল সবুজ।

কিন্তু এই পদ্ধতি কি একমাত্র পদ্ধতি যার সাহায্যে বিশেষ কোন বর্ণকে এভাবে বেছে নিতে পারি ?

উত্তরে বলতে পারি, তরঙ্গ দৈর্ঘ্য ও বর্ণের মধ্যে এ ধরনের সরলীকৃত মিল, দুই বা ততোধিক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বা বর্ণ মিশ্রণের ফলে সৃষ্ট (Match) বর্ণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। একথা বলার উদ্দেশ্য হোল দুই বা ততোধিক বর্ণের (hue) মিলনের ফলেও (Match) পূর্বের মতো আপাতভাবে একই প্রার্থিত বর্ণের অনুভূতি হতে পারে।

এই আলোচনার প্রথমে আমরা (1) প্রাথমিক বা মূল বর্ণ (Primary Colours) এবং (2) পরিপূরক বর্ণ (Complementary Colours) সম্পর্কে দু এক কথা বলে নেবো। পরীক্ষা করে দেখা গেছে দৃশ্যমান নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালীর লাল (তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ = 70000Å) সবুজ (5461Å) এবং নীল (4358Å) এই তিন বর্ণের যথোপযুক্ত আনুপাতিক সংমিশ্রণে দৃশ্যমান বর্ণালীর বাকি বর্ণগুলির সৃষ্টি হয়। এই তিন বর্ণের সংমিশ্রণে অন্যান্য বর্ণ তৈরী করা যায় বলে এদের প্রাথমিক বা মূল বর্ণ বলা হয়। এ ধরনের নামকরণের প্রাথমিক কৃতিত্বের অধিকারী হলেন অংকন

শিল্পীরা। ছবি আঁকার সময় নানা রকমের রং সৃষ্টি করার সময় মূল বর্ণগুলির বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করেন। অবশ্য তাঁরা পদার্থ বিজ্ঞানীদের মতো তরঙ্গ দৈর্ঘ্য মিশিয়ে এসব পরীক্ষা করেননি। তাঁরা এসব পরীক্ষা-নিরীক্ষা করেছেন নানারকম রঞ্জক পদার্থ মিশিয়ে। আমরা পরবর্তী আলোচনায় রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণ দিয়ে তৈরি বর্ণ এবং তরঙ্গ দৈর্ঘ্য মিশিয়ে বর্ণ তৈরির ভিতরে পার্থক্য নিয়ে আলোচনা করবো।

পরিপূরক বর্ণ (Complementary Colours)

তিনটি প্রাথমিক মৌলিক বর্ণের সংমিশ্রণে যেমন সাদা বর্ণের উদ্ভব হয়, তেমনি শুধুমাত্র দুটি বর্ণের সঠিক সংমিশ্রণেও সাদা বর্ণ পাওয়া সম্ভব। এইভাবে যে দুটি বর্ণের সংমিশ্রণে সাদা বর্ণের সৃষ্টি হয় তাদের পরস্পরকে পরস্পরের পরিপূরক বর্ণ বলা হয়।

যেমন নীল ও হলুদ বর্ণের সঠিক সংমিশ্রণে বা লাল ও সবুজ বর্ণের যথোপযুক্ত সংমিশ্রণে সাদা বর্ণের অনুভূতি জাগে। অর্থাৎ কোনো সাদা আলো চোখের গ্রাহক কোষে যে রকম অনুভূতি জাগায়, পরিপূরক বর্ণ যুগলও সেরকম একই অনুভূতি জাগায়।

এইভাবে পরিপূরক দুটি বর্ণের মিশ্রণকে বর্ণ-বীক্ষণে (Colour vision) সংযুক্তি পদ্ধতি বলে। ব্যবহারিক জীবনে সোডা-সাবান দিয়ে কাচা কাপড় থেকে হলদে রঙ নির্গত হতে থাকে ওই কাচা কাপড়কে নীল রঙে ডুবিয়ে দিলে কাচা কাপড়কে সাদা দেখায়। কারণ হলুদ ও নীলের সংমিশ্রণে আমাদের চোখে সাদা রং-এ অনুভূতি জন্মেছে।

বস্তুর বর্ণ (Colours of bodies) ও সংযোগমূলক মিশ্রণ (Additive Mixture)

বস্তুর উপরে সাদা আলো পড়লে বস্তু (1) তাকে শোষণ করতে পারে, (2) বস্তু অস্বচ্ছ হলে তাকে প্রতিফলিত করতে পারেঙ্গ (3) বস্তু স্বচ্ছ হলে আপতিত আলোক শক্তিকে নিঃসরণ (transmission) করতে পারে। সেই নিঃসৃত বা প্রতিফলিত আলো বা উদ্দীপনা দর্শকের চোখে পড়লে তার বস্তু দর্শনের অনুভূতি হয় — এই ধরনের বর্ণ দর্শন নির্ভর করে দর্শকের (1) অক্ষিপটের প্রতি একক ক্ষেত্রফলে প্রতি একক সেকেন্ডে আপতিত শক্তির উপরে, (2) আলোকিত দর্শন ক্ষেত্রের আকারের উপর, (3) চোখের সহিষ্ণুতার উপর এবং (4) দর্শকের শারীর বিজ্ঞানীয় অবস্থার উপর। বস্তু থেকে এভাবে নিঃসৃত কোনো উদ্দীপনার ভিতরে বিশেষ কোনো একটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের উল্লেখযোগ্য মাত্রাধিক্য না থাকলে, তবে সেই উদ্দীপনা আমাদের চোখে সাদা রঙের অনুভূতি জাগায়। এ ধরনের বহু উৎসকে শিথিলভাবে বা মোটামুটিভাবে আমরা সাদাই বলে থাকি।

আলোচনার সুবিধার জন্য সমশক্তিসম্পন্ন বর্ণালী নিঃসরণকারী বস্তুর বর্ণকে আমরা সাদা বর্ণ বলে ধরবো। এরকম একটি সাদা রঙের বর্ণালীতে যদি কোনো বিশেষ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সামান্য পরিমাণে হলেও মাত্রাধিক্য হয় তবে আমাদের চোখে তার অনুভূতি হবে ধূসর বা অসংপৃক্ত বর্ণের (desaturated colour)। যদি এই বিশেষ তরঙ্গ

দৈর্ঘ্যের পরিমাণ ক্রমশ বাড়তে থাকে, তবে একসময় তার সংপৃক্তি সর্বোচ্চমানে পৌঁছবে। সেক্ষেত্রে সেই বর্ণকে আমরা বলি একবর্ণী বর্ণ (mono chromatic lighte colour)। এভাবে কোনো সংপৃক্ত বর্ণের সঙ্গে সাদা আলো মিশালে মিশ্রিত বর্ণ আমাদের চোখে অসংপৃক্ত বা ধূসর বর্ণের অনুভূতির সৃষ্টি করে। আগেই বলা হয়েছে অক্ষিপটের ফোভিয়া অঞ্চলের কেন্দ্রস্থল জুড়ে যে অতি ক্ষুদ্র হলুদ অঞ্চল (yellow spot) রয়েছে, সেইখানে বর্ণ সংবেদন সর্বোচ্চ এবং সর্বোত্তমভাবে হয়। তাই কোনো চোখ বর্ণবীক্ষণের জন্য দর্শন ক্ষেত্রের (field of view) মাত্র 2° কৌণিক পরিমাণ ব্যবহার করে। তারপরে ওই ক্ষেত্রের আরও 10° কৌণিক পরিসর জুড়ে তার বর্ণ বিচার চললেও, সে ব্যবস্থা অত্যন্ত দুর্বল কারণ ফোভিয়া অঞ্চল থেকে দূরে যতই অক্ষিপটের প্রান্তীয় অঞ্চলের দিকে সরে যাওয়া যাবে, ততই শংকু গ্রাহক কোষের সংখ্যা কমবে এবং বর্ণ বীক্ষণের সূক্ষ্মতা কমবে। দন্ড কোষেরা রং দেখতে পায় না বা বর্ণসংবেদী নয়।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে লাল, নীল ও সবুজ এই তিনটি প্রাথমিক বর্ণকে যথোচিত অনুপাতে মিশিয়ে বা সংযোগমূলক মিশ্রণ করে নানা রকম বর্ণ প্রস্তুত করা সম্ভব। এই ধরনের সংযোগমূলক মিশ্রণে তিনটি মৌলিক বর্ণের তরঙ্গ দৈর্ঘ্যই মেশানো হয়, তাই অনেকে একে বিভিন্ন রঞ্জক পদার্থে মিশ্রণে বর্ণ প্রস্তুতির সঙ্গে মিশিয়ে ফেলেন। প্রথম ক্ষেত্রে তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের সংযোগমূলক মিশ্রণ এবং দ্বিতীয় ক্ষেত্রে তাদের বিয়োজনমূলক মিশ্রণ (Substractive mixture of colour) হয়ে থাকে। আমরা রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণের সময় বিয়োজনমূলক মিশ্রণে কিভাবে নূতন বর্ণের সৃষ্টি হয় সে সম্বন্ধে পরে আলোচন করবো।

(Additive Mixtures)

দেখা গেছে বিভিন্ন অনুপাতে লাল ও সবুজ আলোর মিশ্রণে সংপৃক্ত কমলা, হলুদ বা হলদেটে সবুজ বর্ণের সৃষ্টি করা যেতে পারে। আবার অন্য অনুপাতে লাল, সবুজ ও নীল মিশিয়ে সমশক্তি নিঃসরণকারী বর্ণ বা সাদা আলো তৈরি করা যায়। যদি এই ধরনের মিশ্রণে কোনো এক বিশেষ বর্ণ বা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পরিমাণ বাড়িয়ে দেওয়া যায়, তাহলে তার ফলাফল হবে স্পষ্ট ধূসর, হলুদ, নীলচে সবুজ বা গাঢ়লাল (Purple) বর্ণের সৃষ্টি।

আগের আলোচনাটিকে পরিপূরকপূর্ণ সম্পর্কে যে তথ্য পাওয়া গেছে তা বিশ্লেষণ করে দেখতে পাই, দুটি বর্ণ যদি পরস্পরের পরিপূরক হয় তবে তার অর্থ এই নয় যে তাদের গাঠনিক বর্ণগুলির উপরিপাতের ফলেও সাদা বর্ণের সৃষ্টি হবে।

উদাহরণ হিসাবে বলতে পারি একবর্ণী লাল, সবুজ এবং নীলের বিশেষ সংযোগমূলক মিশ্রণে সমশক্তি সম্পন্ন সাদা আলোর সৃষ্টি হয়েছে। সেই মিশ্রণ থেকে যদি নীল বর্ণকে বাদ দেওয়া হয়, বাকি বর্ণদুটি লাল ও সবুজ সাদাবর্ণের সৃষ্টি না করে হলুদ বর্ণের সৃষ্টি হবে। এবার সেই হলুদকে যদি নীলের সঙ্গে মেশানো হয় তবে তাদের

মিশ্রণে পুনরায় সাদা বর্ণের সৃষ্টি হবে। অতএব হলুদ ও নীল পরস্পর পরস্পরের পরিপূরক বর্ণ হবে।

বৈশ্লেষিক পদ্ধতিতে আমাদের এই বক্তব্যকে প্রকাশ করতে পারি।

ধরা যাক এক বিশেষ বর্ণ হলুদকে Y দিয়ে প্রকাশ করা হোল, যদি এই হলুদ বর্ণ r পরিমাণ লাল R এবং g পরিমাণ সবুজ G এর মিশ্রনে প্রস্তুত হয় তবে

$$Y \cong r\,R + g\,G$$

এই সমীকরণে বিকশিত বর্ণ বামপাশে $\cong$ দিয়ে বোঝানো হচ্ছে বর্ণ সৃষ্টি বা বর্ণ বিকাশ হয়েছে। ডান পাশের সূচকগুলি হোল যাদের মিশ্রণে প্রার্থিত বর্ণ সৃষ্টি হয়েছে এবং + চিহ্নে তাদের মিশ্রণ বোঝানো হয়েছে।

14b.8 বর্ণ পরিমাপ

বর্ণ পরিমাপের জন্য ত্রিবর্ণভিত্তিক তন্ত্র (The Trichromatic System of Colour Measurement)

বর্ণ পরিমাপের জন্য যে ত্রিবর্ণ-ভিত্তিক তন্ত্রের কথা আলোচনা করছি, সেই তন্ত্র নিচের দুটি সুপরিচিত পরীক্ষাশ্রয়ী ফলাফলের ওপর ভিত্তি করে রচিত হয়েছে।

(1) সীমাবদ্ধ ক্ষেত্রে, যে কোনো বর্ণই যেকোনো তিনটি আলোকউদ্দীপনার (লাল, সবুজ, নীল) যথোচিত সংমিশ্রণে বিকশিত (Match) হয়।

[With the restrictions, any colour can be matched by a suitable mixture of any three stimuli.]

(2) তিনটি উদ্দীপনার যথোচিত মিশ্রণে দুটি বর্ণ সৃষ্টি করা হলে, ওই সৃষ্ট বর্ণ দুটির যোগফল এই দুটি মিশ্রণের যোগফলের সমান হবে।

(If two colours are matched in turn by mixtures of three stimuli, then the sum of two colours will be matched by the sum of two mixtures.)

প্রথম সূত্র অনুসারে, যে কোন বর্ণই তিনটি পৃথক বর্ণের সাহায্যে তৈরি করা যায়। আমাদের ক্ষেত্রে এই তিনটি বর্ণ হোল তিনটি মৌলিক বর্ণ লাল, সবুজ, হলুদ। আমরা এই তিনটি বর্ণকে নিয়ে একটা মিশ্রণ তৈরী করলে সম্পূর্ণ নূতন এক বর্ণের সৃষ্টি হবে।

ধরা যাক R বর্ণের r পরিমাণ, G বর্ণের g পরিমাণ এবং B বর্ণের b পরিমাণ একত্রে মিশিয়ে একটি নূতন বর্ণ X তৈরী করা হোল। আংকিক পদ্ধতিতে প্রকাশ করলে

$$X = r\,R + g\,G + b\,B \qquad \text{— (1)}$$

এইভাবে নূতন এক বর্ণ Y তৈরি করার জন্য G, R ও B র পৃথক পরিমাণ যথাক্রমে g', r' এবং b' নেওয়া হল অর্থাৎ $Y = r'R + g'G + b'B$ — (2)

এইভাবে তিনটি বর্ণের যথোচিত সংমিশ্রণে যে কোনো বর্ণ X Y তৈরি করা যায়।

দ্বিতীয় সূত্রের ব্যাখ্যায় বলা হয়েছে : যদি X বর্ণকে Y বর্ণ থেকে পৃথক করানো যায় অর্থাৎ দুটি বর্ণ যদি সদৃশ হয় তবে —

$X = Y$ — (3)

এভাবে যদি দুটি বর্ণালী = বন্টন (Spectral distribution) আমাদের চোখে পরস্পর থেকে পার্থক্যহীন অবস্থায় থাকে, তবে তাদের প্রত্যেকের সঙ্গে একটি স্বতন্ত্র বর্ণ Z যোগ করলে, নূতন মিশ্রণ দুটিও পার্থক্যহীন দেখাবে।

অর্থাৎ $X + Z = Y + Z$ — (4)

এবার সমীকরণ (2) এবং (3) এর সাহায্য নিয়ে লিখতে পারি

$X = rR + gG + bB$

এবং $Y = r'R + g'G + b'B$ — (5)

X এবং Y-র মিশ্রণে যদি নূতন বর্ণ Z এর সৃষ্টি হয় তবে $Z = X + Y = (r + r') R + (g + g') G + (b + b') B$

এই সমীকরণটি অংকশাস্ত্রের ভেক্টর যোগফলের মধ্যে যেখানে (g, r, b) সহগগুলি হচ্ছে একটি ভেক্টরের উপাংশ এবং সহগ (g', r', b') হচ্ছে অপর ভেক্টরের উপাংশ এবং নূতন বর্ণ Z হচ্ছে ভেক্টর দুটির যোগফল।

এইভাবে বীক্ষণ বিজ্ঞান পদার্থবিদ ও গণিতজ্ঞকে সমানভাবে আকর্ষণ করেছে। বস্তুতঃ ভেক্টর তত্ত্বের সাহায্যে বিস্ময়করভাবে শ্রোয়ডিংগার (schrodinger) বীক্ষণতত্ত্বের ব্যাখ্যা করেছিলেন।

মৌলিক বা প্রাথমিক বর্ণের মৌলিকতার বিচার

আমাদের আলোচনার শুরুতে যে প্রথম সূত্রের কথা বলা হয়েছে সেটি ভালোভাবে লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে **কোনো তিনটি ভিন্ন বর্ণের** আলোক উদ্দীপনার যথোচিত সংমিশ্রণে যে কোনো বর্ণকেই বিকশিত করা সম্ভব।

এই সূত্রের ব্যাখ্যায় লাল, সবুজ, ও নীল বর্ণকে **প্রাথমিক** বর্ণ ধরে তাদের সংমিশ্রণে দৃশ্যবর্ণালীর অন্তর্গত যে কোনো বর্ণ বিকশিত হয় বলে আমরা ধরেছি।

কিন্তু যে কোনো তিনটি বর্ণের জায়গায় শুধুমাত্র লাল, সবুজ, নীলকে প্রাথমিক বর্ণ বলে কেন ধরবো ? দৃশ্যবর্ণালীর অন্য তিনটি বর্ণকে কেন প্রাথমিক বলে ধরা যাবে না?

অর্থাৎ বর্ণ প্রস্তুতিতে কোনো বিশেষ তিনটি বর্ণের অপরিহার্যতা মেনে নেওয়া যায় না।

লাল, সবুজ, ও নীল উদ্দীপনার পরিবর্তে, যদি আমরা লাল, নীল ও হলুদ উদ্দীপনা ব্যবহার করে সবুজ বর্ণ তৈরী করতে চাই, তাহলে কি তা করা সম্ভব হবে?

বাস্তবিক পক্ষে ভিন্ন ভিন্ন পরিমাণে এই তিনটি বর্ণ ব্যবহার করে দৃশ্যবর্ণালীর বেশ কয়েকটি বর্ণ তৈরী করা গেলেও এভাবে যে সবুজ বর্ণের সৃষ্টি হয় তা কখনও প্রকৃত সবুজের সমকক্ষ নয়। তাহলে কি এই পদ্ধতিতে আমাদের পক্ষে সবুজ বর্ণ তৈরি করা সম্ভব নয়? উত্তর হল: যদি কিছু পরিমাণ লাল বর্ণ এই মিশ্রণে মেশানো যায়, তবে মিশ্রণটি প্রকৃত সবুজ বর্ণের সৃষ্টি করবে।

অর্থাৎ আমরা লাল বর্ণকে বর্ণ সমীকরণের অন্যপাশে রেখে লাল ও হলুদ বর্ণের মিশ্রণের সাহায্যে সবুজ বর্ণের সৃষ্টি করতে পারি।

গণিতের মার্জিত যুক্তি প্রয়োগ করে আমরা দেখাতে পারি লাল, হলুদ ও নীল বর্ণ ব্যবহার করে সর্বদাই যে (X) বর্ণ তৈরি করা যাবে, এ দাবি কখনোই সম্ভব নয় বরঞ্চ দেখা গেল (লাল বর্ণ + X) নীল ও হলুদ বর্ণের মিশ্রণের সাহায্যে তৈরি করা হয়েছে।

এভাবে সমীকরণের একপাশ থেকে অন্য রাশিকে অপরপাশে সরিয়ে আনলে আমরা তাকে ঋণাত্মক রাশি হিসেবে গণ্য করি।

অতএব আমরা বর্ণসমীকরণের সহগগুলিকে যে ভাবে প্রকাশ করেছি তাতে দেখা যায় $X = g(G) + b(B) + r\,(R)$ সমীকরণের সহগগুলিকে (g, b, এবং r) ঋণাত্মক ও ধনাত্মক উভয় ভাবেই ব্যবহার করা যায়।

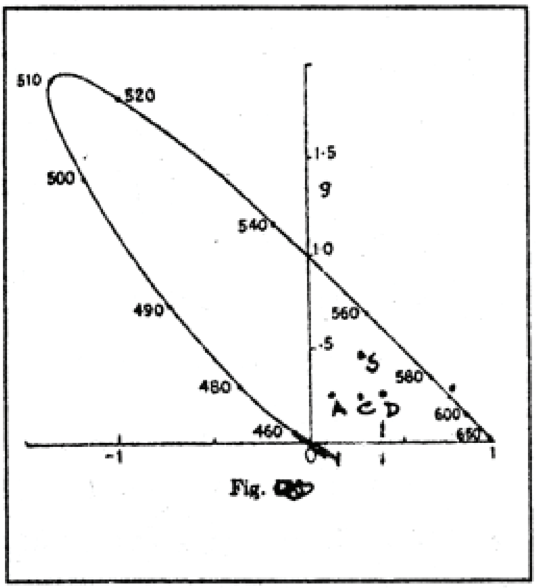
যদি আমরা ঋণাত্মক পরিমাণ বলতে সমীকরণের **অপর পাশে যোগকরা** বুঝি, তাহলে যে কোন বর্ণই যেকোন তিন বর্ণের দ্বারা সৃষ্টি করা যাবে এবং বর্ণ বিজ্ঞানে সে হিসাবে প্রকৃত পক্ষে বিশেষ কোন প্রাথমিক বর্ণের অস্তিত্ব নেই।

এবার প্রশ্ন আসে: সমস্ত ধরনের মিশ্রণের জন্য তিনটি বর্ণের শুধু ধনাত্মক পরিমাণ ব্যবহার করা যাবে কি? এর উত্তর হবে — না। কিছু কিছু বর্ণের জন্য তিনটি প্রাথমিক বর্ণের প্রত্যেকটি গুচ্ছের (set) সঙ্গে কিছু কিছু বর্ণের ঋণাত্মক পরিমাণ যোগ করা দরকার। অতএব আমাদের কাছে এমন কোন নিখুঁত (unique) ব্যবস্থা নেই যার সাহায্যে কোন এক প্রাথমিক বর্ণের সঠিক সংজ্ঞা দিতে পারি। প্রাথমিক পাঠ্যে লাল, সবুজ এবং নীল বর্ণকে

প্রাথমিক বর্ণ বলার কারণ হলো এদের সাহায্যে বহুসংখ্যক ভিন্নধর্মী বর্ণ তৈরি করা যায় এবং কিছু কিছু মিশ্রণে শুধুমাত্র বর্ণের ধনাত্মক পরিমাণ ব্যবহার করা হয়।

14b.9 বর্ণময়তা লেখ (Chromaticity diagram)

বর্ণ প্রস্তুতির আলোচনায় আমরা দেখিয়েছি কিভাবে তিনটি আদর্শ উদ্দীপনার প্রয়োজনীয় পরিমাণ নিয়ে যে কোনো বর্ণের বিকাশ সম্ভব।



চিত্র 14.8

প্রাথমিক বা আদর্শ হিসাবে লাল (R), সবুজ (G) এবং নীল (B) উদ্দীপনাকে আমরা বেছে নিয়েছি। এবার যে এককগুলির সাহায্যে ওই তিন আদর্শ বা প্রাথমিক উদ্দীপনার পরিমাণ নির্বাচন করতে হবে, তার সংজ্ঞা দেওয়া প্রয়োজন। এই এককগুলিকে এমনভাবে নির্বাচন করতে হবে যাতে (R), (G) এবং (B) এর সমপরিমাণ নিয়ে সাদাউদ্দীপনা (W) বা সাদাবর্ণের সৃষ্টি করা যায়।

এই সংজ্ঞায় একক পরিমাণ (X) [যে কোনো বর্ণ] হোল এমন এক পরিমাণ যা (R), (G), (B) উদ্দীপনার সংযোগ-মূলক মিশ্রণের দ্বারা সৃষ্ট হয়েছে এবং ওই তিনটি **উদ্দীপনার পরিমাণ** ত্রিবর্ণ ভিত্তিক এককে এমনভাবে নির্বাচিত হয়েছে যাতে **তাদের যোগ ফলের সমান** 1 হয়।

যদি এই ভিত্তিতে (R), (G) এবং (B) উদ্দীপনার পরিমাণ যথাক্রমে

r, g এবং b হয় তবে $r + g + b = 1$

এবং $1.0\ (X) = r(R) + g(G) + b(B)$ .... (1)

সমীকরণ (1) হোল একক ত্রিবর্ণভিত্তিক সমীকরণ (Unit Trichromatic Equation) এবং r, g. b হল তাদের ত্রিবর্ণ ভিত্তিক সহগ বা ত্রিবর্ণ ভিত্তিক স্থানাংক।

(1) নং সমীকরণে উল্লেখিত (X) বর্ণের পরিমাণকে এক ত্রিবর্ণভিত্তিক একক বা T একক বা বলা হয় এবং ≅ এর অর্থ আগেই বলা হয়েছে সমীকরণের ডান পাশের রাশিগুলোর মিশ্রণে, বামপাশের বর্ণ তৈরি হয়েছে।

এই ধরনের একক ত্রিবর্ণ ভিত্তিক সমীকরণে যে কোনো দুটি স্থানাংক জানা থাকলে তৃতীয় স্থানাংক $r + g + b = 1$ সম্পর্ক ব্যবহার করে সহজেই জানা যায়।

TABLE—1

mμ	r	g	b	mμ	r	g	b
440	–·008	·005	1·00	580	·645	·358	–·003
460	–·091	·052	1·04	600	·847	·154	–·001
480	–·367	·291	1·08	620	·942	·058	·000
500	–1·168	1·390	·778	640	·980	·020	·000
520	–·983	1·853	·130	660	·994	·006	·000
540	–·171	1·163	·008	680	·998	·002	·000
560	+·316	·688	–·004	700	1·000	·000	·000

অতএব (X) হচ্ছে যে কোন দুটি চলরাশির (variable) অপেক্ষক (function) এবং লেখচিত্রের সাহায্যে (X) বর্ণের সৃষ্টি কিভাবে হয়েছে তার ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব। এই ধরনের লেখচিত্রকে বর্ণময়তা লেখ (chromaticity diagram) বলা হয়।

এভাবে গণিতের সাহায্য নিয়ে লেখচিত্রের সাহায্যে আমাদের বক্তব্যকে পরিস্ফুট করা যেতে পারে।

এই বর্ণময়তা লেখে, (R) প্রাথমিক উদ্দীপনার আপেক্ষিক পরিমাণ (ভগ্নাংশে প্রকাশিত) r কে x অক্ষ বরাবর এবং অপর প্রাথমিক উদ্দীপনা (G) এর আপেক্ষিক পরিমাণ g কে y অক্ষ বরাবর প্রকাশ করা হয়। অবশিষ্ট বা তৃতীয় প্রাথমিক উদ্দীপনা (B) র আপেক্ষিক পরিমাণে $r + g + b = 1$ সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়।

এই ধরনের লেখচিত্রের সাহায্যে বর্ণময়তা (chromaticity) ব্যাখ্যা করার জন্য আদর্শ বর্ণগুলির ক্ষেত্রে এমন এক বিশেষ ধরনের একক ব্যবস্থার সাহায্য নেওয়া হয়েছে যাতে সাদা উদ্দীপনার ক্ষেত্রে $r = g = b = {}^1/_3$ হয়।

এই লেখচিত্রে লাল উদ্দীপনা (R) এর স্থানাংক (1,0) , সবুজ উদ্দীপনার (G) এর স্থানাংক (0, 1) এবং নীল উদ্দীপনার (B) স্থানাংক (0, 0) এবং সমশক্তি সম্পন্ন উৎস থেকে নিঃসৃত সাদা (W) র স্থানাংক $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3})$।

এই বর্ণময়তা লেখচিত্রে সংযোগসূত্রের প্রয়োগ করে নূতন বর্ণসৃষ্টি ব্যাখ্যা করা যেতে পারে।

যদি A ও D বিন্দুর দ্বারা দুটি আলোক উৎসের বর্ণময়তা প্রকাশ করা যায়, এবং ত্রিবর্ণ ভিত্তিক এককে তাদের ঔজ্জ্বল্য যথাক্রমে M_A, M_D হয়, তবে তাদের যোগ করে যে বর্ণ মিশ্রণ পাওয়া যায় তার উজ্জ্বলতা হবে $(M_A + M_D)$ এবং C বিন্দুতে সেই বর্ণময়তা প্রকাশ পাবে। যদি A ও D বিন্দুতে যথাক্রমে দুটি ভর MA ও MD থাকতো, তবে C বিন্দুতে তাদের ভরকেন্দ্র থাকতো। বর্ণ মিশ্রণে C-র ভূমিকা সেইরকম এক ভর কেন্দ্রের মাপ।

বিশুদ্ধ বর্ণালীর বর্ণসমূহ এই বর্ণময়তা লেখচিত্রের বিভিন্ন বিন্দুর দ্বারা প্রকাশিত হয় এবং একটি রেখা দিয়ে

এই বিন্দুগুলি যোগ করলে যে বক্র পাওয়া যায় তাকে বলা হয় বিশুদ্ধ বর্ণালী সঞ্চার পথ (pure spectrum locus)। আলোকের প্রকট তরঙ্গ দৈর্ঘ্য (dominent wave length) এই লেখতে বিশেষ বিশেষ স্থানাংক বিন্দুর সাহায্যে প্রকাশিত হয়। সেইরকম একটি বিন্দু হোল D। লেখচিত্রের সাদা উদ্দীপনার সূচক বিন্দু S থেকে D বিন্দুর ভিতর দিয়ে সঞ্চার পথ পর্যন্ত রেখা টানলে D বিন্দুর অবস্থান ওই রেখার উপরেই থাকে। যতই বর্ণালীর বিশুদ্ধতা বাড়ে ততই D বিন্দু বর্ণালী সঞ্চার পথের দিকে সরে যায়।

লেখ থেকে দেখা যাচ্ছে বিশুদ্ধবর্ণালী সঞ্চার পথের আকার উত্তল এবং (0,0), (1,0) এবং (0,1) শীর্ষ বিন্দু বিশিষ্ট ত্রিভুজের বাইরের দিকে থাকে। পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে যেভাবে জানা গেছে যে বিশুদ্ধ বর্ণালি বর্ণ সাধারণভাবে আদর্শ উদ্দীপনাগুলির শুধুমাত্র সংযোগমূলক মিশ্রণে তৈরী হয় না, বরঞ্চ কোন কোন ক্ষেত্রে অল্প সাদা বা অল্প পরিমাণে, তৃতীয় উদ্দীপনা, অন্য দুই বর্ণের মিশ্রণে উৎপন্ন বর্ণের সঙ্গে মিলালে প্রার্থিত বর্ণ পাওয়া যায়। বর্ণময়তা লেখচিত্র সেই বক্তব্যের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্য পূর্ণ বা সহমত পোষণ করে।

নিচের সারণীর প্রথম স্তম্ভে বর্ণালীতে তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের অবস্থান, এবং বাকি তিনটি স্তম্ভে মিশ্রণে লাল (r), সবুজ (g) এবং নীলচে বেগুনী রঙ (b) র ভগ্নাংশে প্রকাশিত পরিমাণ। ঋণাত্মক চিহ্নের দ্বারা বোঝানো হয়েছে, বর্ণ সৃষ্টির সময় আলোচ্য বর্ণের ভগ্নাংশ পরিমাণ বর্ণ সমীকরণের অপর পাশে রয়েছে।

উদাহরণ হিসাবে, সারণীর ৩নং পংক্তিতে 480mμ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য সম্পন্ন বর্ণালী বর্ণ তৈরি করার সময় লাল উদ্দীপনা এককের 0.367 ভগ্নাংশ পরিমাণ আলোচ্য বর্ণের সঙ্গে যোগ করলে সবুজ উদ্দীপনা g এককের 0.291 পরিমাণ ও নীল উদ্দীপনার b এককের 1.08 ভগ্নাংশের মিশ্রণে উৎপন্ন বর্ণের সঙ্গে সদৃশ হবে।

যে এককে r, g, b কে মাপা হয়েছে, তারা সমানভাবে উজ্জ্বল নয়। তাদের ঔজ্জ্বল্য যথাক্রমে 1 : 4.591: 0.060। অনুপাতে রয়েছে এর ফলে গোটা বর্ণময়তা লেখ চিত্র জুড়ে বিভিন্ন বর্ণকে সমান ভাগে জায়গা করে দেওয়া সম্ভব হয়েছে।

যদি ব্যবহৃত একক উদ্দীপনাগুলির উজ্জ্বলতা সমান হোত, তবে সাদা বর্ণ হলুদ বর্ণের খুব কাছে চলে যেতো। সেই ক্ষেত্রে অতি অল্প পরিমাণে নীল মিশিয়ে দিলে গোটা মিশ্রণের বর্ণই পাল্টে যেতো।

এই ধরনের অসমান ঔজ্জ্বল্যের জন্য বর্ণময়তা লেখের সর্বত্র উজ্জ্বলতার পরিমাণ এক হয় না। সবুজ অঞ্চলের উজ্জ্বলতা সবচেয়ে বেশি-আর সবচেয়ে কম উজ্জ্বলতা হোল নীল অঞ্চলে।

14b.10 বস্তুর বর্ণ বা রঙ (colour of bodies)

কোনো বস্তুর উপর সাদা আলো পড়লে, সেই সাদা রঙের ভিতরে থাকা দৃশ্য বর্ণালীর 7টি রঙের মধ্যে (V,I,B,G,Y,O,R = বে, নী, আ, স, ক, লা) সে এই রংগুলিকে পুরোপুরি শোষণ করতে পারে। বস্তুটি অস্বচ্ছ হলে অন্য রঙের শোষণ ছাড়াও বাকি রংকে সে প্রতিফলিত করতে পারে। আবার বস্তুটি স্বচ্ছ হলে পরিমাণে সামান্য হলেও শোষণ, প্রতিফলন বাদে অন্য রংগুলিকে নিঃসরণ (transmission) করতে পারে। এভাবে সাদা আলোর ভিতরে থাকা বর্ণগুলি বা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যকে শোষণ, প্রতিফলন এবং নিঃসরণ এই তিন পদ্ধতির যৌথ ক্রিয়ার

ফলে যে কোন বস্তুর রং বা বর্ণ নির্দেশিত হয়। অর্থাৎ যে রঙের আলো বস্তুটি নিঃসরণ বা প্রতিফলিত করতে পারে সেই রং-ই বস্তুর রং বা বর্ণ হয়ে দাঁড়ায়।

যদি এক টুকরো লাল রঙের কাচের ভিতর দিয়ে দৃশ্যমান বর্ণালীর দিকে তাকাই, তবে আমরা বর্ণালীর লাল অংশটুকুই দেখতে পাবো। সবুজ কাচ বর্ণালীর সবুজ অংশকে নিঃসরণ করলেও, লাল আলোকে শোষণ করে নেয়, এবার, যদি লাল কাচের টুকরোকে সবুজ আলোতে কিংবা সবুজ কাচের টুকরোকে লাল আলোর মধ্যে রাখা হয়, তবে দুটো রঙিন টুকরোকেই কালো দেখাবে। আবার লাল ও সবুজ রঙের দুটি কাচের টুকরে একসঙ্গে দিনের আলোতে রাখলেও, সেই সমন্বয়কে আগের মতোই কালো দেখাবে। কারণ তার ভিতর থেকে কোন আলোই নিঃসৃত হয়ে বাইরে আসতে পারে না। এ ঘটনা থেকে প্রমাণিত হোল স্বচ্ছ বস্তুর রং নিঃসরণের দ্বারা নির্ধারিত হয়।

অস্বচ্ছ বস্তু হিসাবে জবাফুলকে দিনের আলোতে লাল দেখায়, তার কারণ জবাফুলটি দৃশ্যবর্ণালীর আর সমস্ত রং শোষণ করলেও লাল রঙকে প্রতিফলিত করে। ফুল থেকে প্রতিফলিত হয়ে লাল তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো এসে চোখে পড়লে, ফুলটিকে তখন লাল দেখি। আবার এক টুকরো খুব পাতলা সোনার পাতকে হলুদ আলোয় রাখলে প্রতিফলনের ফলে পাতের রং আমাদের চোখে কমলাটে-হলুদ (কমলা রং + হলুদ রং) বলে মনে হবে। আবার সেই পাত থেকে নিঃসৃত আলোকে আমাদের নীলচে সবুজ রং-এর বলে মনে হয়।

এইভাবে বিশেষ বর্ণকে বাছাই করে তার প্রতিফলন বা নিঃসরণকে বলা হয় বৃত প্রতিফলন (selective reflection) বা বৃত শোষণ (selective transmission)। এই ধরনের বৃত প্রতিফলন এবং বৃত শোষণ বস্তুর রঙের ভিতরে নানা বৈচিত্র্য আনে।

এখন প্রশ্ন: রঙিন কাচের গুঁড়োর রং কেমন হবে? এর উত্তর হোল: রঙিন কাচের গুঁড়োর উপরে সাদা আলো ফেললে, কাচের গুঁড়োকে সাদা দেখাবে। এর কারণ হোল প্রতিটি আপতনের সময়, আপতিত সাদা আলোর কিছু অংশ প্রতিবারই প্রতিফলিত হয়। এভাবে বিপুল সংখ্যক প্রতিফলনের দরুন চূড়ান্ত প্রতিফলনে কাচের যে রঙ ছিল সেই রং-এর তুলনায় সাদা আলোর পরিমাণ অনেক বেশি হওয়ায় রঙিন কাচের চূর্ণ সাদা দেখায়।

দুটি ভিন্ন রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণ (Mixture of two pigments)

এক বা একাধিক রঞ্জক পদার্থের সঙ্গে উপযুক্ত ধরনের তরল মিশিয়ে রং তৈরি করে অংকন শিল্পীরা ছবি আঁকেন।

এ ধরনের দুটি ভিন্ন বর্ণের রঞ্জক পদার্থ মিশিয়ে যে বর্ণ বা রং পাওয়া যায় তা কিন্তু দুটি বর্ণ বা দুটি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোক উদ্দীপনার মিশ্রণের বর্ণ থেকে পৃথক হয়।

যেমন হলুদ ও নীল বর্ণের আলো মিশালে, মিশ্রণ থেকে যে আলো পাওয়া যায়, তা আমাদের চোখে সাদা আলোর অনুভূতি সৃষ্টি করে।

কিন্তু হলুদ ও নীল রঙের দুটি রঞ্জক পদার্থ মিশালে মিশ্রণের বর্ণ সবুজ হয়। এক্ষেত্রে মিশ্রণের বর্ণ বৃত শোষণ বা বৃত নিঃসরণ পদ্ধতির সাহায্যে স্থির হোল।

হলুদ বর্ণের রঞ্জক পদার্থের উপরে সাদা আলো পড়লে আপতিত সাদা আলোর কেবল মাত্র হলুদ ও তার পার্শ্ববর্তী সবুজ আলো প্রতিফলিত হয়ে চোখে পড়ে আর বাকি রংগুলি শোষিত হয়। এখানে হলুদ ও সবুজ রঙের বৃত প্রতিফলন হয়েছে।

নীল বর্ণের রঞ্জক পদার্থের উপরে সাদা আলো পড়লে নীল রঞ্জক পদার্থ সাদা আলোর দৃশ্যমান বর্ণালীতে উপস্থিত নীল ও তার পার্শ্ববর্তী সবুজ আলোকে বৃত প্রতিফলনের দ্বারা আমাদের চোখে পাঠায়।

এখন এই দুই বর্ণ অর্থাৎ হলুদ ও নীল রঙের রঞ্জক পদার্থের ওপর সাদা আলো ফেললে, কেবলমাত্র সবুজ বর্ণের আলোই ওই দুটি পদার্থের দ্বারা শোষিত না হয়ে প্রতিফলিত হবে। আর বাকি দুটি বর্ণ হলুদ ও নীল রং একে অপরকে শোষণ করে নেবে। ফলে ওই দু'রঙের রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণ থেকে শুধু সবুজ আলো আমাদের চোখে পড়ে বলে আমরা সেই মিশ্রণকে সবুজ দেখি —

প্রশ্ন: (১) বর্ণ কাকে বলে। কিভাবে লাল ফুলকে চোখে লাল দেখায়?

প্রশ্ন: ২) রঞ্জক পদার্থ কাকে বলে? রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণের রং এবং দুটি ভিন্ন বর্ণের আলোর মিশ্রণের রং কেন পৃথক হয়?

প্রশ্ন: ৩) বর্ণময়তা লেখ কি, তার সাহায্যে আমরা কিভাবে কোন বস্তুর রং ঠিক করি?

14b.11 বর্ণান্ধতা (Colour blindness)

অন্ধকার বীক্ষণে যেমন রাতকানা রোগ, আলোক বীক্ষণে এক বা একাধিক বর্ণের বীক্ষণের সময় বীক্ষণ যন্ত্রের ত্রুটির জন্য বর্ণান্ধতা দেখা যায়।

বর্ণান্ধতাকে তিনভাগে ভাগ করা হয়—

(১) ব্যতিক্রমী ত্রিবর্ণ দর্শন (anamalous trichromatism)

(২) দ্বিবর্ণ দর্শন (dichromatism)

এবং (৩) একবর্ণ দর্শন (mono chromatism)

(১) ব্যতিক্রমী ত্রিবর্ণ দর্শন ঃ

স্বাভাবিক চোখ ও বিকারগ্রস্ত চোখ উভয়েই দৃশ্যবর্ণালীর সব কটি বর্ণ উৎপাদনে তিনটি মূল বর্ণের ব্যবহার করে থাকে। তবে একজন স্বাভাবিক ব্যক্তি কোনো এক নির্দিষ্ট বর্ণ উৎপাদনের সময় তিনটি মূল বর্ণকে যে অনুপাতে ব্যবহার করে, ব্যতিক্রান্ত ত্রিবর্ণদর্শীদের ক্ষেত্রে সেই পরিমাণ আরও বেশি হয়।

এই ধরনের বর্ণান্ধতাকে আবার তিন ভাগে ভাগ করা হয়েছে ঃ

(ক) লোহিত বিচ্যুতি (Protanomaly) ঃ এ ক্ষেত্রে লাল রঙের প্রতি সংবেদনশীলতা স্বাভাবিক ক্ষেত্রের তুলনায় কম হয়। এই ধরনের বর্ণান্ধতা পারিবারিক সূত্র থেকে আসে।

(খ) সবুজ বিচ্যুতি (denteranomaly) ঃ এ ক্ষেত্রে সবুজ-অনুভূতি স্বাভাবিকের চেয়ে কম হয়। এটিও সাধারণত বংশগত ত্রুটি।

(গ) নীলবিচ্যুতি (triamony) ঃ এতে নীল অনুভূতি স্বাভাবিকের অপেক্ষা কম হয়। এ ধরনের বর্ণান্ধতা খুবই বিরল।

দ্বিবর্ণ দর্শন (dichromatism) **ঃ**

দ্বিবর্ণ বর্ণান্ধ লোকেরা তিনটি মূলবর্ণের মধ্যে একটি বর্ণ ছাড়া অপর দুটি বর্ণের মধ্যে পার্থক্য বুঝতে না পারার জন্য মাত্র দুটি বর্ণকে দেখতে পায়।

এই শ্রেণীর বর্ণান্ধতাকেও তিন ভাগে ভাগ করা যায়।

(a) লোহিত বর্ণান্ধতা (Protanopia), (b) সবুজ বর্ণান্ধতা (dueternopia) এবং (c) নীল বর্ণান্ধতা (tritanopia)

লোহিত বর্ণান্ধরা যেমন নীল রং ছাড়া লাল ও সবুজের মধ্যে পার্থক্য করতে পারে না, তেমনি সবুজ বর্ণান্ধ দর্শকেরা সবুজ রং ছাড়া মূলবর্ণের অন্য দুটি রং দেখতে পায়। অতি বিরল নীল বর্ণান্ধরা তেমনি নীল রং ছাড়া অন্যদুটি মূলবর্ণ দেখতে পায়।

একবর্ণ দর্শন ঃ

একবর্ণ দর্শনকে বলা হয় রাত্র্যন্ধতা বা রাতকানা রোগের (night blindness) বিপরীত অবস্থা। এই ত্রুটিতে চোখের দন্ড গ্রাহককোষ-কার্যকর থাকলেও, শংকুগ্রাহক কোষের বর্ণানুভূতি নষ্ট হয়। ফলে দিনের আলোতে এ জাতীয় বর্ণান্ধ ব্যক্তি গোটা পৃথিবীকে অন্ধকার বা ধূসর দেখে।

ইয়ং হেলস্ হোলজ মতবাদ :

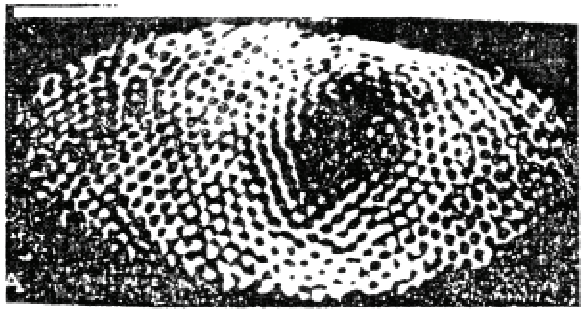
এই বর্ণান্ধতাকে ব্যাখ্যা করার জন্য সর্ব প্রাচীন ব্যাখ্যা হোল সম্পূর্ণ পৃথক তিনটি বর্ণের জন্য প্রতিটি স্বাভাবিক চোখে তিন ধরনের শংকু গ্রাহক কোষ রয়েছে। তাদের প্রত্যেকে এক একটি বিশেষ বর্ণকে তুলনামূলকভাবে অধিকতর পরিমাণে গ্রহণ করার ক্ষমতা রাখে। এদের মধ্যে কিছু কোণ লাল আলোতে বেশি উদ্দীপ্ত হয়। কেউবা নীল আলো আবার কোনটি হয়ত সবুজ আলোর প্রতি তার সংবেদনশীলতা দেখায়। যেসব দর্শকের চোখে এ ধরনের দু-প্রস্থ শংকু গ্রাহক কোষ অনুপস্থিত বা নিষ্ক্রিয় থাকে তারা সম্পূর্ণ বর্ণান্ধ। আবার যাদের ক্ষেত্রে যেকোনো একপ্রস্থ শংকু কোষ অনুপস্থিত থাকে অর্থাৎ হয় লাল আর না হয় নীল-সংবেদী শংকুকোষ অনুপস্থিত থাকে তারা দ্বিবর্ণ-বর্ণান্ধ এবং যেহেতু স্বাভাবিক সুস্থ চোখ তিনটি মৌলিকবর্ণকে সমানভাল দেখতে পায় ও তাদের পার্থক্য বুঝতে পারে, সেজন্য এ ধরনের দর্শককে বলা হয় ত্রিবর্ণ দর্শক (Trichromates)।

আধুনিককালে পূর্বের মতবাদের পরিবর্তে বিরুদ্ধ প্রক্রিয়াশ্রয়ী মতবাদে (opponent process theory) বলা হয়েছে কিছু কিছু তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো বা বর্ণ স্নায়ুপক্ষের গ্যাংগ্লিয়ন কোষে উদ্দীপনা সৃষ্টি করলে, অন্য বর্ণেরা সেখানে বাধার সৃষ্টি করে।

এইসব রং হল লাল ও সবুজ, হলুদ ও নীল এবং সাদা ও কালো। জুটি বর্ণালীগত দৃষ্টিকোণ থেকে দেখা যায় প্রথম দুটি তরঙ্গ যুগলের জন্য যেমন সাদা আলোর সৃষ্টি হয়, তেমনি সাদা-কালোর সংমিশ্রণে অন্ধকার বা ধূসর বর্ণের জন্য দায়ী।

এই তত্ত্বে আরও বলা হয়েছে কোনো দর্শন স্নায়ু হয়ত এইসব বর্ণ যুগলের মধ্যে কোনো একটি রং ধরা যাক হলুদকে বেশি পরিমাণে মস্তিষ্কে বয়ে নিয়ে গেল অথচ স্বাভাবিক পরিমাণ নীল রংকে সে বহন করে নিয়ে গেল না। আবার অনুরূপভাবে লাল ও সবুজের মধ্যে সবুজ উদ্দীপনা লালের অপেক্ষা বেশি পরিমাণে মস্তিষ্কে গচ্ছিত হোল। ফলে বর্ণযুগলের মধ্যে যে সমতা থাকলে প্রার্থিত বর্ণের সৃষ্টি হতো, তার ব্যাঘাত ঘটে, তার জন্য বর্ণানুভূতিতে ত্রুটি ঘটে। এই বর্ণানুভূতির ত্রুটিই হল বর্ণান্ধতা।

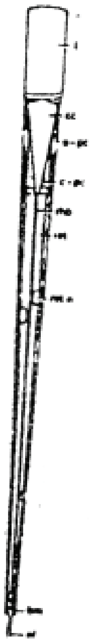
14b.2 পতঙ্গের পুঞ্জাক্ষি (Compound eye of insects)



এই জীবজগতে একমাত্র মানুষেরই যে চোখের মতো দৃষ্টি যন্ত্র আছে তা' নয়, অন্যান্য মেরুদন্ডী প্রাণীদেরও চোখ আছে। নিম্ন শ্রেণীর প্রাণীদের অনেকের চোখ তেমন সুগঠিত বা জোরালো না হলেও, অমেরুদন্ডী শ্রেণীর পতঙ্গদের অনেকেরই পুঞ্জাক্ষি নামে বেশ উন্নত ধরনের চোখ রয়েছে। আবার কোন কোন পতঙ্গের বড়বড় পুঞ্জাক্ষি ছাড়াও বাড়তি সরল চোখ রয়েছে।

মৌমাছির পুঞ্জাক্ষি এখানে আমাদের আলোচনার বিষয়। বৈজ্ঞানিকেরা মধুর প্রতি মৌমাছির স্বাভাবিক টানকে কাজে লাগিয়ে, তাদের পুঞ্জাক্ষির বীক্ষণ সম্পর্কে অনেক তথ্য সংগ্রহ করেছেন। সেই সংগৃহীত তথ্য একদিকে যেমন চিত্তাকর্ষক তেমনি অন্যদিকে কীট পতঙ্গের বীক্ষণ বিজ্ঞানের অনেক অজানা দিগন্ত আমাদের কাছে উন্মুক্ত করেছে। লাল বা নীল রঙের কাগজে মধু রেখে পরীক্ষা করেছেন, কোন রঙের কাগজের মধু মৌমাছিকে আগে আকর্ষণ করে? আমাদের চোখে যা সাধারণভাবে সাদা, সেই সব সাদা ফুলকে এক জায়গায় রেখে তাঁরা পরীক্ষা করে দেখেছেন মৌমাছির চোখে সব সাদা ফুলই একরকম সাদা নয়। সাদারও রকম ফের আছে। কিভাবে তারা বিভিন্ন রঙের মধ্যে পার্থক্য বোঝে? সাধারণভাবে একই রং-এর মনে হলেও তারা যে বিভিন্ন—এ পার্থক্যকে তারা কোন কৌশলে পৃথক করতে পারে ? বৈজ্ঞানিকেরা তার সুষ্ঠু ব্যাখ্যা দিয়েছেন। মানুষের চোখ দৃশ্যবর্ণালীর লাল (তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 7000Å) থেকে বেগুনী (400Å) পর্যন্ত রংগুলিকে দেখতে পায়। কিন্তু মৌমাছিরা সে জায়গায় (400Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের)বেগুনী রং ছাড়িয়ে আরও নিচের দিকে (3000Å পর্যন্ত বিস্তৃত) অতি বেগুনী রশ্মিও দেখতে পায়। তাই

ফুলের যে সব রং আমরা দেখতে পাই না মৌমাছিরা সেগুলি অনায়াসে দেখে। এই সমস্ত রঙ কোনো বিশেষ ফুলের প্রতি মৌমাছিদের আকর্ষণ করার জন্য সংকেত হিসাবে ব্যবহৃত হয়ে থাকে।



চিত্র 14.9

আমরা জানি কোনো ফুল সাদা তার অর্থ হোল ফুলটি সূর্যের সাদা আলোতে থাকা বহু তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের কোনটিই শোষণ করে না — সবগুলিকেই প্রতিফলিত করে। মৌমাছিরা জানে সাদা ফুলটি দৃশ্যবর্ণালীর সবগুলি রংকেই প্রতিফলিত করে ফেরত পাঠালেও অতি বেগুনী রশ্মিকে বিভিন্ন মাত্রায় শোষণ করে। ফলে মৌমাছিরা সহজেই বুঝতে পারে সাধারণভাবে সাদা ফুলগুলি ভিন্ন ভিন্ন মাত্রায় অতি বেগুনী রশ্মি প্রতিফলিত করছে। এভাবেই কোনো সাদা ফুলই মৌমাছির কাছে সাদা নয়। কারণ, কোনো সাদা ফুলই আপতিত অতি বেগুনি রশ্মির শতকরা একশোভাগই প্রতিফলিত করতে পারে না।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে মৌমাছিরা লাল আলো দেখতে পায় না। আমাদের ধারণা মতো সব লাল ফুলকেই মৌমাছির চোখে কালো দেখা উচিত। কিন্তু তা হয় না। যে কোনো ধরনের লাল ফুলকে খুঁটিয়ে দেখলে আমাদের চোখেও ধরা পড়ে লাল ফুল থেকে লাল রঙ ছাড়াও একটা নীলচে রং বেরিয়ে আসছে। এভাবে নীলচে রং বেরিয়ে আসার কারণ হিসাবে বলতে পারি লাল ফুলটি লাল রং ছাড়াও বাড়তি অল্প নীল রং-ও প্রতিফলিত করে — যা মৌমাছির চোখ এড়ায় না। এর ফলেই লাল বর্ণান্ধ মৌমাছিরা কি পরিমাণ নীল রঙ প্রতিফলিত হচ্ছে তার ওপর ভিত্তি করে বিভিন্ন ধরনের লাল ফুলকে চিহ্নিত করতে পারে।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে একই ফুলের বিভিন্ন পাপড়ি থেকে ভিন্ন ভিন্ন পরিমাণ অতি বেগুনি রশ্মি প্রতিফলিত হয়ে বেরিয়ে আসে। যদি আমাদের চোখ অতি বেগুনি রশ্মি দেখতে পেতো তাহলে ফুলগুলিকে আরও সুন্দর, আরও পৃথক দেখাতো।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে কিছু কিছু লাল ফুল একেবারেই নীল বা অতি বেগুনী রশ্মি প্রতিফলিত করে না। মৌমাছিরা এ ধরনের ফুলকে কালো বলেই দেখবে। আবার মৌমাছিরা এসব ফুলকে কালো দেখলেও, এক ধরনের মধু-খাদক ছোট পাখি হামিংবার্ডের কাছে তারা লাল-ই! কারণ হামিবার্ডেরা লাল রঙ ভালো দেখতে পায়।

মৌমাছির বীক্ষণ ক্রিয়ার আরও একটি চিত্তাকর্ষক দিক হোল আকাশে সূর্যকে সরাসরি না দেখেও আলোকিত নীল আকাশের এক ক্ষুদ্র অংশ দেখে মৌমাছিরা সূর্যের দিক ঠিক করে নেয়। আমাদের পক্ষে এ ধরনের কাজ করা সম্ভব নয়। সূর্যকে সরাসরি না দেখে বা মেঘে ঢাকা আকাশের অতি ক্ষুদ্র নীল রঙের একটা টুকরো দেখে সূর্যের দিক ঠিক করা আমাদের পক্ষে অসম্ভবের পর্যায়েই পড়ে। মৌমাছিরা তা করতে পারে কারণ মৌমাছিদের চোখ

আলোক সমবর্তন (poliration) ক্রিয়ার প্রতি অতি মাত্রায় সংবেদনশীল এবং আকাশ থেকে প্রতিক্ষিপ্ত (scattered) আলোক সমবর্তিত।

মানুষের চোখ যেখানে প্রতি সেকেন্ডে কুড়িটি পর্যন্ত আলোক স্পন্দন (fliculer) দেখতে পায় বা বুঝতে পারে সেখানে মৌমাছিরা অনায়াসে প্রতি সেকেন্ডে দু'শোর মতো স্পন্দন দেখতে পায়! মৌচাকের উপরে মৌমাছিদের বিচরণ এবং তার সঙ্গে তাদের ডানার সঞ্চালন এত দ্রুত হয় যে, আমাদের চোখ তার সঙ্গে তাল না রাখতে পারলেও, মৌমাছিরা সেই ক্ষিপ্রতা অনায়াসে বুঝতে পারে।

মৌমাছিদের যে বীক্ষণ সূক্ষ্মতার পরিচয় এতক্ষণ ধরে পেয়েছি, এবার তার উৎস এবং প্রকৃতি সম্বন্ধে আলোচনা করবো।

মৌমাছির মাথার বাইরের দিকে প্রায় গোলীয় এক তলের উপরে প্রচুর পরিমাণে বিশেষ ধরনের অক্ষিকোষ "অক্ষিকা" (ommatadia) কৌণিকভাবে সাজিয়ে মৌমাছির পুঞ্জাক্ষি তৈরি হয়েছে। এই ধরনের অক্ষিকোষগুলি আবার কয়েকটি অণু-অক্ষিকা (ommatadium) দিয়ে গঠিত। এ ধরনের অণুঅক্ষিকার ছবি পাশে দেওয়া হোল। প্রতিটি অণু অক্ষিকার শীর্ষে লেন্সের মতো একটা স্বচ্ছ জায়গা রয়েছে। তাকে লেন্সের মতো না বলে ফিল্টার বা আলোক-নল (light tube) বলাটা বোধহয় অধিকতর যুক্তিযুক্ত হবে। কারণ অণু-অক্ষিকার ভিতরে একট সরু সুতোর মত অংশ বেয়ে আলোর ধারা নেমে যায়। সম্ভবত: আলো এখানেই শোষিত হয়, এই সুতোর শেষ প্রান্ত, দর্শন স্নায়ুসূত্রে এসে মিশেছে। এভাবে এক একটি অক্ষিকায় একটি কেন্দ্রীয় সূত্রের চারপাশে 6টি করে অণুঅক্ষিকা কেণিকভাবে এমন করে ঘিরে থাকে যাতে আলোচ্য সূত্রটি স্বতন্ত্র হিসেবে থাকে। এইভাবে তৈরি হয় মৌমাছির পুঞ্জাক্ষির এক একটি অক্ষিকা। এভাবে অনেক অক্ষিকা বা অক্ষকোষ কৌণিক সজ্জায় সারা চোখ জুড়ে সাজানো থাকে। কোনো একটি অক্ষিকা যদি একদিক থেকে সংবেদন গ্রহণ করে, তবে তার ঠিক পরের কোষটি অন্যদিক থেকে সংবেদন গ্রহণ করবে, এইভাবে পরের পর অক্ষিকা বা অক্ষিকোষগুলি কোণ বস্তু থেকে সংবেদন গ্রহণ করে কেন্দ্রীয় মস্তিষ্কে প্রেরণ করে এবং মৌমাছিরা দুটি অক্ষিকার মধ্যবর্তী অঞ্চল দিয়ে ভালোভাবে দেখতে পায় না। মৌমাছির চোখে যে বীক্ষণ-সূক্ষ্মতার সৃষ্টি হয় তা নিশ্চিতভাবে একটি কোণের সংঙ্গে সংশ্লিষ্ট হবে। সেই কোণটি হোল তার চোখের বক্রতা-কেন্দ্র সাপেক্ষে কোণ অণু অক্ষিকার (ommatidiam) শেষাংশের কোণ।

একটি অণু অক্ষিকা থেকে ঠিক তার পরের অণু অক্ষিকা পর্যন্ত এই কোণের মান হোল অক্ষিকার ব্যাস এবং চোখের ব্যাসার্ধের (r) অনুপাত।

$$\text{অর্থাৎ } \Delta\theta g = \frac{\delta}{r}$$

δ-র মান যত সূক্ষ্ম হবে ততই মৌমাছির চোখের বীক্ষণ সূক্ষ্মতা বাড়বে। তবুও এই δ-র মানকে একটা

নির্দিষ্ট মানের অপেক্ষা কম করা যায় না, তার কারণ তাতে অপবর্তনজনিত ত্রুটি এসে যাবে। আবার δ-র মান বেশি করলে বীক্ষণ বা দেখাটা ততো স্পষ্ট হবে না।

যদি এমন এক দূরত্ব (d) নির্বাচন করা হয়, যাতে অস্পষ্টতাজনীত ত্রুটি এবং অপবর্তনজনিত ত্রুটিকে ন্যূনতম রাখা সম্ভব হয় তবে সেক্ষেত্রে অক্ষিকার ব্যাস হবে — $\delta = \sqrt{\lambda r}$

যদি চক্ষুতলের ব্যাস $r = 3$ মিমি, এবং মৌমাছি যদি 4000Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে ভালো দেখতে পায় তবে

$\delta = \sqrt{3 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-7}}$ meter

$= 3.5 \times 10^{-5}$m বা 35μ

অতএব মৌমাছির চোখের আকার কত ক্ষুদ্র! আমাদের চোখের তুলনায় মৌমাছির চোখের বিশ্লেষণী ক্ষমতা অতীব অল্প।

আমাদের চোখে যে প্রতিবিম্ব গঠিত হয় তার আকার মৌমাছিদের চোখে গঠিত বিম্বের আকারের তুলনায় 30 গুণ ছোট। আমাদের চোখে গঠিত বিম্বের তুলনায় মৌমাছি আবছা ও অফোকাসিত বিম্ব দেখে। অবশ্যই তাদের চোখে সেটাই সবচেয়ে ভালো ব্যবস্থা । কারণ আমাদের চোখের মতো না আছে তাদের সুগঠিত চোখ, না আছে তাতে কোন চক্ষু লেন্স, ভাগ্যিস নেই! প্রথমত: মৌমাছিরা অতি ক্ষুদ্র প্রাণী। যদি আমাদের চোখের মতো তাদের চোখ হোত অবশ্যই তাদের অনুপাতে, তবে চক্ষু ছিদ্রের আকার হোত 30μ-র মতো। এতে তখন অপবর্তন ক্রিয়া এত উল্লেখযোগ্যভাবে বেড়ে যেত যার জন্য তাদের দেখার কাজটা একেবারেই ভালো হোত না। চোখের আকার কম হলে, সেই চোখে ভালো দেখা যায় না। বড় চোখে ভাল দেখে। আচ্ছা, ধরা যাক মৌমাছির চোখ তার মাথার মতো বড় বড় হোল। তাহলে তার গোটা মাথা জুড়েই চোখ থাকতো। পুঞ্জাক্ষির সবচেয়ে ভালো ব্যাপার হলো তার জন্য কোনো জায়গা না লাগা - মৌমাছির দেহতলের উপরে একটা পাতলা স্তরের মতো এটি থাকে (it is just a very thin layer on the surface of the bee) সেজন্য যখন আমরা বলি মৌমাছিদের আমাদের মতো দেখতে পাওয়া উচিত ছিল, তখন তাদের নিজস্ব সমস্যার কথা চিন্তা করা উচিত।

14b.13 আরও অন্য চোখের কথা (other eyes)

মৌমাছি ছাড়াও অপরাপর অনেক প্রাণীই রং দেখতে পায়। মাছ, প্রজাপতি, পাখি এবং অনেক সরীসৃপই রং চিনতে পারে অথচ অধিকাংশ স্তন্যপায়ী জীবই তা পারে না। পাখিরা নিশ্চিতভাবে রং দেখতে পায় এবং সেজন্য প্রকৃতিতে এত রঙিন পাখির ছড়াছড়ি। স্ত্রী পাখিদের মনোরঞ্জনে পুরুষ পাখির পালকে এত রঙের বাহার। পাখিদের যৌনমিলনে রঙের একটা বিশাল ভূমিকা রয়েছে। আমরা যখন কোনো ময়ূরের দিকে তাকাই তখন তাকে রাজকীয় বর্ণের উজ্জ্বল বিজ্ঞাপন বললেও খুব একটা বেশি বলা হয় না। বিস্ময়করভাবে একই সঙ্গে রঙের সুষমা

এবং কোমলতার সংমিশ্রণ ময়ূরের ক্ষেত্রে যে ভাবে হয়েছে তাতে ময়ূরীর রুচিকে সব প্রশংসার উর্ধ্বে রাখতে হয়।

সমস্ত অমেরুদণ্ডী প্রাণীদের ক্ষেত্রে দেখার জন্য হয় অগঠিত, ক্ষীণ দর্শন ক্ষমতাযুক্ত চোখ বা পুঞ্জাক্ষির ব্যবস্থা রয়েছে। আর সব মেরুদণ্ডী প্রাণীদের আমাদের চোখের মতো চোখ রয়েছে। তবে একটা ব্যতিক্রম আছে, অমেরুদণ্ডী প্রাণী অক্টোপাসের চোখ অন্যান্য অমেরুদণ্ডীদের চোখের তুলনায় অনেক উন্নত, সুগঠিত এবং পৃথক। অমেরুদণ্ডীদের তুলনায় অক্টোপাসের মস্তিষ্ক এবং তার ক্রিয়াকলাপ অনেক উন্নত, তাদের চোখে রয়েছে অচ্ছোদপটল বা কর্ণিয়া, চোখের পাতা, কণিনীকা এবং দুপাশের কক্ষে তরল নেত্ররস নিয়ে মাঝখানে চক্ষু লেন্স এবং সবশেষে অক্ষিপট। এ চোখ অমেরুদণ্ডীদের মতো বিন্দু চক্ষু (eye spot) বা পুঞ্জাক্ষির মতো নয়, একেবারে মেরুদণ্ডী প্রাণীদের চোখের অনুরূপ।

ভ্রূণঘটিত বিকাশের ক্ষেত্রে (in the embyonic development) মেরুদণ্ডী প্রাণীদের অক্ষিপট যেমন মস্তিষ্কের অংশ হিসাবে পরিগণিত হয়, অক্টোপাসের ক্ষেত্রেও আশ্চর্যজনকভাবে একই ঘটনা ঘটে। কিন্তু এই দুই-এর মধ্যে একটা চিত্তাকর্ষক পার্থক্য রয়েছে। তা হোল অক্টোপাসের চোখের আলোক সংবেদনী কোষগুলি থাকে ভিতরের দিকে আর বিশ্লেষণকারী কোষগুলি থাকে তাদের পিছনে অর্থাৎ বাইরের দিকে। আমাদের চোখের তুলনায় এই ব্যবস্থা একেবারে উল্টো। আমাদের বিবেচনায় প্রকৃতি যখন দেখলো যে কোষগুলির বাইরে থাকার কথা তাদের বাইরে এনে বিশেষ কোনো লাভ হয়নি, সেই ত্রুটি সংশোধনের জন্য তখন সে অক্টোপাসের চোখ দুটিকে খাড়া সোজাভাবে বাইরে ঠেলে বের করে আনলো।

সামুদ্রিক প্রাণী দানব ইকুইডের চোখের আকার সর্ববৃহৎ, তাদের এক একটা চোখের ব্যাস ১৫ ইঞ্চির মতো।

14b.15 প্রশ্নাবলি

(ক) অভিযোজন এবং উপযোজন কাকে বলে? এদের মধ্যে পার্থক্য কি?

(খ) আঁধার বীক্ষণ কি? আলোক বীক্ষণের সঙ্গে তার পার্থক্য কি?

(গ) আঁধার বীক্ষণে অক্ষিপটের কোন গ্রাহক কোষ অংশ নেয়? তাদের অবস্থা এ ধরনের বীক্ষণে কোন ভূমিকা নেয়?

উঃ অক্ষিপটের প্রান্তীয় অঞ্চলে অবস্থান হওয়ার দরুণ ক্ষীণ আলোকে বীক্ষণের কাজ, গতিশীলতা সংবেদন এবং অবার্ন (achromatic) বীক্ষণ অনুভূতি এবং একপেশে (adverted eye) বীক্ষণে ক্ষীণ আলোক উৎসের সনাক্তকরণ প্রভৃতি কাজে দন্ডগ্রাহক কোষেরা অংশগ্রহণ করে।

(ঘ) আলোক বীক্ষণের বৈশিষ্ট্য কি? [বর্ণানুভূতি, বীক্ষণ সূক্ষ্মতা প্রভৃতি]

প্রঃ পারকিনজি ক্রিয়া কি?

উঃ আঁধার বীক্ষণ থেকে আলোক বীক্ষণের সময় চোখের নিম্ন তরল দৈর্ঘ্য অঞ্চল থেকে উচ্চতর দৈর্ঘ্য অঞ্চলে বীক্ষণ সূক্ষ্মতা সরণকে পারকিনজি ক্রিয়া বলে।

(ঙ) বস্তুর বর্ণ কিসের উপর নির্ভর করে?

উঃ উজ্জ্বলতা, প্রকট তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এবং বর্ণ সংপৃক্তির উপর।

(চ) দৃষ্টি নির্বন্ধ কি? বর্ণ ক্লান্তির সঙ্গে তার পার্থক্য কি?

(ছ) বর্ণানুবেদন কাকে বলে ? বর্ণানুবেদন কয় প্রকার ও কি কি?

(জ) রাতকানা বা রাত্রন্ধতা (Night blindness) অসুখ কোন বীক্ষণের বৈশিষ্ট্য দন্ডগ্রাহক কোষের পর্যাপ্ত অনুপস্থিতি এর খাদ্যে ভিটামিন A-র অভাব রাতকানা রোগের জন্য দায়ী। এটি আঁধার বীক্ষণ ক্রিয়ার সঙ্গে সংযুক্ত।

(ঝ) প্রবল আলোয় আঁধার বীক্ষণ ব্যবস্থা নিষ্ক্রিয় হয়ে পড়ে কেন? কারণ আঁধার বীক্ষণ ব্যবস্থায় মূল অংশগ্রহণকারী দন্ডকোষের উপরে অবস্থিত রঞ্জক পদার্থ তীব্র আলোয় ভেঙে যেতে থাকে।

(ঞ) বীক্ষণ সূক্ষতা কি? কোন কোন শর্তে বীক্ষণ সূক্ষ্মতার মান সর্বাধিক হয় ? সর্বদা কি চোখ এই শর্ত মেনে চলে?

(ট) ভার্নিয়ার বীক্ষণ ও দ্বিনেত্র বীক্ষণের মধ্যে পার্থক্য কি?

ভার্নিয়া বীক্ষনে একটি চোখ বা দুটি চোখ যে কৌশলে মূল স্কেলের দাগ ও ভার্নিয়ার স্কেলের দাগের মধ্যে 1 মিলিমিটারের $\frac{1}{50}$ ভাগ পর্যন্ত সরণ দেখতে পায় তাকে ভার্নিয়া বীক্ষণ বলে।

দ্বিনেত্র দর্শনে বাঁ-চোখ বস্তুর বামদিকের অংশ এবং ডান চোখ বস্তুর ডান দিকের অংশ দেখে দর্শকের কাছে বস্তুর সম্পর্কে ত্রিমাত্রিক ধারণা, আপেক্ষিক অবস্থান ও গভীরতা সম্বন্ধে ধারণা জন্মায়।

14b.14 সারাংশ

আঁধার বীক্ষণ হোল অন্ধকারে বা ক্ষীণ আলোকে বীক্ষণ ব্যবস্থা। এতে অক্ষিপটের সংখ্যাগুরু দন্ডগ্রাহক কোন অংশ গ্রহণ করে তীব্র আলোতে দন্ডগ্রাহক কোষের উপরে রডোপসিন নামে এক ধরনের ক্রোমোপ্রোটিন থাকে তারা ভেঙে যায় এবং আঁধার বীক্ষণ ব্যবস্থা নষ্ট হয়ে যায়। পুনরায় অন্ধকারে গেলে স্বয়ংক্রিয় ব্যবস্থায় রডোপসিনের পুনঃ সৃজন হয় এবং অন্ধকার বীক্ষণের দক্ষতা ধীরে ধীরে অর্জিত হতে থাকে।

আলোক বীক্ষণ ব্যবস্থা হোল আঁধার বীক্ষণ ব্যবস্থার বিপরীত। তীব্র আলোতে শংকু গ্রাহক কোষের সক্রিয়তায় এ ধরনের বীক্ষণ চলে। উজ্জ্বলতার আপেক্ষিক পার্থক্যে চোখের বর্ণানুভূতি হয়। আলোক বীক্ষণে বস্তুর বর্ণ সম্পর্কে ধারণা জন্মায়। অন্ধকার থেকে আলোয় এলে একই চোখের চরম বীক্ষণ অনুভূতি অন্ধকারে নীল অঞ্চলের থেকে লাল অঞ্চলে সরে আসে, এই ঘটনা পারকিনজি ক্রিয়া নামে পরিচিত।

দৃষ্টি নির্বন্ধঃ যে কোন দৃশ্যই স্বাভাবিক চোখে $\frac{1}{10}$ সেঃ পর্যন্ত স্থায়ী হয়। এই সময়ের ভিতরে অন্য দৃশ্য এলে চোখ তাকে দেখতে পায় না। এই ঘটনাকে দৃষ্টি নির্বন্ধ বলে।

বর্ণ ক্লান্তি — একটানা একটি বর্ণের দিকে অনেকক্ষণ তাকিয়ে থেকে হঠাৎ চোখকে সরিয়ে নিলে সেই রঙিন বস্তুর জায়গায় অন্য বর্ণে রঞ্জিত তারই মতো বস্তুর অনুভূতি চোখ লেগে থাকে। এই ঘটনাকে বলা হয় বর্ণ ক্লান্তি লাল বস্তুর জায়গায় চোখ অন্যদুটি প্রাথমিক বর্ণ নীলাভ-সবুজ রঙে চিত্রিত বস্তুর প্রতিবিম্ব দেখে।

অনুবেদন: একটানা অনেকক্ষণ কোন বস্তুর দিকে তাকিয়ে থেকে হঠাৎ বস্তু থেকে চোখ সরিয়ে নিলে বা বস্তুকে চোখ থেকে সরিয়ে নিলে, চোখের উপর রেশ লেগে থাকে এ ঘটনাকে বলা হয় অনুবেদন (after image) অনুবেদন দু'রকমের অবার্ন অনুবেদন এবং সবর্ণ অনুবেদন বীক্ষণ সূক্ষ্মতা হোল মানুষের চোখের যে ক্ষমতার জন্য কোন বস্তুতে অবস্থিত দুটি স্বতন্ত্র ভৌত উদ্দীপনাকে পৃথকভাবে চিহ্নিত করা হয়।

বর্ণবীক্ষণ: উজ্জ্বল আলোকে, আলোক সহিষ্ণু চোখে এবং শংকু কোষের সাহায্যে দর্শন বস্তুর রং দেখতে পায়। সাদা আলোতে 7টি দৃশ্য রং রয়েছে। এদের মধ্যে লাল, সবুজ, নীল হোল মৌলীকরণ বা প্রাথমিক বর্ণ। কারণ এদের যথোচিত সংমিশ্রণে বর্ণালীর অন্যান্য রঙের সৃষ্টি হয়। পরিপূরক বর্ণ হোল, এমন দুটি বর্ণ যাদের মিশ্রণে সাদা আলোর অনুভূতি হয়। যেমন হলুদের সঙ্গে নীল মেশালে সাদা বর্ণের অনুভূতি জন্মায় বলে তারা পরস্পরের পরিপূরক বর্ণ।

বর্ণ মিশ্রণের সাহায্যে যে অন্য বর্ণ তৈরি হয় তাদের পরিমাণ নির্দিষ্ট করার জন্য ত্রিবর্ণভিত্তিক তন্ত্র রয়েছে।

বর্ণময়তা লেখ: এই লেখের সাহায্যে তিনটি প্রাথমিক বর্ণের সংমিশ্রণে কিভাবে বিভিন্ন বর্ণের সৃষ্টি হয়, সেই পরীক্ষালব্ধ ফলকে জ্যামিতিক উপায়ে বর্ণনা করা হয়েছে।

বস্তুর বর্ণ হল - সাদা আলোর দৃশ্যমান বর্ণালীর যে অংশ প্রতিফলন করে, সেই বর্ণই বস্তুর বর্ণ।

আর রঞ্জক পদার্থের বর্ণ সাদা আলোর দৃশ্যমান বর্ণালীর নির্বাচিত অংশের বৃত প্রতিফলন বা বৃতনিঃসরণের উপর নির্ভর করে।

তিনটি প্রাথমিক বর্ণের মিশ্রণের ফলে যে বর্ণের সৃষ্টি হয়, দুটি রঞ্জক পদার্থের মিশ্রণে সেই রংএর সৃষ্টি না-ও হতে পারে।

বর্ণান্ধতা হল চোখের একপ্রকার ত্রুটি যার জন্য যে বিশেষ বিশেষ বর্ণ দেখতে পায় না।

নিম্নশ্রেণীর অমেরুদন্ডী প্রাণীদের চোখে পুঞ্জাক্ষি নামে এক ধরনের বীক্ষণ ব্যবস্থা রয়েছে। পুঞ্জাক্ষি হল বহু সংখ্যক অণু- অক্ষিকার সমাহার। মৌমাছিরা পুঞ্জাক্ষি দিয়ে দৃশ্য বর্ণালীর অন্য রঙ ছাড়াও অতি বেগুনী রশ্মির নিঃসরণও বুঝতে পারে।

NOTES

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

NOTES