NETAJI SUBHAS OPEN UNIVERSITY

STUDY MATERIAL

ELECTIVE PHYSICS HONOURS

EPH 13

Structure of Atoms, Molecular Spectra and Solid State Physics

- Structure of Atoms, Molecular Spectra
- Block-1

প্রাক্‌কথন

নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়ের স্নাতক শ্রেণির জন্য যে পাঠক্রম প্রবর্তিত হয়েছে, তার লক্ষণীয় বৈশিষ্ট্য হল প্রতিটি শিক্ষার্থীকে তাঁর পছন্দমতো কোনো বিষয়ে সাম্মানিক (honours) স্তরে শিক্ষাগ্রহণের সুযোগ করে দেওয়া। এক্ষেত্রে ব্যক্তিগতভাবে তাঁদের গ্রহণ ক্ষমতা আগে থেকেই অনুমান করে না নিয়ে নিয়ত মূল্যায়নের মধ্য দিয়ে সেটা স্থির করাই যুক্তিযুক্ত। সেই অনুযায়ী একাধিক বিষয়ে সাম্মানিক মানের পাঠ-উপকরণ রচিত হয়েছে ও হচ্ছে—যার মূল কাঠামো স্থিরীকৃত হয়েছে একটি সুচিন্তিত পাঠক্রমের ভিত্তিতে। কেন্দ্র ও রাজ্যের অগ্রগণ্য বিশ্ববিদ্যালয় সমূহের পাঠক্রম অনুসরণ করে তার আদর্শ উপকরণগুলির সমন্বয়ে রচিত হয়েছে এই পাঠক্রম। সেইসঙ্গে যুক্ত হয়েছে অধ্যেতব্য বিষয়ে নতুন তথ্য, মনন ও বিশ্লেষণের সমাবেশ।

দূর-সঞ্চারী শিক্ষাদানের স্বীকৃত পদ্ধতি অনুসরণ করেই এইসব পাঠ-উপকরণের লেখার কাজ চলছে। বিভিন্ন বিষয়ের অভিজ্ঞ পণ্ডিতমণ্ডলীর সাহায্য এ কাজে অপরিহার্য এবং যাঁদের নিরলস পরিশ্রমে লেখা, সম্পাদনা তথা বিন্যাসকর্ম সুসম্পন্ন হচ্ছে তাঁরা সকলেই ধন্যবাদের পাত্র। আসলে, এঁরা সকলেই অলক্ষ্যে থেকে দূর-সঞ্চারী শিক্ষাদানের কার্যক্রমে অংশ নিচ্ছেন; যখনই কোনও শিক্ষার্থী এই পাঠ্যবস্তুনিচয়ের সাহায্য নেবেন, তখনই তিনি কার্যত একাধিক শিক্ষকমণ্ডলীর পরোক্ষ অধ্যাপনার তাবৎ সুবিধা পেয়ে যাচ্ছেন।

এইসব পাঠ-উপকরণের চর্চা ও অনুশীলনে যতটা মনোনিবেশ করবেন কোনো শিক্ষার্থী, বিষয়ের গভীরে যাওয়া তাঁর পক্ষে ততই সহজ হবে। বিষয়বস্তু যাতে নিজের চেষ্টায় অধিগত হয়, পাঠ-উপকরণের ভাষা ও উপস্থাপনা তার উপযোগী করার দিকে সর্বস্তরে নজর রাখা হয়েছে। এরপর যেখানে যতটুকু অস্পষ্টতা দেখা দেবে, বিশ্ববিদ্যালয়ের বিভিন্ন পাঠকেন্দ্রে নিযুক্ত শিক্ষা-সহায়কগণের পরামর্শে তার নিরসন অবশ্যই হতে পারবে। তার ওপর প্রতি পর্যায়ের শেষে প্রদত্ত অনুশীলনী ও অতিরিক্ত জ্ঞান অর্জনের জন্য গ্রন্থ-নির্দেশ শিক্ষার্থীর গ্রহণ ক্ষমতা ও চিন্তাশীলতা বৃদ্ধির সহায়ক হবে।

এই অভিনব আয়োজনের বেশ কিছু প্রয়াসই এখনও পরীক্ষামূলক—অনেক ক্ষেত্রে একেবারে প্রথম পদক্ষেপ। স্বভাবতই, ত্রুটি-বিচ্যুতি কিছু কিছু থাকতে পারে, যা অবশ্যই সংশোধন ও পরিমার্জনার অপেক্ষা রাখে। সাধারণভাবে আশা করা যায়, ব্যাপকতর ব্যবহারের মধ্য দিয়ে পাঠ-উপকরণগুলি সর্বত্র সমাদৃত হবে।

অধ্যাপক (ড.) শুভ শঙ্কর সরকার
উপাচার্য

দ্বিতীয় পুনর্মুদ্রণ ঃ জুন, 2017

বিশ্ববিদ্যালয় মঞ্জুরি কমিশনের দূরশিক্ষা ব্যুরোর বিধি অনুযায়ী এবং অর্থানুকূল্যে মুদ্রিত।
Printed in accordance with the regulations and financial assistance of the Distance Education Bureau of the University Grants Commission.

পরিচিতি

বিষয় ঃ পদার্থবিদ্যা সাম্মানিক স্তর

পাঠক্রম : পর্যায় : EPH 13 : 1

	রচনা	সম্পাদনা
একক 1 ❑	ড. অজয়কুমার দেবগুপ্ত	ড. রামকুমার গুছাইত
একক 2 ❑	ঐ	ঐ
একক 3 ❑	অধ্যাপক (ড.) বিকাশ ঘোষ	ঐ
একক 4 ❑	ঐ	ঐ
একক 5 ❑	ঐ	ঐ
একক 6 ❑	ঐ	ঐ
একক 7 ❑	ঐ	ঐ
একক 8 ❑	ঐ	ঐ

প্রজ্ঞাপন

এই পাঠ সংকলনের সমুদয় স্বত্ব নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়ের দ্বারা সংরক্ষিত। বিশ্ববিদ্যালয় কর্তৃপক্ষের লিখিত অনুমতি ছাড়া এর কোন অংশের পুনর্মুদ্রণ বা কোনভাবে উদ্ধৃতি সম্পূর্ণ নিষিদ্ধ।

মোহন কুমার চট্টোপাধ্যায়
নিবন্ধক

নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়

EPH–13

পরমাণুর গঠন, আণবিক বর্ণালি ও কঠিন পদার্থের তত্ত্ব
(স্নাতক পাঠক্রম)

পর্যায়
1
পরমাণুর গঠন এবং আণবিক বর্ণালি

একক 1 ❑ গ্যাসের ভিতর তড়িৎ মোক্ষণ, ক্যাথোড রশ্মি, ইলেকট্রন ও আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া ও তাপীয় ইলেকট্রন 7

একক 2 ❑ ধনাত্মক রশ্মি এবং ভরবর্ণালি বীক্ষণ 41

একক 3 ❑ পারমাণবিক প্রতিরূপ এবং বোরের তত্ত্ব 53

একক 4 ❑ ইলেকট্রন স্পিন এবং ভেক্টর প্রতিরূপ 77

একক 5 ❑ ক্ষারীয় বর্ণালি এবং পর্যায় সারণি 101

একক 6 ❑ জীমান এবং স্টার্ক ক্রিয়া 112

একক 7 ❑ আণবিক বর্ণালি এবং রামন বিক্ষেপ 137

একক 8 ❑ এক্স-রশ্মি 164

একক 1 ❑ গ্যাসের ভিতর তড়িৎ মোক্ষণ, ক্যাথোড রশ্মি, ইলেকট্রন ও আলোক তড়িৎক্রিয়া ও তাপীয় ইলেকট্রন

গঠন

1.1 প্রস্তাবনা

1.2 উদ্দেশ্য

1.3 গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ (তড়িৎ মোক্ষণ নলের ঘটনাবলী)

1.4 ক্যাথোড রশ্মি

1.5 ক্যাথোড রশ্মির উৎপাদন

1.6 ক্যাথোড রশ্মির ধর্ম

→ 1.6.1 ক্যাথোড রশ্মি সরলরেখায় গমন করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

→ 1.6.2 ক্যাথোড রশ্মি তাপীয় শক্তি উৎপন্ন করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

→ 1.6.3 ক্যাথোড রশ্মি চাপ প্রয়োগ করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

1.7 ক্যাথোড রশ্মির ব্যবহার

1.8 ক্যাথোড রশ্মির প্রকৃতি

1.9 ইলেকট্রন

1.10 জে. জে. টমসনের পরীক্ষার সাহায্যে ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নিরূপণ

1.11 মিলিকানের তৈলবিন্দু পরীক্ষার সাহায্যে ইলেকট্রনের আধান নিরূপণ

1.12 ইলেকট্রনের ভর নির্ণয়

1.13 ইলেকট্রনের শক্তি

1.14 গাণিতিক উদাহরণ

1.15 আলোক তড়িৎক্রিয়া

→ 1.15.1 আলোক তড়িৎক্রিয়ার পরীক্ষা

1.16 আলোক তড়িৎক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য

1.17 আলোক তড়িৎক্রিয়া সংক্রান্ত রাশিমালা

1.18 আলোক তড়িৎক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যগুলি ব্যাখ্যায় সনাতন তরঙ্গতত্ত্বের অসামর্থ্য

1.19 কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আলোক তড়িৎক্রিয়ার ব্যাখ্যা

1.20 মিলিকানের পরীক্ষা

1.21 আলোক তড়িৎ-কোশ, গঠন ও কার্যপ্রণালী

1.22 তাপীয় ইলেকট্রন

1.23 উষ্ণতার সংগে তাপায়ন প্রবাহের পরিবর্তন

1.24 রিচার্ডসন-ডুসম্যান সমীকরণ

1.25 শট্‌কি ক্রিয়া

1.26 সারাংশ

1.27 প্রশ্নাবলি

1.1 প্রস্তাবনা (Introduction) :

আমরা জানি, স্বাভাবিক চাপ ও উষ্ণতায় শুষ্ক গ্যাস তড়িতের কুপরিবাহী। কিন্তু কোনো কোনো ক্ষেত্রে গ্যাসের মধ্য দিয়েও তড়িৎ প্রবাহ দেখা যায়। যেমন বিদ্যুৎ চমকানোর সময় বাতাসের মধ্যে ক্ষণস্থায়ী প্রবল তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়। স্বাভাবিক চাপ ও উষ্ণতায় গ্যাসের মধ্যে অতিবেগুনী রশ্মি, X-রশ্মি এবং γ-রশ্মির মত ক্ষুদ্র তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ প্রেরণ করলে গ্যাসের তড়িৎ পরিবাহিতা বৃদ্ধি পায়।

স্বাভাবিক চাপ ও উষ্ণতায় গ্যাস তড়িতের কুপরিবাহী হলেও বিশেষ পরিস্থিতিতে গ্যাসের ভিতর দিয়ে তড়িৎ পরিবাহিত হতে পারে। গ্যাসের মধ্যে দুটি ধাতব তড়িৎদ্বার রেখে তাদের মধ্যে খুব উচ্চ বিভব প্রভেদ সৃষ্টি করলে গ্যাসের ভিতর দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয়। আবার গ্যাসের চাপ কমিয়ে অপেক্ষাকৃত কম বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করলেও গ্যাসের ভিতর দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয়। গ্যাসের ভিতর দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ চালনাকে তড়িৎ মোক্ষণ বলে। যে কাচের নলে নিম্নচাপের গ্যাসের ভিতর দিয়ে তড়িৎ প্রবাহ চালনা করা হয় তাকে মোক্ষণ নল বলে।

আমরা জানি, পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রকের আকর্ষণী বলের প্রভাবে আবদ্ধ থাকে। পরমাণু থেকে ইলেকট্রনগুলিকে বের করে আনতে হলে একটি ন্যূনতম শক্তি বাইরে থেকে ইলেকট্রনগুলিকে সরবরাহ করা প্রয়োজন। তড়িৎ মোক্ষণ নলে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে ইলেকট্রন উৎপন্ন করা যায়। এই শক্তি অন্যভাবে দেওয়া যেতে পারে। যেমন বস্তুর উপরে আলোকপাত করে অথবা বস্তুকে উত্তপ্ত করে। এই পরিচ্ছেদে ধাতু থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণের এই দুই ধরনের পদ্ধতি নিয়ে আমরা বিশেষভাবে আলোচনা করব।

1.2 উদ্দেশ্য

এই অধ্যায়ে আমরা জানতে পারব ঃ

(1) বিভিন্ন চাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণের প্রকৃতি

(2) ক্যাথোড রশ্মি এবং তার ধর্ম

(3) ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নির্ণয়

(4) ইলেকট্রনের আধান নির্ণয়

(5) আলোক তড়িৎক্রিয়া এবং এর পরীক্ষামূলক প্রদর্শন

(6) আলোক তড়িৎক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য

(7) কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আলোক তড়িৎক্রিয়ার ব্যাখ্যা

(8) আলোক তড়িৎকোষ, তাদের গঠন এবং কার্যপ্রণালী

(9) তাপীয় ইলেকট্রন, এর উৎপাদন এবং ধর্ম

1.3 গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণ (তড়িৎমোক্ষণ নলের ঘটনাবলী)

বিভিন্ন চাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ সংক্রান্ত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার জন্য পরীক্ষা ব্যবস্থা 1.1. চিত্রে দেখানো হয়েছে।

চিত্র 1.1 : গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণ পর্যবেক্ষণ করার পরীক্ষা ব্যবস্থা

AB → আবদ্ধ কাঁচের নল (প্রায় 30 cm লম্বা ও 4 cm ব্যাস) যার মধ্যে দুই প্রান্তে দুটি চাকতির আকারের ধাতব তড়িৎদ্বার সীল করে বসানো থাকে।

CD → আবদ্ধ কাঁচের নলের গায়ে লাগানো পার্শ্বনল। একটি বায়ু নিষ্কাশক পাম্প CD পার্শ্বনলের সংগে সংযুক্ত করে AB নলের মধ্যেকার গ্যাসের চাপ ইচ্ছামত কমানো যায়। একটি চাপ মানের সাহায্যে এই চাপ মাপা যায়।

তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে ইচ্ছামত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করার ব্যবস্থা থাকে (আবেশ কুন্ডলীর সাহায্যে)। স্থির তড়িৎ ভোল্ট-মিটারের সাহায্যে এই—বিভব-প্রভেদ মাপা যায়।

1 নলের ভিতরের গ্যাসের চাপ বায়ুমণ্ডলীয় চাপের সমান ঃ

যখন AB নলের মধ্যে গ্যাসের চাপ বায়ুমণ্ডলীয় চাপের সমান হয়, তখন দুটি তড়িৎ দ্বারের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণ সৃষ্টি করার জন্য এদের মধ্যে খুব উচ্চ বিভবপ্রভেদ (10,000 V বা বেশি) প্রয়োগ করা হয়।

এক্ষেত্রে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যস্থিত গ্যাসের ভিতর দিয়ে মাঝে মাঝে দীপ্তিমান তড়িৎ-স্ফুলিংগ দেখা যায়। সংগে সংগে তীক্ষ্ণ চট্‌পটি ফাটার মতো শব্দ শোনা যায়। একে বলা হয় স্ফুলিংগ মোক্ষণ। এই মোক্ষণ সরু আঁকাবাঁকা পথ ধরে চলে। স্ফুলিংগগুলি ক্ষণস্থায়ী হয় এবং এগুলির পুনরাবৃত্তি হতে থাকে। বিভিন্ন স্ফুলিংগ বিভিন্ন পথ ধরে চলে।

1 নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণের প্রকৃতি ঃ

নিম্নতর চাপে গ্যাসের মধ্যে যে দীপ্তিমান তড়িৎ মোক্ষণ দেখা যায় তার প্রকৃতি চাপ পরিবর্তনের সংগে পরিবর্তিত হয়। নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণের প্রকৃতি চিত্র 1.2-এ দেখানো হল।

(i) নলের ভিতরের বায়ুর চাপ 10 mm পারদস্তম্ভের সমান ঃ

এক্ষেত্রে অ্যানোড থেকে ক্যাথোডে আঁকা-বাঁকা রেখায় একটি গোলাপী রং-এর স্ফুলিংগ কে চটপট শব্দ করে যেতে দেখা যায়।

(ii) নলের ভিতরের বায়ুর চাপ প্রায় 5 mm পারদস্তম্ভের সমান ঃ

এক্ষেত্রে তড়িৎমোক্ষণ অনেক উজ্জ্বল ও চওড়া হয় ও অ্যানোড থেকে ক্যাথোড পর্যন্ত বিস্তৃত থাকে। একে ধনাত্মক স্তম্ভ বলে। এই সময় শব্দ অনেক মৃদু হয়ে যায়। ধনাত্মক স্তম্ভের বর্ণ নলে উপস্থিত গ্যাসের উপর নির্ভর করে। যেমন—বায়ু থাকলে গোলাপী, নিয়ন গ্যাস থাকলে হলুদ এবং নাইট্রোজেন গ্যাস থাকলে নীলাভ লাল।

(iii) নলের মধ্যে বায়ুর চাপ 1 mm পারদস্তম্ভের সমান ঃ

এক্ষেত্রে ধনাত্মক স্তম্ভ ক্যাথোড থেকে কিছুটা সরে আসে। এই সময় ক্যাথোডে এক ধরণের নীলাভ আলোকছটা দেখা যায়। একে ঋণাত্মক প্রভা বলে। ঋণাত্মক প্রভা ও ধনাত্মক স্তম্ভের মধ্যে কিছুটা অন্ধকারাচ্ছন্ন স্থান থাকে। তাকে ফ্যারাডের অন্ধকার অঞ্চল বলে।

(iv) নলের মধ্যে বায়ুর চাপ 0·5 mm পারদস্তম্ভের সমান ঃ

এমন অবস্থায় ফ্যারাডের অন্ধকার অঞ্চল অনেকটা বিস্তৃত হয়। ধনাত্মক স্তম্ভ দৈর্ঘ্যে ছোটো হয় ও কয়েকটি উজ্জ্বল আলোর আড়াআড়ি স্তরে বিভক্ত হয়। এদের আলোক চক্র বলে। এই আলোক চক্রগুলি পরস্পর থেকে অন্ধকার স্থানের দ্বারা বিচ্ছিন্ন থাকে। এসময় ঋণাত্মক প্রভা ক্যাথোড ছেড়ে এগিয়ে যায় এবং ক্যাথোডে আরেকটি আভা দেখা যায়। ক্যাথোড প্রভা ও ঋণাত্মক প্রভার মধ্যে একটি—অন্ধকারাচ্ছন্ন স্থানের সৃষ্টি হয়। তাকে ক্রুক্‌সের অন্ধকার অঞ্চল বলে।

(v) নলের মধ্যে বায়ুচাপ 0·01 mm পারদস্তম্ভের সমান ঃ

এই সময় ক্রুক্সের অন্ধকার অঞ্চল প্রায় সমগ্র নলটি পূর্ণ করে ফেলে। তখন গ্যাসের মধ্যে দীপ্তি আর দেখা যায়না। পরিবর্তে কাঁচনলের দেয়াল থেকে একপ্রকার নীলাভ বা সবুজাভ মৃদু প্রতিপ্রভ দীপ্তি নির্গত হতে দেখা যায়। পর্যবেক্ষণ করে দেখা গেছে যে এই সময়ে ক্যাথোড থেকে একপ্রকার দ্রুতগতি আহিত কণিকা নির্গত হয়ে অ্যানোডের উপরে এবং কাঁচ নলের ভিতরের দেয়ালে আপতিত হয়। এই সংঘাতের ফলে কাঁচনলের দেয়াল থেকে নীলাভ বা সবুজাভ প্রতিপ্রভ বিকিরণ নির্গত হয়। ক্যাথোড থেকে নির্গত এই কণিকাকে ক্যাথোডরশ্মি বলে।

(vi) নলের মধ্যে বায়ুচাপ 0·001 mm পারদস্তম্ভের কম ঃ

নলের বায়ুচাপ আরও কমতে থাকলে নল তড়িৎ পরিবহনের অনুপযোগী হয়ে ওঠে ও শেষে তড়িৎপ্রবাহ একেবারে বন্ধ হয়ে যায়।

(i) বায়ুর চাপ = 10 mm পারদস্তম্ভ (ii) বায়ুর চাপ = 5mm পারদস্তম্ভ

(iii) বায়ুর চাপ = 1·0mm পারদস্তম্ভ (iv) বায়ুর চাপ = 0·5mm পারদস্তম্ভ

(v) বায়ুর চাপ = 0·01mm পারদস্তম্ভ

চিত্র 1.2 : নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণের প্রকৃতি

1.4 ক্যাথোড রশ্মি

তড়িৎমোক্ষণ নলের বায়ুর চাপ 0·01 mm পারদস্তম্ভের সমান হলে অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদে ক্যাথোড থেকে এক প্রকার রশ্মি নির্গত হয়ে অ্যানোডের দিকে যায়। একে ক্যাথোড রশ্মি বলে। (পরে দেখা যায় ক্যাথোড রশ্মি প্রকৃতপক্ষে প্রচণ্ড বেগে ধাবমান ঋণাত্মক আধানবাহী ইলেকট্রনকণার স্রোত।)

1.5 ক্যাথোড রশ্মির উৎপাদন

একটি তড়িৎমোক্ষণ নলের মধ্যে গ্যাসের চাপ 0·01mm পারদস্তম্ভের সমান করা হয়। এবার ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে আবেশ কুণ্ডলীর সাহায্যে উচ্চবিভব প্রভেদ (10,000 volt) প্রয়োগ করা হয়। সে সময়ে ক্যাথোড থেকে যে কণিকা স্রোত নির্গত হয় তাই হল ক্যাথোড রশ্মি। এভাবে ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন হয়।

1.6 ক্যাথোড রশ্মির ধর্ম

(i) ক্যাথোড রশ্মি ক্যাথোড পৃষ্ঠ থেকে লম্বভাবে নির্গত হয়।

(ii) ক্যাথোড রশ্মি সরল রেখায় চলে।

(iii) ক্যাথোড রশ্মি অদৃশ্য। উপযুক্ত পদার্থের উপর ক্যাথোড রশ্মি পড়লে প্রতিপ্রভার সৃষ্টি হয়। এই প্রতিপ্রভায় উৎপন্ন রং পদার্থের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। উদাহরণ—কাচের ক্ষেত্রে সবুজ, অ্যালুমিনিয়ামের ক্ষেত্রে লাল।

(iv) ক্যাথোড রশ্মির গতিশক্তি আছে এবং কোনো বস্তুর উপর পড়লে তাপীয় শক্তি উৎপন্ন করে।

(v) ক্যাথোড রশ্মির ভরবেগ আছে এবং চাপ প্রয়োগ করতে পারে।

(vi) ক্যাথোড রশ্মিগুলি পরস্পরকে বিকর্ষণ করে।

(vii) ক্যাথোড রশ্মি চৌম্বক ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত হয়।

(viii) ক্যাথোড রশ্মি তড়িৎক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত হয়।

(ix) ক্যাথোড রশ্মি ঋণাত্মক আধানযুক্ত।

(x) ক্যাথোড রশ্মি গ্যাসকে আয়নিত করে।

(xi) ক্যাথোড রশ্মি সোনা, রূপা, অ্যালুমিনিয়াম প্রভৃতি ধাতুর খুব পাতলা পাত ভেদ করতে পারে।

(xii) ক্যাথোড রশ্মি ফটোগ্রাফিক প্লেটের উপর ক্রিয়া করে।

1.6.1 ক্যাথোড রশ্মি সরলরেখায় গমন করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

পরীক্ষা ঃ অ্যানোডের দিকটা বেশ চওড়া এরূপ একটি বিশেষ ধরনের তড়িৎমোক্ষণ নল নেওয়া হল যার মধ্যে একটি অ্যালুমিনিয়াম পাতের ক্রসকে অ্যানোড হিসাবে ব্যবহার করা হয়। এই নলে গ্যাসের চাপ 0·01 mm পারদস্তম্ভের সমান করে তড়িৎদ্বার দুটিতে উচ্চ বিভব প্রভেদ (10,000 V বা বেশি) প্রয়োগ করলে দেখা যাবে অ্যানোডের পিছনে কাচের দেওয়ালে প্রতিপ্রভা সৃষ্টি হয়েছে এবং তার মধ্যে অ্যালুমিনিয়াম ক্রসের একটি ছায়া সৃষ্টি হয়েছে। এই ছায়ার কোন উপচ্ছায়া থাকে না। এর দ্বারা প্রমাণিত হয় যে, ক্যাথোড রশ্মি ক্যাথোড পাতের সঙ্গে লম্বভাবে নির্গত হয় এবং সরলরেখায় গমন করে।

চিত্র1.3 ক্যাথোড রশ্মি সরলরেখায় চলে।

1.6.2 ক্যাথোড রশ্মি তাপীয় শক্তি উৎপন্ন করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

চিত্র1.4 ক্যাথোড রশ্মি তাপীয় শক্তি উৎপন্ন করে।

এমন একটি তড়িৎমোক্ষণ নল নেওয়া হল যার ক্যাথোড অবতল। ক্যাথোডের বক্রতাকেন্দ্রে একটি প্লাটিনাম অ্যানোড রাখা হল। এখন মোক্ষণ নলে ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন করলে উৎপন্ন ক্যাথোড রশ্মি কেন্দ্রীভূত হয়ে প্লাটিনাম পাতের উপর পড়বে। কিছুক্ষণের মধ্যেই দেখা যাবে যে প্লাটিনাম পাতটি উত্তপ্ত হয়ে লাল হয়েছে। এ থেকে প্রমাণিত হয় যে ক্যাথোড রশ্মি তাপীয় শক্তি উৎপাদন করে।

1.6.3 ক্যাথোড রশ্মি চাপ প্রয়োগ করে—ধর্ম প্রদর্শনের পরীক্ষা

অভ্রের পাতলা পাত দিয়ে তৈরি একটি চাকাকে বিশেষভাবে তৈরি মোক্ষণ নলের মধ্যে এমনভাবে রাখা হয় যাতে মোক্ষণ নলে উৎপন্ন ক্যাথোড রশ্মি সরাসরি ঐ চাকার উপর পড়তে পারে। এই অবস্থায় ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন হবে, দেখা যাবে চাকাটি ধীরে ধীরে ঘুরছে। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে ক্যাথোড রশ্মির ভরবেগ আছে এবং এটি চাপ প্রয়োগ করে।

চিত্র1.5 ক্যাথোড রশ্মি তাপ প্রয়োগ করে।

1.7 ক্যাথোড রশ্মির ব্যবহার ঃ

(i) ক্যাথোড-রশ্মি ওসিলোস্কোপে,
(ii) টেলিভিশন পিকচার টিউবে,
(iii) X-রশ্মি উৎপাদনে।

1.8 ক্যাথোড রশ্মির প্রকৃতি ঃ

ক্যাথোড রশ্মির ধর্ম থেকে জানা যায়, এগুলি এক ধরনের দ্রুতগামী ঋণাত্মক কণিকার স্রোত। তড়িৎ মোক্ষণ নলে নিম্নচাপে ও উচ্চ বিভব প্রভেদে ক্যাথোড থেকে এগুলি নির্গত হয়ে অ্যানোডের দিকে যায়। তড়িৎ মোক্ষণ নলে যে গ্যাস থাকুক না কেন, ক্যাথোড বা অ্যানোড যে পদার্থ দিয়ে তৈরি হোক না কেন ক্যাথোড থেকে নির্গত এই কণিকাগুলির ধর্ম একই হয়। এও বোঝা যায় সমস্ত পদার্থের মধ্যে এই কণিকাগুলি আছে। পদার্থের একটি মৌলিক উপাদান হিসেবে এই কণিকা চিহ্নিত হয়। তড়িৎ বিশ্লেষণ সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে বিজ্ঞানী স্টোনী (Johnston stoney) তড়িৎ বিশ্লেষণের ক্ষেত্রে একপ্রকার অবিভাজ্য তড়িৎ কণিকার অস্তিত্ব সম্পর্কে সিদ্ধান্তে আসেন। এই কণিকার নাম দেন 'ইলেকট্রন' (electron)। পরে প্রমাণিত হয় ক্যাথোড রশ্মি হল প্রকৃতপক্ষে দ্রুতগতি সম্পন্ন ইলেকট্রন প্রবাহ।

1.9 ইলেকট্রন ঃ

সকল বস্তুই ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র পরমাণুর দ্বারা গঠিত। ইলেকট্রনগুলি হচ্ছে সকল বস্তুর সার্বিক উপাদান। অতএব ধরা যেতে পারে যে সব পরমাণুর মধ্যেই ইলেকট্রন থাকে।

পরীক্ষাগারে ইলেকট্রন পর্যবেক্ষণের পদ্ধতি গুলি হল—

(i) গ্যাসের ভিতর বিদ্যুৎ মোক্ষণ প্রক্রিয়া

(ii) তাপীয় আয়ন নিঃসরণ,

(iii) আলোক বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া।

বিজ্ঞানী জে. জে. টমসন (J. J. Thomson) সর্বপ্রথম ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে গবেষণা করে এই রশ্মির কণাগুলির আধান ও ভরের অনুপাত (e/m) নির্ণয় করেন। এই অনুপাতকে বলা হয় আপেক্ষিক আধান। পরে মিলিকান (Millikan) অপর একটি পৃথক পরীক্ষায় ইলেকট্রনের আধান সরাসরি মাপতে সক্ষম হন। এইভাবে ইলেকট্রনের আধান ও ভর দুইই জানা সম্ভব হয়।

1.10 জে. জে. টমসনের পরীক্ষার সাহায্যে ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নিরূপণ ঃ

স্যার জে. জে. টমসন নিম্নে বর্ণিত পদ্ধতিতে ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান (e/m) সর্বপ্রথম নিরূপণ করেন। 1.6 চিত্রে টমসন কর্তৃক ব্যবহৃত যন্ত্রের বর্ণনা দেওয়া হল।

T_1 → একটি ছোট তড়িৎমোক্ষণ নল যার মধ্যে ক্যাথোড রশ্মি উৎপাদন করা হয়।
C → ক্যাথোড।
A → অ্যানোড
S → ধাতব চাকতি
T_2 → খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন অপেক্ষাকৃত প্রশস্ত কাঁচ নল।
E, F → দুটি সমান্তরাল ধাতব প্লেট
M → অশ্বক্ষুর চুম্বক
P → প্রতিপ্রভ পর্দা

চিত্র 1.6 : ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নির্ণয়ে টমসনের পরীক্ষা।

চিত্র 1.7 : ক্যাথোড রশ্মির (a) তাড়িৎ ও (b) চৌম্বক বিচ্যুতি।

পদ্ধতি ঃ C ক্যাথোড ও A অ্যানোডের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রয়োগ করা হয়। T_1 মোক্ষণ নলে উৎপন্ন ক্যাথোড রশ্মি অ্যানোড এবং তার পিছনে অবস্থিত S ধাতব চাকতির মধ্যেকার সূক্ষ্ম ছিদ্র পার হয়ে সমান্তরাল হয়ে T_2 কাঁচ নলের ভিতরে প্রবেশ করে। এর মধ্যে রাখা E, F দুটি সমান্তরাল ধাতব প্লেটের মধ্যবর্তী অঞ্চল দিয়ে এই রশ্মিগুচ্ছ পাঠানো হয়। প্লেট দুটির মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে রশ্মিগুচ্ছের প্রাথমিক ভ্রমণ পথের অভিলম্বে একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। এর ফলে ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছ তাদের সরলরেখা ভ্রমণ পথ থেকে তড়িৎক্ষেত্র অভিমুখে বিচ্যুত হয়। একটি অশ্বক্ষুর চুম্বকের

(M) সাহায্যে একই অঞ্চলে তড়িৎক্ষেত্রের অভিলম্বে প্রয়োজন মত চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করার ব্যবস্থা আছে। এই চৌম্বক ক্ষেত্র পুস্তকের পাতার অভিলম্বে ক্রিয়া করে। এই চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ক্যাথোড রশ্মি গুচ্ছের উপর একটি বল ক্রিয়া করে। এই বল ক্যাথোড রশ্মির গতিপথ ও চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ, উভয়ের সংগে লম্বভাবে ক্রিয়া করে। এই বলকে চৌম্বকক্ষেত্রের দিক ইচ্ছামত নির্দিষ্ট করে তড়িৎক্ষেত্রজ বলের ঠিক বিপরীত দিকে ক্রিয়া করানো সম্ভব।

ক্যাথোড রশ্মি গুচ্ছ তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র থেকে নির্গত হয়ে P প্রতিপ্রভ পর্দার উপর আপতিত হয়ে একটি দীপ্ত বিন্দুর সৃষ্টি করে।

ধরা যাক ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির আধান ও ভর যথাক্রমে e ও m। এখন B চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে v বেগে বিচরণশীল এইরূপ একটি কণিকার উপর প্রযুক্ত বল।

$$F_m = Bev \qquad \text{.....(1.1)}$$

আবার X তড়িৎক্ষেত্রের জন্য ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির উপর ক্রিয়াশীল বলের মান

$$F_e = Xe \qquad \text{.....(1.2)}$$

এখন ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির উপর যদি শুধু চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করে তাহলে প্রতিপ্রভ পর্দার উপরের দীপ্ত বিন্দুটি প্রাথমিক অবস্থান থেকে কিছু দূরে সরে যায়। এবার একই সংগে তড়িৎক্ষেত্রও এমনভাবে প্রয়োগ করা হয় যে প্রতিপ্রভ পর্দার উপর দীপ্ত বিন্দুটি তার প্রাথমিক অবস্থানে ফিরে আসে। সুতরাং ধরা যেতে পারে যে ক্যাথোড রশ্মিগুলির উপর চৌম্বক ক্ষেত্র এবং তড়িৎক্ষেত্রের প্রযুক্ত বল পরস্পরের সমান এবং বিপরীত।

ধরি, এইরকম ঘটনার জন্য প্রয়োজনীয় তড়িৎক্ষেত্রের মান = X_0

তাহলে আমরা লিখতে পারি,

$$X_0.e = Bev \qquad \text{..... (1.3)}$$

অথবা, $$v = \frac{X_0}{B} \qquad \text{..... (1.4)}$$

এই সমীকরণ থেকে ক্যাথোড রশ্মির বেগ নির্ণয় করা যায়।

ধরি E এবং F প্লেট দুটির মধ্যে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রে প্রবেশের পূর্বে ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির গতি x অভিমুখে থাকে এবং X তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে সেগুলি y অভিমুখে বিচ্যুত হয়। (চিত্র 1.7(a))। সুতরাং y অভিমুখে কণাগুলির গতির সমীকরণ

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = X.e \qquad \text{..... (1.5)}$$

যেহেতু ক্যাথোড রশ্মি x অভিমুখে অগ্রসর হবার পথে রশ্মিগুলির y দিকে অর্জিত বেগ $\frac{dy}{dt}$ এবং সরণ y ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়

সুতরাং (5) নং সমীকরণকে লেখা যায়

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dt}\right)\frac{dx}{dt} = \frac{Xe}{m} \qquad \text{..... (1.6)}$$

যেহেতু $\frac{dx}{dt} = v =$ ধ্রুবক

অতএব (6) নং সমীকরণ থেকে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$\frac{dy}{dt} = \int \frac{Xe}{mv} dx$$

অথবা, $$\frac{dy}{dt} = \frac{e}{mv}\int X.dx \qquad \text{..... (1.7)}$$

যেহেতু $x = o$ অবস্থানে $\frac{dy}{dt} = 0$, সুতরাং (7) নং সমীকরণে সমাকলন ধ্রুবকটি শূন্য হয়।

∴ (7) নং সমীকরণকে লেখা যায়

$$\frac{dy}{dx}.\frac{dx}{dt} = \frac{e}{mv}\int X.dx$$

পুনরায় সমাকলন করে পাই

$$y_e = \frac{e}{mv^2}\int_0^L dx\left(\int Xdx\right) \qquad \text{..... (1.8)}$$

এখানে X তড়িৎক্ষেত্র $x = 0$ থেকে $x = L$ অবস্থানে রক্ষিত প্রতিপ্রভ পর্দা পর্যন্ত বিস্তৃত বলে ধরা হয়েছে।

সমমান তড়িৎক্ষেত্রে প্লেট দুটির মধ্যে $X =$ ধ্রুবক এবং প্লেট দুটির বাইরে $X = 0$। বাস্তব ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ সমমান তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা অসম্ভব। যেহেতু প্লেট দুটির প্রান্তে তড়িৎক্ষেত্রের বহির্বিস্তার থাকে সেজন্য বিভিন্ন অবস্থানে X পরিমাপ করে উপরের সমাকলনের মান নির্ণয় করা হয়।

আবার M চৌম্বক মেরুদ্বয়ের মধ্যে z দিকে ক্রিয়াশীল B চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য (চিত্র 1.7(b)) y দিকে ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির গতির সমীকরণ

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = Bev$$

উপরের বর্ণিত পদ্ধতিতে এই সমকীরণের সমাধান হল

$$y_m = \frac{e}{mv}\int_0^L dx\left(\int Bdx\right) \qquad \text{..... (1.9)}$$

এখানেও বিভিন্ন অবস্থানে B পরিমাপ করে উপরের সমাকলনের মান নির্ণয় করা হয়।

(4) নং সমীকরণ থেকে 'v' এর মান নির্ণয় করা হয়। তাড়িৎ বিচ্যুতি y_e অথবা চৌম্বক বিচ্যুতি y_m পরিমাপ করে (8) নং বা (9) নং সমীকরণ থেকে ক্যাথোড রশ্মির e/m নিরূপণ করা যায়। টমসন তড়িৎমোক্ষণ নলের মধ্যে বিভিন্ন গ্যাস ব্যবহার করেন এবং দেখান যে ক্যাথোড রশ্মির e/m সবক্ষেত্রেই সমান হয়।

টমসন এই পদ্ধতির সাহায্যে e/m এর মান পান 10^7 emug^{-1}। পরবর্তীকালে উন্নত ধরনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত e/m এর নির্ভুল মান = $1{\cdot}7589 \times 10^7$ emug^{-1}

$= 5{\cdot}2767 \times 10^{17}$ e.s.u.g^{-1} = $1{\cdot}76 \times 10^{11}$ C kg^{-1}

1.11 মিলিকানের তৈল বিন্দু পরীক্ষার সাহায্যে ইলেকট্রনের আধান নিরূপণ ঃ

1909 খ্রিস্টাব্দে প্রখ্যাত আমেরিকান বিজ্ঞানী আর. এ. মিলিকান উইলসনের মেঘকক্ষ পরীক্ষা প্রণালীকে আরও উন্নত করে সর্বপ্রথম সঠিকভাবে ইলেকট্রনের আধান নিরূপণ করেন। পরীক্ষাটি মিলিকানের তৈল বিন্দু পরীক্ষা নামে পরিচিত।

চিত্র 1.8 : মিলিকানের তৈল বিন্দু পরীক্ষা

যন্ত্র ঃ 1.8. চিত্রে মিলিকানের পরীক্ষা পদ্ধতি দেখান হয়েছে। A এবং B দুটি সমান্তরাল অনুভূমিক বৃত্তাকার ধাতব চাকতি। প্রত্যেক চাকতির ব্যাস 22 cm এবং পরস্পর থেকে 14·9174 mm দূরত্বে রাখা আছে। চাকতি দুটির মধ্যে 10,000 volt বিভব-পার্থক্য প্রয়োগ করা হয়। A চাকতিটির ঠিক কেন্দ্র স্থলে একটি ছোট ছিদ্র থাকে। চাকতি দুটিকে একটি ধাতব প্রকোষ্ঠে (C) রাখা হয় এবং প্রকোষ্ঠের

ভিতরের তাপমাত্রা ঠিক রাখার জন্য প্রকোষ্ঠের বাইরের পৃষ্ঠ স্থির উষ্মতার তেল দিয়ে ঘিরে রাখা হয়। প্রকোষ্ঠ এবং B চাকতি ভূমি সংলগ্ন করে রাখা হয়। স্প্রেয়ারের সাহায্যে ছোট ছোট তেলের বিন্দু ধারাবর্ষণ করে A চাকতির ছিদ্র দিয়ে চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানে প্রবিষ্ট করানো যায়। একটি জানালা W_1 দিয়ে প্রকোষ্ঠের ভিতর X-রশ্মি পাঠিয়ে গ্যাসকে আয়নিত করা হয়। একটি তীব্র আলোক উৎস S ও লেন্সের সাহায্যে জানালা W_2 দিয়ে চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানকে আলোকিত করা হয়। চাকতির দুটির ভিতরের পৃষ্ঠ দুটি কালো করা থাকে। এর ফলে তাদের উপর থেকে আলোকের প্রতিফলন হয় না। একটি শক্তিশালী অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে তেলের বিন্দুগুলিকে দেখা হয়। এই অণুবীক্ষণের অভিনেত্রে একটি স্কেল থাকে। যার সাহায্যে তেলের বিন্দুগুলির বেগ মাপা যায়।

তত্ত্ব ঃ প্রথমে চাকতি দুটির মধ্যে কোন তড়িৎ ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় না। স্প্রেয়ার থেকে নির্গমনকালে তেলের বিন্দুগুলি ঘর্ষণের ফলে আহিত হয়ে যায় এবং A চাকতির ছিদ্র দিয়ে চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানে প্রবেশ করে। অভিকর্ষের টানে তেলের বিন্দুগুলি নীচের দিকে পড়তে থাকে এবং কিছুদূর পড়বার পর তাদের বেগ ধ্রুবক হয়ে যায়। এই বেগকে প্রান্ত বেগ বলে।

মনে করি কোন একটি তেলের বিন্দুর ব্যাসার্ধ = r

তেলের বিন্দুর প্রান্তবেগ = v

তেলের ঘনত্ব = ρ

বাতাসের ঘনত্ব = σ

বাতাসের সান্দ্রতাংক = η

তেলের বিন্দুটির উপর অভিকর্ষজ টান $\omega = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \sigma)g$

ষ্টোক্সের সূত্রানুযায়ী তেলের বিন্দুর গতির উপর সান্দ্রতা জনিত বাধার পরিমাণ = $6\pi\eta rv$

$\therefore$ এক্ষেত্রে $\omega = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \sigma)g = 6\pi\eta rv$ ..... (1.10)

$$\therefore\ r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2(\rho - \sigma)g}} \qquad \text{..... (1.11)}$$

$$\therefore\ \omega = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9}{2}\eta v\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\rho - \sigma)g}} \qquad \text{..... (1.12)}$$

(11) নং সমীকরণ থেকে তেল-বিন্দুর ব্যাসার্ধ r নির্ণয় করা যায় যদি তেল-বিন্দুর-বেগ জানা থাকে।

এবার A ও B চাকতি দুটির মধ্যে এমনভাবে তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় যাতে তেল বিন্দুর গতি v_1 বেগে উর্ধ্বমুখী হয়। অনুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে এই উর্ধ্বমুখী বেগ পরিমাপ করা যায়।

স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে,

$$Xe_n - \omega = 6\pi\eta rv_1 \qquad \text{..... (1.13)}$$

যেখানে X = চাকতি দুটির মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র

e_n = তেল বিন্দুর আধান

(1.10)-নং সমীকরণের সাহায্যে (1.13)-নং সমীকরণকে লেখা যায়

$$Xe_n - 6\pi\eta r v = 6\pi\eta r v_1$$

অথবা, $Xe_n = 6\pi\eta r(v + v_1)$

অথবা, $\dfrac{Xe_n}{\omega} = \dfrac{6\pi\eta r(v + v_1)}{\omega}$

অথবা, $\dfrac{Xe_n}{\omega} = \dfrac{6\pi\eta r(v + v_1)}{6\pi\eta r v}$ $(\therefore\ \omega = 6\pi\eta r v)$

অথবা, $\dfrac{Xe_n}{\omega} = \dfrac{v + v_1}{v}$ ..... (1.14)

সমীকরণ (1.12) থেকে ω-র মান জেনে (1.14) নং সমীকরণের সাহায্যে e_n নির্ণয় করা যায়।

এরপর X-রশ্মির সাহায্যে A ও B চাকতি দুটির মধ্যবর্তী বাতাসের অণুগুলি আয়নিত করা হয়। এবার একটি আয়নিত অণু এবং আহিত তেল বিন্দুর মধ্যে সংঘাত ঘটালে তেল বিন্দুটির আধানের পরিবর্তন হবে। ধরা যাক এইভাবে পরিবর্তিত আধানের মান e'_n। আধান পরিবর্তনের ফলে তেল বিন্দুটির উপর ক্রিয়াশীল তড়িৎক্ষেত্রজ বলের পরিবর্তন হয়। ফলে তেলবিন্দুটির গতি হঠাৎ পরিবর্তিত হয়ে যায়।

ধরা যাক তেল বিন্দুটির নতুন বেগ = v_2

∴ এমত অবস্থায় আমরা লিখতে পারি

$$Xe'_n - \omega = 6\pi\eta r v_2 \quad \text{..... (1.15)}$$

সমীকরণ (1.13) এবং (1.15) থেকে আমরা পাই,

$$Xe'_n - Xe_n = 6\pi\eta r\ (v_2 - v_1)$$

অথবা, $X(e'_n - e_n) = 6\pi\eta r(v_2 - v_1)$ ..... (1.16)

(1.10)-নং এবং (1.16) সমীকরণের সাহায্যে পাওয়া যায়

$$\frac{X(e'_n - e_n)}{\omega} = \frac{v_2 - v_1}{v}$$

অথবা, $e'_n - e_n = \dfrac{\omega}{X} \cdot \dfrac{v_2 - v_1}{v}$

(1.12)-নং সমীকরণ থেকে ω-র মান বসিয়ে পাওয়া যায়,

$$e'_n - e_n = \frac{4\pi}{3X}\left(\frac{9}{2}\eta\right)^3 \left\{\frac{v}{(p-\sigma)g}\right\}^{\frac{1}{2}} (v_2 - v_1) \quad \text{..... (1.17)}$$

মিলিকান একটি নির্দিষ্ট তেল বিন্দুর উপর দীর্ঘ সময় ধরে দৃষ্টি নিবদ্ধ রেখে লক্ষ্য করেন যে

তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে তেল বিন্দুটির বেগ বারবার বিভিন্ন পরিমাণে পরিবর্তিত হয়। প্রত্যেকবার বেগ পরিবর্তন পরিমাপ করে তিনি আধান পরিবর্তনের মান নির্ণয় করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে এই নির্ণীত মানগুলি একটি ন্যূনতম মানের পূর্ণ গুণিতক। আধানের এই ন্যূনতম মানকে মিলিকান ইলেকট্রনের আধান বলে ধরে নেন।

এই পদ্ধতিকে মিলিকান লক্ষ্য করেন যে অতি ক্ষুদ্র তেল বিন্দুর ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের আধানের পরিমিত মান কিছু পরিমাণ বেশি। এর কারণ হিসাবে বলা যেতে পারে এক্ষেত্রে স্টোক্সের সূত্র সম্পূর্ণ ঠিক নয়। স্টোক্সের সূত্রে সংশুদ্ধি প্রয়োগ করলে (1.17)-নং সমীকরণের যে পরিবর্তিত রূপ হয় তা

$$e'_n - e_n = \frac{4\pi}{3X}\left\{\frac{9}{2}\cdot\frac{\eta}{1+\frac{b}{p.r}}\right\}^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{v}{(p-\sigma).g}\right\}^{\frac{1}{2}}.(v_2 - v_1) \qquad \text{..... (1.18)}$$

যেখানে p = চাকতি দুটির মধ্যে বায়ুর চাপ

b = ধ্রুবক

মনে করি, (1.17)-নং সমীকরণের সাহায্যে ইলেকট্রনের আধানের পরিমিত মান e' এবং (1.18) নং সমীকরণের সাহায্যে ইলেকট্রনের আধানের পরিমিত মান e,

$\therefore$ (1.17)-নং এবং (1.18)-নং সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$\left(\frac{e'}{e}\right)^{\frac{2}{3}} = 1 + \frac{b}{pr} \qquad \text{..... (1.19)}$$

বিভিন্ন ব্যাসার্ধের তেল বিন্দু নিয়ে পরীক্ষা করে $(e')^{\frac{2}{3}}$ এবং $\frac{1}{pr}$ সংখ্যা দুটির লেখচিত্র অঙ্কন করে b ধ্রুবকের মান নির্ণয় করা হয়। b ধ্রুবকের মান (19)-নং সমীকরনে বসিয়ে সঠিক ইলেকট্রনীয় আধানের (e) মান পাওয়া যায়।

মিলিকান তার পরীক্ষা থেকে ইলেকট্রনের আধানের মান পান

$e = 4{\cdot}774 \times 10^{-10}$ e.s.u.

বর্তমানে ইলেকট্রনের আধানের সঠিক মান

$e = 4{\cdot}8029 \times 10^{-10}$ e.s.u.

1.12 ইলেকট্রনের ভর নির্ণয়

ধরি, ইলেকট্রনের আধান = e

ইলেকট্রনের ভর = m

টমসন পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান

$\frac{e}{m} = 1{\cdot}76 \times 10^{11}$ Coulomb/kg

মিলিকনের পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আধান

$e = 1{\cdot}601 \times 10^{-19}$ Coulomb

এখন, $\frac{e}{e/m} = \frac{1{\cdot}601 \times 10^{-19}}{1{\cdot}76 \times 10^{11}}$

অথবা, $m = 9{\cdot}1 \times 10^{-31}$ kg

1.13 ইলেকট্রনের শক্তি

ইলেকট্রনের গতিশক্তি ইলেকট্রন-ভোল্ট (eV) এককে প্রকাশ করা হয়।

একটি ইলেকট্রন 1 volt বিভব প্রভেদের ভিতর দিয়ে গেলে ইলেকট্রনটি যে গতিশক্তি লাভ করে তাকেই 1 ইলেকট্রন ভোল্ট বলে।

অর্থাৎ 1 eV $= 1e \times 1$ volt

$= 1{\cdot}60 \times 10^{-19}$ coulomb $\times$ 1 volt

$= 1{\cdot}60 \times 10^{-19}$ Joule

1.14 গাণিতিক উদাহরণ

উদাহরণ 1. স্থিরাবস্থা থেকে 1V বিভব পার্থক্যের ভিতর দিয়ে একটি ইলেকট্রন গতিশীল হলে ইলেকট্রনটি কত বেগ প্রাপ্ত হবে?

সমাধান ঃ ধরি, ইলেকট্রনের ভর $= m$

ইলেকট্রনের আধান $= e$

বিভব পার্থক্য $= V$

ইলেকট্রনের বেগ $= v$

$\therefore$ ইলেকট্রনের গতিশক্তি $= \frac{1}{2}mv^2$

ইলেকট্রন কর্তৃক কৃতকার্য $= eV$

$\therefore \frac{1}{2}mv^2 = eV$

বা, $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$

$= \sqrt{\frac{2 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19} \times 1}{9{\cdot}1 \times 10^{-31}}}$

$= 5{\cdot}92 \times 10^5$ m/s

উদাহরণ 2. কত বিভব-প্রভেদে গেলে স্থিরাবস্থা থেকে ইলেকট্রনের বেগ 10^7 m/s হবে?

সমাধান ঃ আমরা জানি, ইলেকট্রনের গতিশক্তি $= \frac{1}{2}mv^2$

ইলেকট্রনের কৃতকার্য $= eV$

$\therefore \frac{1}{2}mv^2 = eV$

অথবা, $V = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{e}$

$= \frac{\frac{1}{2} \times (9 \cdot 1 \times 10^{-31}) \times (10^7)^2}{1 \cdot 6 \times 10^{-19}}$

$= 284{\cdot}375$ volt

উদাহরণ 3. 10kV বিভব প্রভেদে চললে ইলেকট্রনের বেগ কত হবে?

সমাধান ঃ আমরা জানি, ইলেকট্রনের গতিশক্তি $= \frac{1}{2}mv^2$

ইলেকট্রনের কৃতকার্য $= eV$

যেখানে m = ইলেকট্রনের ভর $= 9{\cdot}1 \times 10^{-19}$

v = ইলেকট্রনের বেগ = ?

V = বিভবপ্রভেদ = 10 kV

e = ইলেকট্রনের আধান $= 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ Coulomb

$\therefore \frac{1}{2}mv^2 = eV$

অথবা, $v^2 = \frac{2eV}{m}$

অথবা, $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$

$$= \sqrt{\frac{2\times(1\cdot6\times10^{-19})\times(10\times10^{3})}{9\cdot1\times10^{-31}}}$$

$= 5{\cdot}92 \times 10^{7}$ m/s

উদাহরণ 4. ক্যাথোড রশ্মি 10^6 m/s বেগে চলছে। ক্যাথোড রশ্মির গতিশক্তি নির্ণয় করুন ঃ

সমাধান ঃ ক্যাথোড রশ্মির ইলেকট্রনের গতিশক্তি $\frac{1}{2}mv^2$

$$= \frac{1}{2}\times\left(9\cdot1\times10^{-31}\right)\times(10^{6})^{2}$$

$= 4{\cdot}55 \times 10^{-19}$ Joule

$$= \frac{4\cdot55\times10^{-19}}{1\cdot6\times10^{-19}}eV$$

$= 2{\cdot}843$ eV

উদাহরণ 5. ক্যাথোড রশ্মির শক্তি 1·6 eV হলে ওর বেগ কত?

সমাধান ঃ ক্যাথোড রশ্মির শক্তি = 1.6 eV

অর্থাৎ ইলেকট্রনের শক্তি = $1{\cdot}6 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ Joule

আবার ক্যাথোড রশ্মির ইলেকট্রনের গতিশক্তি = $\frac{1}{2}mv^2$

যেখানে m = ইলেকট্রনের ভর

v = ইলেকট্রনের গতিবেগ

$$\therefore \frac{1}{2}mv^2 = 1\cdot6\times1\cdot6\times10^{-19}$$

অথবা, $\frac{1}{2}\times(9\cdot1\times10^{-31})\times V^2 = 1{\cdot}6 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$

অথবা, $v = \sqrt{\frac{2\times1\cdot6\times16\times10^{-19}}{9\cdot1\times10^{-31}}}$

$= 2{\cdot}37 \times 10^{6}$ m/s

1.15 আলোক তড়িৎক্রিয়া

কোনো কোনো ধাতব পদার্থের উপর আলো পড়লে ওদের পৃষ্ঠ থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়ে আসে। এই ঘটনাকে আলোক তড়িৎক্রিয়া বলে। এইভাবে নির্গত ইলেকট্রনগুলিকে বলা হয় ফোটো ইলেকট্রন। ফোটো ইলেকট্রন সাধারণত ধাতব পদার্থের পৃষ্ঠে কিংবা পৃষ্ঠের খুবই সন্নিহিত অভ্যন্তর প্রদেশে সৃষ্টি হয় এবং সৃষ্টির পর ফোটো ইলেকট্রনগুলির যথেষ্ট পরিমাণে গতিশক্তি থাকে যার ফলে এরা ধাতব পদার্থের পৃষ্ঠ থেকে নির্গত হয়ে আসে। সোডিয়াম, লিথিয়াম, পটাসিয়াম, সিজিয়াম প্রভৃতি ক্ষারীয় ধাতুর ক্ষেত্রে সাধারণ দৃশ্যমান আলো পড়লেই ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। দস্তার ক্ষেত্রে সাধারণ দৃশ্যমান আলো পড়লে ইলেকট্রন নিঃসৃত হয় না। কিন্তু অতিবেগুনি রশ্মি পড়লে ইলেকট্রনের নিঃসরণ হয়।

আলোক তড়িৎক্রিয়ার খুব স্বাভাবিক ব্যাখ্যা হল যে আপতিত আলো ধাতব পদার্থের ভিতর শোষিত হয় এবং এই শোষিত আলোর শক্তি ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হয় এবং যার ফলে ইলেকট্রন ধাতব পদার্থের বন্ধনমুক্ত হয়ে বেরিয়ে আসে। 1888 সালে আলোক তড়িৎক্রিয়া প্রথম লক্ষ্য করেন জার্মান বিজ্ঞানী হাইনরিখ হার্ৎস। বিজ্ঞানী লেনার্ড এবং টমসন 1900 খ্রিস্টাব্দে পরীক্ষা করে আলোক তড়িৎ ক্রিয়া প্রমাণ করেন।

1.15.1 আলোক তড়িৎক্রিয়ার পরীক্ষা

1.9 চিত্রে আলোক তড়িৎক্রিয়া প্রদর্শনের পরীক্ষা দেখানো হয়েছে।

চিত্র 1.9 : আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া পর্যবেক্ষণের জন্য সহজ পরীক্ষা।

B → একটি কাঁচের ছোট প্রকোষ্ঠ এবং একে খুব নিম্ন বায়ু চাপে রাখা হয়।

E, C → প্রকোষ্ঠের অভ্যন্তরে দুটি ধাতব প্লেট।

A → অ্যামমিটার যা E এবং C-এর সঙ্গে শ্রেণিতে যুক্ত।

ব্যাটারী এবং রোধের সাহায্যে E এবং C প্লেট দুটির মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। এই বিভব প্রভেদকে বাড়ানো কমানো যায় এবং এর দিকও উল্টানো যায়।

কোনো আলোর উৎস থেকে আলো একটি কোয়ার্টজ গবাক্ষের ভিতর দিয়ে প্রকোষ্ঠের অভ্যন্তরে E প্লেটের উপর ফেলা হল।

C প্লেটটি E প্লেটের তুলনায় উচ্চ বিভবে রাখা আছে। সেজন্য E প্লেট থেকে আলোক ক্রিয়ার দরুন যে ইলেকট্রনগুলি নির্গত হয় সেগুলি C প্লেটের দিকে আকর্ষিত হয়। এইভাবে C প্লেটে ক্রমাগত ইলেকট্রন এসে পড়লে বিদ্যুৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়, যার পরিমাণ A-অ্যামমিটার দিয়ে পাওয়া যায়। প্রথম পর্যায়ে আপতিত আলোর কম্পাঙ্ক বদল করে প্রতিটি আলাদা কম্পাঙ্কের জন্য A অ্যামমিটারের সাহায্যে বিদ্যুৎ প্রবাহের পরিমাণ মাপা হয়। এতে দেখা যায় যে বিদ্যুৎ প্রবাহের পরিমাণ নির্ভর করে আপতিত আলোর তীব্রতার উপর এবং প্রতিটি বিভিন্ন পদার্থের জন্য আপতিত আলোর কম্পাঙ্কের একটি ন্যূনতম মান আছে যার কম হলে কোনো ফোটো ইলেকট্রনই নির্গত হয় না। আবার দেখা গেছে আপতিত আলোর তীব্রতা যতই বেশি হোক না কেন, এর কম্পাঙ্ক যদি একটি বিশেষ কম্পাঙ্কের থেকে কম হয় তবে কখনোই ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হয় না।

দ্বিতীয় পর্যায়ে বিভিন্ন পদার্থের আলোকতড়িৎক্রিয়া পর্যবেক্ষণ করার জন্য ঐ সকল পদার্থে গঠিত প্লেট—E-এর স্থানে রাখা হয়। এতে দেখা যায় প্রতিটি পদার্থের জন্য আপতিত আলোর একটি ন্যূনতম কম্পাঙ্ক আছে যার মান বিভিন্ন পদার্থের ক্ষেত্রে বিভিন্ন। আরও দেখা গেছে যে আপতিত আলোর কম্পাঙ্ক যদি ন্যূনতম কম্পাঙ্কের অধিক হয় তবে আলোর তীব্রতার পরিমাণ অতি সামান্য হলেও তার দ্বারা ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হয়।

তৃতীয় পর্যায়ে C এবং E প্লেটদ্বয়েরমধ্যে বিভব পার্থক্যের পরিবর্তন করে প্রতিক্ষেত্রেই তড়িৎপ্রবাহের পরিমাণ মাপা হয়। বিভিন্ন বিভব পার্থক্যের সঙ্গে প্রাপ্ত তড়িৎপ্রবাহের লেখচিত্র 1.10 (a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। লক্ষ্য করলে দেখা যায় বিভব পার্থক্যের পরিমাণ শূন্য বা ধনরাশি তখনও তড়িৎপ্রবাহ বর্তমান থাকে। আবার অধিক বিভব পার্থক্যের জন্য তড়িৎ প্রবাহের মান বৃদ্ধি হয় না এবং এর মান ধ্রুবক হয়ে যায়। এখন যদি E প্লেটটিকে C প্লেটের তুলনায় উচ্চতর বিভবে রাখা হয় এবং এই বিভব পার্থক্য যদি যথোপযুক্ত পরিমাণের হয় তবে C প্লেটে পৌঁছাবার আগেই ফোটো ইলেকট্রনগুলির সমস্ত শক্তি নিঃশেষিত হয়ে যাবে ফলে A অ্যামমিটার তড়িৎপ্রবাহের মান শূন্য দেখাবে।

C প্লেটের যে ন্যূনতম ঋণ বিভবের জন্য বিদ্যুৎ প্রবাহের পরিমাণ শূন্য হয়ে পড়ে তাকে বলে "থামান বিভব" (Stopping Potential)। "থামান বিভব" আপতিত আলোর তীব্রতার উপর নির্ভর করে না। শুধু নির্ভর করে আপতিত আলোর কম্পাঙ্কের উপর। ধরি v নির্গত ইলেকট্রনের গতিবেগ এবং V_0 'থামান বিভব' তবে লেখা যায় $\frac{1}{2}mv^2 = eV_0$ ..... (1.20)

1.10 (a) চিত্র থেকে বলা যায় সমস্ত ইলেকট্রনগুলিই C-এর ভিতর সংগৃহীত হয় এবং তড়িৎপ্রবাহের মান চরম পরিমাণ হয়। এরপর বিভব পার্থক্যের পরিমাণ আরও বৃদ্ধি করলেও তড়িৎ প্রবাহের মান বৃদ্ধি পায় না। এ থেকে বোঝা যায় যে, উৎপন্ন ফোটো ইলেকট্রনগুলির সংখ্যা নির্দিষ্ট।

চিত্র 1.10 : আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার পরীক্ষায় প্রাপ্ত বিদ্যুৎপ্রবাহ ও বিভবের মধ্যে সম্বন্ধ।

অবশ্য আপতিত আলোর তীব্রতার সঙ্গে তড়িৎপ্রবাহের এই চরম মানের পরিবর্তন হয়।

1.10(b) চিত্রে এই পরিবর্তন লক্ষ্য করা যায়। 1.10 (b) চিত্র থেকে আমরা বলতে পারি আপতিত আলোর তীব্রতা বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে মোট উৎপন্ন ইলেকট্রনের সংখ্যারও বৃদ্ধি হয়।

ফোটো ইলেকট্রনগুলির গতিশক্তি ওদের থামান বিভব মেপে (1.20) সমীকরণের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। থামান বিভব যে গতিশক্তি নির্দেশ করে তা হল চরম গতিশক্তি (T_m)। আপতিত আলোর কম্পাঙ্কের সঙ্গে কোনো একটি ধাতুর থেকে নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের চরম গতিশক্তির লেখ আঁকলে 1.11 চিত্রে প্রদর্শিত লেখগুলি পাওয়া যায়।

চিত্র 1.11 : আলোর স্পন্দনাঙ্ক ও নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের চরম শক্তির মধ্যে সরল সম্বন্ধ।

1.11 চিত্রে বিভিন্ন ধাতুর জন্য উপরোক্ত লেখ অঙ্কন করা হয়েছে এবং লক্ষণীয় যে প্রতিক্ষেত্রেই লেখ একটি সরলরেখা ও রেখাগুলি পরস্পর সমান্তরাল। আরও লক্ষণীয় যে প্রতিটি ধাতুর ক্ষেত্রেই এক একটি স্বতন্ত্র ন্যূনতম কম্পাঙ্ক আছে যার কমে ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন হয় না। ন্যূনতম কম্পাঙ্কের অধিক কম্পাঙ্ক হলে ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন হয় এবং এদের গতিশক্তি আপতিত আলোর কম্পাঙ্কের সঙ্গে রৈখিকভাবে বৃদ্ধি পায়। আরও লক্ষ্য করা যায় যে, এই লেখগুলির কোনোটিই আপতিত আলোর তীব্রতার উপর নির্ভর করে না।

1.16 আলোক তড়িৎক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য

(i) আলোক তড়িৎক্রিয়া আলোক পাতের সংগে সংগেই সংঘটিত হয়। অর্থাৎ এটা একটি তাৎক্ষণিক ক্রিয়া।

(ii) আলোক তড়িৎপ্রবাহমাত্রা আপতিত আলোর তীব্রতার সমানুপাতিক, আলোর কম্পাঙ্ক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে না।

(iii) নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলির সর্বোচ্চ নিঃসরণ বেগ বা নিঃসরণ গতিশক্তি আপতিত আলোর কম্পাঙ্কের (বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের) উপর নির্ভর করে। আপতিত আলোর তীব্রতার উপর নির্ভর করে না।

(iv) প্রতিটি ধাতুর ক্ষেত্রে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের জন্য আপতিত আলোর একটি ন্যূনতম কম্পাঙ্ক দরকার। আপতিত আলোর কম্পাঙ্ক এই ন্যূনতম কম্পাঙ্কের কম হলে আলোর

তীব্রতা যত বেশি হোক না কেন পরীক্ষাধীন ধাতু থেকে ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হয় না। এই ন্যূনতম কম্পাঙ্ককে সূচনা কম্পাঙ্ক বলে। বিভিন্ন ধাতুর ক্ষেত্রে সূচনা কম্পাঙ্কের মান বিভিন্ন হয়।

(v) নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ বেগ পরীক্ষাধীন ধাতুর প্রকৃতির উপর নির্ভর করে।

(vi) আলোক তড়িৎ ক্রিয়া পদার্থের তাপমাত্রার উপর নির্ভর করে না।

1.17 আলোক তড়িৎক্রিয়া সংক্রান্ত রাশিমালা

(i) সূচনা কম্পাঙ্ক ঃ কোনো ধাতব পদার্থ থেকে আলোক তড়িৎ ক্রিয়ায় ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের জন্য আপতিত আলোর যে ন্যূনতম কম্পাঙ্ক প্রয়োজন তাকে ধাতুটির সূচনা কম্পাঙ্ক বলে।

(ii) কার্য অপেক্ষক ঃ কোনো ধাতব পদার্থের পৃষ্ঠ থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণ করানোর জন্য ন্যূনতম যে কার্য করতে হয় তাকে পরীক্ষাধীন ধাতব পদার্থের কার্য অপেক্ষক বলে। বিভিন্ন ধাতুর কার্য অপেক্ষককের মান বিভিন্ন হয়।

(iii) ধাতুর কার্য অপেক্ষক ও সূচনা কম্পাঙ্কর সম্পর্ক ঃ

ধরি, ধাতুর কার্য অপেক্ষক = W_0, সূচনা কম্পাঙ্ক = ν_0

$\therefore$ $W_0 = h\nu_0$, যেখানে h প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক।

1.18 আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যগুলি ব্যাখ্যায় সনাতন তরঙ্গ তত্ত্বের অসামর্থ্য

সনাতন তরঙ্গতত্ত্বের সাহায্যে আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যগুলি ব্যাখ্যা করা যায় না। যেমন—

(i) তরঙ্গতত্ত্ব অনুসারে আলোক তড়িৎক্রিয়ায় ইলেকট্রন ধাতু থেকে নির্গত হতে হলে যেহেতু তরঙ্গ কণাকে নির্গত করবে তাই কিছু সময় ব্যয় হওয়ার কথা।

(ii) আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা ও ইলেকট্রনের শক্তি দুটিই আলোকের তীব্রতার সঙ্গে বাড়া উচিত।

(iii) নিঃসৃত ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ গতিশক্তির সঙ্গে কম্পাঙ্কের নির্ভরশীলতা ব্যাখ্যা করা যায় না।

(iv) সূচনা কম্পাঙ্কের উপস্থিতিও তরঙ্গতত্ত্ব অনুসারে ব্যাখ্যা করা যায় না।

1905 সালে আইনস্টাইন আলোকের কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে এর সুষ্ঠু ব্যাখ্যা দেন। এর জন্য 1921 খ্রিস্টাব্দে পদার্থবিজ্ঞানে আইনস্টাইনকে নোবেল পুরস্কারে ভূষিত করা হয়।

1.19 কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যা

প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্বের ভিত্তিতে 1905 সালে আইনস্টাইন আলোক তড়িৎক্রিয়ার প্রথম সুষ্ঠু ব্যাখ্যা দেন। আইনস্টাইনের ব্যাখ্যা অনুযায়ী আলোক তড়িৎক্রিয়া একটি কোয়ান্টাম ঘটনা, বিক্ষিপ্ত আলো হল কতগুলি আলোক কণার বা ফোটনের সমষ্টি যাদের প্রত্যেকটিই প্ল্যাঙ্কের সূত্রানুযায়ী নির্দিষ্ট পরিমাণের শক্তি ($h\nu$) বহন করে। এখানে ν হল আলোর কম্পাঙ্ক এবং h প্লাঙ্কের ধ্রুবক। এইরকম একটি আলোককণা কোনো ধাতুর উপর আপতিত হলে পরমাণুর দ্বারা শোষিত হয় এবং এর সমস্ত শক্তি তখন একটি ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হয়। ইলেকট্রনটি এই অর্জিত শক্তির প্রভাবে ধাতুর বন্ধন থেকে মুক্ত হয়ে বেরিয়ে আসে। প্রকৃতপক্ষে শোষিত আলোক কণার শক্তি দুই অংশে বিভক্ত হয়ে যায়, একটি অংশ ব্যয়িত হয় ইলেকট্রনটিকে ধাতুর বন্ধনদশা থেকে মুক্ত করতে (W_0) এবং বাকী অংশ ইলেকট্রনের গতিশক্তিতে $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ রূপান্তরিত হয়।

অতএব, $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W_0$ ..... (1)

এটিই আইনস্টাইনের আলোক তড়িৎ সমীকরণ। এই সমীকরণের সাহায্যে আলোক তড়িৎক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যগুলি ব্যাখ্যা করা সম্ভব হল। যেমন—

(i) ইলেকট্রনের সঙ্গে ফোটনের সংঘাতের ফলেই ইলেকট্রন নির্গত হয়। এই ঘটনা একটি তাৎক্ষণিক ঘটনা।

(ii) তড়িৎ প্রবাহমাত্রা তথা ইলেকট্রনের সংখ্যা আলোর তীব্রতা তথা ফোটনের সংখ্যার সঙ্গে বাড়ে।

(iii) ফোটনের কম্পাঙ্কের সঙ্গে ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ শক্তি বাড়ে।

(iv) নিম্নতম একটি কম্পাঙ্ক তথা সূচনা কম্পাঙ্ক (ν_0) আছে যার নিচে আলোকের কম্পাঙ্ক হলে ইলেকট্রন নিঃসৃত হবে না।

আপতিত আলোক কণার শক্তি ($h\nu$) যদি ধাতুর উপরিতলস্থ ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি বা ধাতুর কার্য অপেক্ষক (W_0)-এর চেয়ে কম হয় তবে কোনোক্রমেই ইলেকট্রনটি বন্ধনমুক্ত হতে পারে না। ফলে কোনো ফোটন ইলেকট্রন নিঃসৃত হবে না। অর্থাৎ আলোক তড়িৎ ক্রিয়া সম্ভব নয়।

ধরি, সূচনা কম্পাঙ্ক = ν_0

$\therefore\ h\nu_0 = W_0$

সমীকরণটি হবে $\nu = \frac{1}{2}mv^2 + h\nu_0$

বা, $h(\nu - \nu_0) = \frac{1}{2}mv^2$

এভাবে আইনস্টাইন কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আলোক তড়িৎক্রিয়া ব্যাখ্যা করেন।

1.20 মিলিকানের পরীক্ষা

পরে আলোক তড়িৎ ক্রিয়া সূক্ষ্মভাবে পরীক্ষা নিরীক্ষা যাঁরা করেন তাঁদের মধ্যে মিলিকান অন্যতম।

যন্ত্র ঃ মিলিকানের পরীক্ষা ব্যবস্থা (1916 সাল) 1.12 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

চিত্র 1.12 : আলোকতড়িৎ প্রক্রিয়ার উপর পরীক্ষার জন্য মিলিকানের উন্নততর পরীক্ষা।

P একটি পাত্র যার অভ্যন্তরে বায়ুচাপ খুবই নিম্ন। পাত্রের ভিতরে একটি চাকা (W) আছে যার উপর তিন বিভিন্ন ক্ষার ধাতুর নির্মিত তিনটি সিলিন্ডার (C) যুক্ত আছে। চাকাটিকে বাইরে থেকে ঘোরাবার ব্যবস্থা আছে। K একটি ছুরি রাখা হয় যার দ্বারা ধাতুর উপরিতল চেঁছে ফেলে নতুন পরিষ্কার তল উৎপন্ন করা যায়। 'P' পাত্রের একদিকে একটি স্ফটিক নির্মিত প্লেট 'O' লাগানো থাকে। 'O' প্লেটের ভিতর দিয়ে দৃশ্যমান বা অতিবেগুনী রশ্মি প্রবেশ করে যা কিনা সদা পরিষ্কৃত উপরিতলে আপতিত হয়ে ফোটোন ইলেকট্রন নিঃসৃত করতে পারে। O প্লেটটির নীচে একটি বেলনাকৃতি সংগ্রাহক জালি রাখা থাকে। সাধারণতঃ সংগ্রাহক জালিটি তামার দ্বারা নির্মিত হয় বলে আপতিত আলোর প্রভাবে জালি থেকে কোনো ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত হয় না। সংগ্রাহকের সংগে একটি ইলেকট্রোমিটার সংযুক্ত থাকে। এই ইলেকট্রোমিটারের সাহায্যে আলোক তড়িৎ প্রবাহ পরিমাপ করা হয়। সংগ্রাহক জালি (C) এবং চাকার (W) মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করার ব্যবস্থা আছে।

পরীক্ষা পদ্ধতি ও ফলাফল ঃ মিলিকান প্রথমে বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্য সম্পন্ন একটি আলোকরশ্মি ব্যবহার করে C_1, C_2, C_3 ক্ষারীয় ধাতুর টুকরোগুলি থেকে উৎপন্ন আলোক তড়িৎ প্রবাহ পরিমাপ করেন। প্রথমে তিনি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে আপতিত আলোকের তীব্রতা পরিবর্তন করে C এবং W-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে আলোক তড়িৎ প্রবাহ পরিমাপ করেন। তার পরীক্ষালব্ধ ফল 1.12 (a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। এবার যদি W চাকার সাপেক্ষে C-এর বিভব ঋণাত্মক করা যায় তাহলে আলোক তড়িৎ প্রবাহ মাত্রা কমতে থাকে এবং অবশেষে এই বিভবের একটি নির্দিষ্ট মান ($-V_0$) আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা সম্পূর্ণ স্তব্ধ হয়ে যায়। নির্দিষ্ট মানের এই বিভবকে থামান বিভব বলে। 1.12 (a) চিত্র থেকে লক্ষণীয় যে আপতিত আলোর তীব্রতা যাই হোক না কেন নির্দিষ্ট তরঙ্গ দৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোকের ক্ষেত্রে থামান বিভবের মান অপবরিবর্তিত থাকে। তীব্রতা বৃদ্ধির সংগে শুধু সম্পৃক্ত আলোক তড়িৎ প্রবাহ মাত্রা বৃদ্ধি পায়।

এরপর মিলিকান বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোকরশ্মি নিয়ে পরীক্ষা করেন। তিনি বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তীব্রতা এমনভাবে নিয়ন্ত্রিত করেন যে C এবং W-এর মধ্যে বিভব প্রভেদের সংগে সম্পৃক্ত আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা সবক্ষেত্রেই সমান থাকে। পরীক্ষালব্ধ ফল 1.12 (b) চিত্রে লেখচিত্রাকারে দেখানো হয়েছে। এখানে লক্ষণীয় যে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘের আলোকের থামান বিভব বিভিন্ন। এখানে উল্লেখযোগ্য যে C-এর উপর প্রযুক্তবিভব পরিমাপ করবার সময় স্পর্শ বিভবজনিত কিছু ত্রুটি এসে যায়। P পাত্রের মধ্যে প্লাটিনাম নির্মিত তড়িৎদ্বার R-এর সাহায্যে মিলিকান এই ত্রুটি সংশোধন করেন।

মিলিকানের পরীক্ষা থেকেই সর্বপ্রথম প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক h-এর মান শুদ্ধভাবে পাওয়া যায়। বর্তমানে প্ল্যাংকের ধ্রুবকের গৃহীতমান $h = (6{\cdot}6252 \pm 0{\cdot}0002) \times 10^{-34}$ জুল।

চিত্র 1.12 (a) : বিভব পরিবর্তনের সঙ্গে আলোক-তড়িতপ্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র। I_1, I_2, I_3 হচ্ছে বিভিন্ন ক্ষেত্রে আপতিত আলোকের তীব্রতা।

চিত্র 1.12 (b) : বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোকের ক্রিয়ায় আলোক-তড়িত প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র। λ_1, λ_2, λ_3 হচ্ছে বিভিন্ন ক্ষেত্রে আপতিত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য।

1.21 আলোক তড়িৎকোশ, গঠন ও কার্যপ্রণালী

আলোক তড়িৎক্রিয়ার উপর নির্ভর করে যে যন্ত্রের সাহায্যে আলোকশক্তিকে তড়িৎশক্তিতে রূপান্তরিত করা যায় তাকে আলোক তড়িৎকোশ বলে। আলোক তড়িৎকোশ দুরকমের হয়—

(i) বায়ুশূন্য কোশ (ii) গ্যাসভরা কোশ।

(i) বায়ুশূন্য কোশ ঃ সাধারণতঃ এইরূপ কোশের সাহায্যে আলোকের তীব্রতা পরিমাপ করা হয়। 1.13 চিত্রে বায়ুশূন্য কোশের গঠন দেখানো হয়েছে।

B একটি কাঁচ বা কোয়ার্টজ এর তৈরি বাল্ব। C একটি ধাতব অর্ধ চোঙ, যা ক্যাথোড হিসাবে ব্যবহৃত হয়। ক্যাথোডের ভিতরের পৃষ্ঠে আলোক সুবেদী পদার্থের প্রলেপ দেওয়া হয়। সাদা আলোকের ক্ষেত্রে ক্যাথোড তলটি তৈরি করা হয় প্রথমে একটি রূপার পাতের উপর সিজিয়াম ধাতু পরিন্যস্ত করে। পরে তার ওপর সিজিয়াম অক্সাইড প্রলিপ্ত করে। এইরূপ ক্যাথোডকে Cs–O–Ag এইভাবে নির্দেশ করা হয়। A একটি নিকেল বা প্লাটিনামের দন্ড। যাকে অ্যানোড হিসাবে ব্যবহার করা হয়। অ্যানোডকে ক্যাথোড (C)-এর অক্ষ বরাবর বসানো হয়।

চিত্র 1.13 : আলোক-তড়িৎকোশ। C হচ্ছে আলোক সুবেদী ক্যাথোড, যায় উপরে আলোকপাত করলে ফোটোইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। A হচ্ছে অ্যানোড। ডান পাশে কোশটির প্রস্থচ্ছেদ দেখানো হয়েছে।

ক্যাথোড এবং তার নিকটবর্তী অ্যানোড B বাল্বের মধ্যে সন্নিবিষ্ট বাল্বের গায়ের ভিতর দিয়ে বহিঃস্থ বর্তনীর সংযোগের ব্যবস্থা আছে। বাল্বটিকে খুব নিম্ন বায়ুচাপে রেখে সীল করে দেওয়া হয়।

এবার বাইরে থেকে ক্যাথোড পৃষ্ঠে উপযুক্ত আলো আপতিত হলে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডের ধনাত্মক বিভব কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে। দেখা গেছে বিভব প্রভেদ 100 ভোল্ট হলে প্রবাহমাত্রা 1—2 মাইক্রো অ্যামপিয়ার হয়।

এই কোশে আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা আপতিত আলোক তীব্রতার সমানুপাতিক।

(ii) গ্যাসভরা কোশ : এই ধরনের কোশের বাল্বটির মধ্যে নিম্নচাপে ($\approx$ 1 mm পারদ চাপ) আর্গন, নিয়ন প্রভৃতি নিস্ক্রিয় গ্যাস ভরা হয়। প্রযুক্ত বিভবপ্রভেদ বেশি হওয়ার দরুন আলোকসম্পাতের ফলে ক্যাথোড পৃষ্ঠ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি প্রচন্ড বেগে অ্যানোড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়। এর ফলে ফোটো ইলেকট্রনগুলি কোশ মধ্যস্থ গ্যাসকে সংঘাত দ্বারা আয়নিত করে। এভাবে প্রচুর ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক আয়ন সৃষ্টি হয়। এর ফলে আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা অনেক বৃদ্ধি পায়।

এই ধরনের কোশের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা আলোকের তীব্রতার সমানুপাতিক হয় না। ফলে এগুলিকে আলোকের তীব্রতা পরিমাপের কাজে ব্যবহার করা যায় না।

আলোক ভোল্টীয় কোশ : এ ধরনের কোশে বাইরে কোনো ব্যাটারি থাকে না, পরিবর্তে কোশটির সঙ্গে একটি ছোটো গ্যালভানোমিটার লাগানো থাকে। ক্যাথোডের পৃষ্ঠে আলোক আপতিত হলে

গ্যালভানোমিটারের কাঁটা বিক্ষিপ্ত হয়ে তড়িৎপ্রবাহ নির্দেশ করে। ফোটোগ্রাফিক আলোক মাপক যন্ত্রে এধরনের কোশ ব্যবহার করা হয়।

পরিবাহিতা কোশ ঃ কিছু কিছু অর্ধপরিবাহী পদার্থ আছে (যেমন সেলিনিয়াম) যাদের রোধ আলোকের সাথে পরিবর্তিত হয়। অর্ধপরিবাহী পদার্থের এই ধর্ম ব্যবহার করে এই ধরনের কোশ নির্মাণ করা হয়। এই ধরনের কোশ ব্যবহারের জন্য ব্যাটারি প্রয়োজন হয়। পরিবাহিতা কোশে আলোক তড়িৎপ্রবাহ আপতিত আলোকের তীব্রতার ওপর নির্ভরশীল। আলোকের তীব্রতা পরিমাপের কাজে এর ব্যবহার খুবই কম।

আলোকতড়িৎ কোশের ব্যবহার ঃ বিভিন্নভাবে এই কোশ ব্যবহৃত হয় যেমন—

(i) আলোক উৎসের দীপনশক্তি মাপার কাজে।

(ii) সৌরশক্তি থেকে তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি করার জন্য।

(iii) স্বয়ংক্রিয় নিয়ন্ত্রণে।

(iv) টেলিভিশনের প্রেরক যন্ত্রে।

(v) চলচ্চিত্রের শব্দগ্রহণে এবং পুনরুৎপাদনে।

উদাহরণ ঃ 4500 A° তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোক কোনো ধাতুর ওপর আপতিত হল। আপতিত আলোকের শক্তি ও কম্পাঙ্ক কত? যদি ধাতুর কার্য অপেক্ষক 2·3 eV হয় তাহলে ধাতু থেকে নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি কত হবে? বিভবের মান কত?

সমাধান ঃ আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য = 4500 Å

$\therefore$ কম্পাঙ্ক $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{4500 \times 10^{-10}} = 6 \cdot 67 \times 10^{14}$ Hz

আপতিত আলোকের শক্তি $E = h\nu$

$$= 6{\cdot}625 \times 10^{-34} \times 6{\cdot}67 \times 10^{14}$$

$$= 44{\cdot}188 \times 10^{-20} \text{ Joule}$$

$$= \frac{44 \cdot 188 \times 10^{-20}}{1 \cdot 6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

$$= 2{\cdot}76 \text{ eV}$$

ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি $E_m = E - W_0$

$$= 2{\cdot}76 - 2{\cdot}3$$

$$= 0{\cdot}46 \text{ eV}$$

ধরি, থামান বিভব V_0

$$\therefore \quad E_m = eV_0$$

অথবা, $V_0 = \frac{E_m}{e}$

$$= \frac{0 \cdot 46}{e} eV$$

$$= 0{\cdot}46 \text{ Volt}$$

1.22 তাপীয় ইলেকট্রন ঃ

চাপ প্রয়োগের ফলে ধাতু থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণের পদ্ধতিকে বলা হয় তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণ বা তাপায়ন নিঃসরণ।

এই পদ্ধতিতে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলিকে বলা হয় তাপীয় ইলেকট্রন বা তাপায়ন।

1.23 উষ্ণতার সঙ্গে তাপায়ন প্রবাহের পরিবর্তন ঃ

উষ্ণতার সঙ্গে তাপায়ন প্রবাহের পরিবর্তন ডায়োড ভাল্বের সাহায্যে প্রদর্শিত করা যেতে পারে। 1.14 চিত্রে ডায়োড ভাল্বের পুর্ণবর্তনী দেখানো হল।

চিত্র 1.14 : ডায়োড ভাল্ব ব্যবহার করে একটি পূর্ণবর্তনীর চিত্র।

পরীক্ষা পদ্ধতি ঃ ডায়োড ভাল্বের ক্যাথোডটিকে F ফিলামেন্টের সাহায্যে একটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা হয়। এবার প্লেটের (অ্যানোডের) ধনাত্মক বিভব (ক্যাথোডের সাপেক্ষে) আস্তে আস্তে বাড়াতে থাকলে ক্রমশ বেশি সংখ্যক তাপীয় ইলেকট্রন প্লেটের ওপর আপতিতে হতে থাকে ফলে তাপায়ন প্রবাহ বৃদ্ধি পায়। অবশেষে প্লেট (অ্যানোড) বিভব যথেষ্ট উচ্চ হলে ক্যাথোড থেকে নির্গত সব ইলেকট্রনগুলিকেই প্লেট টেনে নেয়, যার ফলে তাপায়ন প্রবাহ সম্পৃক্ত হয়।

এবার ক্যাথোডটির তাপমাত্রা পূর্বের তুলনায় বৃদ্ধি করা হয়। একই ভাবে প্লেট (অ্যানোড) বিভব (ক্যাথোডের সাপেক্ষে) বৃদ্ধি করে তাপয়ান প্রবাহ নির্ণয় করা হয়। লক্ষ্য করা যায় প্লেট (অ্যানোড) বিভব বৃদ্ধির সাথে তাপায়ন প্রবাহ বৃদ্ধি পায় এবং পূর্বের ন্যায় উচ্চ প্লেট বিভবে তাপায়ন প্রবাহ সম্পৃক্ত হয়। কিন্তু এক্ষেত্রে (অর্থাৎ বর্ধিত ক্যাথোড তাপমাত্রায়) সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহের মান সমমানের উচ্চ প্লেট বিভবের জন্য পূর্বের তুলনায় বেশি।

চিত্র 1.15-এ বিভিন্ন ক্যাথোড তাপমাত্রায় প্লেট বিভবের সঙ্গে তাপায়ন প্রবাহের এই পরিবর্তন লেখচিত্রাকারে দেখানো হয়েছে।

চিত্র 1.15 : বিভিন্ন উষ্ণতায় বিভবপ্রভেদের সঙ্গে তাপায়ন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

1.24 রিচার্ডসন ডুসম্যান সমীকরণ ঃ

উষ্ণতার সঙ্গে নিঃসৃত তাপায়ন প্রবাহ-ঘনত্ব সমীকরণটি রিচার্ডসন—ডুসম্যান সমীকরণ নামে পরিচিত। সমীকরণটি হল

$$i_s = AT^2 e^{-W_0/kT}$$

যেখানে i_s = নিঃসৃত তাপায়ন প্রবাহ-ঘনত্ব

$$A = \frac{4\pi m e k^2}{h^2} = \text{ধ্রুবক}$$

এখানে m = ইলেকট্রনের ভর

e = ইলেকট্রনের আধান

k = বোলৎস্‌ম্যান ধ্রুবক

h = প্ল্যাঙ্ক ধ্রুবক

T = ক্যাথোডের উষ্মতা

W_0 = ধাতুর (ক্যাথোডের) কার্য অপেক্ষক।

m, e, k এবং h-এর মান বসিয়ে A-এর মান পাওয়া যায় ঃ

A = 120 অ্যামপিয়ার/সেমি^{2}/ডিগ্রি^{2}

1.25 শট্‌কি ক্রিয়া ঃ

রিচার্ডসন-ডুসম্যান সমীকরণ $\left(i_s = AT^2 e^{-W_0/kT}\right)$ অনুযায়ী সম্পৃক্ত তাপায়ান প্রবাহ (i_s) প্লেটে (অ্যানোডে) প্রযুক্ত বিভবের ওপর নির্ভরশীল নয়। কিন্তু পরীক্ষা করে দেখা গেছে প্লেট (অ্যানোড) বিভব বৃদ্ধির সাথে সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ অল্প পরিমাণে বৃদ্ধি পায়। এটি চিত্র 1.16-এ দেখানো হয়েছে। বিজ্ঞানী শট্‌কি এই বৃদ্ধির সঠিক ব্যাখ্যা দিতে সমর্থ হন। ধনাত্মক প্লেট (অ্যানোড) বিভবের সঙ্গে সম্পৃক্ত তাপায়ন (ইলেকট্রন প্রবাহ) প্রবাহের এই বৃদ্ধিকে বলা হয় "শট্‌কি ক্রিয়া"।

চিত্র 1.16 : বিভবের সঙ্গে সম্পৃক্ত প্রবাহের বৃদ্ধি।

1.26 সারাংশ ঃ

এই অধ্যায়ে আমরা জানতে পারলাম তড়িৎমোক্ষণ নলে নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণের প্রকৃতি। এই ঘটনায় সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ আবিষ্কার ক্যাথোড রশ্মির। ক্যাথোড রশ্মি হল প্রচন্ড বেগে ধাবমান ঋণাত্মক আধানবাহী ইলেকট্রন কণার স্রোত। ক্যাথোড রশ্মির বিভিন্ন ধর্ম সম্বন্ধে আমরা অবগত হয়েছি। পরীক্ষার সাহায্যে সেগুলি প্রমাণ করাও হয়েছে। ক্যাথোড রশ্মির যে ধর্মগুলি সবচেয়ে বেশি রেখাপাত করে সেগুলি হল ঃ

(1) ক্যাথোড রশ্মির গতিশক্তি ও ভরবেগের অস্তিত্ব এবং চাপ প্রয়োগ করার ক্ষমতা, (2) গ্যাসকে আয়নিত করার ক্ষমতা এবং (3) সোনা, রুপা, অ্যালুমিনিয়াম প্রভৃতি বিভিন্ন ধাতুর পাতলা পাত ভেদ করার ক্ষমতা। ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান জে. জে. টমসনের পরীক্ষার সাহায্যে নির্ণয় করা হয়েছে। ইলেকট্রন আধানের মান নির্ণয় করেছেন বিজ্ঞানী মিলিকান তৈলবিন্দু পরীক্ষার সাহায্যে। টমসনের পরীক্ষা পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান $\frac{e}{m} = 1{\cdot}76 \times 10^{11}$ Coulomb/kg। মিলিকানের পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আধানের মান $e = 1{\cdot}601 \times 10^{-19}$ Coulomb। আমরা আরও জেনেছি পদার্থ বিজ্ঞানের যুগান্তকারী আবিষ্কার আলোক তড়িৎ ক্রিয়া এবং এর বৈশিষ্ট্য। আইনস্টাইনের আলোক তড়িৎ সমীকরণ হল $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W_0$, সেখানে $h\nu$ = আপতিত আলোর শক্তি, W_0 = ধাতুর কার্য অপেক্ষক এবং $\frac{1}{2}mv^2$ = নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি। সনাতন তরঙ্গতত্ত্বের সাহায্যে আলোক তড়িৎক্রিয়ার ব্যাখ্যা করা যায় না। 1905 খ্রিস্টাব্দে আইনস্টাইন কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে এর ব্যাখ্যা দেন। এর জন্য 1921 খ্রিস্টাব্দে পদার্থ বিজ্ঞানে আইনস্টাইনকে নোবেল পুরস্কারে ভূষিত করা হয়।

1.27 প্রশ্নাবলি (Questions)

১। (ক) ক্যাথোড রশ্মি কাকে বলে? একে কীভাবে উৎপন্ন করা হয়?

(খ) ক্যাথোড রশ্মির প্রধান ধর্মগুলি লিখুন।

২। (ক) ক্যাথোড রশ্মি তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয় কেন?

(খ) ক্যাথোড রশ্মির আঘাতে টার্গেট উত্তপ্ত হয় কেন?

(গ) পরীক্ষার সাহায্যে দেখান ক্যাথোড রশ্মি সরলরেখায় গমন করে।

(ঘ) ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান বলতে কী বোঝেন? এর মান কত?

(ঙ) সকল ক্যাথোড রশ্মিকণার আপেক্ষিক আধান সমান—এর অর্থ কী?

৩। তড়িৎ মোক্ষণ নলের ঘটনাবলী বর্ণনা করুন।

৪। ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান নির্ণয়ের জন্য জে. জে. টমসনের পরীক্ষা সবিস্তারে বর্ণনা করুন।

৫। ইলেকট্রনের তড়িতাধান নির্ণয়ের জন্য মিলিকানের তেল বিন্দু পরীক্ষা সবিস্তারে বর্ণনা করুন।

৬। (ক) আলোক তড়িৎ ক্রিয়া কী?

(খ) ফোটো ইলেকট্রন কী?

(গ) ধাতুর কার্যঅপেক্ষক কাকে বলে?

(ঘ) সূচনা কম্পাঙ্ক কাকে বলে?

(ঙ) সূচনা কম্পাঙ্ক ও কার্য অপেক্ষকের মধ্যে সম্পর্ক কী?

(চ) সূচনা কম্পাঙ্ক কিসের ওপর নির্ভর করে?

৭। আলোক তড়িৎক্রিয়া প্রদর্শনের একটি পরীক্ষা বর্ণনা করুন।

৮। (ক) আলোক তড়িৎ নিঃসরণের বৈশিষ্ট্যগুলি লিখুন।

(খ) আইনস্টাইনের আলোক তড়িৎ ক্রিয়া সম্পর্কিত সমীকরণটি লিখুন।

(গ) কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আইনস্টাইন কীভাবে আলোক তড়িৎক্রিয়ার ব্যাখ্যা করেছিলেন?

৯। (ক) তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণ বলতে কী বোঝেন?

(খ) তাপায়ন কী?

(গ) ডায়োড ভাল্বে বিভিন্ন ক্যাথোড তাপমাত্রায় প্লেট (অ্যানোড) বিভবের সঙ্গে তাপায়ন প্রবাহের পরিবর্তন লেখচিত্রাকারে দেখান এবং ব্যাখ্যা করুন।

(ঘ) রিচার্ডসন-ডুসম্যান সমীকরণটি লিখুন।

(ঙ) শট্‌কি ক্রিয়া কী?

একক 2 ❑ ধনাত্মক রশ্মি ও ভরবর্ণালী বীক্ষণ

গঠন

2.1 প্রস্তাবনা

2.2 উদ্দেশ্য

2.3 টমসনের পদ্ধতিতে ধনাত্মক রশ্মির বিশ্লেষণ

2.4 টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত অধিবৃত্তগুলির বৈশিষ্ট্য

2.5 এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ

→ 2.5.1 বিবরণ

→ 2.5.2 কর্মপদ্ধতি

→ 2.5.3 আয়নগুলির ভর নির্ণয়

2.6 প্রশ্নাবলি

2.1 প্রস্তাবনা (Introduction) :

ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে দিয়ে তড়িৎমোক্ষণ সম্পর্কিত পরীক্ষার সময় ধনাত্মক ও ঋণাত্মক, দুই প্রকার আয়নের সৃষ্টি হয়। বিজ্ঞানী গোল্ডস্টাইন 1886 খ্রিস্টাব্দে তড়িৎমোক্ষণ সম্পর্কিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার সময় লক্ষ করেন যে তড়িৎমোক্ষণ নলের ক্যাথোড পাত ছিদ্র যুক্ত হলে ক্যাথোড পাতের পিছন দিকে অর্থাৎ অ্যানোড যে দিকে থাকে তার বিপরীত দিকে একটি দীপ্তিমান রশ্মি দেখা যায়। এই রশ্মি অ্যানোড থেকে ক্যাথোডের দিকে যায়। বিজ্ঞানী গোল্ডস্টাইন প্রথমে এই রশ্মির নাম দেন ক্যানেলরশ্মি। যেহেতু এই রশ্মি তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত হয় সেজন্য বলা যেতে পারে ক্যাথোড রশ্মির মতো এরাও একপ্রকার আহিত কণিকার দ্বারা সৃষ্ট রশ্মি। তড়িৎক্ষেত্রে ও চৌম্বকক্ষেত্রে এই রশ্মির বিচ্যুতি ক্যাথোড রশ্মির বিচ্যুতির বিপরীত দিকে হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে এই রশ্মি ধনাত্মক আধান যুক্ত। সেইজন্য পরে এদের নাম দেওয়া হয় ধনাত্মক রশ্মি।

এই রশ্মির উৎপত্তির কারণ হল নিম্নচাপে তড়িৎমোক্ষণ নলে উৎপন্ন ধনাত্মক আয়নগুলি ক্যাথোড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে অ্যানোড থেকে ক্যাথোডের দিকে যায়। এদের মধ্যে কিছুসংখ্যক ধনাত্মক আয়ন ক্যাথোড পাতের ছিদ্র পার হয়ে পেছন দিকে চলে যায়। এই ধনাত্মক আয়নগুলির সঙ্গে সেখানকার নিম্নচাপে গ্যাস অণুগুলির সংঘাত ঘটে। তার ফলে অণুগুলি উত্তেজিত হয়ে আলোক নিঃসৃত করে।

সেইজন্য ক্যাথোড পাতের পেছন দিকে (অর্থাৎ অ্যানোড যে দিকে থাকে তার বিপরীত দিকে-র আয়নগুলির ভ্রমণ পথ দীপ্তিমান হয়। এই ধনাত্মক আয়নগুচ্ছই ধনাত্মক রশ্মি নামে পরিচিত।

2.2 উদ্দেশ্য ঃ

এই অধ্যায়ে আমরা জানতে পারব

(1) ধনাত্মক রশ্মির ধর্ম।

(2) টমসন পদ্ধতিতে ধনাত্মক রশ্মির বিশ্লেষণ।

(3) টমসন পরীক্ষার প্রাপ্ত অধিবৃত্তগুলির বৈশিষ্ট্য।

(4) এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্র—বিবরণ, কর্মপদ্ধতি এবং এর সাহায্যে আয়নগুলির ভর নির্ণয়।

● ধনাত্মক রশ্মির ধর্ম ঃ

(i) তড়িৎক্ষেত্রে ও চৌম্বকক্ষেত্রে এই রশ্মির বিচ্যুতি হয়।

(ii) এই রশ্মি ধনাত্মক আধানে আহিত কণিকার সমষ্টি।

(iii) ধনাত্মক রশ্মির আপেক্ষিক আধান ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান থেকে কম।

(iv) এই রশ্মি খুব পাতলা ধাতব পাত ভেদ করতে পারে।

(v) এই রশ্মি প্রতিপ্রভার সৃষ্টি করতে পারে।

(vi) এই রশ্মি ফোটো প্লেটের উপর ক্রিয়া করে।

2.3 টমসনের পদ্ধতিতে ধনাত্মক রশ্মির বিশ্লেষণ ঃ

বিজ্ঞানী টমসন 1911 খ্রিস্টাব্দে সর্বপ্রথম ধনাত্মক রশ্মির আপেক্ষিক আধান নিরূপণ করেন। টমসনের পরীক্ষায় ব্যবহৃত যন্ত্র চিত্র 2.1-এ দেখানো হল

চিত্র 2.1 : ধনাত্মক রশ্মির e/m নির্ণয়ের জন্য টমসনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

এই যন্ত্রে B একটি কাঁচ নির্মিত ফাঁপা গোলক যার ভেতরের গ্যাসের চাপ পাম্পের সাহায্যে ইচ্ছামতো কমানো যায়। গোলকের এক প্রান্তে অবস্থিত আছে অ্যানোড (A)। এই অ্যানোডের কাছে একটি সরু কৈশিক নল আছে যার মধ্য দিয়ে অতি অল্প হারে গোলকের মধ্যে পরীক্ষাধীন গ্যাস সরবরাহ করা হয়, যাতে একগুচ্ছ ইলেকট্রন পরীক্ষাধীন গ্যাসের অণুগুলির সঙ্গে সংঘাতের ফলে যথেষ্ট সংখ্যক ধনাত্মক আয়ন সৃষ্টি করতে পারে। গোলকটির অন্যপ্রান্তে সংযুক্ত কাঁচনলের মধ্যে ধাতবনলের আকৃতিবিশিষ্ট ক্যাথোড (C) অবস্থিত থাকে। ক্যাথোডের মধ্য দিয়ে একপ্রান্ত থেকে অন্যপ্রান্ত পর্যন্ত 0·1 mm ব্যাসের একটি সূক্ষ্ম ছিদ্র আছে, যাতে ক্যাথোডের ওপর আপতিত ধনাত্মক আয়নগুলির কিছু অংশ নির্গত হয়ে ক্যাথোডের অন্য দিকে একটি খুব সূক্ষ্ম সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ সৃষ্টি করতে পারে। একটি কাঁচের আবরণীর (J) মধ্যে দিয়ে জল প্রবাহিত করে আয়ন বর্ষণের ফলে উত্তপ্ত ক্যাথোডকে ঠান্ডা করা হয়। যন্ত্রে M বৈদ্যুতিক চুম্বকের সাহায্যে চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। চুম্বকের দুটি মেরুর সম্মুখভাগ (P, P′) চুম্বকের দেহ থেকে অভ্রের চাদরের (K, K′) সাহায্যে অন্তরিত করা থাকে। মেরুদ্বয় (P, P′) নরম লোহার তৈরি এবং এদের মধ্যে প্রয়োজন মতো উচ্চ বিভবপ্রভেদ প্রয়োগ করে একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। এইভাবে একই স্থানে এবং একই দিকে ক্রিয়াশীল তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। ক্যাথোডের ছিদ্র থেকে ধনাত্মক রশ্মিগচ্ছ নির্গত হয়ে একই স্থানে এবং একই দিকে ক্রিয়াশীল একটি তড়িৎক্ষেত্র ও একটি চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করে এবং সেখান থেকে নির্গত হয়ে ধনাত্মক রশ্মিগুলি শঙ্কুর আকৃতিবিশিষ্ট কাঁচপাত্রের (D) মধ্যে প্রবেশ করে। কাঁচপাত্রের অভ্যন্তরস্থ বায়ুচাপ খুবই কম থাকে। কাঁচপাত্রের অপরপ্রান্তে একটি ফোটো প্লেট (F) রাখা থাকে। এই প্লেটটি এমনভাবে রাখা হয় যাতে প্লেটের তল অবিচ্যুত ধনাত্মক রশ্মিগুলির অভিলম্বে থাকে। D পাত্রের ভিতরকার চাপ খুবই কম রাখার কারণ হচ্ছে ধনাত্মক আয়নগুলি অন্য গ্যাস অণুর সঙ্গে সংঘাতের ফলে যাতে শক্তিহীন না হয়ে পড়ে ফোটো প্লেটে (F) পৌঁছাতে পারে।

মূলতত্ত্ব ঃ ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের ওপর যখন তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বকক্ষেত্র ক্রিয়া করে না তখন ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের কোনো বিচ্যুতি ঘটে না এবং এই রশ্মিগুচ্ছ F ফোটো প্লেটের ওপরে আপতিত হয় এবং একটি কেন্দ্রীয় অবিচ্যুত কালো বিন্দুর সৃষ্টি হয়। এর পরে ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের ওপর তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করলে রশ্মিগুচ্ছের যে বিচ্যুতি হয় তা নিম্নলিখিত গাণিতিক পদ্ধতিতে সহজেই নির্ণয় করা যায়।

ধরি, ধনাত্মক আয়নগুলির আধান, ভর এবং x-অক্ষ অভিমুখী প্রাথমিক বেগ যথাক্রমে e, M এবং v।

(i) তড়িৎক্ষেত্রের দরুন চ্যুতি ঃ

ধরি, প্লেট দুটির মধ্যে স্থাপিত তড়িৎক্ষেত্রে প্রবেশের পূর্বে x অভিমুখে ধনাত্মক আয়নটির গতিবেগ

ধ্রুবক থাকে এবং এদের মধ্যে স্থাপিত সম তড়িৎক্ষেত্র E-এর প্রভাবে y দিকে বিচ্যুত হয়। (যেহেতু তড়িৎক্ষেত্র y অক্ষ অভিমুখে ক্রিয়া করে)

$\therefore$ y অভিমুখে কণার গতির সমীকরণ হবে

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = Ee$$ [$\because$ y হল y দিকে কণাটির সরণ

অথবা, $$M\frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}\right) = E.e$$ $\therefore$ $\frac{dy}{dt}$ হল y দিকে কণাটির গতিবেগ।

অথবা, $$\frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}\right) = \frac{E.e}{M}$$ y এবং $\frac{dy}{dt}$ উভয়েই x-এর ওপর নির্ভরশীল]

অথবা, $$\frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dt}\right)\frac{dx}{dt} = \frac{E.e}{M}$$

কিন্তু $\frac{dx}{dt} = v =$ x দিকে কণার প্রাথমিক বেগ।

$$\therefore \frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dt}\right).v = \frac{E.e}{M}$$

অথবা, $$\frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dt}\right) = \frac{E.e}{Mv}$$

অথবা, $$\frac{dy}{dt} = \int \frac{Ee}{Mv}dx + C_1$$

$$= \frac{e}{Mv}\int E\,dx + C_1$$

যেখানে C_1 = সমাকলন ধ্রুবক।

এখানে সমাকলন করা হয়েছে x পর্যন্ত সমস্ত মানের জন্য, যখন $x > 0$।

এখানে $C_1 = 0$, কারণ $\frac{dy}{dt} = 0$, যখন $x = 0$

∴ ওপরের সমীকরণকে লেখা যায়,

$$\frac{dy}{dt} = \frac{e}{\mathrm{M\,v}} \int \mathrm{E}\, dx$$

পুনরায় আমরা লিখতে পারি,

$$\frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{e}{\mathrm{M\,v}} \int \mathrm{E}\, dx$$

অথবা, $\frac{dy}{dx} \cdot \mathrm{v} = \frac{e}{\mathrm{M\,v}} \int \mathrm{E}\, dx$

অথবা, $\frac{dy}{dx} = \frac{e}{\mathrm{M\,v}^2} \int \mathrm{E}\, dx$

অথবা, $y = \frac{e}{\mathrm{M\,v}^2} \int_0^L dx \left(\int \mathrm{E}\, dx \right)$ ..... (2.1)

বিভিন্ন অবস্থানে E-এর মান নির্ণয় করে উপরোক্ত সমাকলের মান নির্ধারণ করা যায়।

(ii) চৌম্বকক্ষেত্রের দরুন চ্যুতি ঃ

y-অক্ষ বরাবর সমমাত্রা চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য z অক্ষ বরাবর ধনাত্মক আয়নের বিচ্যুতি অনুরূপভাবে নির্ধারণ করা যায়। এক্ষেত্রে ধনাত্মক আয়নের গতির সমীকরণ

$$\mathrm{M} \frac{d^2 z}{dt^2} = \mathrm{B}\, e\, \mathrm{v} \quad [\mathrm{B} = \text{চৌম্বকক্ষেত্র}]$$

পূর্বের পদ্ধতি অনুসরণ করে এই সমীকরণের সমাধান করলে আমরা পাই,

$$z = \frac{e}{\mathrm{M\,v}} \int_0^L dx \int \mathrm{B}\, dx \qquad \text{..... (2.2)}$$

বিভিন্ন অবস্থানে B-এর মান পরিমাপ করে এই সমাকলটি নির্ণয় করা যায়।

(2.1) এবং (2.2) সমীকরণে সমাকলগুলি তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্রের প্রাবল্যের ওপর এবং উক্ত ক্ষেত্রদ্বয়ের জ্যামিতিক বিস্তৃতির ওপর নির্ভর করে। সুতরাং তড়িৎক্ষেত্রের ও চৌম্বকক্ষেত্রের নির্দিষ্ট মানে এই সমাকলগুলির মান ধ্রুবক হিসাবে ধরা যেতে পারে।

∴ 2.1 এবং 2.2 সমীকরণদ্বয়কে লেখা যায়

$$y = k_e \cdot \frac{e}{M v^2}, \qquad \text{..... (2.3)}$$

যেখানে k_e = ধ্রুবক সংখ্যা

এবং $$z = k_m \frac{e}{Mv} \qquad \text{..... (2.4)}$$

এখানে k_m = ধ্রুবক সংখ্যা।

সুতরাং (2.3) এবং (2.4) সমীকরণদ্বয় থেকে আমরা লিখতে পারি,

$$\frac{z^2}{y} = G.\frac{e}{M} \qquad \text{..... (2.5)}$$

এখানে G = একটি ধ্রুবক।

G-এর মান তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্রের মানের ওপর এবং যন্ত্রটির জ্যামিতিক গঠনের ওপরে নির্ভরশীল।

(2.5) সমীকরণে লক্ষণীয় যে, আয়নগুলির প্রাথমিক বেগ v সমীকরণে প্রত্যক্ষভাবে উপস্থিত নেই।

নির্দিষ্ট তড়িৎক্ষেত্রে ও নির্দিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রে নির্দিষ্ট প্রকৃতির আয়নের জন্য

$\frac{e}{M}$ ধ্রুবক থাকে

∴ (2.5) সমীকরণ থেকে আমরা পাই,

$$\frac{z^2}{y} = \text{ধ্রুবক} \qquad \text{..... (2.6)}$$

সমীকরণ (2.6) একটি অধিবৃত্তের সমীকরণ।

(2.6) সমীকরণ থেকে বলা যেতে পারে যুগপৎ বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্র y-অক্ষের দিকে পরস্পর সমান্তরাল ভাবে উপস্থিত থাকলে তাদের প্রভাবে আহিত কণাগুলি এক-একটি অধিবৃত্তে এসে আপতিত হবে।

অধিবৃত্তের বিশ্লেষণ ঃ

ফোটো প্লেটের (F) ওপর ($y - z$ সমতলে) বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন সমপ্রকৃতির (যাদের $\frac{e}{M}$ = ধ্রুবক)

আয়নগুলি একটি অধিবৃত্ত রেখা বরাবর আপতিত হয়। চিত্র 2.2-এ এইরূপ কয়েকটি অধিবৃত্ত দেখানো হয়েছে।

চিত্র 2.2 : ধনাত্মক রশ্মি অধিবৃত্ত

বিভিন্ন $\frac{e}{M}$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ দ্বারা বিভিন্ন অধিবৃত্ত উৎপন্ন হয়। যে-কোনো একটি অধিবৃত্তের বিভিন্ন বিন্দুর সৃষ্টি হয় একই $\frac{e}{M}$ কিন্তু বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছের দ্বারা।

যদি E এবং B জানা থাকে তবে অধিবৃত্তের ওপরে যে-কোনো বিন্দুর স্থানাঙ্কদ্বয় y এবং z পরিমাপ করে (2.5) সমীকরণের সাহায্যে $\frac{e}{M}$ নির্ণয় করা যায়। টমসন প্রথমে হাইড্রোজেন গ্যাস ব্যবহার করেন। হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে ধনাত্মক রশ্মির $\frac{e}{M}$-এর মান পাওয়া যায় 9571 e.m.u.

(2.5) সমীকরণের সাহায্যে ধনাত্মক রশ্মির $\frac{e}{M}$-এর মান নির্ণয় করতে হলে y ও z অভিমুখে বিচ্যুতির সঠিক পরিমাপ প্রয়োজন। সেজন্য কিছুক্ষণ পরীক্ষা চালানোর পর চৌম্বকক্ষেত্র বিপরীতমুখী করা হয়, যার ফলস্বরূপ y-অক্ষের নীচের দিকে আর একটি অধিবৃত্ত পাওয়া যায় (a' a')। 2.2 চিত্রে দ্বিতীয় অধিবৃত্তটি ($a'a'$) যেন প্রথম অধিবৃত্তটির (aa) প্রতিবিম্ব। যে-কোনো বিন্দুতে এদের মধ্যেকার দূরত্ব = MM′ = 2z পরিমাপ করে (2.5) সমীকরণের সাহায্যে $\frac{e}{M}$ নির্ণয় করা যায়।

2.4 টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত অধিবৃত্তগুলির বৈশিষ্ট্য ঃ

(i) একই আধানসম্পন্ন দুই প্রকার গ্যাসের ধনাত্মক আয়নের জন্য দুটি বিভিন্ন অধিবৃত্ত সৃষ্টি হয়। এদের মধ্যে অপেক্ষাকৃত হাল্‌কা আয়নের অধিবৃত্তের অবস্থান অন্যটি অপেক্ষা y-অক্ষ থেকে দূরে সৃষ্টি হয়।

(ii) অধিবৃত্তগুলি মূলবিন্দু O পর্যন্ত বিস্তৃত হয় না। মূলবিন্দু থেকে কিছু দূরে y স্থানাঙ্কের একটি নির্দিষ্ট নিম্নতম মান থেকে শুরু হয়।

(iii) প্রতিটি অধিবৃত্তের জন্য আপেক্ষিক আধানের একটি নির্দিষ্ট মান থাকে।

(iv) আপেক্ষিক আধানের নির্দিষ্ট মানের আয়নগুলি একটি অধিবৃত্তের আকারে ছড়িয়ে পড়ার জন্য যে-কোনো বিন্দুতে আয়নের তীব্রতা অনেক কম হয়।

2.5 এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ ঃ

কোনো আয়ন রশ্মিতে উপস্থিত আয়নগুলির ভর অনুসারে যে যন্ত্র বিশ্লেষণ করতে পারে তাকে ভর বর্ণালী বীক্ষণ বলা হয়।

এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ এধরনের একটি যন্ত্র। এই যন্ত্রের সাহায্যে সমস্থানিকের অস্তিত্ব, তাদের ভর, মৌলে আপেক্ষিক প্রাচুর্য বের করা যায়।

2.5.1 বিবরণ ঃ

1919 খ্রিস্টাব্দে এ্যাস্টনের ভরমাপনী যন্ত্র প্রথম নির্মিত হয়। চিত্র 2.3-তে এই যন্ত্র দেখানো হয়েছে। ধনাত্মক আয়নের ধারাটি খুব সংকীর্ণ (0·02 mm) দুটি ফাঁকের ভেতর দিয়ে নির্গত হবার পর একটি সরু রশ্মিতে পরিণত হয়। এই রশ্মিটি নিজের পথের সঙ্গে সামান্যভাবে আনত P_1 এবং P_2 প্লেটের মধ্যে (প্লেটের মধ্যবর্তী দূরত্ব 1·25 mm) প্রবেশ করে। প্লেটদ্বয়ের মধ্যে অল্প বিভব প্রয়োগ করলেই তীব্র তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি হয়। D ফাঁকের দ্বারা অগ্রসরমান রশ্মিটির বিস্তার সংযত করা হয়। এরপর রশ্মিটি একটি চুম্বকক্ষেত্রের ভেতর প্রবেশ করে।

চিত্র 2.3 : এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্রের ক্রিয়াপদ্ধতি

চুম্বকটি বিশেষভাবে নির্মিত হওয়ায় রশ্মিটি চুম্বকক্ষেত্র দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়ে বিশেষ অবস্থানে সমতলে

রক্ষিত ফোটো প্লেটেএকটি নির্দিষ্ট ফোকাসে এসে পড়ে। সমস্ত আয়োজনটি অত্যধিক শূন্যতার ভিতর রাখা হয়।

2.5.2 কর্মপদ্ধতি ঃ

ধরা যাক, ধনাত্মক রশ্মির কণাগুলি যেন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের মধ্যবিন্দু Z থেকে নির্গত হয়ে θ কোণে বিচ্যুত হয়। এরপর রশ্মিটি চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়ে ϕ কোণে বেঁকে যায়।

ধরি, E = স্থির বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র

l = বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে আয়নের গতিপথের দূরত্ব

B = চৌম্বকক্ষেত্র

L = চৌম্বকক্ষেত্রের ভেতর আয়নের গতিপথের দূরত্ব

∴ বৈদুত্যিক বলের প্রভাবে আয়নটির বিচ্যুতির পরিমাণ

$$Z = \frac{1}{2}\left(\frac{Ee}{M}\right).\frac{l^2}{v^2}$$

∴ কৌণিক বিচ্যুতি $\theta = \dfrac{z}{\left(\frac{1}{2}l\right)}$ [যখন θ খুব সামান্য]

$$= \frac{lEe}{Mv^2} \qquad \text{..... (2.7)}$$

একইভাবে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে আয়নটির কৌণিক বিচ্যুতি

$$\phi = \frac{Z'}{L/2}$$ [Z′ = চৌম্বকক্ষেত্রে আয়নটির বিচ্যুতি]

$$= \frac{LBe}{Mv} \qquad \text{..... (2.8)}$$

$$\left[\because Z' = \frac{1}{2}.\frac{Bev}{M}.\frac{L^2}{V^2}\right]$$

এখন 2.7 এবং 2.8 সমীকরণদ্বয়কে লেখা যায়

$$\theta v^2 = K_1 \frac{e}{M} \qquad \text{..... (2.9)}$$

এবং $\phi v = K_2 . \frac{e}{M}$ ..... (2.10)

যেখানে K_1 এবং K_2 ধ্রুবক। এদের মান নির্ভর করে শুধু পরীক্ষার জ্যামিতিক গঠনের ওপর।

(2.9) এবং (2.10) সমীকরণদ্বয়কে অবকলন করে পাওয়া যায়,

$$\frac{\delta\theta}{\theta} + \frac{2\delta v}{v} = 0$$

$$\frac{\delta\phi}{\phi} + \frac{\delta v}{v} = 0$$

$$\therefore \quad \frac{\delta\theta}{\theta} = 2.\frac{\delta\phi}{\phi}$$ [কেবলমাত্র মান ধরা হল]

..... (2.11)

$\delta\theta$ এবং $\delta\phi$ কোণদ্বয় একই আধান ও ভর সমন্বিত আয়নগুলিকে নির্দেশ করে যাদের মধ্যে গতিবেগের পার্থক্য হল δv.

ধরি, a = Z থেকে O বিন্দু পর্যন্ত দূরত্ব

$\therefore$ $a\,\delta\theta$ = O বিন্দুতে ধনাত্মকরশ্মির বিস্তার

এখানে বলা দরকার আমরা ধরেছি যে চৌম্বকক্ষেত্রের সমগ্র প্রভাব O বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে রশ্মিটি যেমন ছড়িয়ে পড়ে তেমনি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে এটি সংহত হয়।

ধরি, $\delta\phi$ = চৌম্বকক্ষেত্রে ধনাত্মক রশ্মিটি সংহত হয়।

$\therefore$ $(\delta\theta - \delta\phi)$ = O বিন্দু থেকে সম্মুখের দিকে ধনাত্মক রশ্মির বিচ্যুতি।

r যদি O বিন্দুর অগ্রবর্তী কোনো বিন্দুর দূরত্ব হয় তবে ওই দূরত্বে ধনাত্মক রশ্মির প্রসার হবে

$$W = a\,\delta\theta + r(\delta\theta - \delta\phi)$$

$$= \delta\theta\left[a + r\left(1 - \frac{\delta\phi}{\delta\theta}\right)\right] \qquad \text{..... (2.12)}$$

$$= \delta\theta\left[a + r\left(1 - \frac{\phi}{2\theta}\right)\right]$$ [(2.11) সমীকরণ থেকে $\frac{\delta\phi}{\delta\theta} = \frac{\phi}{2\theta}$]

ধনাত্মক রশ্মিটি যখন ফোকাসে আসে তখন এর প্রসার W = 0

∴ ফোকাসে আসার শর্ত হিসাবে আমরা লিখতে পারি,

$$\delta\theta\left[a+r\left(1-\frac{\phi}{2\theta}\right)\right]=0$$

অথবা, $a+r\left(1-\frac{\phi}{2\theta}\right)=0$

অথবা, $2a\ \theta = r\ (\phi - 2\theta)$ ..... (2.13)

এই শর্তটি পালিত হলে একই $\frac{e}{M}$ মানবিশিষ্ট কিন্তু বিভিন্ন গতিবেগ সম্পন্ন কণাগুলি একই ফোকাসে আপতিত হবে। OX ও OY যদি আমরা যথাক্রমে x এবং y-অক্ষ হিসাবে স্থির করি তবে G বিন্দুর স্থানাঙ্ক হবে

$r\cos(\phi - 2\theta)$ এবং $r\sin(\phi - 2\theta)$

যদি $(\phi - 2\theta)$ কোণটি খুব ছোট হয় তবে

$\sin(\phi - 2\theta) \approx \phi - 2\theta = \frac{2a\theta}{r}$ [সমীকরণ (2.13) থেকে]

অথবা, $r\sin(\phi - 2\theta) = 2a\ \theta$

∴ ফোকাসের (G বিন্দুর) স্থানাঙ্ক হবে

$\{r\cos(\phi-2\theta), 2a\theta\}$। এখানে যেহেতু y স্থানাঙ্কটি ধ্রুবক, বিভিন্ন $\frac{e}{M}$ মানবিশিষ্ট কণাগুলি OX-এর সমান্তরাল একটি সরলরেখার ওপর এসে আপতিত হবে এবং OX থেকে ওই সরলরেখাটির দূরত্ব হবে $2a\ \theta$।

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র দ্বারা কণাগুলি বিক্ষিপ্ত হয়ে যখন O বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তখন মূল গতিপথ থেকে এদের মোট বিচ্যুতির পরিমাণ $a\ \theta$। এ থেকে এই সিদ্ধান্তে আসা যায় যে, যে সরলরেখাটি ফোকাসগুলির সঞ্চার পথ নির্দেশ করে সেটি Z বিন্দু দিয়ে যায়। সুতরাং এবার যদি একটি ফোটো প্লেট ZGF রেখা বরাবর বসানো যায় সেটি ধনাত্মক রশ্মির মূল গতিপথের সঙ্গে θ কোণ করে থাকে তবে বিভিন্ন $\frac{e}{M}$ মানবিশিষ্ট কণাগুলি ওই প্লেটের ওপর বিভিন্ন বিন্দুতে ফোকাসে আপতিত হবে।

2.5.3 আয়নগুলির ভর নির্ণয় ঃ

আয়নগুলির ভর নির্ণয়ের সহজতম পদ্ধতি হল কোনো জ্ঞাত ভরের সঙ্গে অজ্ঞাত আয়নের ভরের তুলনা করা। এর জন্য C^{++}, O^{++}, C^{+}, O^{+}, CO^{+} ইত্যাদি আয়নগুলি ব্যবহার করা হয় যাদের ভরগুলি যথাক্রমে 6, 8, 12, 16, 28 এই রাশিগুলির অনুপাতে থাকবে। এগুলি ব্যবহার করে ফোকাসের অবস্থানের সঙ্গে ভরের একটি মান আরোপণ লেখ অঙ্কন করা হয়। এই মান আরোপণ লেখ থেকে অজ্ঞাত ভরগুলি নির্ণয় করা যায়।

2.6 প্রশ্নাবলি ঃ

1. ধনাত্মক রশ্মি কাকে বলে? এদের ধর্মগুলি আলোচনা করুন।
2. ধনাত্মক রশ্মি পর্যালোচনার জন্য টমসনের অধিবৃত্ত পদ্ধতি বর্ণনা করুন।
3. টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত অধিবৃত্তগুলির বৈশিষ্ট্যগুলি লিখুন।
4. এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্রের গঠন ও কার্যনীতি ব্যাখ্যা করুন। এই যন্ত্রের সাহায্যে কীভাবে অজ্ঞাত আয়নগুলির ভর নিরূপণ করা যায়?

একক 3 □ পারমাণবিক প্রতিরূপ এবং বোরের তত্ত্ব (Atomic model and Bohr's theory)

গঠন

3.1 প্রস্তাবনা
3.2 উদ্দেশ্য
3.3 টমসনের পারমাণবিক প্রতিরূপ
3.4 রাদারফোর্ডের পারমাণবিক প্রতিরূপ
3.5 হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন প্রতিম পরমাণুর বর্ণালী সম্পর্কে বোরের তত্ত্ব
→ 3.5.1 বোরের স্বীকার্য
→ 3.5.2 ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ এবং শক্তি
→ 3.5.3 শোষণ বা বিকিরণের তরঙ্গ সংখ্যা
→ 3.5.4 বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি
3.6 হাইড্রোজেনের শক্তিস্তর
3.7 বোরের তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা
3.8 রিৎসের সমবায় নীতি
3.9 বোরের সাদৃশ্য নীতি
3.10 কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি
3.11 ভারী হাইড্রোজেনের আবিষ্কার
3.12 সারাংশ
3.13 অনুশীলনী
3.14 প্রশ্নাবলি

3.1 প্রস্তাবনা (Introduction)

পূর্ববর্তী অধ্যায়গুলিতে আপনারা দেখেছেন যে নিম্নচাপযুক্ত গ্যাসের মধ্য দিয়ে তড়িৎ মোক্ষণের ফলে দুই ধরনের বিপরীত তড়িৎ আধানযুক্ত কণা পাওয়া যায়। এগুলো যথাক্রমে ঋণাত্মক আধানযুক্ত ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক আয়ন নামে পরিচিত। ক্রমশ বিভিন্ন পরীক্ষার মাধ্যমে এটা গৃহীত হয় যে ঋণাত্মক তড়িৎযুক্ত ইলেকট্রন কণা এবং ধনাত্মক তড়িৎযুক্ত অংশ—এই দুই অংশের সমন্বয়ে যে-কোনো পরমাণু গঠিত। কোনো নির্দিষ্ট মৌলের পরমাণুগুলি একইভাবে গঠিত, কিন্তু বিভিন্ন মৌলের পরমাণুগুলি অবশ্যই বিভিন্নভাবে গঠিত।

আপনারা আরও জেনেছেন যে কোনো পরমাণুর মোট ভরের তুলনায় ইলেকট্রনের ভর অতি নগণ্য। এমতাবস্থায় পরমাণুতে ইলেকট্রন ও ধনাত্মক অংশ কীভাবে অবস্থান করে, অর্থাৎ পারমাণবিক গঠন, আমাদের জানা বিশেষভাবে প্রয়োজন।

3.2 উদ্দেশ্য (Objectives)

এই এককটি পড়বার পর আপনি জানতে পারবেন ঃ

- পরমাণুর টমসন প্রতিরূপ এবং তার ব্যর্থতা
- পরমাণুর রাদারফোর্ড প্রতিরূপ এবং তার ব্যর্থতা
- হাইড্রোজেন বর্ণালী সম্পর্কে বোরের তত্ত্ব
- বোরের তত্ত্বের সাহায্যে হাইড্রোজেন বর্ণালীর ব্যাখ্যা
- বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি
- বোরের তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা
- হাইড্রোজেন পরমাণুর শক্তিস্তর
- উদ্দীপক শক্তি এবং আয়নায়ন শক্তি
- রিৎসের সমবায় নীতি
- বোরের সাদৃশ্য নীতি
- পরমাণুর উদ্দীপনা, সঙ্কট শক্তি এবং বিভব, আয়নায়ন
- ভারী হাইড্রোজেনের আবিষ্কার

3.3 টমসনের পারমাণবিক প্রতিরূপ (Thomson's atomic model)

পারমাণবিক গঠন সম্পর্কে আধুনিক চিন্তাভাবনা শুরু হল ইলেকট্রন আবিষ্কারের সাথে সাথেই। বিজ্ঞানী টমসনের এই আবিষ্কার (1897) যেহেতু পরমাণুকে দুটি বৈদ্যুতিক আধানযুক্ত অংশের সমষ্টি বলে প্রমাণ করল, সেইহেতু এই দুটি অংশের সমন্বয়ে পরমাণু কীভাবে গঠিত হয় সেই প্রশ্নের উত্তর দেবার দায়ও বিজ্ঞানীদের উপর বর্তাল।

টমসন 1907 সালে ঋণাত্মক ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক অংশের সমন্বয়ে গঠিত নিস্তড়িৎ পরমাণুর গঠন সম্পর্কে প্রথম প্রস্তাব পেশ করেন। পরমাণুর এই প্রতিরূপটি টমসন প্রতিরূপ নামে পরিচিত।

এই প্রতিরূপ অনুসারে পরমাণুর মোট ধনাত্মক তড়িৎ 10^{-10} m ক্রমের মানের ব্যাসার্ধযুক্ত একটি গোলকের মধ্যে সমভাবে বণ্টিত থাকে বলে ধরা হয়। এই ধনাত্মক গোলকের মধ্যে নির্দিষ্ট অবস্থানে বিন্দুবৎ

ইলেকট্রনগুলি আবদ্ধ। এই গোলকের আকার পরমাণুর আকারের সমান। ধনাত্মক গোলকের মধ্যে ইলেকট্রনগুলি এমনভাবে থাকে যাতে ইলেকট্রনগুলির মধ্যে মোট বিকর্ষণ বল গোলকের কেন্দ্র অভিমুখে এদের আকর্ষণ বলের সমান হয়। যেমন একটি ইলেকট্রন থাকলে (হাইড্রোজেন পরমাণু) ধনাত্মক গোলকের কেন্দ্রে ইলেকট্রনটি থাকবে। দুটি ইলেকট্রন থাকলে (হিলিয়াম পরমাণু), এগুলি গোলকের কেন্দ্র থেকে দুদিকে সমান দূরত্বে থাকবে, ইত্যাদি।

এই প্রতিরূপে ইলেকট্রনগুলিকে স্থির না ধরে মূল স্থির অবস্থানের সাপেক্ষে স্পন্দনশীল ধরা হয়। এই স্পন্দনের কম্পাঙ্ক সুনির্দিষ্ট এবং তার ফলে ইলেকট্রনটিও ঐ কম্পাঙ্কের শক্তি বিকিরণ করবে। কিন্তু পরীক্ষালব্ধ বিভিন্ন ঘটনাকে ব্যাখ্যা করতে গিয়ে এই প্রতিরূপটির নানারকম দুর্বলতা বা ঘাটতি প্রকাশ পায়। অতঃপর প্রতিরূপটি বাতিল হয়ে যায়। তথাপি প্রথম পারমাণবিক প্রতিরূপ হিসাবে এর ঐতিহাসিক মূল্য অস্বীকার করা যায় না।

3.4 রাদারফোর্ডের পারমাণবিক প্রতিরূপ (Rutherford's atomic model)

1911 সালের মধ্যেই লর্ড রাদারফোর্ড একগুচ্ছ পরীক্ষা শেষ করেন। তিনি অতি পাতলা সোনার পাত দ্বারা α-কণার (হিলিয়াম পরমাণুর নিউক্লিয়াস) বেশি কোণে বিক্ষেপণ পর্যবেক্ষণ করে এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে **(i)** পরমাণুর কেন্দ্রে ধনাত্মক আধানের অংশটি কেন্দ্রীভূত আছে। এর ব্যাসার্ধ প্রায় 10^{-14} m। একে নিউক্লিয়াস বা কেন্দ্রক বলা হয়। **(ii)** পরমাণুর মোট ভর এই নিউক্লিয়াসের ভরের প্রায় সমান এবং **(iii)** পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলিও স্বতন্ত্রভাবে অবস্থান করে।

রাদারফোর্ড প্রথমদিকে ইলেকট্রনগুলিকে স্থির ধরে প্রতিরূপ প্রস্তাব করেন। কিন্তু অনতিবিলম্বে তার অসুবিধা বুঝতে পেরে ইলেকট্রনগুলিকে নিউক্লিয়াসের চারপাশে বৃত্তাকার কক্ষপথে পরিভ্রমণরত বলে প্রস্তাব করেন। সৌরজগতে সূর্যের চারপাশে বিভিন্ন ব্যাসার্ধযুক্ত কক্ষপথে যেমন গ্রহগুলি আবর্তন করে, নিউক্লিয়াসের চারপাশেও ইলেকট্রনগুলি তেমনি বিভিন্ন ব্যাসার্ধের কক্ষপথে আবর্তন করে। এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের অপকেন্দ্র বল (mv^2/r) ইলেকট্রনের ওপর প্রযুক্ত নিউক্লিয়াসের আকর্ষণ বলের দরুন সৃষ্ট অভিকেন্দ্র বল ($Ze.e/r^2$) দ্বারা প্রশমিত হয়। ফলতঃ পরমাণুর গঠন স্থায়িত্ব লাভ করে বলে তখন রাদারফোর্ডের মনে হয়েছিল। এভাবে রাদারফোর্ড একটি গতিশীল পারমাণবিক প্রতিরূপের প্রস্তাব করেন যা কিনা সৌরজগতের সদৃশ। কিন্তু এই প্রতিরূপটিরও কিছু ত্রুটি শীঘ্রই ধরা পড়ল। মুখ্য ত্রুটি দুটি হল এরকম ঃ

(i) আলোকের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে যে-কোনো ত্বরিত (accelerated) আধান তড়িচ্চুম্বকীয় শক্তি বিকিরণ করে, যার ফলে তার গতিবেগ কমে। বৃত্তপথে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনটির ওপর বৃত্তগতির জন্য একটি কেন্দ্রাভিমুখী ত্বরণ (centripetal acceleration) ক্রিয়া করে এবং ফলতঃ ত্বরিত ইলেকট্রনটি শক্তি বিকিরণ করে। এই ক্রমাগত শক্তি হ্রাসের ফলে ইলেকট্রনটির কক্ষপথের ব্যাসার্ধও ক্রমশ হ্রাস পেতে থাকে

এবং একসময় ইলেকট্রনটির নিউক্লিয়াসের ওপর পড়ে বিলীন হবার কথা। চিত্র 3.1-এ কেন্দ্রাভিমুখী বলের এবং চিত্র 3.2-এ ইলেকট্রনের তত্ত্বীয় সর্পিল গতিপথ (spiral trajectory) দেখানো হয়েছে। কিন্তু বাস্তবে পরমাণুর স্থায়িত্ব প্রশ্নাতীত। সুতরাং পরমাণুর এই প্রতিরূপ সঠিক নয়।

(ii) তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী বৃত্তপথে ঘূর্ণায়মান ত্বরিত ইলেকট্রন ক্রমাগত শক্তি বিকিরণ করার ফলে ওই পরমাণুর বর্ণালী নিরবিচ্ছিন্ন (continuous) হওয়ার কথা। কিন্তু পরীক্ষায় দেখা গেল যে সব পরমাণুর বর্ণালীই কয়েকটি পৃথক পৃথক বা অবচ্ছিন্ন (discrete) রেখার সমষ্টি। এই রেখা বর্ণালী (line spectrum) ব্যাখ্যা করার জন্য পরমাণুর গঠন নিয়ে নতুনভাবে চিন্তাভাবনার প্রয়োজন হয়ে পড়ে।

বিখ্যাত বিজ্ঞানী নীলস্ বোর এই ব্যাপারে এক যুগান্তকারী প্রস্তাব উত্থাপন (1912) করেন যা কিনা তৎকালীন দৃষ্টিভঙ্গিতে একেবারেই অবাস্তব বলে মনে হত। কিন্তু বর্ণালী ব্যাখ্যায় এর প্রয়োগের সফলতার পর বোরের এই তত্ত্বটি সবাই মেনে নিতে বাধ্য হন। 1900 সালে ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক কোয়ান্টাম তত্ত্বের যে সূচনা করেন, বোর তাকেই প্রয়োগ করেন তাঁর এই বিখ্যাত তত্ত্বে।

চিত্র 3.1
রাদারফোর্ডের পারমাণবিক প্রতিরূপ

চিত্র 3.2
ইলেকট্রনের সম্ভাব্যগতি

3.5 হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন প্রতিম পরমাণুর বর্ণালী সম্পর্কে বোরের তত্ত্ব (Bohr's theory on the spectrum of hydrogen or hydrogen-like atom)

বোর প্রথমে রাদারফোর্ডের পরমাণু প্রতিরূপ সঠিক ধরে নিয়ে হাইড্রোজেন পরমাণুর ওপর কাজ শুরু করেন। ধরে নেওয়া হয় যে ইলেকট্রনের গতিপথ বৃত্তাকার। অন্যদিকে যদি হিলিয়াম পরমাণুর দুটি ইলেকট্রনের একটিকে পরমাণু থেকে বিচ্যুত করা হয়, তাহলে আয়নিত হিলিয়াম পরমাণু He^+ হাইড্রোজেন প্রতিম একটি পরমাণুর মতো ব্যবহার করবে। এক্ষেত্রে $Z = 2$ একক ধনাত্মক আধানযুক্ত নিউক্লিয়াসের চারপাশে $(Z - 1) = 1$ একক ঋণাত্মক আধানযুক্ত একটি ইলেকট্রন বৃত্তপথে পরিভ্রমণ করলে এই আয়নিত He^+ পরমাণুকে আমরা হাইড্রোজেন প্রতিম বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু বলে ধরতে পারি। অনুরূপভাবে Li^{++} $(Z = 3)$, Be^{+++} $(Z = 4)$ প্রভৃতি আয়নগুলিকে আমরা হাইড্রোজেন প্রতিম পরমাণু বলে গণ্য করতে পারি। 3.3 চিত্রে এগুলো দেখানো হল।

চিত্র 3.3 : হাইড্রোজেন এবং হাইড্রোজেনপ্রতিম পরমাণু।

3.5.1 বোরের স্বীকার্য (Bohr's postulates)

রাদারফোর্ডের পারমাণবিক প্রতিরূপটির বিভিন্ন ত্রুটি ধরা পড়ার পর বোর নিম্নলিখিত তিনটি বর্ণালী সংক্রান্ত সমস্যাগুলি সমাধান করতে অগ্রসর হলেন এবং সফল হলেন (1912)।

(ক) প্রথম স্বীকার্য ঃ হাইড্রোজেন পরমাণুতে যে একটিমাত্র ইলেকট্রন আছে সেটি নিউক্লিয়াসের চারপাশে কয়েকটি সুনির্দিষ্ট অনুমোদিত বিভিন্ন কক্ষপথে ভ্রমণ করতে পারে যাদের বলা হয় স্থায়ী কক্ষপথ (stationary orbit)। এই স্থায়ী কক্ষপথগুলিতে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ L-এর মানগুলি হবে।

$$L = n.h/2\pi = n\hbar \text{ (এখানে } \hbar = h/2\pi,\ h = \text{প্ল্যাঙ্ক ধ্রুবক)} \qquad \text{..... 3.1}$$

যেখানে n একটি পূর্ণ সংখ্যা যার সম্ভাব্য মানগুলি হল $n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$ এবং এই সংখ্যাটিকে বলা হয় কোয়ান্টাম সংখ্যা (quantum number)। এই সমীকরণ 3.1-কে বলা হয় বোরের কোয়ান্টাম শর্ত (Bohr's quantum condition)। এই অবস্থায় ইলেকট্রনটি স্থায়ী অবস্থায় (stationary state) আছে বলা হয়। সনাতন পদার্থবিদ্যা অনুসারে ইলেকট্রনটি যে-কোনো ব্যাসার্ধের কক্ষপথে ঘুরতে পারে—কিন্তু বোরের তত্ত্ব মাত্র কয়েকটি সুনির্দিষ্ট কক্ষপথকেই অনুমোদন করে।

(খ) দ্বিতীয় স্বীকার্য ঃ স্থায়ী কক্ষপথে বিচরণরত ইলেকট্রন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ করে না এবং তার গতি পদার্থবিদ্যার সাধারণ নিয়ম অনুসারে চলে।

(গ) তৃতীয় স্বীকার্য ঃ যখন ইলেকট্রন একটি স্থায়ী কক্ষপথ থেকে অন্য একটি স্থায়ী কক্ষপথে লাফ দেয় তখনই পরমাণু তড়িচ্চুম্বকীয় শক্তি শোষণ বা বিকিরণ করে। এই লাফ দেওয়াকে ইলেকট্রনের সংক্রমণ (transition) বলে। যদি ইলেকট্রনটির উচ্চতর শক্তির কক্ষপথে শক্তি হয় E_1 এবং নিম্নতর শক্তির কক্ষপথে শক্তি হয় E_2, তাহলে নীচের শক্তিস্তরে সংক্রমণের ফলে একটি ফোটনের আকারে বিকিরিত শক্তির পরিমাণ $h\nu$ প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুসারে হবে, $E_1 - E_2 = h\nu = \hbar\omega$ 3.2

যেখানে ν = বিকিরণের কম্পাঙ্ক এবং $\omega = 2\pi\nu$ = আবর্তন কম্পাঙ্ক (circular frequency)। সমীকরণ 3.2-কে বোরের কম্পাঙ্ক শর্ত (frequency condition) বলে।

বোরের এই স্বীকার্যগুলি সরাসরি সনাতন বলবিদ্যা এবং ম্যাক্স-ওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের বিরোধী। তা সত্ত্বেও এই স্বীকার্যগুলিকে অস্থায়ী (ad-hoc) ভিত্তিতে গ্রহণ করে বোর পরবর্তী গণনা শুরু করেন এবং বর্ণালী ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন। হাইড্রোজেন পরমাণু এবং হাইড্রোজেন প্রতিম পরমাণু, সকলের ক্ষেত্রেই এই বক্তব্য সমানভাবে প্রযোজ্য।

পরমাণুর ইলেকট্রন সাধারণ উষ্ণতায় যে কক্ষপথে থাকে তাকে তার ভৌম-অবস্থা (ground state) বলে এবং তা $n = 1$-এর জন্য হয়। এই অবস্থায় ইলেকট্রন শক্তি শোষণ করলে কোনো উচ্চতর শক্তিস্তরে যায় ($n \geq 2$) এবং সেই অবস্থাকে ঐ ইলেকট্রনের উত্তেজিত অবস্থা (excited state) বলে। কিন্তু ইলেকট্রন উত্তেজিত অবস্থায় 10^{-8} s-এর বেশি থাকতে পারে না ; শক্তি ফোটনের (photon) আকারে বিকিরিত হয়ে ইলেকট্রনকে ভৌম অবস্থায় ফিরিয়ে নিয়ে যায়।

3.5.2 ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ এবং শক্তি (Radius of the orbit of the electron and its energy)

ধরা যাক m ভর এবং $-e$ আধানের একটি ইলেকট্রন M ভরের এবং $+Ze$ আধানের একটি নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে ঘুরছে। যেহেতু উভয়েরই ভর সসীম (finite), সেইহেতু তারা উভয়েই তাদের ভরকেন্দ্র O-এর চারপাশে ঘুরতে থাকবে, (চিত্র 3.4) একই কৌণিক বেগ ω নিয়ে। যদি r_1 এবং r_2 যথাক্রমে ইলেকট্রন ও নিউক্লিয়াসের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ হয়, তাহলে

$$mr_1 = Mr_2$$

বা, $r_2 = r_1.m/M$

চিত্র 3.4 : ইলেকট্রন নিউক্লিয়াস সংস্থা

যদি ইলেকট্রন – নিউক্লিয়াস দূরত্ব r হয়,

$$r = r_1 + r_2$$

$$= r_1 (1 + {}^{m}/_{M})$$

ভরকেন্দ্র O-এর সাপেক্ষে এই সংস্থাটির যৌথ ভরবেগ

$$L = mr_1^2\omega + Mr_2^2\omega$$

$$= mr_1^2\omega + M\left(\frac{m}{M}r_1\right)^2\omega$$

$$= mr_1^2\omega\,(1 + m/M)$$

$$= \frac{mr^2\omega}{1 + m/M}$$

$$= \mu r^2\omega \qquad \text{..... 3.3}$$

যেখানে $\mu = \dfrac{m}{1 + m/M} = \dfrac{mM}{m + M}$

এই μ-কে ইলেকট্রনের পরিমিত ভর (reduced mass) বলে। সমীকরণ (3.3) থেকে বলা যায় যে μ ভরের একটি ইলেকট্রন অসীম ভরের একটি নিউক্লিয়াসের চারপাশে ω কৌণিক বেগে ঘুরছে। অর্থাৎ স্থির নিউক্লিয়াস এবং বৃত্তপথে চলমান ইলেকট্রনের ঘটনাকে বর্ণনা করা যায় এই সমীকরণ দিয়ে।

বোরের কোয়ান্টাম শর্ত থেকে আমরা পাই,

$$L = \mu r^2\omega = nh \quad (n = 1, 2, 3, ...)$$

বা, $\mu vr = nh \qquad (\because\ v = \omega r)$

যেখানে v হচ্ছে ইলেট্রনের রৈখিক বেগ।

$$\therefore\ v = \frac{nh}{\mu r} \qquad \text{..... 3.4}$$

এখন ইলেকট্রনটির ওপর প্রযুক্ত স্থির তাড়িতিক বলের মান হচ্ছে $\dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\dfrac{Ze.e}{r^2}$ যা কিনা সেটিকে অভিকেন্দ্র বল জোগায়। এখানে ϵ_0 হচ্ছে শূন্য মাধ্যমের ভেদন-যোগ্যতা (permittivity) এবং এর মান $10^{-9}/36\pi = 8{\cdot}84 \times 10^{-12}$ Farad/metre.

$$\therefore\ \frac{1}{4\pi\,\epsilon_0}\cdot\frac{Ze^2}{r^2} = \mu\frac{v^2}{r}$$

বা, $\dfrac{1}{4\pi\,\epsilon_0}\cdot Ze^2 = \mu r\cdot\left(\dfrac{nh}{\mu r}\right)^2$

বা, $r = \frac{4\pi \epsilon_0}{\mu Z e^2} n^2 h^2$ 3.5

এবং $v = \frac{nh}{\mu} \cdot \frac{\mu Z e^2}{4\pi \epsilon_0 n^2 h^2} = \frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 nh}$ 3.6

সুতরাং সমীকরণ 3.5 এবং 3.6 থেকে দেখা যাচ্ছে যে ইলেকট্রনের বেগ এবং কক্ষপথের ব্যাসার্ধ কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর ওপর নির্ভর করে। হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে $Z = 1$ এবং সেক্ষেত্রে প্রথম বোর ব্যাসার্ধ $(n = 1)$ হবে $r_1 = \frac{4\pi \epsilon_0 h^2}{\mu e^2}$।

আবার, $r \propto n^2$ সুতরাং $r_1 : r_2 : r_3 \ldots\ldots = 1 : 4 : 9 \ldots\ldots$

কক্ষপথে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনটির মোট শক্তি তার গতিশক্তি E_K এবং স্থিতিশক্তি E_V-এর সমষ্টি।

$$E_K = \frac{1}{2}\mu v^2 = \frac{1}{2}\mu \cdot \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{\mu r}$$

$$= \frac{1}{8\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} \quad \ldots\ldots 3.7$$

আবার, $E_V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int_{\infty}^{r} \frac{Ze^2}{r^2} dr = -\frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 r}$

সুতরাং মোট শক্তি $E = E_K + E_V$

$$= \frac{1}{8\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} - \frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 r}$$

$$= -\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 r} \quad \ldots\ldots 3.8$$

সমীকরণ 3.8-এর ঋণাত্মক চিহ্ন বোঝাচ্ছে যে আলোচ্য সংস্থাটি একটি বদ্ধ সংস্থা (bound system)। এই সমীকরণ অনুযায়ী n-তম বোর কক্ষপথের শক্তি হবে

$$E_n = -\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0} \cdot \frac{\mu Z e^2}{4\pi \epsilon_0 n^2 h^2}$$

$$= -\frac{\mu Z^2 e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 n^2 \hbar^2} \qquad \text{..... 3.9}$$

$$= -\frac{\mu Z^2 e^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2} \qquad \text{..... 3.10}$$

সমীকরণ 3.10 থেকে দেখা যাচ্ছে যে $E_n \propto \frac{1}{n^2}$, অর্থাৎ $n \to \infty, E_n \to 0$। কিন্তু ইলেক্ট্রনের শক্তি ধনাত্মক হওয়ায় n-এর মান যত বেশি হবে, শক্তিও তত বেশি হবে এবং ইলেক্ট্রনের সর্বোচ্চ শক্তি হবে শূন্য।

3.5.3 শোষণ বা বিকিরণের তরঙ্গসংখ্যা (Wave number of absorption or emission)

ধরা যাক, ইলেকট্রনটির দুটি স্থায়ী বোর কক্ষপথ n_i এবং n_f। তাহলে সমীকরণ 3.9 অনুসারে

$$E_i = -\frac{\mu Z^2 e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 n_i^2 \hbar^2} \text{ এবং } E_f = -\frac{\mu Z^2 e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 n_f^2 \hbar^2}$$

যদি $n_i > n_f$, তাহলে $E_i > E_f$ এবং বোরের তৃতীয় স্বীকার্য অনুসারে শক্তির বিকিরণ হবে ঃ

$$h\nu = E_i - E_f$$

$$= \frac{\mu Z^2 e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad \text{..... 3.11}$$

এই বিকীর্ণ ফোটনের কম্পাঙ্ক হল

$$\nu = \frac{\mu Z^2 e^4}{64 \cdot \pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 \cdot h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

যদি ঐ বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হয়, তাহলে $c = \nu\lambda$ এবং λ বিকিরণের তরঙ্গ সংখ্যা $\bar{\nu}$ পাওয়া যায় এরকমভাবে—

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{\mu Z^2 e^4}{\frac{64\pi^3}{8} \cdot \epsilon_0^2 \frac{h^3}{h^3} c} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \qquad \text{..... 3.12}$$

$$= \quad R_M \cdot Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \qquad \text{..... 3.13}$$

যেখানে $R_M = \left(\frac{\mu e^4}{\frac{64\pi^3}{8} \cdot \epsilon_0^2 \frac{h^3}{h^3} c} = 1 \cdot 09677 \times 10^7 m^{-1} \right)$

= রীডবার্গ ধ্রুবক (সসীম নিউক্লিয়ার ভরের জন্য)

যদি $M >> m$ হয়, অর্থাৎ ইলেকট্রনের তুলনায় নিউক্লিয়াস অত্যন্ত ভারী হয়, তাহলে $m/M \to 0$ এবং $\mu \to m$। সেক্ষেত্রে আমরা পাই, $R_M \to R_\infty$,

$$R_\infty = \frac{me^4}{\frac{64\pi^3}{8} \epsilon_0^2 \frac{h^2}{h^3} c} = 1 \cdot 09737 \times 10^7 m^{-1}$$

= রীডবার্গ ধ্রুবক (অসীম নিউক্লিয়ার ভরের জন্য)

তাত্ত্বিকভাবে, $R_H = 1{\cdot}09677 \times 10^7\ m^{-1}$ এবং $R_{He} = 1{\cdot}09722 \times 10^7 m^{-1}$

পরীক্ষামূলকভাবে, $R_H = 1{\cdot}09678 \times 10^7 m^{-1}$ এবং $R_{He} = 1{\cdot}09722 \times 10^7 m^{-1}$

হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে $Z = 1$, তখন

$$\bar{\nu} = R_M \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \qquad \text{..... 3.14}$$

আবার, $R_M = \frac{\mu e^4}{8\, \epsilon_0^2\, h^3 c} = \frac{me^4}{8\, \epsilon_0^2\, h^3 c} \cdot \frac{M}{M+m} = R_\infty \cdot \frac{1}{1 + m/M} = R_\infty \cdot \frac{\mu}{m}$

3.5.4 বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি (Origin of spectral series)

বোরের তত্ত্বের বহু বছর আগে 1883 সালে বামার দেখিয়েছিলেন যে পরীক্ষামূলকভাবে প্রাপ্ত দৃশ্যমান অঞ্চলে হাইড্রোজেনের তরঙ্গ সংখ্যাকে সমীকরণ 3.13-র সদৃশ একটি সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়—

$$\bar{\nu} = A\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right) = A\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

যেখানে A একটি ধ্রুবক এবং $n = 3, 4, 5, ...$। বামার পরীক্ষা থেকে λ নির্ণয় করেন এবং $\bar{\nu} = 1/\lambda$ ব্যবহার করে $A = 1{\cdot}09678 \times 10^7 m^{-1}$ পান। লক্ষণীয় যে বামারের A-এর মান রীডবার্গ ধ্রুবকের সাথে মিলে যাচ্ছে। এর থেকে বোরের তত্ত্বের সঠিকতা প্রমাণ হয়। এই বর্ণালী শ্রেণিকে বামার শ্রেণি বলা হয়।

পরবর্তীকালে অতিবেগুনি (ultraviolet) এবং অবলোহিত (infrared) অঞ্চলে বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে হাইড্রোজেনের আরও কয়েকটি বর্ণালী শ্রেণি আবিষ্কৃত হয়। শ্রেণিগুলির তরঙ্গসংখ্যা ভালোভাবে লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে তাদের মধ্যে একটি ঐক্য আছে। সমীকরণের সাহায্যে তাদের এভাবে লেখা যায়—

(i) লাইম্যান শ্রেণি (Lyman series) :

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 2, 3, 4, ...$$

এই শ্রেণিটি অতিবেগুনি অঞ্চলে অবস্থিত।

(ii) বামার শ্রেণি (Balmer series) :

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 3, 4, 5, ...$$

এই শ্রেণির রেখাগুলি দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত।

(iii) পাশেন শ্রেণি (Paschen series) :

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 4, 5, 6, ...$$

এই শ্রেণিটি অবলোহিত অঞ্চলে অবস্থিত।

(iv) ব্রাকেট শ্রেণি (Brackett series) :

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 5, 6, 7, ...$$

এই শ্রেণিটি অবলোহিত অঞ্চলে পাওয়া যায়।

(v) ফাণ্ড শ্রেণি (Pfund series) :

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 6, 7, 8, \ldots\ldots\ldots$$

এই শেষ শ্রেণিটিও অবলোহিত অঞ্চলে অবস্থিত।

বোরের তত্ত্ব থেকে এই বর্ণালী শ্রেণিগুলির উৎপত্তি সহজেই বোঝা যায়। যদি হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেনপ্রতিম পরমাণুর ইলেকট্রনটি প্রাথমিকভাবে $n_i = 2, 3, 4, \ldots\ldots$ স্থায়ী কক্ষপথে থাকে এবং $n_f = 1$ অন্তিম স্থায়ী কক্ষপথে সংক্রমণ (transition) করে, তাহলে সমীকরণ 3.14 অনুসারে বিভিন্ন n_i-এর মানের জন্য বিভিন্ন তরঙ্গসংখ্যাযুক্ত বর্ণালী পাওয়া যাবে—

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), n_i = 2, 3, 4, \ldots\ldots$$ এই রেখাগুলিই লাইম্যান শ্রেণি গঠন করে।

চিত্র 3.4 : হাইড্রোজেনের বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি।

অনুরূপভাবে যদি $n_i = 3, 4, 5, \ldots\ldots\ldots$ এবং $n_f = 2$ হয়, তাহলে আমরা যে তরঙ্গ সংখ্যাগুলি পাই সেগুলি হল—

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)।$$

$n_i = 3$ হলে যে রেখাটি পাওয়া যায় তাকে H_α রেখা বলে। একইভাবে H_β এবং H_γ রেখা দুটি যথাক্রমে $n_i = 4$ এবং $n_i = 5$-এর জন্য সৃষ্টি হয়। এই রেখাগুচ্ছটি দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত। একেই বামার শ্রেণি বলে। এই একই নিয়মে

পাশেন শ্রেণি ($n_i = 4, 5, 6, \ldots\ldots\ldots n_f = 3$),

ব্রাকেট শ্রেণি (n_i = 5, 6, 7, ... এবং n_f = 4) এবং

ফাণ্ড শ্রেণির (n_i = 6, 7, 8,..... এবং n_f = 5) উৎপত্তি হয়। সুতরাং দেখা গেল যে বোরের তত্ত্বের সাহায্যে চমৎকারভাবে পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীকে ব্যাখ্যা করা গেল।

3.6 হাইড্রোজেনের শক্তিস্তর (Energy levels of hydrogen)

বোরের তত্ত্ব অনুসারে স্থায়ী কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তি সুনির্দিষ্ট। সমীকরণ 3.10 অনুযায়ী এই শক্তির মান $E_n = -\dfrac{\mu L^2 e^4}{\frac{32\pi^2}{8} \cdot \epsilon_0^2 n^2 \frac{h^2}{h^2}} = -R_M \dfrac{Z^2 ch}{n^2}$

হাইড্রোজেনের জন্য Z = 1 এবং তখন

$$E_n = -R_M \cdot \frac{ch}{n^2} \qquad \text{..... 3.15}$$

এই সমীকরণে n = 1, 2, 3, ... ইত্যাদি বসালে আমরা বিভিন্ন স্থায়ী কক্ষপথের শক্তি জানতে পারব। এই শক্তিগুলিকে আমরা কতকগুলি সমান্তরাল অনুভূমিক সরলরেখা দিয়ে বোঝাতে পারি। ইলেকট্রন-ভোল্ট (eV) এককে এই শক্তিস্তর 3.6 চিত্রে দেখানো হল ঃ

চিত্র 3.6 : হাইড্রোজেনের শক্তিস্তর (স্কেল অনুসারে নয়)।

চিত্র 3.6 থেকে ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলি এবং বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণিগুলির উৎপত্তি সহজে বোঝা যায়। সমীকরণ 3.14 অনুসারে n-এর মান বাড়ার সাথে সাথে শক্তিস্তরের মানও বাড়তে থাকে এবং $n = \infty$ হলে $E_n = 0$ হয়। n বাড়ার সাথে সাথে শক্তিস্তরগুলি কাছাকাছি অবস্থান করে এবং n খুব বড়ো হলে আমরা শক্তিস্তরগুলিকে পরস্পরের গায়ে গায়ে লাগা অবস্থায় পাই। একেই বলে continuum। উত্তেজিত হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেনপ্রতিম পরমাণুর ইলেকট্রনটি কোনো উচ্চ কক্ষপথ থেকে নীচের কক্ষপথে সংক্রামিত হলে কীভাবে বিকিরণ বর্ণালী রেখা সৃষ্টি হয় চিত্র 3.6 থেকে সেটা পরিষ্কার হচ্ছে। উল্টোভাবে যদি নীচের কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রনটি কোনো উচ্চ কক্ষপথে সংক্রামিত হয় তাহলে তীর চিহ্নগুলির দিক পাল্টে দিতে হবে। তখন আমরা শোষণ বর্ণালী পাব, কারণ শক্তি গ্রহণ বা শোষণ করেই ইলেকট্রনটি নিম্ন শক্তিস্তর থেকে উচ্চ শক্তিস্তরে পৌঁছাবে। যখন $E_n = 0$, অর্থাৎ ইলেকট্রনটির শক্তি সর্বোচ্চ, তখন সেটি নিউক্লিয়াস থেকে অসীম দূরত্বে থাকবে বা পরমাণুটি আয়নিত হয়ে যাবে (ionized atom)। ভৌমস্তরে অবস্থিত কোনো ইলেকট্রনকে পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন করতে যে শক্তি লাগে তাকে আয়নায়ন শক্তি (ionization energy) বলে। হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে আয়নায়ন শক্তি $= 0 - (-13{\cdot}6)\ eV = 13{\cdot}6\ eV$। অর্থাৎ $13{\cdot}6\ eV$ শক্তি গ্রহণ করে প্রথম কক্ষপথের ইলেকট্রনটি ওই পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন হবে। এই শক্তির আনুষঙ্গিক আয়নায়ন বিভব (ionization potential) হচ্ছে $13{\cdot}6\ V$। এটা হচ্ছে ভোল্ট এককে সেই বিভব যার মধ্য দিয়ে একটি ইলেকট্রন ত্বরিত হয়ে $13{\cdot}6\ eV$ আয়নায়ন শক্তি অর্জন করে।

উল্লেখযোগ্য যে বিভিন্ন কারণে ইলেকট্রন নির্দিষ্ট শক্তি গ্রহণ করে ভৌমস্তর থেকে যে-কোনো উত্তেজিত স্তরে পৌঁছাতে পারে। কিন্তু মাত্র 10^{-8}s সময়ের মধ্যেই সেটি শক্তি বিকিরণ করে ভৌমস্তরে ফিরে আসে।

3.7 বোরের তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা (Limitations of Bohr's theory)

আলোকীয় শোষণ এবং বিকিরণ বর্ণালী রেখার এবং শ্রেণির উৎপত্তি ব্যাখ্যায় বোরের তত্ত্ব দারুণভাবে সাফল্য লাভ করে। পরমাণুর স্থায়িত্ব ব্যাখ্যা করতেও এই তত্ত্ব সফল হয়। তা সত্ত্বেও এর কিছু ব্যর্থতা এবং সীমাবদ্ধতা আছে। সেগুলো এরকম—

(ক) ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকারে ঘোরার কথা বলা হয়নি, যদিও সেই সম্ভাবনা অবশ্যই আছে।

(খ) এই তত্ত্ব হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন (fine structure) ব্যাখ্যা করতে পারে না।

(গ) এই তত্ত্ব একাধিক ইলেকট্রনযুক্ত জটিল পরমাণুর বর্ণালী ব্যাখ্যা করতে ব্যর্থ।

(ঘ) এই তত্ত্ব থেকে বর্ণালী রেখাগুলির তুলনামূলক তীব্রতা (comparative intensity) জানা যায় না।

(ঙ) বিভিন্ন শক্তিস্তরে ইলেকট্রনের অতিবাহিত সময় এই তত্ত্ব থেকে জানা যায় না।

3.8 রিৎসের সমবায় নীতি (Ritz's combination principle)

বোরের তত্ত্বের অনেক বছর আগে রিৎস্ (Ritz) লক্ষ্য করেন যে কোনো পরমাণুর বর্ণালী রেখার তরঙ্গসংখ্যাকে $(\bar{\nu}_1)$ অন্য দুটি তরঙ্গসংখ্যার $(\bar{\nu}_2$ এবং $\bar{\nu}_3)$ যোগফল $(\bar{\nu}_2 + \bar{\nu}_3)$ বা বিয়োগফল $(\bar{\nu}_2 - \bar{\nu}_3)$ হিসাবে পাওয়া যেতে পারে। একেই রিৎসের সমবায় নীতি বলে।

ধরা যাক, একটি ইলেকট্রন $n = 3$ কক্ষপথে আছে। এই উত্তেজিত অবস্থা থেকে শক্তি নিঃসরণ করে দুভাবে সে ভৌম অবস্থায় আসতে পারে : (ক) $n = 3 \rightarrow n = 1$ এবং (খ) প্রথমে $n = 3 \rightarrow n = 2$ এবং তারপর $n = 2 \rightarrow n = 1$। প্রথম ক্ষেত্রে একটি বর্ণালীরেখা $(\bar{\nu}_{31}$ তরঙ্গ সংখ্যাযুক্ত) পাওয়া যায়। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে দুটি বর্ণালী রেখা উৎপন্ন হয় $(\bar{\nu}_{32}$ এবং $\bar{\nu}_{21}$ তরঙ্গ সংখ্যাযুক্ত)। পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে,

চিত্র 3.7 : রিৎসের সমবায় নীতি।

3.9 বোরের সাদৃশ্য নীতি (Bohr's correspondence principle)

পরমাণুর গঠন ব্যাখ্যায় কোয়ান্টাম তত্ত্ব ও সনাতন পদার্থবিদ্যার তত্ত্ব প্রয়োগ করে যেসব সিদ্ধান্ত পাওয়া যায় তার কোথাও মিল থাকা উচিত। বোরের সাদৃশ্য নীতি অনুসারে উচ্চ কোয়ান্টাম সংখ্যার ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম তত্ত্বের সিদ্ধান্ত এবং সনাতন পদার্থবিদ্যার তত্ত্বের সিদ্ধান্ত অভিন্ন হবে। অর্থাৎ তখন কোয়ান্টাম তত্ত্ব ও সনাতন পদার্থবিদ্যার তত্ত্বের সাযুজ্য পাওয়া যাবে। এই নীতির সাহায্যে বোর বিকিরণের তীব্রতা, প্রকৃতি (সমবর্তিত কী না) ইত্যাদি ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন।

ধরা যাক, হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটি f কক্ষীয় কম্পাঙ্ক (orbital frequency) বা আবর্তন কম্পাঙ্ক (frequency of rotation) নিয়ে n-তম কক্ষপথে v বেগে r ব্যাসার্ধের বৃত্তপথে ঘুরছে। তাহলে—

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{e^2}{4\pi \in_0 n\hbar} \cdot \frac{\mu e^2}{4\pi\varepsilon_0 n^2\hbar^2} = \frac{\mu e^4}{32\pi^3 \in_0^2 n^3\hbar^3 h^3}$$

আবার বোরের তত্ত্ব থেকে হাইড্রোজেনের $(n + 1)$-তম কক্ষপথ থেকে n-তম কক্ষপথে সংক্রমণের জন্য নির্গত বিকিরণের কম্পাঙ্ক

$$\nu = \frac{\mu e^4}{64\pi^3 \in_0^2 \hbar^3}\left\{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2}\right\}$$

$$= \frac{\mu e^4}{64\pi^3 \cdot \in_0^2 \cdot \hbar^3} \cdot \frac{2n+1}{n^2(n+1)}$$

এখন যদি $n >> 1$, অর্থাৎ কক্ষপথটি যদি অনেক বড়ো মানের হয়, তাহলে

$$\nu = \frac{\mu e^4}{64\pi^3 \cdot \in_0^2 \hbar^3} \cdot \frac{2n}{n^4}$$

$$= \frac{\mu e^4}{32\pi^3 \in_0^2 n^3 \hbar^3}$$

$$= f$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে অনেক বড়ো কোয়ান্টাম সংখ্যার সীমায় (in the limit of very large quantum numbers) বোরের তত্ত্বের ফলাফল এবং সনাতন তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের থেকে প্রাপ্ত ফলাফল ঠিক একই, যেমনটি সাদৃশ্য নীতি থেকে পাওয়ার কথা।

পরবর্তী সময়ে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার (Quantum Mechanics) সাহায্যে বিকিরণের তীব্রতা, প্রকৃতি ইত্যাদি সহজে ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়েছে।

3.10 কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি (Some important quantities)

বর্ণালী সংক্রান্ত আলোচনায় আমরা প্রায়শই কিছু রাশির সাহায্য নেব যেগুলি ভালোভাবে জানা দরকার। এগুলো হল—

(ক) পরমাণুর উদ্দীপনা (Excitation of atoms)

পরমাণুর শক্তি যখন সর্বনিম্ন তখন ইলেকট্রনটি প্রথম কক্ষপথ বা ভৌম অবস্থায় আছে বলা হয়। বাইরে থেকে শক্তি গ্রহণ করে ইলেকট্রনটি উচ্চতর কক্ষপথে যাবার পর পরমাণুটি উদ্দীপ্ত অবস্থায় (excited state)

আছে বলা হয়। সুতরাং যে পদ্ধতিতে বাইরের শক্তির সাহায্যে ইলেকট্রনকে উচ্চতর কক্ষপথে স্থাপন করা হয় তাকে পরমাণুর উদ্দীপনা বলা হয়। বিভিন্ন উপায়ে পরমাণুকে উদ্দীপ্ত করা যায়। বৈদ্যুতিক শক্তি, X-রশ্মি, তেজস্ক্রিয় বিকিরণ ইত্যাদির সাহায্যে পরমাণুকে উদ্দীপ্ত করা যায়। যদি এই উদ্দীপনা এতই বেশি হয় যে ইলেকট্রনটি পরমাণু থেকে পুরোপুরি বিচ্ছিন্ন হয়ে যায়, তাহলে পরমাণুটি আয়নিত হয়েছে বলে বলা হয়।

(খ) সঙ্কট শক্তি এবং বিভব (Critical energy and potential)

একটি স্বাধীন, নিস্তড়িৎ পরমাণুকে তার ভৌম অবস্থা থেকে উদ্দীপ্ত অবস্থায় আনতে ইলেকট্রন-ভোল্ট এককে যে ন্যূনতম শক্তি প্রয়োজন হয় তাকেই ঐ পরমাণুর সংকট শক্তি বলে। ভোল্ট এককে তার প্রাসঙ্গিক/আনুষঙ্গিক বিভবকে সঙ্কট বিভব বলে।

এই সঙ্কট শক্তি/বিভব আবার দু-ধরনের হতে পারে।

(i) উদ্দীপক শক্তি (বিভব) [Excitation energy (potential)]

কোনো পরমাণুকে তার ভৌম অবস্থা থেকে কোনো উদ্দীপ্ত অবস্থায় পাঠাতে ইলেকট্রন-ভোল্ট (ভোল্ট) এককে যে শক্তি (বিভব) প্রয়োজন তাকে ঐ অবস্থার উদ্দীপক শক্তি (বিভব) বলে। এই বিভবকে বিকিরণ বিভব এবং অনুনাদ বিভব (radiation potential and resonance potential) নামেও ডাকা হয়।

(ii) আয়নায়ন শক্তি (বিভব) [Ionization energy (potential)]

কোনো পরমাণুর নির্দিষ্ট কোনো কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রনকে অসীম দূরত্বে নিয়ে যেতে অর্থাৎ পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন করতে ইলেকট্রন-ভোল্ট (ভোল্ট) এককে যে শক্তি (বিভব) প্রয়োজন হয় তাকেই আয়নায়ন শক্তি (বিভব) বলে।

দৃষ্টান্ত : হাইড্রোজেন পরমাণুর n-তম কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তি $E_n = -13{\cdot}6/n^2\ eV$। সুতরাং $E_1 = -1{\cdot}36\ eV$, $E_2 = -13{\cdot}6/4\ eV = -3{\cdot}4\ eV$, $E_3 = -13{\cdot}6/9\ eV = -1{\cdot}51\ eV$ ইত্যাদি। সুতরাং হাইড্রোজেনের আয়নায়ন শক্তি $13{\cdot}6\ eV$ এবং আয়নায়ন বিভব $13{\cdot}6\ V$। কিন্তু ওই হাইড্রোজেন পরমাণুরই অনেকগুলি উদ্দীপক শক্তি (বিভব) হতে পারে—

$$n_1 \rightarrow n_2 : E_2 - E_1 = -3{\cdot}4 - (-13{\cdot}6) = 10{\cdot}2\ eV\ (V)$$
$$n_1 \rightarrow n_3 : E_3 - E_1 = -1{\cdot}51 - (-13{\cdot}6) = 12{\cdot}09\ eV\ (V)$$
$$n_1 \rightarrow n_4 : E_4 - E_1 = -0{\cdot}85 - (-13{\cdot}6) = 12{\cdot}75\ eV\ (V)$$

.....

$$n_1 \rightarrow n_\infty = E_n - E_1 = 0 - (-13{\cdot}6) = 13{\cdot}6\ eV\ (V)$$

সুতরাং দেখা গেল যে হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে কেবলমাত্র একটি আয়নায়ন শক্তি (বিভব) প্রযোজ্য, কিন্তু অনেকগুলি উদ্দীপক শক্তি (বিভব) সম্ভব। যেসব পরমাণুতে একাধিক ইলেকট্রন আছে তাদের ক্ষেত্রে একাধিক আয়নায়ন শক্তি (বিভব) হতে পারে। পরমাণুর সবচেয়ে বাইরের দিকের যোজ্যতা ইলেকট্রন, যেটি নিউক্লিয়াস দ্বারা সবচেয়ে কম আকর্ষিত হয়, সেটিকে বিচ্ছিন্ন করতে যে শক্তি (বিভব) লাগে তাকে প্রথম

আয়নায়ন শক্তি (বিভব) বলে। প্রথম ইলেকট্রনের বিচ্ছিন্নতার পর বাকি ইলেকট্রনগুলি আরও দৃঢ়ভাবে নিউক্লিয়াস দ্বারা আকর্ষিত হবে কারণ পরমাণুর নিট আপেক্ষিক ধনাত্মক আধানের বৃদ্ধি। এই রকম অবস্থায় দ্বিতীয় ইলেকট্রনটিকে বিচ্ছিন্ন করতে স্বভাবতই বেশি শক্তি লাগবে। অর্থাৎ প্রথমের তুলনায় দ্বিতীয় আয়নায়ন শক্তি (বিভব) বেশি। উদাহরণ হিসাবে বলা যায় যে হিলিয়ামের (He) দুটো আয়নায়ন শক্তি (বিভব) যথাক্রমে 24·5 eV (V) এবং 78·6 eV (V)।

3.11 ভারী হাইড্রোজেনের আবিষ্কার (Discovery of heavy hydrogen)

একদল বিজ্ঞানী 1931 সালে লক্ষ্য করলেন যে হাইড্রোজেন বর্ণালীতে মূল রেখাগুলির খুব কাছে খুব সূক্ষ্ম এবং হাল্কা আর একটি সঙ্গী রেখা পাওয়া যায়। তাঁরা সিদ্ধান্ত করলেন যে এগুলো এযাবতকাল অনাবিষ্কৃত হাইড্রোজেনের আইসোটোপের জন্য পাওয়া যাচ্ছে। মূল এবং সঙ্গী রেখার তরঙ্গসংখ্যার পার্থক্য থেকে তাঁরা সিদ্ধান্ত করলেন যে নতুন আইসোটোপটি হাইড্রোজেনের দ্বিগুণ ভারী। এর নাম দেওয়া হল ডয়টেরিয়াম (deuterium) বা ভারী হাইড্রোজেন। বর্ণালী রেখাগুলির তুলনামূলক তীব্রতা পরিমাপ থেকে জানা গেল যে হাইড্রোজেনের এই দুটি আইসোটোপের আপেক্ষিক প্রাচুর্য্য হল—

H : D = 7000 : 1 = 99·985% : 0·015%।

3.12 সারাংশ (Summary)

এই এককটি পড়ে আপনি জানতে পারলেন যে—

- বিজ্ঞানী টমসন প্রথম পারমাণবিক প্রতিরূপ প্রস্তাব করেন। প্রতিরূপটি অত্যন্ত সরল কিন্তু অবাস্তব বলে বর্জিত হয়।
- বিজ্ঞানী রাদারফোর্ড সৌরমণ্ডলের সদৃশ একটি গতিশীল পারমাণবিক প্রতিরূপ প্রস্তাব করেন। কিন্তু সনাতন পদার্থবিদ্যা অনুসারে প্রতিরূপটির স্থায়িত্ব লাভ করার কথা নয় যদিও বাস্তবে পরমাণু অবশ্যই স্থায়ী। সুতরাং এই প্রতিরূপটিও অগ্রাহ্য হয়।
- বিজ্ঞানী বোর কয়েকটি বৈপ্লবিক শর্ত, যা কিনা প্লাঙ্কের কোয়ান্টাম শর্ত থেকে নেওয়া, আরোপ করে পরমাণুর একটি গতিশীল প্রতিরূপ প্রস্তাব করেন।
- বোরের প্রতিরূপ থেকে গণনা করে যে ফলাফল পাওয়া যায় তা পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের খুবই কাছাকাছি। অর্থাৎ বোরের প্রতিরূপ অনেক বেশি বাস্তবসম্মত।
- বোরের প্রতিরূপ বা তত্ত্ব থেকে বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি সহজে ব্যাখ্যা করা যায়।
- বহু সাফল্য সত্ত্বেও বোরের তত্ত্বেরও কিছু সীমাবদ্ধতা আছে।
- বর্ণালী বিশ্লেষণ থেকেই ভারী হাইড্রোজেন বা ডয়টেরিয়াম আবিষ্কার হয়েছে।

3.13 অনুশীলনী (Exercise)

উদাহরণ 1. বামার শ্রেণির প্রথম রেখার (H_α) তরঙ্গ সংখ্যা নির্ণয় করুন।

দেওয়া আছে, $RH = 1{\cdot}09677 \times 10^7\ m^{-1}$।

সমাধান ঃ বামার শ্রেণির প্রথম রেখার জন্য $n_i = 3$ এবং $n_f = 2$ সেক্ষেত্রে তরঙ্গসংখ্যা হবে—

$$\bar{v} = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = R_H\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right) = R_H \times \frac{5}{36}$$

$$= 1 \cdot 09677 \times 10^7 \times \frac{5}{36} m^{-1}$$

$$= 1{\cdot}52 \times 10^6\ m^{-1}$$

সুতরাং H_α রেখার নির্ণেয় তরঙ্গসংখ্যা হল $1{\cdot}52 \times 10^6/m$।

উদাহরণ 2. হাইড্রোজেন পরমাণুর প্রথম স্থায়ী কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তি $-13{\cdot}6\ eV$ হলে তৃতীয় স্থায়ী কক্ষপথ থেকে প্রথম কক্ষপথে ইলেকট্রনের সংক্রমণের ফলে নির্গত ফোটনের শক্তি এবং তরঙ্গ সংখ্যা নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ হাইড্রোজেনের n_i থেকে n_f কক্ষপথে ইলেকট্রনের সংক্রমণ হলে নির্গত ফোটনের শক্তি

$$E = E_{n_i} - E_{n_f} = \frac{\mu Z^2 e^4}{\frac{32\pi^2}{8} \epsilon_0^2 \frac{\hbar^2}{h^2}} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

এখন $n_f = 1$ এবং $n_i = \infty$ হলে, $E_{n_i} = E_\infty = 0$

$$\therefore\ -E_1 = \frac{\mu Z^2 e^4}{\frac{32\pi^2}{8} \cdot \epsilon_0^2 \frac{\hbar^2}{h^2}} \left(\because n_i = \infty, \frac{1}{n_i^2} = 0\right)$$

কিন্তু প্রশ্নানুযায়ী, $E_1 = -13{\cdot}6\ eV$

$$\therefore\ \frac{\mu Z^2 e^4}{\frac{32\pi^2}{8} \epsilon_0^2 \frac{\hbar^2}{h^2}} = 13 \cdot 6\,\text{eV}$$

এখন যদি $n_i = 3$ এবং $n_f = 1$ হয়, তাহলে

$$E_3 - E_1 = 13 \cdot 6\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 13 \cdot 6 \times \frac{8}{9} = 12 \cdot 267\,\text{eV}$$

আবার ঐ ফোটনের তরঙ্গসংখ্যা হবে,

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{h\nu}{hc} = \frac{12 \cdot 267\,\text{eV}}{hc} = \frac{12 \cdot 267 \times 1 \cdot 6 \times 10^{-19}\,\text{J}}{6 \cdot 63 \times 10^{-34}\,\text{Js} \times 3 \times 10^{8}\,\text{ms}^{-1}}$$

$$= 9{\cdot}86787 \times 10^{6}\ m^{-1}$$

ফোটনের নির্ণেয় শক্তি 12·267 eV এবং তার তরঙ্গসংখ্যা $9{\cdot}86787 \times 10^{6}/m$।

উদাহরণ 3. শীতল Hg বাষ্প 144 nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি ফোটন শোষণ করার ফলে দুটি ফোটন বিকিরণ করল। যদি তাদের একটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 187 nm হয়, তাহলে অন্যটির কত হবে?

সমাধান ঃ ধরা যাক,

শোষিত ফোটনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $= \lambda_1 = 144\ nm$

প্রথম বিকীর্ণ ফোটনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $= \lambda_2 = 187\ nm$

দ্বিতীয় „ „ „ $= \lambda_3 = ?$

প্রথম ফোটনের শক্তি

$$E_1 = h\nu_1 = h\frac{c}{\lambda_1} = hc\left(\frac{1}{144}\right) = hc(0 \cdot 006944)$$

অনুরূপভাবে,

$$E_2 = hc\left(\frac{1}{187}\right) = hc(0 \cdot 005348)$$

এবং $E_3 = hc\left(\frac{1}{\lambda_3}\right)$

এখন রিৎসের সমবায় নীতি থেকে পাই,

$$E_1 = E_2 + E_3$$

বা, $E_3 = E_1 - E_2$

বা, $hc\left(\frac{1}{\lambda_3}\right) = hc(0 \cdot 006944) - hc(0 \cdot 005348)$

বা, $\frac{hc}{\lambda_3} = hc \times 0 \cdot 001596$

বা, $\lambda_3 = 626{\cdot}6\ nm$

সুতরাং বিকীর্ণ দ্বিতীয় ফোটনটির নির্ণেয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য হল 626·6 nm।

উদাহরণ 4. ধরা যাক, যে সোডিয়াম D লাইনের গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5893Å। তাহলে ইলেকট্রন-ভোল্ট এককে কমপক্ষে কত শক্তির ইলেকট্রন দ্বারা আঘাত করলে এই উদ্দীপনা রেখা পাওয়া যাবে? ভৌত ধ্রুবকের মান ধরে গণনা করুন।

সমাধান ঃ এখানে $\lambda = 5893\text{Å} = 5893 \times 10^{-10}\ m$।

আঘাতকারী ইলেকট্রনের ন্যূনতম শক্তি এমন হওয়া প্রয়োজন যে,

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

বা, $$E = 6 \cdot 63 \times 10^{-34}\ \text{J-- s.}\ \frac{3 \times 10^{8}\ \text{ms}^{-1}}{5893 \times 10^{-10}\ \text{m}}$$

$$= 6 \cdot 63 \times 10^{-34}\ \frac{3 \times 10^{18}}{5893}\ \text{J}$$

$$= 6 \cdot 63 \times^{-16} \times \frac{3}{5893} \times \frac{1}{1 \cdot 6 \times 10^{-19}}\ \text{eV} \quad [\because 1\text{eV} = 1 \cdot 6 \times 10^{-19}\ \text{J}]$$

$$= \frac{6 \cdot 63 \times 3}{5893 \times 1 \cdot 6} \times 10^{3}\ \text{eV}$$

$$= 2 \cdot 11\ \text{eV}$$

সুতরাং আঘাতকারী ইলেকট্রনের নির্ণেয় ন্যূনতম শক্তির মান 2·11 eV।

উদাহরণ 5. পজিট্রোনিয়াম (positronium) একটি হাইড্রোজেন প্রতিম সংস্থা যেখানে পজিট্রন দিয়ে প্রোটনকে প্রতিস্থাপিত করা হয়েছে। বোরের প্রতিরূপ এবং তত্ত্ব ব্যবহার করে ভৌম অবস্থায় eV-এককে এই সংস্থাটির শক্তি নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ পজিট্রোনিয়াম একটি দ্বিকণা বিশিষ্ট সংস্থা (binary system) যেখানে পজিট্রন এবং ইলেকট্রন পরস্পর পরস্পরেক কেন্দ্র করে আবর্তন করে। বোরের তত্ত্ব এবং প্রতিরূপ অনুসারে ইলেট্রনটির n-তম স্থায়ী কক্ষপথে ভ্রমণের জন্য সংস্থাটির শক্তির মান—

$$E_n = -R_\infty \cdot \frac{hcZ^2}{n^2} \cdot \frac{\mu}{m}$$

এখানে $\mu = \dfrac{m}{1 + \dfrac{m}{M}} = \dfrac{m}{1 + \dfrac{m}{m}} = \dfrac{m}{2}$

এবং $R_\infty = 1 \cdot 09737 \times 10^{7} m^{-1}$

এক্ষেত্রে $Z = 1$ এবং ভৌমস্তরে $n = 1$ সুতরাং

$$E_1 = -1\cdot09737\times10^7\times6\cdot63\times10^{-34}\times3\times10^8\times\frac{m/2}{m}\,\text{J}$$

$$= -\frac{1}{2}\times1\cdot09737\times6\cdot63\times3\times10^{-19}\,\text{J}$$

$$= -1\cdot09737\times6\cdot63\times1\cdot5\times\frac{10^{-19}}{1\cdot6\times10^{-19}}\,\text{eV}$$

$$= -6\cdot8\ \text{eV}$$

[এখানে লক্ষ্য করার বিষয় এই যে পজিট্রোনিয়ামের ইলেকট্রনের পরিমিত ভর $\mu = m/2$ হওয়ার ফলে সংস্থাটির মোট শক্তি হাইড্রোজেনের ভৌমস্তরের মোট শক্তির অর্ধেক হয়েছে, $-13\cdot6/2$ eV $= -6\cdot8$ eV।]

সুতরাং সংস্থাটির ভৌমস্তরে নির্ণেয় শক্তি $-6\cdot8$ eV।

উদাহরণ 6. হাইড্রোজেন (H) এবং হিলিয়াম আয়ন (He^+)-এর জন্য রীডবার্গ ধ্রুবকের মান যথাক্রমে $1\cdot0967758\times10^7\ m^{-1}$ এবং $1\cdot0972227\times10^7\ m^{-1}$। যদি He এবং H-এর নিউক্লিয়াসের ভরের অনুপাত 3·9726 হয় তাহলে প্রোটন ও ইলেকট্রনের ভরের অনুপাত নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ মনে করি, ইলেকট্রনের ভর $= m$

প্রোটনের ,, $= p$

নিউট্রনের ,, $= n$

দেওয়া আছে যে,

H-এর রীডবার্গ ধ্রুবক $R_H = 1\cdot0967758\times10^7\ m^{-1}$

He ,, ,, ,, $R_{He} = 1\cdot0972223\times10^7\ m^{-1}$

এবং $2p + 2n = 3\cdot9726p$ [H-এ একটি p এবং He-এ $2p + 2n$ আছে।]

এখন $R_H \propto \mu_H$ বা, $R_H = A\cdot\mu_H$ [A = ধ্রুবক]

$R_{He} \propto \mu_{He}$ বা, $R_{He} = A\cdot\mu_{He}$

$$\therefore\ \frac{R_{He}}{R_H} = \frac{\mu_{He}}{\mu_H}$$

$$\text{বা,}\ \frac{1\cdot0972223\times10^7}{1\cdot0967758\times10^7} = \frac{\left(\dfrac{m}{1+\dfrac{m}{2p+2n}}\right)}{\left(\dfrac{m}{1+\dfrac{m}{p}}\right)}$$

ধরা যাক, $\dfrac{p}{m} = k$

$$\therefore\ 1\cdot00040747 = \frac{m}{\left(1+\frac{m}{2p+2n}\right)} \times \frac{\left(1+\frac{m}{p}\right)}{m}$$

$$\text{বা,}\ 1\cdot00040747 = \frac{\left(1+\frac{m}{p}\right)}{\left(1+\frac{m}{3\cdot9726p}\right)}$$

$$= \frac{1+\frac{1}{k}}{\left(1+\frac{1}{3\cdot9726k}\right)}$$

$$= \left(\frac{k+1}{k}\right)\times\left(\frac{3\cdot9726k}{1+3\cdot9726k}\right)$$

$$= \frac{3\cdot9726k+3\cdot9726}{1+3\cdot9726k}$$

বা, $1{\cdot}0040747 + 3{\cdot}9742187k = 3{\cdot}9726k + 3{\cdot}9726$

বা, $0{\cdot}0016187k = 2{\cdot}972192$

বা, $k = 1836{\cdot}14$

সুতরাং প্রোটন ও ইলেকট্রনের ভরের নির্ণেয় অনুপাত হল 1836·14।

3.14 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. (a) কোয়ান্টাম সংখ্যা কী? বোরের কোয়ান্টাম শর্ত আলোচনা করুন।
   (b) বোরের কম্পাঙ্ক শর্ত ব্যাখ্যা করুন।
   (c) ইলেকট্রনের পরিমিত ভর ব্যাখ্যা করুন।
   (d) ইলেকট্রন-নিউক্লিয়াস সংস্থার মোট কৌণিক ভরবেগ নির্ণয় করুন।
   (e) হাইড্রোজেনের বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণির নাম উল্লেখ করুন।

(f) H_α, H_β এবং H_γ রেখাগুলির প্রারম্ভিক এবং অন্তিম কক্ষপথের কোয়ান্টাম সংখ্যা চিত্রসহ ব্যাখ্যা করুন।

(g) উদ্দীপনা শক্তি এবং আয়নায়ন শক্তি বলতে কী বোঝেন?

(h) হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনের শক্তি সর্বাধিক হবে কোন্ কক্ষপথে এবং কেন?

(i) কী কী ভাবে পরমাণুকে উদ্দীপিত করা যায়?

(j) পরমাণুর ইলেকট্রনের শক্তি ঋণাত্মক হওয়ার অর্থ কী?

2. পরমাণুর গঠন সম্পর্কে টমসন এবং রাদারফোর্ডপ্রতিরূপ দুটির আলোচনা করুন এবং তাদের ব্যর্থতার কারণগুলি উল্লেখ করুন।

3. হাইড্রোজেন পরমাণুর গঠন সম্পর্কে বোরের স্বীকার্যগুলি বিবৃত এবং ব্যাখ্যা করুন। এগুলির সাহায্যে ঐ পরমাণুর n-তম স্থায়ী কক্ষপথে মোট শক্তি নির্ণয় করুন।

4. বোরের তত্ত্বের সাহায্যে কীভাবে হাইড্রোজেন বর্ণালী শ্রেণির উৎপত্তি ব্যাখ্যা করা যায়?

5. রিৎসের সমবায় নীতি উদাহরণসহ ব্যাখ্যা করুন।

6. বোরের সাদৃশ্য নীতি বিবৃত এবং ব্যাখ্যা করুন।

7. হাইড্রোজেন পরমাণুর নিউক্লিয়াস স্থির ধরে নিয়ে প্রথম স্থায়ী কক্ষপথের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করুন। দেওয়া আছে, $h = 6{\cdot}63 \times 10^{-34}$ J-s, $m = 9{\cdot}1 \times 10^{-31}$ kg, $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$C এবং $\epsilon_0 = 8{\cdot}84 \times 10^{-12}$ F/m। [উত্তর। $5{\cdot}3 \times 10^{-11}$m]

8. হাইড্রোজেনের রীডবার্গ ধ্রুবক $1{\cdot}09677 \times 10^7$ m^{-1} হলে তার বর্ণালীর বামার শ্রেণির বৃহত্তম ও ক্ষুদ্রতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করুন। [উত্তর। 655·7 nm এবং 634·3 nm]

9. ভৌম অবস্থায় একটি পজিট্রনিয়াম পরমাণুর কণাদুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব নির্ণয় করুন। অতঃপর এই ক্ষেত্রে রীডবার্গ ধ্রুবক এবং আয়নায়ন বিভবের মান নির্ণয় করুন।

[উত্তর। $1{\cdot}06 \times 10^{-10}$m ; $0{\cdot}5489 \times 10^7$ m^{-1} ; 6·8eV]

10. সাধারণ হাইড্রোজেন এবং ট্রিটিয়াম (ভর সংখ্যা 3) পরমাণুর বামার শ্রেণির বর্ণালীর প্রথম রেখা দুটির মধ্যে দূরত্ব নির্ণয় করুন যদি $R_\infty = 1{\cdot}09737 \times 10^7$/m হয়। [উত্তর। $2{\cdot}38 \times 10^{-10}$ m]

11. রীডবার্গ ধ্রুবকের রাশিমালা থেকে প্রোটন ও ইলেকট্রনের ভরের অনুপাত নির্ণয় করুন। ধরে নিন যে প্রোটন ও নিউট্রনের ভর সমান। দেওয়া আছে যে, $R_H = 1{\cdot}09678 \times 10^7$/m এবং $R_{He} = 1{\cdot}09722 \times 10^7$/m। [উত্তর। 1869]

12. পারদের $\lambda = 5416$ Å উদ্দীপনা সৃষ্টি করতে যে সঙ্কট বিভব প্রয়োজন সেটা ভোল্ট এককে গণনা করুন। [উত্তর। 2·29 V]

একক 4 □ ইলেকট্রন স্পিন এবং ভেক্টর প্রতিরূপ (Electron spin and Vector Model)

গঠন

4.1 প্রস্তাবনা
4.2 উদ্দেশ্য
4.3 বোর-সমারফেল্ড পরমাণু প্রতিরূপ
→ 4.3.1 সমারফেল্ডের আপেক্ষিকতাজনিত তত্ত্ব
→ 4.3.2 বোর-সমারফেল্ডের প্রতিরূপের অপূর্ণতা
4.4 স্থান কোয়ান্টায়ন
→ 4.4.1 ঘূর্ণচৌম্বক অনুপাত এবং বোর ম্যাগনেটন
4.5 ইলেকট্রন ঘূর্ণন
4.6 পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপ
→ 4.6.1 সংযোজন পরিকল্পনাসমূহ
4.7 পাউলির বর্জন নীতি এবং পরমাণুর ইলেকট্রনীয় গঠন
4.8 পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস
4.9 অনুশীলনী
4.10 সারাংশ
4.11 প্রশ্নাবলি

4.1 প্রস্তাবনা (Introduction) :

বোর তাঁর তত্ত্বে পরমাণু প্রতিরূপে ধরে নিয়েছিলেন যে ইলেকট্রন বৃত্তাকার পথে ঘোরে। কিন্তু গ্রহগুলির উপবৃত্তাকার পথে পরিভ্রমণ, যেমন, ব্যস্তবর্গের সূত্রানুযায়ী (law of inverse square) হয়, তেমন ইলেকট্রনেরও উপবৃত্তাকার গতিপথ স্বাভাবিক।

অন্যদিকে বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী পরমাণুর বর্ণালীর রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য অত্যন্ত সুনির্দিষ্ট। অথচ উচ্চশক্তি সম্পন্ন বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে দেখা গেল যে হাইড্রোজেনের H_α, H_β এবং H_γ রেখাগুলি একক (single) নয়—তারা প্রত্যেকেই খুব নিকটবর্তী কয়েকটি রেখার সমষ্টি। যেমন, H_α রেখাটি 0·13Å

দূরত্বে অবস্থিত দুটি রেখার সমষ্টিমাত্র। কোন বর্ণালী রেখার এইরকম গঠনকে 'সূক্ষ্ম গঠন' (fine structure) বলা হয়। বোরের তত্ত্ব এই সূক্ষ্ম গঠনকে ব্যাখ্যা করতে পারল না। সমারফেল্ড 1915 সালে বোরের প্রতিরূপের সামান্য সংশোধন করে এই সূক্ষ্ম গঠনের ব্যাখ্যা দেবার চেষ্টা করেন।

4.2 উদ্দেশ্য (Objectives)

এই এককটি পড়বার পর আপনি জানতে পারবেন—

- বোর-সমারফেল্ড পরমাণু প্রতিরূপ
- সমারফেল্ডের আপেক্ষিকতাবাদ জনিত সংশোধনী
- স্থান কোয়ান্টায়ন
- ইলেকট্রনের ঘূর্ণন
- পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপ

4.3 বোর-সমারফেল্ড পরমাণু প্রতিরূপ (Bohr-Sommerfeld Atomic Model)

ধরা যাক, M ভরের নিউক্লিয়াসের চারদিকে m ভরের ইলেকট্রন উপবৃত্তাকার পথে ঘুরছে যার অবস্থান সময়ের সাথে পরিবর্তনশীল পোলার স্থানাঙ্ক r এবং ϕ দ্বারা সূচিত হয়। বৃত্তাকার কক্ষপথের জন্য r সুনির্দিষ্ট কিন্তু ϕ পরিবর্তনশীল।

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে যে কোনো মুহূর্তে ইলেকট্রনের দুটি গতিবেগ এবং দুটি ভরবেগ থাকে। এই ভরবেগ দুটি হল ব্যাসার্ধমুখী অরীয় ভরবেগ (p_r) এবং কৌণিক ভরবেগ (p_ϕ)।

এই ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম শর্ত প্রয়োগ করে আমরা লিখতে পারি,

$$\oint p_\phi d\phi = n_\phi h \qquad \text{..... 4.1}$$

এবং $\oint p_r dr = n_r h$ 4.2

এখানে p = ভরবেগ এবং r = ব্যাসার্ধ ভেক্টর।

চিত্র 4.1 ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ

এখানে n_ϕ-কে বলা হল কৌণিক বা দিগংশীয় (angular or azimuthal) কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং n_r-কে বলা হয় অরীয় (radial) কোয়ান্টাম সংখ্যা। এখানে উল্লেখযোগ্য যে বোরের তত্ত্বে বৃত্তাকার কক্ষপথের জন্য একটিমাত্র কোয়ান্টাম সংখ্যা $n = 1, 2, 3, ...$ -এর প্রয়োজন হয়েছিল। কিন্তু কক্ষপথটি উপবৃত্তাকার হওয়ার ফলে দুটি কোয়ান্টাম সংখ্যার দরকার হয়ে পড়ল। সুতরাং

মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা $= n = 1, 2, 3, 4, ...$

$= n_\phi + n_r$

কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যা $= n_\phi = 1, 2, 3, ..., n$

অরীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা $= n_r = 0, 1, 2, ..., (n-1)$

উল্লেখ্য যে, $n_\phi = 0$ হতে পারে না, তাহলে ইলেকট্রনের কোনো কৌণিক ভরবেগ থাকে না, ইলেকট্রন তখন নিউক্লিয়াসের মধ্য দিয়ে সরলরৈখিক দোলগতিতে থাকবে। সুতরাং n এবং n_ϕ দ্বারাই একটি ইলেকট্রনকে চিহ্নিত করা সম্ভব, n_r-এর প্রয়োজন হয় না।

যদি উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রিকতা (eccentricity) ϵ হয়, তাহলে $1 - \epsilon^2 = b^2/a^2$ যেখানে b = অর্ধ-উপাক্ষ (sami-minor axis) এবং a = অর্ধ-পরাক্ষ (semi-major axis)। এই অবস্থায় দেখানো যায় যে, $\frac{b}{a} = \frac{n_\varphi}{n}$ 4.3

সমীকরণ 4.3 ইলেকট্রনের অনুমোদিত উপবৃত্তাকার কক্ষপথগুলি সুনির্দিষ্ট করে দেয়। কেবলমাত্র সেই উপবৃত্তাকার কক্ষপথগুলিই অনুমোদিত হবে যেগুলির পরাক্ষ (major axis) এবং উপাক্ষ (minor axis) দুটির অনুপাত দুটি পূর্ণসংখ্যার অনুপাত। যখন $n_\phi = n$, $b = a$ তখন $\epsilon = 0$ এবং তখন কক্ষপথটি বৃত্তাকার হয়। সুতরাং n-এর নির্দিষ্ট মানের জন্য n_ϕ কেবলমাত্র n-সংখ্যক ভিন্ন মান পেতে পারে, যার অর্থ বিভিন্ন উৎকেন্দ্রিকতার n-সংখ্যক উপবৃত্তাকার পথ হতে পারে। আবার n_ϕ কখনই n-এর থেকে বড়ো হতে পারে না কারণ $b \leq a$।

চিত্র 4.2 : বিভিন্ন n এবং n_ϕ-এর জন্য কক্ষপথ।

উপরোক্ত 4.2 চিত্র আলোচনা করা যাক। প্রথম কক্ষপথে $n = 1$। যেহেতু $n_\phi + n_r = 1$ এবং $n_\phi \neq 0$, $n_\phi = 1$। সুতরাং $n = n_\phi = 1$ হলে কক্ষপথটি অবশ্যই বৃত্তাকার হবে। যখন $n = 2$, $n_\phi = 1$ বা 2, এক্ষেত্রে দুটি কক্ষপথ হবে। একটি বৃত্তাকার ($n = 2$, $n_\phi = 2$) এবং অপরটি উপবৃত্তাকার ($n = 2$, $n_\phi = 1$)। একইভাবে যখন $n = 3$ হয়, তখন তিনটি কক্ষপথ হতে পারে—একটি বৃত্তাকার ($n = 3$, $n_\phi = 3$) এবং দুটি উপবৃত্তাকার [($n = 3$, $n_\phi = 2$) এবং ($n = 3$, $n_\phi = 1$)]। এই কক্ষপথগুলিকে অনেকে 3_3, 3_2 এবং 3_1 চিহ্ন দ্বারা প্রকাশ করেন।

আরেক রকম সংকেত ব্যবহৃত হয়। এদের বর্ণালী বিষয়ক সংকেত বলে।* তাতে s, p, d, f প্রভৃতি অক্ষর দ্বারা $n_\phi = 1, 2, 3$ বা 4 প্রভৃতি বোঝানো হয়। উদাহরণস্বরূপ $n = 4$, $n_\phi = 2$ কক্ষপথকে 4p দ্বারা সূচিত করা হয়। অন্যভাবে বললে 5f বললে বুঝব $n = 5$, $n_\phi = 4$ কক্ষপথকে।

এখন এই উপবৃত্তাকার কক্ষপথে হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেনপ্রতিম পরমাণুর ইলেকট্রনটির মোট শক্তি E_n স্থিতিশক্তি এবং গতিশক্তির যোগফল।

$$E_n = E_v + E_k$$

$$= -\frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 r} + \frac{1}{2}\mu\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(r\frac{d\phi}{dt}\right)^2\right]$$

এখানে dr/dt গতির অরীয় উপাংশ (radial component) এবং $r(d\phi/dt)$ হল গতির তির্যক উপাংশ (transverse component)। কিছু গণনা করে দেখানো যায় যে—

$$E_n = -\frac{\mu e^4 z^2}{8\,\epsilon_0^2\, h^2 n^2} \qquad \text{..... 4.4}$$

পূর্ববর্তী এককের সমীকরণ 3.10-এর সঙ্গে সমীকরণ 4.4 তুলনা করলে দেখা যাবে যে ইলেকট্রনের শক্তি বৃত্তাকার এবং উপবৃত্তাকার কক্ষপথে একই হচ্ছে। অর্থাৎ কক্ষপথের এই বহুলতা (multiplicity) বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠনের ব্যাখ্যা দিতে সক্ষম হল না। তখন সমারফেল্ড এই বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠনের সমস্যা সমাধানের জন্য গতিবেগের সঙ্গে ইলেকট্রনের ভরের পরিবর্তনের আপেক্ষিকতাবাদের ধারণাটিকে ব্যবহার করেন।

4.3.1 সমারফেল্ডের আপেক্ষিকতাজনিত তত্ত্ব (Sommerfeld's relativistic theory) :

পরমাণুর বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠনের ব্যাখ্যা করতে গিয়ে সমারফেল্ড গতিবেগের সঙ্গে ইলেট্রনের ভরের পরিবর্তনের আপেক্ষিকতাবাদের ধারণাকে ব্যবহার করলেন $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ সমীকরণের মাধ্যমে, যেখানে

* sharp, principal, diffuse, fundamental ইত্যাদি বর্ণালীর প্রথম অক্ষর নিয়ে এগুলি ব্যবহৃত হয়।

$\beta = v/c$, v = ইলেকট্রনের গতিবেগ এবং c = শূন্য মাধ্যমে আলোর গতিবেগ, m_o = ইলেকট্রনের স্থির ভর।

বৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনের গতি ধ্রুবক। কিন্তু উপবৃত্তের অনুসুরে (perihelion) গতি সর্বোচ্চ হয় এবং সর্বনিম্ন হয় অপসুরে (aphelion)। গণনা থেকে দেখা যায় যে, $v \approx c/137$ অর্থাৎ আপেক্ষিকতাবাদকে উপেক্ষা করা যায় না। ইলেকট্রনটি যখন নিউক্লিয়াসের খুব কাছে চলে আসে তখন (i) আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী তার ভর বৃদ্ধি পায়, ফলে মহাকর্ষীয় আকর্ষণও বৃদ্ধি পায় এবং (ii) কুলম্ব আকর্ষণও বৃদ্ধি পায়। এই ক্রিয়াসমূহের ফলে ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ পূর্বের অবস্থান থেকে অতি সামান্য বিচ্যুত হয়ে নিউক্লিয়াসের দিকে সরে যায়। এর ফলে উপবৃত্তের পরাক্ষের (major axis) একটি ধীর অয়নচলন (precession) হয় উপবৃত্তের তলের অভিলম্ব এবং একটি নাভির ভিতর দিয়ে উপগত একটি অক্ষের সাপেক্ষে। ইলেকট্রনের এই গতিপথ একটি রসেটি (rosette) সৃষ্টি করে, চিত্র 4.3।

চিত্র 4.3 : রিলেটিভিষ্টিক ইলেকট্রনের পরাক্ষের সঞ্চারপথ।

এই রকম অবস্থায় প্রমাণ করা যায় যে ইলেকট্রনের মোট শক্তি

$$E_{n,n_\phi} = -\frac{\mu Z^2 e^4}{8 \in_0^2 h^2 n^2} - \frac{\mu Z^4 e^4 \alpha^2}{8 \in_0^2 h^2}\left(\frac{n}{n_\phi} - \frac{3}{4}\right)\frac{1}{n^4} \qquad \text{..... 4.5}$$

$$= -\frac{\mu Z^2 e^4}{8 \in_0^2 h^2 n^2}\left[1 + \frac{Z^2 \alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{n_\phi} - \frac{3}{4}\right)\right] \qquad \text{..... 4.6}$$

যেখানে $\alpha = \frac{e^2}{2 \in_0 ch} = 7{\cdot}3 \times 10^{-3} \simeq \frac{1}{137}$ এবং একে 'সূক্ষ্ম-গঠন ধ্রুবক' (fine-structure constant) বলে।

সমীকরণ 4.5-এর প্রথম পদটি মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর জন্য প্রাপ্ত শক্তি। দ্বিতীয় পদটি

'সমারফেল্ডের আপেক্ষিকতা সংশোধন'। এখানে দেখা যাচ্ছে যে শক্তি কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যা n_ϕ-এর উপর নির্ভরশীল। এর ফলে ইলেকট্রনের (অর্থাৎ পরমাণুর কোনো নির্দিষ্ট n-এর জন্য শক্তিস্তর n-সংখ্যক স্তরে বিশ্লিষ্ট বা বিভাজিত (split) হয় কারণ n_ϕ-এর অনুমোদিত মান n-সংখ্যকই হবে। অর্থাৎ $n = 4$ হলে, পরমাণুর শক্তি খুব কাছাকাছি চারটি স্তরে বিশ্লিষ্ট হয়ে যাবে, কারণ এক্ষেত্রে n_ϕ = 1, 2, 3, 4।

এখন যেহেতু $\alpha << 1$, সংশোধন পদটির মান খুবই কম, কিন্তু শূন্য নয়। সুতরাং নির্দিষ্ট n-এর জন্য শক্তিস্তর n_ϕ-সংখ্যক কাছাকাছি অবস্থিত শক্তিস্তরে বিশ্লিষ্ট হচ্ছে বা ভাঙছে।

চিত্র 4.4 : আপেক্ষিকতাবাদ জনিত হাইড্রোজেন শক্তিস্তরের বিভাজন।

মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর দুটি ভিন্ন মানের জন্য উদ্ভূত বিভিন্ন n_ϕ মানের উপশক্তি স্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণের ফলে একটির বদলে একাধিক সংক্রমণ হওয়া কাঙ্খিত। হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণির H_α রেখার ক্ষেত্রে ($n_i = 3$ এবং $n_f = 2$) সূক্ষ্ম-গঠন ভাঙন 4.4 চিত্রে দেখানো হয়েছে। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী যেখানে কেবলমাত্র একটি সংক্রমণ হওয়ার কথা, সূক্ষ্ম-গঠন তত্ত্ব অনুযায়ী সেখানে ছ'টি সংক্রমণ হওয়ার কথা। কি বাস্তবে যে সংক্রমণগুলি পাওয়া যায় তার সংখ্যা কম। এর কারণ হল এই যে কিছু সংক্রমণ নিষিদ্ধ (forbidden)। সেই সংক্রমণগুলিই অনুমোদিত (allowed) যেগুলির ক্ষেত্রে n_ϕ-এর মান এক পরিবর্তিত হয়। একে 'বাছাই নিয়ম' (selection rule) বলে :

$$\Delta n_\phi = n_{\phi f} - n_{\phi i} = \pm 1 \qquad \text{..... 4.7}$$

এই নিয়মানুসারে H_α-র ক্ষেত্রে মাত্র তিনটি সংক্রমণ অনুমোদিত হয় এবং বর্ণালীতে খুব কাছাকাছি, প্রায় গায়ে গায়ে লাগা, তিনটি রেখা পাওয়ার কথা। চিত্র 4.4-এ পূর্ণরেখা (solid line) দিয়ে এগুলো বোঝানো হয়েছে। বাকি তিনটি সংক্রমণ নিষিদ্ধ এবং এগুলিকে ভাঙারেখা (broken line) দিয়ে বোঝানো

হয়েছে। এতৎসত্ত্বেও কিন্তু পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীর সাথে তাত্ত্বিক ফল মেলানো গেল না। পরবর্তীকালে n_0-কে k দ্বারা সূচিত করা হয়েছিল নানা কারণে।

4.3.2 বোর-সমারফেল্ড প্রতিরূপের অপূর্ণতা (Short-comings of Bohr-sommerfeld model)

বোর-সমারফেল্ড প্রতিরূপে ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ এবং আপেক্ষিকতাবাদ জনিত ভর পরিবর্তন তাত্ত্বিক ফলাফলে সামান্য পরিবর্তন বা উন্নতি ঘটায়। কিন্তু বাস্তবে প্রাপ্ত বর্ণালীকে আশানুরূপভাবে ব্যাখ্যা করতে ব্যর্থ হয়। এই তত্ত্বের মূল অপূর্ণতাগুলি হল এরকম—

1. বাছাই নিয়ম প্রয়োগ করা সত্ত্বেও H_α রেখার বিভাজনগুলি (splittings) তাত্ত্বিক বিভাজন ধাঁচের সঙ্গে মেলে না।

2. 'বাছাই নিয়ম'টি অ্যাড-হক (ad-hoc) ভিত্তিতে তৈরি করা হয়েছে—এর তাত্ত্বিক ভিত্তি নেই।

3. বর্ণালী রেখাগুলির আপেক্ষিক তীব্রতা এবং রেখাগুলির সমবর্তন এই প্রতিরূপ থেকে ব্যাখ্যা করা যায় না।

এই অব্যাখ্যাত ঘটনাগুলিকে ব্যাখ্যা করার জন্য পরবর্ত্তীকালে স্থান কোয়ান্টায়ন (space quantization), ইলেকট্রন ঘূর্ণন (electron spin) এবং কোয়ান্টাম ইলেক্‌ট্রোডাইনামিক্স (quantum electrodynamics)-এর ধারণাগুলি প্রয়োগ করা হয় এবং সুফল পাওয়া যায়।

4.4 স্থান কোয়ান্টায়ন (Space quantization)

বোর-সমারফেল্ড পরমাণুর প্রতিরূপে ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথগুলির আকার এবং মাপ (shape and size) সুনির্দিষ্ট—একথা আমরা ইতিপূর্বে জেনেছি। অর্থাৎ কক্ষপথগুলি মানের দিক দিয়ে কোয়ান্টায়িত। কিন্তু পরীক্ষালব্ধ ফলাফলকে ব্যাখ্যা করার জন্য এবার এই কক্ষপথগুলির বিন্যাসও (orientation) কোয়ান্টায়িত হওয়া প্রয়োজন। সুতরাং পরমাণুর কক্ষপথে নির্দিষ্ট মান এবং দিকের সমন্বয়ে একটি ভেক্টর ধর্ম আরোপ করতে হয়।

বদ্ধ বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহের ফলে একটি চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন হয় এবং বর্তনীটি একটি পাত চুম্বকের মত ব্যবহার করে। একথা আমরা আগেই তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে জানতে পেরেছি। এই পাতচুম্বকের দুই মেরু অঞ্চল পাতের দুই পাশে অবস্থান করে এবং একটি চৌম্বক ভ্রামক (magnetic moment) সৃষ্ট হয়। একই কারণে হাইড্রোজেন পরমাণুরও একটি চৌম্বক ভ্রামক থাকে। এই চৌম্বক ভ্রামকযুক্ত পরমাণুকে একটি বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থাপন করলে, পরীক্ষা থেকে দেখা যায়, পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামকটি এবং কৌণিক

ভরবেগ বহিঃস্থ ক্ষেত্রের সঙ্গে মাত্র কয়েকটি সুনির্দিষ্ট কোণে অবস্থান করতে পারে। এটাই হল স্থান কোয়ান্টায়ন।

ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ যদি $\vec{p}_k$ হয় তাহলে বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রে $\vec{B}$-এর সাপেক্ষে $\vec{p}_k$-র বিন্যাসগুলি এমন হবে যে $\vec{B}$-এর অভিমুখে $\vec{p}_k$-র উপাংশগুলির মান পূর্ণ-সংখ্যা হবে, (ঠ 3.5.1 স্মরণ করুন)। অর্থাৎ $p_k \cos\theta = m\dfrac{h}{2\pi}$ 4.8

চিত্র 4.5 : ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বক ভ্রামক।

যেখানে m একটি পূর্ণসংখ্যা এবং এর নাম 'চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা' (magnetic quantum number)। এখানে θ হচ্ছে p_k এবং B-এর অন্তর্গত কোণ। m-এর সম্ভাব্য মানগুলি হল $m = k$,

চিত্র 4.6 : স্থান কোয়ান্টায়ন।

$k-1, k-2, \ldots\ldots, 0, -1, -2, \ldots, -k$, অর্থাৎ m-এর মোট মান হতে পারে $(2k+1)$ সংখ্যক। অন্যভাবে বলা যায় যে বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে p_k ভেক্টরটি $(2k+1)$ বিভিন্ন দিকে বিন্যস্ত থাকতে পারে। 4.6 চিত্রে এটাই দেখানো হয়েছে। $k = 3$ হলে m-এর মোট 7টি মান সম্ভব।

এখন বহিঃস্থ ক্ষেত্র প্রযুক্ত না হলে ইলেকট্রনটির শক্তি সব সময়ে সমান হবে, কক্ষপথটি যে তলেই অবস্থিত হোক না কেন। এই শক্তি সমীকরণ 4.6 দ্বারা নির্ধারিত হয়। সুতরাং দেখা গেল যে বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পরমাণুর শক্তির মান কেবলমাত্র n এবং k-র উপর নির্ভর করে না, চৌম্বক কোয়ন্টাম সংখ্যা m-এর উপরেও নির্ভর করে। পরবর্তীকালে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় k-কে l দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা হয় $l = k-1$, সম্পর্ক অনুসারে $(l = 0, 1, 2, \ldots, n-1)$।

4.4.1 ঘূর্ণচৌম্বক অনুপাত এবং বোর ম্যাগনেটন (Gyromagnetic ratio and Bohr magneton)

কক্ষপথে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রন যে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে তা একটি বন্ধলুপে (closed loop) প্রবাহিত হয় বলে কক্ষপথটি একটি পাতলা পাত চুম্বকের (thin magnetic shell) মত ব্যবহার করে। এই পাত চুম্বকের চৌম্বক ভ্রামক $\mu_l = Ai$ যেখানে $A = \pi r^2$ এবং i = প্রবাহমাত্রা। যদি ইলেকট্রনটি প্রতি সেকেন্ডে ν বার নিজ কক্ষপথে আবর্তন করে এবং তার কৌণিক বেগ যদি ω হয়, তাহলে

$$\omega = 2\pi\nu \text{ এবং } i = e\nu = e\omega/2\pi$$

সুতরাং কক্ষপথে ইলেকট্রনের আবর্তনজনিত চৌম্বকভ্রামকের মান

$$\mu_l = \pi r^2 i = \pi r^2 . e\omega/2\pi = \frac{1}{2} e\omega r^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ 4.9$$

চৌম্বক ভ্রামক একটি ভেক্টর রাশি এবং এটি কক্ষতলের অভিলম্ব দিকে ক্রিয়া করে। প্রকৃতপক্ষে এটি $\left(\vec{\mu_l}\right)$ কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ (Orbital angular momentum) $\vec{p_l}$-এর বিপরীত দিকে কাজ করে, কারণ ইলেকট্রন ঋণাত্মক আধান বহন করে।

এখন $\left|\vec{p_l}\right| = p_l = m_e r^2 \omega$

যেখানে m_e = ইলেকট্রনের ভর।

সুতরাং $$\frac{\mu_l}{p_l} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m_e} \qquad \ldots\ldots\ldots\ 4.10$$

এই অনুপাতকে ঘূর্ণচৌম্বক অনুপাত বলে। যেহেতু কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ $p_l = lh/2\pi = l\hbar$, যেখানে $l = 0, 1, 2, \ldots, n-1$, সেইহেতু আমরা লিখতে পারি, $\mu_l = \frac{1}{2}.\frac{e}{m_e}.p_l = l.\frac{e\hbar}{2m_e} = l\mu_B$

যেখানে $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9{\cdot}274 \times 10^{-24}$ জুল/টেসলা 4.11

এই μ_B-কে বলা হয় বোর ম্যাগনেটন এবং এটিই হচ্ছে পারমাণবিক চৌম্বক ভ্রামকের মৌলিক একক।

4.5 ইলেকট্রন ঘূর্ণন (Electron Spin)

1896 সালে বিজ্ঞানী জীমান (Zeeman) চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পরমাণুর বর্ণালীরেখার বিভাজন [illegible] (anamolous Zeeman effect) এবং ক্ষার ধাতুর (alkali metals) বর্ণালীরেখার দ্বৈত গঠন (doublet structure) ব্যাখ্যা করতে গিয়ে দেখা গেল যে, n, l এবং m—এই তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা গঠিত পারমাণবিক প্রতিরূপটি যথেষ্ট নয়। উলেনবেক্ (Uhlenbeck) এবং গাউডস্মিট (Goudsmit) নামে দুই বিজ্ঞানী 1925 সালে এই সমস্যার সমাধান করার জন্য এক অভিনব প্রস্তাব পেশ করেন। তাঁরা বলেন যে পরমাণুর ইলেট্রনগুলিও নিউক্লিয়াসের চারিদিকে আবর্তন করার সময় নিজেদের অক্ষের উপর ঘুরতে থাকে। যেমন, সূর্যের চারপাশে ঘোরার সময় পৃথিবীর আহ্নিক বা দৈনিক গতি হয়। ইলেট্রনের এই ঘূর্ণন গতি (electron spin) কিন্তু সনাতন বলবিদ্যার সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ নয়। কারণ বিন্দুভরের ঘূর্ণনগতি অর্থহীন। সেইজন্য প্রকৃতপক্ষে ইলেকট্রন ঘূর্ণনের কোন সনাতন সদৃশ্যতা নেই (electron spin has no classical analog)। পরবর্তীকালে ডিরাকের (Dirac) কোয়ান্টাম বলবিদ্যা থেকে সহজেই এই ঘূর্ণনের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা পাওয়া যায়।

আমরা জানি যে, যে কোন আবর্তনশীল বিস্তৃত (extended) বস্তুরই কৌণিক ভরবেগ থাকে। উলেনবেক্ ও গাউডস্মিট প্রস্তাব করেন যে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (spin angular momentum) কোয়ান্টাম শর্তানুযায়ী হওয়া উচিত।

$$p_s = s.\frac{h}{2\pi} = \frac{\hbar}{2} \qquad \text{..... 4.12}$$

যেখানে $s = \frac{1}{2}$ হবে এবং এই s-কে বলা হয় ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা (spin quantum number)। স্বাভাবিকভাবেই এটি (ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ) একটি ভেক্টর রাশি। এবং দু'দিকে ঘূর্ণন হতে পারে বলে s-এর মান $s = \pm\frac{1}{2}$।

সুতরাং দেখা গেল যে ইলেকট্রনের দুটি কৌণিক ভরবেগ থাকে—একটি কক্ষপথে আবর্তনের জন্য

$\left(\vec{p}_k\right)$ যেটি কক্ষতলের অভিলম্বদিকে (perhendicular to the plane of orbit) ক্রিয়াশীল। অন্যটি ঘূর্ণনের জন্য $\left(\vec{p}_s\right)$ যেটি ঘূর্ণন তলের অভিলম্বদিকে (perpendicular to the plane of spin) ক্রিয়াশীল। এই ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের সঙ্গে যুক্ত স্বকীয় (intrinsic) চৌম্বক ভ্রামকের মান μ_s হলে দেখানো যায় যে,

$$\frac{\mu_s}{p_s} = g_s \cdot \frac{e}{2m_e}$$

যেখানে পরীক্ষালব্ধ ফলাফলকে ব্যাখ্যা করার জন্য g_s-এর মান ঠিক 2 ধরা হয়। সুতরাং

$$\mu_s = 2.\frac{e}{2m_e} \cdot p_s = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\hbar}{2} = \frac{e\hbar}{2m_e} = \mu_B$$

[ডিরাকের ইলেকট্রন তত্ত্ব অনুসারে g_s-এর মান 2 পাওয়া যায়।]

এখানে বিশেষভাবে উল্লেখ করা যেতে পারে যে $l = 0$ হলে সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী ইলেকট্রন উপবৃত্তাকার কক্ষপথে পরিভ্রমণ না করে নিউক্লিয়াসকে ভেদ করে এবং একে কেন্দ্র করে সরল সমঞ্জস রৈখিক (linear simple harmonic) গতিতে স্পন্দিত হবে। কিন্তু কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুযায়ী ইলেকট্রনকে একটি বিন্দুভরযুক্ত আধান হিসাবে না দেখে নিউক্লিয়াসের চারপাশে একটি মেঘের আস্তরণের মতো ভাবা হয়। $l = 0$ হলে এই আধান-মেঘের (charge cloud) ঘনত্ব নিউক্লিয়াস থেকে একই দূরত্বে সকল দিকে সমান হয়, অর্থাৎ গোলীয় প্রতিসমভাবে (spherically symmetrically) আধান-মেঘ সর্বদিকে বিস্তৃত হয়।

অতএব আমরা জানতে পারলাম যে পরমাণুর ইলেকট্রনের গতিবিধি সঠিকভাবে জানার জন্য মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n, কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা l এবং ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা s, এই তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা অবশ্যই প্রয়োজন। এছাড়া পরমাণুটি চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থাপিত হলে চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যারও (m) প্রয়োজন হবেই।

4.6 পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপ (Vector model of the atom)

ইলেকট্রন আবিষ্কারের পর থেকে পরমাণুর যে ক'টি প্রতিরূপ প্রস্তাব করা হয়েছে, ভেক্টর প্রতিরূপটি তাদের মধ্যে সর্বাধিক গ্রহণযোগ্য বলে প্রমাণিত হয়েছে। এই প্রতিরূপে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n ছাড়াও আরও তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা অন্তর্ভুক্ত করা হয়েছে যেগুলি তিনটি ভিন্ন ভেক্টর রাশির মান বোঝায়। এই তিনটি কোয়ন্টাম সংখ্যা হল—(i) কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা $l = \left|\vec{l}\right|$, (ii) চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা $m = \left|\vec{m}\right|$ এবং (iii) ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা $s = \left|\vec{s}\right|$। এই তিনটি ভেক্টর রাশির উপস্থিতির জন্যই এই প্রতিরূপটিকে ভেক্টর প্রতিরূপ বলা হয়।

অন্যভাবে বলা যায় যে পরমাণুর লব্ধ কৌণিক ভরবেগ যে পদ্ধতিতে বা উপায়ে ইলেকট্রনের কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর সংযোজন সূত্র দ্বারা নির্ণয় করা যায় সেই পদ্ধতিকে পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপ বলে।

আপনারা আগেই জেনেছেন (EPH 11, Block–2, § 9·2 এবং 9·3) যে বর্ণালি বিশ্লেষণে সনাতন কোয়ান্টাম তত্ত্ব (classical quantum theory) প্রাথমিকভাবে যথেষ্ট সফল হলেও পরবর্তীকালে কিছুটা ব্যর্থ হয় এবং তার ফলে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার (quantum mechanics) প্রয়োজন হয়।

কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুযায়ী কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের মান পুরানো কোয়ান্টাম তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত মানের থেকে সামান্য আলাদা হয়। কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুসারে $p_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ এবং $p_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ দেখানো যায়। উল্লেখযোগ্য যে $\vec{p_l}$ এবং $\vec{p_s}$ ভেক্টরগুলির পরিবর্তে বর্তমানে কেবলমাত্র $\vec{l}$ এবং $\vec{s}$ লেখা হয় যথাক্রমে কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের জন্য। সুতরাং পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপটি আমরা নিম্নবর্ণিত কয়েকটি কোয়ান্টাম সংখ্যার সাহায্যে বর্ণনা করতে পারি।

(i) মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা (n) : এটি একটি পূর্ণ সংখ্যা এবং এর সম্ভাব্য মান 1, 2, 3, ... ইত্যাদি।

(ii) কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা (l) : এটিও একটি পূর্ণ সংখ্যা। এর সম্ভাব্য মান $l = 0, 1, 2, 3, \ldots\ldots, (n-1)$। যদি $n = 5$ হয় তাহলে $l = 0, 1, 2, 3, 4$ হতে পারে। মনে রাখতে হবে যে, $l = \left|\vec{l}\right|$ এবং একাধিক ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $\vec{L} = \sum_i l_i = \vec{l_1} + \vec{l_2} + \vec{l_3} + \ldots\ldots$

(iii) ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা (s) : আমরা আগেই দেখেছি যে, $s = \left|\vec{s}\right| = \frac{1}{2}$ এবং এই $\vec{s}$ ভেক্টরটির কেবলমাত্র দুটি মানই হতে পারে, $+\frac{1}{2}$ এবং $-\frac{1}{2}$, দুদিকে ঘূর্ণনের জন্য। একাধিক ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $\vec{S} = \sum_i s_i = \vec{s_1} + \vec{s_2} + \vec{s_3} + \ldots\ldots$

(iv) মোট কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যা (j) : আমরা দেখেছি যে ইলেকট্রনের দুই রকম কৌণিক ভরবেগ আছে $\vec{p_l}$ এবং $\vec{p_s}$ যারা উভয়েই ভেক্টর রাশি। এদের লব্ধি মোট কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরকে $\vec{p_j}$ দ্বারা বোঝানো হয়। অর্থাৎ $\vec{p_j} = \vec{p_l} + \vec{p_s}$। কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুসারে p_j রাশিটিও কোয়ান্টায়িত এবং অন্যদের মতোই

$$p_j = \hbar\sqrt{j(j+1)}$$

p_l এবং p_s-এর প্রক্ষেপ যেমন l এবং s, তেমনই p_j-এর প্রক্ষেপ হল j এবং $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$, অর্থাৎ $j = l \pm \frac{1}{2}$, $s = +\frac{1}{2}$ ধরা হবে যখন $\vec{l}$ এবং $\vec{s}$ পরস্পরের সমান্তরাল এবং $s = -\frac{1}{2}$ ধরা হবে যখন ভেক্টর দুটি পরস্পরের বিযমান্তরাল। সুতরাং $j = |l + s| \geq \frac{1}{2}$। একাধিক ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $\vec{J} = \sum_i j_i = \vec{j_1} + \vec{j_2} + \vec{j_3} + \ldots\ldots\ldots$

আমরা ইতিপূর্বেই জেনেছি যে পরমাণুকে কোনো চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে স্থাপন করলে ওই চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতি ও ঘূর্ণন গতি প্রভাবিত হয়, কারণ ইলেকট্রন একটি আহিত কণা। এই কারণে আমরা আরও তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা পাই। এগুলো হল—

(v) চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা (m_l) : বহিস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর $\vec{p_l}$-এর উপাংশের মান হয় $p_l \cos\theta = m_l\hbar$। এই চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_l-এর সম্ভাব্য মানগুলি হল $m_l = l, (l-1), \ldots\ldots, 0, \ldots\ldots -(l-1), -l$; অর্থাৎ m_l-এর মোট $(2l+1)$ সংখ্যক মান থাকতে পারে। এখানে উল্লেখ করা দরকার যে চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_l সনাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বে ব্যবহৃত m-এর সমতুল্য।

(vi) চৌম্বক ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা (m_s) : এই কোয়ান্টাম সংখ্যাটি হল প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখে ঘূর্ণন ভেক্টর $\vec{s}$-এর প্রক্ষেপ। যেহেতু $\vec{s}$ ভেক্টরের মান কেবলমাত্র $+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$ হতে পারে, সেইহেতু m_s-এর সম্ভাব্য মান $+\frac{1}{2}$ এবং $-\frac{1}{2}$।

(vii) মোট চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা (m_j) : এটি হল বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখে মোট কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর $\vec{j}$-এর প্রক্ষেপ। এই কোয়ান্টাম সংখ্যাটির সম্ভাব্য মানগুলি হল $m_j = j, (j-1), \ldots\ldots, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \ldots\ldots, -(j-1), -j$ এবং মোট মানগুলির সংখ্যা হল $(2j+1)$। যদি $j = \frac{5}{2}$ হয়, তাহলে $m_j = \frac{5}{2}, \frac{3}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$ এবং $-\frac{5}{2}$। দেখা যাচ্ছে যে এক্ষেত্রে $(2j+1) = 2 \cdot \frac{5}{2} + 1 = 6$ সংখ্যক মান পাওয়া যাচ্ছে। মনে রাখতে হবে যে একক ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে j বা m_j-র মান কখনও শূন্য হতে পারে না।

4.6.1 সংযোজন পরিকল্পনাসমূহ (Coupling schemes)

আমরা দেখেছি যে ইলেকট্রনগুলির কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগগুলি কোয়ান্টায়িত এবং তার ফলে ভেক্টর ধর্ম সম্পন্ন। এরকম অবস্থায় কোনো পরমাণুতে দুই বা তার বেশি সংখ্যক ইলেকট্রন থাকলে তাদের কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন ভরবেগ ভেক্টরগুলির সংযোজন (coupling) দুটি ভিন্ন পরিকল্পনা অনুসারে হতে পারে। এদের বলা হয় (1) $L - S$ সংযোজন (coupling) বা রাসেল-সাণ্ডার্স (Russel-Saunders) সংযোজন এবং (2) $j - j$ সংযোজন।

1. L – S সংযোজন

একাধিক ইলেকট্রন সম্পন্ন পরমাণুর ক্ষেত্রে বিভিন্ন ইলেকট্রনের $\vec{l}$ ভেক্টরগুলির যোগফল হচ্ছে পরমাণুর লব্ধ কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ $\vec{L}$।

$$\vec{L} = \vec{l_1} + \vec{l_2} + \vec{l_3} + \ldots\ldots = \sum_i \vec{l_i}$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে l_1, l_2 ইত্যাদির মান পূর্ণসংখ্যা এবং L-এর মানও পূর্ণসংখ্যা, কোয়ান্টাম শর্তানুসারে। অনুরূপভাবে একাধিক ইলেকট্রনের লব্ধ ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ পাওয়া যায় ঃ

$$\vec{S} = \vec{s_1} + \vec{s_2} + \vec{s_3} + \ldots\ldots = \sum_i \vec{s_i}$$

এই দুই ভরবেগের লব্ধ ভরবেগই পরমাণুটির মোট ভরবেগ ঃ $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ (চিত্র 4.7)। J-র পূর্ণসংখ্যা হবে যদি S-এর মান পূর্ণসংখ্যা হয় এবং j-র মান সার্ধপূর্ণ সংখ্যা হবে যদি S-এর মান সার্ধপূর্ণ সংখ্যা হয়। দেখা গেছে যে বেশিরভাগ পরমাণুতেই এই সংযোজন পরিকল্পনা কার্যকর হয়।

চিত্র 4.7 : L–S সংযোজন।

2. *j–j* সংযোজন (*j-j* coupling) :

চিত্র 4.8 : *j–j* সংযোজন।

কোনো কোনো উচ্চ ভার পরমাণুর উত্তেজিত অবস্থায় এই ধরনের সংযোজন দেখা যায় (চিত্র 4.8)। এই প্রকল্পটি তখন কার্যকর হয় যখন বিভিন্ন ইলেকট্রনগুলির ঘূর্ণন ভেক্টরগুলির মধ্যে ক্রিয়া অথবা কক্ষীয় ভেক্টরগুলির মধ্যে ক্রিয়ার তুলনায় প্রতিটি ইলেকট্রনের কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন ভরবেগ ভেক্টরগুলির মধ্যে পারস্পরিক ক্রিয়া (interaction) তুলনামূলকভাবে জোরালো হয়। অর্থাৎ প্রথমে $\vec{l}-\vec{s}$ ক্রিয়ার ফলে $\vec{j}$ তৈরি হয় এবং পরে এই রকম কয়েকটি $\vec{j}$ মিলে $\vec{J}$ তৈরি হয়। কিছু কিছু ক্ষেত্রে অবশ্য *L–S* এবং *j–j* সংযোজনের মাঝামাঝি বা মিশ্রণ সংযোজনও লক্ষ্য করা যায়।

4.7 পাউলির বর্জন নীতি এবং পরমাণুর ইলেকট্রনীয় গঠন (Pauli's exclusion principle and electronic structure of atom)

উপরোক্ত আলোচনা থেকে আমরা জানতে পারলাম যে পরমাণুর ইলেকট্রনের বিভিন্ন অনুমোদিত শক্তিস্তর নির্ধারণ করার জন্য n, l, s, j, m_l, m_s এবং m_j-এই মোট সাতটি কোয়ান্টাম সংখ্যার প্রবর্তন করা হয়েছে ধাপে ধাপে। কিন্তু একটু চিন্তা করলেই দেখা যাবে যে এদের প্রত্যেকটিই স্বাধীন বা স্থির রাশি নয়—অন্য কোনো একটি বা দুটি রাশির ওপর সেটি নির্ভরশীল হতে পারে। ফলে উপরোক্ত সাতটি কোয়ান্টাম সংখ্যার সবক'টি অপরিহার্য নয়। যেমন— ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা (s)-এর মান স্থির $\left(s=\frac{1}{2}\right)$ হওয়ার ফলে এটিকে আলাদাভাবে বিবেচনা না করলেও চলে। আবার অন্যদিকে $j = l + s$ বলে কেবলমাত্র l-এর মান জানা থাকলেই j-এর মান জানা যায়। অতএব আলাদাভাবে j-এর মান জানার দরকার নেই।

একই যুক্তিতে m_j-এর মানও পৃথক বিবেচনার দরকার হয় না। সুতরাং বাকি রইল চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যা—n, l, m_l এবং m_s যেগুলি শক্তিস্তরের মান নির্ণয়ে অপরিহার্য। 1925 সালে বিজ্ঞানী পাউলি (W. Pauli) এই ব্যাপারে একটি নীতি প্রস্তাব করেন যাকে পাউলির বর্জন নীতি বলা হয়। নীতিটি এইরকম—"কোনো পরমাণুর ভিতর এরকম দুটি ইলেকট্রন থাকা সম্ভব নয় যাদের অনুরূপ চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যাই পরস্পর সমান।" অর্থাৎ একটি পরমাণুর মধ্যে যে-কোনো দুটি ইলেকট্রনের n, l, m_l এবং m_s এই কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির সবগুলিই সমান হতে পারে না। দুটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে যদি n, l এবং m_l সমান হয় তাহলে চতুর্থ কোয়ান্টাম সংখ্যাটি (m_s)-র মান অবশ্যই ভিন্ন হবে। এই প্রসঙ্গে মনে রাখা দরকার যে আর এক সেট কোয়ন্টাম সংখ্যা—n, l, j এবং m_j-এর সাহায্যেও ইলেকট্রনের অবস্থা বর্ণনা করা যায় সহজবোধ্য উপরোক্ত যুক্তিতে।

ইতিপূর্বে 1914 সালে বিজ্ঞানী মোজলে (H.G.J. Moseley) এক্সরশ্মি সংক্রান্ত পরীক্ষায় আবিষ্কার করেন যে পরমাণুর ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন খোলক (shell)-এ সজ্জিত থাকে। কিন্তু কেন এবং কীভাবে কটি থাকে তার ব্যাখ্যা তখন জানা যায়নি। পরবর্তীকালে পাউলির বর্জন নীতির প্রয়োগ করে এই খোলক এবং উপখোলকে ইলেকট্রনের বিন্যাস সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়।

[illegible] K খোলক যেখানকার ইলেকট্রনগুলির মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যার মান $n = 1$; অনুরূপভাবে $n = 2$ এবং $n = 3$ হলে খোলকের নাম হবে যথাক্রমে L এবং M। কিন্তু নির্দিষ্ট n-এর জন্য খোলকটি n-সংখ্যক উপখোলকে বিভাজিত হয়, কারণ $l = 0, 1, 2, \ldots\ldots, (n-1)$; মোট n-সংখ্যক মান হয় l-এর। এই উপকক্ষপথগুলিকে যথাক্রমে s, p, d, f ইত্যাদি প্রতীক বা অক্ষর দ্বারা সূচিত করা হয়। এগুলি যথাক্রমে sharp, principal,diffuse, fundamental শব্দের আদ্যাক্ষর বোঝায়। আবার বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে প্রতিটি l-শক্তিস্তর $(2l + 1)$-সংখ্যক m_l-উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হয়, যেখানে $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots\ldots\ldots, \pm l$ হতে পারে। আবার প্রতিটি m_l মানের জন্য m_s-এর দুটি মান হতে পারে, $+\frac{1}{2}$ এবং $-\frac{1}{2}$ এবং তার ফলেও ইলেকট্রনের শক্তির মান আলাদা হবে। সব মিলিয়ে নির্দিষ্ট n-মান সম্পন্ন খোলকে অবস্থিত সর্বাধিক ইলেকট্রনের সংখ্যা এবং ভিন্ন শক্তিস্তরের সংখ্যা হল—

$$2\sum_{l=0}^{n-1}(2l+1) = 2n^2$$

নীচের সারণিতে ইলেকট্রনের বিন্যাস দেখানো হল।

সারণি ঃ 1

খোলকের নাম	K	L		M			N				O				
মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা (n)	1	2		3			4				5				
উপখোলকের নাম	s	s	p	s	p	d	s	p	d	f	s	p	d	f	g
কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা (l)	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4
উপখোলকে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা 2 ($2l + 1$)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18
খোলকের মধ্যে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা	2	2+6=8		2+6+10=18			2+6+10+14=32				2+6+10+14+18=50				

এই সারণিকে বোঝার জন্য উদাহরণস্বরূপ আমরা M খোলকের কথা ভাবি। এখানে $n = 3$ এবং তার ফলে l-এর মান হতে পারে 0, 1, 2-অর্থাৎ M-এর তিনটি উপখোলক আছে। s উপখোলকে ($l = 0$) দুটি ইলেকট্রন ($3s^2$) থাকে ; p উপখোলকে ছটি ইলেকট্রন ($3p^6$) থাকবে। তৃতীয় d উপখোলকে ($l = 2$) দশটি ইলেকট্রন ($3d^{10}$) থাকবে। সর্বমোট M খোলকে 2 + 6 + 10 = 18টি ইলেকট্রন থাকতে পারে যাদের আমরা সাঙ্কেতিক ভাষায় $3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}$ দ্বারা বুঝিয়ে থাকি।

এই প্রসঙ্গে মনে রাখা দরকার যে K খোলকে দুটি ইলেকট্রন ($1s^2$) থাকলেই এটি পূর্ণ বা বদ্ধ খোলক (closed shell) হয়ে যায়, কারণ এই খোলকে আর বেশি ইলেকট্রন থাকা সম্ভব না। অনুরূপভাবে L খোলকে আটটি ইলেকট্রন থাকলে সেটি বদ্ধ হবে এবং M খোলকের ক্ষেত্রে সংখ্যাটি হল আঠেরো (18)।

পাউলির বর্জন নীতি প্রয়োগ করেই কিন্তু উপরোক্ত সারণিটি তৈরি করা হয়েছে। সবচেয়ে সহজবোধ্য ঘটনাটি হল K খোলকের ক্ষেত্রে। এখানে $n = 1, l = 0$, ফলে $m_l = 0$ এবং $m_s = +\frac{1}{2}$ এবং $m_s = -\frac{1}{2}$। সুতরাং K খোলকে সর্বাধিক দুটি ইলেকট্রনই থাকতে পারে।

4.8 পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস (Electron configuration of atom)

আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন খোলক এবং উপখোলকে বণ্টিত বা বিন্যস্ত থাকে। এই বণ্টন ব্যবস্থাকে ইলেকট্রন বিন্যাস বলে। নীচের তিনটি নিয়ম অনুসারে এই বিন্যাস হয়।

(a) খোলকের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n হলে ওই খোলকে সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা $2n^2$।

(b) n-তম খোলকে সর্বাধিক n-সংখ্যক উপখোলক থাকতে পারে। প্রতিটি উপখোলককে s, p, d, f, g ইত্যাদি প্রতীক বা অক্ষর দ্বারা চিহ্নিত করা হয় l-এর মান 0, 1, 2, 3, 4 ইত্যাদি অনুসারে।

(c) কোনো উপখোলককে সর্বাধিক $2(2l + 1)$ সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে।

এই আলোচনার পরিপ্রেক্ষিতে আমরা এবার প্রতিটি পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস লিখতে পারি।

(i) হাইড্রোজেন $(Z = 1) : H \rightarrow 1s^1$

(ii) হিলিয়াম $(Z = 2) : He \rightarrow 1s^2 \rightarrow \boxed{K}$

(iii) লিথিয়াম $(Z = 3) : Li \rightarrow 1s^2 2s^1 \rightarrow \boxed{K}\ 2s^1$

(iv) নিয়ন $(Z = 10) : Ne \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 \rightarrow \boxed{K}\boxed{L}$

(v) সোডিয়াম $(Z = 11) : Na \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 \rightarrow \boxed{K}\boxed{L}\ 3s^1$

(vi) ম্যাঙ্গানিজ $(Z = 25) : Mn \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$

$$\rightarrow \boxed{K}\boxed{L}\ 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$$

এখানে লক্ষ্যণীয় এই যে $3d$ উপখোলক পূর্ণ হবার আগেই $4s$ উপখোলক পূর্ণ হয়, কারণ দেখানো যায় যে তাহলে পরমাণুটি ন্যূনতম শক্তিসম্পন্ন অবস্থায় থাকে যেটি পরমাণুর স্থায়িত্বের জন্য আবশ্যক শর্ত।

4.9 অনুশীলনী (Exercise)

উদাহরণ 1. যদি একটি পরমাণুর ইলেকট্রনিক বিন্যাস $1s^2 2s^2 2p^1$ হয়, তাহলে l, s এবং j-র সম্ভাব্য মানগুলি কী কী? এছাড়া $\vec{l}, \vec{s}$ এবং $\vec{j}$ কৌণিক ভরবেগগুলির কোয়ান্টাম মেকানিকাল মান নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ পরমাণুটির ইলেকট্রনীয় বিন্যাস থেকে দেখা যাচ্ছে যে $1s$ খোলকটি এবং $2s$ উপখোলকটি 2টি করে ইলেকট্রন থাকার ফলে পূর্ণ বা আবদ্ধ হয়ে আছে। সুতরাং এদের জন্য কৌণিক ভরবেগ শূন্য। পরমাণুটির কৌণিক ভরবেগ কেবলমাত্র $2p^1$ ইলেকট্রনটি থেকেই উৎপন্ন হবে। এই ইলেকট্রনটির জন্য

$$n = 2,\ l = 1,\ s = \frac{1}{2}$$

এর j-এর সম্ভাব্য মানগুলি হল—

$$j = l + s = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

এবং $j = l - s = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$

∴ কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের কোয়ান্টাম মেকানিকাল মান

$$\left|\vec{l}\right| = \sqrt{l(l+1)}.\hbar = \sqrt{1(1+1)}.\hbar = \sqrt{2}.\hbar$$

∴ ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের কোয়ান্টাম মেকানিকাল মান

$$\left|\vec{s}\right| = \sqrt{s(s+1)}.\hbar = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)}.\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}.\hbar$$

∴ মোট কৌণিক ভরবেগের কোয়ান্টাম মেকানিকাল মান

$j = \frac{3}{2}$-এর জন্য, $\left|\vec{j}\right| = \sqrt{j(j+1)}.\hbar = \sqrt{\frac{3}{2}\left(\frac{3}{2}+1\right)}.\hbar = \frac{\sqrt{15}}{2}.\hbar$

$j = \frac{1}{2}$-এর জন্য, $\left|\vec{j}\right| = \sqrt{j(j+1)}.\hbar = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)}.\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}.\hbar$

উদাহরণ 2. $j_1 = \frac{3}{2}$ এবং $j_2 = \frac{5}{2}$ মানযুক্ত দুটি ইলেকট্রনের সম্ভাব্য লব্ধ কৌণিক ভরবেগের মানগুলি নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ এক্ষেত্রে যেহেতু

$$j_2 + j_1 = \frac{5}{2} + \frac{3}{2} = 4$$

এবং, $j_2 - j_1 = \frac{5}{2} - \frac{3}{2} = 1,$

ইলেকট্রন দুটির লব্ধ কৌণিক ভরবেগ (J)-এর সম্ভাব্য মূল্যগুলি (values) হবে $J = 4, 3, 2, 1$। স্বভাবতই এদের কোয়ান্টাম মেকানিকাল মান (magnitude) হবে—

$$\left|\vec{J}\right| = \sqrt{J(J+1)}.\hbar$$

$J = 4$-এর ক্ষেত্রে, $\left|\vec{J}\right| = \sqrt{4(4+1)}\cdot\hbar = \sqrt{20}\cdot\hbar$

$J = 3$-এর ক্ষেত্রে, $\left|\vec{J}\right| = \sqrt{3(3+1)} \cdot \hbar = 2\sqrt{3} \cdot \hbar$

$J = 2$-এর ক্ষেত্রে, $\left|\vec{J}\right| = \sqrt{2(2+1)} \cdot \hbar = \sqrt{6} \cdot \hbar$

$J = 1$-এর ক্ষেত্রে, $\left|\vec{J}\right| = \sqrt{1(1+1)} \cdot \hbar = \sqrt{2} \cdot \hbar$

উদাহরণ 3. নিম্নলিখিত শক্তিস্তরগুলির সঙ্গে যুক্ত L, S এবং J-র মানগুলি নির্ণয় করুন—

$^1S_0$, $^1P_1$, $^2D_{3/2}$, $^5F_5$.

সমাধান ঃ আমরা জানি যে, $^{2S+1}L_J$ (notation) দ্বারা কোনো পরমাণুর L, S এবং J কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি জানা যায়, যেখানে

$L = l_1 + l_2 + l_3 + ...$

$S = s_1 + s_2 + s_3 + ...$

$J = L + S,$

J-এর সম্ভাব্য মূল্যগুলি হল—

$L + S, L + S - 1, L + S - 2, ..., L - S$

এবার আমরা প্রতিটি শক্তিস্তরকে বিশ্লেষণ করতে পারি এভাবে—

(i) $^1s_0 : L = 0, 2s + 1 = 1$, ফলে $s = 0$ এবং $J = 0$

(ii) $^1p_1 : L = 1, 2s + 1 = 1$, ফলে $s = 0$ এবং $J = 1$

(iii) $^2D_{3/2} : L = 2, 2s+1 = 1$, ফলে $s = \frac{1}{2}$ এবং $J = \frac{3}{5}, \frac{5}{2}$

সুতরাং $L = 2$ এবং $s = 1/2$ হলে $^2D_{3/2}$ ছাড়াও $^2D_{5/2}$ শক্তিস্তরটি অনুমোদিত।

(iv) $^5F_5 : L = 3, 2s + 1 = 5$, ফলে $s = 2$ এবং $J = 5, 4, 3, 2, 1$ সুতরাং $L = 3$ এবং $S = 2$ হলে $^5F_5$ ছাড়াও আরও চারটি শক্তিস্তর, $^5F_4$, $^5F_3$, $^5F_2$ এবং $^5F_1$ অনুমোদিত।

উদাহরণ 4. সূক্ষ্ম গঠন ধ্রুবক (fine-structure constant)-এর মান নির্ণয় করুন যদি $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ C, $\epsilon_0 = 8{\cdot}85 \times 10^{-12}$, $h = 6{\cdot}63 \times 10^{-34}$ Js এবং $c = 3 \times 10^8$ ms^{-1} হয়।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে, সূক্ষ্ম-গঠন ধ্রুবকের মান হল $\alpha = \dfrac{e^2}{2\,\epsilon_0\, ch}$

ধ্রুবকগুলির মান বসিয়ে পাই,

$$= \frac{(1\cdot6\times10^{-19})^2}{2\times8\cdot85\times10^{-12}\times3\times10^{8}\times6\cdot63\times10^{-34}}$$

$$= 7\cdot272 \times 10^{-3}$$

($\simeq$ 1/137 যেমনটি আগেই উল্লেখ করা হয়েছে।)

সুতরাং সূক্ষ্ম-গঠন ধ্রুবকের নির্ণেয় মান $7\cdot272 \times 10^{-3}$।

উদাহরণ 5. বোর ম্যাগনেটনের মান নির্ণয় করুন প্রয়োজনীয় রাশিগুলির প্রচলিত মান ধরে নিয়ে।

সমাধান ঃ বোর ম্যাগনেটের রাশিটি হল

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = \frac{eh}{4\pi m}$$

ধ্রুবকগুলির মান বসিয়ে পাই

$$\mu_B = \frac{1\cdot6\times10^{-19}\times6\cdot63\times10^{-34}}{4\pi\times9\cdot1\times10^{-31}}$$

$$= 9\cdot276 \times 10^{-24}\ JT^{-1}$$

উদাহরণ 6. বোর ম্যাগনেটনের পরীক্ষামূলক মান হল $9\cdot21 \times 10^{-24}\ JT^{-1}$ এবং প্ল্যাঙ্ক ধ্রুবকের মান হল $6\cdot62 \times 10^{-34}\ Js$। এই দুই মান থেকে ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে,

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

বা, $e/m = \mu_B \cdot \frac{2}{\hbar}$

$$= \mu_B \cdot \frac{2\cdot2\pi}{h} \quad (\because\ \hbar = h/2\pi)$$

$$= 9\cdot21\times10^{-24}\times4\pi / 6\cdot62\times10^{-34}$$

$$= 1\cdot748\times10^{11}\ Ckg^{-1}$$

সুতরাং নির্ণেয় আপেক্ষিক আধানের মান $1\cdot748 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$।

উদাহরণ 7. যদি ইলেকট্রনের স্থির ভর (rest mass) 512 eV এবং সূক্ষ্মগঠন ধ্রুবকের মান 1/137 হয়, তাহলে হাইড্রোজেন পরমাণুর n = 3 অবস্থার দুটি উপস্তরের (sublevel) মধ্যে শক্তি পার্থক্য নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ পাশাপাশি অবস্থিত দুটি উপশক্তি স্তরের মধ্যে শক্তি পার্থক্যের রাশিমালাটি হল—

$$\Delta E = (mc^2)\ \alpha^4/n^5$$

যেখানে mc^2 = ইলেকট্রনের স্থিরভর শক্তি (rest mass energy)। এই সমীকরণে α এবং $n = 3$ বসিয়ে পাই,

$$\Delta E = 512 \times \left(\frac{1}{137}\right)^4 \times \frac{1}{3^5}$$

$$= 5{\cdot}98 \times 10^{-9}\ \text{eV}$$

সুতরাং নির্ণেয় শক্তি পার্থক্য $5{\cdot}98 \times 10^{-9}$ eV।

উদাহরণ 8. (a) ইলেকট্রনের $l = 2$ শক্তিস্তরে কটি ইলেকট্রন থাকতে পারে?

(b) ইলেকট্রনের $l = 3$ শক্তিস্তরে কটি ইলেকট্রন থাকতে পারে?

সমাধান ঃ (a) $l = 2$ হলে m_l-এর মানগুলি হল, $-2, -1, 0, 1, 2$ অর্থাৎ পাঁচটি চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা সম্ভব।

প্রত্যেকটি চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার জন্য দুটি চৌম্বক ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা $m_s = \pm\frac{1}{2}$ অর্থাৎ দুটি মান হতে পারে।

অতএব মোট সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা = 5 × 2 = 10টি

(b) সাধারণ নিয়মে সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা = $2\ (2l + 1)$

একইভাবে $l = 3$ হলে m_l-এর 7টি মান থাকা সম্ভব। অতএব সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা = 14

4.10. সারাংশ (Summary)

এই এককটি পড়ে আপনারা জানতে পারলেন যে বোর তত্ত্বের বৃত্তাকার ইলেকট্রনীয় কক্ষপথের ধারণা ত্যাগ করে সমারফেল্ড কেন উপবৃত্তীয় কক্ষপথের প্রস্তাব করলেন। এই বোর-সমারফেল্ড পরমাণু প্রতিরূপে স্বাভাবিকভাবেই একটি কোয়ান্টাম সংখ্যা (n)-এর পরিবর্তে দুটি কোয়ান্টাম সংখ্যা (n_ϕ এবং n_r)-এর অন্তর্ভুক্তি ঘটানো হল। কিন্তু গণনায় দেখা গেল যে এর ফলে ইলেকট্রনের শক্তির কোনো তারতম্য হল না। তখন সমারফেল্ড উপবৃত্তাকার কক্ষপথে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনের আপেক্ষিকতাবাদ জনিত কারণে ভরের পরিবর্তনকে গ্রাহ্য করেন এবং দেখা যে ইলেকট্রনের শক্তিস্তর এর ফলে বিভাজিত বা বিশ্লিষ্ট (splitting) হচ্ছে এবং সূক্ষ্ম গঠন অনেকটা ব্যাখ্যা করা যাচ্ছে।

কিন্তু বর্ণালীর সফল ব্যাখ্যা দেবার জন্য ইলেকট্রনের কক্ষপথগুলির বিন্যাসও কোয়ান্টায়িত ধরতে হল,

যার ফলে একটি ভেক্টর ধর্ম আরোপ করা হল ইলেকট্রনের কক্ষপথের ওপর। এভাবেই স্থান কোয়ান্টায়নের ধারণা সৃষ্টি হল। তারও পরবর্তীকালে আরও সফলভাবে বর্ণালী ব্যাখ্যার জন্য ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের ধারণাটি প্রস্তাবিত হয় এবং পরবর্তীকালে গাণিতিকভাবে সমর্থিত হয়। এই সমস্ত বৈশিষ্ট্যযুক্ত প্রতিরূপটিকে ভেক্টর পরমাণু প্রতিরূপ বলা হয়। এই প্রতিরূপ অনুসারে বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রের উপস্থিতিতে সর্বমোট সাতটি কোয়ান্টাম সংখ্যা—n, l, s, j, m_l, m_s এবং m_j হতে পারে। পাউলির নীতি অনুসারে পরমাণুর কোনো দুটি ইলেকট্রনের সবকটি কোয়ান্টাম সংখ্যা একই হতে পারে না। তবে দেখা যায় যে কোনো ইলেকট্রনকে সুনির্দিষ্টভাবে চিহ্নিত করার জন্য কেবলমাত্র চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যাই (n, l, m_l এবং m_s) অথবা (n, l, j এবং m_j) যথেষ্ট।

বর্ণালীবিজ্ঞানে ছোটো হাতের বর্ণ l, s, j এবং s, p, d, f, g ইত্যাদি ব্যবহার করা হয় কোনো একক ইলেকট্রনের অবস্থা বোঝাবার জন্য। অন্যদিকে বড়ো হাতের বর্ণ L, S, J এবং S, P, D, F, G ইত্যাদি ব্যবহার করা হয় একটি গোটা পরমাণুর অবস্থা বর্ণনা করার জন্য।

4.11 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. সংক্ষিপ্ত উত্তর দিন ঃ

(a) সমারফেল্ড প্রতিরূপে কোয়ান্টাম সংখ্যা কটি এবং তাদের মধ্যে সম্পর্ক কী?

(b) আপেক্ষিকতাবাদ জনিত সংশোধনের কারণ কী?

(c) ইলেকট্রনের অয়নচলন বলতে কী বোঝায়?

(d) কোনো পরমাণুর একটি ইলেকট্রনের প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা n হলে উপখোলকের সংখ্যা কত?

(e) কোনো উপখোলকের কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা l হলে এই উপখোলকে সর্বাধিক কটি ইলেকট্রন থাকতে পারে?

(f) প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা $n = 4$ হলে l-এর মান কী কী হতে পারে? l-এর বিভিন্ন মানের জন্য উপখোলকগুলির চিহ্ন কী হবে?

(g) কোনো খোলকের প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা n হলে ওই খোলকে সর্বাধিক কত সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে?

(h) পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপের বৈশিষ্ট্য কী কী?

(i) ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা প্রবর্তনের কারণ কী?

(j) পরমাণুতে ইলেকট্রনের অবস্থা বর্ণনার জন্য কমপক্ষে কটি কোয়ান্টাম সংখ্যা প্রয়োজন? এরকম দুটি কোয়ান্টাম সংখ্যার সেটের (set) উল্লেখ করুন।

(k) পাউলির বর্জন নীতি বিবৃত করুন।

(l) পাউলির নীতি থেকে দেখান যে, L-খোলকে 6টির বেশি ইলেকট্রন থাকতে পারে না।

(m) বোর ম্যাগনেটন কী এবং এর মান কত?

2. বোর-সমারফেল্ড পরমাণু প্রতিরূপের বিস্তারিত বিবরণ দিন এবং n =1, 2, 3-এর জন্য সম্ভাব্য কক্ষপথগুলির চিত্র এঁকে দেখান (ব্যাখ্যাসহ)।

3. স্থান কোয়ান্টায়ন বলতে কী বোঝায়? চিত্রসহ ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বক ভ্রামকের অবস্থান ব্যাখ্যা করুন। বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে স্থান কোয়ান্টায়ান চিত্রসহ ব্যাখ্যা করুন।

4. ঘূর্ণ চৌম্বক অনুপাত এবং বোর ম্যাগনেটন-এর মধ্যে একটি সম্পর্ক স্থাপন করুন এবং বোর ম্যাগনেটন-এর মান ও গুরুত্ব (significance) উল্লেখ করুন।

5. পরমাণুর ভেক্টর প্রতিরূপ বলতে যা বোঝেন লিখুন। সাতটি কোয়ান্টাম সংখ্যার নাম এবং সম্ভাব্য মান সম্পর্কে আলোচনা করুন।

6. ইলেকট্রনগুলির কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগগুলির সংযোজন পরিকল্পনা দুটি চিত্রসহ আলোচনা করুন।

7. পাউলির বর্জন নীতি প্রয়োগ করে পরমাণুর ইলেকট্রনীয় গঠন ব্যাখ্যা করুন।

8. পাউলির বর্জন নীতি প্রয়োগ করে দেখান যে L এবং M খোলকে যথাক্রমে 8টি এবং 18টির বেশি ইলেকট্রন থাকতে পারে না।

9. একটি বহু-ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ক্ষেত্রে যদি $L = 2, S = 1$ এবং $J = 2$ হয় তাহলে ভেক্টর চিত্রের সাহায্যে L এবং S-এর অন্তর্গত কোণের মান নির্ণয় করুন।

10. যদি $L = 1, S = 1$; $L = 2, S = 1$; $L = 1, S = \frac{3}{2}$ এবং $L = 2, S = \frac{3}{2}$ হয় তাহলে ভেক্টর চিত্র এঁকে J-এর মান নির্ণয় করুন।

11. পরমাণুর ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতির জন্য ঘূর্ণ চৌম্বক অনুপাতের মান নির্ণয় করুন। ধ্রুবকগুলির প্রচলিত মান ব্যবহার করুন। (উঃ $8{\cdot}8 \times 10^{-19}$ Ckg^{-1})

একক 5 ❑ ক্ষারীয় বর্ণালী এবং পর্যায় সারণি
Alkali Spectral lines and Periodic Table

গঠন

5.1 প্রস্তাবনা

5.2 উদ্দেশ্য

5.3 পদ মান

5.4 ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালীর ব্যাখ্যা

→ 5.4.1 ক্ষারীয় বর্ণালী রেখাগুলির দ্বৈত গঠন

5.5 পর্যায় সারণি

5.6 জটিল পরমাণুর শক্তিস্তর

5.7 সারাংশ

5.8 অনুশীলনী

5.9 প্রশ্নাবলি

5.1 প্রস্তাবনা (Introduction)

লিথিয়াম (Li), সোডিয়াম (Na), পটাশিয়াম (K) প্রভৃতি মৌলগুলিকে ক্ষার ধাতু বলা হয় এবং হাইড্রোজেনের সাথে এদের ইলেকট্রনীয় গঠনের একটি সাদৃশ্য আছে। হাইড্রোজেনের কেবলমাত্র একটি ইলেকট্রন আছে আর এদের ক্ষেত্রে বন্ধ খোলক বা উপখোলকের বাইরে একটিমাত্র ইলেকট্রন থাকে। সেইজন্য এই ক্ষার ধাতুগুলির বর্ণালী বহুলাংশে হাইড্রোজেনের বর্ণালীর সদৃশ। এই ধাতুগুলির বন্ধ খোলক বা উপখোলকে অবস্থিত (Z–1) সংখ্যক ইলেকট্রন কেন্দ্রককে বেষ্টন করে আবর্তন করার ফলে কেন্দ্রকের (Z–1) সংখ্যক প্রোটন বহিঃস্থ ইলেকট্রনটির কাছে আড়াল হয়ে যায় এবং মনে করা যেতে পারে যেন একটিমাত্র ইলেকট্রন একটিমাত্র প্রোটনকে কেন্দ্র করে ঘুরছে। সেইজন্য এই ক্ষারধাতুগুলির বর্ণালী বহুলাংশে হাইড্রোজেন বর্ণালী সদৃশ। তবে এই ক্ষারীয় বর্ণালীতে আরো বেশি সংখ্যক শ্রেণি (series) পাওয়া যায়। এছাড়া ক্ষারীয় বর্ণালী রেখাগুলির দ্বৈত গঠন (doublet structure) বিশেষ উল্লেখযোগ্য ঘটনা।

5.2 উদ্দেশ্য (Objectives)

এই এককটি পড়বার পর আপনি জানতে পারবেন—

- ক্ষারীর পরমাণুর বর্ণালীর বহুলতা (multiplicity)।
- সোডিয়াম পরমাণুর শক্তিস্তর।
- সোডিয়াম D-রেখার দ্বৈত গঠনের (doublet structure) উৎপত্তির ব্যাখ্যা।
- সংক্রমণের নির্বাচন সূত্র (selection rules for transition)।
- পর্যায় সারণি এবং তার ব্যাখ্যা।

5.3 পদ মান (Term value)

বর্ণালী সংক্রান্ত আলোচনায় বর্ণালী বিশ্লেষকরা (spectroscopists) অনেক সময় পদ মানের ভিত্তিতে আলোচনা করেন। বিভিন্ন মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যার সাথে সংশ্লিষ্ট শক্তির মানকেই cm^{-1} বা m^{-1} এককে প্রকাশ করলে ওই স্তরের পদমান পাওয়া যায়। যেমন হাইড্রোজেনের প্রথম পদমান $1{\cdot}09678\times10^{7}m^{-1}$ (n = 1-এর জন্য) এবং সপ্তম পদমান $2{\cdot}238 \times 10^{5}m^{-1}$ (n = 7-এর জন্য)।

কিন্তু ক্ষারীর পরমাণুর আলোচনায় বিভিন্ন l মান সম্পন্ন শক্তিস্তর বা পদগুলির কতকগুলি বিশেষ নামকরণ করা হয়েছে। যেমন, $l = 0$ পদগুলিকে বলা হয় S পদ ; $l = 1$ হলে P পদ ; $l = 2$ হলে D পদ ; $l = 3$ পদগুলিকে বলা হয় F পদ ; ইত্যাদি। এই S, P, D, F প্রভৃতি অক্ষরগুলির বাম পাশে 1, 2, 3 ইত্যাদি সংখ্যা লিখে শক্তিস্তরগুলির মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n বোঝান হয়। যেমন, 1S-এর অর্থ $n = 1, l = 0$; 2S-এর অর্থ $n = 2, l = 0$; 3D-এর অর্থ $n = 3, l = 2$; ইত্যাদি।

5.4 ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালীর ব্যাখ্যা (Explanation of alkali atom spectra)

ক্ষারীর পরমাণুর নির্দিষ্ট n এবং l মান সম্পন্ন বহিঃস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল সংযোজী (valence) ইলেকট্রনটি পরমাণুর বদ্ধ খোলক বা উপখোলকের মধ্যেও কিছুটা অনুপ্রবেশ করে এবং এই অনুপ্রবেশের মাত্রা তত বেশি হয় যত কম হয় l-এর মান, কারণ তখন উপবৃত্তটি বেশি চ্যাপ্টা হয়—উৎকেন্দ্রিকতা বেশি বলে। এই অনুপ্রবেশের ফলে ইলেকট্রনটির উপরে কেন্দ্রকীয় আধানের প্রভাব স্বভাবতই কিছু বৃদ্ধি পায়।

5.1 চিত্রে সোডিয়াম (Na) পরমাণুর শক্তিস্তর দেখানো হয়েছে। এই শক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণ নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হয় ঃ

চিত্র 5.1 : সোডিয়ামের শক্তিস্তর চিত্র

$\Delta l = \pm 1$

এর অর্থ এই যে P পদ থেকে S, D, F ইত্যাদি পদে সংক্রমণ সম্ভব ; কিন্তু P $\not\rightarrow$ P, S $\not\rightarrow$ S, D $\not\rightarrow$ D ইত্যাদি। এইসব বিভিন্ন সংক্রমণের ফলে যে বর্ণালী শ্রেণিসমূহ উৎপন্ন হয় তাদের মধ্যে এই কয়েকটি খুবই গুরুত্বপূর্ণ ঃ

nP $\rightarrow$ 1S প্রধান (Principal) শ্রেণি ;

nS $\rightarrow$ 2P তীব্র (Sharp) শ্রেণি ;

nD $\rightarrow$ 2P বিক্ষিপ্ত (Diffuse) শ্রেণি ;

nF $\rightarrow$ 3D মূল (Fundamental) শ্রেণি।

5.1 চিত্রে এইসব বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণি উৎপাদনকারী সংক্রমণগুলি দেখান হয়েছে। এগুলির মধ্যে সোডিয়ামের ক্ষেত্রে প্রধান শ্রেণির অন্তর্ভুক্ত D বর্ণালী রেখাটি বিশেষ উল্লেখযোগ্য। 2P $\rightarrow$ 1S সংক্রমণের ফলে এই রেখাটির সৃষ্টি হয় এবং দৃশ্যমান আলোর পাল্লার মধ্যে সোডিয়ামের এই হলুদ বর্ণের রেখাটি যথেষ্ট তীব্র।

5.4.1 ক্ষারীয় বর্ণালী রেখাগুলির দ্বৈত গঠন (Doublet structure of the alkali spectral lines)

ক্রমশ উন্নত বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে Na-D রেখাটি একক (single) নয়—খুব কাছাকাছি মানের 5896Å এবং 5890Å দুটি রেখার পাশাপাশি অবস্থানের জন্যই হলুদ বর্ণের এই রেখাটি দেখতে পাওয়া যায়। এদের যথাক্রমে সোডিয়াম D_1 এবং D_2 রেখা বলা হয়। প্রকৃতপক্ষে ক্ষারীয় পরমাণুগুলির প্রধান (principal) শ্রেণিভুক্ত সব বর্ণালী রেখারই একই রকম দ্বৈত গঠন দেখা যায়।

আগেই উল্লেখ করা হয়েছে (§4·5) যে এই সকল ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালীর দ্বৈত গঠন ব্যাখ্যা করার জন্য ইলেকট্রনের ঘূর্ণন বা স্পিন কল্পনা করতে হয়েছে পরমাণুর প্রতিরূপে। এই ঘূর্ণনের জন্যই নির্দিষ্ট l-মান সম্পন্ন কোনো ইলেকট্রনের মোট কোয়ান্টাম সংখ্যা j-এর দুটি মান থাকতে পারে। একটি $j=l+\frac{1}{2}$ অন্যটি $j = l-\frac{1}{2}$। শক্তিস্তরসমূহের এইরকম বিভাজনকে (splitting) বলা হয় 'শক্তিস্তরের বহুলতা' (multiplicity of energy states)। অর্থাৎ একই l কিন্তু ভিন্ন j-এর জন্য শক্তিস্তরের বিভাজনকে ওই শক্তিস্তরের বা পদের বহুলতা (multiplicity) বলা হয়। যেহেতু সব ক্ষার ধাতুরই একটিমাত্র ইলেকট্রন বর্তমান, সেইহেতু $j = l \pm \frac{1}{2}$ এবং স্বভাবতই সব ক্ষার ধাতুর বহুলতা $2s+1=2\times\frac{1}{2}+1=2$ হবে। সাধারণভাবে, যদি কোন পরমাণুর একাধিক ইলেকট্রনের লব্ধি ঘূর্ণন S হয় তাহলে নির্দিষ্ট L-মান সম্পন্ন পদের বহুলতা হবে (2S+1) অর্থাৎ প্রতিটি শক্তিস্তর (2S+1) সংখ্যক স্তরে বিভাজিত হবে। ক্ষার ধাতুর ক্ষেত্রে $S=s=\frac{1}{2}$

এবার দেখা যাক সোডিয়াম পরমাণুর বর্ণালীর দ্বৈত গঠনের চিত্ররূপটি—চিত্র 5.2—যেখানে P, D, F প্রভৃতি পদগুলির প্রত্যেকটির দ্বৈত গঠন থাকে। P পদের জন্য $l=1$ এবং $j = \frac{3}{2}$ বা $\frac{1}{2}$। এই পদ দুটিকে বলা হয় $^2P_{\frac{3}{2}}$ এবং $^2P_{\frac{1}{2}}$। অনুরূপভাবে D পদের ক্ষেত্রে $l = 2$ এবং $j= \frac{5}{2}$ বা $\frac{3}{2}$ এবং বিভাজিত পদগুলিকে আমরা $^2D_{\frac{5}{2}}$ এবং $^2D_{\frac{3}{2}}$ বলে চিহ্নিত করি। এখানে মনে রাখতে হবে যে পদ নির্দেশকারী P, D, F ইত্যাদি অক্ষরগুলির উপরের বাঁদিকে (superscript) লেখা 2 সংখ্যাটি বহুলতা নির্দেশ করে। আর অক্ষরগুলির ডানদিকের নিচের (subscript) সংখ্যাগুলি j-র মান বোঝায়। S পদগুলির ক্ষেত্রে $l = 0$, $j = \frac{1}{2}$; কারণ j কখনও ঋণাত্মক হতে পারে না। ফলে S পদগুলি একক (singlet) হয়। এই পদগুলিকে তাই $^2S_{\frac{1}{2}}$ বলা হয়। সোডিয়ামের ক্ষেত্রে এই $3\,^2S_{\frac{1}{2}}$ (এখানে 3 সংখ্যাটি $n = 3$ বোঝায়) শক্তিস্তরটিই ভৌমস্তর হিসাবে

কাজ করে। উচ্চতর শক্তিস্তর থেকে এই স্তরে সংক্রমণের ফলেই বিভিন্ন নিঃসরণ বর্ণালী রেখার উৎপত্তি হয়। এই সংক্রমণগুলি

চিত্র 5.2 : সোডিয়ামের শক্তিস্তরের দ্বৈত গঠন

$\Delta j = 0, \pm 1$

নির্বাচন সূত্র (selection rule) দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হয়। এই সূত্রের মানে হচ্ছে এই যে দুটি শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণ হবে যদি তাদের j-এর মান একই হয় অথবা j-এর মানের তফাৎ একক হয়। এই সূত্রানুযায়ী, উদাহরণস্বরূপ, সোডিয়ামের প্রধান শ্রেণির ক্ষেত্রে $nP \rightarrow 3S$ (n=3,4,5,..) সংক্রমণগুলির মধ্যে নিম্নলিখিত সংক্রমণগুলি অনুমোদিত ঃ

$$n^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2} \ (\Delta j=0)$$

$$n^2P_{3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2} \ (\Delta j=1)$$

স্পষ্টতই এই ^2P পদ থেকে উৎপন্ন রেখাটি দ্বৈত গঠনের। সোডিয়ামের ক্ষেত্রে D রেখাদ্বয়ের উৎপত্তি হয় এভাবে—

$$3^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2} \ (D_1 \text{ রেখা, } 5896\text{Å})$$

$$3^2P_{3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2} \ (D_2 \text{ রেখা, } 5890\text{Å})$$

5.5 পর্যায় সারণি (Periodic Table)

আমরা ইতিপূর্বে §4.7 এবং §4.8-এ দেখেছি যে ইলেকট্রনগুলি পরমাণুর মধ্যে কীভাবে বিন্যস্ত থাকে। ওই আলোচনা থেকে আমরা মৌলের পর্যায় সারণি সহজেই ব্যাখ্যা করতে পারি।

আমরা জানি যে পর্যায় সারণি (চিত্র 5.3) হচ্ছে এমন একটি ব্যবস্থা যেখানে প্রকৃতিতে প্রাপ্য 92টি মৌলকে তাদের রাসায়নিক ধর্ম এবং পারমাণবিক সংখ্যা অনুসারে সাজানো হয়। রুশ রসায়নবিদ মেণ্ডেলিয়েভ 1869 সালে প্রথম কেবলমাত্র রাসায়নিক ধর্মের ভিত্তিতে বিভিন্ন পর্যায়ে (periods) মৌলগুলিকে শ্রেণিবদ্ধ করেছিলেন। পরবর্তীকালে দেখা যায় যে এই সারণিতে মৌলের ক্রমিক সংখ্যার সাথে তার পারমাণবিক সংখ্যা (Z) মিলে যায়। আমরা এবার দেখাব যে পাউলির বর্জন নীতি অনুসারে পরমাণুর ইলেকট্রনগুলির যে বিন্যাস পদ্ধতি জেনেছি তার সাহায্যে পর্যায় সারণি ব্যাখ্যা করা যায়।

পর্যায় সারণির সর্বপ্রথম মৌল হাইড্রোজেনের (Z=1) যে একটিমাত্র ইলেকট্রন আছে সেটি কেন্দ্রকের নিকটতম খোলক K-খোলকে থাকবে ন্যূনতম শক্তির শর্ত অনুযায়ী। এটির নাম 1s ইলেকট্রন। যেহেতু K-খোলকে সর্বাধিক 2টি 1s ইলেকট্রন থাকতে পারে, সেইহেতু হাইড্রোজেন পরমাণু অত্যন্ত সক্রিয়-বদ্ধ খোলক তৈরি করার জন্য। সেইহেতু দুটি হাইড্রোজেন পরমাণু পরস্পর আবদ্ধ হয়ে হাইড্রোজেন অনু গঠন করে বা অন্য মৌলের সাথে ক্রিয়া করে হাইড্রোজেন পরমাণু সহজেই অন্য অণু তৈরি করে যেখানে K-খোলক পূর্ণ বা বদ্ধ হয়।

হিলিয়াম (Z=2) হচ্ছে সারণির দ্বিতীয় মৌল যার দুটি ইলেকট্রন আছে। অতএব দুটি $1s^2$ ইলেকট্রন থাকার সুবাদে বদ্ধ খোলক প্রাপ্ত হয়ে হিলিয়াম একটি নিষ্ক্রিয় গ্যাস (inert gas) হিসাবে ব্যবহার করে।

সারণির দ্বিতীয় পর্যায়ের প্রথম মৌল লিথিয়াম (Li) যার (Z=3) তিনটি ইলেকট্রনের মধ্যে দুটি $1s^2$ এবং তৃতীয়টি $2s^1$ হিসাবে থাকে। এই শেষতম ইলেকট্রনটিই যোজ্যতা ইলেকট্রন এবং বন্ধন (bond) তৈরির কারণ। এই পর্যায়ের শেষতম মৌল নিয়ন (Ne) যার (Z=10) দশটি ইলেকট্রন $1s^2 2s^2 2p^6$ বিন্যাসে থাকে। ফলে K এবং L খোলক দুটি সম্পূর্ণভাবে ভর্তি (occupied) থাকে এবং পরমাণুটি নিষ্ক্রিয় গ্যাসের গঠন পায়।

এভাবে তৃতীয়, চতুর্থ ইত্যাদি পর্যায়ের মৌলগুলি আলোচনা করলে দেখা যাবে যে আর্গন (Ar, Z=18), ক্রিপটন (Kr, Z=36), জেনন (Xe, Z=54) এবং রেডন (Rn, Z=86) মৌলগুলি যথাক্রমে M, N, O এবং P খোলকগুলির p উপখোলক পূর্ণ করে থাকে। সেইজন্যই এরা নিষ্ক্রিয়। পর্যায় সারণি লক্ষ্য করলে দেখা যাবে যে, যে কোন পর্যায়ের (period) প্রথম স্তম্ভের (group) মৌল থেকে শেষ স্তম্ভের মৌল পর্যন্ত মৌলগুলির রাসায়নিক বিক্রিয়ার তীব্রতা ক্রমশ হ্রাস পায় এবং শেষতম মৌলটি নিষ্ক্রিয় হয়। মৌলগুলির ইলেকট্রনীয় বিন্যাসের এই পরিবর্তনের সাথে সাথে রাসায়নিক ধর্মের এই ধারাবাহিক পরিবর্তন অত্যন্ত সামঞ্জস্যপূর্ণ এবং সেইজন্যই পর্যায় সারণিটি পাউলির বর্জন নীতির একটি সার্থক রূপায়ণ। তবে মনে রাখতে হবে যে 3d এবং 4s উপকক্ষপথের ক্ষেত্রে সামান্য বিচ্যুতি লক্ষ্য করা যায় যেটি কেবলমাত্র

Period	Group I	Group II											Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group VIII
1	1 H 1.00																	2 He 4.00
2	3 LI 6.94	4 Be 9.01											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.98	16 S 32.07	17 Cl 35.46	18 Ar 39.94
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.86	27 Co 58.93	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Zn 65.37	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.91	36 Kr 83.98
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.66	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.87	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.30
6	55 CS 132.91	56 Ba 137.34	57-71 *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 197.0	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bl 208.98	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn 222
7	87 Fr (223)	88 Ra 226.05	89-103 **															
* Rare earths			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.35	63 Eu 152.0	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.92	68 Ef 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97	
* * Actinides			89 Ac 227	90 Th 232.04	91 Pa 231	92 U 238.03	93 NP (237)	94 Pu (237)	95 Pu (242)	96 Cm (247)	97 Bk (249)	98 Bk (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Fm (253)	102 No (254)	103 Lw (257)	

চিত্র 5.3 : পর্যায় সারণি

বর্জন নীতি দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায় না। যাইহোক, এরকম দু-একটি ব্যতিক্রমী ক্ষেত্র ছাড়া মৌলগুলির ইলেকট্রনীয় বিন্যাস পাউলির বর্জন নীতি দ্বারা সন্তোষজনকভাবে ব্যাখ্যা করা যায় এবং পর্যায় সারণিরও চমৎকার বিশ্লেষণ পাওয়া যায়। সুতরাং বর্জন নীতি, ইলেকট্রনীয় বিন্যাস এবং পর্যায় সারণি পরস্পরের পরিপূরক এবং সুসমঞ্জস।

5.6 জটিল পরমাণুর শক্তিস্তর (Energy levels of complex atoms)

কোন পরমাণুর সবচেয়ে বাইরের কক্ষপথে যদি একাধিক যোজ্যতা ইলেকট্রন থাকে, তাহলে সেই ধরনের জটিল পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি ভেক্টর পরমাণু প্রতিরূপের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। এই সর্ববহিঃস্থ ইলেকট্রনগুলি দুই ধরনের হতে পারে।

(ক) অতুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন (non-equivalent electron) ঃ যে ইলেকট্রনগুলির n অথবা l অথবা উভয়েরই মানগুলি আলাদা তাদের অতুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন বলে।

দুটি অতুল্যাঙ্ক p-ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে মোট ঘূর্ণনের পরিমাণ হতে পারে $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ অথবা $S = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$। যেহেতু উভয় p-ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেই $l = 1$, মোট কক্ষীয় ভরবেগের সম্ভাব্য মানগুলি হতে পারে L=2,1,0। সুতরাং নিম্নলিখিত শক্তিস্তরগুলি বা বর্ণালী স্তরগুলি তৈরি হতে পারে।

$$S=1,\ 2S+1=3,\ L=0 \rightarrow {}^3S \rightarrow {}^3S_1$$

$$L=1 \rightarrow {}^3P \rightarrow {}^3P_2,\ {}^3P_1,\ {}^3P_0$$

$$L=2 \rightarrow {}^3D \rightarrow {}^3D_3,\ {}^3D_2,\ {}^3D_1$$

$$S=O,\ 2S+1=1,\ L=0 \rightarrow {}^1S \rightarrow {}^1S_0$$

$$L=1 \rightarrow {}^1P \rightarrow {}^1P_1,\ {}^1P_o$$

$$L=2 \rightarrow {}^1D \rightarrow {}^1D_2,\ {}^1D_1,\ {}^1D_0$$

(খ) তুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন (equivalent electron) ঃ কোন পরমাণুর একাধিক ইলেকট্রনের n এবং l-এর মানগুলি যদি একই হয় তবে তাদের তুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন বলে। কিন্তু পাউলির বর্জন নীতি অনুসারে সেক্ষেত্রে m_l অথবা m_s-এর মান আলাদা হতে হবে। অর্থাৎ l এবং s-এর সবরকম বিন্যাস (orientation) সম্ভব নয়।

দুটি তুল্যাঙ্ক p-ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে যদি উভয়ের l-ই একইদিকে কাজ করে তাহলে আমরা l=2 অর্থাৎ একটি D-পদ (term) পাই। এক্ষেত্রে উভয়েরই m_l এর মানগুলি একই (+1, 0 বা −1)। সুতরাং m_s-এর মান অবশ্যই আলাদা হতে হবে, যার অর্থ হচ্ছে একটির $m_s = +\frac{1}{2}$ হলে অন্যটির $m_s = -\frac{1}{2}$, যাতে করে

$m_s = 0$ এবং $S = 0$ এবং এর থেকে একটি ^1D-পদ উৎপন্ন হবে। পাউলির নীতি অনুসারে কোন ^3D সম্ভব নয়। দেখানো যায় যে এক্ষেত্রে কেবলমাত্র তিনটি পদ ^1S, ^3P এবং ^1D উৎপন্ন হতে পারে।

তিনটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে তৃতীয়টির l এবং s-এর মান অন্য দুটির প্রাসঙ্গিক মানের সঙ্গে ভেক্টরীয় ভাবে যুক্ত করে সম্ভাব্য পদগুলি পেতে হয়, অবশ্যই পাউলির নীতি মেনে চলে।

দুটি তুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন (eq) এবং দুটি অতুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন (neq)-এর ক্ষেত্রে যেসব পদগুলি উৎপন্ন হতে পারে নীচে তার কয়েকটি নমুনা সারণিবদ্ধ করা হল, সারণি 5.1।

সারণি—5.1

ইলেকট্রনদ্বয়	তুল্যাঙ্কতা	উৎপন্ন সম্ভাব্য পদগুলি
ss	eq	^1S
ss	neq	^1S ^3S
pp	eq	^1S ^3P ^1D
pp	neq	^1S ^3S ^1P ^3P ^1D ^3D
dd	eq	^1S ^3P ^1D ^3F ^1G
dd	neq	^1S ^3S ^1P ^3P ^1D ^3D ^1F ^3F ^1G ^3G

কোন পরমাণুর বদ্ধ খোলকের বা খোলকগুলির মধ্যেই অধিকাংশ ইলেকট্রনগুলি অবস্থান করে। এক্ষেত্রে বর্জন নীতি মানতে গেলে সমস্ত ইলেকট্রনগুলিকে বিসমান্তরাল (antiparallel) জোড়া বা যুগ্ম (pair) তৈরি করতে হবে যাতে করে $m_S = 0$ এবং $S = 0$ হয় প্রতিটি জোড়ার ক্ষেত্রে। অধিকন্তু, $m_L = 0$ এবং $L = 0$ হতে হবে যার ফলে তারা সব সময়ই উদাসী গ্যাসের (inert gas) মত $^1S_0$ ভৌমন্তর তৈরি করতে পারে। এই কারণে আমরা বহু ইলেকট্রনযুক্ত জটিল পরমাণুর ক্ষেত্রে বদ্ধ খোলকের অন্তর্গত ইলেকট্রনগুলিকে বিবেচনার বাইরে রাখতে পারি এবং কেবলমাত্র যোজ্যতা ইলেকট্রনগুলিকে বিবেচনা করে পদগুলি নির্ণয় করতে পারি।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে কয়েকটি বিশেষ ইলেকট্রন বিন্যাসের ক্ষেত্রে উদ্ভূত পদগুলি আমরা এভাবে লিখতে পারি—

একক s যোজ্যতা ইলেকট্রন (H, Na, K ইত্যাদি) ঃ $^2S_{1/2}$

একক p যোজ্যতা ইলেকট্রন (B, Al, Ga ইত্যাদি) ঃ $^2P_{1/2}$

দুটি s যোজ্যতা ইলেকট্রন (Be, Mg, Ca ইত্যাদি) ঃ $^1S_0$

দুটি p যোজ্যতা ইলেকট্রন (C, Si, Ge ইত্যাদি) ঃ $^3P_0$

আশা করা যায় যে উপরোক্ত আলোচনা থেকে আমরা বিভিন্ন তুল্যাঙ্ক বা অতুল্যাঙ্ক ইলেকট্রনগুলির থেকে উৎপন্ন শক্তিস্তর বা পদগুলি সম্পর্কে সম্যকভাবে অবহিত হলাম।

5.7 সারাংশ (Summary)

এই এককটি পড়ার পর আমরা জানতে পারলাম যে ক্ষারীয় ধাতুগুলির ক্ষেত্রে বন্ধ খোলক বা উপখোলকের বাইরে কেবলমাত্র একটি যোজ্যতা ইলেকট্রন ঘুরে বেড়ায় যার ফলে হাইড্রোজেন পরমাণুর বর্ণালীর সাথে ক্ষার ধাতুর বর্ণালীর যথেষ্ট সাদৃশ্য পরিলক্ষিত হয়। ক্ষারীর বর্ণালীর দ্বৈত গঠন এবং বহুলতা বিশেষ উল্লেখযোগ্য এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণন ধর্ম ব্যবহার করে এর ব্যাখ্যা করা যায়, কারণ তার ফলেই $j = l \pm \frac{1}{2}$ হয়, অর্থাৎ j-র দু'টি মান পাওয়া যায় দু'টি শক্তিস্তরের আনুষঙ্গিক। দেখানো হয়েছে যে সোডিয়াম ধাতুর উজ্জ্বল সোনালী বর্ণের যে বিকিরণ রেখা পাওয়া যায় সেটি প্রকৃতপক্ষে একটি দ্বৈত গঠন এবং এই D_1 এবং D_2 রেখা দুটি যথাক্রমে $^2P_{1/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$ এবং $^2P_{3/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$ সংক্রমণের জন্য পাওয়া যায়।

5.8 অনুশীলনী (Exercise)

উদাহরণ 1. সোডিয়ামের দুটি P-শক্তিস্তর ($3^2P_{3/2}$ এবং $3^2P_{1/2}$)-এর মধ্যে শক্তি পার্থক্য যদি $2{\cdot}14\times10^{-3}$ev হয়, তাহলে D_1 এবং D_2 রেখাদ্বয়ের মধ্যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পার্থক্য নির্ণয় করুন যখন λ_2=589 nm।

সমাধান ঃ এখানে $3^2P_{3/2}$ এবং $3^2P_{1/2}$ শক্তিস্তরদ্বয়ের মধ্যে পার্থক্য—

$\Delta E = 2.14\times10^{-3}\times1{\cdot}6\times10^{-19}$J

কারণ, $1eV = 1{\cdot}6\times10^{-19}$J

সুতরাং, স্তরদ্বয়ের মধ্যে কম্পাঙ্ক পার্থক্য—

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{2\cdot14\times1\cdot6\times10^{-22}}{6\cdot63\times10^{-34}}$$

আবার আমরা জানি যে, $\nu = c/\lambda$

বা, $d\lambda = -\frac{\lambda^2 d\nu}{c}$

বা, $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c}\Delta\nu$

$$= \frac{(590\times10^{-9})^2}{3\times10^8}\times\frac{2\cdot14\times1\cdot6\times10^{-22}}{6\cdot63\times10^{-34}}m$$

$= 599\cdot2\times10^{-12}$m

$= 0\cdot599\times10^{-9}$m

$= 0\cdot599$ nm

$= 5\cdot99$Å

সুতরাং, D_1 এবং D_2 রেখাদ্বয়ের মধ্যে পার্থক্য 5·99Å।

5.9 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. নিম্নলিখিত শক্তিস্তরগুলির কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা (L), ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা (S) এবং মোট কোয়ান্টাম সংখ্যা (J) নির্ণয় করুন ঃ $^2S_{\frac{1}{2}}$, $^2P_{\frac{1}{2}}$, $^2P_{\frac{3}{2}}$, $^3P_0$, $^2D_{\frac{5}{2}}$ এবং স্তরগুলি অনুমোদিত কি না যুক্তি দিয়ে বোঝান।
2. সোডিয়াম পরমাণুর বর্ণালীর দ্বৈত গঠনের (D_1 এবং D_2) সংক্রমণগুলি লিখুন এবং চিত্রসহ আলোচনা করুন।
3. পর্যায় সারণির গঠন এবং ব্যাখ্যায় পাউলির বর্জন নীতির ভূমিকা ব্যাখ্যা করুন।
4. তুল্যাঙ্ক এবং অতুল্যাঙ্ক ইলেকট্রন বলতে আপনি কী বোঝেন উদাহরণ সহযোগে ব্যাখ্যা করুন।
5. নিম্নলিখিত মৌলগুলির ইলেকট্রন বিন্যাস কী হবে?
   5^B, 7^N, 10^{Ne}, 11^{Na}, 18^{Ar}
6. (a) সোডিয়াম পরমাণুর প্রথম উদ্দীপিত 3p স্তর, 3s স্তর থেকে 2·10ev উপরে আছে। 3p $\rightarrow$ 3s সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত আলোকের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য কত হবে? [সংকেত $\lambda = \frac{hc}{E_\gamma}, E_\gamma = 2\cdot10eV$]

   (b) ঘূর্ণন-কথা মিথক্রিয়ার (Spin orbit interaction) 3p স্তর দুটি ভাগে ভাগ হয় যাদের শক্তি পার্থক্য $2\cdot1\times10^{-3}$ev। 3p $\rightarrow$ 3s সংক্রমণের ফলে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পার্থক্য $\Delta\lambda$-এর মান কী হবে?

উত্তর (a) λ=590 nm, (b) $\Delta\lambda \cong 0\cdot6$ nm।

একক 6 ❑ জীমান ও স্টার্ক ক্রিয়া

গঠন

6.1 প্রস্তাবনা
6.2 উদ্দেশ্য
6.3 জীমান ক্রিয়া
6.4 (লোরেঞ্জ) সনাতন তত্ত্ব থেকে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা
6.5 কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুসারে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা
6.6 কোয়ান্টাম তত্ত্বানুযায়ী অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা
6.7 পাশেন-বাক্ ক্রিয়া
6.8 স্টার্ক ক্রিয়া
6.9 স্টার্ন ও গের্লাখের পরীক্ষা-ইলেকট্রন ঘূর্ণন
6.10 সারাংশ
6.11 অনুশীলনী
6.12 প্রশ্নাবলি

6.1 প্রস্তাবনা (Introduction)

ইলেকট্রন আবিষ্কার বা পরমাণুর গঠন সম্পর্কে বিস্তারিতভাবে জানার বহু আগে থেকেই বিজ্ঞানীরা বিভিন্ন গ্যাসের শোষণ এবং নিঃসরণ বর্ণালী নিয়ে গবেষণা করে আসছিলেন। বিভিন্ন বর্ণালীর ওপর চৌম্বক এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাব অনুসন্ধান করেছিলেন অনেকেই। এই এককটিতে আমরা সেইসব পর্যবেক্ষণগুলি আলোচনা করব এবং তার ব্যাখ্যা দেবার চেষ্টা করব।

6.2 উদ্দেশ্য (Objectives)

এই এককটি পড়লে আপনি জানতে পারবেন যে বহিঃস্থ চৌম্বক বা বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে কীভাবে

- বর্ণালীরেখা বিভাজিত হয় সনাতন তত্ত্ব অনুসারে ;
- ইলেট্রনের কক্ষপথের কোয়ান্টায়ন দ্বারা জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা করা যায় ;
- সংক্রমণ নির্বাচন সূত্র প্রয়োগ করা হয় ;
- স্টার্ক ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা হয়।

6.3 জীমান ক্রিয়া (Zeeman effect)

1896 সালে জীমান (P. Zeeman) প্রথম লক্ষ্য করেন যে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে বিভিন্ন বর্ণালী রেখাগুলি বিভিন্নভাবে বিভাজিত হয়ে যায়। এই আলোক-চুম্বকীয় (magneto-optical) ক্রিয়াকে সেইজন্য জীমান ক্রিয়া বলা হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একটি বর্ণালী রেখার তিনটি উপাংশে বিভাজিত হবার ঘটনাকে "স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া" বা normal Zeeman effect বলা হয়। এই ঘটনাটিকে সনাতন পদার্থবিদ্যার লোরেঞ্জ ইলেকট্রন তত্ত্ব (Lorentz electron theory) এবং আধুনিক পদার্থবিদ্যার কোয়ান্টাম তত্ত্ব, উভয়েরই সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু মজার ব্যাপার হল এই যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া সাধারণত খুবই কম ঘটতে দেখা যায়। অন্যদিকে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একটি বর্ণালীরেখার তিনের বেশি উপাংশে বিভাজিত হবার ঘটনাকে অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া বা anomalous Zeeman effect বলা হয়। বলা বাহুল্য যে এই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া সনাতন পদার্থবিদ্যার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায় না।

6.4 লোরেঞ্জ সনাতন তত্ত্ব থেকে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা (Explanation of normal Zeeman effect from Lorentz classical theory)

সনাতন পদার্থবিদ্যা অনুযায়ী কোনো ভাস্বর স্বপ্রভ (glowing) বস্তু থেকে আলোক নিঃসরণ হয় বস্তুর ইলেকট্রনের স্পন্দনশীল গতির জন্য। পরমাণুর কেন্দ্রের চারপাশে ইলেকট্রনগুলি সরল সমঞ্জস স্পন্দন (simple harmonic vibration) সম্পন্ন করে বলে সনাতন তত্ত্বে ধরা হয়। এই ইলেকট্রনের স্পন্দনের কম্পাঙ্ক বর্ণালী রেখার কম্পাঙ্কের সমান।

গণনা ঃ ধরা যাক, m ভরের এবং e আধানযুক্ত একটি ইলেকট্রন r ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার কক্ষপথে v রৈখিক বেগ এবং ω কৌণিক বেগসহ নিউক্লিয়াসের চারপাশে ঘুরছে।

বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা না হলে ওই ইলেকট্রনের ওপর প্রযুক্ত কেন্দ্রাভিমুখী (centripetal) বলের মান

$$F = \frac{m v^2}{r} = m\omega^2 r$$

এখন B ফ্লাক্স ঘনত্বের (flux density) একটি বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্র ইলেকট্রনের কক্ষতলের অভিলম্বভাবে প্রয়োগ করা হল। আমরা জানি যে কোনো ইলেকট্রনের রৈখিক গতিকে তিনটি উপাংশে ভাগ করা যায়—একটি চৌম্বক ক্ষেত্র বরাবর রৈখিক গতি এবং দুটি বিপরীতমুখী বৃত্তীয় গতি ক্ষেত্রের অভিলম্বের দিকে। চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগের ফলে ইলেকট্রনের ওপর অতিরিক্ত একটি ব্যাসার্ধমুখী বল Bev কাজ করবে। ইলেকট্রনের দক্ষিণাবর্ত (clockwise) গতির জন্য এই বলের দিক হবে কেন্দ্র থেকে ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী এবং ব্যাসার্ধ বরাবর কেন্দ্রের দিকে অন্তর্মুখী হবে ইলেকট্রনের বামাবর্ত (anti-clockwise)

গতির জন্য। এর ফলে ইলেকট্রনের যে জটিল গতি সৃষ্টি হয় তাকে লার্মার অয়নচলন (Larmor precession) বলে। এর ফলে কক্ষপথের আকৃতির পরিবর্তন না হয়ে কেবলমাত্র কৌণিক বেগের পরিবর্তন হয়।

ধরা যাক চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য কৌণিক বেগের উৎপন্ন পরিবর্তন হল $\delta\omega$। দক্ষিণাবর্তী বৃত্তীয় গতির জন্য আমরা লিখতে পারি—

$$F - Bev = m(\omega + \delta\omega)^2 r$$

বা, $m\omega^2 r - m(\omega + \delta\omega)^2 r = Be\,\omega r$ ($\because$ $v = \omega r$)

বা, $-2mr\,\omega\delta\,\omega = Be\,\omega r$ ($\delta\omega^2$-কে উপেক্ষা করে)

বা, $\delta\omega = -Be/2m$ 6.1

অনুরূপভাবে বামাবর্তী গতির জন্য লিখতে পারি,

$$\delta\omega = +Be/2m$$

এই দুটি আলাদা ক্ষেত্রকে (case) একসাথে লিখতে পারি,

$\delta\omega = \pm Be/2m$ 6.2

যদি ইলেকট্রনের স্পন্দনের কম্পাঙ্ক ν হয়, তাহলে

চিত্র 6.1 কক্ষপথে ইলেকট্রনের গতির দিক এবং বহিস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে তার ওপর প্রযুক্ত অতিরিক্ত বল Bev-এর ক্রিয়ার দিক।

চৌম্বকক্ষেত্রে বিভাজন

চিত্র 6.2 চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে আদি বর্ণালীরেখার (ν) তিনটি উপাংশে বিভাজন—স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া।

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$\therefore\ \delta\omega = 2\pi\ \delta\nu$$

বা, $\delta\nu = \delta\omega/2\pi$ 6.3

সুতরাং বর্ণালীরেখার কম্পাঙ্কের পরিবর্তন

$$\delta\nu = \pm\ Be/4\pi\ m = \pm\ \omega_L/2\pi\ c \qquad \text{..... 6.4}$$

($\omega_L = Be/2m$ = লার্মার অয়নচলন কম্পাঙ্ক)

যদি মূল বা আদি (original) বর্ণালীরেখার কম্পাঙ্ক এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে ν এবং λ হয় তাহলে

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{বা,} \quad \delta\lambda = -\frac{c}{\lambda^2}\delta\lambda$$

সুতরাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জীমান স্থানান্তর বা সরণ (shift)

$$\delta\lambda = \pm\frac{Be\lambda^2}{4\pi\ mc} \qquad \text{..... 6.5}$$

জানা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) একটি বর্ণালী রেখা নিয়ে তার ওপর B মানের চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করে জীমান স্থানান্তর $d\lambda$ মাপা হয়। অন্যভাবে লেখা যায়

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi\ c}{B\lambda^3}\cdot d\lambda \qquad \text{..... 6.6}$$

এই সমীকরণের ডানদিকের সব রাশি জানা থাকলে e/m-এর মান নির্ণয় সম্ভব। জীমান এই 6.6 সমীকরণ ব্যবহার করে ইলেকট্রনের আধানের প্রকৃতি (ধনাত্মক বা ঋণাত্মক) এবং ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান e/m নির্ণয় করেন যার মান অন্যান্য পদ্ধতিতে প্রাপ্ত মানের সাথে মিলে যায়।

যদি কম্পাঙ্কের পরিবর্তে তরঙ্গ-সংখ্যা ব্যবহার করা হয় তাহলে $\bar{\nu} = \nu / c$ অনুযায়ী তিনটি জীমান উপাংশের মান হবে যথাক্রমে

$$\bar{\nu}_1 = \bar{\nu}_0 + \frac{Be}{4\pi\ mc} = \bar{\nu}_0 + \frac{\omega_L}{2\pi\ c} \qquad \text{..... 6.7}$$

$$\bar{\nu}_2 = \bar{\nu}_0 \qquad \text{..... 6.8}$$

$$\bar{\nu}_3 = \bar{\nu}_0 - \frac{Be}{4\pi\ mc} = \bar{\nu}_0 - \frac{\omega_L}{2\pi\ c} \qquad \text{..... 6.9}$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে জীমান স্থানান্তরের (Zeeman shift) মান আদি কম্পাঙ্কের বা তরঙ্গসংখ্যার ওপর নির্ভর করে না, নির্ভর করে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের ওপর।

6.5 কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুসারে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা (Explanation of normal Zeeman effect from quantum theory)

আমরা ইতিপূর্বে (একক 3 এবং 4) জেনেছি যে কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরটি $\left(\vec{p}_l\right)$ কক্ষতলের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে (চিত্র 6.3)। অন্যদিকে কক্ষপথে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনটির আধানের জন্য উদ্ভূত কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক $\vec{\mu}_l$ (orbital magnetic moment) ভেক্টরটি $\vec{p}_l$ ভেক্টরের বিপরীতমুখীভাবে কাজ করে এবং অবশ্যই কক্ষতলের সঙ্গে লম্বভাবে বিন্যস্ত থাকে। কিন্তু পরমাণুর ওই ইলেকট্রনটি যদি কোনো নির্দিষ্ট দিকে ক্রিয়াশীল চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থাপিত হয় তাহলে ওই ক্ষেত্রের অভিমুখের সাপেক্ষে $\vec{p}_l$ ভেক্টরটি সমারফেল্ডের স্থান কোয়ান্টায়ন সূত্র অনুসারে কেবলমাত্র কয়েকটি নির্দিষ্ট দিকে বিন্যস্ত হবে (চিত্র 6.4)।

ধরা যাক, বহিস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের চৌম্বক প্রবাহ ঘনত্ব (magnetic flux density) $\vec{B}$। তাহলে চৌম্বক ক্ষেত্র এবং কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামকের মধ্যে চুম্বকীয় ক্রিয়ার ফলে উদ্ভূত ইলেকট্রনটির স্থিতিশক্তির (potential energy) মান হবে

চিত্র 6.3 : চৌম্বক ক্ষেত্রে কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামকের অবস্থান।

চিত্র 6.4 : কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের স্থান কোয়ান্টায়ন।

$$\varepsilon_B = -\vec{\mu}_l \cdot \vec{B}$$

যদি $\vec{B}$ এবং $\vec{p}_l$ ভেক্টর দুটির মধ্যেকার কোণ θ হয়, তা হলে যেহেতু $\vec{p}_l$ এবং $\vec{\mu}_l$ পরস্পর বিপরীতমুখী, সেইহেতু আমরা লিখতে পারি

$$\varepsilon_B = \mu_l B \cos\theta$$

কিন্তু $\cos\ \theta = m_l / l$

এবং $\mu_l = \frac{e}{2m_e} \cdot p_l = \frac{e}{2m_e} lh$

$$= l \cdot \frac{eh}{2m_e} = l \cdot \mu_B$$

যেখানে $\mu_B = \frac{eh}{2m_e} =$ বোর ম্যাগনেটন।

$$\therefore\ \varepsilon_B = l\,\mu_B B \cdot m_l / l$$

$$= m_l \mu_B B \qquad \text{..... 6.10}$$

এর ফলে চৌম্বক ক্ষেত্রে ইলেকট্রনটির মোট শক্তির পরিমাণ

$$E_{nlm} = E_{nl} + \varepsilon_B$$

$$= E_{nl} + m_l\ \mu_B B \qquad \text{..... 6.11}$$

যেখানে E_{nl} বিনা চৌম্বক ক্ষেত্রে ইলেকট্রনটির শক্তি।
μ_B-এর মান বিস্তৃতভাবে লিখে পাই,

$$E_{nlm} = E_{nl} + \frac{e\hbar}{2m_e} \cdot m_l B$$

$$= E_{nl} + m_l \hbar \cdot \frac{eB}{2m_e}$$

$$= E_{nl} + m_l \hbar \cdot \omega_L \qquad \text{..... 6.12}$$

যেখানে $\omega_L = \frac{eB}{2m_e} = 8 \cdot 782 \times 10^{10} B / s$

এবং $\nu_L = \frac{\omega_L}{2\pi} =$ লার্মার অয়নচলন কম্পাঙ্ক (Larmour precessional frequency)।

উপরোক্ত 6.12 সমীকরণ থেকে সহজেই বোঝা যাচ্ছে যে-কোনো ইলেকট্রনের নির্দিষ্ট n এবং l-যুক্ত শক্তিস্তর বহিস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে খুব কাছাকাছি অবস্থিত $(2l + 1)$-সংখ্যক সামান্য পৃথক মানের উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। এই সামান্য ভিন্ন শক্তির মান নির্ধারিত হয় চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_l-এর মান দ্বারা, কারণ নির্দিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রে ω_L ধ্রুবক। সর্বনিম্ন শক্তিস্তরটির কৌণিক ভরবেগ চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখের বিসমান্তরাল হবে $(m_l < 0)$। এর ফলে $l = 1$ স্তরটি $2 \times 1 + 1 = 3$টি উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হবে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে। অনুরূপভাবে $l = 2$ হলে $2 \times 2 + 1 = 5$টি উপস্তর তৈরি হবে। এইসব বিভিন্ন উপস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণ অনুমোদিত হয় বা নিয়ন্ত্রিত হয়।

$$\Delta m_l = 0, \pm 1 \qquad \text{..... 6.13}$$

নির্বাচন সূত্র দ্বারা। অর্থাৎ দুটি উপস্তরের m_l-এর মানের পার্থক্য 0 বা ± 1 হলেই সংক্রমণটি অনুমোদিত হবে। চিত্র 6.5-এ দেখানো হয়েছে যে একটি নির্দিষ্ট n-এর জন্য $l = 2$ এবং $l = 1$ স্তরগুলির মধ্যে বিনা চৌম্বক ক্ষেত্রে এবং চৌম্বকক্ষেত্রে কী কী সংক্রমণ হতে পারে। এই লব্ধ বর্ণালীরেখার বা বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা, চৌম্বকক্ষেত্রে বিভাজিত উপস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণের ফলে লব্ধ বর্ণালীরেখা বা রেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা নিম্নলিখিত সমীকরণ থেকে পাওয়া যাবে—

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{h\nu}{hc} = \frac{\Delta E}{2\pi c \cdot \frac{h}{2\pi}} = \frac{\Delta E}{2\pi c\hbar}$$

$$= \frac{(E_{nl} + m_l \mu_B B) - (E_{n'l'} + m_{l'} \mu_B B)}{2\pi c\hbar}$$

$$= \frac{(E_{nl} - E_{n'l'})}{2\pi c\hbar} + \frac{\mu_B B}{2\pi c\hbar}(m_l - m_{l'})$$

$$= \bar{\nu}_0 + \frac{e\hbar}{2m_e} \cdot \frac{B}{2\pi c\hbar} \cdot \Delta m_l$$

$$= \bar{\nu}_0 + \frac{eB}{4\pi cm_e} \cdot \Delta m_l \qquad \text{..... 6.14}$$

এখানে $\bar{\nu}_0 = \left(E_{nl} - E_{n'l'}\right) / 2\pi c\hbar$ হচ্ছে বিনা চৌম্বকক্ষেত্রে আদি অবিভাজিত বর্ণালীরেখাটির তরঙ্গসংখ্যা। যেহেতু কেবলমাত্র $\Delta m_l = 0, \pm 1$ সংক্রমণগুলি অনুমোদিত, সেইহেতু কেবলমাত্র তিনটি বিভাজিত উপাংশযুক্ত একটি বর্ণালী পাওয়া যায়, যদিও অনুমোদিত সংক্রমণের সংখ্যা নয় (9)টি। প্রকৃতপক্ষে $l = 2$ এবং $l = 1$ স্তরগুলির উপস্তরগুলির মধ্যে শক্তি পার্থক্যের মান একই হওয়ার ফলে আমরা ন'টির পরিবর্তে কেবলমাত্র তিনটি সংক্রমণ পর্যবেক্ষণ করি। অন্যভাবে বলতে গেলে বলা যায় যে আপাতদৃষ্টিতে আদি রেখাটি ন'টি উপাংশে বিভাজিত হয় বলে মনে হলেও প্রকৃতপক্ষে তিনটি বর্ণালীরেখা পাওয়া যাবে।

চিত্র 6.5 স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায় শক্তিস্তরের বিভাজন, তাদের মধ্যে অনুমোদিত সংক্রমণ এবং পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীর রূপরেখা। এখানে বিভাজনগুলি বহুগুণ বর্ধিত মাত্রায় দেখানো হয়েছে।

এখন এই উৎপন্ন তিনটি বর্ণালীরেখার তরঙ্গসংখ্যা হল

$$\bar{\nu}_1 = \bar{\nu}_0 + \frac{eB}{4\pi c m_e} = \nu_0 + \frac{\omega L}{2\pi c} \left(\Delta m_l = +1\right) \qquad \text{..... 6.15}$$

$$\bar{\nu}_2 = \bar{\nu}_0 \ \left(\Delta m_l = 0\right) \qquad \text{..... 6.16}$$

$$\bar{\nu}_3 = \bar{\nu}_0 - \frac{eB}{4\pi c m_e} = \bar{\nu}_0 - \frac{\omega L}{2\pi c} \ \left(\Delta m_l = -1\right) \qquad \text{..... 6.17}$$

উপরোক্ত সমীকরণ তিনটির (6.15, 6.16 এবং 6.17) ডানদিকের প্রথম পদটি (ν_0) হচ্ছে আদি বর্ণালীরেখার তরঙ্গসংখ্যা। ডানদিকের অপর পদ দুটি ($\omega_L/2\pi c$) সদৃশ্যভাবে (symmetrically) আদি রেখার এপাশে বা ওপাশে অবস্থিত হয়। নির্দিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য ω_L ধ্রুবক এবং সেইজন্য পাশের রেখাদুটি আদি রেখার ওপর নির্ভরশীল নয়।

এখন সমীকরণ 6.7—6.9 এবং সমীকরণ 6.15—6.17 তুলনা করলে দেখা যায় যে সনাতন তত্ত্বীয় পদার্থবিদ্যা এবং কোয়ান্টাম তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা সম্পূর্ণভাবে একই। সুতরাং অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যায় দুটি তত্ত্বই সমানভাবে সক্ষম।

6.6 কোয়ান্টাম তত্ত্বানুযায়ী অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা (explanation of anomalous Zeeman effect according to quantum theory)

অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়াই অধিকতর পরিলক্ষিত হয় স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার তুলনায়। ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতি ছাড়াও ঘূর্ণন গতি বিবেচনা করলে এই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা সম্ভব। পরবর্তী আলোচনায় আমরা দেখতে পাব যে তথাকথিত অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়াই প্রকৃতপক্ষে স্বাভাবিক।

ধরা যাক, একটি বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর (h-এর এককে) যথাক্রমে $\vec{L}$ এবং $\vec{S}$। তাহলে তাদের লব্ধ $\vec{J}$ ভেক্টরটি প্রযুক্ত বহিস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখকে বেষ্টন করে অয়নচলন গতিতে আবর্তিত হবে। ওই চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের সাপেক্ষে $\vec{J}$ ভেক্টরটির $(2J + 1)$-সংখ্যক দিগ্‌বিন্যাস (orientation) সম্ভব এবং এইসব বিভিন্ন দিগ্‌বিন্যাসগুলি মোট চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_J দ্বারা নির্ধারিত হয়। এখানে $m_J = J, J - 1, J - 2, \ldots\ldots, -(J - 1), -J$; মোট $(2J + 1)$-সংখ্যক মান। চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখে এই $\vec{J}$-এর উপাংশগুলির মান হচ্ছে $m_J h$। সুতরাং একটি নির্দিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি পারমাণবিক শক্তিস্তর-নির্দিষ্ট $\vec{L}$ এবং $\vec{J}$ মানযুক্ত হলে—$(2J + 1)$ সংখ্যক কাছাকাছি

অবস্থিত উপশক্তিস্তরে (sub energy state) বিভাজিত হয়ে যায়। এই সন্নিহিত উপশক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক ব্যবধান বা বিভাজনের মান প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র এবং 'লান্‌ডে g-গুণক' বা বিভাজন গুণক (Lande g-factor or splitting factor)-এর ওপর নির্ভর করে।

চিত্র 6.6.: 'লান্‌ডে' 'g' গুণকের ব্যাখ্যা

আমরা আগেই দেখেছি (একক 4) কক্ষীয় ইলেকট্রনের বেলায়, কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক (μ_l) এবং কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের সম্পর্ক হল— $\frac{\mu_l}{p_l} = \frac{e}{2m_e}$

এই অনুপাতকে ঘূর্ণ চৌম্বক অনুপাত (gyromagnatic ratio) বলা হয়।

ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতির (spin motion) জন্য নিজস্ব একটি চৌম্বক ভ্রামক থাকে। ডিরাকের (P. A. M. Dirac) ইলেকট্রনের আপেক্ষিকতা তত্ত্ব থেকে দেখানো যায় ইলেকট্রন ঘূর্ণ চৌম্বক ভ্রামক (μ_s) এবং ঘূর্ণ ভরবেগের সম্পর্ক হল—

$$\frac{\mu_s}{p_s} = 2 \times \frac{e}{2m_e} = \frac{e}{m_e}$$

বা, $\mu_s = \frac{e}{m_e} s\hbar \qquad \because \; p_s = s\hbar = \frac{1}{2}\hbar$

$$= \frac{e\hbar}{2m_e} = \mu_B$$

সংক্ষেপে $\frac{\mu_s}{p_s} = \frac{e}{m_e}$ এবং $\frac{\mu_l}{p_l} = \frac{e}{2m_e}$

অর্থাৎ $\frac{\mu_s}{p_s} = 2\frac{\mu_l}{p_l}$

ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতি ও ঘূর্ণন গতি বিবেচনা করলে বহু ইলেকট্রনের বেলায় লব্ধি ভেক্টর

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

এবং লব্ধি চৌম্বক ভ্রামক হবে

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_s$$

যেহেতু $\frac{\mu_s}{p_s}$ অনুপাত, $\frac{\mu_L}{p_L}$ অনুপাতের দ্বিগুণ, $\vec{\mu}_L$ ও $\vec{\mu}_S$-এর লব্ধি $\vec{\mu}$ ভেক্টর, $\vec{L}$ ও $\vec{S}$-এর লব্ধি $\vec{J}$ ভেক্টরের একই সরলরেখা বরাবর হবে না। 6.6 চিত্রে এটি দেখানো হয়েছে। ইলেকট্রনের আধান ঋণাত্মক বলে, চৌম্বক ভেক্টরগুলি কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের বিপরীত দিকে দেখানো হয়েছে। ইলেকট্রনের কক্ষীয় ভরবেগ Lh ও ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ Sh এদের লব্ধি কৌণিক ভরবেগ Jh-এর চারপাশে অয়নচলন গতিতে যেমন আবর্তন করে, তেমনি চৌম্বক ভেক্টরগুলি μ_L ও μ_S, লব্ধি ভেক্টর $\vec{J}$-এর চারপাশে আবর্তন করে। অবিরাম আবর্তনের ফলে চৌম্বক ভ্রামকের লম্ব উপাংশগুলির গড়মান শূন্য হয়। $\vec{J}$-এর অভিমুখী মান হবে

$$\mu_J = \mu_L \cos\left(\vec{L}, \vec{J}\right) + \mu_S \cos\left(\vec{S}, \vec{J}\right)$$

এখানে $\left(\vec{L}, \vec{J}\right)$ হল $\vec{L}$ ও $\vec{J}$-এর মধ্যে কোণ এবং

$\left(\vec{S}, \vec{J}\right)$ হল $\vec{S}$ ও $\vec{J}$-এর মধ্যে কোণ।

আবার, $\mu_L = \frac{e\hbar}{2m_e} L$ এবং

$$\mu_S = \frac{e\hbar}{2m_e} 2S$$

$$\therefore \quad \mu_J = \left[L\cos\left(\vec{L},\vec{J}\right) + 2S\cos\left(\vec{S},\vec{J}\right)\right]\frac{e\hbar}{2m_e}$$

$\vec{L}, \vec{S}$ ও $\vec{J}$-এর ত্রিভুজ গঠনের চিত্র

$\vec{L}, \vec{S}$ ও $\vec{J}$ ভেক্টরগুলির ত্রিভুজ গঠন করে (উপরের চিত্র),

ওপরের $\cos\left(\vec{L},\vec{J}\right)$ ও $\cos\left(\vec{S},\vec{J}\right)$-এর মান সহজেই পাওয়া যায়।

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

$$\therefore \quad S^2 = J^2 + L^2 - 2LJ\cos\left(\vec{L},\vec{J}\right)$$

এবং $L^2 = J^2 + S^2 - 2SJ\cos\left(\vec{S},\vec{J}\right)$

$$\therefore \quad \cos\left(\vec{L},\vec{J}\right) = \frac{J^2 + L^2 - S^2}{2LJ}$$

$$\cos\left(\vec{S},\vec{J}\right) = \frac{J^2 + S^2 - L^2}{2SJ}$$

$$\therefore \quad \mu_J = \left[\frac{J^2 + L^2 - S^2}{2J} + 2\,\frac{J^2 + S^2 - L^2}{2J}\right]\frac{eh}{2m_e}$$

$$= \left[1 + \frac{J^2 + S^2 - L^2}{2J^2}\right]J\,\frac{2\hbar}{2m_e}$$

কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুসারে

$$L^2 = L(L+1), S^2 = S(S+1), J^2 = J(J+1)$$

$$\therefore\ \mu_J = \left[1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}\right]\sqrt{J(J+1)}\,\frac{e\hbar}{2m_e}$$

$$= g\sqrt{J(J+1)}\,\frac{e\hbar}{2m_e} = g\sqrt{J(J+1)}\,\mu_B$$

g-কে বলা হয় লান্‌ডে g-গুণক।

এই লান্‌ডে g-গুণকের মান হল—

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \qquad \text{..... 6.18}$$

$\vec{B}$ প্রবাহ ঘনত্বের চৌম্বক ক্ষেত্রে J শক্তিস্তরে কোনো ইলেকট্রনের অতিরিক্ত শক্তি হবে—

$$\epsilon_B = -\mu_J\, B\cos(\mu_J, B)$$

μ_J এবং J পরস্পরের বিপরীতমুখী হওয়ায়

$$\epsilon_B = \mu_J\, B\cos(J, B)$$

এখন, $\sqrt{J(J+1)}\cos(J, B)$ হচ্ছে $\vec{J}$ ভেক্টরের চৌম্বক ক্ষেত্রের দিকে উপাংশ। এর মান চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_J।

সুতরাং $\vec{B}$ প্রবাহ ঘনত্বযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে সন্নিহিত উপশক্তিস্তরগুলির মধ্যে পারস্পরিক ব্যবধান বা বিভাজনের মান $\epsilon_B = \mu_B g\, Bm_J$ 6.19

যেখানে $\mu_B = e\hbar / 2m_e =$ বোর ম্যাগনেটন। যেহেতু g-এর মান J-এর ওপর নির্ভরশীল, সেইহেতু অনেক সময় g-এর বদলে g_J লেখা হয়।

অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া লক্ষ্য করা যায় সেইসব ক্ষেত্রে যেখানে বর্ণালীরেখা সৃষ্টিকারী শক্তিস্তরগুলির $\vec{S} \neq 0$। সেইসব ক্ষেত্রে একটি বর্ণালীরেখা চারটি বা ততোধিক উপাংশে বিভাজিত হয়ে যায়। যেহেতু $\vec{S} \neq 0$, প্রাথমিক এবং শেষ শক্তিস্তরে g_J-এর মান পৃথক হবে (কারণ L-এর মানগুলি আলাদা) এবং তার ফলে প্রাথমিক এবং শেষ শক্তিস্তরের বিভাজনের পরিমাণ পৃথক হবে। অধিকন্তু, দেখা গেছে যে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র তুলনামূলকভাবে কম (কয়েক টেস্‌লা) হলেও অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া পরিলক্ষিত হয়।

L, S এবং J-এর মানের ওপর নির্ভর করে যেহেতু g_J-এর মান বিভিন্ন শক্তিস্তরের জন্য বিভিন্ন হয়, সেইহেতু শক্তিস্তরের চৌম্বক বিভাজনের পরিমাপও বিভিন্ন স্তরের জন্য বিভিন্ন হয়। ফলতঃ যে দুই উপরের

এবং নীচের স্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে কোনো বিশেষ বর্ণালীরেখার উদ্ভব হয়, তাদের চৌম্বক বিভাজনও সমান হয় না। এইসব বিভাজিত উপশক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণগুলি

$$\Delta m_j = 0, \pm 1 \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 6.20$$

নির্বাচন সূত্র দ্বারা অনুমোদিত হয়। এভাবেই কোনো বর্ণালীরেখার বিভাজন হয় চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে। সাধারণত একটি বর্ণালীরেখা যে কটি উপাংশে বিভাজিত (দুটি বা তিনটি) হবে বলে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায় ভাবা হয় তার থেকে বেশি সংখ্যক বিভাজন ব্যাখ্যা করা যায় ইলেকট্রনের ঘূর্ণন ধর্ম আরোপ করে অর্থাৎ অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায়।

এবার আমরা একটি উদাহরণের সাহায্যে ব্যাপারটি বুঝতে চেষ্টা করব। আমরা জানি যে সোডিয়াম D-রেখার দুটি উপাংশ আছে, D_1 (589·6 nm) এবং D_2 (589·0 nm)। যখন একটি সোডিয়াম শিখা বা সোডিয়াম ভেপার ল্যাম্পকে প্রায় 3 টেস্‌লা (1 টেস্‌লা = 10,000 গাওস্‌ বা $1T = 10^4$ Gauss)

চিত্র 6.7 সোডিয়াম D_1-রেখার অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার উৎপত্তি এবং সমবর্তিত বর্ণালীর ধরন। এই চিত্রে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে বর্ণালীরেখার বিভাজনগুলি বর্ধিত আকারে দেখানো হয়েছে এবং এগুলি স্কেল অনুসারে আঁকা হয়নি। প্রকৃত বিভাজনগুলি অত্যন্ত সূক্ষ্ম এবং বহুক্ষেত্রে মাত্র কয়েক nm মাপের হয়।

চিত্র 6.8 সোডিয়াম D_2-রেখার অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার উৎপত্তি এবং সমবর্তিত বর্ণালীর ধরন। বিভাজনগুলি স্কেল অনুসারে আঁকা হয়নি। সম্ভাব্য অনুমোদিত সংক্রমণগুলি $\Delta m_j = 0, \pm 1$ নির্বাচন সূত্রানুযায়ী আঁকা হয়েছে। উপরের এবং নীচের স্তরের বিভাজনের পার্থক্য বিশেষভাবে লক্ষণীয়।

চৌম্বকক্ষেত্রে স্থাপন করা হয় এবং শক্তিশালী বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্র (high resolution spectrometer) দ্বারা বিশ্লেষণ করা হয় তখন দেখা যায় যে D_1-রেখা চারটি (4) এবং D_2-রেখা ছটি (6) উপরেখায় বা উপাংশে বিভাজিত হয়ে যাচ্ছে। আমরা জানি যে এই রেখা দুটি উৎপন্ন হয় নিম্নলিখিত সংক্রমণ দুটি দ্বারা

$$D_1\ (\lambda_1 = 589{\cdot}6\ \text{nm}) : 3^2S_{\frac{1}{2}} \longrightarrow 3^2P_{\frac{1}{2}}$$

$$D_2\ (\lambda_2 = 589{\cdot}0\ \text{nm}) : 3^2S_{\frac{1}{2}} \longrightarrow 3^2P_{\frac{1}{2}}$$

এখানে সঙ্কেতগুলির অর্থ হল—

$$3^2S_{\frac{1}{2}} \longrightarrow n=3, l=0, j=\frac{1}{2}, s=\frac{1}{2}$$

$$3^2P_{\frac{1}{2}} \longrightarrow n=3, l=1, j=\frac{1}{2}, s=\frac{1}{2}$$

$$3^2P_{\frac{3}{2}} \longrightarrow n=3, l=1, j=\frac{3}{2}, s=\frac{1}{2}$$

এইসব উপরেখা বা উপাংশের সঠিক চিহ্নিতকরণের জন্য সমবর্তন (polarization) ধর্ম লক্ষ্য করা হয়। যেসব উপাংশের ক্ষেত্রে আলোক তরঙ্গের তাড়িত ভেক্টর চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্বে $\left(\vec{E} \perp \vec{B}\right)$ সমবর্তিত হয় তাকে σ-সমবর্তিত রেখা বলা হয়। অন্যদিকে যেসব উপাংশের ক্ষেত্রে আলোক তরঙ্গের তাড়িত ভেক্টর চৌম্বক ক্ষেত্রের সমান্তরালে $\left(\vec{E} \parallel \vec{B}\right)$ সমবর্তিত হয় তাকে π-সমবর্তিত রেখা বলা হয়। কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাহায্যে প্রমাণ করা যায় যে $\Delta m_j = 0$ হলে বর্ণালীরেখাটি π-সমবর্তিত হবে এবং $\Delta m_j = \pm 1$ হলে বর্ণালীরেখাটি σ-সমবর্তিত হবে। অর্থাৎ সমবর্তন পরীক্ষার ফলাফল বিশ্লেষণ করে আমরা যে-কোনো বর্ণালীরেখার উপাংশ বা উপরেখার উৎপত্তির জন্য দায়ী সংক্রমণটিকে সুস্পষ্টভাবে চিহ্নিত করতে পারি। এই ব্যাপারটি চিত্র 6.6 এবং চিত্র 6.7-এ দেখানো হয়েছে।

সোডিয়াম D-রেখার উৎপত্তির সাথে যুক্ত শক্তিস্তরগুলির লান্‌ডে g-গুণকগুলির মান এবং সংশ্লিষ্ট কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি 6.1 সারণিতে দেখানো হল।

সারণি 6.1

শক্তিস্তর	L	S	J	m_J	g_J	$m_J g_J$
$^2S_{\frac{1}{2}}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\pm\frac{1}{2}$	2	± 1
$^2P_{\frac{1}{2}}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\pm\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\pm\frac{1}{3}$
$^3P_{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\pm\frac{3}{2}, \pm\frac{1}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\pm 2, \pm\frac{2}{3}$

দেখা গেছে যে চৌম্বক ক্ষেত্র যখন খুব বেশি শক্তিশালী নয়, তখনই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া লক্ষ্য করা যায়। যেসব মৌলের ভৌমস্তর $^1S_0$, অর্থাৎ $S = 0$ এবং $J = L$, তাদের ক্ষেত্রে $g_J = 1$ এবং তার ফলে উপরের (প্রাথমিক) এবং নীচের (অন্তিম) শক্তিস্তরের চৌম্বক বিভাজনের মান $(\mu_B g_J B m_J)$ সঠিকভাবে একই হয়। তারফলে বর্ণালীরেখাটি কেবলমাত্র তিনটি উপাংশে বা উপরেখায় বিভাজিত হয় অর্থাৎ স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া। এই ধরনের মৌলগুলি হল M_g, Ca, Sr, Cd ইত্যাদি। এদের শক্তিস্তরের চৌম্বক বিভাজন L এবং J-র মানের উপর নির্ভরশীল নয়।

6.7 পাশেন-বাক্ ক্রিয়া (Paschen-Back effect)

আমরা জেনেছি যে অপেক্ষাকৃত দুর্বল চৌম্বক ক্ষেত্রে ($\sim 1T$) অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া লক্ষ্য করা যায়। ক্ষেত্রের তীব্রতা যথেষ্ট বৃদ্ধি পেলে বর্ণালীরেখার বিভাজনগুলি স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার বিভাজনের সদৃশ হয়, অর্থাৎ কেবলমাত্র দু'টি বা তিনটি উপাংশে বিভাজিত হয়। একেই পাশেন-বাক্ (Paschen-Back) ক্রিয়া বলে।

খুব শক্তিশালী চৌম্বক ক্ষেত্রে কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরদ্বয় $\vec{L}$ এবং $\vec{S}$-এর মধ্যেকার চৌম্বক সংযোগ (magnetic coupling) নষ্ট হয়ে যায় এবং তার ফলে $\vec{J}$ ভেক্টর তৈরি হতে পারে না। তখন $\vec{L}$ এবং $\vec{S}$ স্বাধীনভাবে চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখকে কেন্দ্র করে অয়নচলন করে। ক্ষেত্রাভিমুখে $\vec{L}$-এর $(2L + 1)$-সংখ্যক সম্ভাব্য উপাংশ থাকে যাদের মান হচ্ছে $m_L = L, L - 1, L - 2, \ldots, -L$। অনুরূপভাবে ক্ষেত্রাভিমুখে S-এর $(2S + 1)$ সংখ্যক উপাংশ থাকে যাদের মান $m_S = S, S - 1, \ldots, -S$। এই পরিস্থিতিতে কোন বর্ণালীরেখার বিভাজনের মান মোটামুটিভাবে লেখা যায়—

$$\begin{aligned} \varepsilon_B &= \mu_B B m_L + 2\mu_B B m_S \\ &= \mu_B B(m_L + 2m_S) \qquad \ldots\ldots 6.21 \end{aligned}$$

ঘূর্ণন ভরবেগের ঘূর্ণচৌম্বক অনুপাতে 2 উপস্থিতির জন্য 6.21 সমীকরণের দ্বিতীয় পদে 2 দিয়ে গুণ করতে হয়েছে। তার ফলে আমরা স্বাভাবিক তিনটি বিভাজন পেয়ে থাকি যেমন পাওয়ার কথা § 6.5 অনুসারে। এই ক্ষেত্রে সংক্রমণের নির্বাচন সূত্র হল $\Delta m_L = 0, \pm 1$ এবং $\Delta m_S = 0$। $(m_L + 2m_S)$-কে প্রবল-ক্ষেত্র কোয়ান্টাম সংখ্যা (strong-field quantum number) বলে।

6.8 স্টার্ক ক্রিয়া (Stark Effect)

বিজ্ঞানী স্টার্ক (J. Stark) 1913 সালে জার্মানিতে পরমাণুর বর্ণালীরেখার উপর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগ করে তার বিভাজন লক্ষ্য করেন। এই ক্রিয়াকে স্টার্ক ক্রিয়া বলে এবং এটি জীমান ক্রিয়ার বৈদ্যুতিক অনুরূপ (electrical analog of Zeeman effect)। এই বিভাজিত উপাংশগুলি বিভিন্ন মাত্রার সমবর্তন ধর্ম দেখায়।

প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সঙ্গে বিভাজন সাধারণত সমানুপাতিক ($E = 10^7$ v/m ক্ষেত্র পর্যন্ত)। কিন্তু তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে বিভাজন জটিল হয় এবং E^2-এর সমানুপাতিক হয়। তখন দ্বিতীয় পর্যায়ের (second-order) স্টার্ক ক্রিয়া শুরু হয়।

6.9 স্টার্ন ও গের্লাখের পরীক্ষা-ইলেকট্রন ঘূর্ণন (Stern and Gerlach experiment-electron spin)

আমরা ইতিপূর্বে জেনেছি যে পরমাণুর ইলেকট্রনের কক্ষীয় এবং ঘূর্ণন গতির জন্য একটি নিট (net) পারমাণবিক চৌম্বক ভ্রামক উৎপন্ন হয়। স্টার্ন এবং গের্লাখ 1921 সালে পরীক্ষার সাহায্যে এই পারমাণবিক চৌম্বক ভ্রামকের অস্তিত্ব এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণন প্রমাণ করেন।

অসমমাত্র (inhomogeneous) চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি পারমাণবিক চৌম্বক দ্বিমেরুর (magnetic dipole) ধর্ম বা গতিপ্রকৃতির উপর নির্ভর করে এই পরীক্ষাটির পরিকল্পনা করা হয়েছে। একটি সমমাত্র বা সমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রে $\left(\vec{B}\right)$ উপরোক্ত চুম্বক দ্বিমেরুটির উপর একটি টর্ক (torque) τ ক্রিয়া করে। এই টর্ক উৎপন্ন হয় পারমাণবিক চুম্বকের দুই মেরুর উপর প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য সমান ও বিপরীতমুখী বলের ক্রিয়ার ফলে। এই টর্কের ক্রিয়ায় পারমাণবিক চুম্বকগুলি প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র বেষ্টন করে অয়নচলিত (precess) হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রটি অসমমাত্র বা অসমসত্ত্ব হলে ওই টর্ক ছাড়াও পারমাণবিক চুম্বকটি চৌম্বক ক্ষেত্র অভিমুখে একটি রৈখিক বল (translatory force) অনুভব করে। এই রকম একটি অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্বভাবে যদি কোন পারমাণবিক চুম্বক গতিশীল হয় তাহলে সেটি তার সরলরৈখিক গতি থেকে বিচ্যুত হবে। এই বিচ্যুতির রাশিমালা আমরা নিম্নলিখিতভাবে নির্ণয় করতে পারি।

ধরা যাক x-অক্ষ বরাবর চৌম্বক ক্ষেত্র পরিবর্তিত হয় যার ফলে ক্ষেত্রের বিষমমাত্রিকতা (field gradient) $\frac{dB}{dx}$ এবং এটি একটি ধনাত্মক রাশি। ধরা যাক যে CD হচ্ছে l দৈর্ঘ্যের পারমাণবিক চুম্বকটি যার মেরুশক্তি p, চৌম্বক ভ্রামক M এবং চুম্বকটির অক্ষ ক্ষেত্রের সঙ্গে θ কোণে আনত। যদি C মেরুতে ক্ষেত্র প্রাবল্য B হয় তাহলে অন্য মেরু D-তে ক্ষেত্রপ্রাবল্য হবে $\left(B + \frac{dB}{dx}.l\cos\theta\right)$। সুতরাং মেরুদ্বয়ের উপর প্রযুক্ত বলের পরিমাণ হবে pB এবং $p\left(B + \frac{dB}{dx}.l\cos\theta\right)$। সুতরাং পারমাণবিক চুম্বকটি একটি টর্ক ($\tau = plB = \mu_s B$) ছাড়াও একটি রৈখিক বল

$$F_x = p.\frac{dB}{dx}l\cos\theta = \frac{dB}{dx}\mu_s\cos\theta \qquad \ldots 6.22$$

অনুভব করে (চিত্র 6.9)।

চিত্র 6.9 : বিষম মাত্রিক চৌম্বক ক্ষেত্রে চৌম্বক ভ্রামক।

এখন ধরা যাক,

v = ক্ষেত্রে প্রবেশের সময় m ভরের চুম্বকটির গতিবেগ

L = ক্ষেত্রের ভিতর চুম্বকটির পথের দৈর্ঘ্য

t = ক্ষেত্রের ভিতর চুম্বকটির ভ্রমণের সময়

$= L / v$

রৈখিক বল F_x চুম্বকটিকে ক্ষেত্রাভিমুখে ত্বরিত করে।

$\therefore$ ত্বরণ $= F_x/m$

ক্ষেত্র থেকে নিষ্ক্রমণের পর ক্ষেত্রের দিকে চুম্বকটির সরণ

$$\alpha = \frac{1}{2}(F_x / m)t^2$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{F_x}{m}\cdot\frac{L^2}{v^2}$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{dB}{dx}\cdot\frac{\mu_s \cos\theta}{m}\cdot\frac{L^2}{v^2}$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{dB}{dx}\cdot\frac{\mu}{m}\cdot\frac{L^2}{v^2} \qquad \text{... 6.23}$$

যেখানে $\mu = \mu_s \cos\theta$ হচ্ছে ক্ষেত্রাভিমুখে চৌম্বক ভ্রামকের উপাংশ।

স্টার্ন এবং গের্লাখ একটি চুল্লীতে কিছু রূপাকে উত্তপ্ত করে রূপার পারমাণবিক রশ্মিগুচ্ছ (atomic beam of silver) তৈরি করেন। রূপা ($Z = 47$, $\square\, 5s^1$ এবং $l = 0$) এবং আরও কয়েকটি পরমাণুর (H, Li,

Na, K, Cu, Au) ভৌমস্তর হল $^2S_{\frac{1}{2}}$ কারণ এদের $l = 0$ এবং $j = s$। তারফলে এদের কোন কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক থাকে না—অর্থাৎ $\mu_l = 0$। অতএব এই মৌলগুলির ভৌমস্তরের চৌম্বক ভ্রামকগুলি অতি অবশ্যই ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের জন্য উদ্ভূত। বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রে এই মৌলগুলির চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার মাত্র দুটি মান হ'তে পারে $m_j = +\frac{1}{2}$ বা, $m_j = -\frac{1}{2}$ এবং এদের চৌম্বক বহুলতা (magnetic multiciplity) $2j + 1 = 2 \times \frac{1}{2} + 1 = 2$।

রূপার উপরোক্ত পারমাণবিক রশ্মিগুচ্ছকে S_1 এবং S_2 রেখাছিদ্রের (slit) সাহায্যে খুব সূক্ষ্মভাবে সমান্তরাল করা হয় যাতে করে গুচ্ছটি অত্যন্ত ক্ষুরধার এবং রৈখিক হয় (চিত্র 6.10 (ক))। এই সমান্তরিত পারমাণবিক রশ্মিগুচ্ছকে একটি শক্তিশালী অথচ অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করানো হয়। এই অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়, (চিত্র 6.10 (ক)) চিত্রে প্রদর্শিত বিশেষ আকারের *MM* চুম্বক দ্বারা। এই চুম্বকটির একটি মেরু হচ্ছে ক্ষুরধার আকৃতির (knife edge shaped) এবং অপরটি একটি সরু খাত কাটা (grooved) সমতল রেলের মত (চিত্র 6.10 (খ) (গ)। ক্ষুরধারের থেকে নির্গত চৌম্বক বলরেখাগুলি অত্যন্ত ঘন সন্নিবিষ্ট হওয়ার ফলে বিষমমাত্রিকতা বা অসমত্বতা অত্যন্ত উচ্চ হয় এবং পারমাণবিক দৈর্ঘ্যের মধ্যেই $(\sim 10^{-10}m)$ এই চৌম্বক ক্ষেত্রের মানের যথেষ্ট পরিবর্তন ঘটে। ফলে পারমাণবিক চুম্বকগুলির উপর যথেষ্ট পরিমাণে ক্ষেত্রাভিমুখী বল ক্রিয়া করে। চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে নির্গত হবার পর পারমাণবিক চুম্বকগুলি—অর্থাৎ পারমাণবিক রশ্মিগুচ্ছ একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেট *P*-এর উপর আপতিত হয়। গোটা পরীক্ষা ব্যবস্থাটাই একটি শূন্য প্রকোষ্ঠে (evacuated chamber) স্থাপন করা হয়।

চিত্র 6.10 : (ক)

চিত্র 6.10 : (খ)

চিত্র 6.10 : (ঘ)

চিত্র 6.10 : (গ)

স্টার্ন-গের্লাখের পরীক্ষা।

চৌম্বক ক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে রূপার রশ্মিগুচ্ছ সরাসরি অবিচ্যুত পথে P প্লেটের উপর আপতিত হয় এবং একটি সরু অবিচ্ছিন্ন রেখা পাওয়া যায় (চিত্র 6.10 (খ))। কিন্তু অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করলে প্রতিটি পরমাণুর উপর 6.22 সমীকরণ অনুসারে একটি বল ক্ষেত্রাভিমুখে কাজ করবে। এর ফলে পারমাণবিক চুম্বকগুলি ক্ষেত্র থেকে নির্গত হবার পর P প্লেটের উপর অক্ষীয় বিন্দু থেকে অল্প দূরত্বে আপতিত হয়। যেহেতু এক্ষেত্রে $m_j = \pm\frac{1}{2}$, সেইহেতু বিচ্যুত রশ্মিগুচ্ছ দুইভাগে বিভক্ত হয়ে P-র উপর দুটি বিভিন্ন বিন্দুতে আপতিত হয়। বিভিন্ন পরমাণুর বিভিন্ন গতিবেগের জন্য P-এর উপর দুটি বিন্দুর বদলে রেখা উৎপন্ন হয় এবং একটি উপবৃত্তের মত দেখায় (চিত্র 6.10 (ঘ))। দুটিদাগের মধ্যবর্তী দূরত্ব মেপে চৌম্বক ভ্রামকের মান নির্ণয় করা যায়।

পরীক্ষালব্ধ dB/dx, L, v এবং α-এর মানগুলি জেনে আমরা μ-এর মান নির্ণয় করতে পারি। গণনা করে দেখা গেছে যে, প্রতিটি রূপার পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামকের মান হচ্ছে প্রযুক্ত ক্ষেত্রাভিমুখে এক বোর ম্যাগনেটনের $\left(\mu_B = \frac{eh}{2m}\right)$ সমান (1 Bohr magneton in the direction of the applied field)।

Li, Na, K প্রভৃতি ক্ষার ধাতু এবং *Cu, Au* ইত্যাদি ধাতুর ক্ষেত্রে একইরকম ফলাফল পাওয়া যায়। এদের সকলের ক্ষেত্রেই $l = 0$, ফলে $j = s$ এবং $\mu_j = \mu_s$। সুতরাং প্রমাণিত হল যে পরমাণুর ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতি ব্যতিরেকে একটি ঘূর্ণন গতি আছে যার কোয়ান্টাম সংখ্যার মান হতে পারে $+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$। এভাবেই স্টার্ন এবং গের্লাখ ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতির প্রমাণ পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণ করেন।

6.10 সারাংশ (Summary)

চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একটি বর্ণালীরেখার তিন বা ততোধিক রেখায় বিভাজিত হয়ে যাবার যে ক্রিয়া তাকেই বলে জীমান ক্রিয়া। যদি তিনটি উপাংশে ভাগ হয় তাহলে সেটি স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া এবং তিনের বেশি হলে সেটি অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া। লক্ষ্যণীয় এই যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া পরিলক্ষিত হয় খুব অল্প ক্ষেত্রেই—বেশিরভাগ ক্ষেত্রেই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া দেখা যায়।

সনাতন পদার্থবিদ্যার লোরেঞ্জ তত্ত্বের সাহায্যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায়। আবার কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুসারেও স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া সুন্দরভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। এক্ষেত্রে স্থান কোয়ান্টায়নের ধারণাকে প্রয়োগ করা হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে বিভাজিত বর্ণালীরেখার বিভিন্ন উপশক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণগুলি $\Delta m_l = 0, \pm 1$ নির্বাচন সূত্র দ্বারা অনুমোদিত হয়।

অন্যদিকে অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া, যেটি অবশ্য বাস্তবে অধিক পরিমাণে ঘটতে দেখা যায়, সনাতন পদার্থবিদ্যার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয় না। কোয়ান্টাম তত্ত্বের স্থান কোয়ান্টায়নের অধিকন্তু ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের ধারণাকে প্রয়োগ করে এই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়। বিভাজিত উপশক্তিস্তরগুলির মধ্যে অনুমোদিত সংক্রমণগুলি $\Delta m_j = 0, \pm 1$ নির্বাচন সূত্র দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হয়। এই

অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায় বহু সংখ্যক উপাংশ উৎপন্ন হয় এবং কেবলমাত্র সমবর্তন ধর্ম পর্যবেক্ষণ করেই এই উপাংশগুলি সঠিকভাবে চিহ্নিত করা যায়।

সর্বশেষে এই এককটিতে স্টার্ন এবং গের্লাখের পরীক্ষাটি বর্ণনা করা হয়েছে। দেখানো হয়েছে যে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যার মান $+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$ হলে পরীক্ষালব্ধ ফলাফল সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। অর্থাৎ ইলেকট্রনের ঘূর্ণন হয় এবং ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যার মান $\pm\frac{1}{2}$।

6.11 অনুশীলনী (Exercises)

1. একটি বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্র 0·05 nm পার্থক্যের বর্ণালীরেখাগুলিকে 500 nm অবস্থানে বিশ্লেষণ করতে পারে। ঐ যন্ত্রে সাধারণ জীমান ক্রিয়া পর্যবেক্ষণ করতে হলে ন্যূনতম কত চৌম্বক প্রবাহ ঘনত্ব প্রয়োজন হবে? প্রয়োজনীয় রাশিগুলির প্রচলিত মান ব্যবহার করুন।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে জীমান স্থানান্তর (shift)

$\delta\lambda = \frac{Be\lambda^2}{4\pi mc}$, যেখানে

B = চৌম্বক প্রবাহ ঘনত্ব

e = ইলেকট্রনের আধান $= 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$C

λ = তরঙ্গদৈর্ঘ্য $= 500$ nm

$\delta\lambda$ = জীমান স্থানান্তর $= 0{\cdot}05$ nm

m = ইলেকট্রনের ভর $= 9{\cdot}1 \times 10^{-31}$ kg

c = আলোর বেগ $= 3 \times 10^8$ m/s

এখন,

$$B = \frac{4\pi\, mc}{e\lambda^2}\delta\lambda$$

$$= \frac{4\pi \times 9{\cdot}1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8}{1{\cdot}6 \times 10^{-19} \times (500 \times 10^{-9})^2} \times 0{\cdot}05 \times 10^{-9}$$

$$= \frac{4\pi \times 9{\cdot}1 \times 3 \times 5}{1{\cdot}6 \times 25} \times 10^{-1}$$

$$= 4{\cdot}288 \text{ Tesla}$$

সুতরাং ওই যন্ত্রে সাধারণ জীমান ক্রিয়া পর্যবেক্ষণ করতে হলে ন্যূনতম 4·288T চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করতে হবে।

2. 0·8T চৌম্বক ক্ষেত্রে 500 nm তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি বর্ণালীরেখার সাধারণ জীমান স্থানান্তর (shift) কত হবে হিসাব করুন যদি $e/m = 1{\cdot}758 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$ হয়।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে জীমান স্থানান্তর—

$$\delta\lambda = \frac{Be\lambda^2}{4\pi mc} = \frac{B\lambda^2}{4\lambda c}\left(\frac{e}{m}\right)$$

$$= \frac{0\cdot 8\times(500\times 10^{-9})^2}{4\pi\times 3\times 10^8}\times 1\cdot 758\times 10^{11}$$

$$= 9{\cdot}326 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

$$= 0{\cdot}0093\ \text{nm}$$

সুতরাং জীমান স্থানান্তরের মান 0·0093 nm।

3. পারদ বাষ্পের জীমান পরীক্ষায় প্রাপ্ত $d\lambda/\lambda^2$-এর মান $204m^{-1}$। পরীক্ষায় ব্যবহৃত চৌম্বক ক্ষেত্রের মান 4·246 T হলে e/m-এর মান নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে,

$$\delta\lambda = \frac{Be\lambda^2}{4\pi mc}$$

বা, $$\frac{e}{m} = \frac{4\pi c}{B}\cdot\frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

$$= \frac{4\pi\times 3\times 10^8}{4\cdot 246}\times 204$$

$$= 1{\cdot}811 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$$

সুতরাং e/m-এর নির্ণেয় মান $1{\cdot}811 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$।

4. স্টার্ন ও গের্লাখের পরীক্ষায় $60Tm^{-1}$ নতিমাত্রা (gradient) যুক্ত অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে রূপার পরমাণুগুলি ক্ষেত্রের মধ্যে 0·1m ভ্রমণ করে। সংগ্রাহক প্লেটের উপর উৎপন্ন দাগ (trace) দুটির মধ্যে পার্থক্য 15×10^{-5}m হলে রূপার পরমাণুগুলির বেগ নির্ণয় করুন। ধরে নিন যে রূপার পরমাণুর ভর = $1{\cdot}8 \times 10^{-25}$ kg এবং বোর ম্যাগনেটন = $9{\cdot}2 \times 10^{-24}\ JT^{-1}$।

সমাধান ঃ আমরা জানি যে রূপা এককযোজী (monovalent) মৌল। সুতরাং চৌম্বক ভ্রামক উৎপন্ন হয় তার সর্ববহিস্থ কক্ষপথে পরিভ্রমণরত একটিমাত্র ইলেকট্রন থেকে। সেইজন্য রূপা পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামকের মান বোর ম্যাগনেটনের সাথে সমান।

এখন, অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি রূপা পরমাণুর উপর প্রযুক্ত বল

= চৌম্বক ভ্রামক × চৌম্বক ক্ষেত্রের নতিমাত্রা

$= 9{\cdot}2 \times 10^{-24} \times 60\ Jm^{-1}$

সুতরাং ওই পরমাণুর ত্বরণ, α = বল/ভর

বা, $\alpha = 9{\cdot}2 \times 60 \times 10^{-24} / 1{\cdot}8 \times 10^{-25}$

$= 3{\cdot}066 \times 10^{3}\ ms^{-2}$

ক্ষেত্রের মধ্যে পরমাণুটির সরণ d = 0·1m। যদি এর বেগ v হয় এবং t সময়ে উপরোক্ত পরমাণুটি প্লেটে গিয়ে পৌঁছয়, তাহলে $t = 0{\cdot}1/\ vS$।

সুতরাং ক্ষেত্রের অভিমুখে পরমাণুটির সরণ $= \frac{1}{2}\alpha t^2$

$$= \frac{1}{2}(3\cdot066\times10^{3})\times(0\cdot1/v)^2$$

অতএব দাগ দুটির মধ্যেকার দূরত্ব বা পার্থক্য (separation)

$$= 2\times\frac{1}{2}(3\cdot066\times10^{3})\times(0\cdot1/v)^2$$

কিন্তু প্রশ্নানুসারে এই পার্থক্য $15 \times 10^{-5}\ m$।

$\therefore\ (3{\cdot}066 \times 10^{3}) \times (0{\cdot}1/v)^2 = 15 \times 10^{-5}$

বা, $v^2 = \dfrac{3\cdot066\times10^{3}\times10^{-2}}{15\times10^{-5}}$

বা, $v^2 = 20{\cdot}44 \times 10^{4}$

বা, $v = 4{\cdot}52 \times 10^{2} ms^{-1}$

সুতরাং রূপা পরমাণুগুলির নির্ণেয় বেগ হল 452 ms^{-1}।

6.12 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. স্বাভাবিক এবং অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার মিল এবং অমিল কী কী?
2. লোরেঞ্জের তত্ত্ব থেকে প্রমাণ করুন যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায় বর্ণালীরেখার কম্পাঙ্কের পরিবর্তনের মান $\pm Be/4\pi m$, যেখানে সঙ্কেতগুলি প্রচলিত অর্থে ব্যবহৃত হয়েছে।
3. কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করার জন্য ইলেকট্রনের কৌণিক গতির উপর কী শর্ত আরোপ করা হয়েছে? এই প্রসঙ্গে স্থান কোয়ান্টায়ন চিত্রসহ ব্যাখ্যা করুন।

4. কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করুন।

5. অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করার জন্য ইলেকট্রনের উপর কোন্ ধর্ম আরোপ করার প্রয়োজন হয়ে পড়ল? এই ধর্মটি প্রতিষ্ঠা এবং প্রমাণ করার জন্য একটি পরীক্ষা ব্যবস্থার চিত্রসহ বর্ণনা দিন এবং সংক্ষেপে তার ফলাফল আলোচনা করুন।

6. অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার কোয়ান্টাম তত্ত্বীয় ব্যাখ্যাটি চিত্রসহ আলোচনা করুন।

7. বোর ম্যাগনেটনের মান যদি $9{\cdot}2 \times 10^{-24}\ JT^{-1}$ হয়, তাহলে ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান (specific charge) নির্ণয় করুন। (উত্তর : $1{\cdot}75 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$)

8. স্টার্ন ও গের্লাখের একটি পরীক্ষায় রূপা পরমাণুগুলি $55Tm^{-1}$ নতিমাত্রা যুক্ত অসমসত্ত্ব চৌম্বক ক্ষেত্রে $0{\cdot}1m$ দূরত্ব অতিক্রম করে। যদি পরমাণুগুলির গতিবেগ $450\ ms^{-1}$ হয় তাহলে সংগ্রাহক প্লেটের উপর উৎপন্ন দাগদুটির মধ্যে দূরত্ব কত হবে? ধরে নিন বোর ম্যাগনেটন $= 9{\cdot}2 \times 10^{-24}\ JT^{-1}$। (উত্তর : $1{\cdot}4 \times 10^{-4}$m)

9. $1T$ চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি 500 nm বর্ণালীরেখার জীমান উপাংশগুলি $0{\cdot}012\ nm$ দূরত্বে দেখা যায়। এর থেকে ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান নির্ণয় করুন। (উত্তর : $1{\cdot}81 \times 10^{11}\ Ckg^{-1}$)

10. একটি $500\ nm$ বর্ণালীরেখা $1{\cdot}1 \times 10^{-4}\ nm$ সাধারণ জীমান বিভাজন দেখায়। প্রয়োজনীয় চৌম্বক ক্ষেত্রের মান নির্ণয় করুন। (উঃ $0{\cdot}00942\ T$)

একক 7 ❑ আণবিক বর্ণালী এবং রামন বিক্ষেপ

গঠন

7.1 প্রস্তাবনা

7.2 উদ্দেশ্য

7.3 পটি বর্ণালীর উৎপত্তি

7.4 বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী

→ 7.4.1 বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর গুরুত্ব

7.5 দ্বিপরমাণুক অণুর শক্তি এবং স্পন্দন বর্ণালী

7.6 দ্বিপরমাণুক স্পন্দনশীল আবর্তক

7.7 রামন ক্রিয়া

→ 7.7.1 রামন বর্ণালীর বৈশিষ্ট্য

→ 7.7.2 রামন ক্রিয়ার কোয়ান্টাম তত্ত্ব

→ 7.7.3 রামন ক্রিয়া এবং প্রতিপ্রভা

→ 7.7.4 রামন ক্রিয়া ও র‍্যালে বিক্ষেপণ

→ 7.7.5 রামন ক্রিয়ার ব্যবহারিক প্রয়োগ

7.8 অণুতরঙ্গ উনুন

7.9 অনুশীলনী

7.10 সারাংশ

7.11 প্রশ্নাবলি

7.1 প্রস্তাবনা (Introduction)

পূর্ববর্তী এককগুলিতে আমরা রেখা বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ নিয়ে আলোচনা করেছি। আমরা জেনেছি যে মৌলের পরমাণুগুলিই রেখা বর্ণালী উৎপন্ন করে। এই রেখা বর্ণালীর ব্যাখ্যা করার জন্য পরমাণুর বিভিন্ন ধরনের প্রতিরূপের প্রস্তাব করা হয় এবং অবশেষে বোর-সমারফেল্ড প্রতিরূপ এবং কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাহায্যে রেখাবর্ণালীর উৎপত্তির গ্রহণযোগ্য সমাধান সম্ভব হয়। বাইরে থেকে প্রযুক্ত চৌম্বক বা বৈদ্যুতিক

ক্ষেত্র এই রেখা বর্ণালীকে প্রভাবিত করতে পারে এবং কোনো কোনো ক্ষেত্রে বহু সংখ্যক বিভাজন তৈরি করতে পারে। কিন্তু তড়িৎ মোক্ষণ নল থেকে নির্গত আলো আর এক ধরনের বর্ণালী উৎপন্ন করে যেগুলো কতকগুলি পৃথক পৃথক বা অবচ্ছিন্ন (discrete) আলোর 'পটি'র (band of light) সমষ্টি। এই ধরনের বর্ণালীকে পটি বর্ণালী (band spectrum) বলে এবং এগুলির উৎস হল মৌল বা যৌগের (elements or compounds) অণুগুলি। অর্থাৎ পরমাণু রেখাবর্ণালী উৎপন্ন করে কিন্তু পটি বর্ণালী সৃষ্টি হয় একাধিক পরমাণুর সমন্বয়ে গঠিত অণু দ্বারা। সুতরাং পটি বর্ণালীগুলি প্রকৃতপক্ষে আণবিক বর্ণালী (molecular spectrum)।

7.2 উদ্দেশ্য (Objective)

- এই এককটি পড়লে আপনি জানতে পারবেন—
- আণবিক বর্ণালী কাকে বলে।
- আণবিক বর্ণালীর উৎপত্তি এবং গুরুত্ব।
- বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর শক্তিস্তর।
- দ্বি-পারমানুক অণুর শক্তি এবং স্পন্দন বর্ণালী উৎপত্তি।
- দ্বি-পারমানুক স্পন্দনশীল আবর্তকের শক্তি।
- রামন বর্ণালীর আবিষ্কার এবং ব্যাখ্যা।
- অণুতরঙ্গ উনুন কীভাবে কাজ করে।

7.3 পটি বর্ণালীর উৎপত্তি (Origin of band spectrum)

পটি বর্ণালীর উৎপত্তি হয় পদার্থের অণু থেকে। আমাদের পরিচিত সহজতম দ্বি-পরমাণুক (diatomic) কয়েকটি অণু হল H_2, N_2, O_2, HCl, NaCl প্রভৃতি। এই অণুগুলির পরমাণুদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব নির্দিষ্ট এবং গঠন ডাম্‌বেলের (dumb-bell) মতো। পরমাণুদ্বয়ের মধ্যে একটি আকর্ষণ বল কাজ করে তাদের অণুর মধ্যে আবদ্ধ রাখে। পরমাণুগুলির সর্ববহিস্থ কক্ষের ইলেকট্রনগুলি সমবেতভাবে আণবিক ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তর (E_e) তৈরি করে এবং তাদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্ট মানের পটি বর্ণালী উৎপন্ন হয়। এছাড়া ডাম্‌বেলের অক্ষ বরাবর পরমাণুদ্বয় সরল সমঞ্জসভাবে (simple harmonically) স্পন্দিত হতে পারে। এর ফলে অণুটির কিছু পরিমাণ স্পন্দনশক্তি (vibrational energy) E_v তৈরি হয়। সবশেষে, অণুটি তার ডাম্‌বেলের অক্ষের চারপাশে ঘুরতে পারে ফলে একটি আবর্তন শক্তি (rotational energy) E_r সৃষ্টি হয়। সুতরাং আণবিক শক্তিস্তরের মোট শক্তি

$$E = E_e + E_v + E_r \qquad \text{..... 7.1}$$

এই প্রসঙ্গে মনে রাখা দরকার যে সাধারণত ইলেকট্রনীয় শক্তি (E_e) ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্রিক (of the order of electron-volt) হয়। তার তুলনায় স্পন্দন শক্তি (E_v) অনেক কম হয় এবং এই স্পন্দন

শক্তির তুলনায় আবর্তন শক্তি (E_r) অপেক্ষাকৃত আরও কম হয়। উল্লেখযোগ্য যে, E_e, E_v এবং E_r প্রত্যেকটিই কোয়ান্টায়িত। গাণিতিকভাবে,

$$E_e >> E_v >> E_r.$$

কোনো অণুর দুটি শক্তিস্তরের মান যদি E_1 এবং E_2 হয়, তাহলে স্তরদুটির মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত ফোটনের শক্তি হবে

$$h\nu = E_2 - E_1 \qquad \text{..... 7.2}$$

উপরোক্ত সমীকরণগুলির সাহায্যে বিভিন্ন প্রকার আণবিক বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ ব্যাখ্যা করা যায়। এই প্রসঙ্গে আমরা দেখব যে—

(ক) ইলেকট্রনীয় শক্তি (E_e)-র উৎস হল অণুর মধ্যে ইলেকট্রন বণ্টনের পরিবর্তন।

(খ) স্পন্দন শক্তি (E_v)-র উৎস হল অণুর পরমাণুগুলির কেন্দ্রক সংযোজী বন্ধনীর (bond) সঙ্কোচন ও প্রসারণ।

(গ) আবর্তন শক্তি (E_r)-র উৎস হল সংযোজী বন্ধনীর অভিলম্বে এবং ভরকেন্দ্রগামী অক্ষের সাপেক্ষে অণুটির ঘূর্ণনের পরিবর্তন।

7.4 বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী (Pure rotational spectrum)

মনে করা যাক একটি দ্বিপরমাণুক অণুর পরমাণুদ্বয় একটি সুদৃঢ় দণ্ড (rigid rod) দ্বারা সংযুক্ত। ফলে অণুটির কোনো স্পন্দন গতি থাকবে না। অর্থাৎ $E_v = 0$। এখন যদি ওই দণ্ডের অভিলম্বভাবে ভরকেন্দ্রগামী কোনো অক্ষকে বেষ্টন করে অণুটি আবর্তিত হতে থাকে তাহলে তাকে দৃঢ় আবর্তক (rigid rotator) ভাবা যায়। প্রসঙ্গত মনে রাখতে হবে যে অণুটির ইলেকট্রনীয় শক্তি (E_e) নির্দিষ্ট থাকলে এরকম ক্ষেত্রে কেবলমাত্র আবর্তন শক্তির (E_r) পরিবর্তনের ফলে অণুটির মোট শক্তির পরিবর্তন হতে পারে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে E_e = ধ্রুবক, E_v = ধ্রুবক = 0 এবং $\Delta E = \Delta E_r$।

ধরা যাক, পরমাণু দুটির ভর m_1 ও m_2 এবং তাদের কেন্দ্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব r, চিত্র 7.1। অণুর ভরকেন্দ্র থেকে এদের দূরত্ব যথাক্রমে r_1 ও r_2। তাহলে বলবিদ্যার নিয়ম অনুযায়ী (তৃতীয় এককটি মনে করুন)

$$m_1 r_1 = m_2 r_2 \text{ এবং } r = r_1 + r_2$$

এর থেকে আমরা পাই,

$$r_1 = \frac{m_2 r}{m_1 + m_2} \text{ এবং } r_2 = \frac{m_1 r}{m_1 + m_2}$$

সুতরাং ভরকেন্দ্রগামী কোনো অক্ষের সাপেক্ষে অণুটির জড়তা ভ্রামক (moment of inertia) হয়

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2$$

$$= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} r^2$$

$$= \mu r^2 \qquad \text{..... 7.3}$$

এখানে μ হচ্ছে অণুটির পরিমিত ভর (reduced mass) যার মান হল

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

অণুটির কৌণিক বেগ ω হলে তার কৌণিক ভরবেগ (p) এবং আবর্তন গতিশক্তি (E_r) হবে যথাক্রমে $p = I\omega$ এবং $E_r = \frac{1}{2} I\omega^2$

তৃতীয় এককে আলোচিত বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী কৌণিক ভরবেগ কোয়ান্টায়িত। অতএব

$$p = I\omega = J \cdot \frac{h}{2\pi} = J\hbar$$

যেখানে J হচ্ছে আবর্তন কোয়ান্টাম সংখ্যা (rotational quantum number) এবং এর সম্ভাব্য মানগুলি হচ্ছে $J = 0, 1, 2, 3$ ইত্যাদি।

সুতরাং অণুটির আবর্তন শক্তি হচ্ছে.

$$E_r = \frac{1}{2} I\omega^2$$

$$= \frac{1}{2} I \left(\frac{J\hbar}{I}\right)^2$$

$$= \frac{J^2\hbar^2}{2I} \qquad \text{.....7.4}$$

চিত্র 7.1

আলোকের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে কেবলমাত্র সমেরু (polar) অণুগুলির আবর্তন গতির জন্যই বিকিরণ নিঃসৃত হতে পারে। HF, HCl ইত্যাদি যেসব অণুগুলির ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধানকেন্দ্রদ্বয় পরস্পর থেকে দূরে (separated) থাকে তাদেরই স্থায়ী বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু ভ্রামক (electric dipole moment) সৃষ্টি হয় এবং এরাই সমেরু অণু। এই সমেরু অণুগুলির আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে $\Delta J = \pm 1$ নির্বাচন সূত্রানুযায়ী সংক্রমণ হয়ে আবর্তন বর্ণালী উৎপন্ন হয়। আরেক ধরনের অণু যাদের ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানকেন্দ্রদ্বয় সমাপতিত (coincident) থাকে তাদের স্থায়ী বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে না। N_2, H_2, O_2 প্রভৃতি এই ধরনের অণু এবং এদের মেরুহীন (non-polar) অণু বলা হয়। সেইজন্য এই অণুগুলির বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী হতে পারে না। একই কারণে CO_2, CH_4 প্রভৃতি বহুপরমানুক প্রতিসম (symmetric) অণুরও আবর্তন বর্ণালী উৎপন্ন হতে পারে না।

আমরা ইতিপূর্বে চতুর্থ এককে উল্লেখ করেছি যে পুরাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বে যে J^2 ব্যবহার করা হয়েছে পরবর্তীকালে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় তার বদলে $J(J+1)$ লেখা হয় এবং তার ফলে আমরা শ্রোয়েডিঙ্গার সমীকরণের সাহায্যে লিখতে পারি,

$$E_J = \frac{J(J+1)\hbar^2}{2I} \text{ Joules} \qquad \text{..... 7.5}$$

সমীকরণ 7.5 থেকে আমরা দেখতে পাচ্ছি যে আবর্তন কোয়ান্টাম সংখ্যা J-এর বিভিন্ন সম্ভাব্য মানের জন্য অণুটির আবর্তন শক্তির বিভিন্ন অবচ্ছিন্ন (discrete) মান থাকবে।

চিত্র 7.2-এ একটি অণুর বিশুদ্ধ আবর্তনজনিত শক্তিস্তরগুলিকে (pure rotational energy levels) দেখানো হয়েছে। এক্ষেত্রে লক্ষণীয় যে J-এর মান বাড়ার সাথে সাথে $J(J+1)$-এর মান দ্রুত হারে বাড়তে থাকে এবং উচ্চতর J-এর জন্য শক্তিস্তরগুলির মধ্যে শক্তি মানের পার্থক্যও দ্রুত বাড়তে থাকে। এইরকম যে-কোনো দুটি আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী (pure rotational spectrum) সৃষ্টি হয়, নির্বাচন সূত্র (selection rule) দ্বারা সংক্রমণটি অনুমোদিত (allowed) হলে। এই ধরনের আণবিক বর্ণালীর ক্ষেত্রেও পারমাণবিক বর্ণালীর মতো জুল এককে প্রকাশিত বিভিন্ন শক্তিস্তরের শক্তিকে hc দ্বারা ভাগ করে পদমান (term value) নির্ণয় করা হয়। দুটি পদমানের অন্তরফলের সমান হবে ওই দুই শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণজনিত নিঃসৃত বর্ণালীরেখার তরঙ্গসংখ্যা। দুটি শক্তিস্তরের জুল এককে শক্তি পার্থক্য ΔE হলে

$$\Delta E = h\nu$$

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} Hz$$

$$\bar{\nu} = \frac{\Delta E}{hc} cm^{-1}$$

শক্তিস্তরের পদমানগুলিকে এইভাবে লেখা যায়,

$$E(J) = BJ(J+1) \qquad \text{..... 7.6}$$

যেখানে $B = \frac{\hbar^2}{2I}$ Joule

$$= \frac{\hbar}{4\pi I c} \text{cm}^{-1} = \frac{\hbar}{8\pi^2 I c} \text{cm}^{-1}$$

কারণ, 1 Joule = $(hc)^{-1}$ cm^{-1}।

এই B-কে বলা হয় আবর্তন ধ্রুবক (rotational constant)।

দুটি আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণ অনুমোদিত হয় এই নির্বাচন সূত্র (selection rule) দ্বারা

$$\Delta J = \pm 1 \qquad \text{..... 7.7}$$

স্বাভাবিকভাবেই বোঝা যায় যে নিঃসরণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে $\Delta J = -1$ এবং শোষণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে $\Delta J = +1$ হবে। সাধারণভাবে লেখা যায়,

$$\bar{\nu}_{J \to J+1} = B(J+1)(J+2) - BJ\,(J+1)$$
$$= 2B\,(J+1)\ \text{cm}^{-1} \qquad \text{..... 7.8}$$

চিত্র 7.2 : একটি দৃঢ় দ্বিপরমাণুক অণুর বিশুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরগুলি এবং তাদের শক্তির মান।

অন্যান্য বিকিরণ বা শোষণ বর্ণালীর মতো পরপর দুটি বিশুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে বর্ণালীর কম্পাঙ্ক গণনা করা হবে এইভাবে—

$$E_{J_1} = \frac{J(J+1)\hbar^2}{2I}$$

$$E_{J_2} = \frac{(J+1)(J+2)\hbar^2}{2I}$$

$$h\nu = E_{J_2} - E_{J_1}$$

বা, $$\nu = \frac{E_{J_2} - E_{J_1}}{h}$$

$$= \frac{\hbar^2}{h2I}\left[(J+1)(J+2) - J(J+1)\right]$$

$$= \frac{\hbar}{4\pi I}\left[2(J+1)\right]$$

$$= \frac{\hbar}{2\pi I}(J+1) \qquad \text{..... 7.9}$$

এবং আনুষঙ্গিক তরঙ্গসংখ্যা (wave number) হবে,

$$\bar{\nu} = \frac{\hbar}{2\pi Ic}(J+1) = 2B(J+1) \qquad \text{..... 7.9a}$$

সমীকরণ 7.9a থেকে দেখা যাচ্ছে যে বিভিন্ন বিশুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে নির্বাচন সূত্র দ্বারা অনুমোদিত সংক্রমণের ফলে বহুসংখ্যক সমব্যবধান ($\Delta\bar{\nu} = 2B$) সম্পন্ন (equi spaced) বর্ণালীরেখা সৃষ্টি হয়। একত্রে এদের 'বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী' বলে। চিত্র 7.3-এ এরকম একটি তাত্ত্বিক বর্ণালী দেখানো হল। প্রতিটি বর্ণালীরেখা তার পার্শ্ববর্তী রেখা থেকে $2B$ cm^{-1} দূরত্বে অবস্থিত। পরীক্ষা থেকে দেখা গেছে যে

চিত্র 7.3

সাধারণ দ্বিমেরু অণুগুলির আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে পার্থক্য বা দূরত্ব প্রায় 1–100 cm^{-1}-এর মধ্যে হয়। চিত্র 7.4-এ একটা পরীক্ষালব্ধ শোষণ বর্ণালী দেখানো হল। পাশাপাশি দুটি শোষণ চূড়ার মধ্যে পার্থক্য

$2B = 40\ cm^{-1}$ (প্রায়) বা $B = 20\ cm^{-1}$। যে চূড়াটির $\bar{\nu} = 200\ cm^{-1}$, তার তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = 1/\bar{\nu}$ $= 50 \times 10^{-6}$ m যা কিনা দূর অবলোহিত (far infra-red) অঞ্চলে অবস্থিত। যদিও তাত্ত্বিকভাবে শোষণ এবং বিকিরণ উভয় বর্ণালীতেই আবর্তন বর্ণালীরেখা দেখতে পাওয়া উচিত, বাস্তবে শোষণ বর্ণালীতেই এর উপস্থিতি বিশেষভাবে লক্ষ্য করা যায়।

চিত্র 7.4

7.4.1 বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর গুরুত্ব (Importance of the pure rotational spectrum)

দ্বিপরমাণুক অণুর বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর পরপর দুটি বর্ণালীরেখার মধ্যে কম্পাঙ্ক পার্থক্য ($\Delta\nu$) আমরা লিখতে পারি এইভাবে ঃ

$$\Delta\nu = \nu_{J+1 \to J+2} - \nu_{J \to J+1}$$

$$= \frac{h}{2\pi I} = \frac{h}{4\pi^2 I}$$

তরঙ্গসংখ্যা পার্থক্য হল $\Delta\bar{\nu} = \dfrac{h}{4\pi^2 Ic}$

পরীক্ষালব্ধ বর্ণালী থেকে আমরা $\Delta\nu$ মাপতে পারি। ফলে অণুটির জড়তা ভ্রামক (moment of inertia) I-এর মান পাওয়া যায়। আবার

$$I = \mu r^2$$

$$= \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right) r^2 \qquad \text{..... 7.10}$$

বা, $r = \sqrt{I/\mu}$

এই সমীকরণ থেকে পরমাণু দুটির নিউক্লিয়াসের মধ্যবর্তী দূরত্ব r নির্ণয় করা যায়। এর থেকে পরমাণু দুটির মধ্যে ক্রিয়ারত রাসায়নিক বন্ধনী বা সংযোগীর দৈর্ঘ্য (chemical bond length) পাওয়া যায়।

7.5 দ্বিপরমাণুক অণুর শক্তি এবং স্পন্দন বর্ণালী (Energy and vibration spectra of diatomic molecule)

পূর্ববর্তী অনুচ্ছেদে আলোচিত দৃঢ় আবর্তক (rigid rotator) প্রতিরূপটি সহজবোধ্য কারণেই একটি আদর্শায়িত (idealized) প্রতিরূপ (model)। প্রকৃতপক্ষে পরমাণু দুটি তাদের সংযোগী অক্ষ বরাবর স্পন্দিত হয়, যেন তারা একটি ভরহীন স্প্রিং দিয়ে যুক্ত। ফলে পরমাণু দুটির মধ্যে দূরত্ব পরিবর্তিত হয় সরল সমঞ্জসভাবে (simple harmonically) একটি গড় মানের সাপেক্ষে। সুতরাং একটি বাস্তব দ্বিপরমাণুক অণুর ক্ষেত্রে কেবলমাত্র আবর্তন নয়, যুগপত স্পন্দনও যথেষ্ট ভূমিকা পালন করে আণবিক বর্ণালী গঠনের ক্ষেত্রে।

আমরা জানি যে দুটি পরমাণু একত্রে যখন একটি অণু গঠন করে, যেমন—HCl অণু, তখন তাদের অভ্যন্তরীণ ইলেকট্রনীয় পুনর্গঠন হয়। এমতাবস্থায় জটিল আলোচনায় না গিয়েও আমরা সমস্যাটিকে আধানগুলির মধ্যে ক্রিয়ারত বলসমূহের ভারসাম্যের ঘটনা বলে ভাবতে পারি। প্রকৃতপক্ষে উভয় পরমাণুর ধনাত্মক নিউক্লিয়াসের মধ্যে বিকর্ষণ, তাদের ইলেকট্রন মেঘের (electron cloud) মধ্যে বিকর্ষণ ; একটি পরমাণুর নিউক্লিয়াস দ্বারা অপর পরমাণুর ইলেকট্রনকে আকর্ষণ এবং তার বিপরীতক্রম (vice-versa) অবশ্যই বিবেচনাযোগ্য। এই বলসমূহের মধ্যে ভারসাম্য বজায় রাখা এবং অণুটির ন্যূনতম শক্তি অবস্থা (state of minimum energy) সৃষ্টি করার জন্য যে গড় দূরত্বে পরমাণু দুটির অবস্থান করার প্রয়োজন তারা সেই

চিত্র 7.5

দূরত্বেই নিজেদের স্থাপন করে। এই আণবিক সংযোজী (বা বন্ধন) দূরত্ব (বা দৈর্ঘ্য) (bond length) পরিবর্তন করার জন্য শক্তি প্রয়োজন এবং আমরা চিত্র 7.5 থেকে দেখতে পারি যে আন্তঃ-নিউক্লিয়ার দূরত্বের (internuclear distance) সঙ্গে এই শক্তি কীভাবে পরিবর্তিত হয়। এই ন্যূনতম স্থিতি শক্তি অবস্থার

আনুষঙ্গিক আন্তঃ-নিউক্লিয়ার দূরত্বকেই সাম্য দূরত্ব, r_{eq}, বা এককথায় সংযোজী দৈর্ঘ্য বা বন্ধনী দূরত্ব (bond length) বলে। যখন আন্তঃ-নিউক্লিয়ার দূরত্ব $r < r_{eq}$ তখন তাদের স্থিতিশক্তি ধনাত্মক দিকে বাড়তে থাকে। অপরদিকে $r > r_{eq}$ হলে তাদের স্থিতিশক্তি ঋণাত্মক দিকে বাড়তে থাকে। একমাত্র $r = r_{eq}$ হলে স্থিতিশক্তি ন্যূনতম হয়। অর্থাৎ অণুটি যেন একটি বিভব কূপের (potential well) মধ্যে অবস্থান করে ; চিত্র 7.6।

এইরকম একটি আণবিক বন্ধন সরল সমঞ্জসভাবে (simple harmonically) প্রসারিত এবং সঙ্কুচিত (elongated and compressed) হতে পারে এবং তখন এটিকে একটি স্প্রিং-এর মতো ভাবা যেতে পারে যেটি হুকের (স্থিতিস্থাপকতার) সূত্র মেনে চলে। এক্ষেত্রে আমরা লিখতে পারি—

$$F = -k\,(r - r_{eq}) \qquad \text{..... 7.11}$$

যেখানে F হচ্ছে প্রত্যানয়নকারী (restoring) বল এবং k হচ্ছে বল ধ্রুবক (force constant)। অধিকন্তু, $k = \mu\omega_0^2 = 4\pi^2\mu\nu_0^2$, যেখানে ω_0 হচ্ছে কৌণিক বেগ এবং ν_0 কৌণিক কম্পাঙ্ক। এক্ষেত্রে শক্তি লেখচিত্রটি (energy curve) হবে অধিবৃত্তাকার (parabolic) এবং তার গাণিতিক রূপটি হচ্ছে

$$E = \frac{1}{2}k\left(r - r_{eq}\right)^2 \qquad \text{..... 7.12}$$

এই 7.12 সমীকরণটিরই চিত্ররূপ হচ্ছে চিত্র 7.5। এই লেখচিত্রের এবং সমীকরণের শূন্য হচ্ছে $r = r_{eq}$-তে। এই শক্তির বেশি যে-কোনো শক্তি, যেমন ε_2, উৎপন্ন হয় বন্ধনটির সঙ্কোচন বা প্রসারণের ফলে। চিত্র 7.5 থেকে বোঝা যাচ্ছে যে, যদি একটি পরমাণুকে (Cl) অপরটির (H) তুলনায় যথেষ্ট ভারী বলে ভাবা যায়, তাহলে Cl পরমাণুটিকে $r = 0$ অক্ষের ওপর স্থির বিবেচনা করা যায়। তখন দ্বিতীয় পরমাণুটি (H) সরল সমঞ্জসভাবে H' এবং H'' অবস্থান দুটির মধ্যে আন্দোলিত হতে থাকবে।

এই HCl অণুটির শক্তি বৃদ্ধি পেয়ে যদি ε_1 হয় তাহলে এই বন্ধনটির আন্দোলন (oscillation) আরও প্রচণ্ড (vigorous) হবে, কিন্তু আন্দোলন কম্পাঙ্ক (vibrational frequency) একই থাকবে। একটি আণবিক স্থিতিস্থাপক বন্ধনের, একটি স্প্রিং-এর মতো, একটি নির্দিষ্ট স্বকীয় (intrinsic) আন্দোলন কম্পাঙ্ক আছে যেটি তার ভর এবং বল ধ্রুবকের ওপর নির্ভরশীল, কিন্তু বিকৃতির মাত্রার ওপর নির্ভরশীল নয়। সনাতন পদার্থবিদ্যা অনুসারে এই আন্দোলন (বা স্পন্দন) কম্পাঙ্কের মান

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}}\,Hz \qquad \text{..... 7.13}$$

যেখানে μ হচ্ছে সংস্থাটির পরিমিত ভর (reduced mass)। তরঙ্গসংখ্যায় পরিবর্তন করে আমরা লিখতে পারি, $\bar{\nu}_0 = \frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{k}{\mu}}\,\text{cm}^{-1}$ 7.14

কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুযায়ী অন্যান্য সকল আণবিক শক্তির মতোই স্পন্দন শক্তিও কোয়ান্টায়িত। কোনো নির্দিষ্ট সংস্থার অনুমোদিত (allowed) স্পন্দন শক্তি স্তরগুলি শ্রোয়েডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান

করে গণনা করতে হয়। সরল সমঞ্জস স্পন্দকের (simple harmonic oscillator) এই স্পন্দন শক্তিস্তরগুলি লেখা যায় এইভাবে—

চিত্র 7.6

$$E_v = \left(v + \frac{1}{2}\right) h\nu_0 \text{ Joules} \qquad \text{..... 7.14}$$

এখানে v একটি পূর্ণসংখ্যা ; একে বলা হয় স্পন্দন কোয়ান্টাম সংখ্যা (vibrational quantum number) এবং এর সম্ভাব্য মান হচ্ছে v = 0, 1, 2, 3, 4, ... ইত্যাদি।

শ্রোয়েডিঙ্গার সমীকরণের প্রয়োগ করে আমরা দেখাতে পারি যে সরল সমঞ্জস স্পন্দকের ক্ষেত্রে স্পন্দন শক্তিস্তরের নির্বাচন সূত্রটি হল

$$\Delta v = \pm 1 \qquad \text{..... 7.15}$$

সমীকরণ 7.14-কে বর্ণালীবিদ্যার এককে (spectroscopic units), cm^{-1} লিখলে আমরা পাই,

$$\varepsilon_V = \frac{E_V}{hc} = \left(v + \frac{1}{2}\right)\bar{\nu}_0 \text{ cm}^{-1} \qquad \text{..... 7.16}$$

এরকম কয়েকটি অনুমোদিত স্পন্দন শক্তিস্তর চিত্র 7.7-এ দেখানো হল। এখানে বিশেষভাবে লক্ষণীয় যে ন্যূনতম স্পন্দন শক্তির মান কিন্তু শূন্য নয়। যখন $V = 0$ হয়, তখন

$$E_0 = \frac{1}{2} h\nu_0 \text{ Joules} \qquad \text{..... 7.17}$$

এবং $\varepsilon_0 = \frac{1}{2}\bar{\nu}_0 \text{ cm}^{-1}$

এই সমীকরণ 7.17-এর মর্মার্থ এই যে, কোনো দ্বিপরমাণুক অণু (এবং, প্রকৃতপক্ষে, যে-কোনো অণু) কখনই শূন্য স্পন্দনশক্তি যুক্ত হতে পারবে না। অর্থাৎ একটি পরমাণুর পরিপ্রেক্ষিতে অপরটি কখনই সম্পূর্ণ স্থিরাবস্থায় থাকতে পারে না। এই $\frac{1}{2} h\bar{\nu}_0$ Joules বা $\frac{1}{2}\nu_0 \text{ cm}^{-1}$ শক্তিকে বলা হয় শূন্যাঙ্ক শক্তি (Zero-point energy) এবং এই শক্তি নির্ভর করে পারমাণবিক ভর দুটির ওপর এবং সংযোজী বন্ধনের

শক্তির (strength) ওপর। এই শূন্যাঙ্ক শক্তির ভবিষ্যদ্‌বাণীই সনাতন পদার্থবিদ্যা এবং তরঙ্গ বলবিদ্যার (wave mechanics) পার্থক্য নির্দেশ করে আণবিক স্পন্দনের ক্ষেত্রে। সনাতন পদার্থবিদ্যায় স্পন্দন শক্তির ন্যূনতম মান শূন্য হওয়াতে কোনো বাধা নেই, কিন্তু তরঙ্গ বলবিদ্যায় অণুর ন্যূনতম স্পন্দন থাকা আবশ্যিক শর্ত। এই সিদ্ধান্তটি বহু পরীক্ষার ফলাফল দ্বারা সমর্থিত হয়েছে। মনে রাখতে হবে যে পর্যবেক্ষণযোগ্য (observable) স্পন্দন বর্ণালী তখনই উৎপন্ন হবে যখন স্পন্দনের ফলে অণুটির দ্বিমেরু ভ্রামকের পরিবর্তন হয়। অতএব স্পন্দন বর্ণালী কেবলমাত্র বিষম-কেন্দ্রকীয় (hetero-nuclear) দ্বিমেরু অণুর (যেমন—HCl, HF, HBr ইত্যাদি) ক্ষেত্রেই পর্যবেক্ষণ করা যাবে, কারণ সুষম-কেন্দ্রকীয় (homonuclear) অণুর (যেমন—N_2, H_2, O_2 প্রভৃতি) কোনো দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে না।

পূর্বে আলোচিত 7.15 সমীকরণ (নির্বাচন সূত্র) প্রয়োগ করে আমরা লিখতে পারি ঃ

বিকিরণের ক্ষেত্রে

$$\epsilon_{V+1\to V} = \left(v+1+\frac{1}{2}\right)\bar{\nu}_0 - \left(v+\frac{1}{2}\right)\bar{\nu}_0$$
$$= \bar{\nu}_0 \text{ cm}^{-1}$$

চিত্র 7.7

শোষণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে

$$\varepsilon_{v \to v+1} = \bar{\nu}_0 \text{ cm}^{-1}$$

দেখা যাচ্ছে যে শোষণ বা বিকিরণ বর্ণালী যা-ই হোক না কেন এবং স্পন্দন কোয়ান্টাম সংখ্যা v–এর প্রাথমিক মান যা-ই হোক না কেন, সর্বক্ষেত্রেই একটিমাত্র বর্ণালীরেখা উৎপন্ন হবে যার মান $\bar{\nu}_0$ cm^{-1} (চিত্র 7.7)।

7.6 দ্বিপরমাণুক স্পন্দনশীল আবর্তক (Diatomic vibrating rotator)

আমরা ইতিমধ্যেই জেনেছি যে সাধারণ দ্বিপরমাণুক অণুর আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে 1—100 cm^{-1} শক্তি পার্থক্য থেকে থাকে। অপরপক্ষে স্পন্দন শক্তি স্তরগুলির মধ্যে শক্তিপার্থক্যের মান কয়েক হাজার (1000—8000) cm^{-1} হতে পারে, যেমন HCl অণুর ক্ষেত্রে এই পার্থক্য প্রায় 3000 cm^{-1}। যেহেতু অণুর এই দুই ধরনের গতির (স্পন্দন এবং আবর্তন) শক্তির মান যথেষ্টই আলাদা সেইহেতু, প্রাথমিকভাবে ভাবা যেতে পারে যে, একটি দ্বিপরমাণুক অণু প্রায় স্বাধীনভাবে স্পন্দন এবং আবর্তন গতি সম্পন্ন করতে পারে। এরকম ধরে নেওয়ার অর্থ এই দাঁড়ায় যে অণুটির আবর্তন-স্পন্দন শক্তি হচ্ছে এই দুই শক্তির যোগফলের সমান ঃ

$$\left.\begin{aligned} E_{\text{total}} &= E_{\text{rot}} + E_{\text{vib}} \text{ (Joules)} \\ \varepsilon_{\text{total}} &= \varepsilon_{\text{rot}} + \varepsilon_{\text{vib}} \quad (\text{cm}^{-1}) \end{aligned}\right\} \qquad \text{..... 7.18}$$

যদিও ক্ষেত্রবিশেষে এই অনুমান সঠিক না-ও হতে পারে। আলাদা আলাদা শক্তিগুলির মান ব্যবহার করে আমরা লিখতে পারি,

$$\varepsilon_{J,V} = \varepsilon_J + \varepsilon_V$$

$$\text{বা, } \varepsilon_{J,V} = BJ(J+1) + \left(v + \frac{1}{2}\right)\bar{\nu}_0 \text{ cm}^{-1} \qquad \text{..... 7.19}$$

চিত্র 7.8-এ আবর্তন শক্তিস্তরগুলি দেখানো হয়েছে v = 0 এবং v = 1 স্পন্দন কোয়ান্টাম সংখ্যার জন্য। প্রতিটি স্পন্দন শক্তিস্তরের সঙ্গে দেখানো হয়েছে তার আবর্তন শক্তিস্তরগুলি। যেহেতু আবর্তন শক্তি স্পন্দনশক্তির তুলনায় ভীষণই ক্ষুদ্র সেইহেতু চিত্রে আবর্তন শক্তিস্তরগুলি স্কেলে আঁকা হয়নি (not to scale)। v = 0 বা 1 যাই হোক না কেন, কোনো নির্দিষ্ট J-এর জন্য যে-কোনো বর্ণালীতে পরিলক্ষিত পরপর দুটি আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে পার্থক্য একই হবে। চিত্র 7.9-এ একটি দ্বিপারমাণবিক অণুর J = 0, 1, 2, 3 এবং 4 আবর্তন শক্তিস্তর দেখানো হয়েছে v = 0 এবং v = 1 স্পন্দন স্তরের জন্য। চিত্রে শোষণ বর্ণালীর রেখাগুলিও দেখানো হয়েছে। শোষণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে নির্বাচন সূত্রটি হল $\Delta v = 1$ এবং $\Delta J = \pm 1$; $\Delta J = 0$ সংক্রমণটি অনুমোদিত নয়।

এখন $v = 0 \rightarrow v = 1$ সংক্রমণগুলিকে দুটি ভিন্ন শ্রেণিতে (categories) ভাগ করা হয় ঃ
(ক) P-শাখা, যেখানে $\Delta J = -1$, অর্থাৎ $J \rightarrow J - 1$

চিত্র 7.8 প্রথম দুটি স্পন্দন স্তরের ক্ষেত্রে কয়েকটি আবর্তন শক্তিস্তর।

সমীকরণ 7.19 থেকে আমরা P-শাখার বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা পেতে পারি এভাবে

$$\overline{\nu}_P = \varepsilon_{J-1,1} - \varepsilon_{J,0}$$

$$= \left[B(J-1)J + \left(1+\frac{1}{2}\right)\overline{\nu}_0\right] - \left[BJ(J+1) + \left(0+\frac{1}{2}\right)\overline{\nu}_0\right]$$

$$= \overline{\nu}_0 - 2BJ; (J = 1, 2, 3, \ldots\ldots) \qquad \ldots\ldots 7.20$$

(খ) R-শাখা, যেখানে $\Delta J = +1$, অর্থাৎ $J \rightarrow J + 1$। এক্ষেত্রে

$$\overline{\nu}_R = \varepsilon_{J+1,1} - \varepsilon_{J,0}$$

$$= \left[B(J+1)(J+2) + \left(1+\frac{1}{2}\right)\overline{\nu}_0\right] - \left[BJ(J+1) + \left(0+\frac{1}{2}\right)\overline{\nu}_0\right]$$

$$= \overline{\nu}_0 + 2B(J+1); \ (J = 0, 1, 2, 3, \ldots\ldots\ldots) \qquad \ldots\ldots 7.21$$

আমরা জানি যে কঠিন বা তরল অবস্থায় স্পন্দনরত দ্বিপরমাণুক অণুর আবর্তন গতি থাকে না, কেবলমাত্র গ্যাসীয় অবস্থায় আবর্তন গতি সম্ভব। শেষোক্ত অবস্থায় $\Delta J = \pm 1$ নির্বাচন সূত্র প্রযোজ্য। এই কারণে স্পন্দনরত অণুর বর্ণালীতে একটি পটি-মূল (bond origin) থাকে যার তরঙ্গসংখ্যা $\bar{\nu}_0$ এবং এর দুই পাশে উচ্চতর এবং নিম্নতর অবচ্ছিন্ন (discrete) বর্ণালীরেখা সমূহের উৎপত্তি হয় সমীকরণ 7.20 এবং 7.21 অনুসারে। এদেরই যথাক্রমে P-শাখা এবং R-শাখা বলা হয় (চিত্র 7.9)। এক্ষেত্রে লক্ষণীয় যে পটিমূলে, অর্থাৎ $\bar{\nu}_0$ তরঙ্গসংখ্যায়, কোনো রেখা থাকে না। একেই Q-শাখা বলে। এর কারণ দ্বিপরমাণুক অণুতে $\Delta J = 0$ সংক্রমণ নিষিদ্ধ।

পরিশেষে একথা মনে রাখা উচিত যে উপরোক্ত আলোচনা একেবারেই আদর্শায়িত অণুর জন্য প্রযোজ্য। কিন্তু বাস্তবে স্পন্দন এবং আবর্তন গতি পরস্পরকে প্রভাবিত করে। ফলে 7.19 সমীকরণটি প্রকৃত অর্থে সঠিক নয়, যদিও সহজ ব্যবহারের প্রয়োজনে আমরা এটিকে প্রয়োগ করে থাকি।

চিত্র 7.9

7.7 রামন ক্রিয়া (Raman effect)

কলকাতার গবেষণাগারে 1928 সালে বিজ্ঞানী রামন (C. V. Raman) লক্ষ্য করেন যে বেঞ্জিন (benzene), টোলুইন (tolune) প্রভৃতি বিভিন্ন তরলের মধ্য দিয়ে একবর্ণী দৃশ্যমান আলোকরশ্মি (monochromatic visible light) পাঠালে আপতিত রশ্মিগুচ্ছের গতিপথের অভিলম্ব দিকে বিক্ষিপ্ত (scattered) বিকিরণের মধ্যে আদি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মি ছাড়াও অপেক্ষাকৃত ক্ষুদ্রতর এবং দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিক্ষিপ্ত বিকিরিত রশ্মি পাওয়া যায়। এই ঘটনাকে বলা হয় রামন ক্রিয়া এবং এজন্যই তাঁকে 1931 সালে পদার্থবিদ্যায় নোবেল পুরস্কারে ভূষিত করা হয়। পরবর্তীকালে বিভিন্ন কঠিন, তরল এবং গ্যাসীয় পদার্থের মধ্যে রামন ক্রিয়া লক্ষ্য করা গেছে।

রামন ক্রিয়া পর্যবেক্ষণের জন্য যে প্রাথমিক যন্ত্র ব্যবহার করা হয়েছিল পরবর্তীকালে বিভিন্ন বিজ্ঞানী তার অনেক উন্নতিসাধন করেন। বিজ্ঞানী উড্ (R.W. Wood) দ্বারা উদ্ভাবিত এরকম একটি যন্ত্র আমরা নীচে বর্ণনা করছি।

চিত্র 7.10-এ উডের যন্ত্রটির নক্শা দেখানো হল। তরলে রামন ক্রিয়া দেখার জন্য এটি উপযুক্ত। এই যন্ত্রে AB একটি কাচের নল যার মধ্যে ধূলিহীন এবং বুদ্‌বুদ্‌হীন বিশুদ্ধ পরীক্ষামূলক তরলটি রাখা হয়। নলটির একটি মুখ আলোকীয়ভাবে (optically) সমতল কাচের প্লেট W দ্বারা বন্ধ এবং অপর মুখে একটি শিঙা (horn) আকৃতির বন্ধ নল যুক্ত থাকে, H শিঙাটির বাঁকা অংশের বাইরের গা কালো রং করা থাকে।

পারদের আর্ক বাতি (mercury arc lamp) থেকে উৎপন্ন আলোর মধ্যে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণ থাকে। আর্ক বাতি থেকে নিঃসৃত বহুবর্ণীয় আলোককে একটি আলোক পরিস্রাবকের (optical filter) F মধ্য দিয়ে পাঠিয়ে অপরদিকে একবর্ণীয় ($\lambda = 4358$ Å) আলোক পাওয়া যায়। AB নলটি একটি জল-আবরণী (water-jacket) J দ্বারা পরিবৃত থাকে। একটি অর্ধ চোঙাকৃতি (semi-cylindrical) অ্যালুমিনিয়াম প্রতিফলক R ব্যবহার করা হয় আলোকের তীব্রতা বৃদ্ধির জন্য। F থেকে নির্গত একবর্ণীয় আলোক AB নল মধ্যস্থ পরীক্ষাধীন তরল দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়। বিক্ষিপ্ত আলোকের কিছু অংশ আপতিত রশ্মির অভিলম্ব

চিত্র 7.10

চিত্র 7.11 স্টোক্স রেখা

দিকে অগ্রসর হয়ে W প্লেটকে ভেদ করে অভিসারী লেন্সের (condensing lens) ওপর পড়ে। সেখান থেকে বিক্ষিপ্ত আলোক বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের মধ্যে প্রবেশ করে এবং অবশেষে এর বর্ণালীর আলোকচিত্র গ্রহণ করা হয়। এই আলোকচিত্র পর্যবেক্ষণ করলে দেখা যায় যে রামন ক্রিয়ার ফলে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের বর্ণালীতে আদি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুই পাশে আরও কয়েকটি নতুন ক্ষীণতর বর্ণালীরেখা উৎপন্ন হয়েছে। বর্তমানে লেজার রশ্মির সাহায্যে রামন ক্রিয়া অনেক সূক্ষ্মভাবে পর্যবেক্ষণ করা যায়। রামন ক্রিয়াকে অনেকসময় রামন বিক্ষেপণও বলা হয়। চিত্র 7.11-এ রামন ক্রিয়ার একটি চিত্রকল্প দেখানো হল। একবর্ণী আলোক ব্যবহার করে যে রামন বর্ণালী পাওয়া যায় সাধারণ জৈব তরলের (organic liquid) ক্ষেত্রে—আদি রেখার দুই পাশে সমান কম্পাঙ্ক ব্যবধানে স্টোক্স এবং বিপরীত স্টোক্স রেখাগুলিসহ—সেটাই দেখানো হল উপরোক্ত চিত্রে।

7.7.1 রামন বর্ণালীর বৈশিষ্ট্য (Characteristics of Raman spectra)

অভিনিবেশ সহকারে পর্যবেক্ষণ করলে রামন ক্রিয়ার বা রামন বর্ণালীর নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলি লক্ষ্য করা যায় ঃ

(ক) রামন ক্রিয়ার বর্ণালীতে উত্তেজনা সৃষ্টিকারী আদি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বর্ণালীরেখা ছাড়াও দীর্ঘতর এবং হ্রস্বতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কয়েকটি ক্ষীণ বর্ণালীরেখা আদি রেখার দুপাশে লক্ষ্য করা যায়। দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা হ্রস্বতর কম্পাঙ্কের রেখাগুলিকে বলা হয় 'স্টোক্স রেখা' (Stokes' lines)। হ্রস্বতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা দীর্ঘতর কম্পাঙ্কের রেখাগুলিকে বলা হয় 'বিপরীত স্টোক্স রেখা' (Anti-Stokes' lines)। এই স্টোকস ও বিপরীত স্টোক্স্ রেখাগুলিকে একত্রে 'রামন রেখা'ও (Raman lines) বলা হয়।

(খ) রামন রেখাগুলির তীব্রতা সাধারণত আদি রেখার তুলনায় খুব কম হয়। এদের মধ্যে আবার স্টোক্স রেখাগুলির তীব্রতা বিপরীত স্টোক্স রেখাগুলির তুলনায় বেশি হয়।

(গ) রামন রেখাগুলি আদি রেখার দুপাশে প্রতিসমভাবে (symmetrically) সরে (displaced) থাকে। এই রামন রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য আদি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে, পরীক্ষাধীন পদার্থের প্রকৃতির ওপর নয়।

(ঘ) রামন বর্ণালীর আদি রেখার কম্পাঙ্ক ν_0 থেকে রামন রেখাগুলির কম্পাঙ্ক ব্যবধান (frequency difference) $\Delta\nu$ পরীক্ষাধীন পদার্থের প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে, আদি রেখার কম্পাঙ্কের ওপর নির্ভর করে না। যদি আদি রেখার কম্পাঙ্ক ν_0 হয়, তাহলে স্টোক্‌স এবং বিপরীত স্টোক্‌স রেখা দুটির কম্পাঙ্ক হবে যথাক্রমে ঃ

$$\nu' = \nu_0 - \Delta\nu \text{ (স্টোক্‌স রেখা)} \qquad \text{..... 7.22}$$

$$\nu'' = \nu_0 + \Delta\nu \text{ (বিপরীত স্টোক্‌স রেখা)} \qquad \text{..... 7.23}$$

এক্ষেত্রে বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য যে আদি রেখার কম্পাঙ্ক পরিবর্তিত করলে ν' এবং ν'' এমনভাবে পরিবর্তিত হয় যে $\Delta\nu$ অপরিবর্তিত থাকে।

(ঙ) রামন ক্রিয়ায় আদি রশ্মির বা বিকিরণের যে বিক্ষেপণ হয় তা সাধারণ র‍্যালে বিক্ষেপণ থেকে আলাদা। র‍্যালে বিক্ষেপণে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত থাকে ; কিন্তু রামন বিক্ষেপণে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন হয় (λ' এবং λ'')।

চিত্র 7.12 দ্বিপরমাণুক অণুর আবর্তন শক্তিস্তর এবং এদের থেকে উদ্ভূত আবর্তনীয় রামন বর্ণালী।

(চ) সাধারণত রামন রেখাগুলি সমবর্তিত (polarized) হয়। সমবর্তনের পরিমাণ পদার্থের ওপর নির্ভরশীল।

7.7.2 রামন ক্রিয়ার কোয়ান্টাম তত্ত্ব (Quantum theory of Raman effect)

কোয়ান্টাম তত্ত্ব অনুসারে $h\nu_1$ শক্তি সম্পন্ন একটি আলোক ফোটন M ভরের একটি বিক্ষেপক (scatterer) অণুর সঙ্গে তিনরকম ভাবে বিক্রিয়া (interaction) করতে পারে।

(ক) ফোটনটি অণুটির কোয়ান্টাম অবস্থার (quantum state) কোনো পরিবর্তন না ঘটিয়ে বিক্ষিপ্ত হয় অর্থাৎ স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ (elastic collision) ঘটে।

(খ) ভৌমস্তরে (ground state) অবস্থিত অণুটিকে ফোটনটি কিছু শক্তি স্থানান্তরিত (transfer) করে উচ্চতর আণবিক শক্তিস্তরে স্থাপন করে এবং ফোটনের নিজের শক্তি কমে যায়। এটি একটি অস্থিতিস্থাপক (inelastic) সংঘর্ষ।

(গ) ফোটনটি উচ্চতর শক্তিস্তরে (excited state) অবস্থিত অণু থেকে শক্তি গ্রহণ করে নিজের শক্তি বৃদ্ধি করে এবং অণুটি ভৌমস্তরে সংক্রমিত হয়। এটিও অস্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ।

ধরা যাক, সংঘর্ষের আগে এবং পরে অণুটির অন্তর্নিহিত (intrinsic) শক্তি যথাক্রমে U_1 এবং U_2 এবং ফোটনটির শক্তি সংঘর্ষের আগে এবং পরে যথাক্রমে $h\nu_1$ এবং $h\nu_2$। অধিকন্তু ধরে নেওয়া যাক্ যে সংঘর্ষের আগে ও পরে অণুর গতিশক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না। তাহলে শক্তির সংরক্ষণ সূত্রানুযায়ী আমরা লিখতে পারি—

$$U_1 + h\nu_1 = U_2 + h\nu_2$$

বা, $$\nu_2 = \nu_1 + \frac{U_1 - U_2}{h} \qquad \text{..... 7.24}$$

এখন যদি $U_1 = U_2$ হয়, তাহলে $\nu_1 = \nu_2$, অর্থাৎ বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাঙ্ক আদি কম্পাঙ্কের সমান হবে। যদি $U_1 > U_2$ হয়, তাহলে $\nu_2 > \nu_1$, অর্থাৎ বিপরীত স্টোক্স রেখার সৃষ্টি হবে। সবশেষে যদি $U_1 < U_2$ হয় তাহলে $\nu_1 > \nu_2$, অর্থাৎ স্টোক্স রেখার সৃষ্টি হবে।

স্বাভাবিকভাবেই আদি কম্পাঙ্ক থেকে স্টোক্স বা বিপরীত স্টোক্স রেখাগুলির কম্পাঙ্ক ব্যবধান সহজেই নির্ণয় করা যায়—

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{U_1 - U_2}{h} \qquad \text{..... 7.25}$$

দেখা যাচ্ছে যে এই কম্পাঙ্ক ব্যবধান অণুটির শক্তিস্তরগুলির ওপর নির্ভরশীল, কিন্তু আদি কম্পাঙ্কের ওপর নয়, অর্থাৎ পদার্থটির প্রকৃতির ওপর।

ওপরের আলোচনা থেকে বোঝা যাচ্ছে যে রামন বর্ণালীতে একটিমাত্র স্টোক্স এবং একটিমাত্র বিপরীত স্টোক্স রেখা পাওয়ার কথা, আদি রেখা ব্যতিরেকে। কিন্তু পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীতে বেশ কয়েকটি স্টোক্স এবং বিপরীত স্টোক্স রেখা দেখা যায়। এগুলির উৎপত্তি হয় অণুগুলির স্পন্দন বা আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণের ফলে।

দ্বিপরমাণুক রৈখিক অণুর ক্ষেত্রে আবর্তনীয় রামন সংক্রমণের নির্বাচন সূত্র হল ঃ

$$\Delta J = 0, \pm 2 \qquad \text{..... } 7.26$$

যখন $\Delta J = 0$, তখন বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাঙ্কের কোনো পরিবর্তন হয় না। র‍্যালে বিক্ষেপণ প্রকৃতপক্ষে তাই।

দেখানো যায় যে দ্বিপরমাণুক অণুর আবর্তনীয় রামন বর্ণালীর স্টোক্‌স রেখাগুলির মধ্যে এবং বিপরীত স্টোক্‌স রেখাগুলির মধ্যে শক্তির পার্থক্য হল,

$$\Delta\varepsilon = B\ (4J + 6)\ \text{cm}^{-1} \qquad \text{..... } 7.27$$

যেখানে $J = 0, 1, 2, \ldots\ldots\ldots\ldots$। চিত্র 7.12-তে এইরকম একটি অণুর অনুমোদিত সংক্রমণগুলি এবং উদ্ভূত আবর্তনীয় রামন বর্ণালীর চিত্রকল্প দেখানো হয়েছে।

7.7.3 রামন ক্রিয়া এবং প্রতিপ্রভা (Raman effect and flurescence)

আপাত দৃষ্টিতে রামন ক্রিয়া এবং প্রতিপ্রভার মধ্যে যথেষ্ট মিল বা সাদৃশ্য দেখা যায়—উভয় ক্ষেত্রেই আপতিত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের নতুন বর্ণালীরেখা সমূহ উৎপন্ন হয়। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে এই দুটির মধ্যে যথেষ্ট পার্থক্য আছে। এগুলো হল—

(ক) রামন ক্রিয়ায় আদি কম্পাঙ্কের কম এবং বেশি কম্পাঙ্কের রেখা পাওয়া যায়। কিন্তু প্রতিপ্রভা বর্ণালীর রেখাগুলি সর্বদাই আদি কম্পাঙ্কের থেকে কম কম্পাঙ্কের।

(খ) রামন রেখাগুলির কম্পাঙ্ক স্থানান্তর (frequency shift) $\Delta\nu$ নির্ভর করে বিক্ষেপক পদার্থের প্রকৃতির ওপর, আদি রেখার কম্পাঙ্কের ওপর নয়। কিন্তু প্রতিপ্রভা রেখাগুলির কম্পাঙ্ক পার্থক্য নির্ভর করে আদি কম্পাঙ্কের ওপর।

(গ) রামন রেখাগুলির কম্পাঙ্ক নির্ভর করে আদি কম্পাঙ্কের ওপর। প্রতিপ্রভ বর্ণালীর ক্ষেত্রে ঠিক এর বিপরীত ঘটনা ঘটে।

(ঘ) রামন রেখাগুলির সমাবর্তন হয়, কিন্তু প্রতিপ্রভার রেখাগুলির হয় না।

7.7.4 রামন ক্রিয়া এবং র‍্যালে বিক্ষেপণ (Raman effect and Rayleigh scattering)

আমরা জানি যে র‍্যালে বিক্ষেপণ হল পদার্থের অণু দ্বারা যে-কোনো তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোককে বিক্ষিপ্ত করার ঘটনা। এই বিক্ষেপে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোনো পরিবর্তন হয় না। অপরপক্ষে রামন বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন ঘটে। র‍্যালে বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তীব্রতা (I) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভরশীল, $I \propto 1/\lambda^4$ অর্থাৎ ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক বেশি পরিমাণে বিক্ষিপ্ত হয়। এই জন্যই ক্ষুদ্রতম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের নীল বর্ণের আলোক অন্যান্য বর্ণের আলোকের

তুলনায় বাতাসের অণু দ্বারা বেশি বিক্ষিপ্ত হয়। এই কারণেই আকাশকে নীল দেখায়। অন্যদিকে রামন বিক্ষেপণের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তীব্রতা এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে এরকম কোনো সম্পর্ক জানা নেই।

7.7.5 রামন ক্রিয়ার ব্যবহারিক প্রয়োগ (Practical applications of Raman effect)

রামন ক্রিয়া পদার্থের (কঠিন, তরল, গ্যাসীয়) অণুর গঠন নির্ণয়ে একটি গুরুত্বপূর্ণ পদ্ধতি। আমরা দেখেছি যে হাল্কা পরমাণু দ্বারা গঠিত অণুর স্পন্দন কম্পাঙ্ক বেশি হবে। আবার এক বন্ধনীর (single bond) তুলনায় দ্বিবন্ধনীর (double bond) ক্ষেত্রে বন্ধনী বল বেশি হবার কারণে উচ্চতর স্পন্দন কম্পাঙ্ক হয়।

H_2, N_2, O_2 প্রভৃতি সুষম কেন্দ্রকীয় মেরুহীন অণুগুলির আবর্তন স্পন্দন বর্ণালী পাওয়া যায় না কারণ এদের কোনো বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু নক না-থাকায় আপতিত বিকিরণের তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা এরা প্রভাবিত হয় না। একমাত্র রামন বর্ণালী থেকেই এদের স্পন্দন গতি সম্পর্কিত বিভিন্ন তথ্য পাওয়া যায়।

অপরদিকে HCl, HBr, HI প্রভৃতি বিষম-কেন্দ্রকীয় সমেরু অণুগুলির স্থায়ী বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু থাকার ফলে এদের অবলোহিত শোষণ বর্ণালী পাওয়া যায়। উপযুক্ত নির্বাচন সূত্র প্রয়োগ করে এদের স্পন্দন কম্পাঙ্ক এবং বন্ধনী বল নির্ণয় করা যায়।

7.8 অণুতরঙ্গ উনুন (Microwave oven)

বর্তমান যুগে অণুতরঙ্গ উনুন বা মাইক্রোওয়েভ ওভেন তার বিভিন্ন সুবিধার জন্য মানুষের রান্নাঘর, খাবারের দোকান, রেস্তোরা ইত্যাদিতে ঠাঁই করে নিয়েছে। জৈব অণুর সঙ্গে অণু তরঙ্গের বিক্রিয়াই এই উনুনের মূল কর্মপদ্ধতি। খাবারের অণু (জৈব অণু) বা জল অণু দ্বারা অণুতরঙ্গের শোষণই এই উনুনের মূল নীতি। প্রকৃতপক্ষে খাদ্যের (মাছ, মাংস, আনাজপাতি ইত্যাদি) মধ্যে যে জলের অণুগুলি আছে সেগুলো এই অণুতরঙ্গ ($\nu = 3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{2}$ Hz বা $\lambda = 0{\cdot}01 - 1$ cm) শোষণ করে উচ্চতর আবর্তন শক্তি স্তরে উন্নীত হয়। খাদ্যের মধ্যে যে জৈব অণুগুলি আছে তাদের আকার এবং আকৃতি এতই বড়ো যে এই অণুতরঙ্গের শক্তি তাদের আবর্তন শক্তিস্তরের কোনো পরিবর্তন ঘটাতে পারে না। জল অণুর আবর্তন শক্তিস্তরগুলি যখন এই অতিরিক্ত শক্তি তাপশক্তি রূপে ত্যাগ করে বা নিঃসরণ করে (অন্যান্য উত্তেজিত স্তরের মাধ্যমে) তখনই এই তাপে খাদ্যের পাকক্রিয়া সুসম্পন্ন হয় বা খাবার সুসিদ্ধ হয়।

এই উনুনের দক্ষতার কারণ হল এই যে এখানে খাদ্য আভ্যন্তরীণভাবে উত্তপ্ত হয় (internally heated)। সাধারণ প্রচলিত উনুনে রান্নার সময় খাদ্যদ্রব্যকে বাইরে থেকে উত্তপ্ত করা হয় এবং যতক্ষণ না তার কেন্দ্র যথেষ্টভাবে উত্তপ্ত হয় ততক্ষণ রান্না চালিয়ে যেতে হয়। ফলে অনেক বেশি জ্বালানি খরচ এবং সময় ব্যয় করতে হয়। অন্যদিকে অণুতরঙ্গ উনুনে গোটা একটি খাদ্যের টুকরোর সর্বত্রই জলের অণুগুলি আবর্তন শক্তি নিঃসরণ করে তাপীয় শক্তি নির্গত করে এবং তার ফলে গোটা টুকরোটাই একসাথে সুসিদ্ধ হয় অনেক কম সময়ে।

এই উনুন ব্যবহারের আবার দ্বিবিধ বিপদের আশঙ্কা আছে। প্রথমত, শক্তিশালী অণুতরঙ্গ বিকিরণ মানুষের শরীরে প্রবেশ করলে মানুষের মাংসও ভিতর থেকে উত্তপ্ত এবং সিদ্ধ হয়ে যাবে। দ্বিতীয়ত, এই প্রক্রিয়ায় আণবিক বন্ধনী ভেঙে (bond breaking) মুক্ত র‍্যাডিকাল (free radical) তৈরি হয়ে থাকে অনেক সময় যা কীনা মানব শরীরের পক্ষে ক্ষতিকারক।

7.9 অনুশীলনী (Exercises)

উদাহরণ 1. CO অণুর আবর্তন বর্ণালীতে পরপর দুটি রেখার মধ্যে তরঙ্গসংখ্যা পার্থক্য 380 m^{-1}। C^{12} এবং O^{16} পরমাণুগুলির ভর যথাক্রমে $19{\cdot}92 \times 10^{-27}$ kg এবং $26{\cdot}56 \times 10^{-27}$ kg হলে অণুটির জড়তা-ভ্রামক এবং বন্ধনী দৈর্ঘ্য কত?

সমাধান : দেওয়া আছে,

$$m_1 = 19{\cdot}92 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_2 = 26{\cdot}56 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta\bar{\nu} = 380 = \text{m}^{-1}$$

এখন, $\Delta\bar{\nu} = \dfrac{h}{2\pi Ic}$

বা, $I = \dfrac{h}{4\pi^2 c\,\Delta\nu}$

$$= \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-34}}{4 \times 9{\cdot}87 \times 3 \times 10^8 \times 380}$$

$$= 1{\cdot}47 \times 10^{-46} \text{ kg m}^2$$

অণুটির পরিমিত ভর (μ) হল—

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$= \frac{19{\cdot}92 \times 10^{-27} \times 26{\cdot}56 \times 10^{-27}}{(19{\cdot}92 + 26{\cdot}56) \times 10^{-27}}$$

$$= 11{\cdot}38 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

সুতরাং বন্ধনী দৈর্ঘ্য হল

$$r = \sqrt{I / \mu}$$

$$= \sqrt{(1{\cdot}47 \times 10^{-46})/(11{\cdot}38 \times 10^{-27})}$$

$$= 1{\cdot}1365 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 1{\cdot}14 \text{ Å}$$

∴ নির্ণেয় উত্তর $11{\cdot}38 \times 10^{-27}$ kg এবং 1·14Å।

উদাহরণ 2. হাইড্রোজেন (H) এবং ফ্লুরিন (F) পরমাণুর ভর যথাক্রমে $1{\cdot}66 \times 10^{-27}$ kg এবং $31{\cdot}56 \times 10^{-27}$ kg হলে এবং তাদের বন্ধনীর দৈর্ঘ্য 0·94 Å হলে HF অণুর আবর্তন বর্ণালীর তরঙ্গসংখ্যা ব্যবধান কত হবে? আবর্তন ধ্রুবকের মানও নির্ণয় করুন।

সমাধান : দেওয়া আছে,

$$m_1 = 1{\cdot}66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_2 = 31{\cdot}56 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$r = 0{\cdot}94\text{Å} = 0{\cdot}94 \times 10^{-10} \text{ m}$$

এখন $I = \mu r^2$

$$= \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right) r^2$$

$$= \frac{1{\cdot}66 \times 10^{-27} \times 31{\cdot}56 \times 10^{-27}}{(1{\cdot}66 + 31{\cdot}56) \times 10^{-27}} \times (9{\cdot}4 \times 10^{-11})^2$$

$$= 1{\cdot}577 \times 10^{-27} \times 88{\cdot}36 \times 10^{-22}$$

$$= 139{\cdot}34 \times 10^{-49} \text{ kg m}^2$$

সুতরাং বর্ণালীর তরঙ্গসংখ্যা পার্থক্য $\Delta\nu$ হল

$$\Delta\bar{\nu} = \frac{h}{2\pi Ic} = \frac{h}{4\pi^2 Ic}$$

$$= \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-34}}{4 \times 9{\cdot}87 \times 139{\cdot}34 \times 10^{-49} \times 3 \times 10^8}$$

$$= 4011{\cdot}29 \text{ m}^{-1}$$

অন্যদিকে আবর্তন ধ্রুবকের মান

$$B = \Delta\nu / 2$$

$$= 2005{\cdot}65 \ m^{-1}$$

সুতরাং নির্ণেয় তরঙ্গসংখ্যা ব্যবধান 4011·29 m^{-1} এবং আবর্তন ধ্রুবকের মান 2005·65 m^{-1}।

উদাহরণ 3. HCl এবং CO অণুদ্বয়ের উচ্চতম তীব্রতা সম্পন্ন স্পন্দন পটিগুলির তরঙ্গসংখ্যা যথাক্রমে 288600 m^{-1} এবং 214300 m^{-1}। এই দুই অণুর বল ধ্রুবকের মান নির্ণয় করুন।

সমাধান : আমরা জানি যে বল-ধ্রুবকের (k) মান হচ্ছে $k = 4\pi^2 c^2 \mu \bar{\nu}_0^2$

যেখানে $\mu(\text{HCl}) = \dfrac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

$$= \frac{1 \times 35 \cdot 5}{1 + 35 \cdot 5} \times 1 \cdot 66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 1{\cdot}615 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

এবং $\bar{\nu}_0(\text{HCl}) = 288600 \text{ m}^{-1}$

সুতরাং $k\ (\text{HCl}) = 4 \times 9{\cdot}87 \times (3 \times 10^8)^2 \times 1{\cdot}615 \times 10^{-27} \times (288600)^2$

$$= 478 \text{ N/m}$$

আবার CO অণুর ক্ষেত্রে

$$\mu(\text{CO}) = \frac{12 \times 16}{12 + 16} \times 1{\cdot}66 \times 10^{-27} kg$$

$$= 11{\cdot}38 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

এক্ষেত্রে দেওয়া আছে যে,

$$\bar{\nu}_0(\text{CO}) = 214300 \text{ m}^{-1}$$

সুতরাং $k(\text{CO}) = 4\pi^2 c^2 \bar{\nu}_0^2$

$$= 355{\cdot}3 \times 10^{16} \times 11{\cdot}38 \times 10^{-27} \times (214300)^2$$

$$= 1857\text{N/M}$$

$\therefore$ নির্ণেয় বল-ধ্রুবকগুলির মান হল 478 N/m (HCl) এবং 1857/N/m (CO)।

উদাহরণ 4. CO অণুর বন্ধনীর দৈর্ঘ্য 1·13Å। এই অণুর প্রথম উত্তেজিত এবং ভৌমস্তরের মধ্যে আবর্তন শক্তির পার্থক্য কত?

সমাধান : আমরা জানি যে আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মান

$$E_J = BJ\ (J + 1)$$

$J = 0$ হলে ভৌমস্তর এবং $J = 1$ হলে প্রথম উত্তেজিত স্তরের শক্তি পাওয়া যায়। তাদের মধ্যে পার্থক্যও সহজেই নির্ণয় করা যায় এভাবে—

$$E_0 = O$$

এবং $E_1 = 2B$

$$\therefore\ \Delta E = E_1 - E_0 = 2B$$

এখন আমরা জানি যে,

$$B = \frac{h}{8\pi^2 Ic}$$

আমরা আগেই দেখেছি যে CO অণুর ক্ষেত্রে

$$I = \mu r^2$$
$$= 11{\cdot}38 \times 10^{-27} \times (1{\cdot}13 \times 10^{-10})^2$$
$$= 14{\cdot}53 \times 10^{-47} \text{ kg m}^2$$

$$\therefore \ \Delta E = 2 \times \frac{h}{8\pi^2 Ic}$$

$$= 2 \times \frac{6 \cdot 62 \times 10^{-34}}{8 \times 9 \cdot 87 \times 14 \cdot 53 \times 10^{-47} \times 3 \times 10^8} m^{-1}$$
$$= 384{\cdot}67 \text{ m}^{-1}$$
$$= 3{\cdot}8467 \text{ cm}^{-1}$$
$$= 0{\cdot}0004775 \text{ eV} \qquad (\because \ 1 \text{ eV} = 8056 \text{ cm}^{-1})$$

$\therefore$ নির্ণেয় আবর্তন শক্তির পার্থক্য $384{\cdot}67 \text{ m}^{-1}$ বা $4{\cdot}775 \times 10^{-4}$ eV।

7.10 সারাংশ (Summary)

এই এককটিতে আমরা আণবিক বর্ণালী এবং রামন বর্ণালী সম্পর্কে আলোচনা করেছি। মোক্ষণ নল থেকে নিঃসৃত আলোকের বর্ণালীতে কতকগুলি অবচ্ছিন্ন আলোকর পটি বা পটি-বর্ণালী পাওয়া যায়। বিভিন্ন মৌল বা যৌগের অণু থেকে এই বর্ণালীর উৎপত্তি হয় বলে একে আণবিক বর্ণালী বলে। অণুর মধ্যে অবস্থিত যে-কোনো একটি পরমাণু অন্যটির ইলেকট্রনগুলির গতিপথকে কিছুটা অবশ্যই প্রভাবিত করে। আণবিক ক্ষেত্রেও বাইরের কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে আণবিক ইলেকট্রনীয় শক্তির (E_e) উদ্ভব হয়। আবার যে-কোনো দ্বিপরমাণুক অণুর পরমাণু দুটির কেন্দ্রক দুটি তাদের সংযোজী রেখা বরাবর স্পন্দিত হতে পারে সরল সমঞ্জসভাবে। এর ফলে স্পন্দন শক্তির (E_v) উৎপত্তি হয়। অবশেষে যে-কোনো অণুর একটি সামগ্রিক আবর্তন গতি থাকতে পারে। এর ফলে অণুটির কিছু আবর্তন শক্তি (E_r) থাকে। সেই জন্য কোনো অণুর মোট শক্তি এই তিন প্রকার শক্তির যোগফল অর্থাৎ $E = E_e + E_v + E_r$।

যে-কোনো দ্বিপরমাণুক অণুর পরমাণু দুটি একটি সুদৃঢ় দণ্ড দ্বারা যুক্ত আছে এরকম ভাবা যেতে পারে। এই দণ্ডের অভিলম্বে ভরকেন্দ্রের মধ্য দিয়ে কল্পিত অক্ষ বেষ্টন করে অণুটি আবর্তিত হতে পারে। এই আবর্তন কোয়ান্টায়িত এবং এই আবর্তন শক্তির মান $E_r = BJ(J+1)$, যেখানে $J = 0, 1, 2, \ldots\ldots$ হচ্ছে আবর্তন

কোয়ান্টাম সংখ্যা। $\Delta J = \pm 1$ নির্বাচন সূত্র দ্বারা দুটি আবর্তন শক্তি স্তরের মধ্যে সংক্রমণ নিয়ন্ত্রিত হয়। এই আবর্তন বর্ণালী রেখাগুলি দূর অবলোহিত (far-infrared) বা অণুতরঙ্গ (microwave) অঞ্চলে অবস্থিত হয়। এই আবর্তন বর্ণালী থেকে আণবিক গঠন সম্পর্কে বহু তথ্য জানা যায়।

যে-কোনো দ্বিপরমাণুক অণুর পরমাণু দুটির সংযোজী (bond) অক্ষ বরাবর একটি স্পন্দনগতি সব সময়ই থাকে। এই স্পন্দনশক্তির মান হচ্ছে $E_V = \left(v + \frac{1}{2}\right)h\nu_0$ যেখানে $V = 0, 1, 2, ...$ হচ্ছে স্পন্দন কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং ν_0 হচ্ছে নিম্নতম শক্তিস্তরে স্পন্দন কম্পাঙ্ক। এই স্পন্দন গতিও কোয়ান্টায়িত। যখন $v = 0$, তখন $E_v = \frac{1}{2}h\nu_0$ এবং একে শূন্যাঙ্ক শক্তি (zero-point energy) বলা হয়। এর প্রত্যক্ষ অনুসিদ্ধান্ত হচ্ছে এই যে অণুর একটি পরমাণুর সাপেক্ষে অপরটি কিছুতেই কখনই স্থির থাকতে পারে না—অর্থাৎ তাদের মধ্যে সর্বদাই একটি আপেক্ষিক বেগ থাকবে। এক্ষেত্রে নির্বাচনী সূত্রটি হল $\Delta v = \pm 1$, যদিও বিশেষ ক্ষেত্রে অন্য নির্বাচনী সূত্রও হতে পারে।

রামন ক্রিয়া একটি আণবিক ক্রিয়া। এটি র‍্যালে বিক্ষেপণ থেকে আলাদা। প্রতিপ্রভার সঙ্গে এর সামান্য মিল আছে। এই ক্রিয়াটি পদার্থের যে-কোনো অবস্থাতেই পরীক্ষা করা যেতে পারে। কোনো পদার্থের ওপর একবর্ণী আলোক ফেললে কিছু আলোক বিক্ষিপ্ত হবে। এই বিক্ষিপ্ত আলোকের মধ্যে আদি আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছাড়াও তার কিছু কম এবং বেশি দৈর্ঘ্যের তরঙ্গ উপস্থিত থাকে। একেই রামন বিক্ষেপ বলে। আণবিক শক্তিস্তরগুলি কোয়ান্টায়িত বলে আগত আলোকের ফোটনের শক্তি অণুটি গ্রহণ করে অন্য শক্তিস্তরে উন্নীত হয় এবং সংক্রমণের ফলে অন্য তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ফোটন নিঃসৃত হয়। এটাই রামন ক্রিয়ার কোয়ান্টাম ব্যাখ্যা।

7.11 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. সংক্ষিপ্ত উত্তর দিন ঃ

(ক) পটি বর্ণালী কী এবং এর উৎপত্তি কীভাবে হয়?
(খ) একটি অণুর মোট শক্তি কোন্ কোন্ শক্তির যোগফল?
(গ) আবর্তন শক্তি কীভাবে উৎপন্ন হয়?
(ঘ) স্পন্দন শক্তি কীভাবে উৎপন্ন হয়?
(ঙ) সমেরু এবং মেরুহীন অণু কাদের বলে? উদাহরণসহ ব্যাখ্যা করুন।
(চ) বিশুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী কাকে বলে?
(ছ) আবর্তন ধ্রুবকের রাশিটি লিখুন এবং ব্যাখ্যা করুন।
(জ) স্পন্দন কোয়ান্টাম সংখ্যা কী এবং এর মানগুলি কত হতে পারে?
(ঝ) শূন্যাঙ্ক-শক্তি ব্যাখ্যা করুন।

(ঞ) সুষম এবং বিষম কেন্দ্রকীয় অণুগুলির কয়েকটি উদাহরণসহ ব্যাখ্যা করুন।

(ট) অণুর স্থায়ী দ্বিমেরু ভ্রামকের সঙ্গে সংক্রমণ ঘটার সম্পর্ক কী?

(ঠ) স্পন্দন বর্ণালীর P এবং R-শাখার উৎপত্তি কীভাবে হয়?

(ড) রামন ক্রিয়া কাকে বলে?

(ঢ) স্টোক্‌স এবং বিপরীত স্টোক্‌স রেখাগুলি কী?

(ণ) র‍্যালে বিক্ষেপণ এবং রামন ক্রিয়ার পার্থক্য কোথায়?

(ত) খাদ্যের ভিতর এবং বাইরে থেকে উত্তপ্ত করার অর্থ কী?

2. একটি দ্বিপরমাণুক অণুর কেবলমাত্র আবর্তন গতি থাকলে সেই আবর্তন শক্তির মান নির্ণয় করুন। আবর্তন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণের নির্বাচন সূত্রটি সহযোগে আবর্তন বর্ণালী চিত্রসহ আলোচনা করুন।

3. একটি দ্বিপরমাণুক অণুর স্পন্দন শক্তির উদ্ভব কীভাবে হয় ব্যাখ্যা করুন। স্পন্দন শক্তিস্তরগুলির মানের রাশিমালা নির্ণয় করুন এবং সম্ভাব্য সংক্রমণগুলি চিত্রসহ ব্যাখ্যা করুন।

4. আণবিক বর্ণালী এবং রামন বর্ণালীর সাহায্যে পদার্থের গঠন সংক্রান্ত তথ্য কীভাবে পাওয়া যায় আলোচনা করুন। অন্যান্য ব্যবহারিক প্রয়োগও আলোচনা করুন।

5. অণুতরঙ্গ উনুনের কার্যনীতি এবং ব্যবহারিকপ্রয়োগ সম্পর্কে আলোচনা করুন। এর থেকে সম্ভাব্য বিপদের কথাও উল্লেখ করুন।

6. রামন বর্ণালীর বৈশিষ্ট্যগুলি আলোচনা করুন। প্রতিপ্রভা এবং র‍্যালে বিক্ষেপণ থেকে রামন ক্রিয়ার পার্থক্য উল্লেখ করুন।

7. রামন ক্রিয়া পর্যবেক্ষণের পরীক্ষামূলক একটি ব্যবস্থার আলোচনা করুন।

8. CO অণুর বন্ধনীর বল ধ্রুবকের মান 1870 Nm^{-1} হলে অণুটির স্পন্দন কম্পাঙ্কের মান এবং স্পন্দন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে ব্যবধান কত নির্ণয় করুন। অণুটির পরিমিত ভর $11{\cdot}38 \times 10^{-27}$ kg ধরে নিন। (উত্তর ঃ $6{\cdot}45 \times 10^{13}$ Hz এবং 0·2668 eV)

9. CO অণুর বন্ধনী দৈর্ঘ্য 0·113 nm এবং C এবং O পরমাণুগুলির ভর যথাক্রমে $1{\cdot}99 \times 10^{-26}$ kg এবং $2{\cdot}66 \times 10^{-26}$ kg। সর্বনিম্ন (J = 1) আবর্তন শক্তিস্তরে অণুটির শক্তি এবং কৌণিক বেগ নির্ণয় করুন। (উত্তর ঃ $4{\cdot}774 \times 10^{-4}$ eV, $3{\cdot}23 \times 10^{11}$ rad/s)

10. HF অণুর আবর্তন ধ্রুবক (B)-এর মান 2025 m^{-1}, এবং H এবং F পরমাণুদ্বয়ের ভর যথাক্রমে $1{\cdot}673 \times 10^{-27}$ kg এবং $31{\cdot}55 \times 10^{-27}$ kg হলে অণুটির বন্ধনী দৈর্ঘ্যের মান নির্ণয় করুন। (উত্তর ঃ 0·935Å বা 0·0935 nm)

11. ^{1}H, ^{35}Cl এবং ^{37}Cl পরমাণুগুলির ভর যথাক্রমে $1{\cdot}673 \times 10^{-27}$ kg, $58{\cdot}06 \times 10^{-27}$ kg এবং $61{\cdot}38 \times 10^{-27}$ kg। $H^{35}Cl$ অণুর আবর্তন ধ্রুবকের মান 10·5909 cm^{-1} হলে $H^{37}Cl$ অণুর আবর্তন ধ্রুবকের মান কত? (উত্তর ঃ 10·575 cm^{-1})

একক 8 ❑ এক্স রশ্মি (X-rays)

গঠন

8.1 প্রস্তাবনা

8.2 উদ্দেশ্য

8.3 এক্স-রশ্মির উৎপাদন

→ 8.3.1 গ্যাস ভর্তি এক্স-রশ্মি নল

→ 8.3.2 কুলিজ নল

8.4 এক্স-রশ্মির বৈশিষ্ট্য

8.5 এক্স-রশ্মির বর্ণালী

→ 8.5.1 এক্স-রশ্মির অবিচ্ছিন্ন বর্ণালী

→ 8.5.2 অবিচ্ছিন্ন বর্ণালীর উৎপত্তি

→ 8.5.3 বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি বর্ণালী

→ 8.5.4 বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মির উৎপত্তি

→ 8.5.5 কোসেল চিত্র এবং শক্তিস্তর চিত্র

8.6 মোজলের সূত্র

→ 8.6.1 বোর তত্ত্ব থেকে মোজলে সূত্রের ব্যাখ্যা

→ 8.6.2 K এবং L শ্রেণির এক্স-রশ্মি বর্ণালী রেখার কম্পাঙ্ক

8.7 অনুশীলনী

8.8 সারাংশ

8.9 প্রশ্নাবলি

8.10 উৎস

8.1 প্রস্তাবনা (Introduction)

ঊনবিংশ শতাব্দীর শেষ দুটি দশকে এবং বিংশ শতাব্দীর প্রথম তিনটি দশকে—মোটামুটিভাবে এই পঞ্চাশ বছরে পরীক্ষামূলক এবং তাত্ত্বিক পদার্থবিদ্যার যে বিপুল পরিমাণ অগ্রগতি এবং আবিষ্কার হয়েছে,

বিজ্ঞানের ইতিহাসে তাকে প্রায় বিরলই বলা যায়। পৃথিবীর দিকে দিকে বিভিন্ন গবেষণাগারে এই সময়ে যে বিপুল কর্মকাণ্ড চলছিল এক্স-রশ্মির আবিষ্কার তারই একটি সামান্য কিন্তু অত্যন্ত তাৎপর্যপূর্ণ অংশবিশেষ। এই সময়ের আরও কয়েকটি আবিষ্কারের মত এই আবিষ্কারটিও আকস্মিকভাবে বা ঘটনাচক্রে আবিষ্কৃত হয়। জার্মানিতে বিজ্ঞানী রন্‌টগেন (Röntgen) 1895 সালে মোক্ষণ নলে উৎপাদিত ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে গবেষণা করছিলেন। বিশেষ আকৃতির কাচের মোক্ষণ নলে অত্যন্ত কম বায়ুচাপে ($\sim 10^{-3}$ mm of Hg) অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে তিনি প্রায় 40,000 V বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করেন আবেশ কুণ্ডলীর (induction coil) সাহায্যে। কালো রঙের শক্ত কার্ড-বোর্ডের সাহায্যে যন্ত্রটিকে আচ্ছাদিত করা হয় যাতে দৃশ্যমান বা অতিবেগুনী রশ্মি বাইরে আসতে না পারে। তিনি আশ্চর্য হয়ে লক্ষ্য করেন যে একটি বেরিয়াম প্ল্যাটিনো সায়ানাইড প্রলেপযুক্ত কাগজের পর্দা অন্ধকার ঘরে ওই ক্রিয়াশীল যন্ত্রের কাছে আনলে কাগজের পর্দাটি প্রতিপ্রভা (fluorescence) দেখায়। তিনি সিদ্ধান্ত নেন যে এটি ক্যাথোড রশ্মির ক্রিয়া নয়, কারণ ক্যাথোড রশ্মির ভেদ্যতা অনেক কম। আরও পরীক্ষা-নিরীক্ষার পর তিনি নিশ্চিত হন যে এটি একটি অনাবিষ্কৃত রশ্মি এবং গণিতের প্রথা অনুসরণ করে এর নাম দেন এক্স-রশ্মি (X-rays), কারণ এটি একটি অজানা রশ্মি। পরবর্তীকালে কেউ কেউ একে রন্‌টগেন রশ্মি (Röntgen rays) নামেও অভিহিত করেন।

8.2 উদ্দেশ্য (Objectives)

এই এককটি পড়বার পর আপনি জানতে পারবেন—

- এক্স-রশ্মি উৎপাদন পদ্ধতি।
- এক্স-রশ্মির বৈশিষ্ট্য।
- এক্স-রশ্মির বর্ণালী।
- নিরবচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি উৎপত্তির কারণ।
- এক্স-রশ্মির চূড়াগুলির উৎপত্তির কারণ।
- মোজলের সূত্র এবং তার তাৎপর্য।

8.3 এক্স-রশ্মির উৎপাদন (Production of X-rays)

এক্স-রশ্মি উৎপাদনের দুটি পদ্ধতি এখানে আমরা আলোচনা করব। প্রথমটির আলোচনা করা হচ্ছে তার ঐতিহাসিক গুরুত্বের জন্য—যদিও এই পদ্ধতি এখন ব্যবহার করা হয় না। কিন্তু দ্বিতীয় পদ্ধতিটি অনেক বেশি উন্নত, সুবিধাজনক এবং তার ফলে ব্যাপকভাবে ব্যবহার্য।

8.3.1 গ্যাসভর্তি এক্স-রশ্মি নল (Gas-filled X-ray tube)

তড়িৎ মোক্ষণ নলে এক্স-রশ্মির আবিষ্কারের পর রন্ট্‌গেন ওই ব্যবস্থার কিছু সংস্কার এবং উন্নতি সাধন করেন। এই নতুন ব্যবস্থাটিকে গ্যাস ভর্তি এক্স-রশ্মি নল (gas-filled X-ray tube) বলে। এই নলে অ্যানোড এবং ক্যাথোড পাত ছাড়াও একটি অতিরিক্ত তড়িৎদ্বার অ্যানোডের সাথে যুক্ত থাকে যাকে বলা হয় অ্যান্টিক্যাথোড বা টার্গেট (anti-cathode or target)। নলে নিম্নচাপের (10^{-3} mm of Hg) বায়ু রেখে আবেশ কুণ্ডলীর সাহায্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ (30,000–50,000V) প্রয়োগ করলে নল মধ্যস্থ বাতাসের অণু আয়নিত হয়ে ধনাত্মক আয়ন এবং ইলেকট্রন সৃষ্টি হয়। ধনাত্মক আয়নগুলি ক্যাথোড দ্বারা আকর্ষিত হয়ে ক্যাথোড পাতে আঘাত করে উচ্চ বেগসম্পন্ন ইলেকট্রন নির্গত করে। এই ইলেকট্রনগুলি অ্যান্টি-ক্যাথোডে আঘাত করে অত্যন্ত দ্রুত মন্দীভূত (retarded) হয় এবং খুব স্বল্প তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের একপ্রকার তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ সৃষ্টি করে যাকে বলা হয় এক্স-রশ্মি। 8.1 নং চিত্রে এই এক্স-রশ্মি উৎপাদন ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে।

এই উৎপাদন ব্যবস্থার দুটি মুখ্য অসুবিধা আছে। প্রথমত, এই ধরনের ব্যবস্থায় উত্তপ্ত কাচের দেওয়াল গ্যাস অণু শোষণ করার ফলে নলের ভিতরের বায়ুচাপ হ্রাস পায়। ফলে উৎপন্ন রশ্মির তীব্রতার তারতম্য ঘটে যা একেবারেই কাম্য নয়। দ্বিতীয়ত, দেখা গেছে যে এই বায়ুচাপ, বিভব প্রভেদ এবং অ্যানোডের উপর আপতিত ইলেকট্রন প্রবাহ পরস্পরকে প্রভাবিত করে। তার ফলে বায়ুচাপ এবং বিভবপ্রভেদ নিয়ন্ত্রণ করে উৎপন্ন রশ্মির তীব্রতা সন্তোষজনকভাবে নিয়ন্ত্রণ করা যায় না। তাছাড়া বিভব প্রভেদ পরিবর্তনে এক্স-রশ্মির তীব্রতা ও শক্তি দুটিই একসঙ্গে পরিবর্তিত হয়। পৃথকভাবে এদের নিয়ন্ত্রণ করা যায় না। আবার নলটিতে গ্যাস থাকায় উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা যায় না ফলে উচ্চশক্তির এক্স-রশ্মি (কঠিন রশ্মি) এতে উৎপাদন করা যায় না। এইসব কারণে ক্রমশ এই পদ্ধতিটি বাতিল হয়ে যায় যদিও এর ঐতিহাসিক গুরুত্ব অনস্বীকার্য।

চিত্র 8.1 গ্যাস ভর্তি এক্স-রশ্মি নল (রনট্‌গেন আবিষ্কৃত)

8.3.2 কুলিজ নল (Coolidge tube)

বিজ্ঞানী কুলিজ (W.D. Coolidge) 1913 সালে একটি নতুন ধরনের এক্স-রশ্মি উৎপাদন যন্ত্র উদ্ভাবন করেন, চিত্র 8.2। এই ব্যবস্থাটি গ্যাস-ভর্তি নলের তুলনায় যথেষ্ট উন্নততর এবং তার ফলে ব্যবহার করা বেশি উপযোগী। গ্যাস ভর্তি নলের অসুবিধাগুলি এখানে যথেষ্ট পরিমাণে দূরীভূত হয়েছে।

এই ব্যবস্থায় নলের কুণ্ড (bulb)-টি যথাসম্ভব বায়ুশূন্য রাখা হয়। ফলে তড়িৎ-মোক্ষণের ঘটনা ঘটে না। সেইজন্য এই ধরনের নলে অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে খুব বেশি বিভব প্রভেদ (প্রায় 1,00,000V) প্রয়োগ করা সম্ভব। এই যন্ত্রে টাংস্টেনের তৈরি একটি ফিলামেন্ট ক্যাথোডের কাজ করে। এই ফিলামেন্টের ভিতর তড়িৎ প্রবাহ পাঠালে এটি উত্তপ্ত হয়ে প্রচুর পরিমাণে তাপীয় ইলেকট্রন (thermal electrons) নিঃসরণ করে। ক্যাথোড ফিলামেন্টের চারপাশে মলিবডেনামের তৈরি একটি অবতল চোঙ থাকে। এই চোঙটিকে ক্যাথোডের তুলনায় বেশি ঋণাত্মক বিভবে রাখলে নির্গত ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডের উপর ফোকাসিত (focussed) হয়। অ্যানোড এবং ক্যাথোডের মধ্যে উচ্চ মানের পরিবর্তী বিভব প্রভেদ (alternating p.d.) একমুখীকারক ভালভ (rectifier valve) এবং আবেশক (inductor) ও ধারক capacitor)-এর সাহায্যে একমুখী করে প্রয়োগ করা হয়। এই বিভব ইচ্ছামত পরিবর্তন করে ইলেকট্রনের শক্তি পরিবর্তন করা হয়। আপতিত ইলেকট্রনের আঘাতে অ্যানোডটি ভীষণ উত্তপ্ত হয়ে পড়ে। তাই এর সুরক্ষার জন্য এটিকে একটি ফাঁপা তামার নলের উপর বসান থাকে এবং নলের ভিতর জল বা তেল প্রবাহিত করে অ্যানোডের তাপকে স্থানান্তরিত করা হয়। ফলে অ্যানোড ঠাণ্ডা থাকে।

চিত্র 8.2 কুলিজ নল

এই কুলিজ পদ্ধতিতে ইলেকট্রনগুলি শক্তি সংগ্রহ করে ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে সক্রিয় বিভব প্রভেদ থেকে। এই শক্তির অধিকাংশ অ্যানোড উত্তপ্তকারী শক্তিতে রূপান্তরিত হয় এবং অবশিষ্ট সামান্য

অংশই এক্স-রশ্মিতে পরিণত হয়। এই পদ্ধতিতে ফিলামেন্টের মধ্যে প্রবাহিত তড়িৎ প্রবাহ নিয়ন্ত্রণ করে উৎপন্ন ইলেকট্রন স্রোত নিয়ন্ত্রণ করা যায় এবং এর সাহায্যে এক্স-রশ্মির তীব্রতা কমানো বাড়ানো যায়। আবার ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে বিভব প্রভেদ পরিবর্তন করে ইলেকট্রনের শক্তি কমানো বাড়ানো যায় এবং তার দ্বারা কোমল (soft) এবং কঠিন (hard) এক্স-রশ্মি উৎপাদন নিয়ন্ত্রণ করা হয়। অর্থাৎ পৃথকভাবে এক্স-রশ্মির তীব্রতা ও শক্তি এই নলে নিয়ন্ত্রণ করা যায়। বায়ুশূন্য হওয়ায় এই নলে বিভেদ প্রভেদ অনেক বেশি বাড়ানো যায় এবং কঠিন এক্স-রশ্মি উৎপাদন সহজ হয়।

8.4 এক্স-রশ্মির বৈশিষ্ট্য (Characteristics of X-rays)

আমরা যত রকম তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ বা তরঙ্গ (electro-magnetic radiation or waves)-এর কথা জানি এক্স-রশ্মি তাদের মধ্যে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ এবং বৈশিষ্ট্যপূর্ণ। পৃথিবীব্যাপী বহু বিজ্ঞানীর গবেষণালব্ধ ফল থেকে এক্স-রশ্মির নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলি আবিষ্কৃত হয়েছে ঃ

(ক) এক্স-রশ্মি খুব ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ, এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 10^{-12} থেকে 10^{-8} m পর্যন্ত হতে পারে, অর্থাৎ এর কম্পাঙ্ক 10^{20} থেকে 10^{16} Hz পর্যন্ত হতে পারে। এই প্রসঙ্গে স্মর্তব্য যে দৃশ্যমান আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য 4×10^{-7} থেকে 8×10^{-7} m পর্যন্ত।

(খ) এই রশ্মির গতিবেগ অন্যান্য তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণের মতো শূন্য মাধ্যমে 3×10^{8} ms^{-1}।

(গ) এই রশ্মি প্রায় সব বস্তুকেই কমবেশি ভেদ করতে পারে, তবে বিভিন্ন বস্তুর ক্ষেত্রে ভেদ্যতা বিভিন্ন। রশ্মির তীব্রতা, কম্পাঙ্ক এবং বস্তুর ঘনত্বের ওপর প্রাথমিকভাবে এই ভেদ্যতা নির্ভর করে। মানুষের দেহের হাড়ের ছবি তুলতে এই রশ্মি অপরিহার্য।

(ঘ) এক্স-রশ্মি ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে কৃষ্ণিত (blacken) করে। আপতিত রশ্মির তীব্রতার ওপর কৃষ্ণতার পরিমাণ নির্ভর করে।

(ঙ) বেরিয়াম প্ল্যাটিনো সায়ানাইড এবং কিছু অন্যান্য খনিজ লবণে এক্স-রশ্মি আপতিত হলে সেগুলো থেকে প্রতিপ্রভা সৃষ্টি হয়।

(চ) এক্স-রশ্মি গ্যাসকে আয়নিত করে। আয়নায়ন ক্ষমতা আপতিত রশ্মির তীব্রতার ওপর নির্ভরশীল।

(ছ) এই রশ্মি আলোক তড়িৎ ক্রিয়া (photo-electric effect) সংঘটিত করতে পারে।

(জ) আলোক তরঙ্গের মতো এই রশ্মির ব্যতিচার (interference), অপবর্তন (diffraction) এবং সমবর্তন (polarization) হয়। এক্স-রশ্মির এই তিনটি ধর্মই তাকে নিশ্চিতভাবে তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের শ্রেণিভুক্ত করেছে।

8.5 এক্স-রশ্মির বর্ণালী (X-ray spectra)

পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে একই টার্গেট এবং একই প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের জন্য একই এক্স-রশ্মি নল থেকে একই সময়ে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক্স-রশ্মি উৎপন্ন হয়। যদি এই এক্স-রশ্মি তীব্রতা I, তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের (λ) অপেক্ষক (function) হিসাবে মাপা হয় কোনো নির্দিষ্ট বিভব প্রভেদের জন্য তাহলে আমরা একটি লেখচিত্র আঁকতে পারি। এই লেখচিত্রটিকেই বলা হয় এক্স-রশ্মির বর্ণালী, অর্থাৎ I-λ লেখচিত্র।

এক্স-রশ্মির দুই ধরনের বর্ণালী পাওয়া যায়। এক ধরনের বর্ণালীকে বলে নিরবচ্ছিন্ন বা অবিচ্ছিন্ন (continuous) বর্ণালী। এই বর্ণালীতে একটি নিম্নতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে শুরু করে অবিচ্ছিন্নভাবে একটি উচ্চতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য পর্যন্ত সবরকম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আনুষঙ্গিক তীব্রতা পাওয়া যায়। দেখা গেছে যে পরীক্ষালব্ধ নিম্নতম ও উচ্চতম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান নির্ভর করে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের ওপর, টার্গেট ধাতুর ওপর নির্ভর করে না, চিত্র 8.3।

অন্য ধরনের যে বর্ণালীটি তার নাম বৈশিষ্ট্যমূলক (characteristic) বর্ণালী। এই বর্ণালীতে কতকগুলি

চিত্র 8.3 অবিচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালী

বিশেষ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে অবিচ্ছিন্ন লেখচিত্রের বা বর্ণালীর ওপর সমাপতিত (superimposed) কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (discrete) সুতীক্ষ্ণ চূড়া (sharp peak) দেখা যায়, চিত্র 8.4.। বিভবপ্রভেদ পরিবর্তিত হলে এই চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা অবস্থানের কোনো পরিবর্তন হয় না, পরিবর্তিত হয় তার তীব্রতার পরিমাণের। অন্যদিকে দেখা যায় যে কেবলমাত্র একটি সংকটমানের বেশি ভোল্টেজ প্রয়োগ করলেই এই

বর্ণালী পাওয়া যায়। বৈশিষ্ট্যমূলক বর্ণালীর চূড়ার তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি কিন্তু অবশ্যই টার্গেট ধাতুর ওপর নির্ভরশীল, অর্থাৎ চূড়াগুলি টার্গেট ধাতুর বৈশিষ্ট্যমূলক নিদর্শন।

8.5.1 এক্স-রশ্মির অবিচ্ছিন্ন বর্ণালী (Continuous X-ray spectra)

টাংস্টেন (Z = 74) প্রভৃতি উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন ধাতুর টার্গেট ব্যবহার করে যে রকম বর্ণালী পাওয়া যায় 8.3 নং চিত্রে তা দেখানো হয়েছে। এই চিত্রে দেখা যায় যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তীব্রতা অবিচ্ছিন্নভাবে পরিবর্তিত হয়। এই অবিচ্ছিন্ন বা নিরবচ্ছিন্ন পরিবর্তন 50,000V উচ্চ বিভবপ্রভেদের ক্ষেত্রেও লক্ষ্য করা যায়। এই চিত্রে বিভব প্রভেদের কয়েকটি বিভিন্ন মানে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে উৎপন্ন এক্স-রশ্মির তীব্রতার পরিবর্তনের লেখচিত্র আঁকা হয়েছে। চিত্র 8.3 থেকে দেখা যায় যে বর্ণালীটি অবিচ্ছিন্ন এবং নিম্নলিখিত কয়েকটি বৈশিষ্ট্যমণ্ডিত।

চিত্র 8.4 বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি বর্ণালী

(ক) নির্দিষ্ট উদ্দীপক বিভব প্রভেদে উৎপন্ন এক্স-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি ন্যূনতম মান (λ_{min}) থাকে, যার থেকে ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মি নির্গত হয় না। পরীক্ষায় দেখা গেছে যে টাংস্টেন টার্গেটের ক্ষেত্রে 50kV বিভবপ্রভেদে λ_{min} = 0·25Å এবং বিভব প্রভেদ কমে 20kV হলে λ_{min} = 0·65Å হয় ; অর্থাৎ বিভব প্রভেদ বৃদ্ধি পেলে নিম্নতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য হ্রাস পায়।

(খ) তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে উৎপন্ন এক্স-রশ্মির তীব্রতা ক্রমশ বৃদ্ধি পায়। একটি গরিষ্ঠ মান পর্যন্ত বৃদ্ধি পাওয়ার পর দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে তীব্রতা আবার হ্রাস পেতে থাকে এবং এক সময়ে বিলীন হয়ে যায়।

(গ) চিত্র থেকে দেখা যাচ্ছে যে বর্ণালীর তীব্রতা একটি বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে সর্বাধিক হয়। এই সর্বোচ্চ

তীব্রতার অবস্থান প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের উপর নির্ভরশীল। বিভব বৃদ্ধি পেলে এই সর্বোচ্চ তীব্রতার অবস্থান ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দিকে সরে যায়।

8.5.2 অবিচ্ছিন্ন বর্ণালীর উৎপত্তি (Origin of continuous spectra)

কোনো নিউক্লিয়াসের তড়িৎক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে যাওয়ার সময় ইলেকট্রন মন্দীভূত হয় এবং তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ হিসাবে শক্তি বিকিরণ করে। একে bremsstralung বা braking radiation বলে। (জার্মান ভাষায় brems কথাটির অর্থ মন্দন এবং stralung কথাটির অর্থ বিকিরণ)। এই বিকিরিত তড়িৎচুম্বকীয় শক্তি অবিচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি রূপে নির্গত হয়।

এক্স-রশ্মি নলের ক্যাথোড বা ফিলামেন্ট থেকে উৎপন্ন ইলেকট্রনগুলি প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের দরুন উচ্চ গতি সম্পন্ন হয়ে অ্যানোড বা টার্গেটে আঘাত করে বাধাপ্রাপ্ত হয়। টার্গেটের পৃষ্ঠস্তরের সঙ্গে সংঘাতের ফলে যদি ইলেকট্রনটি সম্পূর্ণরূপে গতিহীন হয়, তাহলে সম্পূর্ণ গতিশক্তিই বিকিরণ শক্তিতে রূপান্তরিত হবে এবং তার ফলে সবচেয়ে বেশি ভেদনক্ষমতা সম্পন্ন এক্স-রশ্মি বা কঠিন এক্স-রশ্মি (hard X-rays) উৎপন্ন হবে। তাই এক্স-রশ্মি মন্দনজনিত বিকিরণ। কিন্তু বেশির ভাগ ইলেকট্রনই টার্গেটের পৃষ্ঠের বেশ কয়েকটি পারমাণবিক স্তর ভেদ করার পর গতিহীন হয়। ফলে কিছুটা বিকিরণ শক্তি এবং কিছুটা তাপশক্তি উৎপন্ন হয়। এই কারণে বিকীর্ণ শক্তিতে সমস্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণ পাওয়া যায়—তাই একে সাদা বিকিরণ (white radiation) বলে। কোন্ ইলেকট্রন টার্গেটের কত গভীরে প্রবেশ করতে পারবে তা নির্ভর করে তার গতিশক্তি এবং টার্গেটের ধাতুর ওপর।

আমরা জানি যে, ν কম্পাঙ্কযুক্ত বা λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য যুক্ত ফোটনের শক্তি হচ্ছে

$$E = h\nu = hc/\lambda \qquad \text{..... 8.1}$$

যেখানে h হচ্ছে প্ল্যাঙ্ক ধ্রুবক এবং c হচ্ছে শূন্য মাধ্যমে আলোর বেগ। স্বভাবতই নিঃসৃত এক্স-রশ্মি ফোটনের সর্বোচ্চ শক্তি হবে আপতিত ইলেকট্রনের প্রাথমিক শক্তির সমান ঃ

$$E_{max} = h\nu_{max} = hc / \lambda_{min} = eV \qquad \text{..... 8.2}$$

যেখানে V হচ্ছে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ, যার ফলে ক্যাথোড থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলি eV শক্তি অর্জন করে টার্গেটের ওপর আঘাত করে। সুতরাং সমীকরণ 8.2 থেকে দেখা যাচ্ছে যে নিরবিচ্ছিন্ন বর্ণালীর সর্বনিম্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ_{min}) কেবলমাত্র V-এর ওপর নির্ভরশীল ; টার্গেটের ধাতুর ওপর নির্ভরশীল নয়। সমীকরণ 8.2 থেকে লিখতে পারি,

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \text{ এবং } \nu_{max} = \frac{eV}{h}$$

এখন $h = 6{\cdot}62 \times 10^{-34}$ J–s, $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ C এবং $c = 3 \times 10^{8}$ ms^{-1} বসিয়ে আমরা পাই—

$$\lambda_{min} = \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1{\cdot}6 \times 10^{-19} \times V\,(\text{volts})}$$

$$= \frac{12{\cdot}4}{V} \times 10^{-7} m$$

$$= \frac{12400}{V\,(\text{volts})}\,\text{Å} \qquad \ldots\ldots\ 8.3$$

সমীকরণ 8.3 থেকে দেখা যাচ্ছে যে 1Å বা 1×10^{-10} m তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক্স-রশ্মি উৎপাদন করতে হলে নলে ন্যূনপক্ষে 12,400V বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করতে হবে। অন্যভাবে বলা যায় যে যখন V = 20,000 V, তখন λ_{min} = 0·64Å হবে এবং যখন V = 40,000 V, তখন λ_{min}-কে ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য (short wave length) সীমা বা ছেদমান (cut-off value) বলা হয়।

কখনও কখনও বস্তুকে ভেদ করার ক্ষমতা অনুসারে এক্স-রশ্মিকে তিনভাগে ভাগ করা হয়। খুব বেশি ভেদনক্ষমতা সম্পন্ন বিকিরণকে 'কঠিন বিকিরণ' (hard radiation), মাঝারিকে 'মধ্যম বিকিরণ' (medium radiation) এবং খুব কম বিকিরণকে 'নরম বিকিরণ' (soft radiation) বলা হয়।

একথা মনে রাখা প্রয়োজন যে এক্স-রশ্মির উৎপাদন একটি বিপরীত আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া (inverse photoelectric effect)। এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের আঘাতে টার্গেট ধাতু থেকে এক্স-রশ্মি ফোটন উৎপন্ন হয়, পক্ষান্তরে যেখানে আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ায় ফোটনের আঘাতে ক্যাথোড ধাতু থেকে ইলেকট্রন উৎপন্ন হয়।

8.5.3 বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি বর্ণালী (Characteristic X-ray spectra)

আমরা আগেই জেনেছি যে নিরবচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালীর উপর কয়েকটি তীক্ষ্ণ চূড়া বিশেষ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে সমাপতিত হয়ে বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি বর্ণালী সৃষ্টি করে। নিম্ন পারমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন ধাতু, যেমন—মলিবডেনাম (Z = 42), যে বৈশিষ্ট্যমূলক বর্ণালী উৎপন্ন করে 8.4 নং চিত্রে তা দেখানো হয়েছে। পরীক্ষা থেকে দেখা গেছে যে 20,000 V-এর নীচে পর্যন্ত নিরবচ্ছিন্ন পরিবর্তন দেখা যায়। কিন্তু V $\geq$ 25000 V হলে বিশেষ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালীর ওপর কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (discrete) সুতীক্ষ্ণ চূড়া দেখা যায়। বিভব প্রভেদের পরিবর্তনের সঙ্গে এই চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোনো পরিবর্তন হয় না, কেবলমাত্র তীব্রতার পরিবর্তন হয়। যদি টার্গেটের পারমাণবিক সংখ্যা আরও কম হয়, যেমন তামা (Z = 29), তাহলে আরও কম বিভব প্রভেদে এই চূড়া দেখতে পাওয়া যায়। তামার ক্ষেত্রে V $\geq$ 8000V হলেই এই চূড়াগুলি দেখা যায়। এই প্রসঙ্গে মনে রাখা দরকার যে এই চূড়াগুলি প্রকৃতপক্ষে টার্গেট ধাতুর নিজস্ব বৈশিষ্ট্য প্রদর্শন করে। বিভিন্ন ধাতুর টার্গেটের চূড়াগুলির অবস্থান বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য অবশ্যই ভিন্ন। পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে আমরা নিম্নলিখিত সিদ্ধান্তগুলি গ্রহণ করতে পারি ঃ

(ক) বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে উৎপন্ন এক্স-রশ্মির তীব্রতাও বৃদ্ধি পায় ($I \propto V$)।

(খ) নির্দিষ্ট বিভব প্রভেদের জন্য টার্গেটের পারমাণবিক সংখ্যার সাথে তীব্রতা পরিবর্তিত হয় ($I \propto Z$, $V = \text{const.}$)।

(গ) নির্দিষ্ট বিভব প্রভেদের জন্য উৎপন্ন এক্স-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি ন্যূনতম মান আছে ($\lambda_{min} = hc/eV$)।

(ঘ) নির্দিষ্ট টার্গেট ধাতুর জন্য একটি ন্যূনতম বিভব প্রভেদের বেশি বিভবে নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালীর ওপর কতকগুলি সূক্ষ্ম তীক্ষ্ণ চূড়া আবির্ভূত হয় যাদের বলা হয় বৈশিষ্ট্যমূলক বর্ণালী।

(ঙ) বৈশিষ্ট্যমূলক বর্ণালীর এই আবির্ভাবের জন্য প্রয়োজনীয় ন্যূনতম বিভব নির্ভর করে টার্গেটের পারমাণবিক সংখ্যার ওপর। পারমাণবিক সংখ্যা বৃদ্ধি পেলে ন্যূনতম বিভবও বৃদ্ধি পায়।

8.5.4 বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মির উৎপত্তি (Origin of characteristic X-rays)

নিরবচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালীর ওপর অবস্থিত যে তীক্ষ্ণ (shark) চূড়াগুলি (peaks) পাওয়া যায় সেগুলি আসলে অতি ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বর্ণালীরেখা। এগুলির উৎপত্তির কারণ আমরা মৌলের পারমাণবিক গঠন আলোচনা করলেই জানতে পারব।

আমরা পূর্ববর্তী এককগুলিতে দেখেছি যে দৃশ্যমান বা অতিবেগুনি বর্ণালীরেখাগুলি সৃষ্টি হয় পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথের ইলেকট্রনটির উত্তেজিত স্তর (excited state) থেকে ভৌমস্তরে (ground state) সংক্রমণ (transition) হবার ফলে। এই ইলেকট্রনগুলি নিউক্লিয়াসের সাথে শিথিলভাবে (loosely) আবদ্ধ এবং এদের বন্ধন শক্তি (binding energy) সাধারণত কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্ট। এই বন্ধন শক্তি, যা কিনা আয়নন (ionization) শক্তির সমান, উদ্ভূত বিকিরণের শক্তির সমমাত্রিক (same order) হয়। যেমন—সোডিয়ামের 3s ইলেকট্রনটির বন্ধন শক্তি 5·1 eV এবং সোডিয়ামের D-রেখার বিকিরণের শক্তি হল 2·1 eV ($E = h\nu = hc/\lambda = 12400/5893$ (Å) $= 2{\cdot}1$ eV)। কিন্তু লক্ষ্য করা গেছে যে বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি ফোটনগুলির শক্তির মাত্রা 10^4 eV বা ততোধিক। অর্থাৎ এই ইলেকট্রনগুলি অনেক বেশি দৃঢ়ভাবে পরমাণুতে আবদ্ধ এবং নিউক্লিয়াসের খুব কাছাকাছি কক্ষপথে আবর্তনশীল।

আমরা ইতিপূর্বেই জেনেছি যে পরমাণুর নিউক্লিয়াসের চারপাশে ইলেকট্রনগুলি কতকগুলি খোলকে (shell) সজ্জিত থাকে (K, L, M, N ইত্যাদি) এবং খোলকগুলিতে সর্বাধিক যে সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে সেটাও সুনির্দিষ্ট। সর্বাপেক্ষা ভিতরের K খোলকের ইলেকট্রন দুটি সর্বাপেক্ষা বেশি দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ হয়। এর পরের L খোলকের আটটি ইলেকট্রন K-এর দুটির তুলনায় শিথিলতরভাবে আবদ্ধ থাকে। ক্রমান্বয়ে M-এর 18টি ইলেকট্রন আরও শিথিলভাবে আবদ্ধ থাকে। পরমাণুর এইসব অভ্যন্তরীণ খোলকগুলিই বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মির উৎপত্তিস্থল।

এখন মনে করা যাক যে একটি দ্রুত গতিসম্পন্ন ইলেকট্রন টার্গেট ধাতুর ওপর সজোরে আঘাত করে টার্গেট পরমাণুর অভ্যন্তরে প্রবেশ করল এবং K-খোলকের একটি ইলেকট্রনকে ধাক্কা মেরে সরিয়ে দিল। K-খোলকের ওই শূন্যস্থান তৎক্ষণাৎ বাইরের কোনো শিথিলতর সংবদ্ধ খোলক L, M ইত্যাদি থেকে একটি ইলেকট্রন এসে দখল করবে। এই সংক্রমিত ইলেকট্রনটির উদ্বৃত্ত শক্তি তড়িচ্চুম্বকীয় বা এক্স-রশ্মি ফোটন হিসাবে নিঃসৃত হবে।

$$h\nu_{KL} = E_K - E_L$$

টার্গেট ধাতুর K এবং L খোলকের ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তির উপর এই নিঃসৃত এক্স-রশ্মি ফোটনের শক্তি $h\nu_{KL}$ নির্ভর করে। এই বন্ধনশক্তি টার্গেটের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে এবং নির্দিষ্ট টার্গেটের জন্য নির্দিষ্ট। সেইজন্য এক্স-রশ্মির বৈশিষ্ট্যমূলক বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা কম্পাঙ্ক সুনির্দিষ্ট হয় এবং এগুলি টার্গেটের প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে। পরমাণুর প্রোটনের সংখ্যা যত বেশি হবে, নিঃসৃত এক্স-রশ্মি ফোটনের কম্পাঙ্ক তত বেশি হবে এবং সেই কারণে ওই রশ্মির ভেদনক্ষমতাও বেশি হবে।

8.5.5 কোসেল চিত্র এবং শক্তিস্তর চিত্র (Kössel diagram and energy level diagram)

নির্দিষ্ট টার্গেট ধাতুর জন্য সাধারণত একাধিক বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি চূড়া (প্রকৃতপক্ষে রেখা বর্ণালী) পাওয়া যায়, চিত্র 8.4। প্রতিটি চূড়ার কম্পাঙ্ক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য আলাদা। টার্গেটের ওপর আপতিত ইলেকট্রনটি যদি টার্গেট পরমাণুর K কক্ষপথের একটি ইলেকট্রনকে কক্ষচ্যুত করে এবং সেই শূন্যস্থান পূরণ করতে যদি L, M, N ইত্যাদি বিভিন্ন কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রনের সংক্রমণ হয়, (L, M, N $\rightarrow$ K) তাহলে উদ্ভূত বর্ণালীরেখাগুলিকে K-শ্রেণির রেখা বা K-রেখা বলা হয়। অনুরূপভাবে M, N ইত্যাদি কক্ষপথ থেকে L কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে (M, N $\rightarrow$ L) উদ্ভূত রেখা বর্ণালীগুলিকে বলা হয় L রেখা ; ইত্যাদি। এই K, L প্রভৃতি শ্রেণির অন্তর্ভুক্ত স্বতন্ত্র রেখাগুলিকে যথাক্রমে K_α (L $\rightarrow$ K), K_β (M $\rightarrow$ K), K_γ (N $\rightarrow$ K) ইত্যাদি নামে চিহ্নিত করা হয়। এই বিভিন্ন শ্রেণির রেখাগুলির উৎপত্তি 8.5 চিত্রে দেখানো হল।

চিত্র 8.5 কোসেল চিত্র

এই জাতীয় চিত্রকে কোসেল চিত্র (Kössel diagram) বলা হয়। আনুষঙ্গিক শক্তিস্তর চিত্র 8·6-এ দেখানো হল।

এই কোসেল প্রকল্প অনুসারে যথাযথভাবে ইলেকট্রন দ্বারা পরিপূর্ণ পরমাণুর শক্তিকে শূন্য ধরা হয়। এখন বাহ্যিক একটি ইলেকট্রন দ্বারা সংঘর্ষের ফলে একটি শূন্য গতিশক্তি সম্পন্ন K-ইলেকট্রন নিঃসৃত হলে ওই পরমাণু সংস্থাটির (আয়নিত পরমাণু এবং নিঃসৃত শূন্য গতিশক্তিসম্পন্ন ইলেকট্রন) মোট শক্তি বেড়ে E_K হয়, কারণ ইলেকট্রনটিকে কক্ষচ্যুত করতে E_K পরিমাণ শক্তি সরবরাহ করা হয়েছে পরমাণুটিকে। একইভাবে সংঘর্ষের ফলে যদি L কক্ষপথের একটি ইলেকট্রন বিচ্ছিন্ন হয়, তাহলে পরমাণু সংস্থাটির শক্তি তার আদি শক্তি অপেক্ষা E_L পরিমাণে বেশি হয়। চিত্র 8.6-এ পরমাণুর এই বিভিন্ন শক্তিস্তর সমূহ কতকগুলি অনুভূমিক রেখার সাহায্যে বোঝানো হয়েছে। তৃতীয় এককের আলোচনা থেকে আমরা দেখেছি যে $E_K > E_L > E_M$ ইত্যাদি। চিত্র 8.6 সেভাবেই আঁকা হয়েছে, অর্থাৎ K স্তরটি সবার ওপরে, ইত্যাদি। এখন একথা সহজবোধ্য যে একটি K ইলেকট্রনবিহীন পরমাণুর মধ্যে যখন একটি ইলেকট্রন L কক্ষপথ থেকে K কক্ষপথে সংক্রমিত হয়, তখন পরমাণুটি K শক্তিস্তর থেকে L শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয়। এই দুই স্তরের শক্তি পার্থক্য, $E_K - E_L$, নিঃসৃত এক্স-রশ্মি ফোটনের শক্তির সমান। বিভিন্ন সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত রেখাগুলিকে $\alpha, \beta, \gamma, \ldots\ldots$ ইত্যাদি চিহ্ন দ্বারা বোঝানো হয় ঃ

চিত্র 8.6 এক্সরশ্মি লাইনের উৎপত্তি

$K \rightarrow L : K_\alpha$ লাইন	$L \rightarrow M : L_\alpha$ লাইন
$K \rightarrow M : K_\beta$,,	$L \rightarrow N : L_\beta$,,
$K \rightarrow N : K_\gamma$,,	$L \rightarrow O : L_\gamma$,,

উপরোক্ত এক্স-রশ্মি রেখা বর্ণালী (বা চূড়া) গুলির কম্পাঙ্ক অতি সহজেই নির্ণয় করা যায়—

$$\nu(K_\alpha) = \frac{E_K - E_L}{h}, \quad \nu(K_\beta) = \frac{E_K - E_M}{h},$$

$$\nu(L_\alpha) = \frac{E_L - E_M}{h}, \quad \nu(L_\beta) = \frac{E_L - E_N}{h}$$ ইত্যাদি।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে বোঝা গেল যে টার্গেট ধাতুর বিভিন্ন কক্ষপথের মধ্যে ইলেকট্রনের সংক্রমণের ফলেই বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি সৃষ্টি হয়। স্বাভাবিকভাবেই এই রেখা বা চূড়াগুলির কম্পাঙ্ক ওই টার্গেট ধাতুর প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে। অর্থাৎ এই রেখাগুলি টার্গেট ধাতুর বৈশিষ্ট্যসূচক। পরবর্তীকালে সূক্ষ্ম পরিমাপে জানা গেছে যে এই রেখা বর্ণালীগুলির প্রত্যেকটিরই সূক্ষ্ম গঠন (fine structure) হয়। এই সূক্ষ্ম গঠন ব্যাখ্যা করা সম্ভব n, l এবং j—এই তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা ব্যবহার করে।

8.6 মোজ্‌লের সূত্র (Mosseley's law)

বিজ্ঞানী মোজ্‌লে এক্স-রশ্মির কম্পাঙ্ক (ν) এবং টার্গেটের পারমাণবিক সংখ্যা (Z)-এর মধ্যে একটি গুরুত্বপূর্ণ সম্পর্ক আবিষ্কার করেন। তিনি দেখান যে এক্স রশ্মির কম্পাঙ্কের বর্গমূল $\sqrt{\nu}$ টার্গেটের পারমাণবিক সংখ্যার (Z) সাথে সমানুপাতিক। চিত্র 8.7-এ তাঁর পরীক্ষালব্ধ ফলাফল দেখানো হয়েছে। এটিকে মোজ্‌লে চিত্র বলে। এই চিত্রের পৃথক নতিযুক্ত সরলরেখাগুলি K_α এবং K_β রেখা নির্দেশ করে। এই সরলরেখাগুলিকে $\sqrt{\nu} = C_1(Z - a)$ 8.4

বা, $\nu = C(Z - a)^2$ 8.5

চিত্র 8.7 মোজ্‌লে সূত্র

সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায় যেখানে C_1, C এবং a হচ্ছে ধ্রুবক। এই ধ্রুবক a-কে পর্দা ধ্রুবক (screening constant) বলা হয়। দেখানো যায় যে K_α শ্রেণির ক্ষেত্রে $C = \frac{3}{4}Rc$ যেখানে R হচ্ছে রীডবার্গ

ধ্রুবক এবং c হচ্ছে শূন্য মাধ্যমে আলোর বেগ। এগুলি ব্যবহার করে পাওয়া যায় K_α শ্রেণির জন্য $a \simeq 1$ এবং K_β শ্রেণির জন্য $a \simeq 7.4$, যার ফলে লেখা যায়—

$$\nu_{K_\alpha} = \frac{3}{4} Rc(Z-1)^2$$

$$= Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) \qquad \text{..... 8.6}$$

ইতিপূর্বে তৃতীয় এককে আমরা দেখেছি যে বোর তত্ত্ব থেকে লাইম্যান শ্রেণির প্রথম বর্ণালীরেখাটির কম্পাঙ্কের সমীকরণটি 8.6 সমীকরণের অনুরূপ। পার্থক্য কেবলমাত্র Z-এর পরিবর্তে (Z – 1) পদটির উপস্থিতি।

আমরা ইতিপূর্বেই রসায়নবিদ্যায় পড়েছি যে পর্যায় সারণীতে বিভিন্ন মৌলগুলিকে ক্রমবর্ধমান পারমাণবিক ভার (atomic weight), W অনুযায়ী তালিকাবদ্ধ করেছিলেন রুশ বিজ্ঞানী মেণ্ডেলিয়েভ (Mendeleev)। কিন্তু পরবর্তীকালে এই সারণীতে কিছু অসংলগ্নতা লক্ষ্য করা যায়। যেমন মেণ্ডেলিয়েভ Fe, Ni এবং Co ক্রমানুসারে সাজিয়েছিলেন। কিন্তু রাসায়নিক ধর্মানুসারে এই ক্রম হওয়া উচিত Fe, Co এবং Ni। দেখা গেল যে মোজ্‌লের চিত্রানুসারে এই Fe, Co এবং Ni ক্রমই রাসায়নিক ফলাফলকে সমর্থন করে। এর থেকে বোঝা গেল যে পারমাণবিক ভার নয়, পারমাণবিক সংখ্যা (atomic number), Z, অনুযায়ী মৌলগুলিকে সাজানো উচিত। মোজ্‌লের সূত্রের ব্যবহার করে আরও পরবর্তীকালে সেই সময় পর্যন্ত অনাবিষ্কৃত হাফনিয়াম (Hf, 72), ইলিনিয়াম (Pm, 61) এবং টেকনেটিয়াম (Tc, 43) মৌলগুলি আবিষ্কৃত হয়।

8.6.1 বোর তত্ত্ব থেকে মোজ্‌লে সূত্রের ব্যাখ্যা (Explanation of Mosseley's law from Bohr's theory)

বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি উৎপত্তির যে কারণ আমরা §8·5·4-এ আলোচনা করেছি তার থেকেই মোজ্‌লে সমীকরণ—

$$\nu_{K_\alpha} = Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right)$$

ব্যাখ্যা করা যায় সহজেই। আমরা দেখেছি যে L-খোলক (n = 2) থেকে K-খোলকে (n =1) ইলেকট্রনের সংক্রমণের ফলে K_α রেখার উৎপত্তি হয়। বোর তত্ত্ব অনুসারে কোনো হাইড্রোজেনপ্রতিম পরমাণুর ক্ষেত্রে $n = 2$ থেকে $n = 1$ কক্ষপথে ইলেকট্রনের সংক্রমণ হলে যে বিকিরণ হয় তার কম্পাঙ্ক হবে $\nu = Rc\,Z^2\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right)$।

এই হাইড্রোজেন প্রতিম পরমাণুতে কেবলমাত্র একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আছে যার ওপর গোটা নিউক্লিয়াসের আধান + Ze ক্রিয়ারত এবং তার ফলে কুলম্ব আকর্ষণ বল সৃষ্টি হয়। এই কারণেই উপরোক্ত রাশিমালায় Z^2 পদটির উপস্থিতি। কিন্তু K_α এক্স-রশ্মি নিঃসরণের ক্ষেত্রে টার্গেট পরমাণুটির দুটি K-ইলেকট্রনের মধ্যে একটি বহিস্থ ইলেকট্রনের সংঘাতে ছিটকে যাওয়ার পর K খোলকে কেবলমাত্র একটি ইলেকট্রন উপস্থিত থাকে। এই ইলেকট্রনটির ঋণাত্মক আধান আংশিকভাবে নিউক্লিয়াসের আধান + Ze-কে আড়াল করে, যাতে করে L-ইলেকট্রনের ওপর কার্যকর কুলম্ব বল কার্যত + (Z – 1) e পরিমাণ আধানের জন্য উৎপন্ন হয়। যেহেতু K_α বিকিরণ উৎপন্ন হয় একটি L-ইলেকট্রনের K খোলকে সংক্রমণের ফলে, সেইহেতু স্পষ্টতই 8.6 সমীকরণে $(Z - 1)^2$ পদটির উপস্থিতি বোধগম্য হয়।

8.6.2 K এবং L শ্রেণির এক্স-রশ্মি বর্ণালী রেখার কম্পাঙ্ক (Frequencies of K and L series X-ray spectral lines) :

ওপরের আলোচনা থেকে আমরা জানতে পারলাম যে কোন্ সংক্রমণের ফলে কোন্ বর্ণালীরেখা সৃষ্টি হয় এবং মোজ্‌লের সূত্রের সাহায্যে কীভাবে তার কম্পাঙ্ক নির্ণয় করা যায়। কয়েকটি কম্পাঙ্ক এভাবে নির্ণয় করা হয় ঃ

K শ্রেণি ঃ K শ্রেণির বর্ণালীরেখাগুলির সাধারণ সমীকরণ হল—

$$\nu_K = Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right), \text{ যেখানে } n = 2, 3, 4, \ldots\ldots$$

(a) এখন K_α রেখার বেলায় n = 2, অতএব,

$$\nu_{K_\alpha} = Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right)$$

$$= \frac{3}{4}Rc(Z-1)^2$$

(b) অন্যদিকে K_β রেখার বেলায় n = 3 ; ফলে,

$$\nu_{K_\beta} = Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}\right)$$

$$= \frac{8}{9}Rc(Z-1)^2$$

অনুরূপভাবে L শ্রেণির জন্য n = 3, 4, 5, ... এবং $a \simeq 7{\cdot}4$; সুতরাং

$$\nu_{L_\alpha} = Rc(Z-7\cdot4)^2\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2}\right)$$

$$= \frac{5}{36} Rc(Z - 7 \cdot 4)^2$$

এবং $\nu_{L_\beta} = Rc(Z - 7 \cdot 4)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)$

$$= \frac{3}{16} Rc(Z - 7 \cdot 4)^2$$

8.7 অনুশীলনী (Exercises)

এই এককে আমরা যে গাণিতিক সূত্রাবলি পেয়েছি বা তৈরি করেছি, সেগুলির কিছু প্রয়োগ আমরা নিম্নবর্ণিত সমস্যা সমাধানে করে দেখাব।

উদাহরণ 1. একটি এক্স-রশ্মি নলের অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে 25,000 V বিভবপ্রভেদ প্রয়োগ করলে উৎপন্ন রশ্মির ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত হবে? দেওয়া আছে যে, $h = 6{\cdot}62 \times 10^{-34}$ J–s, $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ C।

সমাধান : ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অর্থ সর্বোচ্চ কম্পাঙ্ক। উৎপন্ন এক্স-রশ্মির সর্বোচ্চ কম্পাঙ্ক হবে তখনই যখন ইলেকট্রনটি পূর্ণ বিভব প্রভেদের ভিতর দিয়ে গিয়ে সর্বোচ্চ গতিশক্তি লাভ করে এবং টার্গেটে আঘাত করে এই গতিশক্তির পুরোটাই এক্স-রশ্মিতে রূপান্তরিত হয়।

যদি উৎপন্ন রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হয়, তাহলে

$$eV = h\nu_{max} = hc / \lambda_{min} \text{ বা } \lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$$

এক্ষেত্রে $h = 6{\cdot}62 \times 10^{-34}$ J-s, $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ C এবং $c = 3 \times 10^8$ m/s ; সুতরাং

$$\lambda_{min} = \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1{\cdot}6 \times 10^{-19} \times 25{,}000} m$$

$$= 0{\cdot}497 \times 10^{-10} \text{m}$$

$$= 0{\cdot}497 \text{Å}$$

সুতরাং উৎপন্ন ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য হল 0·497Å।

উদাহরণ 2. তামার (Z = 29) K_α এক্স-রশ্মি বর্ণালী রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য 1·5Å হলে মলিবডেনামের (Z = 42) K_α বর্ণালী রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত হবে?

সমাধান : মোজ্‌লের সূত্র থেকে আমরা জানি যে,

$$\nu = C(Z - a)^2$$

যেখানে K_α রেখার ক্ষেত্রে $a = 1$; অতএব,

$$\frac{c}{\lambda} = C(Z-1)^2$$

বা, $\frac{1}{\lambda} \propto (Z-1)^2$, কারণ c এবং C ধ্রুবক।

$$\therefore \frac{\lambda_{M_o}}{\lambda_{Cu}} = \frac{(Z_{Cu}-1)^2}{(Z_{M_o}-1)^2}$$

বা, $\lambda_{M_o} = \lambda_{Cu} \cdot \frac{(29-1)^2}{(42-1)^2}$

বা, $\lambda_{M_o} = 1 \cdot 5 \times \left(\frac{28}{41}\right)^2$

$= 1{\cdot}5 \times 0{\cdot}683$

$= 0{\cdot}6996$

$= 0{\cdot}70$Å

সুতরাং মলিবডেনামের K_α রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য 0·7Å।

উদাহরণ 3. কোনো এক্স-রশ্মি নলে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ দ্বিগুণ করলে অবিচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালীর ক্ষুদ্রতরঙ্গ সীমা (short-wave limit) 0·5Å সরে যায়। ওই এক্স-রশ্মির ক্ষুদ্রতরঙ্গ সীমা কত?

সমাধান : মনে করি, প্রাথমিক বিভব প্রভেদ = V_1 volts

অন্তিম „ „ = V_2 „

প্রাথমিক তরঙ্গদৈর্ঘ্য = λ_1Å

অন্তিম „ = λ_2Å

শর্তানুসারে, $V_2 = 2V_1$

এবং $\lambda_2 = (\lambda_1 - 0{\cdot}5)$

এখন, $\lambda_1 = \frac{hc}{eV_1}$ $\left(\because E_1 = h\nu_1 = h \cdot \frac{c}{\lambda_1} = eV_1\right)$

এবং $\lambda_2 = \frac{hc}{eV_2}$ $\left(\because E_2 = h\nu_2 = h\frac{c}{\lambda_2} = eV_2\right)$

$\therefore \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{V_2}{V_1} = 2$

বা, $\lambda_1 = 2\lambda_2$

বা, $\lambda_1 = 2(\lambda_1 - 0 \cdot 5)$

বা, $\lambda_1 = 1 \text{Å}$

সুতরাং ওই এক্স-রশ্মির ক্ষুদ্রতরঙ্গ সীমা 1Å।

উদাহরণ 4. একটি অজ্ঞাত মৌল 7·41 k eV শক্তির K_α এক্স-রশ্মি উৎপন্ন করে। যদি $h = 6 \cdot 62 \times 10^{-34}$ J-s, $R = 1 \cdot 09 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ এবং $1 \text{ eV} = 1 \cdot 6 \times 10^{-19}$ J হয় তাহলে মৌলটিকে শনাক্ত করুন।

সমাধান : উক্ত রশ্মির শক্তি $E = 7 \cdot 41\ k \text{ eV} = 7 \cdot 41 \times 10^3 \times 1 \cdot 6 \times 10^{-19}$ J

ওই রশ্মির কম্পাঙ্ক ν হলে $E = h\nu$,

অথবা, $\nu = \frac{7 \cdot 41 \times 1 \cdot 6 \times 10^{-16}}{6 \cdot 62 \times 10^{-34}} = 1 \cdot 791 \times 10^{18}$ Hz

মোজ্‌লের সূত্র থেকে K_α রেখার জন্য পাই,

$\nu = \frac{3}{4} Rc(Z-1)^2$, Z = অজ্ঞাত মৌলের পারমাণবিক সংখ্যা।

বা, $1 \cdot 791 \times 10^{18} = \frac{3}{4} \times 1 \cdot 09 \times 10^7 \times 3 \times 10^8 \times (Z-1)^2$

বা, $(Z-1)^2 = \frac{4 \times 1 \cdot 791 \times 10^{18}}{3 \times 1 \cdot 09 \times 3 \times 10^{15}}$

$= 7 \cdot 303 \times 10^2$

বা, $Z - 1 = 27 \cdot 024$

বা, $Z = 28 \cdot 024$

$\simeq 28$, কারণ পারমাণবিক সংখ্যা ভগ্নাংশ হতে পারে না।

সুতরাং অজ্ঞাত মৌলটির পারমাণবিক সংখ্যা 28, অর্থাৎ মৌলটি হচ্ছে নিকেল (Ni)।

উদাহরণ 5. হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণির শ্রেণি সীমার (series limit) 364·6 nm হলে যে মৌলটি 0·1 nm পর্যন্ত এক্স-রশ্মি তরঙ্গদৈর্ঘ্য উৎপন্ন করে তার পারমাণবিক সংখ্যা নির্ণয় করুন। মৌলটিকে শনাক্ত করুন।

সমাধান : আমরা জানি যে বামার শ্রেণির জন্য

$n_f = 2$

$n_i = \infty$ (শ্রেণি সীমার জন্য)

এবং দেওয়া আছে, $\lambda_1 = 364{\cdot}6$ nm $= 364{\cdot}6 \times 10^{-9}$ m

হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে Z = 1 এবং তখন বামার শ্রেণির জন্য

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

বা, $\frac{\nu}{C} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty}\right)$

বা, $\frac{1}{\lambda_1} = R/4$

বা, $R = 4/\lambda_1 = \frac{4}{364{\cdot}6 \times 10^{-9}}$

$= 1{\cdot}0971 \times 10^7\ m^{-1}$

সর্বনিম্ন (এক্স-রশ্মি) তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda_2 = 0{\cdot}1$ nm $= 10^{-10}$ m) হলে শক্তি হবে সর্বোচ্চ। আবার সর্বোচ্চ শক্তি হতে হলে $n_i = \infty$ এবং $n_f = 1$ হবে। তখন মোজ্‌লের সূত্র থেকে পাই,

$$\nu = \frac{c}{\lambda_2} = Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty}\right)$$

বা, $\frac{1}{\lambda_2} = R(Z-1)^2$

বা, $(Z-1)^2 = \frac{1}{R\lambda_2}$

$= 10^{10}/1{\cdot}0971 \times 10^7$

$= 911{\cdot}49$

বা, $Z - 1 = 30{\cdot}19$

বা, $Z = 31{\cdot}19$

$\simeq 31$

অতএব মৌলটির পারমাণবিক সংখ্যা 31 এবং এটি হল গ্যালিয়াম (Ga)।

উদাহরণ 6. একটি এক্স-রশ্মি নলে **20000 V** বিভবপ্রভেদ প্রযুক্ত হয়ে, **2mA** প্রবাহমাত্রা সৃষ্টি করে। এই তথ্য থেকে নির্ণয় করুন (a) টার্গেটের ওপর প্রতি সেকেণ্ডে আঘাতকারী ইলেকট্রনের সংখ্যা, (b) নলে শক্তি উৎপাদনের হার, (c) উৎপন্ন রশ্মির সর্বনিম্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য, এবং (d) টার্গেটে আঘাতকারী ইলেকট্রনের গতিবেগ। দেওয়া আছে, $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ C, $m = 9{\cdot}1 \times 10^{-31}$ kg।

সমাধান :

(a) আমরা জানি যে একক সময়ে প্রবাহিত আধানকে (Q) প্রবাহমাত্রা (I) বলে। যদি একক সময়ে টার্গেটের ওপর n-সংখ্যক ইলেকট্রন আঘাত করে তাহলে

$Q = ne$ এবং $I = Q = ne$

বা, $n = \frac{I}{e} = \frac{2\times10^{-3}}{1\cdot6\times10^{-19}} = 1\cdot25\times10^{16}$

(b) নলে শক্তি উৎপাদনের হার = প্রবাহ × ভোল্টেজ

$= 2 \times 10^{-3} \times 20{,}000$

$= 40\ Js^{-1}$

(c) উৎপন্ন এক্স-রশ্মির সর্বনিম্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য

$\lambda_{min} = \frac{12400}{20000} = 0\cdot62\ Å$

(d) ইলেকট্রনগুলি যদি v বেগ নিয়ে টার্গেটে আঘাত করে তাহলে

$\frac{1}{2}mv^2 = eV$

বা, $v = \sqrt{2eV/m}$

$= \sqrt{\frac{2\times1\cdot6\times10^{-19}\times20000}{9\cdot1\times10^{-31}}}$

$= 8{\cdot}386 \times 10^7\ ms^{-1}$

8.8 সারাংশ (Summary)

এই এককটি পড়ে আপনি জানতে পারলেন যে বিজ্ঞানী রনটুগেন 1895 সালে এই এক্স-রশ্মি আবিষ্কার করেন। প্রথম দিকে গ্যাসভর্তি নল ব্যবহার করে এই রশ্মি উৎপাদন করা হত। পরবর্তীকালে কুলিজ নল

এই কাজে ব্যবহৃত হতে থাকে। এই নলে এক্স-রশ্মির তীব্রতা ও শক্তি পৃথকভাবে নিয়ন্ত্রণ করা যায়। কঠিন এক্স-রশ্মিও এতে উৎপাদন করা যায়।

এক্স-রশ্মি খুব ছোটো (10^{-12} থেকে 10^{-8} m) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ। নির্দিষ্ট টার্গেট এবং বিভব প্রভেদের জন্য উৎপন্ন রশ্মির বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ)-এর জন্য তীব্রতা (I)-এর পরিবর্তন দেখা যায়। এই $I - \lambda$ লেখচিত্রকে এক্স-রশ্মির বর্ণালী বলে। দু'ধরনের বর্ণালী হয়, অবিচ্ছিন্ন এবং বৈশিষ্ট্যমূলক। প্রথম ধরনের বর্ণালী তৈরি হয় 'বিপরীত আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া'র ফলে—অর্থাৎ গতিশীল ইলেকট্রন টার্গেটে আঘাত করে গতিহীন হওয়ার কারণে এক্স-রশ্মি বা বিকিরণ সৃষ্টি হয়। অন্যদিকে বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মি উৎপন্ন হয় বাইরের ইলেকট্রনের আঘাতে টার্গেট পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ ইলেকট্রনীয় গঠনের পরিবর্তনের ফলে। অর্থাৎ দুটি সম্পূর্ণ ভিন্ন প্রক্রিয়ায় এক্স-রশ্মি উৎপন্ন হতে পারে—প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ এবং টার্গেট ধাতুর ওপর নির্ভর করে। বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মির ব্যাখ্যায় বোরের পারমাণবিক গঠনের প্রকল্পটি সুন্দরভাবে গ্রহণযোগ্য ব্যাখ্যা প্রদান করে।

বিজ্ঞানী মোজ্‌লে দেখান যে টার্গেট পরমাণুর পারমাণবিক সংখ্যা এবং নির্গত এক্স-রশ্মির কম্পাঙ্কের বর্গমূলের মধ্যে একটি সমানুপাতিক সম্পর্ক বিদ্যমান। একেই মোজ্‌লে সূত্র বলে। এই সূত্রের ব্যাখ্যাও বোরের তত্ত্ব থেকে পাওয়া যায়। মোজলে সূত্রের বিশেষ সার্থকতা এখানেই যে এই সূত্রের প্রয়োগে পর্যায়সারণীর কিছু মৌলের অবস্থানগত ত্রুটি সংশোধিত হয় এবং কয়েকটি নতুন মৌল আবিষ্কৃত হয়।

8.9 প্রশ্নাবলি (Questions)

1. সংক্ষিপ্ত উত্তর দিন ঃ

(i) এক্স-রশ্মি কী ধরনের রশ্মি?

(ii) এক্স-রশ্মির কম্পাঙ্কের এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা কত?

(iii) এক্স-রশ্মির তীব্রতা কীভাবে নিয়ন্ত্রণ করা যায়?

(iv) কঠিন ও কোমল এক্স-রশ্মি কাদের বলে?

(v) এক্স-রশ্মির সর্বনিম্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য কীভাবে নিয়ন্ত্রণ করা যায়?

(vi) কাচ মাধ্যমে দৃশ্যমান আলো এবং এক্স-রশ্মির মধ্যে কার গতিবেগ বেশি এবং কেন?

(vii) অবিচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালীকে একটি লেখচিত্রে এঁকে দেখান।

(viii) অবিচ্ছিন্ন এক্স-রশ্মি বর্ণালীর উৎপত্তির ব্যাখ্যা কী?

(ix) বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রশ্মির উৎপত্তির ব্যাখ্যা কী?

(x) মোজ্‌লে সূত্রটি বিবৃত করুন।

মানুষের জ্ঞান ও ভাবকে বইয়ের মধ্যে সঞ্চিত করিবার যে একটা প্রচুর সুবিধা আছে, সে কথা কেহই অস্বীকার করিতে পারে না। কিন্তু সেই সুবিধার দ্বারা মনের স্বাভাবিক শক্তিকে একেবারে আচ্ছন্ন করিয়া ফেলিলে বুদ্ধিকে বাবু করিয়া তোলা হয়।

—*রবীন্দ্রনাথ ঠাকুর*

ভারতের একটা mission আছে, একটা গৌরবময় ভবিষ্যৎ আছে, সেই ভবিষ্যৎ ভারতের উত্তরাধিকারী আমরাই। নূতন ভারতের মুক্তির ইতিহাস আমরাই রচনা করছি এবং করব। এই বিশ্বাস আছে বলেই আমরা সব দুঃখ কষ্ট সহ্য করতে পারি, অন্ধকারময় বর্তমানকে অগ্রাহ্য করতে পারি, বাস্তবের নিষ্ঠুর সত্যগুলি আদর্শের কঠিন আঘাতে ধূলিসাৎ করতে পারি।

—*সুভাষচন্দ্র বসু*

Any system of education which ignores Indian conditions, requirements, history and sociology is too unscientific to commend itself to any rational support.

—*Subhas Chandra Bose*

Price : Rs. 225.00

(*NSOU*-র ছাত্রছাত্রীদের কাছে বিক্রয়ের জন্য নয়)

Published by : Netaji Subhas Open University, DD-26, Sector-1, Salt Lake City, Kolkata-700 064 and Printed at : Royal Halftone Co., 4, Sarkar Bye Lane, Kolkata-700 007