NETAJI SUBHAS OPEN UNIVERSITY

STUDY MATERIAL

ELECTIVE CHEMISTRY HONOURS

ECH 01

GENERAL CHEMISTRY

- Atoms, Molecules and Structure of Matter

Block 1

প্রাক্‌কথন

নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়ের স্নাতকশ্রেণির জন্য যে পাঠক্রম প্রবর্তিত হয়েছে, তার লক্ষণীয় বৈশিষ্ট্য হল প্রতিটি শিক্ষার্থীকে তাঁর পছন্দমতো কোনও 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 বিশ্ববিদ্যালয়সমূহের পাঠক্রম অনুসরণ করে তার আদর্শ উপকরণগুলির সমন্বয়ে রচিত হয়েছে এই পাঠক্রম। সেই সঙ্গে যুক্ত হয়েছে অধ্যেতব্য বিষয়ে নতুন তথ্য, মনন ও বিশ্লেষণের সমাবেশ।

দূর-সঞ্চারী শিক্ষাদানের স্বীকৃত পদ্ধতি অনুসরণ করেই এইসব পাঠ-উপকরণ 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 হ'তে 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

তৃতীয় পুনর্মুদ্রণ : মার্চ, 2020

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

পরিচিতি

বিষয় : রসায়নবিদ্যা   সাম্মানিক স্তর

পাঠক্রম : পর্যায় : ECH 01 : 01

	রচনা	সম্পাদনা
একক 1	ড. চন্দন পাল	ড. ব্রজেশ চন্দ্র সেন
একক 2	ঐ	ঐ
একক 3	ড. রথীন্দ্র নাথ ঘোষ	ঐ
একক 4	ড. চন্দন পাল	ঐ
একক 5	ড. রথীন্দ্র নাথ ঘোষ	ঐ

প্রজ্ঞাপন

এই পাঠ-সংকলনের সমুদয় স্বত্ব নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়ের দ্বারা সংরক্ষিত। বিশ্ববিদ্যালয় কর্তৃপক্ষের লিখিত অনুমতি ছাড়া এর কোনও অংশের পুনর্মুদ্রণ বা কোনওভাবে উধৃতি সম্পূর্ণ নিষিদ্ধ।

মোহন কুমার চট্টোপাধ্যায়
নিবন্ধক

নেতাজি সুভাষ মুক্ত বিশ্ববিদ্যালয়

ECH 01

সাধারণ রসায়ন

(স্নাতক পাঠক্রম)

পর্যায়

1

পরমাণুসমূহ, অণুসমূহ ও পদার্থের গঠন—I

একক	1	পরমাণুর গঠন পশ্চাদ্‌পট, প্রাথমিক ধারণা, মৌলিক কণাসমূহের আবিষ্কার, রাদারফোর্ডের রূপকল্প	7-38
একক	2	পরমাণুর গঠন : কোয়ান্টাম তত্ত্ব এবং ইলেকট্রন বিন্যাস	39-105
একক	3	তরঙ্গাবলবিদ্যা : তরঙ্গযান্ত্রিক পরমাণু	106-181
একক	4	রাসায়নিক বন্ধনী : আয়নীয় ও সমযোজী বন্ধনী	182-240
একক	5	রাসায়নিক বন্ধনীর তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা	241-311

একক 1 ☐ পরমাণুর গঠন পশ্চাদপট, প্রাথমিক ধারণা, মৌলিক কণা সমূহের আবিষ্কার রাদারফোর্ডের রূপকল্প

গঠন

1.1 প্রস্তাবনা,

উদ্দেশ্য

1.2 কয়েকটি প্রাথমিক জ্ঞাতব্য :

1.2.1 কয়েকটি প্রচলিত ধ্রুবকের মান

1.2.2 বহুল ব্যবহৃত কয়েকটি মাত্রা নির্দেশক উপসর্গ

1.2.3 কয়েকটি ভৌতরাশি ও তাদের একক

1.3 নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ :
ইলেকট্রনের আবিষ্কার

1.4 আলোর ধর্ম

1.5 আপেক্ষিকতা তত্ত্বের প্রাসঙ্গিক জ্ঞাতব্য

1.6 তেজস্ক্রিয়তার প্রাথমিক ধারণা

1.7 রাদারফোর্ডের α-রশ্মির বিচ্ছুরণ-পরীক্ষা

1.7.1 রাদারফোর্ডের পারমাণবিক রূপকল্প : পরমাণু কেন্দ্রকের ধারণা

1.7.2 রাদারফোর্ড রূপকল্পের সীমাবদ্ধতা

1.8 মৌলিক কণা প্রোটন ও নিউট্রনের আবিষ্কার

1.9 সারাংশ

1.10 প্রশ্নাবলি
1.11 উত্তরমালা

1.1 প্রস্তাবনা

রসায়ন শাস্ত্রের প্রধান লক্ষ্য হল বিভিন্ন পদার্থের ধর্ম ও পারস্পরিক বিক্রিয়া সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট ধারণা গড়ে তোলা। এজন্য বিভিন্ন পদার্থের গঠন সম্পর্কে একটি যথাযথ এবং স্বচ্ছ ধারণা বিশেষ প্রয়োজন। পদার্থের গঠন সম্পর্কে প্রাচীনতম মতবাদটির জনক গ্রীক দার্শনিক ডেমোক্রিটাস (~400 খ্রীঃ পূঃ)। প্রাচীন ভারতীয় দর্শনে কণাদ পদার্থের গঠন প্রসঙ্গে মৌলিক কণার কল্পনা করেন। বিভিন্ন যুগে বিভিন্ন দেশের বৈজ্ঞানিক দর্শনে পদার্থের পারমাণবিক গঠন সম্পর্কে কল্পনা করা হয়েছে। মূলত এগুলি ছিল দার্শনিক মতবাদ ; কোন বাস্তব পরীক্ষা নিরীক্ষার ভিত্তিতে অর্থাৎ আধুনিক বৈজ্ঞানিক পদ্ধতিতে এই মতবাদগুলি পরিক্ষীত বা প্রতিষ্ঠিত নয়।

প্রচলিত পদার্থের গঠন সম্পর্কের সর্বপ্রথম তাত্ত্বিক ধারণাটি দেন ব্রিটিশ রসায়ণবিদ জন ডালটন। ডালটনের পারমাণবিক তত্ত্বে পরমাণুকে ক্ষুদ্র অবিভাজ্য কণারূপে কল্পনা করা হয়েছিল। উনবিংশ শতাব্দির একেবারে শুরুতে তার প্রস্তাবিত ধারণার মূলে ছিল রাসায়নিক সংযোগ সূত্রাবলীর পরীক্ষাসমূহ, বস্তুত ভরের সংরক্ষণ সূত্র, স্থিরানুপাত সূত্র, গুণানুপাত ও মিথানুপাত সূত্রগুলি ডালটনের পরমাণুবাদের সাহায্যে সুন্দরভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। এজন্য ডালটনের পরমাণুবাদই বিজ্ঞানে আধুনিক পরমাণুতত্ত্বের সূচনা করে।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করে আপনি—

- পরমাণুর গঠন সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট প্রাথমিক ধারণা করতে সক্ষম হবেন।
- পরমাণুর বিভিন্ন উপাদান যেমন ইলেকট্রন, প্রোটন, নিউট্রন ইত্যাদির বৈশিষ্ট সম্পর্কে জানতে পারবেন।
- ইলেকট্রন আবিষ্কারের পটভূমি সম্পর্কে বিশদভাবে জানতে পারবেন এবং বিশেষত পরমাণু যে অবিভাজ্য নয় তা বুঝিয়ে দিতে পারবেন।

- আলোর ধর্ম এবং বিভিন্ন ধরণের বর্ণালীর প্রকৃতি তথা উৎপত্তির ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- তেজস্ক্রিয়তার প্রাথমিক ধারণা থেকে তেজস্ক্রিয় বিকিরণের বিভিন্ন বৈশিষ্ট সম্পর্কে জানতে পারবেন।
- পরমাণুর গঠন প্রসঙ্গে তেজস্ক্রিয় α–রশ্মির বিচ্ছুরণ পরীক্ষা জেনে এর ফলাফল বিশ্লেষণ করতে পারবেন।
- রাদারফোর্ডের পারমাণবিক রূপকল্পটির সঙ্গে সৌরজগতের সাদৃশ্য তুলনা করতে পারবেন।
- রাদারফোর্ডের রূপকল্পটির সীমাবদ্ধতা নির্দেশ করতে পারবেন।
- সমগ্র এককটির শেষে পরমাণুর গঠন সম্পর্কে একটি বুনিয়াদী ধারণা করতে সক্ষম হবেন।

1.2 কয়েকটি প্রাথমিক জ্ঞাতব্য

উনবিংশ শতাব্দির মাঝামাঝি সময় থেকে ঐ শতাব্দীর শেষ পর্যন্ত প্রায় পঞ্চাশ বছরের মধ্যে পদার্থবিদ্যা এবং রসায়নশাস্ত্রে বিভিন্ন নতুন পরীক্ষা নিরীক্ষা করা হয়। এর মধ্যে উল্লেখযোগ্য হল তড়িৎপ্রবাহ ও চুম্বক ধর্ম সম্পর্কিত গবেষণা, আলোর ধর্ম তথা বর্ণালীর সম্পর্কে বিশদ তথ্য সংগ্রহ এবং তেজস্ক্রিয়তার আবিষ্কার। পদার্থের তাড়িতিক চরিত্রের ব্যাখ্যা প্রসঙ্গে আহিত কণা বা আয়ন এবং বিশেষত তড়িৎ আধানের একক হিসাবে জে. জে. টমসন (J. J. Thomson) কর্তৃক ইলেকট্রনের আবিষ্কার প্রাচীন পরমাণু তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা প্রকটভাবে প্রকাশ করে। এই নতুন পরীক্ষা নিরীক্ষাগুলির ব্যাখ্যা করার জন্য ডালটনের ধারণার পরিবর্তনের প্রয়োজন হয়। বস্তুত প্রাচীন পরমাণুবাদের পরিবর্তে—আমরা একটি আধুনিক রূপকল্পের প্রয়োজন অনুভব করি যা সমসাময়িক পরীক্ষাগুলির যথাযথ ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হবে। তড়িৎ আধানের একক হিসাবে ইলেকট্রনের স্বীকৃতির পরবর্তী সময়ে বিজ্ঞানী রাদারফোর্ড তেজস্ক্রিয়তার প্রয়োগ ঘটিয়ে পরমাণুর গঠন সম্পর্কে একটি আধুনিক রূপকল্পের প্রস্তাব করেন। আলোচ্য এককে আমরা বিভিন্ন তাত্ত্বিক ধারণার বিবর্তনের মধ্যে দিয়ে আধুনিক রূপকল্পটি কিভাবে সুস্পষ্টভাবে প্রতিষ্ঠিত হয় তা দেখব।

এই পর্যায়ে পাঁচটি এককের ক্ষেত্রে আমরা বিভিন্ন ধ্রুবক ব্যবহার করব। এজন্য এগুলির উল্লেখ করে প্রমাণ আন্তর্জাতিক এককে এগুলির মানসহ একটি বিষদ তালিকা এই পর্যায়ের শুরুতেই সংযোজিত হল। বিভিন্ন রাশির মান প্রকাশের জন্য আমরা মাত্রা নির্দেশক উপসর্গ যেমন মিলি, কিলো, ইত্যাদি ব্যবহার করি। এদের সুবিধার জন্য এগুলির চিহ্ন সহ একটি ব্যবহারোপযোগী সারণীও দেওয়া হল। (সারণী 1.1 1.2, 1.3)

সারণী 1.1

কয়েকটি প্রচলিত ধ্রুবকের মান

	প্রতীক	SI এককে মান	
		মান	একক
আলোর গতিবেগ	c	2.99792458×10^{8} $\simeq 3 \times 10^{8}$	ms^{-1}
বোলটজমান (Boitzmann) ধ্রুবক	k	1.38066×10^{-23}	JK^{-1}
সর্বজনীন গ্যাস ধ্রুবক	R	8.314	$JK^{-1}\ mol^{-1}$
প্ল্যাঙ্ক (Hanck) ধ্রুবক	h	6.626×10^{-34}	Js
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	1.054×10^{-34}	Js
প্রাথমিক আধান তড়িত	e	1.602×10^{-19}	C
ইলেকট্রনের ভর	m_e	9.10939×10^{-31}	kg
প্রোটনের ভর	m_p	1.67262×10^{-27}	kg
নিউট্রনের ভর	m_n	1.67493×10^{-27}	kg
শূন্যমাধ্যমের বিদ্যুৎশীলতা	ε_0	8.85419×10^{-12}	$J^{-1}C^{2}m^{-1}$
	$4\pi\varepsilon_0$	1.11265×10^{10}	$J^{-1}C^{2}m^{-1}$
অ্যাভোগাড্রো সংখ্যা (Avogadro number)	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}
বোরের তত্ত্বানুযায়ী হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্ধ (Bohr radius)	$a_0 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{2m_e e^2}$	$= 5.29177 \times 10^{-11}$ $= 52.9177$	m pm

সারণী 1.2

বহুল ব্যবহৃত কয়েকটি মাত্রা নির্দেশক উপসর্গ

f	p	n	µ	m	c	d	k	M	G
ফেমটো (femto)	পিকো (pico)	ন্যানো (nano)	মাইক্রো (micro)	মিলি (milli)	সেন্টি (centi)	ডেসি (deci)	কিলো (kilo)	মেগা (mega)	জিগা (giga)
10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{3}	10^{6}	10^{9}

সারণী 1.3

কয়েকটি ভৌত রাশি ও তাদের একক

রাশি	প্রতীক	মাত্রা	SI একক	প্রতীক	অন্যান্য নাম	একক	প্রতীক
দৈর্ঘ্য (Length)	l	L	মিটার (meter)	m	সেন্টিমিটার (Centimeter)	10^{-2} m	cm
					অ্যাংস্ট্রম (Angstrom)	10^{-10} m	Å
					মাইক্রন (micron)	10^{-6} m	µ
ভর (Mass)	m	M	কিলোগ্রাম (kilogram)	kg	গ্রাম (gram)	10^{-3} kg	g
					পারমাণবিক ভর একক (atomic mass unit)	1.66×10^{-27} kg	amu
সময় (Time)	t	T	সেকেন্ড (Second)	s			
বেগ (Velocity)	V	LT^{-1}	ms^{-1}				

সারণী i.3 (*Contd.*)

রাশি	প্রতীক	মাত্রা	SI একক	প্রতীক	অন্যান্য নাম	একক	প্রতীক
বল (Force)	F	MLT^{-2}	নিউটন (Newton)	N	ডাইন (dyne)	10^{-5} N	dy
ভরবেগ (Momentum)	p	MLT^{-1}	kg ms^{-1}				
কৌণিক ভরবেগ (Angular momentum)	L	ML^2T^{-1}	kg m^2s^{-1}				
শক্তি (Energy)	E	ML^2T^{-2}	জুল (Joule)	J	আর্গ (erg)	10^{-7} J	erg
কার্য (Work)	W				ক্যালোরি (Calorie)	4.19J	Cal
তাপ (Heat)	H				ইলেকট্রন ভোল্ট (electron volt)	1.6×10^{-19} J	ev
কৌণিক সরণ (Angular displacement)	θ	—	রেডিয়ান (radian)				
ত্বরণ (Accelaration)	a	LT^{-2}	m s^{-2}				
কৌণিক বেগ (angular velocity)	ω	T^{-1}	rad s^{-1}				
কম্পাঙ্ক (Frequency)	υ	T^{-1}	হার্জ				
তরঙ্গসংখ্যা	$\bar{\upsilon}$	L^{-1}	cycles s^{-1} = Hertz	HZ			

সারণী 1.3 (*Contd.*)

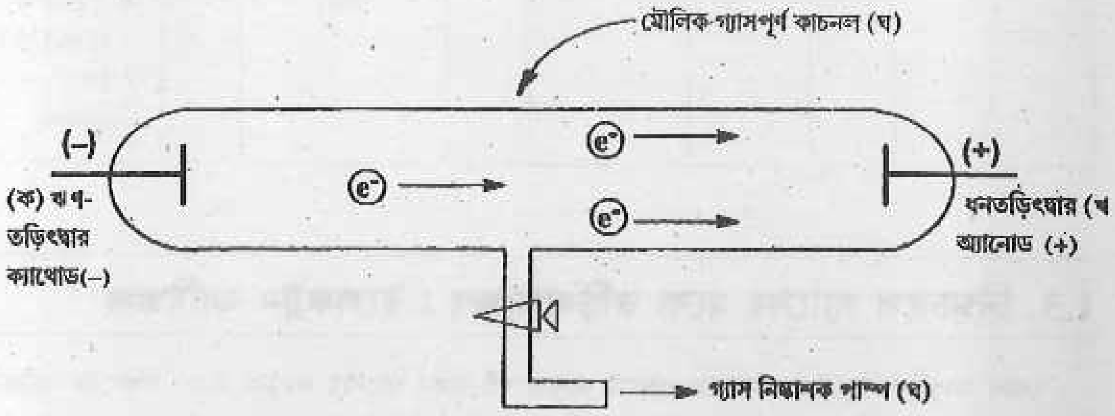
রাশি	প্রতীক	মাত্রা	SI একক	প্রতীক	অন্যান্য একক		
					নাম	প্রতীক	SI এককে মান
কৌণিক কম্পাঙ্ক (Angular (frequency)	ω	T^{-1}	রেডিয়ান/ সেকেন্ড radian/sec.	s^{-1}			
পর্যায়কাল (Period)	T	T	সেকেন্ড (second)	s			
তরঙ্গদৈর্ঘ্য (wavelength)	λ	L	m				
তড়িতাধান (electric charge)	q	Q	Coulomb	C	স্থিরতাড়িতিক একক (electrostatic unit)	esu	1C = 2.997927 × 10^{9} esu বা 1 esu = 3.3356373 × 10^{-10} coulomb

1.3 নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণ : ইলেকট্রন আবিষ্কার

কোন আধুনিক শহরে সন্ধ্যাবেলায় পথঘাট অধিকাংশই রঙিন আলোয় ঝলমল করে। বিদ্যুতের আলোয় উদ্ভাসিত যে কোন জায়গায় ফ্লুরসেন্ট টিউব প্রায়ই লক্ষ্য করা যায়। শহরের পথের এই রঙিন আলো বা সাধারণ ঘরের ছোট টিউবলাইট—সর্বত্রই আলোক উৎস হিসাবে যে ব্যবস্থাটি দেখা যায় তার মূলে থাকে একটি গ্যাসভর্তি কাচনল এবং নলের প্রান্তে অবস্থিত দুটি তড়িৎদ্বার। আয়োজনের দিক থেকে এই ব্যবস্থাটি কোন দ্রবণের মধ্যে তড়িৎ চালনার সমতুল। (কাচনল মধ্যবর্তী গ্যাসটি এক্ষেত্রে দ্রবণের বা মাধ্যমের ভূমিকা পালন করে।) আজ থেকে প্রায় 100 বছরেরও কিছু আগে গ্যাসের মধ্যে দিয়ে তড়িৎ চালনা সংক্রান্ত কিছু পরীক্ষা নিরীক্ষা করেন ব্রিটিশ বিজ্ঞানী স্যার জে. জে. টমসন (J. J. Thomson)। দ্রবণের মধ্যে তড়িৎ পরিবহণে বাহকের ভূমিকা গ্রহণ করে থাকে বিপরীত গতি সম্পন্ন ভিন্ন ভিন্ন তড়িৎদ্বার অভিমুখী বিভিন্ন

ঋণাত্মক বা ঋণাত্মক আধান। গ্যাসের মধ্যে বিদ্যুৎ পরিবহনেও একইরকম ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানযুক্ত কণা বাহকের কাজ করে থাকে। ধনাত্মক আধানযুক্ত কণাগুলি দ্রবণে উপস্থিত ধনাত্মক আয়নের অনুরূপ। কিন্তু ঋণাত্মক আধানগ্রস্ত কণাগুলি দ্রবণের ঋণায়নের তুলনায় অনেক হাল্কা এবং বস্তুত এই এক একটি ঋণাত্মক কণার চেয়ে কম তড়িৎগ্রস্ত ঋণাত্মক আধান পাওয়া যায় না। অর্থাৎ, আধানের দিক থেকে এগুলি একক ঋণাত্মক আধানযুক্ত কণা। মৌলিক গ্যাসগুলির মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণের পরীক্ষার সময়ে এই ঘটনার তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা করার জন্য কেবল ডালটনের পরমাণুবাদই (Dalton's Atomic Theory) স্বীকৃত ছিল। নিস্তড়িৎ পরমাণুর অবিভাজ্যতা ডালটনের পরমাণুবাদের অন্যতম স্বীকার্য, সে কারণে এই ঘটনাগুলি ব্যাখ্যা করার জন্য নতুন তত্ত্বের প্রয়োজন, যেখানে পরমাণু অবশ্যই বিভাজনক্ষম কণা। এ বিষয়ে আরো জানার আগে দেখা যাক জে. জে. টমসনের পরীক্ষাটি কেমন ছিল।

দুইপ্রান্তে দুটি ধাতব তড়িৎদ্বার (যথাক্রমে ঋণতড়িৎদ্বার, ক্যাথোড (ক) ও ধনতড়িৎদ্বার, অ্যানোড (খ)) যুক্ত একটি আবদ্ধ মৌলিক গ্যাসপূর্ণ (যেমন N_2, O_2, ইত্যাদি) কাচনল (গ) কে একটি গ্যাসনিষ্কাশক



চিত্র–1.1 : গ্যাসে তড়িৎমোক্ষণের পরীক্ষা

পাম্প (ঘ)-এর সঙ্গে যুক্ত করে অনেকটা গ্যাস বার করে নিয়ে নলমধ্যবর্তী গ্যাসের চাপ খুবই কমিয়ে দেওয়া হল। (চিত্র 1.1) (পারদস্তম্ভের প্রায় 0.00001 মি.) এই অবস্থায় কোনো উচ্চবিভব সম্পন্ন তড়িৎ বর্তনীতে তড়িৎদ্বারদ্বয় যথাযথভাবে সংযুক্ত করলে ক থেকে একরকম অদৃশ্য রশ্মি বেরিয়ে আসে। এই রশ্মি কাচের দেওয়ালে ধাক্কা দিলে, কাচদেওয়ালের সংশ্লিষ্ট অংশে সবুজ প্রভার সৃষ্টি করে। এই প্রভা সৃষ্টি হলে বোঝা যায়

বর্তনীটি সম্পূর্ণ হয়েছে এবং গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ ঘটছে। পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে এই রশ্মির ধর্ম নিম্নরূপ :

পরীক্ষার ফল	গৃহীত সিদ্ধান্ত
1. এই রশ্মিপথে কোন অভেদ্য বা অস্বচ্ছ বস্তু রাখলে তার পিছনের অংশে অভেদ্য বস্তুর আকৃতি সম্পন্ন সুনির্দিষ্ট ছায়া উৎপন্ন হয়।	1. রশ্মিটি সরলরেখায় গমন করে।
2. এই রশ্মির গতিপথে রাখা কোন চক্রে এরা যান্ত্রিক গতিযুক্ত করতে পারে।	2. রশ্মিটি ভরবেগসম্পন্ন।
3. কোন গ্যাসের মধ্যে দিয়ে পাঠানো হলে এটি সংশ্লিষ্ট গ্যাসকে আয়নিত করে।	3. রশ্মিটি উচ্চশক্তিসম্পন্ন।
4. উপযুক্ত তড়িৎ / চুম্বক ক্ষেত্র দ্বারা রশ্মিটি বিচ্যুত হয়। বস্তুত, এটি ধনতড়িৎক্ষেত্রের দিকে সরে আসে।	4. রশ্মিটি তড়িৎগ্রস্ত কণার সমবায়ে গঠিত। এবং তড়িৎ আধানের মাপ ঋণাত্মক।

সুতরাং এই অদৃশ্য রশ্মিটি গ্যাসের পরমাণুর বিভাজনে উৎপন্ন ভর এবং গতিসম্পন্ন ঋণাত্মক আধানযুক্ত কণার সমন্বয়ে গঠিত হয়। পরমাণুর বিভাজনে প্রাপ্ত এই মৌলিক কণার নাম দেওয়া হয় ইলেকট্রন (electron)।

একটি সুনির্দিষ্ট বিদ্যুৎ ও চুম্বক ক্ষেত্রে ক্যাথোড রশ্মির বিক্ষেপ পরিমাপ করে 1897 খৃঃ স্যার জে. জে. টমসন এই কণাগুলির আধান ও ভরের অনুপাত নির্ণয় করেন। ক্যাথোড-নির্গত এই কণাগুলির ক্যাথোডের উপাদান বা তড়িৎ মোক্ষণে ব্যবহৃত গ্যাসের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে না। ক্যাথোড রশ্মির উপাদান এই ঋণাত্মক কণাগুলির আধান /ভর-এর পরিমাণগত অনুপাত সর্বদাই ধ্রুবক।

$$\frac{\text{ইলেকট্রনের আধান (e)}}{\text{ইলেকট্রনের ভর (m)}} = 1.7588 \times 10^{11} \text{ কুলম্ব / কিগ্রা. Coulomb/kg}$$

অর্থাৎ ভিন্ন ভিন্ন পরীক্ষা ও বিভিন্ন ধাতব উৎস থেকে প্রাপ্ত ক্যাথোড রশ্মির মৌলিক উপাদান অভিন্ন এবং সুনির্দিষ্ট।

পরবর্তী বছর অন্য পরীক্ষার সাহায্যে স্যার টমসন ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করেন। এর ফলে ইলেকট্রনের ভর নির্দিষ্ট করা যায় : এই ভর ক্ষুদ্রতম পরমাণু হাইড্রোজেনের প্রায় 1/1837 বা 5.44×10^{-4} অংশ। পরবর্তীকালে ইলেকট্রনের সূক্ষ্মতর এবং নির্ভুল আধান নির্ণয়ে পৃথক ও মৌলিক পরীক্ষা করেন মিলিকান উইলসন এবং মিলিকান (H. A. Wilson, R. A. Millikan)। বর্তমানে বিভিন্ন পরীক্ষার ফলে প্রমাণিত :

ইলেকট্রনের আধান (e) $= -1.60219 \times 10^{-19}$ কুলম্ব

$= -4.80324 \times 10^{-10}$ স্থির তড়িৎ একক (electrostatic unit) (e.s.u.)

ইলেকট্রনের ভর (m) $= 9.1096 \times 10^{-31}$ কি.গ্রা.

ইলেকট্রনকে একটি অসংকোচনীয় সুবর্তুল (সুষম গোলাকার) কণা হিসাবে কল্পনা করলে এর ব্যাসার্ধ হয় প্রায় 2×10^{-15} মি.।

বিভিন্ন পরীক্ষা করে দেখা যায়, অতি উত্তপ্ত ধাতু থেকে বা উচ্চ শক্তি সম্পন্ন x-রশ্মি বা γ –রশ্মির অভিঘাতে আয়নিত পরমাণু নির্গত ইলেকট্রন, বা কোন কোন তেজস্ক্রিয় পরমাণু থেকে পাওয়া β –কণার মৌলিক উপাদান ইলেকট্রন আসলে একই এবং অভিন্ন কণা। বিভিন্ন রাসায়নিক বিক্রিয়া মূলত ইলেকট্রনের সক্রিয় অংশগ্রহণে সংঘটিত হয়। ইলেকট্রন পরমাণু গঠনের একটি সাধারণ এবং মৌলিক উপাদান। তড়িৎ আধানের বিচারে ইলেকট্রনের চেয়ে আরো ছোট কোন আধান হয় না অর্থাৎ ইলেকট্রন হল তড়িৎ আধানের একক। বলাবাহুল্য, ইলেকট্রন পরমাণুর একটি মৌলিক কণা ; বস্তুত অবপারমাণবিক কণাসমূহের মধ্যে ইলেকট্রনই সর্বপ্রথম আবিষ্কৃত হয়।

1.4 আলোর ধর্ম সম্পর্কিত প্রাথমিক আলোচনা ও কয়েকটি প্রয়োজনীয় জ্ঞাতব্য

আলোর প্রকৃতি ও সৃষ্টি সংক্রান্ত গবেষণা থেকেই কোয়ান্টাম তত্ত্বের সূত্রপাত। সুতরাং কোয়ান্টাম তত্ত্বের আলোচনা শুরু করার আগে আলো কী এ সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট ধারণা থাকা প্রয়োজন। পারমাণবিক ও আণবিক

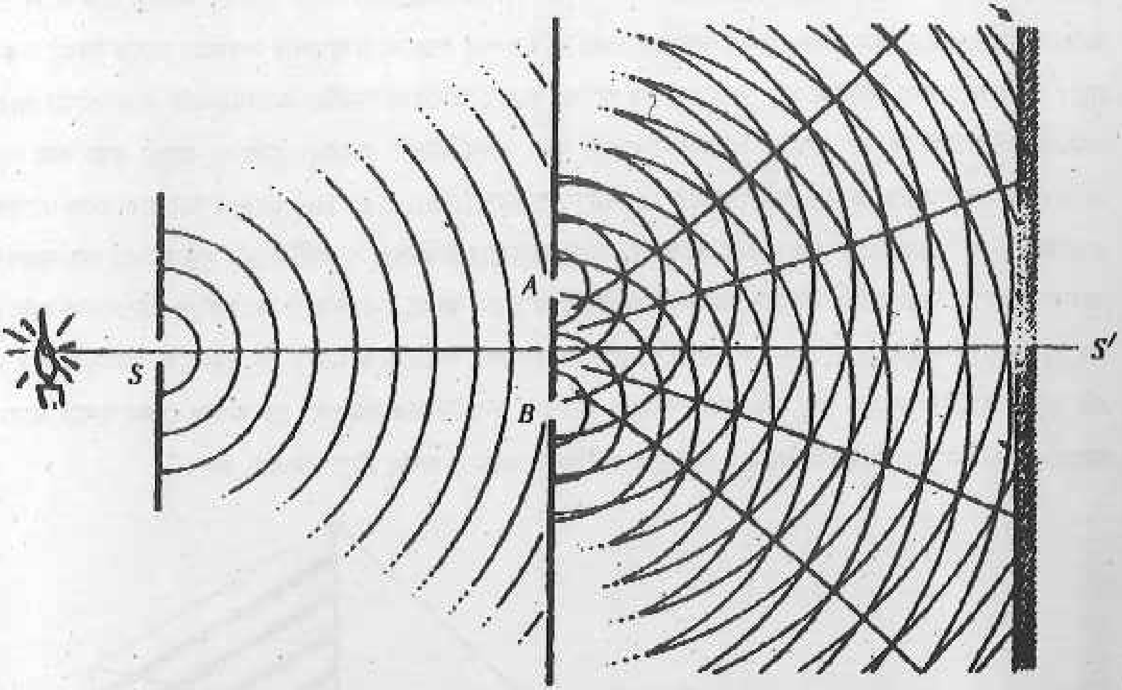
বিকিরণ ও শোষণ বর্ণালী যথাক্রমে পরমাণু বা অণু কর্তৃক যথাক্রমে আলোর বিকিরণ বা শোষণ। কোন পদার্থের অণু বা পরমাণু স্বভাবতই আমাদের দৃষ্টির অগোচর। কিন্তু ঐ পদার্থের বর্ণালী পর্যবেক্ষণ তথা বিশ্লেষণ করে এগুলির গঠন সম্পর্কে ধারণা করতে পারি। বর্ণালী যথাযথভাবে বুঝে নেবার জন্য আলো সম্পর্কে প্রাথমিক জ্ঞান সবিশেষ প্রয়োজনীয়।

আমরা জানি যে আলো এক প্রকার শক্তি। সাধারণভাবে আমরা আলো বলতে শক্তির সেই রূপকে বুঝি যা আমাদের চোখের ওপর প্রভাব ফেলে অথবা যা কিনা আমরা চোখ দ্বারা অনুভব করতে পারি। প্রকৃতপক্ষে বিজ্ঞানে আলো কথাটি আরো ব্যাপক অর্থে ব্যবহৃত হয়, যার অতি ক্ষুদ্র অংশই আমাদের দৃষ্টি গ্রাহ্য। আমাদের অদৃষ্ট আলোও বর্তমান। আলোর প্রধান ধর্মগুলি হল প্রতিফলন (reflection), প্রতিসরণ (refraction), বিচ্ছুরণ (defraction), ব্যতিচার (interferance) এবং ব্যবর্তন (polarisation)। সাধারণভাবে আমরা এও জানি যে আলো সরলরেখায় গমন করে, যদিও আলোর সরলরৈখিক পথ ধরে নিয়ে আলোর সবরকম ধর্মের ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। স্যার আইজাক নিউটন মনে করতেন যে আলো বস্তুতঃ কণিকার সমষ্টি। আলোর এই কণা তত্ত্বের দ্বারা আলোর সরলরৈখিক গতিপথ ও প্রতিফলন ব্যাখ্যা করা সম্ভব হলেও অন্যান্য ধর্মগুলি ব্যাখ্যা করা যায় না। নিউটনের সমসাময়িক অ.ᴊ এক বৈজ্ঞানিক ক্রিস্টিয়ান হাইনস (Christian Huygens) আলোর তরঙ্গ তত্ত্বের প্রস্তাবনা করেন। আলোকে এক প্রকার তরঙ্গ ধরে নিলে আলোর উল্লিখিত সবকটি ধর্মের সুষ্ঠু ব্যাখ্যা করা সম্ভব। আমরা আলোর তরঙ্গধর্মের সাহায্যে আলোর ব্যতিচার কীভাবে ব্যাখ্যা করা যায় তা সংক্ষেপে আলোচনা করব। আলো তরঙ্গের যাত্রাপথে কোন রকম বাধা পড়লে ঐ তরঙ্গের পথ বেঁকে যায়। এই ঘটনাকে ব্যতিচার বলে। এই ব্যতিচার উল্লেখযোগ্য হয় যদি বাধকের মাপ আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমতুল্য হয় অথবা কোন বাধার মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমতুল্য ছিদ্রপথ থাকে। ব্যতিচার পরীক্ষার প্রধান নিদর্শন নীচে দেওয়া হল।

চিত্র–1.2 : আলোর ব্যতিচার। ব্যতিচার ধর্মের জন্য পিছনের পর্দাটি পর্যায়ক্রমে আলোকিত এবং অনালোকিত দেখায়

A ও B ছিদ্রপথ দুটি আলোকের গতিপথে সরাসরি অবস্থিত না হওয়ায় ব্যতিচার ছাড়া পিছনের 'S'' পর্দাটি আলোকিত হওয়ার কথা নয়।

ব্যতিচার সংক্রান্ত এই পরীক্ষার একটি উল্লেখযোগ্য ঘটনা হল 'S'' পর্দাটির সর্বত্র একইরকম ভাবে আলোকিত হয় না। বরং ঐ পর্দার ওপর পর্যায়ক্রমে অনেকগুলি উজ্জ্বল ও অনুজ্জ্বল রেখার সৃষ্টি হয়। এই ঘটনাকে A এবং B ছিদ্রমুখে ব্যতিচারের ফলে সৃষ্ট আলোক তরঙ্গসমূহের মধ্যে সঙ্গত উপরিপাত ছাড়া ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়।

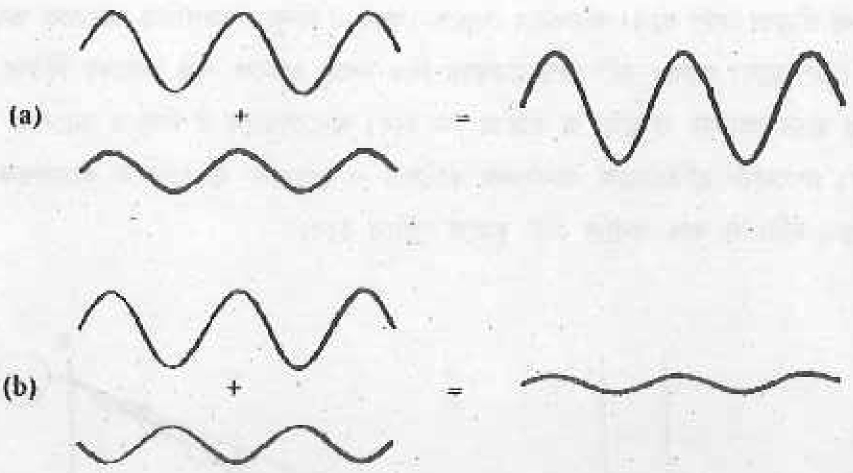


চিত্র—1.3 : আলোকের ব্যতিচার পরীক্ষা
ব্যতিচার না হলে S′ পর্দাটি সম্পূর্ণ অন্ধকার হত।

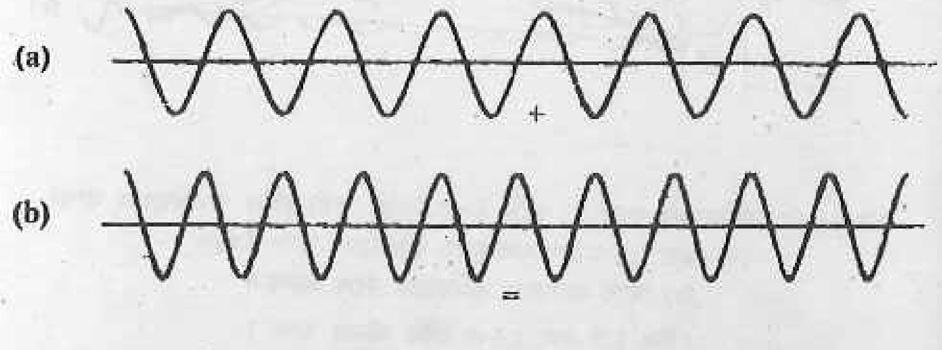
আলোর ব্যতিচার তথা চিত্র 1.2-এ বর্ণিত পর্দার উপর সৃষ্ট উজ্জ্বল ও অনুজ্জ্বল আলোকিত অংশের উৎপত্তি তরঙ্গের উপরিপাত নীতির সাহায্যে যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। তরঙ্গের উপরিপাত সমস্ত রকম তরঙ্গের একটি বৈশিষ্ট্য।

উপরিপাত নীতি

যখন কোন একটি বিন্দুর উপর দিয়ে একাধিক সমধর্ম বিশিষ্ট তরঙ্গ একইসময়ে প্রবাহিত হয় তখন ঐ বিন্দুর বিস্তারের মাত্রা ঐ বিন্দুতে তরঙ্গগুলির বিস্তারের যোগফলের সমান হয়।

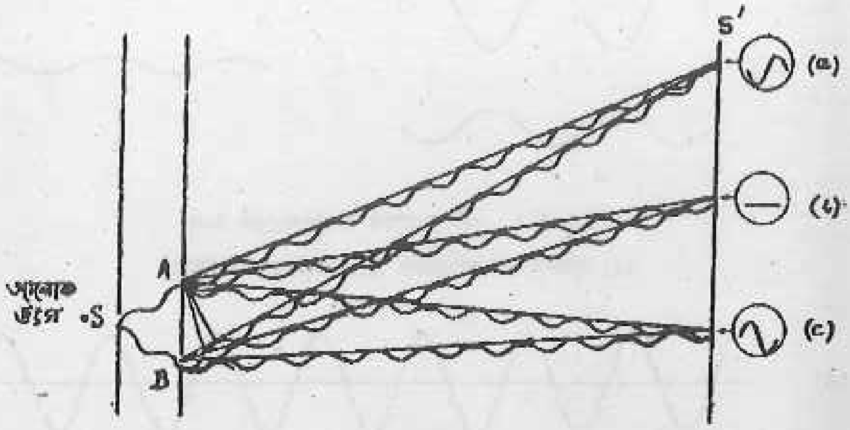


চিত্র–1.4 : দুটি তরঙ্গের উপরিপাতের ফল
(a) সৃজনমূলক ব্যতিচার, (b) ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার



চিত্র–1.5 : দুটি তরঙ্গের (a, b) উপরিপাতের ফলে সৃষ্ট লব্ধি তরঙ্গ (c)

দুটি তরঙ্গ কোন একটি বিন্দুতে মিলিত হলে ঐ তরঙ্গদ্বয়ের আপেক্ষিক দশার (Relative Phase) ওপর নির্ভর করে ঐ তরঙ্গদ্বয়ে সৃষ্ট ব্যতিচারের ধরণ বিভিন্ন রকম হবে। যদি তরঙ্গ দুটি সমাদশাসম্পন্ন হয় তা হলে ঐ তরঙ্গদ্বয়ের ব্যতিচারের ফলে সৃষ্ট লব্ধিতরঙ্গের বিস্তার দীর্ঘতর হবে এবং ঐ স্থানে আলোর ঔজ্জ্বল্য বা তীব্রতা বেশি হবে। অন্যভাবে দেখতে গেলে ঐ বিন্দুতে আপতিত আলোক তরঙ্গবাহিত শক্তির পরিমাণ বেশি হবে। আবার ব্যতিক্রান্ত তরঙ্গদ্বয় ভিন্ন দশায় থাকলে লব্ধি-তরঙ্গের বিস্তার কম হবে এবং ঐ বিশেষ স্থানে আলোর ঔজ্জ্বল্য বা তীব্রতা কম হবে। সাধারণভাবে ঐ বিন্দুতে আলোক শক্তির পরিমাণ কম হবে। প্রথমোক্ত ব্যতিচারকে গঠনমূলক ব্যতিচার ও শেষোক্ত ব্যতিচারকে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার বলা হয়। নীচের ছবিগুলি লক্ষ করলে এটি বুঝতে সুবিধে হবে।



চিত্র—1.6 : ব্যতিচারের ফলে S′ পর্দার উপর উৎপন্ন পর্যায়ক্রমিক আলোছায়ার ব্যাখ্যা
(a) এবং (c) অংশে সৃজনমূলক ব্যতিচারের ফলে উজ্জ্বল
(b) অংশে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের ফলে অনুজ্জ্বল
[চিত্র 1.2 এবং 1.3-এ বর্ণিত ঘটনার ব্যাখ্যা]

A ও B ছিদ্রমুখে উৎপন্ন রশ্মিগুলি যথাক্রমে ভিন্ন দৈর্ঘ্যের পথ অতিক্রম করে S′ পর্দার বিভিন্ন বিন্দুতে পৌঁছায়। রশ্মিগুলির দশার বিভিন্নতা অনুসারে কোন একটি বিন্দুতে সমাগত দুটি রশ্মির মধ্যে যদি গঠনমূলক ব্যতিচার হয় তা হলে ঐ স্থানটি আলোকিত হয় কিন্তু ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের কারণে ঐ স্থানটি তুলনামূলকভাবে অন্ধকারাচ্ছন্ন হয়ে থাকে।

আলোচনার এই পর্যায়ে আমরা দেখব ইলেকট্রন এবং অন্যান্য সূক্ষ্ম অবপারমাণবিক কণা (Subatomic

particle) তরঙ্গধর্ম বিশিষ্ট হয়ে থাকে। ইলেকট্রনের তরঙ্গধর্ম দ্বারা রাসায়নিক বন্ধনীর আলোচনার সময় আমরা তরঙ্গের উপরিপাতনীতি ও ব্যতিচার ধর্মের বিশেষ প্রয়োগ করব।

বিজ্ঞানী মাইকেল ফ্যারাডে (Michael Faraday) 1831 খ্রীষ্টাব্দে প্রমাণ করেন যে কোন পরিবর্তনশীল চৌম্বক ক্ষেত্র কোন তড়িৎ পরিবাহীর ওপর ক্রিয়া করে ঐ পরিবাহীতে তড়িৎ প্রবাহ সঞ্চারিত করতে পারে। অর্থাৎ পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র থেকে একটি তড়িৎ ক্ষেত্রের উদ্ভব হয়। পরবর্তীকালে 1834 খ্রীষ্টাব্দে জেমস ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল (James Clerk Maxwell) ধারণা করেন যে পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্র থেকেও চৌম্বক ক্ষেত্রের সৃষ্টি হয়। সুতরাং পর্যায়ক্রমে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র ও তড়িৎক্ষেত্র একই সাথে থাকলে তা থেকে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের সৃষ্টি হবে। ম্যাক্সওয়েল গণনা করে দেখান এরকম তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের শূন্যে গতিবেগ c হলে

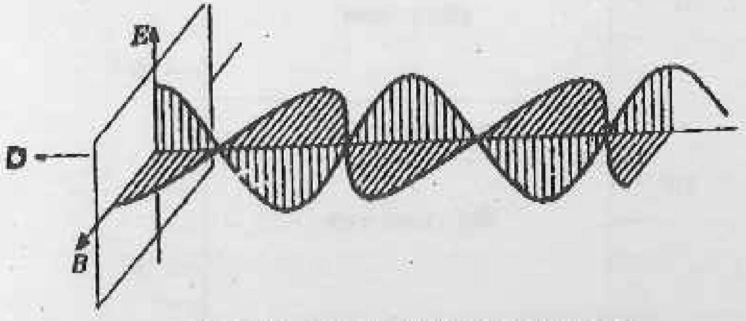
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad \text{......... (1.1)}$$

এক্ষেত্রে ε_0—মাধ্যমের বিদ্যুৎশীলতা

μ_0—মাধ্যমের চুম্বকশীলতা।

$c = 3 \times 10^8$ meter/sec.

অর্থাৎ এই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের শূন্যে গতিবেগ আলোর শূন্যে গতিবেগের সমান। এর থেকে ম্যাক্সওয়েল সিদ্ধান্ত করেন যে আলোক একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। আলোক তরঙ্গ প্রবাহের অভিমুখের সঙ্গে উল্লম্বভাবে তড়িতক্ষেত্রের ভেক্টর এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের ভেক্টর দুটি আন্দোলিত হয়। এই দুটি ক্ষেত্রে পরস্পরের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে।



চিত্র–1.7 : আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ

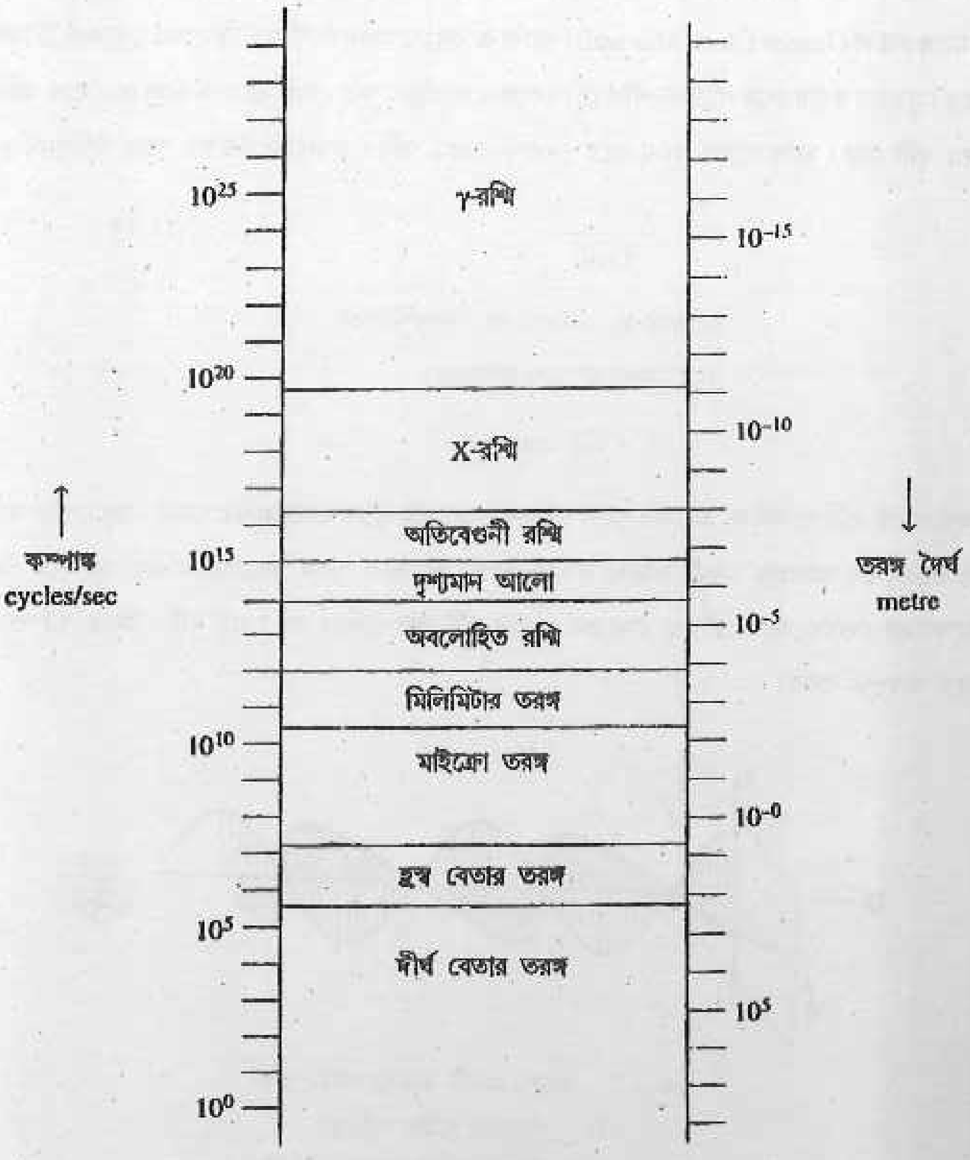
D : আলোর গতির অভিমুখ

E : সংশ্লিষ্ট তড়িৎ ক্ষেত্রের অভিমুখ

B : সংশ্লিষ্ট চুম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ

বস্তুত আলো, যা কিনা তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ, তা কেবল দৃশ্য আলোই বোঝায় না—তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক তথা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের মাত্রার বিস্তার ব্যাপক এর অতি সামান্য অংশই আমাদের দৃষ্টিগোচর হয়।

তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক তথা তরঙ্গের কম্পাঙ্কভেদে তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের বিভিন্ন নামকরণ করা হয়। এর একটি সংক্ষিপ্ত বিবরণ চিত্র 1.8 এ দেওয়া হল। এখন থেকে আমরা আলো বলতে কেবল দৃশ্য আলো নয়, সমগ্র তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গকে বুঝব।



চিত্র—1.8 : তড়িৎচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের বিস্তার

1.5 আপেক্ষিকতা তত্ত্বের প্রাসঙ্গিক জ্ঞাতব্য

1905 সালে আলবার্ট আইনস্টাইন আপেক্ষিকতা তত্ত্বের আবিষ্কার করেন। এই গুরুত্বপূর্ণ তত্ত্বটির কিছু ফলাফল আমাদের বর্তমান আলোচনার জন্য বিশেষ প্রয়োজনীয়। এই জন্য আমরা তত্ত্বটির জটিলতা বাদ দিয়ে কেবলমাত্র আমাদের কাজে লাগবে এমন কিছু তথ্য আলোচনা করব। এই তত্ত্বের একটি গুরুত্বপূর্ণ প্রতিজ্ঞা হল—

"শূন্যে আলোর বেগ ধ্রুবক এবং তা পর্যবেক্ষকের গতিবেগের ওপর নির্ভরশীল নয়।"

শূন্যে, আলোর বেগ (c) হল $3 \times 10^8 \ ms^{-1}$

আপেক্ষিকতা তত্ত্বের একটি গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হল যে কোন পদার্থের ভর তার গতিবেগের নিরপেক্ষ নয় বরং তার গতিবেগের ওপর নির্ভর করে পরিবর্তিত হয়। যদি আলোচ্য বস্তুটি পর্যবেক্ষকের সাপেক্ষে স্থিতাবস্থায় থাকাকালীন তার ভর m_0 হয় তবে ঐ বস্তুটিরই পর্যবেক্ষকের সাপেক্ষে v বেগে গতিশীল অবস্থায় ভর মাপলে তার ভর m হবে।

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \text{.........(1.2)}$$

সাধারণত আমাদের চারপাশে গতিশীল বস্তুসকল আলোকের গতিবেগের তুলনায় অনেক কম বেগ সম্পন্ন হয়। ফলে সকল ক্ষেত্রে m, m_0 এর মধ্যে পার্থক্য অতি নগণ্য ও সাধারণ পরীক্ষায় এই তফাৎ পরিমাপ করা যায় না।

বস্তুটির গতিবেগ আলোর গতিবেগের 10% হলে 5% ভরের বৃদ্ধি হয়। কিন্তু এর গতিবেগ আলোর গতির 90% হলে ভর 100% এর বেশি বাড়ে। m_0 কে বস্তুটির স্থির ভর এবং m কে এর গতীয় ভর বলে।

যদি V = c হয় তাহলে 1.2 সমীকরণ থেকে আমরা পাই যে $m \longrightarrow \infty$। কোন বস্তুর ভর অসীম হওয়া নানা কারণে অসম্ভব। এর সাহায্যে এই সিদ্ধান্তে আসা যায় যে কোন বস্তুর গতিবেগ কখনও শূন্যে আলোকের গতিবেগের সমান বা তার বেশি হতে পারে না।

আপেক্ষিকতা তত্ত্বের অন্য একটি গুরুত্বপূর্ণ অনুসিদ্ধান্ত হল ভর ও শক্তির অভিন্নতা। আপেক্ষিকতা তত্ত্ব অনুযায়ী কোন বস্তুর স্থিরাবস্থায় ভর m_0 হলে, এই স্থিরাবস্থায় এর মোট শক্তি $E_0 = m_0c^2$ এবং v বেগে গতিশীল

থাকাকালীন ভর m_0 হলে তার মোট শক্তি $E = mc^2$ । অর্থাৎ 1 kg ভর 9×10^{16} jule শক্তির সমতুল্য। খুব অল্প পরিমাণ ভর সম্পূর্ণ শক্তিতে রূপান্তরিত হলে তা থেকে যে বিপুল পরিমাণ শক্তি পাওয়া যেতে পারে তা পারমাণবিক বোমা বা নক্ষত্রগুলির বিকীর্ণ শক্তির উৎস। এখানে মনে রাখা দরকার $V<<c$ হলে $m \sim m_0$ এবং ঐ রকম গণনার ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতার সূত্রাবলীর প্রয়োগ অপ্রয়োজনীয়।

1.6 তেজস্ক্রিয়তার প্রাথমিক ধারণা

1896 সালে ফরাসী বিজ্ঞানী আঁরি বেকরেল (Henry Becqucrel) লক্ষ করেন ভারী মৌল ইউরেনিয়ামের লবণ পটাসিয়ামইউরানিল সালফেট কালো কাগজে মোড়া ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আলোর মত সংবেদনের সৃষ্টি করে। এ বিষয়ে আরো পর্যবেক্ষণের পর তিনি সিদ্ধান্ত করেন যে—

(1) পটাসিয়ামইউরানিল সালফেট থেকে স্বতস্ফূর্তভাবে একধরণের ভেদকধর্মী অদৃশ্য রশ্মি বার হয়।

(2) এই রশ্মি পাতলা ধাতবপাত ভেদ করে যেতে পারে এবং ধাতব পাত ভেদ করেও কালো কাগজে মোড়া ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে কালো করতে পারে।

(3) এই রশ্মি যে গ্যাসের ভেতর দিয়ে যায় তাকেও আয়নিত করে। সে অর্থে এই রশ্মি একধরণের আয়নকারক রশ্মি (Ionising radiation)। এই রশ্মি রাসায়নিক বন্ধন ভাঙার মত যথেষ্ট ক্ষমতা সম্পন্ন।

(4) চরিত্রগতভাবে এই রশ্মির মধ্যে X-রশ্মির বিভিন্ন বৈশিষ্ট্য ও ধর্ম বর্তমান।

(5) লবণটি থেকে এই বিশেষ রশ্মির বার হওয়া কোনভাবেই বন্ধ করা যায় না বা বাইরের অবস্থার পরিবর্তন এই রশ্মির বার হওয়ার ওপর কোন রকম প্রভাব ফেলতে পারে না। কোন পদার্থ থেকে স্বতস্ফূর্তভাবে নির্গত এই রশ্মিকে 1998 সালে অপর এক বিশিষ্ট গবেষক মাদাম কুরী নামকরণ করেন তেজস্ক্রিয় রশ্মি এবং স্বতস্ফূর্তভাবে তেজস্ক্রিয় রশ্মি নির্গমনের ঘটনাকে তেজস্ক্রিয়তা বলা হয়। পরীক্ষার সাহায্যে বেকরেল আরো আবিষ্কার করেন যে—

(6) তেজস্ক্রিয়তা মূলত ভারী পরমাণুটির ধর্ম এবং তেজস্ক্রিয়তার পরিমাণ নির্ভর করে তেজস্ক্রিয়তার কারণ ভারী পরমাণুটির পরিমাণের উপর। অর্থাৎ সমপরিমাণ অভিন্ন ভারী মৌলযুক্ত বিভিন্ন পরিমাণ তেজস্ক্রিয় যৌগের তেজস্ক্রিয়তার পরিমাণ একই হয়।

তেজস্ক্রিয়তা ও তেজস্ক্রিয় মৌল :

সংজ্ঞা—যে ধর্মের প্রভাবে (সাধারণত) উচ্চপারমাণবিক ভর বিশিষ্ট (যেমন $^{209}_{83}Bi$ বা তার থেকে বেশি পারমাণবিক সংখ্যা / ভর সম্পন্ন) কোন মৌল সর্ব অবস্থায় স্বতস্ফুর্তভাবে অদৃশ্য তেজস্ক্রিয় রশ্মি নির্গত করে তাকে তেজস্ক্রিয়তা বলে। তেজস্ক্রিয়তার ফলে নির্গত আয়নকারক রশ্মির নির্গমনের হার শুধু নির্দিষ্ট মৌল এবং এর পরিমাণের ওপর নির্ভরশীল। কিন্তু চাপ, তাপমাত্রা, আলো, অনুঘটক, অবস্থান ইত্যাদি বাহ্যিক শর্তের ওপর নির্ভরশীল নয় এবং যে রশ্মি নির্গমনের ফলে মৌলটির কেন্দ্রকের উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন ঘটে, এবং সাধারণত একটি সুস্থিত অতেজস্ক্রিয় মৌলে রূপান্তরণ না হওয়া পর্যন্ত ক্রমান্বয়ে চলতে থাকে তাকে তেজস্ক্রিয়তা বলে। তেজস্ক্রিয় ধর্মসম্পন্ন মৌলগুলিকে তেজস্ক্রিয় মৌল বলে। তেজস্ক্রিয় মৌলের পরমাণুর কেন্দ্রক দুস্থিত। প্রধানত তেজস্ক্রিয়তার মাধ্যমে পরমাণুর কেন্দ্রীন গুলি ক্রমশ সুস্থিতি অর্জন করে। সুতরাং তেজস্ক্রিয়তা কোন মৌলের কেন্দ্রকের দ্বারা নিয়ন্ত্রিত এবং মূলত কেন্দ্রকের বৈশিষ্টবাহী ধর্ম।

প্রকৃতিতে স্বাভাবিকভাবে অবস্থান করে এমন তেজস্ক্রিয় মৌলকে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় মৌল ও প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় মৌলের তেজস্ক্রিয়তাকে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তা বলা হয়।

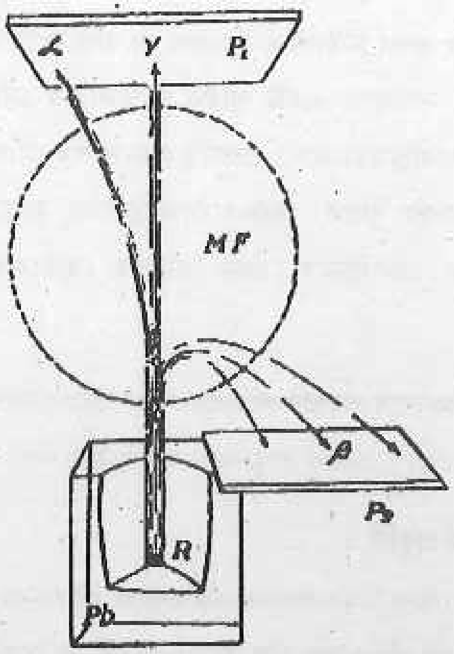
তেজস্ক্রিয় রশ্মির প্রকৃতি :

তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নির্গত আয়নকারক রশ্মিকে এই ঘটনার আবিষ্কারক বেকরেল এর প্রতি সম্মানসূচক স্বীকৃতি জানিয়ে বেকরেল রশ্মিও বলা হয়ে থাকে। এই রশ্মিকে বৈদ্যুতিক ও চুম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে দিয়ে অতিক্রম করিয়ে কুরী দম্পতি, রাদারফোর্ড এবং ভিলার্ড এই সিদ্ধান্তগ্রহণ করেন যে তেজস্ক্রিয় রশ্মি আসলে তিন ধরণের রশ্মির সমবায়ে গঠিত। তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নির্গত রশ্মিকে শক্তিশালী তাড়িত-চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে দিয়ে পাঠালে তা তিন ধরণের রশ্মিতে বিশ্লিষ্ট হয়ে যায় :

(1) তেজস্ক্রিয় রশ্মির একটি অংশ তড়িৎ/চুম্বকের অপরামেরুর দিকে আকৃষ্ট হয়। সুতরাং তেজস্ক্রিয় রশ্মির এই অংশটি পরাতড়িতধর্মী, তেজস্ক্রিয় রশ্মির এই অংশটিকে α (আলফা রশ্মি) বলা হয়।

(2) সম্পূর্ণ রশ্মির আরেকটি অংশ চুম্বকের পরামেরুর দিকে অর্থাৎ α-রশ্মির বিপরীত দিকে অনেকখানি বেঁকে যায়। তেজস্ক্রিয় রশ্মির অপরা আধানবাহী এই রশ্মিগুচ্ছকে বলা হয় β (বিটা) রশ্মি।

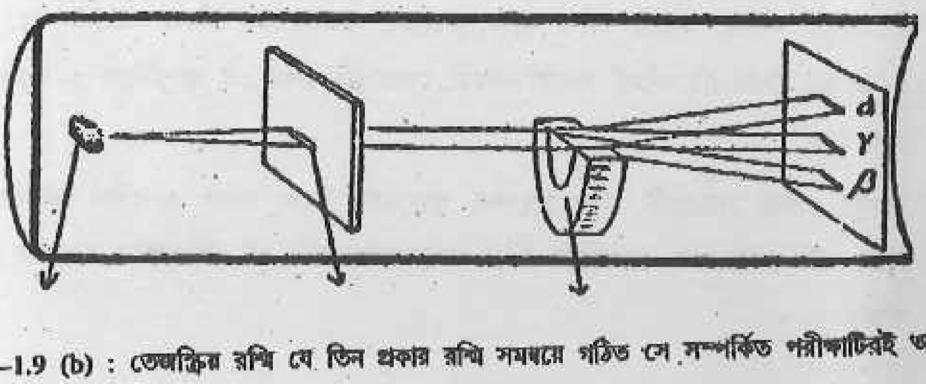
(3) তেজস্ক্রিয় রশ্মির অপর একটি অংশ তাড়িত-চুম্বকক্ষেত্রের সম্পূর্ণ প্রভাবমুক্ত এবং তা অবিচ্যুতভাবে, তড়িৎচুম্বকক্ষেত্রটি অতিক্রম করে। তেজস্ক্রিয় রশ্মির এই অংশটি আধানমুক্ত। বিশুদ্ধ তড়িৎচুম্বক তরঙ্গ বস্তুত সংশ্লিষ্ট তড়িৎচুম্বক তরঙ্গের শক্তি সাধারণ আলোর থেকে অনেক বেশি। তেজস্ক্রিয় রশ্মির এই তৃতীয় রশ্মিগুচ্ছকে γ-(গামা) রশ্মি বলে।



R = তেজস্ক্রিয় পদার্থ; Pb = লেড ব্লক: তেজস্ক্রিয় পদার্থের আধার

P_1P_2 = ফটোগ্রাফিক প্লেট; MF = চৌম্বক ক্ষেত্র প্লেট

চিত্র—1.9 (a) : তেজস্ক্রিয় রশ্মি যে তিন প্রকার রশ্মি সমন্বয়ে গঠিত সে সম্পর্কিত পরীক্ষা।



চিত্র—1.9 (b) : তেজস্ক্রিয় রশ্মি যে তিন প্রকার রশ্মি সমন্বয়ে গঠিত সে সম্পর্কিত পরীক্ষাটিরই অন্যতম চিত্র

বিভিন্ন পরীক্ষার সাহায্যে α, β ও γ রশ্মির ধর্মগুলি প্রতিষ্ঠিত হয়। নীচের সারণী (1.4) টি লক্ষ্য করলে α, β ও γ রশ্মির ধর্মগুলি পারস্পরিক তুলনা করা যাবে।

সারণী 1.4

α, β ও γ রশ্মির ধর্মাবলী

ধর্ম	α-কণা / α-রশ্মি	β-কণা / β-রশ্মি	γ-রশ্মি
1) প্রকৃতি	প্রতি α-কণা দুটি প্রোটন ও দুটি নিউট্রন নিয়ে গঠিত। একটি α-কণা হল 4 ভর সংখ্যা যুক্ত 2 একক ধনাত্মক আধানবাহী হিলিয়াম আয়ন, $\alpha \equiv {}^{4}_{2}He$	β-রশ্মি হল β-কণার স্রোত। প্রতিটি β-কণা মূলত একটি ইলেকট্রন অর্থাৎ অতি নগণ্য ভর সম্পন্ন এবং একক ঋণাত্মক আধানযুক্ত কণা। $\beta \equiv {}^{0}_{-1}e$	γ-রশ্মি হল অতি উচ্চশক্তি-সম্পন্ন তড়িৎচুম্বক তরঙ্গ। বস্তুত γ রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 10^{-11} – 10^{-14} মিটার। বাস্তবিক γ-রশ্মি X-রশ্মি অপেক্ষাও উচ্চক্ষমতাসম্পন্ন।
2) ভর	α-কণার ভর 4.0015 a.m.u বা পারমাণবিক ভর একক। প্রকৃত পক্ষে 6.642×10^{27} g.	β-কণার ভর .000548 a.m.u বা 9.108×10^{-31} kg. অর্থাৎ α-কণার তুলনায় একটি β কণা প্রায় 7300 গুণ হালকা।	ভরহীন; শক্তিবাহী কোন কণার সমষ্টি।
3) আধান	+ 2 একক অর্থাৎ $2 \times 1.602 \times 10^{-19}$ কুলম্ব বা 3.2043×10^{-19} কুলম্ব	–1 একক অর্থাৎ -1.602×10^{-19} কুলম্ব	আধানশূন্য
4) প্রারম্ভিক গতিবেগ α-রশ্মি < β-রশ্মি < γ-রশ্মি	উৎসের ভিন্নতা অনুসারে α-রশ্মির গতিবেগ ভিন্ন হতে পারে। তেজস্ক্রিয় মৌল থেকে নির্গত হবার সময় α-রশ্মির সর্বোচ্চ প্রারম্ভিক গতিবেগ আলোর গতিবেগের এক দশমাংশ বা 10%	উৎসের ভিন্নতা অনুসারে β-কণার গতিবেগ ভিন্ন হয়ে থাকে। β-কণার প্রারম্ভিক বেগ আলোর গতিবেগের 33 শতাংশ থেকে প্রায় 99 শতাংশ পর্যন্ত হয়।	আলোর গতিবেগের সমান অর্থাৎ, 2.99×10^{8} m./sec.

সারণী 1.4 (*Contd.*)

ধর্ম	α–কণা /α-রশ্মি	β–কণা /β–রশ্মি	γ–রশ্মি
5) গতিশক্তি, $^1/_2\ mv^2$; m = কণার ভর, V = গতিবেগ, α রশ্মি > β রশ্মি > γ রশ্মি	β ও γ রশ্মির তুলনায় গতিবেগ কম হলেও বিশেষ ভর যুক্ত হবার কারণে α রশ্মির গতিশক্তি তুলনামূলক-ভাবে সর্বাধিক।	β কণার গতিবেগ α-কণার তুলনায় অনেক বেশি হলেও নগণ্য ভরের কারণে এর গতিশক্তি α-কণার তুলনায় অনেক কম।	যেহেতু γ-রশ্মি ভরশূন্য সুতরাং এই রশ্মিগুচ্ছের কোন গতিশক্তি নাই।
6) ভরবেগ, mv α রশ্মি > β রশ্মি > γ রশ্মি	α-রশ্মি তুলনামূলকভাবে উচ্চভরবেগসম্পন্ন।	অতি উচ্চশক্তিসম্পন্ন হলেও নগণ্যভর সম্পন্ন হবার কারণে β রশ্মির ভরবেগ তুলনামূলক-ভাবে α থেকে অনেক কম।	ভররহিত হবার ফলে γ-রশ্মির ভরবেগ শূণ্য।
7) ভেদনক্ষমতা α রশ্মি < β রশ্মি < γ রশ্মি	আকার বড় ও ভর বেশি হবার জন্য α-রশ্মির ভেদন ক্ষমতা খুব কম। 0.01 mm পুরু অ্যালুমিনিয়াম পাত ভেদ করে গেলেও মাত্র 0.1 mm পুরু পাতের আবরণ দিয়ে α-রশ্মি আটকান যায়। এমনকি পুরু কাগজ বা শীতের পোষাকের আবরণেও α-রশ্মি প্রতিহত হয়।	β-কণার গতিবেগ বেশি এবং ভর নগণ্য হবার জন্যে এর ভেদন ক্ষমতা α-কণার তুলনায় বেশি। 0.2 cm পুরু অ্যালুমিনিয়াম পাত ভেদ করতে সক্ষম। সুতরাং β কণার ভেদন ক্ষমতা α কণার তুলনায় প্রায় 100 গুণ বেশি।	আধানবিহীন উচ্চগতিবেগ ও প্রচন্ড শক্তিসম্পন্ন. তাই কোন বস্তুকে ভেদ করে যাবার ক্ষমতা অত্যন্ত বেশি। প্রায় 1 মিটার পুরু অ্যালুমিনিয়াম পাত. বা 15 সেমি পুরু সীসার পাত ভেদ করে যেতে পারে।
8) গ্যাস আয়নিত করার ক্ষমতা α রশ্মি > β রশ্মি > γ রশ্মি	অপেক্ষাকৃত ধীরগতিসম্পন্ন কিন্তু উচ্চভরবেগ ও আধানযুক্ত হওয়ায় কোন গ্যাসের মধ্যে দিয়ে যাওয়ার সময় ঐ গ্যাসকে প্রবলভাবে আয়নিত করে। গ্যাসকে আয়নিত করার ক্ষমতা β তুলনায় 10-100 গুণ বেশি।	উচ্চগতিসম্পন্ন এবং অপেক্ষাকৃত কম ভরবেগযুক্ত হবার কারণে কোন গ্যাস মাধ্যমে প্রবাহিত হবার সময় গ্যাসটিকে আয়নিত করে, কিন্তু আয়ন গঠন করার প্রবণতা α-র থেকে কম কিন্তু γ-র থেকে প্রায় 100 গুণ বেশি।	উচ্চগতিসম্পন্ন γ রশ্মি গ্যাসকে অতি অল্পই আয়নিত করতে পারে।

সারণী 1.4 (*Contd.*)

ধর্ম	α–কণা /α–রশ্মি	β–কণা /β–রশ্মি	γ–রশ্মি
9) চৌম্বক ও তড়িৎক্ষেত্রে বিক্ষেপণ	ধনাত্মক আধানযুক্ত, তাই চৌম্বক ও তড়িৎক্ষেত্রে ঋণাত্মক ক্ষেত্রের দিকে আকৃষ্ট হয়। কিন্তু বিচ্যুতির পরিমাণ β কণার থেকে অনেক কম।	ঋনাত্মক আধানযুক্ত, তাই চৌম্বক ও তড়িৎক্ষেত্রে α কণার বিক্ষেপণের বিপরীত দিকে বিক্ষেপিত হয়। অর্থাৎ ধনাত্মক তড়িৎ/চুম্বকক্ষেত্রের দিকে আকৃষ্ট হয়। ভরবেগ α-র তুলনায় অনেক কম বলে এক্ষেত্রে বিচ্যুতির পরিমাণ অনেক বেশি।	আধানশূন্য তাই তড়িৎ/ চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবমুক্ত অর্থাৎ অবিচ্যুত অবস্থায় তড়িৎ/ চুম্বকক্ষেত্র অতিক্রম করে।
10) আলোক-সংবেদী পাতের ওপর ক্রিয়া	আলোকসংবেদী পাত যেমন ফোটোগ্রাফিক ফিল্মের ওপর দাগ ফেলে।	α রশ্মির মতই ফোটোগ্রাফিক ফিল্মের ওপর ক্রিয়া করে।	γরশ্মি ও ফোটোগ্রাফিক ফিল্মে দাগ ফেলে।
11) প্রতিপ্রভ পর্দার ওপর ক্রিয়া α-রশ্মি > β-রশ্মি > γরশ্মি	প্রতিপ্রভ প্রলেপযুক্ত পাত যেমন ZnS বা বেরিয়াম প্ল্যাটিও-সায়ানাইড প্রলেপযুক্ত পর্দার ওপর আপতিত হলে তৎক্ষণাৎ উজ্জ্বল ঝলকানি বা প্রতিপ্রভা সৃষ্টি করে।	β রশ্মিও অনুরূপ প্রতিপ্রভা সৃষ্টি করতে পারে কিন্তু প্রতিপ্রভার ঔজ্জ্বল্য α–র তুলনায় কম।	γ রশ্মি ও প্রতিপ্রভা সৃষ্টি করতে পারে কিন্তু তা α ; বা β তুলনায় অনেক কম।
12) জীবদেহ বা জীবন্ত কোষের ওপর প্রতিক্রিয়া α-রশ্মি > β-রশ্মি > γরশ্মি	জীবকোষের সব থেকে বেশি ক্ষতি করে ও জীবদেহে বেশি ক্ষত সৃষ্টি করে।	α-কণার থেকে জীবকোষে কম ক্ষতি করে। জীবদেহে ক্ষত সৃষ্টি হয়।	γ রশ্মির ক্ষতিকর প্রভাব তুলনামূলকভাবে কম কিন্তু রশ্মির প্রভাবে জীবদেহে ক্ষত সৃষ্টি হয়।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে তেজস্ক্রিয়তা হল তেজস্ক্রিয় মৌলের পরমাণুর ধর্ম বা পারমাণবিক ধর্ম। বস্তুত সুনির্দিষ্টভাবে বলা যায় যে তেজস্ক্রিয়তা হল তেজস্ক্রিয় মৌলের পরমাণুর কেন্দ্রকের ধর্ম।

তেজস্ক্রিয়তা কোন পদার্থের স্বকীয় ধর্ম। তা বিভিন্ন বাহ্যিক শর্ত যথা চাপ, উষ্ণতা, আলোক, বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বা চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব বা অনুঘটকের উপস্থিতি ইত্যাদির ওপর নির্ভর করেনা। অর্থাৎ এই শর্তগুলির পরিবর্তন ঘটালেও তেজস্ক্রিয় পদার্থের তেজস্ক্রিয়তা অপ্রভাবিত থাকে। বস্তুত তেজস্ক্রিয়তার পরিমাণ বা তেজস্ক্রিয়তা রশ্মি নির্গমনের হার কেবলমাত্র তেজস্ক্রিয় পদার্থে বর্তমান। নির্দিষ্ট তেজস্ক্রিয় মৌলের পরিমাণের উপর নির্ভরশীল।

α, β বা γ রশ্মি পরমাণুর কেন্দ্রীন থেকেই নির্গত হয়। উপযুক্ত তড়িৎ বা চুম্বকক্ষেত্রের দ্বারা α বা β কণার গতিপথ নিয়ন্ত্রণ করা যায়। উপযুক্ত যন্ত্রের সাহায্যে α কণার গতিপথ সুনির্দিষ্টভাবে নিয়ন্ত্রণ করে α কণাকে একটি বিন্দুর অভিমুখে চালনা করা যায়। বিজ্ঞানী রাদারফোর্ড পরবর্তীকালে তেজস্ক্রিয় রশ্মিগুচ্ছকে পরমাণুর গঠন জানার জন্য পরীক্ষায় প্রক্ষেপক হিসাবে সাফল্যের সঙ্গে ব্যবহার করেন।

1.7 রাদারফোর্ডের α কণা বিচ্ছুরণের পরীক্ষা

পরমাণুর নিউক্লিয় মডেল

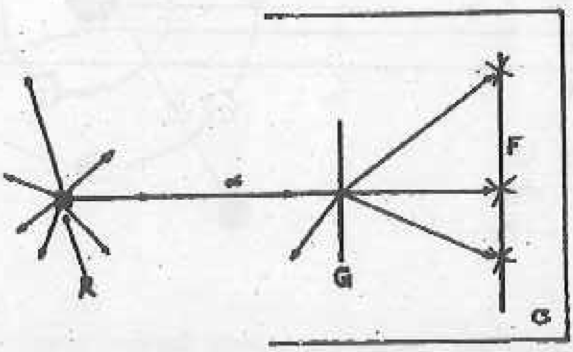
1911 সালে রাদারফোর্ডের (E. Rutherford) পরিকল্পনা অনুসারে তাঁর দুই ছাত্র গাইগার (Geiger) এবং মার্সডেন (Marsden) তেজস্ক্রিয় পরমাণু থেকে নির্গত α কণাকে প্রক্ষেপক /গ্রাস (Projectile) হিসাবে ব্যবহার করে একটি খুব পাতলা ধাতব পাতের উপর আঘাত করেন। পাতলা ধাতব পাতের দ্বারা বিচ্ছুরিত α কণা পরমাণুর গঠন সম্পর্কে বিশেষভাবে আলোকপাত করে। পরীক্ষাটি সংক্ষেপে এইরকম :

এই বায়ুশূন্য আবদ্ধ নলে (C) প্রায় 4×10^{-9} মিটার পুরু সোনার পাতের (G) উপর কোনো তেজস্ক্রিয় মৌল (R), যেমন পোলোনিয়াম থেকে উৎসারিত তীব্র গতি সম্পন্ন α কণার আঘাত হানা হয়। ধাতব পাতের অপর দিকে একটি জিঙ্ক সালফাইডের প্রতিপ্রভ পর্দা (F) রাখা হয়। ঐ পর্দার উপর কোন α কণা আঘাত করলে পর্দার আহত অংশে থেকে উজ্জ্বল আলোর ঝলকানি (Scintillation) লক্ষ্য করা যায়। পরীক্ষার সাহায্যে দেখা যায় যে—চিত্র 1.10(a), 1.10(b), 1.10(c)

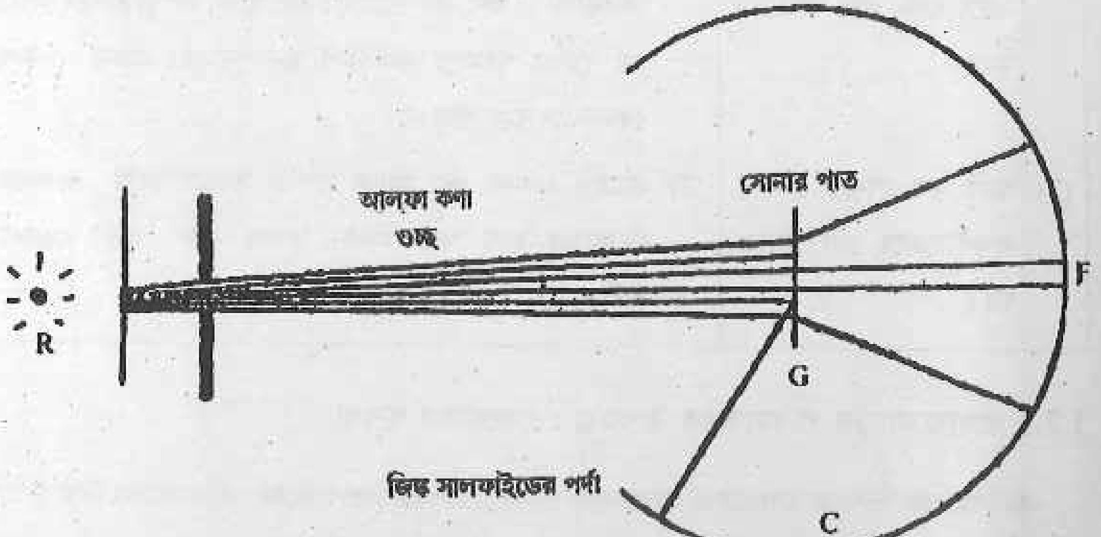
(1) অধিকাংশ α কণা ধাতব পাত ভেদ করে সরাসরি জিঙ্ক সালফাইডের পর্দায় আঘাত করে।

(2) খুব সামান্য কয়েকটি কণা (প্রতি 10.000-এ একটি রশ্মি পথ থেকে লক্ষণীয়ভাবে বিচ্যুত হয়।

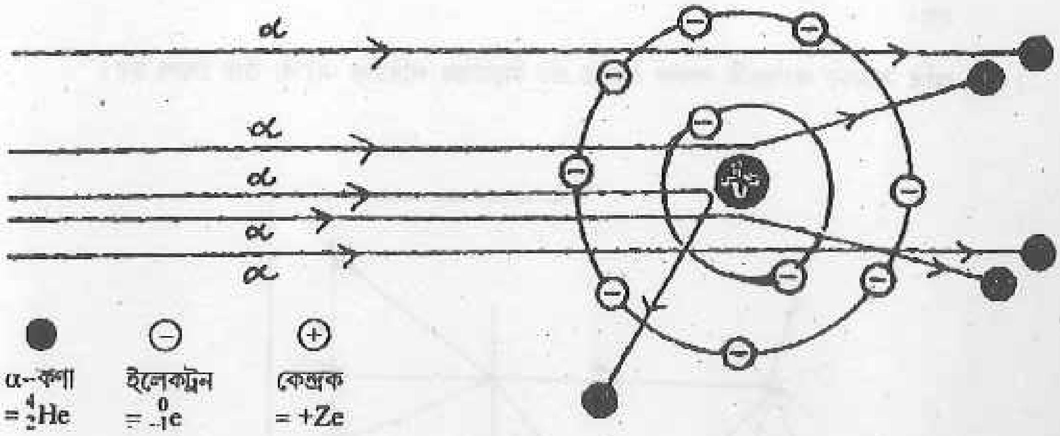
(3) অতি সামান্য কয়েকটি কণার ক্ষেত্রে এই বিচ্যুতির পরিমাণ 90°বা তার বেশি হয়।



চিত্র–1.10(a) : পাতলা ধাতব পাত কর্তৃক α–কণা বিচ্ছুরণের পরীক্ষার সরল চিত্র।



চিত্র–1.10(b) : পাতলা ধাতব পাত কর্তৃক আলফা কণা বিচ্ছুরণ



চিত্র-1.10(c) : পরমাণু দ্বারা α-কণার বিচ্ছুরণের ব্যাখ্যা

এ থেকে রাদারফোর্ড সিদ্ধান্ত করেন যে—

(1) অধিকাংশ α-রশ্মি অবিচ্যুত-ভাবে ধাতব পাত অতিক্রম করে।	(1) ধাতব পাত ধাতব পরমাণুর সুনির্দিষ্ট সমবায়ে গঠিত এবং অধিকাংশ α কণা এই পরমাণুগুলির মধ্যে অবিচ্যুতভাবে নির্গত হয় সুতরাং পরমাণুর অধিকাংশ স্থান শূন্যময়। এজন্য α-কণা কোনভাবে বাধা পায় না।
(2) অতি অল্প সংখ্যক α-কণা লক্ষণীয়ভাবে পথ বিচ্যুত হয়।	(2) যেহেতু α-কণা পরা আধান সম্পন্ন সুতরাং ভারী α-কণার বিক্ষেপের জন্য পরা আধান সম্পন্ন কোন ভারী বস্তুকণা দায়ী।

1.7.1 রাদারফোর্ডের পারমাণবিক রূপকল্প : কেন্দ্রকের ধারণা

এই সিদ্ধান্তের ভিত্তিতে রাদারফোর্ড কেন্দ্রকযুক্ত পরমাণুর রূপকল্প প্রস্তাব করেন। এই প্রস্তাবের উল্লেখযোগ্য অংশগুলি হল—

(1) সমগ্র পরমাণুর তুলনায় একটি অতি ক্ষুদ্র কেন্দ্রে পরমাণুর মোট ভর নিহিত থাকে। অর্থাৎ পরমাণুর সামগ্রিক আয়তনের তুলনায় পরমাণুর অধিকাংশ স্থানই শূন্যময়।

গোলাকার পরমাণুর ব্যাস 10^{-10} m

পরমাণুর কেন্দ্রকের ব্যাস 10^{-15} m

অর্থাৎ পরমাণুর কেন্দ্রকের তুলনায় পরমাণুর ব্যাস 10^5 বা লক্ষ গুণ বেশি। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় একটি পরমাণুর মাপ প্রমাণ সাইজের স্টেডিয়ামের মত হলে, কেন্দ্রকটি ঐ স্টেডিয়ামের কেন্দ্রে রাখা একটি মটরদানার মত।

(2) অতিক্ষুদ্র কেন্দ্রকটিকে ঘিরে বৃত্তাকার পথে ইলেকট্রনগুলি আবর্তন করতে থাকে।

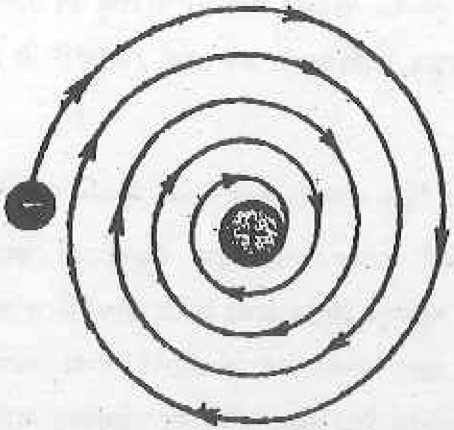
রাদারফোর্ডের রূপকল্পটি পরমাণুর গঠন রহস্য উদঘাটনের ক্ষেত্রে একটি উল্লেখযোগ্য পদক্ষেপ। বস্তুত এই রূপকল্পটি পরমাণুর বিভিন্ন ধর্মের সঠিক ব্যাখ্যা দিতে অক্ষম কিন্তু তা সত্ত্বেও এটি একটি দিকদর্শী প্রস্তাবনা। বস্তুত রাদারফোর্ড রূপকল্পেই প্রথম পরমাণুর গঠনে কেন্দ্রকের অস্তিত্ব পরীক্ষামূলকভাবে প্রমাণিত হয়। পরমাণুর গঠনের কেন্দ্রকের সামগ্রিক অবস্থান রাদারফোর্ডের মুল প্রস্তাবনাগুলি এখনও যথেষ্ট প্রাসঙ্গিক। পরমাণুর গঠনে কেন্দ্রকের ধারণা রাদারফোর্ড তত্ত্বের দ্বারা সুপ্রতিষ্ঠিত হয়।

1.7.2 রাদারফোর্ড রূপকল্পের সীমাবদ্ধতা

রাদারফোর্ডের পরমাণুর রূপকল্পের কেন্দ্রকের ধারণাটি উল্লেখযোগ্য সাফল্য পেলেও এই তত্ত্বের কয়েকটি সীমাবদ্ধতা লক্ষ্য করা যায়। প্রধানত রাদারফোর্ডের রূপকল্প পরমাণুর স্থায়িত্ব ব্যাখ্যা করতে অপারগ। যেহেতু ঋণাত্মক আধানযুক্ত ইলেকট্রন বৃত্তাকার পথে ধনাত্মক আধানযুক্ত নিউক্লিয়াসকে অবিরত পরিক্রমা করে ; সুতরাং গতিশীল ইলেকট্রনের ধর্ম ধ্রুপদী তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হবে। এই তত্ত্ব অনুসারে যখন কোন আহিত কণা বৃত্তাকার পথে আবর্তন করে তখন সেটি একটি ত্বরিত (accelerated) নির্দেশতন্ত্রের অংশ। একারণে সেটি ক্রমাগত শক্তি বিকিরণ করতে থাকবে। কেন্দ্রকের চতুর্দিকে বৃত্তাকার পথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনও এই তত্ত্বানুসারে সর্বদা শক্তি বিকিরণ করতে থাকবে। ক্রমাগত শক্তি বিকীর্ণ করার ফলে ইলেকট্রনের শক্তি ক্রমশ কমতে থাকবে এবং তা ক্রমশ নিউক্লিয়াসের নিকটবর্তী হবে। বস্তুত এইরূপ গতির ফলে ইলেকট্রনটি একটি নীহারিকা সদৃশ পথ অতিক্রম করে অন্তিম দশায় কেন্দ্রকের ওপর আপতিত হবে, গণনা করে দেখা গেছে যে এরকম ক্ষেত্রে রূপকল্পটির স্থায়িত্ব 10^{-8} sec.

রাদারফোর্ডের প্রস্তাবিত রূপকল্পটি ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার সূত্রানুসারে অস্থিত। নীহারিকা সদৃশ পরিক্রমা পথ অনুসরণকালে ইলেকট্রন কর্তৃক বিকীর্ণ শক্তি নিরবচ্ছিন্ন তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালী সৃষ্টি করবে। সেক্ষেত্রে পারমাণবিক

বর্ণালী নিরবচ্ছিন্ন হওয়া উচিত। বাস্তবিক চিত্রটি এই রূপকল্পটি থেকে প্রাপ্ত অবস্থা থেকে সম্পূর্ণ আলাদা। প্রকৃতপক্ষে পরমাণু যথেষ্ট সুস্থিত ও পারমাণবিক বর্ণালী রৈখিক হয়ে থাকে।



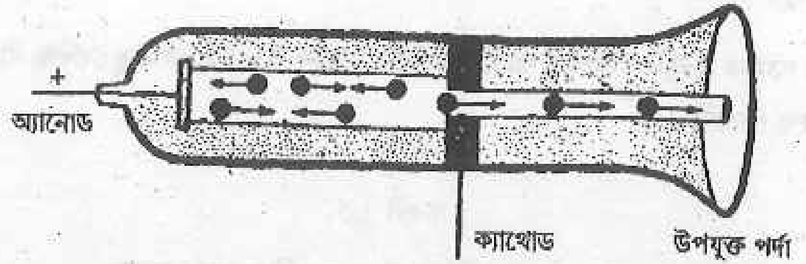
চিত্র–1.11: রাদারফোর্ড রূপকল্পের অস্থায়িত্ব ; কেন্দ্রক পরিক্রমারত ইলেকট্রনের নীহারিকার মতো কক্ষপথ

পরমাণুর গঠন ব্যাখ্যা করার ক্ষেত্রে রাদারফোর্ডের রূপকল্পটি একটি প্রাথমিক পদক্ষেপ। উপরের আলোচনা থেকে এটি স্পষ্ট যে রাদারফোর্ড রূপকল্পটি পরমাণুর গঠন যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করতে পারে না। পরমাণুর গঠন বিস্তারিতভাবে পরবর্তী এককে আলোচিত হয়েছে। পরমাণুর গঠনের প্রাসঙ্গিক রূপকল্পগুলি বিষদভাবে পরবর্তী এককে উল্লেখ করা হল। বর্তমান এককে আমরা রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় পরবর্তীকালে আবিষ্কৃত দুটি প্রাথমিক পারমাণবিক উপাদান নামতঃ প্রোটন এবং নিউট্রনের আবিষ্কার সম্পর্কে অবহিত হব।

1.8 মৌলিক কণা প্রোটন ও নিউট্রনের আবিষ্কার

পরমাণু সামগ্রিক বিচারে নিস্তড়িৎ। যেহেতু পরমাণুর গঠনে ঋণাত্মক ইলেকট্রন একটি মৌলিক উপাদান সুতরাং পরমাণুর মধ্যে ধনাত্মক আধানযুক্ত একটি অংশ নিশ্চয় বর্তমান। রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে পরমাণুর কেন্দ্রকে ধনাত্মক আধান উপস্থিত তাকে। এই ধনাত্মক আধানের উৎস কী তা জানার জন্য কয়েকটি পরীক্ষা করা হয়। তড়িৎক্ষরণ নলে ক্যাথোড রশ্মি সংক্রান্ত পরীক্ষার সময় যদি ছিদ্রযুক্ত ধাতব

চাকতি ক্যাথোড হিসাবে ব্যবহৃত হয় তবে ঐ ছিদ্র দিয়ে ক্যাথোড রশ্মির বিপরীতমুখী এক ধরণের রশ্মি বেরিয়ে আসে।



চিত্র–1.12: পজিটিভ রশ্মি উৎপাদন সম্পর্কিত পরীক্ষা।

এই রশ্মিকে বলা হয় পজিটিভ রশ্মি বা অ্যানোড রশ্মি। বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক ক্ষেত্রে এই রশ্মি ক্যাথোড রশ্মির বিপরীত দিকে বেঁকে যায় ; এর থেকে বোঝা যায় যে এই রশ্মিগুলি ধনাত্মক আধান সম্পন্ন কণার সমবায়ে গঠিত। এক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট কণার আধান/ভর অনুপাত নির্ণয় করলে দেখা যায় যে তড়িৎক্ষরণ নলে ব্যবহৃত গ্যাস আলাদা হলে ঐ অনুপাতগুলিও আলাদা হয়ে থাকে। তবে সবক্ষেত্রেই ধণাত্মক আধানযুক্ত কণার ভর ইলেকট্রনের ভরের থেকে অনেক বেশি। সবচেয়ে হালকা ধনাত্মক আধানযুক্ত কণা তড়িৎক্ষরণ নলে হাইড্রোজেন গ্যাস ব্যবহৃত হলে উৎপন্ন হয়। এক্ষেত্রে ধনাত্মক রশ্মি যে কণাগুলি দ্বারা গঠিত হয় তাদের প্রতিটির ভর হাইড্রোজেন পরমাণুর ভরের প্রায় সমান এবং আধান ইলেকট্রনের আধানের সমান কিন্তু বিপরীতধর্মী। বস্তুত এই কণাটিকে একটি ইলেকট্রনমুক্ত হাইড্রোজেন পরমাণুর অংশ বলে মনে করা যেতে পারে। প্রমাণিত হয় যে এই কণাটি প্রাথমিক বিচারে অবিভাজ্য এবং পরমাণুর গঠনের ক্ষেত্রে একটি মৌলিক তথা প্রাথমিক উপাদান। 1920 সালে রাদারফোর্ড এই কণার নাম দেন প্রোটন (গ্রীকশব্দ প্রোটস = প্রথম)। প্রতিটি প্রোটনের ভর 1.6725×10^{-27} kg অর্থাৎ ইলেকট্রনের ভরের প্রায় 1836 গুণ এবং আধান $+ 1.602 \times 10^{-19}$ কুলম্ব। প্রোটন কণার ব্যাসার্ধ প্রায় 1.2×10^{-15} meter।

1920 সালে রাদারফোর্ড পরমাণুর মধ্যে 1 একক ভরযুক্ত নিস্তড়িৎ একটি কণার অস্তিত্বের সম্ভাবনা কল্পনা করেন। এর 12 বছর পরে 1932 সালে রাদারফোর্ডের ছাত্র স্যাডউইক (Chadwick) এই ধরণের কণার অস্তিত্ব প্রমাণ করেন। বস্তুত 1930 খ্রীষ্টাব্দে বুথে (W. Bothe) এবং বেকার (H. Becker) পরীক্ষা করে এই কণার অস্তিত্বের প্রমাণ পেলেও তারা বিষয়টি সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করতে পারেননি। নিস্তড়িৎ এই কণা বা নিউট্রনের আবিষ্কর্তা হিসাবে স্যাডউইককেই স্বীকৃতি দেওয়া হয়। তিনি বেরিলিয়াম ধাতুকে তেজস্ক্রিয়াজাত α কণা দিয়ে

আঘাত করিয়ে এই নিস্তড়িৎ ও উচ্চ ভেদশক্তি সম্পন্ন নিউট্রন কণা আবিষ্কার করেছিলেন। নিউট্রনের ভর হাইড্রোজেন পরমাণুর ভরের প্রায় সমান। এর ভর 1.00867 a.m.u বা পারমাণবিক ভর একক। নিউট্রন (দুস্থিত হলেও) পরমাণুর গঠনের একটি অন্যতম মৌলিক উপাদান।

পরমাণুর গঠনের তিনটি মৌলিক উপাদান ইলেকট্রন, প্রোটন ও নিউট্রনের কিছু বৈশিষ্ট্য নীচের সারণীটিতে উল্লেখ করা হল (সারণী 1.5)

সারণী 1.5

পরমাণুর গঠনের মৌলিক উপাদানগুলির ধর্মের তুলনা

ধর্ম	ইলেকট্রন	প্রোটন	নিউট্রন
1) চিহ্ন	$_{-1}^{0}e$, e, e^-	$_{1}^{1}H$, p	$_{0}^{1}n$, n
2) ভর	9.108×10^{-31} kg. বা 0.000548 a.m.u বা পারমাণবিক ভর একক।	1.672×10^{-27} kg বা 1.00728 a.m.u বা পারমাণবিক ভর একক। এটি একটি ইলেকট্রনের ভরের 1836 গুণ।	1.675×10^{-27} kg বা 1.00867 amu বা পারমাণবিক ভর একক। এটি একটি ইলেকট্রনের ভরের 1839 গুণ।
3) আধান	একক হিসাবে –1 -1.602×10^{-19} কুলম্ব	একক হিসাবে +1 $+1.602 \times 10^{-19}$ কুলম্ব	0 0
4) ব্যাসার্ধ	2×10^{-15} meter	1.2×10^{-15} meter	1.2×10^{-15} meter
5) সাধারণ অবস্থান	পরমাণু কেন্দ্রকের বাইরের কক্ষপথে	পরমাণুর কেন্দ্রকে	পরমাণুর কেন্দ্রকে

1.10 সারাংশ

ঊনবিংশ শতাব্দীর মধ্যভাগে গ্যাসের মধ্য দিয়ে তড়িৎ মোক্ষণের উপর গবেষণা শুরু হয়। এই গবেষণায়ই

ফলশ্রুতি ক্যাথোড রশ্মির আবিষ্কার। বিজ্ঞানী জে. জে. টমসন এই রশ্মিকে ইলেকট্রনের প্রবাহ হিসাবে সনাক্ত করেন এবং ইলেকট্রনের ভর ও আধানমাত্রা নির্ণয় করেন। অপরদিকে অঁরি বেকারেল কর্তৃক তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কৃত হয়। কোন তেজস্ক্রিয় পরমাণুর কেন্দ্র থেকে আলফা (α), বিটা (β) কণা এবং গামা (γ) রশ্মি নির্গত হয়। α কণা প্রকৃতপক্ষে দুটি ধনাত্মক আধানযুক্ত হিলিয়াম পরমাণু এবং β কণা হচ্ছে ইলেকট্রন। γ রশ্মি হচ্ছে উচ্চশক্তিসম্পন্ন তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। α কণার ভরবেগ তথা গতীয় শক্তি β রশ্মির তুলনায় অনেক বেশি। γ রশ্মির ভেদন ক্ষমতা সর্বাধিক এবং α কণার ভেদনক্ষমতা ন্যূনতম।

কোয়ান্টাম তত্ত্বের আলোকে পরমাণুর গঠন এবং রাসায়নিক বন্ধনীর আলোচনায় প্রবেশ করার পূর্বে আলোর প্রকৃতি এবং ধর্ম সম্বন্ধে একটা প্রাথমিক ধারণার প্রয়োজন। আলোর প্রতিসরণ, ব্যবর্তন, ব্যতিচার প্রভৃতি আলোর তরঙ্গ প্রকৃতির দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায়। বিজ্ঞানী জে. সি. ম্যাক্সওয়েল দেখান যে আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ।

পরমাণুর অভ্যন্তরীণ গঠন ব্যাখ্যায় রাদারফোর্ডের আলফা কণা বিচ্ছুরণ পরীক্ষা প্রথম উল্লেখযোগ্য সাফল্য আনে। এই পরীক্ষালব্ধ ফলের ভিত্তিতে রাদারফোর্ড পরমাণুর সৌরজগতের সঙ্গে তুলনীয় একটি প্রতিরূপ দেন। কিন্তু রাদারফোর্ডের তত্ত্ব পরমাণুর স্থায়িত্ব এবং বর্ণালী ব্যাখ্যা করতে পারে না।

পরবর্তীকালে পরমাণুর উপাদান হিসাবে কেন্দ্রকে উপস্থিত মৌলিক কণা ধনাত্মক প্রোটন এবং নিস্তড়িত নিউট্রন আবিষ্কৃত হয়। এই দুটি কণার সম্মিলিত ভর পরমাণুর ভরের প্রায় সমান।

1.11 প্রশ্নাবলি

(1) ক্যাথোড রশ্মি বলতে কী বোঝায়?

(2) γ রশ্মি ও দৃশ্যমান আলোর মধ্যে তফাৎ কী?

(3) $^{234}_{90}Th$ তেজস্ক্রিয় বিকিরণের দ্বারা $^{206}_{82}Pb$ এ পরিণত হয়। মোট নির্গত α ও β কণার সংখ্যা কত?

(4) কোন নীতির দ্বারা আলোর ব্যতিচার ধর্মের ব্যাখ্যা করা যায়? নীতিটি বিবৃত করুন।

(5) 'পরমাণুর প্রায় সমস্ত ভর পরমাণুর কেন্দ্রে বিধৃত' রাদারফোর্ডের এরূপ অনুমানের কারণ কী ছিল?

(6) কোন তেজস্ক্রিয় পদার্থের খনিতে হিলিয়াম গ্যাস পাওয়া যায় কেন?

1.12 উত্তরমালা

(1) 1.4 দ্রষ্টব্য। ক্যাথোড রশ্মি ইলেকট্রনের প্রবাহ।

(2) উভয়েই তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ। γ রশ্মির কম্পাঙ্ক এবং শক্তি দৃশ্যমান আলোর তুলনায় অনেক বেশি।

(3) নির্গত α ও β কণার সংখ্যা যথাক্রমে 7 এবং 6।

(4) তরঙ্গের উপরিপাত নীতি। 1.6 দ্রষ্টব্য।

(5) α কণার মতো উচ্চ ভরবেগ তথা গতীয়শক্তি বিশিষ্ট কণাকে পথভ্রষ্ট করতে হলে পরমাণুর অভ্যন্তরের বিকর্ষণকারী ধনাত্মক তড়িতাহিত কণা বা একত্রিত কণাসমূহের সম্মিলিত ভর যথেষ্ট বেশি হতে হবে। অন্যথায় উচ্চ গতীয় শক্তি সম্পন্ন α কণাগুলিকে তাদের পথ থেকে বিচ্যুত করা যাবে না।

(6) তেজস্ক্রিয় পদার্থ হতে নিঃসৃত α কণা এবং He পরমাণুর নিউক্লিয়াস অভিন্ন। α কণা পরিবেশ থেকে ইলেকট্রন গ্রহণ করে He গ্যাসে পরিণত হয়।

একক 2 □ পরমাণুর গঠন : কোয়ান্টাম তত্ত্ব এবং ইলেকট্রন বিন্যাস

গঠন

2.1 প্রস্তাবনা,

উদ্দেশ্য

2.2 কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ

2.2.1 প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্ব

2.3 আলোক তড়িৎ ক্রিয়া

2.3.1 আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার আইনস্টাইনের ব্যাখ্যা

2.4 পারমাণবিক বর্ণালী

2.5 হাইড্রোজেন পরমাণুর গঠন সংক্রান্ত বোর তত্ত্ব

2.5.1 বোর তত্ত্বের সাহায্যে গণনা

(1) ইলেকট্রনের পরিক্রমাপথের ব্যাসার্ধ নির্ণয়

(2) বৃত্তাকার পরিক্রমাপথে ইলেকট্রনের রৈখিক গতি

(3) বৃত্তাকার পরিক্রমাপথে ইলেকট্রনের শক্তি

2.5.2 বোর তত্ত্বের প্রয়োগ

(1) পারমাণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যা

(2) ইলেকট্রনের শক্তি ও পারমাণবিক বর্ণালীর উপর কেন্দ্রকের গতির প্রভাব।

2.5.3 বোর তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা

2.6 সমারফেল্ডের সংশোধনী

2.7 জীমান ক্রিয়া : পারমাণবিক বর্ণালীর উপর চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব, স্থান কোয়ান্টায়ন এবং চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা।

2.8 ইলেকট্রনের ঘূর্ণন

2.9 বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস : নির্মাণ নীতি

2.9.1 পাউলির অপবর্জন নীতি

2.9.2 হুণ্ডের গরিষ্ঠ বহুকতা সূত্র

2.9.3 বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ইলেকট্রন সজ্জা

2.10 সারাংশ

2.11 প্রশ্নাবলি

2.12 উত্তরমালা

2.1 প্রস্তাবনা

আগের এককে আপনারা দেখেছেন যে পারমাণবিক গঠনের ক্ষেত্রে ডালটনের পরমাণুবাদ সঠিক ধারণা গড়ে তুলতে অক্ষম —বিশেষত তা সমসাময়িক পরীক্ষাগুলির ব্যাখ্যা প্রসঙ্গে নিতান্ত অক্ষম। আবার তেজস্ক্রিয়তার প্রয়োগ ঘটিয়ে রাদারফোর্ড পরমাণুর গঠন সম্পর্কে একটি রূপকল্পের ধারণা দিলেও তা ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার সূত্র অনুসারে পরমাণুর বিভিন্ন ধর্মের বিশেষত পারমাণবিক বর্ণালীর বৈশিষ্ট্য যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করতে পারে না। এর পাশাপাশি তিনি কতগুলি আলোক এর প্রয়োগ ঘটিয়ে আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার সঙ্গত ব্যাখ্যা দেন। পরবর্তীকালে আলোকতাড়িতিক ঘটনাও বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য : যেমন কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ, আলোক তড়িৎ ক্রিয়া, ইত্যাদি। এগুলির কোনটিই ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার ধারণা থেকে পুরোপুরি ব্যাখ্যা করা যায় না। বিগত শতাব্দির প্রথমভাগে কোয়ান্টাম তত্ত্বের সূচনা করেন ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক (Max Planck) এবং এটিকে সুদৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত করার ক্ষেত্রে আইনস্টাইন বিশেষ উল্লেখযোগ্য ভূমিকা গ্রহণ করেন। কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রয়োগ ঘটিয়ে রাদারফোর্ড রূপকল্পের সীমাবদ্ধতা দূর করেন নীলস্ বোর। প্রধানত তিনি পরমাণুর মধ্যে বিচ্ছিন্ন শক্তিস্তরের ধারণার জনক। তাঁর প্রস্তাবিত রূপকল্প প্রাথমিকভাবে সরল পরমাণুর বিভিন্ন ধর্মের যথাযথ ব্যাখ্যা করতে সক্ষম। পরবর্তীকালে সূক্ষ্ম পারমাণবিক বর্ণালী ব্যাখ্যা করার উদ্দেশ্যে সমারফিল্ড বোর তত্ত্বের কার্যকরী সংশোধন করেন। পরমাণুর গঠনের ক্ষেত্রে নিঃসন্দেহে এটি আরো সম্যক ধারণা দেয়।

পারমাণবিক বর্ণালীর উপর চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাব তথা জীম্যান ক্রিয়া এবং ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়ার ব্যাখ্যার জন্য পরবর্তীকালে চুম্বকীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং ইলেকট্রন ঘূর্ণনের ধারণা কাজে লাগানো হয়। পরমাণু গঠনের ক্ষেত্রে বিভিন্ন কোয়ান্টাম শর্তগুলি একত্রিতভাবে পরমাণুর মধ্যে অবস্থিত বিভিন্ন শক্তিস্তর সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট ধারণা দেয়।

একাধিক ইলেকট্রনযুক্ত পরমাণুর ক্ষেত্রে ইলেকট্রন বিন্যাসের জন্য এই শক্তিস্তরগুলি কেমনভাবে, কী ক্রম অনুসারে ব্যবহৃত হবে তা গঠন নীতির প্রসঙ্গে সুস্পষ্টভাবে নির্দেশ করা হয়েছে।

সমগ্র এককটির বিষয়গুলি সুনির্দিষ্ট ক্রমানুসারে অনুসরণ করলে তাত্ত্বিক ধারণাগুলির পরিবর্তনসহ পরমাণুর গঠন সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট ধারণা গড়ে উঠবে। বলাবাহুল্য একাধিক ইলেকট্রন যুক্ত একটি পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস গঠন করতে পারা যাবে এবং এটির সাহায্যে পরমাণুর বিভিন্ন ধর্মের বিশেষত নানারকম বর্ণালীর যুক্তিসঙ্গত ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করে আপনি আলোর ধর্ম সম্পর্কে আরো বিষদভাবে জানবেন এবং কৃষ্ণবস্তু বিকিরণের ঘটনা ব্যাখ্যার ক্ষেত্রে ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার সীমাবদ্ধতা বুঝতে পারবেন।

- কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ ও আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যার ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম তত্ত্বের যথার্থতা উপলব্ধি করবেন।
- পারমাণবিক বর্ণালী সম্পর্কে আরো জানবেন এবং এটি ব্যাখ্যা করার ক্ষেত্রে আগের এককে আলোচিত রাদারফোর্ডের রক্ষাকল্পের সীমাবদ্ধতা বুঝিয়ে দিতে পারবেন।
- এর পরবর্তী ধাপে বোরের রূপকল্প অনুসারে কোয়ান্টাম তত্ত্বের সার্থক প্রয়োগ ঘটিয়ে পরমাণুর বিভিন্ন ধর্মের উপযুক্ত ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বর্ণালীর সুক্ষ্মতর বিশ্লেষণে বোর তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা বুঝতে পারবেন এবং সমারফেল্ড রূপকল্প অনুসারে এগুলির প্রয়োজনীয় সংশোদন করতে পারবেন।
- পারমাণবিক বর্ণালীর উপর চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব সম্পর্কে জানবেন এবং চুম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার ধারণা থেকে জীম্যান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

- ইলেকট্রনে ঘূর্ণের ধারণা থেকে ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়া কেন ঘটে তা বুঝিয়ে বলতে পারবেন।

- কোয়ান্টাম সংখ্যা সমূহের ধারণা থেকে পরমাণুর মধ্যে বিভিন্ন শক্তিস্তর সম্পর্কে জানবেন এবং পারমাণবিক গঠন নীতির প্রয়োগ ঘটিয়ে কোন পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস গঠন করতে সক্ষম হবেন।

- সমগ্র আলোচনাটি থেকে পরমাণুর গঠন সম্পর্কে পুরাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রয়োগ ঘটিয়ে বিভিন্ন রূপকল্পের মাধ্যমে একটি স্বচ্ছ ধারণা গড়ে তুলতে সক্ষম হবেন।

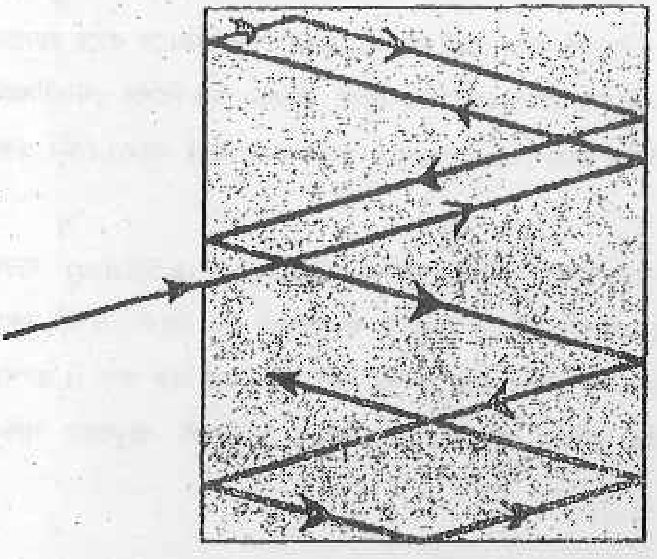
2.2 কৃষ্ণ বস্তু বিকিরণ (Blackbody radiation)

সাধারণ অভিজ্ঞতা থেকে বলা যায় যে কোন বস্তুকে যথেষ্ট উত্তপ্ত করলে তা আলো বিকিরণ করে। যেমন— একটি লোহার দণ্ডকে ধীরে ধীরে উত্তপ্ত করলে তা প্রথমে অদৃশ্য তাপ এবং আরো উত্তপ্ত করলে লাল, ক্রমশ কমলা-হলুদ এবং শেষে উজ্জ্বল সাদা হয়ে ওঠে। বস্তুত সকল ভৌত বস্তুই সমস্ত উষ্ণতায় অর্থাৎ সর্বক্ষণই অদৃশ্য (যেমন তাপ) অথবা দৃশ্যমান আলো বিকিরণ করে। কিন্তু মানুষ খালি চোখে এই নিঃসারিত তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের অতি সামান্য অংশ্যই দেখতে পায়। বস্তুর থেকে বার হওয়া তড়িৎ চুম্বকীয় বিকিরণের অনেকটাই অবলোহিত আলো অর্থাৎ দৃশ্যমান আলোর তুলনায় বেশি তরঙ্গদৈর্ঘ সম্পন্ন অর্থাৎ অপেক্ষাকৃত নিম্ন কম্পাঙ্কের হওয়ায় খালি চোখে ধরা পড়ে না। বস্তুর উষ্ণতা ক্রমশ বাড়ালে নিঃসারিত আলো ক্রমশ তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর দৃশ্যমান অংশে দেখা যায়। অর্থাৎ উষ্ণতা বাড়ানোর সঙ্গে সঙ্গে বিকীর্ণ তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক বাড়তে থাকে অর্থাৎ তরঙ্গদৈর্ঘ্য হ্রাস পায়। যখন একটি লৌহ দণ্ডকে ধীরে ধীরে উত্তপ্ত করা হয় তখন প্রথম প্রথম তা তাপ নিঃসরণ করে। এই প্রাথমিক অদৃশ্য তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণকে তাপীয় বিকিরণ বলা হয়। কোন বস্তুর তাপীয় বিকিরণের ধরণ ঐ বস্তুর উষ্ণতার এবং ঐ বস্তুর উপাদানের উপর নির্ভরশীল। সুতরাং বিভিন্ন উপাদানের বস্তুগুলির উষ্ণতা এক হলেও তাদের বিকীর্ণ আলো একই রকম নাও হতে পারে। এজন্য বিভিন্ন উষ্ণতায় এই তাপীয় বিকিরণের চরিত্র বুঝতে গেলে আমাদের এমন একটি আদর্শ বস্তুর উপর পরীক্ষা চালানো উচিত যেখানে বস্তুটির বিকীর্ণ আলো তার উপাদানের ওপর নির্ভরশীল নয়; অর্থাৎ বিকীর্ণ আলোর ধরণ পুরোপুরিভাবে বস্তুটির উষ্ণতার উপর নির্ভরশীল। বাস্তবিক একটি আদর্শ কৃষ্ণবস্তু এমনই এক বিশেষ গুণসম্পন্ন বিকিরণকারী বস্তু।

আবার কোন বস্তুর আলো তথা শক্তি বিকীরণ করার ক্ষমতা বস্তুটির আলো শোষণ করার ক্ষমতার সাথে

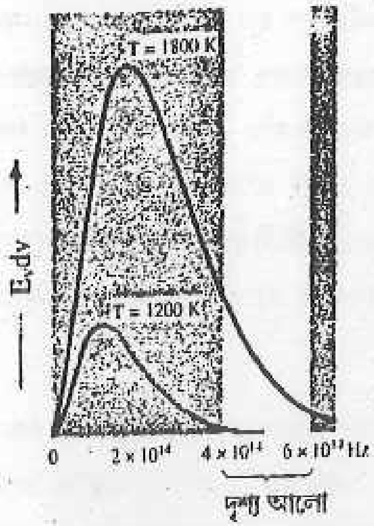
পর্কিত। যেহেতু কোন বস্তুর উষ্ণতা অপরিবর্তিত থাকলে অর্থাৎ বস্তুটি তার পরিমণ্ডলের সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকাকালীন, বস্তুটি দ্বারা আলো তথা শক্তি শোষণ ও বিকীরণের হার সমান হতে হবে। আদর্শ কৃষ্ণ বস্তু হচ্ছে এমন একটি বস্তু যা তার উপর আপতিত আলোক তরঙ্গ শোষণ করে। একটি কৃষ্ণবস্তুর সংজ্ঞা নিম্নরূপ—একটি আদর্শ কৃষ্ণ বস্তু আপতিত সকল কম্পাঙ্কের আলোকতরঙ্গ শোষণ করে এবং সকল কম্পাঙ্কের আলোকতরঙ্গ বিকীর্ণ করে। বস্তুটির উপর আপতিত কোন তরঙ্গই প্রতিফলিত বা এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয় না। এইভাবে সজ্ঞাত আদর্শ কৃষ্ণ বস্তু বাস্তবে পাওয়া সম্ভব নয়। একটি নিখুঁত আদর্শ কৃষ্ণবস্তু সম্পর্কে কেবলমাত্র ধারণাই করা যায়। বাস্তবিক পরীক্ষায় যে সমস্ত কৃষ্ণবস্তু ব্যবহৃত হয়, তাকে নীচের রূপকল্প অনুসারে নেওয়া যেতে পারে :

পরীক্ষামূলক বাস্তব কৃষ্ণ বস্তু : ধাতুনির্মিত একটি ছিদ্রযুক্ত উজ্জ্বল ফাঁপা বস্তু আদর্শ কৃষ্ণবস্তুর একটি সম্ভাব্য প্রতিরূপ (চিত্র 2.1) বস্তুটির ছিদ্রের উপর পরা আলোকরশ্মি ঐ বস্তুটির মধ্যে ফাঁপা অংশে প্রবেশ করে এবং পাত্রটির ভিতরের দেওয়ালে ক্রমাগত প্রতিফলিত হয়ে চলে যতক্ষণ না তা সম্পূর্ণ শোষিত হয়। অর্থাৎ পাত্রটির দেওয়ালের এই ছিদ্রযুক্ত অংশটির ওপর আগত সমস্ত রঙের (দৃশ্যমান বা অদৃশ্য) আলো শোষণ করে। আবার বস্তুটি তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকার জন্য ক্রমাগত সমস্ত রশ্মিই নিঃসরণ করতে পারে। ঐ ছিদ্র দিয়ে বাইরে বেরিয়ে আসা আলো নিয়ে আমরা কৃষ্ণ বস্তু দ্বারা বিকীর্ণ আলোর ধরণ সংক্রান্ত পরীক্ষা নিরীক্ষা চালাতে পারি। কৃষ্ণবস্তু নিঃসারিত আলোকের মধ্যে সমস্ত রঙের অর্থাৎ সম্ভাব্য সমস্ত কম্পাঙ্কের আলো থাকে। অর্থাৎ একটি কৃষ্ণ বস্তু থেকে বেরিয়ে আসা মোট শক্তি সমস্ত ধরণের কম্পাঙ্ক বা রঙের মধ্যে ছড়িয়ে ছিটিয়ে থাকে। দুটি ভিন্ন মাত্রার কম্পাঙ্কের মধ্যে বস্তু কর্তৃক নিঃসারিত মোট শক্তির কত অংশ থাকবে তা নিঃসারক বস্তুটির উষ্ণতার ওপরই কেবল নির্ভর করে। উষ্ণতা বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে নিঃসারিত বিকিরণের প্রধান অংশটি ক্রমশ উচ্চ কম্পাঙ্কের দিকে সরে যায়।



চিত্র–2.1 : একটি আদর্শ কৃষ্ণ বস্তুর প্রতিরূপ

নিঃসারিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক υ এবং $\upsilon + d\upsilon$ এর মধ্যে শক্তির পরিমাণ $E_\upsilon d_\upsilon$ হলে একে বর্ণালীয় শক্তি ঘনত্ব (Spectral energy density) বলা হয়। বিভিন্ন উষ্ণতায় একটি কৃষ্ণবস্তুর বর্ণালীয় শক্তি ঘনত্ব বনাম কম্পাঙ্কের লেখচিত্রটি চিত্র (2.2) এ দেখান হয়েছে।



চিত্র–2.2 : কৃষ্ণ বস্তুর বর্ণালী

2.2.1 প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্ব :

ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার ধারণা অনুসারে আলোকে তরঙ্গধর্মী বলে ভাবা হয় এবং মনে করা হয় যে কৃষ্ণবস্তুটি প্রতি মুহূর্তেই এর ওপর আপতিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ শোষণ এবং বিকিরণ করছে। কিন্তু ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যা দ্বারা বিভিন্ন কম্পাঙ্ক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে ছড়িয়ে থাকা কৃষ্ণবস্তু বিকিরণের বর্ণালীর শক্তি ঘনত্বের লেখচিত্রটির চরিত্র পুরোপুরি ব্যাখ্যা করা যায় না। ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার কাছে রহস্যময় এই সমস্যাটির একটি গ্রহণযোগ্য সমাধান দেন বিশিষ্ট পদার্থবিজ্ঞানী ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক (Max Planck) সর্বপ্রথম 1900 সালে। তিনি প্রস্তাব করেন যে—

(1) ফাঁপা কৃষ্ণবস্তুটির ভিতরের দেওয়ালে আহিত স্পন্দক (Charged oscillator) থাকে। আহিত স্পন্দকগুলি কেবলমাত্র কতগুলি সীমিত সুনির্দিষ্ট শক্তিসম্পন্ন হয়। অর্থাৎ ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার ধারণা অনুসারে স্পন্দকগুলি যেকোন শক্তি সম্পন্ন নয়। যদি কোন বস্তু কণা υ কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট হয়ে থাকে তবে তার শক্তির পরিমাণ (E) নীচের সমীকরণ অনুসারে পাওয়া যাবে :

$$E = nh\upsilon \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.1)$$

n : একটি ধনাত্মক পূর্ণ সংখ্যা যথা 0, 1, 2, 3 ইত্যাদি।

h : প্লাঙ্ক ধ্রুবক যার সর্বজনীন মান 6.626×10^{-34} J. S.

(2) একটি নির্দিষ্ট শক্তি স্তর থেকে একটি স্পন্দক পরবর্তী শক্তি স্তরে নেমে এলে নির্গত তড়িৎচুম্বকীয় শক্তি υ কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট হয়ে থাকে। একইভাবে একটি স্পন্দক পরবর্তী শক্তিস্তরে উন্নীত হলে শোষিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক = υ।

একস্তর থেকে অন্য স্তরে এই ধরণের শক্তির বিচ্ছিন্ন তাৎক্ষণিক পরিবর্তন বা বিভিন্ন শক্তি স্তরের মধ্যে স্পন্দকের লাফের (Energy jump) ধারণা এতাবৎ ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যায় ছিল না। ধারণার দিক থেকে এটি সম্পূর্ণ নূতন। এর ফলে একটি স্পন্দক যেমন যেকোন শক্তিসম্পন্ন হয় না তেমনই তা যে কোন শক্তি গ্রহণ বা নিঃসরণ করতেও অপারগ। দুটি শক্তিস্তরের মধ্যের সুনির্দিষ্ট পার্থক্যের সমপরিমাণ শক্তিই কেবলমাত্র গৃহিত হয়। স্পন্দকটি একটি নির্দিষ্ট শক্তিস্তর থেকে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন অপর একটি স্তরে উন্নীত হলে দুটি শক্তি স্তরের পার্থক্যের সমপরিমাণ শক্তি গ্রহণ করে। আবার বিপরীতক্রমে স্পন্দকটি একটি অপেক্ষাকৃত নীচের শক্তিস্তরে নেমে এলে বিকীর্ণ শক্তির পরিমাণ সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তরের পার্থক্যের সমান হয়। অর্থাৎ স্পন্দকটির দ্বারা গৃহিত বা বিকীর্ণ শক্তির পরিমাণ সুনির্দিষ্ট।

প্ল্যাঙ্কের প্রকল্প অনুসারে বলা যায় যে কোন একটি বস্তু কর্তৃক গৃহীত বা বিকীর্ণ আলোকরূপী তড়িৎচুম্বকীয় শক্তির প্রকৃতি বিচ্ছিন্ন। অর্থাৎ আলো কোন একটি বস্তুর সঙ্গে ক্রিয়া করার ক্ষেত্রে বিচ্ছিন্ন শক্তি কণার মত আচরণ করে। ভাবা যেতে পারে তড়িৎ চুম্বকীয় বিকিরণ বিভিন্ন শক্তিকণার সমষ্টি। এই বিচ্ছিন্ন শক্তি কণার এক একটি একক কোয়ান্টাম শক্তি (E)

$$E = h\upsilon \qquad \text{...............2.1(a)}$$

এক্ষেত্রে υ-ঐ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ তথা শক্তিকণার কম্পাঙ্ক। শক্তির এরূপ এক একটি কণাকে ফোটন (Photon) বলা হয়। এই ধারণাগুলির ওপর নির্ভর করে প্লাঙ্ক কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ ব্যাখ্যা করার জন্য নীচের সমীকরণটিতে উপনীত হন।

$$E\upsilon d\upsilon = \frac{8\pi h}{C^3}\cdot\frac{\upsilon^d d\upsilon}{C^{h\upsilon/kt} - 1} \qquad \text{..............2.2}$$

C : তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের গতিবেগ

K : বোল্‌জ্‌ম্যান (Boltzman) ধ্রুবক

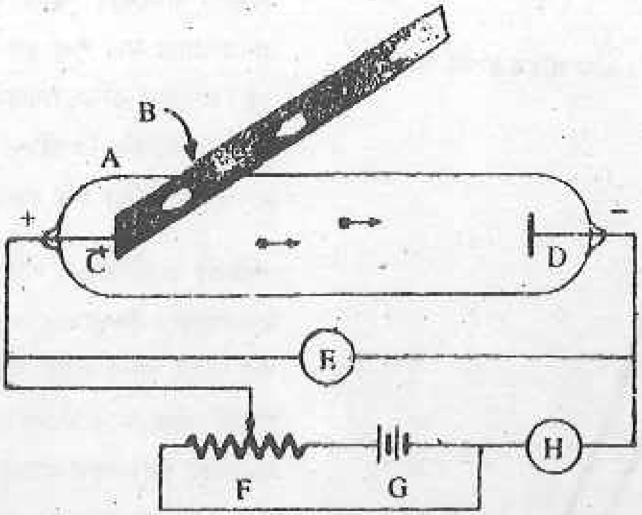
বর্ণালীয় শক্তি ঘনত্ব এবং বিকীর্ণ তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্কের লেখচিত্রটি উপরোক্ত সমীকরণের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। বস্তুত প্ল্যাঙ্কের আগে ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার সূত্র অনুসারে কৃষ্ণবস্তু বিকিরণের সম্পূর্ণ ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়নি। এ বিষয়ে প্ল্যাঙ্কের প্রস্তাবনা পদার্থবিদ্যার ক্ষেত্রে বৈপ্লবিক এবং সম্পূর্ণ নতুন পথের সূচনা করে। ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক তাঁর কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রস্তাবনায় একথা স্বীকার করেন যে কৃষ্ণবস্তুর ভিতরের

দেওয়ালগুলি যে কোন পরিমাণ শক্তি শোষণ করতে অক্ষম। আপতিত আলোর যে অংশটির জন্য $E_n = nh\upsilon$ কেবলমাত্র সেই কম্পাঙ্কের আলোই গৃহীত হবে। n এর বিভিন্ন মান যেমন n = 0, 1, 2......ইত্যাদির জন্য স্পন্দকটি বিভিন্ন মানের শক্তিগ্রহণ করে। যখন স্পন্দকটি একটি উচ্চশক্তিস্তর থেকে নিম্নশক্তিস্তরে নেমে আসে তখন ঐ সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তর দ্বয়ের পার্থক্যের সমপরিমাণ শক্তি বিকীর্ণ হয় বা বিপরীতক্রমে স্পন্দকটি শক্তিস্তরে উন্নীত হলে তার প্রয়োজন অনুসারে আপতিত আলোর একটি বিশেষ অংশকেই গ্রহণ করে। একটি সুনির্দিষ্ট কম্পাঙ্ক υ সম্পন্ন আলোর শক্তির পরিমাণ hυ কে শক্তি কোয়ান্টাম বলা হয়। বস্তুত আলোর সম্পর্কে ম্যাক্স প্লাঙ্ক তাঁর এই ধারণাকে বহুদিন অপ্রকাশিত রেখে ছিলেন। বাস্তবিক প্লাঙ্কের প্রস্তাবনা অনুসারে স্পন্দকটি শক্তিগ্রহণের সময় অথবা বিকিরণের ক্ষেত্রে গুচ্ছ গুচ্ছ ভাবে অর্থাৎ বিচ্ছিন্ন কোয়ান্টামের মাধ্যমে যথাক্রমে তা গ্রহণ অথবা বর্জন করে থাকে। প্রাথমিক প্রস্তাবনা অনুসারে প্ল্যাঙ্ক মনে করেন কোন একটি উৎস থেকে নিঃসরণ এবং একটি শোষক দ্বারা শোষণের মধ্যবর্তী সময়ে আলো ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার ধারণা মত তরঙ্গ ধর্ম মেনে চলে। প্ল্যাঙ্কের প্রকল্প অনুযায়ী আলোর বিকিরণ বা শোষণ কোয়ান্টামবদ্ধ। কিন্তু নিঃসরণ ও শোষণের মধ্যবর্তী বিস্তার বা অগ্রগতির ক্ষেত্রে তা তরঙ্গধর্মী।

2.3 আলোক তড়িৎ ক্রিয়া (Photo electric effect)

ম্যাক্স প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রস্তাবনার কিছুদিন পরে এই ধারনার সপক্ষে আরো জোরালো তাত্ত্বিক প্রমাণ দেন আইনস্টাইন। তাঁর যুক্তির মূল ভিত্তি ছিল আলোক তড়িৎ ক্রিয়া এবং সেই সংক্রান্ত সূত্রাবলী। কিছু কিছু পদার্থের উপর দৃশ্যমান বা অতিবেগুনী রশ্মি আপতিত হলে তা থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়। আলোকের প্রভাবে নিঃসারিত ইলেকট্রনকে উপযুক্ত ব্যবস্থার মাধ্যমে বর্তনীতে প্রবাহিত করানো যায়। আলোর প্রভাবে তড়িৎ পরিবহণের এই সামগ্রিক বিষয়টিকে আলোকতড়িৎ প্রভাব বলা হয়। (আপাত দৃষ্টিতে আলোর আপতনের ফলে ইলেকট্রন নিঃসরণের ঘটনাকে অতি স্বাভাবিক বলে মনে হয়। যেহেতু আলো শক্তি বহন করে সুতরাং উপযুক্ত শক্তি সম্পন্ন আলো ধাতুর পাতের উপর পড়লে তা ধাতুর পাতে বদ্ধ ইলেকট্রনগুলির বন্ধনশক্তির তুলনায় বেশি হলে, ধাতুর পাত থেকে ইলেকট্রনের মুক্তি ঘটাতে পারে। কিন্তু এই আপাত সরল ঘটনাটির সবটাই সহজবোধ্য নয়। যেমন ইলেকট্রন নিঃসরণের ঘটনাটি আলোর ঔজ্জ্বল্যের উপর নির্ভর করেনা, বরং তা আলোর রঙের উপর নির্ভরশীল। দেখা যায় অতি উজ্জ্বল কিন্তু নিম্ন কম্পাঙ্ক সম্পন্ন আলো ইলেকট্রন নিঃসরণে অক্ষম ; আবার অপেক্ষাকৃত কম উজ্জ্বল অথচ উচ্চ কম্পাঙ্ক সম্পন্ন আলো ধাতুর পাত

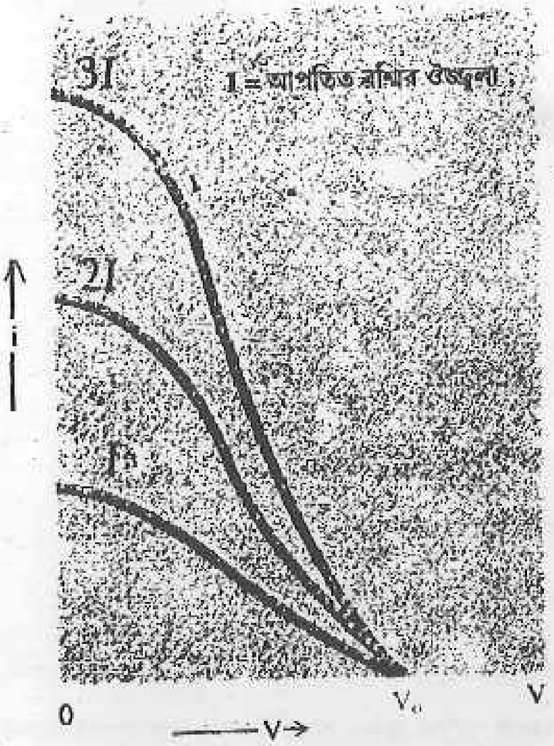
থেকে ইলেকট্রন মুক্ত করতে পারে।' আলোক তড়িৎ প্রভাবের পরীক্ষার জন্য নীচের ব্যবস্থা মত যন্ত্র সাজানো যায়।



চিত্র–2.3 : আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার যন্ত্রসজ্জা

'A' একটি 'B' কোয়ার্জ জানলা যুক্ত ফাঁপা কাঁচনল। B জানালাটির মধ্যে দিয়ে দৃশ্যমান এবং অতিবেগুনী রশ্মি কাঁচনলের মধ্যে প্রবেশ করে C আলো সংবেদী ধাতব পাতের উপর পরে। উপযুক্ত গুণসম্পন্ন আলো 'C' পাতের ওপর পড়লে তা থেকে আলোক তড়িৎ প্রভাবের ফলে ইলেকট্রন নির্গত হয়। কাঁচনলের অপরপ্রান্তে 'C' পাতের বিপরীতে 'D' অপর একটি ধাতব দন্ড। C এবং D তড়িৎ বর্তনীর দুই প্রান্ত একটি গ্যালভানোমিটার 'E' এবং একটি পরিবর্তনশীল রোধ 'F' মাধ্যমে তড়িৎ কোষ 'G' এর সঙ্গে যুক্ত। 'C' প্রান্তটি তড়িৎবর্তনীর ধনাত্মক ও 'D' প্রান্তটি ঋণাত্মক দিকে যোগ করা হয়। অর্থাৎ 'D' প্রান্তের বিভব 'C' প্রান্তের তুলনায় বেশি হলে ঋণাত্মক আধান যুক্ত ইলেকট্রন 'C' থেকে 'D' প্রান্তের দিকে ছুটে চলে। 'C' প্রান্তের উপর আপতিত একটি নির্দিষ্ট রঙের স্থির ঔজ্জ্বল্যের আলোর জন্য বর্তনীতে প্রবাহিত তড়িতের প্রবাহমাত্রা 'C' এবং 'D' এর মধ্যে যে কোন বিভব প্রভেদের জন্য স্থির হয় বা বলা যায় যে একটি নির্দিষ্ট রং ও ঔজ্জ্বল্যের আলোর বর্তনীতে পরিচালিত তড়িতের প্রবাহমাত্রা ঐ দুই প্রান্তের বিভব প্রভেদের ওপর নির্ভর করে না। কিন্তু এই দুই প্রান্তের ধ্রুবীয়তার (Polarity) বদল ঘটালো অর্থাৎ 'C' কে 'D' এর তুলনায় উচ্চবিভবসম্পন্ন করলে আলোক তড়িৎপ্রবাহমাত্রা (i) ক্রমশ কমতে থাকে যা অ্যাম্মিটার 'H'-ধরা পড়ে। এই অবস্থায় বিভবপ্রভেদ ক্রমশ বাড়াতে থাকলে অর্থাৎ 'D' প্রান্তকে 'C' প্রান্তের তুলনায় আরো নিম্ন বিভব সম্পন্ন করলে বিভবপার্থক্যের একটি বিশেষ মান ধরা যাক V_0 এর জন্য আলোক তড়িৎ প্রবাহ বন্ধ হয়ে যায় অর্থাৎ প্রবাহমাত্রা (i) এর মান শূণ্য হয়।

V_0 কে বিরাম বিভব (Stopping protential) বলা হয়। অর্থাৎ আলোক তড়িৎ প্রভাব পরীক্ষার জন্য ব্যবহৃত যন্ত্রের তড়িৎদ্বারের (আলোর সংবেদী প্রান্ত এবং তার বিপরীত তড়িৎদ্বারের উপযুক্ত ধ্রুবীয়তায়) যে নিম্নতম বিভব পার্থক্যের জন্য সংলগ্ন বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রার মান শূন্য হয় তাকে বিরাম বিভব বলা হয়। আলোক তড়িৎ প্রবাহমাত্রা এবং তড়িৎদ্বারদ্বয়ের বিভব পার্থক্যের বিপরীতে রেখে লেখচিত্র আঁকলে তা পার্শ্বের ছবির মত হয়।



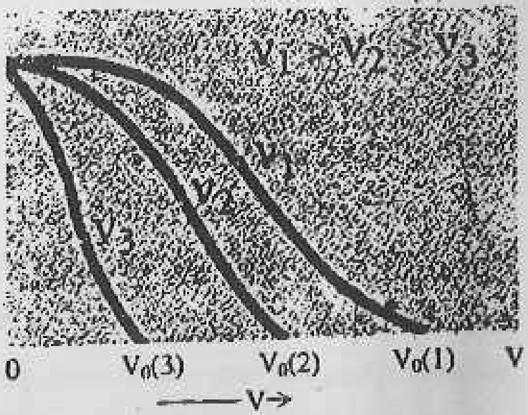
চিত্র–2.4 : একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কযুক্ত (υ) আলোর জন্য আলোকতড়িৎ প্রবাহমাত্রা (i) বনাম মন্দিত বিভব (v) লেখচিত্র

স্পষ্টতই একই রঙের আলোর জন্য বিরাম বিভবের মান আলোর ঔজ্জ্বল্যের ওপর নির্ভরশীল নয়। অর্থাৎ বলা যেতে পারে একই রঙের আলোর জন্য আলো সংবেদী পাত থেকে নিঃসারিত ইলেকট্রনের গতিশক্তির মান একই হয়। বস্তুত আলো সংবেদী ইলেকট্রনগুলির গতিশক্তির সর্বোচ্চ মান একটি রঙের আলোর জন্য সুনির্দিষ্ট। মনে করা যাক সংশ্লিষ্ট ক্ষেত্রে গতিশক্তির মান নিম্নরূপ।

গতিশক্তির সর্বোচ্চ মান = $V_0 \times e$

আলোক তড়িৎ প্রভাবের ওপর পরীক্ষানিরীক্ষা চালিয়ে

আলোক তড়িৎপ্রভাবের বৈশিষ্ট সম্পর্কে বলা যায় যে— (1) আলোক তড়িৎ ক্রিয়া তাৎক্ষণিক। অর্থাৎ ধাতব পাতের ওপর আলোর আপতন এবং ইলেকট্রন নিঃসরণের মধ্যে কোন সময়ের ব্যবধান নেই। বস্তুত ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার সূত্র অনুসারে এই ঘটনাটি আলোর তরঙ্গধর্মীতার দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায় না। কেননা আপতিত আলোকতরঙ্গ ধাতুর ওপর ক্রমশ ছড়িয়ে পড়ে। সুতরাং কোন একটি ইলেকট্রন নিঃসরণের আগে যথোপযুক্ত শক্তি সংগ্রহের জন্য কিছু সময় নেবে।

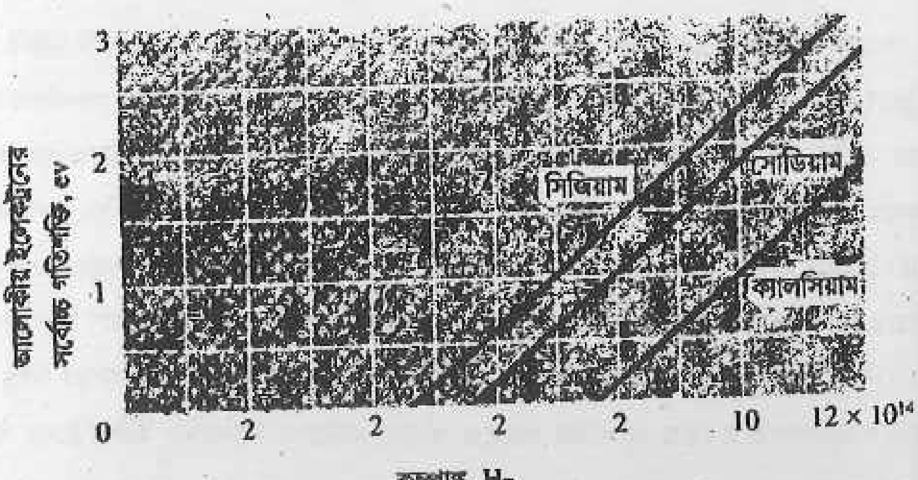


চিত্র–2.5 : একটি নির্দিষ্ট ঔজ্জ্বল্য সম্পন্ন (I) আলোর জন্য আলোকতড়িৎ প্রবাহমাত্রা (i) বনাম মন্দিত বিভব (v) লেখচিত্র

এক্ষেত্রে আলোর আপতন ও নিঃসরণের মধ্যবর্তী সময়ের ব্যবধান গণনা করে দেখা যায় প্রায় 10^{-9} সেকেন্ড।

(2) বিমুক্ত ইলেকট্রনের গতিশক্তি আপতিত আলোর ঔজ্জ্বল্যের ওপর নির্ভর করে না। আলোক সম্পাতের জন্য বর্তনীতে সৃষ্ট প্রবাহমাত্রা বা আলোক তাড়িতিক প্রবাহমাত্রাই এর ফলে বাড়ে। অর্থাৎ এ কথা বলা যায় যে আলোকরশ্মির ঔজ্জ্বল্য বাড়লে বর্তনীতে আলোকীয় ইলেকট্রনের সংখ্যা সমানুপাতে বাড়তে থাকে। এই ঘটনাটি আপাতদৃষ্টিতে আমাদের প্রচলিত ধারণার বিরোধী। তরঙ্গধর্মী আলোর ক্ষেত্রে ঔজ্জ্বল্য বৃদ্ধি পেলে তরঙ্গটি অধিকশক্তিবাহী হয়ে থাকে। সুতরাং সাধারণ ধারণায় বলা যেতে পারে আপতিত আলোর ঔজ্জ্বল্য বা প্রাবল্য বৃদ্ধি পেলে আলোকীয় ইলেকট্রনের গতিশক্তিও বৃদ্ধি পাওয়া উচিত।

(3) আপতিত আলোর কম্পাঙ্ক একটি সুনির্দিষ্ট মাত্রার চেয়ে কম হলে, বর্তনীতে ইলেকট্রন প্রবাহ হয় না। বস্তুত একটি গৃহীত ধাতুর জন্য যে নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের নীচে (যত উজ্জ্বল বা তীব্র আলোকরশ্মিই হোক না কেন), বর্তনীতে ইলেকট্রন প্রবাহ শুরু হয় না, সেই আলোক কম্পাঙ্কটি একটি গৃহিত ধাতুর জন্য সুনির্দিষ্ট। আবার দেখা যায় যে আপতিত আলোর কম্পাঙ্ক বৃদ্ধি পেলে বিমুক্ত ইলেকট্রনের গতিশক্তি সমানুপাতে বৃদ্ধি পায়। দেখা যাচ্ছে যে একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের চেয়ে কম কম্পাঙ্ক সম্পন্ন আলো, তা যত তীব্র বা উজ্জ্বলই হোক না কেন, আলোকীয় ইলেকট্রনের নিঃসরণ ঘটাতে অক্ষম। আবার এই প্রারম্ভ কম্পাঙ্কের থেকে বেশি কম্পাঙ্ক সম্পন্ন অপেক্ষাকৃত মৃদু আলো ইলেকট্রন নিঃসরণ ঘটাতে সক্ষম। এই ঘটনাটিও প্রচলিত তত্ত্বের সাহায্যে যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না।



চিত্র–2.6 : আলোকীয় ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ গতিশক্তি বনাম কম্পাঙ্ক লেখচিত্র

2.3.1 আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার আইনস্টাইনের ব্যাখ্যা

কৃষ্ণ বস্তু বিকিরণের ক্ষেত্রে বিকিরক বস্তুটির আয়তন বৃদ্ধি পেলে এনট্রপি (Entropy) বা অবিনস্ততা কেমনভাবে প্রভাবিত হয় তা গণনার সময় আইনস্টাইন লক্ষ্য করেন যে কৃষ্ণ বস্তুর আয়তন V_1 থেকে V_2 হলে সংশ্লিষ্ট অবিনস্ততার পরিবর্তন (ΔS) এর মান $\Delta S = R l_n(V_2/V_1)$ হয়। (R = সার্বজনীন গ্যাসীয় ধ্রুবক)। সম্পর্কটি খুঁটিয়ে দেখলে স্পষ্টতই বোঝা যায় যে এটি অবিকল একটি আদর্শ গ্যাসের অনুরূপ আয়তন পরিবর্তনের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট অবিনস্ততার পরিবর্তনের পরিমাণের নির্ণায়ক সম্পর্কটির মত, অবিকল একরকম। সম্পর্কদুটির গাণিতিক প্রকাশ অবিকল একরকম হওয়ায় আইনস্টাইন মনে করেন যে একটি আদর্শ গ্যাস যেমন কতগুলি বিচ্ছিন্ন পরমাণুর সমন্বয় তেমনই আলো বা তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ ও একইরকম বিচ্ছিন্ন কণাধর্ম সম্বলিত, এই ধারণার বশবর্তী হয়ে অর্থাৎ আলোকীয় বিকিরণকে কণাধর্মী ভেবে নিয়ে আইনস্টাইন আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার নিম্নলিখিত ব্যাখ্যা দেন।

(1) যেহেতু তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ মূলত ফোটন কণার সমন্বয়ে গঠিত সুতরাং একটি ইলেকট্রন হয় একটি সম্পূর্ণ ফোটনকে তার শক্তিসহ গ্রাহ করে (অর্থাৎ ঐ ফোটনের সংশ্লিষ্ট শক্তি সম্পূর্ণরূপে গ্রহণ করে) অথবা ঐ ফোটনটিকে (বা সংশ্লিষ্ট আলোকে) আদৌ গ্রহণ করে না। যদি সংশ্লিষ্ট ফোটন বাহিত শক্তি বা ইলেকট্রন কর্তৃক গৃহিত শক্তির পরিমাণ ধাতুর আকর্ষণ কাটিয়ে ওঠার মত যথেষ্ট শক্তি সম্পন্ন হয় তবেই ইলেকট্রনটি ধাতব তল থেকে বিমুক্ত হতে পারে। যেহেতু এই প্রক্রিয়াটিতে ধ্রুপদী তত্ত্বের মত তরঙ্গের বিস্তারের কোন ভূমিকা নেই সুতরাং আলোক তড়িৎ ক্রিয়া তাৎক্ষণিক। অর্থাৎ আলোক বা ফোটনের আপতন এবং আলোকীয় ইলেকট্রনের নিঃসরণের মধ্যে কোন সময়ের ব্যবধান নেই।

(2) যেহেতু একরঙা আলো নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কযুক্ত ফোটন কণার সমন্বয় সুতরাং—একটি নির্দিষ্ট একরঙা আলোর তীব্রতা যত বৃদ্ধি পায় ততই একটি নির্দিষ্ট ক্ষেত্রফলে একটি নির্দিষ্ট সময়ের মধ্যে আপতিত আলোর ফোটন কণার সংখ্যা বৃদ্ধি পায়। কিন্তু মনে রাখতে হবে আলোর রং সুনির্দিষ্ট বলে ফোটনগুলির কম্পাঙ্কও সুনির্দিষ্ট। অর্থাৎ একরঙা আলোর জন্য সংশ্লিষ্ট সব ফোটনের কম্পাঙ্ক একই হয়। অর্থাৎ সব ফোটনই একই শক্তি সম্পন্ন। যেহেতু একটি ইলেকট্রন একসঙ্গে কেবলমাত্র একটি ফোটন গ্রহণ করতে পারে সুতরাং আলো যত উজ্জ্বল হয় (বা আপতিত আলোয় যত বেশি সংখ্যায় ফোটন উপস্থিত থাকে তত বেশি হারে ইলেকট্রন ধাতব পাত থেকে বিমুক্ত হয়)। ফলতঃ আলোক তাড়িতিক প্রবাহমাত্রা সমানুপাতে বাড়ে। কিন্তু প্রতিটি ফোটন একই শক্তি সম্পন্ন হওয়ায় আপতিত আলোর তীব্রতা বাড়লেও নিঃসারিত ইলেকট্রনের গতিশক্তি বাড়েনা।

(3) যদি একটি ধাতুর পাত থেকে নিঃসরণের জন্য ইলেকট্রনের শক্তির পরিমাণ ω হয় অর্থাৎ কমপক্ষে

ω শক্তি পেলে তবেই একটি ইলেকট্রন ধাতুর আকর্ষণ কাটিয়ে মুক্ত হতে পারে তা হলে বলা যায় যে কমপক্ষে ω শক্তি সম্পন্ন ফোটন শোষিত না হলে একটি ইলেকট্রন ধাতব পাতের আকর্ষণ ছেড়ে বার হতে পারে না। যেহেতু একটি ফেটনের বাহিত শক্তির পরিমাণ ফোটনের কম্পাঙ্কের সমানুপাতী সুতরাং বলা যায় যে যতক্ষণ পর্যন্ত না আপতিত আলো বা সংশ্লিষ্ট ফোটন বাহিত শক্তির পরিমাণ ω বা তার বেশি হয় ততক্ষণ পর্যন্ত আপতিত আলোর তীব্রতা যাই হোক না কেন তা ধাতুর পাত থেকে ইলেকট্রনের বিমুক্তি ঘটাতে পারে না। অর্থাৎ ω শক্তির জন্য প্রয়োজনীয় নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের সবচেয়ে কম কম্পাঙ্ক সম্পন্ন আলো কোন অবস্থাতেই আলোক তড়িৎ ক্রিয়া শুরু করতে পারে না। বা বলা যায় একটি নির্দিষ্ট সর্বনিম্ন কম্পাঙ্কের আলোক তড়িৎ ক্রিয়া বন্ধ হয়ে যায়। ধাতুর ইলেকট্রন কর্তৃক শোষিত ফোটনের শক্তির একটি অংশ ধাতুর আকর্ষণ কাটানোর জন্য ব্যবহৃত হয়। শোষিত শক্তির অতিরিক্ত বা বাড়তি অংশটি ইলেকট্রনের গতিশক্তি বাড়ায়। যদি υ কম্পাঙ্কের আলো দ্বারা ইলেকট্রন নির্গত হয় তাহলে

$$E = h\upsilon \quad \text{এবং} \quad \omega = h\upsilon_0$$

সুতরাং $E = \omega + \frac{1}{2} mv^2$,

$$h\upsilon = h\upsilon_0 + \tfrac{1}{2} mv^2$$

$$h(\upsilon - \upsilon_0) = \tfrac{1}{2} mv^2 \qquad \ldots\ldots\ldots(2.3)$$

সুতরাং আইনস্টাইনের প্রস্তাবনা অনুসারে অর্থাৎ আলোকে কণাধর্মী বলে মনে করলে আলোক তড়িৎক্রিয়ার যুক্তিসঙ্গত ব্যাখ্যা করা যায়। আইনস্টাইনের তত্বের ফলে কোন মাধ্যমের মধ্যে বিস্তারের সময় আলো কণার মত আচরণ করে। কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণের ব্যাখ্যা করার প্রসঙ্গে প্ল্যাঙ্ক মনে করেন যে কোন বস্তুর দ্বারা বিকীর্ণ বা শোষিত আলো কণাধর্মী। এবং কোন মাধ্যমের মধ্যে প্রবাহকালীন আলো তরঙ্গধর্মী। আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যার পর এই আলোর চরিত্রের তাত্বিক সীমাবদ্ধতা দূর হয়। বা বলা যায় আলো উৎসারণ, বিস্তার এবং শোষণের সকল অবস্থাতেই যে আলোকশক্তি আলোককণা বা ফোটন দ্বারা পরিবাহিত হয় তা সন্দেহাতীত ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়। আলোর এই বৈশিষ্ট প্রমাণ করার জন্য বা আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার যুক্তিসঙ্গত তাত্বিক ব্যাখ্যার জন্য 1905 খ্রীষ্টাব্দে আইনস্টাইন পদার্থবিদ্যার নোবেল পুরস্কার পান।

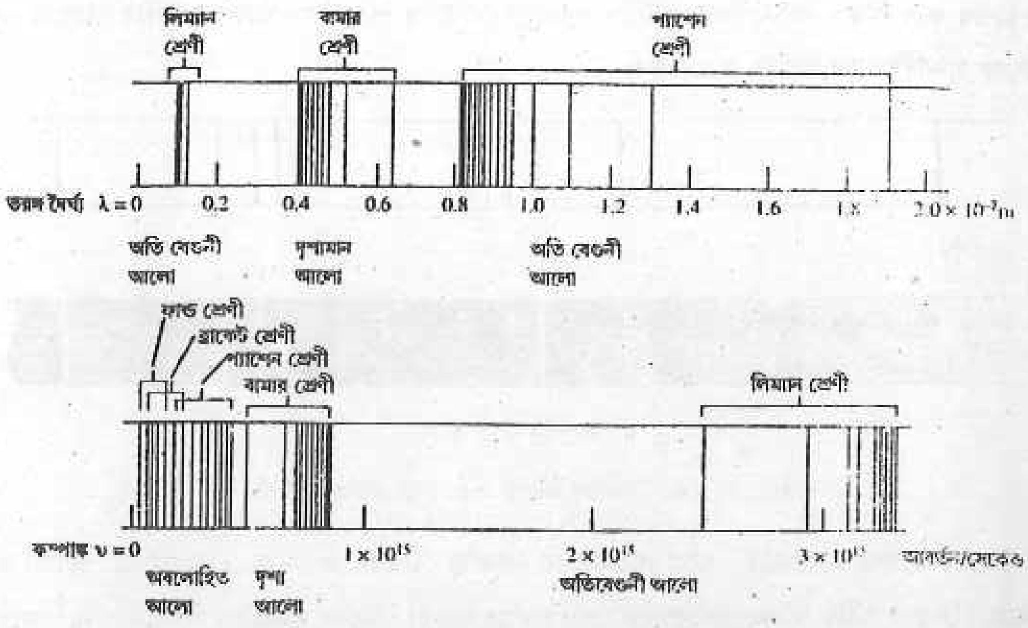
2.4 পারমাণবিক বর্ণালী (Atomic Spectra)

পূর্ববর্তী 2.3 অংশে আমরা কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ সম্পর্কে আলোচনা করেছি এবং জেনেছি যে সমস্ত পদার্থই সকল উষ্ণতায় তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বিকিরণ করে। এটি কোন বস্তুর উপাদান, অণু, পরমাণুর সমষ্টিগত ধর্ম।

এই তাত্ত্বিক ধারণা থেকে আবার কোন একটি গ্যাস বা একাধিক গ্যাসীয় পরমাণুর সমাহারকে বা এককথায় গ্যাসীয় পরমাণুর সমূহকে উপযুক্ত পরিমাণে উত্তেজিত করলে (যেমন কোন পারমাণবিক গ্যাসের ওপর যথোপযুক্ত শক্তিসম্পন্ন ইলেকট্রিক আর্ক আলো ফেলে) তা থেকে আলো বিকীর্ণ হতে পারে। এক্ষেত্রে তাত্ত্বিক রূপকল্পটি আগে উল্লিখিত কৃষ্ণবস্তু বিকিরণের থেকে সম্পূর্ণ আলাদা। বস্তুত গ্যাসীয় অবস্থায় পরমাণুগুলি পরস্পরের থেকে সম্পূর্ণ আলাদাভাবে অবস্থান করে। অর্থাৎ শক্তির আদান প্রদানের দিক থেকে একটি পরমাণু এক্ষেত্রে অপর একটি পরমাণুর সম্পূর্ণ প্রভাবমুক্ত। সুতরাং এইরকম পরমাণুগুলির প্রত্যেকটিকেই সম্পূর্ণ স্বাধীন কণা হিসাবে কল্পনা করা যেতে পারে এবং পরমাণুগুলির পারস্পরিক ক্রিয়াগুলিকে তুচ্ছ বলে উপেক্ষা করা যেতে পারে। এই আলোচনার পরিপ্রেক্ষিতে কোন পরমাণু থেকে বিকীর্ণ আলোকে ঐ পরমাণুর বৈশিষ্ট্য সম্পন্ন বলে ভাবা যেতে পারে।

একটি পারমাণবিক গ্যাসকে উপযুক্তভাবে উত্তেজিত করলেন পরবর্তী পর্যায়ে এটি সুনির্দিষ্ট কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট আলো বিকিরণ করে। এই বিকীর্ণ বিভিন্ন রঙের বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট আলোর সমাহারকে সংশ্লিষ্ট পরমাণুর বিকিরণ বর্ণালী বলা হয়। পরমাণু দ্বারা বিকীর্ণ আলোকে একটি বিবর্তন গ্রেটিং (diffraction grating) বা প্রিজমের দ্বারা কম্পাঙ্ক অনুসারে বিশ্লেষণ করলে আমরা ঐ পরমাণুর বৈশিষ্ট্যযুক্ত বিভিন্ন রঙের তথা কম্পাঙ্কের সমাহার পাব। এই সমাহারকে ঐ পরমাণুর বিকিরণ বর্ণালী বলা হয়।

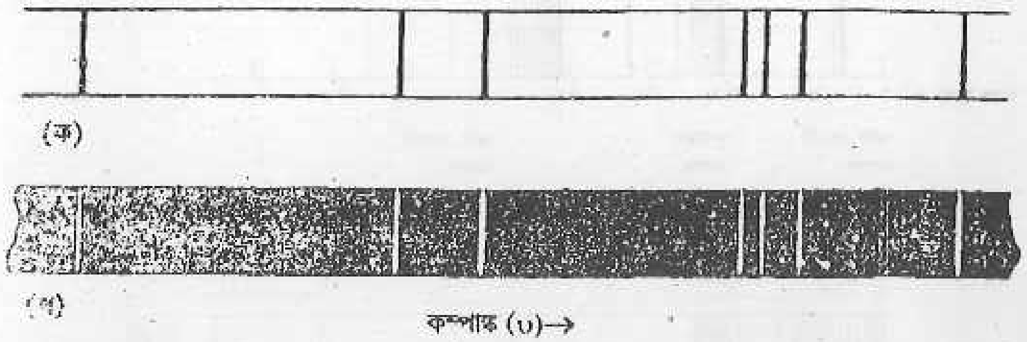
চিত্র–2.7 : পারমাণবিক বর্ণালী বীক্ষণের সরল চিত্ররূপ



চিত্র–2.8 : হাইড্রোজেন পরমাণুর বিভিন্ন বর্ণালী

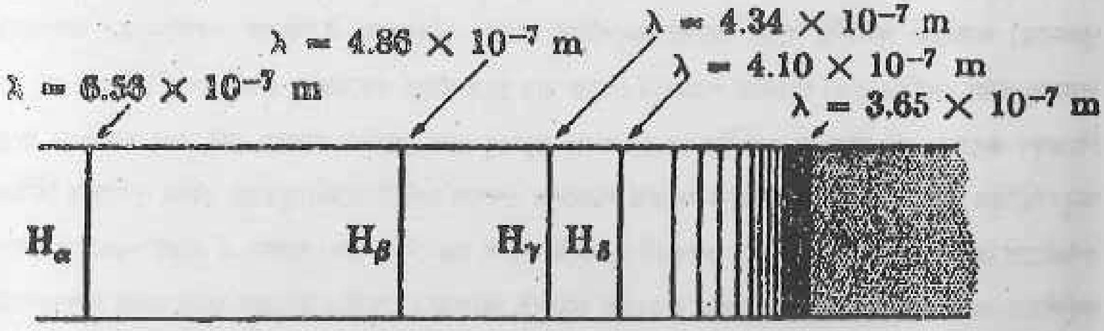
(2.8) চিত্রে হাইড্রোজেন পরমাণুর বিকিরণ বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণী দেখানো হয়েছে। এই চিত্রটি লক্ষ্য করলে দেখা যায় কোন একটি পরমাণুর বিকিরণ বর্ণালী কতগুলি শ্রেণী বা গুচ্ছে বিভক্ত। যেহেতু এক একটি গুচ্ছ কতগুলি সুনির্দিষ্ট বর্ণালী রেখার বা একরঙা আলোর সমষ্টি, তাই পারমাণবিক বর্ণালীকে রেখা বর্ণালী বলা যায়। আবার কোন একটি পারমাণবিক গ্যাসের ওপর একাধিক রঙের আলো, যেমন সাদা আলো ফেললে ঐ পারমাণবিক গ্যাসটি নিজস্ব বৈশিষ্ট অনুসারে মাত্র কতগুলি বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বা কম্পাঙ্কের আলো শোষণ করে। সুতরাং ঐ গ্যাস প্রকোষ্ঠ থেকে বেরিয়ে আসা বিভিন্ন রঙের আলোর সমষ্টি তে (আপতিত আলোর তুলনায়) কতগুলি সুনির্দিষ্ট রঙের আলো অনুপস্থিত থাকে। বলাবাহুল্য ঐ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোগুলি পরমাণু দ্বারা শোষিত হয়। গ্যাসীয় পরমাণুর থেকে বার হয়ে আসা আলোকে একটি বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্র দ্বারা বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে বর্ণালীর যে যে অংশ পরমাণু দ্বারা শোষিত হয়েছে সেই জায়গাগুলিতে রঙের অনুপস্থিতির কারণে কালো হয়। একে সংশ্লিষ্ট পরমাণুর শোষণ বর্ণালী বলে। সুতরাং কোন পরমাণুর বিকিরণ বর্ণালীতে কালো পশ্চাৎপটের ওপর কতগুলি সুনির্দিষ্ট বর্ণ বা রঙ দেখা যায়। আবার ঐ একই পরমাণুর শোষণ বর্ণালীতে একাধিকরঙের আলোর মধ্যে কতগুলি সুনির্দিষ্ট অংশমাত্র শোষিত হওয়ার ফলে রঙিন পশ্চাৎপটের ওপর সুনির্দিষ্ট অংশে কালো রেখাঙ্কিত হয়ে থাকে। আরো লক্ষ্য করা গেছে যে কোন পরমাণুর বিকিরণ ও শোষণ বর্ণালী পরস্পরের পরিপূরক। অর্থাৎ বিকিরণ বর্ণালীর যে যে অংশ রঙিন শোষণ বর্ণালীর সেই অংশগুলি কালো রেখাঙ্কিত হয়। বলা বাহুল্য বর্ণালীর কোন অংশটি রঙিন বা কালো হতে তা সম্পূর্ণভাবে পরমাণুর বৈশিষ্টের

উপর নির্ভর করে অর্থাৎ পারমাণবিক বর্ণালীর পরমাণুর বৈশিষ্ট্যের পরিচায়ক। অর্থাৎ বর্ণালীর সাহায্যে একটি পরমাণুকে সুনির্দিষ্টভাবে সনাক্ত করা সম্ভব।



চিত্র–2.9 : (ক) নিঃসরণ বর্ণালী এবং (খ) শোষণ বর্ণালী.

উনবিংশ শতাব্দির মাঝামাঝি থেকে পারমাণবিক বর্ণালীর বিশ্লেষণ ও সে সংক্রান্ত বিভিন্ন পরীক্ষা করা হতে থাকে। কিন্তু বর্ণালীর বিভিন্ন পর্যবেক্ষণে কোন তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা সেসময় আমাদের জানা ছিল না। যেহেতু পারমাণবিক বর্ণালীর পরমাণুর বৈশিষ্ট নির্দেশ করে সুতরাং পরমাণুর গঠন সঠিকভাবে জানা গেলে বর্ণালীর তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব হতে এমনটা সে কথা সহজেই বলা চলে। বস্তুত পরমাণুর গঠনের যে কোন তাত্ত্বিক রূপকল্পের যথার্থতা বিচারে ঐ রূপকল্পটির পারমাণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যার ক্ষেত্রে কতদূর উপযোগী তা থেকে ধারণা করা যেতে পারে। বস্তুত বর্ণালীর বিশ্লেষণের বিভিন্ন তথ্য আমাদের সঠিক পারমাণবিক রূপকল্প সন্ধানে বিশেষভাবে কাজে লাগে। (2.10) চিত্রে হাইড্রোজেন পরমাণুর রেখা বর্ণালীর বামার শ্রেণী দেখান হয়েছে।



চিত্র–2.10 : হাইড্রোজেন পরমাণুর বর্ণালীর বামার শ্রেণী

1885 খ্রীষ্টাব্দে বামার হাইড্রোজেনের পারমাণবিক বর্ণালীর বিশ্লেষণ করে দেখান যে একটি বিশেষ শ্রেণীতে

(দৃশ্যমান আলোর জন্য বর্ণালীর বিভিন্ন রেখার তরঙ্গ সংখ্যা $\bar{\upsilon}$) নীচের সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়।

$$\frac{1}{\lambda} = \bar{\upsilon} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

এক্ষেত্রে λ = সংশ্লিষ্ট রঙের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য

R_H = রিডবার্গ ধ্রুবক, বর্ণালী সংক্রান্ত সার্বজনীন ধ্রুবক।

$n = 3$ বা ততোধিক অর্থাৎ 3, 4, 5, 6 ইত্যাদি ধনাত্মক পূর্ব সংখ্যা।

$n = 3$ হলে বামার শ্রেণীর প্রথম রেখা বা H_α রেখার তরঙ্গসংখ্যা নির্দেশ করে। আবার $n = 4$, 5 ইত্যাদি যথাক্রমে বর্ণালীর ঐ অংশের H_β, H_γ, H_δ ইত্যাদি রেখাকে নির্দেশ করে। (চিত্র 2.10)

1899 খ্রীষ্টাব্দে রিডবার্গ পরীক্ষার সাহায্যে প্রতিষ্ঠিত করেন যে হাইড্রোজেন পরমাণুর বর্ণালীর যে কোন শ্রেণীর একটি রেখাকে নিম্নলিখিত সাধারণ সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়

$$\bar{\upsilon} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad \text{.........(2.5)}$$

এক্ষেত্রে m এবং n শূণ্য ব্যতীত ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যা। এবং $m < n$। হাইড্রোজেন পরমাণুর বামার শ্রেণীর ক্ষেত্রে $m = 2$, সুতরাং $n = 3, 4, 5, 6$ ইত্যাদি। R_H বা রিডবার্গ ধ্রুবকের মান পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করা হয় $1.09677581 \times 10^7 \ m^{-1}$ । হাইড্রোজেনের রেখা বর্ণালীর ক্ষেত্রে অপরাপর যে শ্রেণীগুলি লক্ষিত হয় তা নীচে সারণী (2.1) উল্লেখ করা হল। (চিত্র 2.8)

সারণী (2.1)

শ্রেণী	সমীকরণ	n এর মান	বর্ণালীর যে অংশে পাওয়া যায়
লীম্যান (Lyman)	$\bar{\upsilon} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 2, 3, 4$ ইত্যাদি	অতি বেগুণী
বামার (Balmer)	$\bar{\upsilon} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 3, 4, 5$ ইত্যাদি	দৃশ্যমান

সারণী (2.1) (*Contd.*)

শ্রেণী	সমীকরণ	n এর মান	বর্ণালীর যে অংশে পাওয়া যায়
প্যাশেন (Paschen)	$\bar{\upsilon} = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	n = 4, 5, 6 ইত্যাদি	অবলোহিত
ব্রাকেট (Brackett)	$\bar{\upsilon} = R_H\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	n = 5, 6, 7 ইত্যাদি	দূর অবলোহিত
ফান্ড (pfund)	$\bar{\upsilon} = R_H\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	n = 6, 7, 8 ইত্যাদি	অতি দূর অবলোহিত

হাইড্রোজেন বর্ণালীর ক্ষেত্রে লীম্যান, বামার, প্যানেল ও ব্রাকেট শ্রেণীগুলি জানা থাকলেও সুক্ষ বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্রের অভাবে ফান্ড শ্রেণী অন্য শ্রেণীগুলির সঙ্গে একই সময়ে অবিকৃত হয়নি। বস্তুত ফান্ড শ্রেণী অনেক পরে আবিষ্কৃত হলেও তা রিডবার্গের প্রস্তাবিত সমীকরণ অনুসরণ করে এবং পরবর্তীকালে বোর রূপকল্পের সাহায্যে এটিকে উপযুক্তভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। বোর তত্ত্বেরও অনেক পরে আবিষ্কৃত এই শ্রেণীটির ব্যাখ্যা বোর তত্ত্বের অনুসারী হবার ফলে এই শ্রেণীর আবিষ্কার বোরতত্ত্বকে দৃঢ় ভিত্তির ওপর প্রতিষ্ঠিত করে।

2.5 হাইড্রোজেন পরমাণুর গঠন সংক্রান্ত বোর তত্ত্ব : (Bohr's theory of structure of hydrogen atom)

কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ সংক্রান্ত প্ল্যাঙ্কের তত্ত্ব থেকে আমরা জানি যে কৃষ্ণবস্তু যে স্পন্দকগুলির সমন্বয়ে গঠিত সেগুলি কেবলমাত্র কয়েকটি সুনির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন হতে পারে। অর্থাৎ স্পন্দকগুলি শক্তির যে কোন মান গ্রহণ করতে পারে না।

পরবর্তীকালে আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যা প্রসঙ্গে আইনস্টাইন দেখান যে স্পন্দকগুলি কোন আপতিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ থেকে শক্তি শোষণ করার ক্ষেত্রে শক্তির যে কোন মান গ্রহণ করতে পারে না। অর্থাৎ সংশ্লিষ্ট শোষণ বর্ণালীটি বিচ্ছিন্ন হয়ে থাকে। সুতরাং বলা যায় তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ শোষণ বা নিঃসারণের ক্ষেত্রে স্পন্দকটি শক্তির কতগুলি বিচ্ছিন্ন মানই যথাক্রমে শোষণ বা নিঃসরণ করে।

এই তত্ত্বের অনুবর্তী ধারণার বশবর্তী হয়ে 1911 খ্রীষ্টাব্দে নীলস্ বোর্ (Neils Bohr) মনে করেন যে

বর্ণালী সৃষ্টিকারী গ্যাসীয় পরমাণুর তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ শোষণ বা নিঃসরণের বিষয়টিও একইরকম প্রক্রিয়ায় ঘটে থাকে। যেহেতু রেখা বর্ণালী গঠনের ক্ষেত্রে পরমাণু কেবলমাত্র কতগুলি বিচ্ছিন্নমানের শক্তির বা তরঙ্গ সংখ্যা তথা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোই কেবল গ্রহণ করে সুতরাং পরমাণুর মধ্যে (কৃষ্ণবস্তুর মধ্যে স্থিত স্পন্দকের মত) কতগুলি বিচ্ছিন্ন শক্তিস্তর রয়েছে। বোরের প্রস্তাবিত প্রকল্পটির পারমাণবিক গঠন সম্পর্কিত ধারণার জগতে সম্পূর্ণ মৌলিক। যদিও এই পর্যায়ে বোর রাদারফোর্ড প্রস্তাবিত কেন্দ্রকযুক্ত পরমাণুর রূপকল্পটি উপযুক্ত সংশোধনী সহ অনুসরণ করেন। এই তত্ত্ব অনুসারে ইলেকট্রন অতিক্ষুদ্র কেন্দ্রকের চতুর্দিকে কতগুলি সুনির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তন করে। এরকম একটি তন্ত্রে পরিক্রমারত ইলেকট্রন একটি ত্বরিত নির্দেশতন্ত্রের অংশ। সুতরাং ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বানুযায়ী আহিত কণা ইলেকট্রন অবিরত শক্তি বিকীর্ণ করতে থাকবে। এর ফলে, বস্তুত, সমগ্র ব্যবস্থাটি বিপর্যস্ত হয়ে পড়বে কারণ ইলেকট্রনটি শক্তি বিকীর্ণ করতে করতে নিউক্লিয়াসে আপতিত হবে। বোর তাঁর প্রস্তাবিত কোয়ান্টাম তত্ত্বের ধ্রুপদী পদার্থ ধারণার সম্পূর্ণ বিরোধিতা করে প্রস্তাব করেন যে কতগুলি সুনির্দিষ্ট বা নির্ধারিত বৃত্তাকার পরিক্রমা পথে কেন্দ্রকের চারদিকে আবর্তনরত ইলেকট্রনটি শক্তি বিকীরণ করবে না। অর্থাৎ সংশ্লিষ্ট নির্দেশতন্ত্রটি সুস্থিত হবে। যদিও ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যা অনুসারে এটি অসম্ভব। স্পষ্টতই বোরের প্রস্তাবিত রূপকল্পটি পরমাণুর গঠন সংক্রান্ত সমসাময়িক প্রচলিত তত্ত্বগুলি থেকে একেবারেই আলাদা। প্রস্তাবিত তত্ত্বের ব্যাখ্যা প্রসঙ্গে বোর প্রস্তাব করেন যে—

(1) পরমাণুর মধ্যে একটি অতি ক্ষুদ্রস্থানে অবস্থিত ধনাত্মক আধানযুক্ত নিউক্লিয়াসের চারপাশে কতগুলি সুনির্দিষ্ট বৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনগুলি অবিরত পরিক্রমা করে। নিউক্লিয়াসের চারপাশে এই সুনির্দিষ্ট বৃত্তাকার পথে আবর্তনের সময় ইলেকট্রন কোনরকম শক্তি বিকিরণ করেনা। অর্থাৎ শক্তির দিক থেকে এই তন্ত্রটি সম্পূর্ণ সুস্থিত। এই বৃত্তাকার কক্ষপথগুলিকে ইলেকট্রনের সুস্থিত অবস্থা (Stationary State) বলে।

(2) পরমাণুর মধ্যে সুস্থিত অবস্থাসমূহের অবস্থান সুনির্দিষ্ট। বৃত্তাকার পথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ (mvr) নিম্নলিখিত কোয়ান্টামসূত্র অনুসারে পূর্ব নির্দিষ্ট।

$$mvr = n\hbar \qquad \text{.........(2.6)},$$

এক্ষেত্রে m = ইলেকট্রনের ভর

r = পরিক্রমাপথের ব্যাসার্ধ

v = পরিক্রমা পথের কোন বিন্দুতে ইলেকট্রনের রৈখিক বেগ।

n = একটি ধনাত্মক পূর্ণ সংখ্যা

h = প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক ; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

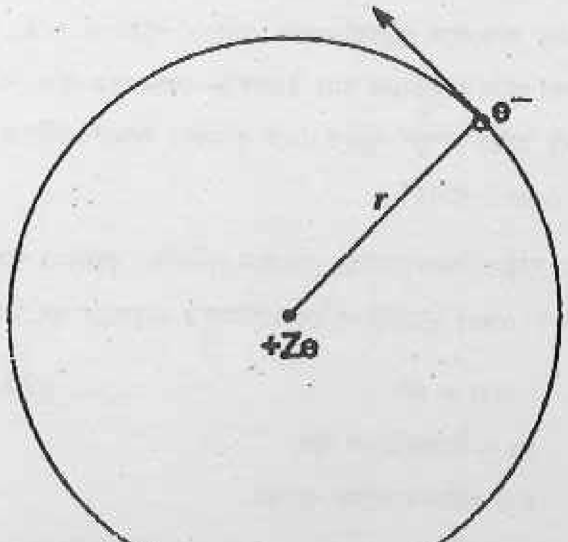
n কে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা বলা হয়। কৌণিক ভরবেগের কোয়ান্টায়নের জন্য বলা যায়, যে কোন ব্যাসার্ধ যুক্ত বৃত্তাকার পথই পরিক্রমার উপযুক্ত নয়। বরং যে বৃত্তাকার পথগুলিতে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ h এর পূর্ণসংখ্যার গুণিতক কেবলমাত্র সেগুলিই বিবেচ্য।

(3) একটি সুস্থিত অবস্থা থেকে অন্য একটি সুস্থিত অবস্থায় (অর্থাৎ একটি বৃত্তাকার পথ থেকে অপর একটি বৃত্তাকার পথে সংক্রমণের ক্ষেত্রে ইলেকট্রন কর্তৃক শোষিত বা নিঃসারিত শক্তি (ΔE) ঐ সুস্থিত অবস্থাদ্বয়ের শক্তির পার্থক্যের সমান। এক্ষেত্রে

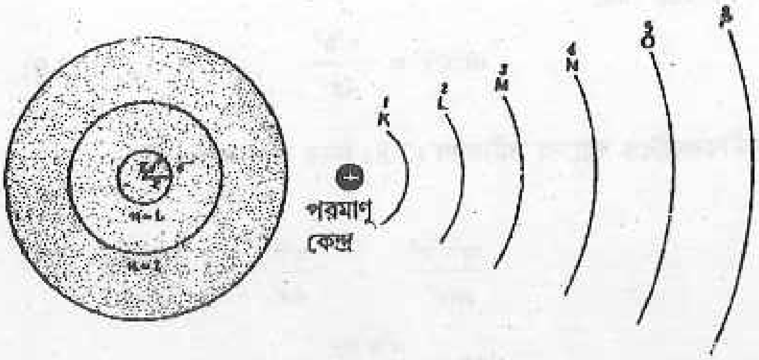
$$\Delta E = E_f - E_i$$

E_f ও E_i যথক্রমে অন্তিম ও প্রাথমিক সুস্থিত অবস্থার শক্তি।

(4) কেবলমাত্র এই তিনটি প্রস্তাব ছাড়া পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রন এর গতি নির্ধারণ এর ক্ষেত্রে অন্য সকল বিষয়ে ধ্রুপদী পদার্থ বিদ্যার তত্ত্বগুলি যথাযথভাবে অনুসৃত হয়। এই রূপকল্পটি অনুসারে হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের শক্তি, বিভিন্ন ধরণের বর্ণালীর যথাযথ ব্যাখ্যা, পরিক্রমাপথের ব্যাসার্ধ ইত্যাদি নির্ণয় করা যায়। বোর প্রস্তাবিত হাইড্রোজেন পরমাণুর রূপকল্প ও এই রূপকল্পে অবস্থিত সুস্থিত শক্তিস্তর চিত্র [2.11(a) ও 2.11(b)] তে দেখান হয়েছে।



চিত্র–2.11(a) : বোর প্রস্তাবিত হাইড্রোজেন পরমাণুর রূপকল্প
(সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থা)



চিত্র–2.11(b) : বোর প্রস্তাবিত পরমাণুর রূপকল্পে অবিচ্ছিন্ন সুস্থিত শক্তিস্তর

2.5.1 বোর তত্ত্বের সাহায্যে গণনা

(1) ইলেকট্রনের পরিক্রমাপথের ব্যাসার্ধ নির্ণয় :

ধরা যাক কোন হাইড্রোজেন সদৃশ তত্ত্বের পারমাণবিক সংখ্যা Z ; অর্থাৎ কেন্দ্রকের মোট তড়িতাধান Ze। কুলম্বের সূত্রানুসারে r দূরত্বে অবস্থিত ইলেকট্রনটির উপর কেন্দ্রকের তড়িৎ আকর্ষণ বলের পরিমাণ F হলে,

$$F = \frac{Ze.e}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad ....(2.7)$$

এক্ষেত্রে e ইলেকট্রনের তড়িতাধানের মান এবং ε_0 মাধ্যমের বিদ্যুৎশীলতা।

বাস্তবিক এই বল 'F' ইলেকট্রনের উপর কার্যকরী কেন্দ্রাতিগ বলের সমান। যেহেতু কেন্দ্রাতিগ বলের মান $\frac{mv^2}{r}$ । সুতরাং

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$\therefore \quad mv^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad ....(2.8)$$

আবার বোরের প্রস্তাবনা অনুসারে (2.6)

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

একে বর্গ করে পাই,

$$m^2v^2r^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2} \qquad ....(2.9)$$

এই সমীকরণটিকে আগের সমীকরণ (2.8) দিয়ে ভাগ করে পাই,

$$\frac{m^2v^2r^2}{mv^2} = \frac{n^2h^2}{4\pi^2} \times \frac{4\pi\varepsilon_0 r}{Ze^2}$$

$$mr = \frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi Ze^2}$$

$$\therefore \quad r = \frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi Ze^2 m} \qquad ....(2.10)$$

হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষের জন্য Z = 1, n = 1 বসিয়ে পাই

$$r_1 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi e^2 m} \qquad ....(2.11)$$

ইলেকট্রনের আধান, ভর এবং প্ল্যাঙ্ক ধ্রুবকের মান বসিয়ে পাই

$$r_1 = 0.528 \times 10^{-10}\ m$$

বা 5.28×10^{-9} m

অর্থাৎ 5.28 nm

এই মান হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষের পরীক্ষামূলক নির্নীত মানের সমতুল।

(2) বৃত্তাকার পরিক্রমাপথে ইলেকট্রনের রৈখিক গতি :

বোরের প্রস্তাব অনুসারে (সমীকরণ 2.6)

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

$$\therefore v = \frac{nh}{2\pi mr}$$

এক্ষেত্রে উপরের সমীকরণ (2.10) থেকে r-এর মান বসিয়ে পাই,

$$v = \frac{nh}{2\pi m} \times \frac{\pi Z e^2 m}{n^2 h^2 \varepsilon_0}$$

$$= \frac{Ze^2}{2nh\varepsilon_0} \qquad \text{............(2.12)}$$

হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের গতিবেগ নির্ণয়ের জন্য Z = 1, n = 1 ; এবং অন্যান্য ধ্রুবকগুলির মান বসিয়ে V_1-এর মান নির্ণয় করা যায়।

$$V_1 = 2.43 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$$

(3) বৃত্তাকার পরিক্রমাপথে ইলেকট্রনের শক্তি :

তাঁর প্রস্তাবিত তত্ত্বের সাহায্যে বোর হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ তন্ত্রের ইলেকট্রনের শক্তি নির্ণয় করেন। এই তত্ত্বের প্রয়োগে বোর হাইড্রোজেন বর্ণালীর যুক্তিসম্মত ব্যাখ্যা করেন এবং রিডবার্গ ধ্রুবকের তাত্ত্বিক মান নির্ণয় করেন।

পূর্ববর্তী অংশে (2.8) সমীকরণ থেকে আমরা জানি,

$$\frac{Ze^2}{2\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} \qquad \text{............(2.13)}$$

হাইড্রোজেন বা তৎসদৃশ ইলেকট্রন তন্ত্রের কেন্দ্রকের চারপাশে বৃত্তাকার পথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের শক্তির মূলত দুটি অংশ :

(i) আবর্তনকালীন গতিজনিত গতিশক্তি এবং

(ii) ধনাত্মক আধানযুক্ত কেন্দ্রকের তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থানজনিত স্থিতিশক্তি ;

আবর্তনকালীন গতি (v)-এর জন্য ইলেকট্রনের মোট গতি শক্তি (KE) কে নিচের সমীকরণের সাহায্যে লেখা যায় $KE = \frac{1}{2} mv^2$

আবার সমীকরণ (2.13) থেকে $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{Ze^2}{2r\,(4\pi\varepsilon_0)}$

$$= \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \qquad \text{............(2.14)}$$

কেন্দ্রক থেকে r দূরত্বে অবস্থানরত ইলেকট্রনের মোট স্থিতিশক্তি (PE) কে নিচের সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়,

$$PE = \frac{-Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = \frac{-Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad ....(2.15)$$

গতি ও স্থিতি শক্তির সমন্বয়ে ইলেকট্রনের মোট শক্তির পরিমাণ (E) কে (KE + PE) এই সমষ্টির সমান বলা চলে, এক্ষেত্রে,

$$E = KE + PE$$

$$\therefore \quad E = \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r} + \left(\frac{-Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)$$

$$= \frac{-Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \qquad ....(2.16)$$

এই সমীকরণে r এর মান

$$r = \frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi Ze^2m}$$ (সমীকরণ 2.10 থেকে), বসিয়ে পাই।

$$\therefore \quad E = \frac{-Ze^2\pi Ze^2m}{8\pi\varepsilon_0 n^2h^2\varepsilon_0}$$

$$= \frac{-Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2n^2h^2} \qquad ....(2.17)$$

হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে Z = 1 এবং সুস্থিত শক্তিস্তরের জন্য n = 1 এই মান বসিয়ে পাই,

$$E_1 = -\frac{e^4m}{8\varepsilon_0^2h^2}$$

এক্ষেত্রে e, m, h এবং π এর যথাযথ মান বসিয়ে

$E_1 = -13.6$ ev/পরমাণু

বা $E_1 = -1.3120 \times 10^{13}$ আর্গ / মোল

বা $E_1 = -1.3120 \times 10^{6}$ জুল / মোল

ইলেকট্রনের শক্তি নির্ণয় করতে গিয়ে আমরা লক্ষ্য করি যে, ইলেকট্রনের স্থিতি শক্তি ঋণাত্মক। কেন্দ্রকের তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থানরত ইলেকট্রনের স্থিতি শক্তি ঋণাত্মক হওয়ার তাৎপর্য এই যে, অসীম দূরত্বে অর্থাৎ কেন্দ্রকের তড়িৎ আধানের সম্পূর্ণ প্রভাবমুক্ত (স্থিতিশক্তির সাপেক্ষে 0) অবস্থান থেকে কোন ইলেকট্রনকে কেন্দ্রকের থেকে r দূরত্বে নিয়ে আসার জন্য প্রয়োজনীয় কাজ কেন্দ্রকই করে থাকে। এবং ঐ পরিমাণ কাজ কক্ষে অবস্থানরত ইলেকট্রনের মধ্যে স্থিতিশক্তি হিসাবে সঞ্চিত থাকে। ঐ অবস্থান থেকে কেন্দ্রকের তুলনায় ইলেকট্রনকে দূরে সরিয়ে নিতে হলে বাড়তি কাজ করতে হবে। সহজ কথায়, ঐ ইলেকট্রনটি নিউক্লিয়াসের তড়িৎক্ষেত্রে আবদ্ধ বা আটকে রয়েছে বলে মনে করা যেতে পারে।

গতি ও স্থিতি শক্তির সমন্বয়ে ইলেকট্রনের মোট শক্তি ঋণাত্মক বলে, সামগ্রিক বিচারে ইলেকট্রনটি নিউক্লিয়াসের তড়িৎক্ষেত্রে বন্দী রয়েছে এমন ভাবা যায়। ইলেকট্রনের ঐ অবস্থান থেকে অসীম দূরত্বে সরাতে হলে ইলেকট্রনের মোট শক্তির সমান কাজ করতে হবে। ইলেকট্রনটিকে নিউক্লিয়াসের সম্পূর্ণ প্রভাব মুক্ত করার অর্থ হল হাইড্রোজেন পরমাণুকে H^+ আয়নে রূপান্তর। যেহেতু হাইড্রোজেন পরমাণুর সুস্থিত অবস্থায় ইলেকট্রনের মোট শক্তি –13.6 ev/পরমাণু, সুতরাং বলা যায়, 1টি হাইড্রোজেন পরমাণুকে কেবলমাত্র আয়নে রূপান্তরিত করতে হলে 13.6 ev শক্তি প্রয়োজন। বাস্তবে এটিই হাইড্রোজেনের আয়নায়ন বিভব।

2.5.2 বোরতত্ত্বের প্রয়োগ

(I) পারমাণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যা :

বোর তত্ত্ব অনুসারে ইলেকট্রন একটি সুস্থিত কক্ষ থেকে অপর একটি কক্ষে স্থানান্তরিত হলে প্রয়োজনীয় শক্তি তড়িচ্চুম্বকীয় শক্তির আকারে হয় শোষিত, নতুবা বর্জিত হয়। যেহেতু কেন্দ্রকের অপেক্ষাকৃত নিকটবর্তী বা ভিতরের দিকের সুস্থিত কক্ষগুলির শক্তি দূরবর্তী কক্ষগুলি তথা বাইরের দিকের কক্ষগুলির তুলনায় কম সুতরাং কোন ইলেকট্রন যদি বাইরের দিকের কক্ষপথ থেকে ভিতরের দিকে সরানো হয় তবে শক্তি বর্জিত হয়। বিপরীতক্রমে, কোন ইলেকট্রনকে ভিতরের কক্ষপথ থেকে ক্রমশ বাইরের দিকে সরিয়ে আনতে হলে শক্তি শোষিত হয়। বোর তাঁর তত্ত্বের প্রস্তাবনায় 3 নং অংশে এই শক্তির মাত্রা সুনির্দিষ্টভাবে প্রকাশ করেন। তাঁর প্রস্তাবনা অনুসারে বর্জিত বা শোষিত শক্তির মান, (ΔE)

$$\Delta E = E_f - E_i$$

এখন, প্রাথমিক শক্তিস্তরটি অন্তিম শক্তিস্তর থেকে কমশক্তি সম্পন্ন (অর্থাৎ প্রাথমিক শক্তিস্তর অপেক্ষাকৃত ভিতরের দিকে) হলে, $E_f > E_i$ $\therefore E_f - E_i > 0$; সুতরাং, $\Delta E > 0$ অর্থাৎ এই স্থানান্তরণের জন্য ΔE পরিমাণ শক্তি শোষিত হবে।

আবার, ইলেকট্রনের শক্তিসংক্রান্ত সমীকরণ (2.17) থেকে দেখা যায়,

$$E_f = -\frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2 n_f^2 h^2}$$

$$\text{এবং } E_i = -\frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2 n_i^2 h^2}$$

এক্ষেত্রে n_f এবং n_i যথাক্রমে অন্তিম ও প্রাথমিক কক্ষপথের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা।

$$\Delta E = \left(-\frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2 n_f^2 h^2}\right) - \left(\frac{-Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2 n_i^2 h^2}\right)$$

$$= \left[\frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2 h^2}\right]\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right) \qquad \text{...........(2.18)}$$

এখন $n_f > n_i$ হলে, অর্থাৎ ইলেকট্রনটিকে ভিতরের কক্ষপথ থেকে ক্রমশ বাইরের দিকে সরিয়ে নিলে, আমরা দেখি,

$$n_f > n_i$$

$$\therefore n_f^2 > n_i^2$$

$$\therefore \frac{1}{n_f^2} < \frac{1}{n_i^2}$$

$$\therefore \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) < 0$$

অর্থাৎ ΔE সংক্রান্ত সমীকরণের দ্বিতীয়াংশটি < 0

∵ ঐ সমীকরণের প্রথমাংশটি অর্থাৎ $\left[\frac{z^2e^4m}{h^2}\right]$ সর্বদাই ধনাত্মক ∴ এক্ষেত্রে উভয় গুণকের গুণফল ঋণাত্মক হবে। আবার, লক্ষ্য করি

ΔE = – { [ধনাত্মক রাশি] × [ঋনাত্মক রাশি] }

= – { ঋণাত্মক রাশি }

উপরোক্ত সমীকরণের বাইরের ঋণাত্মক চিহ্নটি উপস্থিত থাকার কারণে মোটের উপর,

$$\Delta E > 0$$

অর্থাৎ $\Delta E > 0$ পরিমাণ শক্তি শোষিত হবে। বিপরীতভাবে $n_f < n_i$ হলে অর্থাৎ ইলেকট্রন ক্রমশ ভিতরের কক্ষপথে স্থানান্তরিত করলে $\Delta E < 0$ অর্থাৎ (2.18) সমীকরণে ব্যবহৃত চিহ্নটি কেবল শক্তির পরিমাণ শোষিত বা বর্জিত হবে কিনা তা নির্দেশ করে। স্থানান্তরণের জন্য শক্তির মান নির্দেশক চিহ্ন বর্জিত সমীকরণটি হ'ল

$$\Delta E = \frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0{}^2h^2}\cdot\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right) \qquad \text{............(2.19)}$$

আবার, $\Delta E = h\upsilon$

$$= \frac{hc}{\lambda}$$

$$= hc\upsilon$$

উপরের (2.19) সমীকরণে ঐ মান বসিয়ে পাই,

$$hc\bar{\upsilon} = \frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0{}^2h^2}\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$\bar{\upsilon} = \frac{Z^2e^4m}{8\varepsilon_0^2ch^3}\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right)$$

হাইড্রোজেনের জন্য, $Z = 1$,

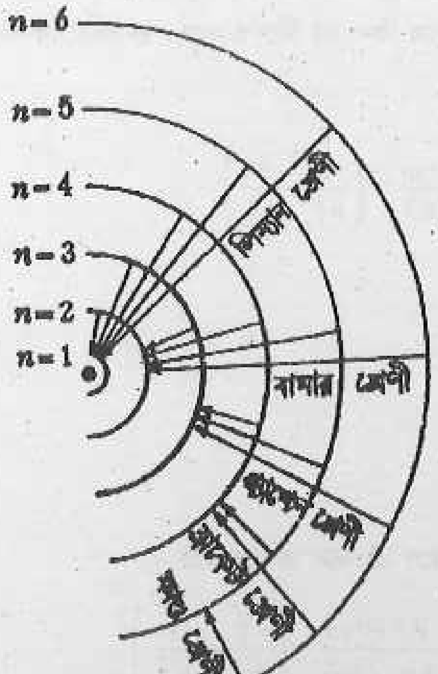
$$\therefore \bar{\upsilon} = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 c h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \text{............(2.20)}$$

এই সমীকরণটি রিজের সমন্বয় সূত্রের সাথে তুলনা করে পাই,

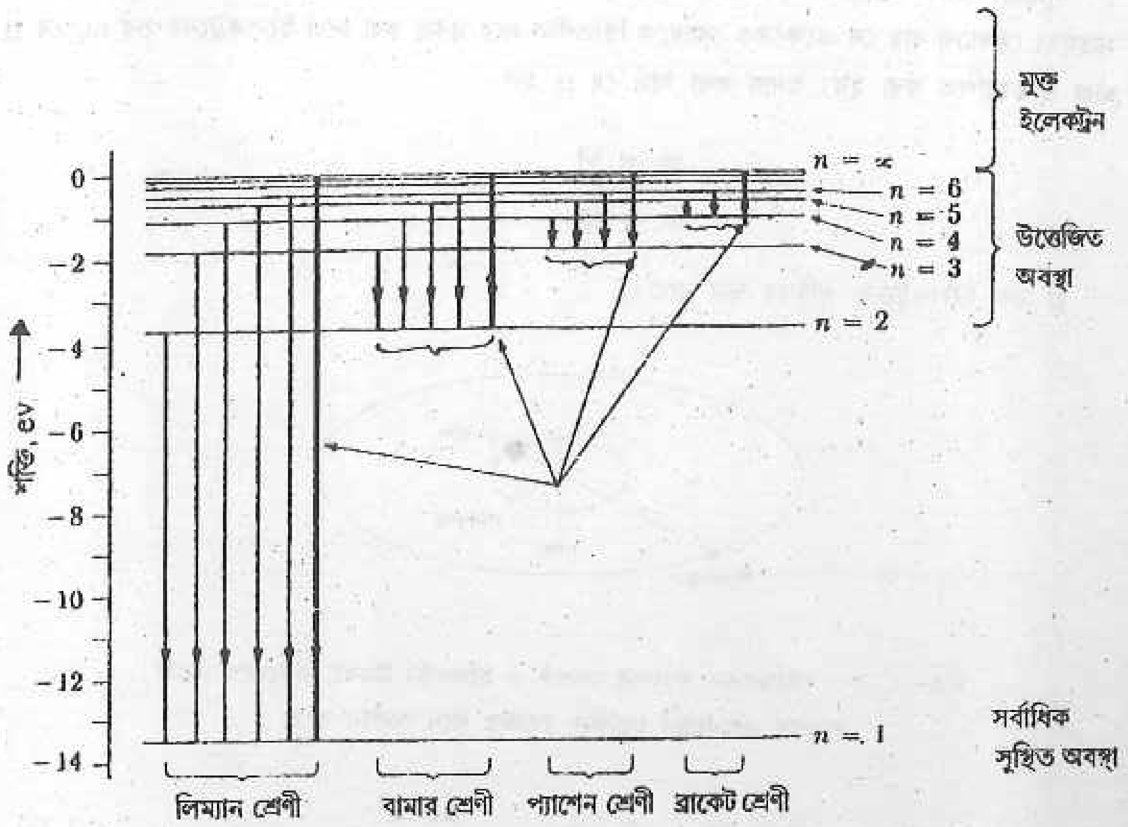
$$\bar{\upsilon} = R_H = \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \text{............(2.21)}$$

অর্থাৎ $R_H = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 C h^3}$ অর্থাৎ রিডবার্গ ধ্রুবক R_H এর মান তাত্ত্বিকভাবে নির্ণয় করা সম্ভব। গণনা করে দেখা গেছে, $R_H = 1.0973731 \times 10^7 \ m^{-1}$

হাইড্রোজেন বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীর উৎপত্তি চিত্র 2.12(a) ও 2.12(b) তে দেখান হয়েছে।



চিত্র-2.12(a) : হাইড্রোজেন বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীর উৎপত্তি



চিত্র–2.12(b) : হাইড্রোজেন বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীর উৎপত্তি ব্যাখ্যা

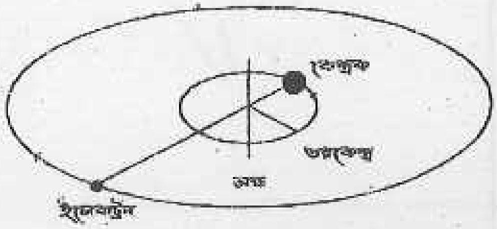
(1) ইলেকট্রনের শক্তি ও পারমাণবিক বর্ণালীর উপর কেন্দ্রকের গতির প্রভাব :

বোরের তত্ত্বে ধরা হয় যে ইলেকট্রনটি স্থির কেন্দ্রকের চতুর্দিকে বৃত্তাকার পথে আবর্তন করে। এই ধারণার ভিত্তি হল ইলেকট্রনের তুলনায় কেন্দ্রকের ভর অনেক বেশি—প্রায় অসীম। বস্তুত হাইড্রোজেন কেন্দ্রকের ভর ইলেকট্রনের ভরের তুলনায় প্রায় 1836 গুণ বেশি হয়। তুলনামূলক বিচারে এই ভর খুব বেশি হলেও অসীম নয়। উপরন্তু ইলেকট্রন যেমন নিজস্ব কক্ষপথে নিউক্লিয়াসকে আবর্তন করে কেন্দ্রকও তেমনই একটি ক্ষুদ্র কক্ষপথে আবর্তন করে। এই দুটি কক্ষের কেন্দ্র ওদের সাধারণ ভরকেন্দ্র।

সুতরাং সঠিক গণনার জন্য কেন্দ্রককে স্থির না ধরে উভয়ের গতিই গ্রাহ্য করা উচিত। ধ্রুপদী বলবিদ্যার সাহায্যে দেখানো যায় যে এক্ষেত্রেও কেন্দ্রকে স্থিতিশীল ধরে গণনা করা হলে ইলেকট্রনের ভর m_e কে μ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা হয়। প্রমাণ করা যায় যে μ হল

$$\mu = \frac{m_e \times M}{m_e + M} \qquad \text{..............(2.22)}$$

μ কে ইলেকট্রনের পরিণত ভর বলে।



চিত্র—2.13 : হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রক ও ইলেকট্রন উভয়ই একযোগে একটি সাধারণ ভরকেন্দ্রের চতুর্দিকে বৃত্তাকার পথে আবর্তন করে।

এক্ষেত্রে 'n' তম কক্ষে ইলেকট্রনের শক্তি $E_n = -\frac{\mu e^4 z^2}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}$ ....(2.23)

এই সমীকরণের প্রভাবে হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য রিডবার্গ ধ্রুবকের সঠিক মান হবে $R_H = 1.0967758 \times 10^7\ m^{-1}$। এবং হাইড্রোজেনের কেন্দ্রকের ভর হিলিয়াম কেন্দ্রকের ভরের থেকে আলাদা হবার কারণে ইলেকট্রনের শক্তির মান বিভিন্ন হবে।

সমস্থানিকগুলির কেন্দ্রকের ভর বিভিন্ন হবার জন্য তাদের রিডবার্গ ধ্রুবকের মানও বিভিন্ন হয় যেমন হাইড্রোজেন ও ডয়টেরিয়াম। এইজন্য হাইড্রোজেন ও ডয়টেরিয়াম পারমাণবিক বর্ণালীর বামার শ্রেণীর $n = 4$ থেকে $n = 2$ অতিক্রমণের বর্ণালী রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য 1.28Å। বস্তুত এই পার্থক্যই ডয়টেরিয়ামের উপস্থিতি তথা আবিষ্কারের মূল কারণ।

2.5.3 বোর তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা

পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের ব্যাখ্যা, কিংবা কোন পরীক্ষার ফলাফলের পূর্বানুমান ইত্যাদির বিচারে অথবা কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রয়োগের দিক থেকে দেখলে বোর তত্ত্ব অসাধারণ বৈজ্ঞানিক দূরদৃষ্টির সাক্ষর বহন করে।

তাত্ত্বিক অসাধারণতা সত্ত্বেও বোর তত্ত্বের কিছু উল্লেখযোগ্য সীমাবদ্ধতা রয়েছে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় :

(1) বোর রূপকল্পে কোয়ান্টাম তত্ত্ব সার্থকভাবে প্রযুক্ত হলেও এই প্রয়োগের ভিত্তি যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করা হয়নি। ইলেকট্রনসমূহের অবিচ্ছিন্ন সুস্থিত শক্তিস্তর বর্তমান এবং চক্রপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনগুলি কেবলমাত্র কতকগুলি বিশিষ্ট শক্তিস্তরেই সুস্থিত একথা উল্লেখ করা হলেও কেন এরকম হয়ে থাকে তা ব্যাখ্যা করা হয়নি।

(2) বোর রূপকল্প কেবলমাত্র হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশতন্ত্রের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর গঠন বোর তত্ত্ব দ্বারা সার্থকভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না।

(3) এমনকি হাইড্রোজেন সদৃশতন্ত্রের জন্যও সূক্ষ্ম বিভাজন ক্ষমতাসম্পন্ন বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রে বর্ণালী রেখার বিভাজন বোর তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায় না। বস্তুত বোরের প্রস্তাবিত তত্ত্বের পরবর্তীসময়ে দেখা যায় যে, বোরের সমসাময়িক বর্ণালীবীক্ষণ পরীক্ষায় যে রেখাগুলিকে একক বা তীক্ষ্ণ বলে মনে করা হয়েছিল তা আসলে অতি সামান্য বর্ণ বা তরঙ্গসংখ্যার পার্থক্যসহ একাধিক অতি নিকটবর্তী রেখার সমাহার। এই রেখাগুলির ব্যাখ্যা বা উৎপত্তির কারণ বোর তত্ত্ব দ্বারা বোঝা যায় না।

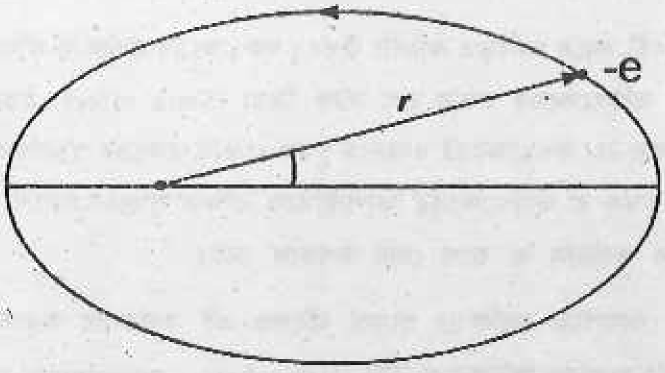
(4) বোরের পূর্ববর্তী সময়ে আবিষ্কৃত বর্ণালীর উপর চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব বা জীম্যান ক্রিয়া (Zeeman effect) বা তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাব তথা স্টার্ক ক্রিয়া (Stark effect) ইত্যাদি বোর তত্ত্ব দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায় না। উভয়ক্ষেত্রেই যথাক্রমে চুম্বক ও তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে বর্ণালীরেখা বিভাজিত হয়। অর্থাৎ চুম্বক বা তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে লক্ষিত সূক্ষ্মতর অংশে বিভাজিত হয়—এই ঘটনার কোন পূর্বাভাস বা ব্যাখা বোর রূপকল্পে নেই।

(5) বোর তত্ত্বে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার প্রয়োগ ঘটলেও এই বলবিদ্যার অন্যতম প্রাথমিক স্বীকার্য হাইজেনবার্গের প্রস্তাবিত অনিশ্চয়তা নীতি (Heisenberg's uncertainty principle) [পরবর্তী এককে 3.5 দ্রষ্টব্য] বোর তত্ত্বে লঙ্ঘিত হয়। বস্তুত অনিশ্চয়তার ধারণা সূক্ষ্মতর কণা তথা তরঙ্গের ক্ষেত্রে একটি মৌলিক স্বীকার্য। এই তত্ত্ব অনুসারে কোন গতিশীল সূক্ষ্মকণার জন্য একইসঙ্গে অবস্থান এবং ভরবেগ সম্পূর্ণ নিশ্চিত বা সঠিকভাবে নির্ণয় করা অসম্ভব। অথচ বোর তত্ত্ব অনুসারে আবর্তনরত ইলেকট্রনের জন্য ভরবেগ এবং অবস্থান একইসাথে নির্ণয় করা যায়—সুতরাং বোরতত্ত্ব হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির পরিপন্থী। যেহেতু শেষোক্ত নীতিটি কোয়ান্টাম কণার আলোচনার একটি প্রাথমিক নিয়ম, সুতরাং এক্ষেত্রে বোর তত্ত্বই তাত্ত্বিক বিচারে ত্রুটিমুক্ত নয়।

2.6 সমারফেল্ডের সংশোধনী (Sommerfeld's corrections)

রেখাবর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করার জন্য বোর প্রস্তাবিত ইলেকট্রনের বৃত্তাকার কক্ষপথের বদলে সমারফেল্ড ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথের কল্পনা করেন। বোর রূপকল্প অনুসারে, ইলেকট্রন কেবলমাত্র বৃত্তাকার কক্ষপথে কেন্দ্রকের চারিদিকে আবর্তন করে। সমারফেল্ডের প্রস্তাবিত রূপকল্পে কেবলমাত্র বৃত্তাকারই নয়, সাধারণভাবে ইলেকট্রনের কক্ষপথকে উপবৃত্তাকার বলে কল্পনা করা হয়েছে। এক্ষেত্রে কেন্দ্রক বৃত্তের কেন্দ্রের বদলে উপবৃত্তের নাভিদ্বয়ের যে কোন একটিতে অবস্থান করে, যেহেতু, বৃত্তকে উপবৃত্তেরই একটি বিশেষ রূপ হিসেবে কল্পনা করা যায়, সেহেতু বৃত্তের ক্ষেত্রে অর্ধ উপাক্ষ b = অর্ধপরাক্ষ a = বৃত্তের ব্যাসার্ধ)।

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনরত অবস্থায় সময়ের সঙ্গে সঙ্গে কেন্দ্রক থেকে ইলেকট্রনের দূরত্ব (r) এবং উপবৃত্তের নাভিতে অবস্থিত কেন্দ্রক থেকে ইলেকট্রনের সদিশ অরীয় দূরত্ব (radial distance) উপবৃত্তের প্রধান অক্ষের অন্তর্গত কোণ (Φ) দুই-ই বদলায়। কক্ষপথটি বৃত্তাকার হলে আবর্তনের সবসময়ই কেন্দ্রক থেকে ইলেকট্রনের অরীয় দূরত্ব অপরিবর্তিত থাকে। শুধু অরীয় দূরত্ব ও প্রধান অক্ষের অন্তর্গত দিগংশীয় কোণ বদলায়।



চিত্র-2.14 : হাইড্রোজেন পরমাণুতে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ

উপবৃত্তাকার কক্ষে কোন একটি অবস্থানে ইলেকট্রনের পার্শ্বিক গতি তথা ভরবেগকে (p) দুটি অংশে ভাগ করা যেতে পারে : অরীয় উপাংশ (p_r) এবং কৌণিক উপাংশ (p_ϕ)। সমারফেল্ডের ধারণা অনুসারে যেহেতু ইলেকট্রনের গতি অরীয় দূরত্ব এবং দিগংশীয় কোণ—দুইয়ের দ্বারাই নিয়ন্ত্রিত হয়, সুতরাং, ইলেকট্রনের ভরবেগের উভয় উপাংশেরই কোয়ান্টাম প্রয়োজন। তিনি প্রস্তাব করেন যে,

$$\oint p_r dr = n_r \times h \qquad \text{...........(2.24)}$$

$$\oint p_\phi d\phi = n_\phi \times h \qquad \text{...........(2.25)}$$

এক্ষেত্রে, n_r এবং n_ϕ যথাক্রমে অরীয় এবং দিগংশীয় বা কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যা। (radial and azimuthal quantum numbers)।

এই প্রস্তাব অনুসারে কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের মোট শক্তি (E) হল কক্ষপথে অবস্থানজনিত স্থিতিশক্তি [P.E.] অরীয় গতিশক্তি [$(KE)_r$] ও কৌণিক গতিশক্তির [$(KE)_\phi$] যোগফল, অর্থাৎ,

$$E = P.E + (K.E)_r + (K.E)_\phi \qquad \text{...........(2.26)}$$

সমারফেল্ড গণনা করে দেখান যে,

$$\frac{n_\phi^2}{(n_\phi + n_r)^2} = \frac{b^2}{a^2}$$

$$= 1 - \varepsilon^2 \qquad \text{...........(2.27)}$$

b এবং a যথাক্রমে উপবৃত্তের অর্ধউপমা বা গৌণ অক্ষ অর্ধ পরাক্ষ বা মুখ্য অক্ষ ε উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রিকতা। গণনার ফলে দেখা যায়, ইলেকট্রনের মোট শক্তি E হলে,

$$E = -\frac{\mu e^4 z^2}{8\varepsilon_0^2 h^2 (n_r + n_\phi)^2} \qquad \text{...........(2.28)}$$

$$= -\frac{\mu e^4 z^2}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2} \qquad \text{...........(2.29)}$$

এখানে ইলেকট্রনের সমানীত ভর μ এবং এক্ষেত্রে, $n = (n_r + n_\phi)$। বস্তুত, এখানে n এবং বোর প্রস্তাবিত মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা এক এবং অভিন্ন।

n-এর মান আগের সমীকরণ (2.27) এ বসিয়ে পাই।

$$\frac{n_\phi^2}{n^2} = \frac{b^2}{a^2}$$

$$= 1 - \varepsilon^2 \qquad \text{...........(2.30)}$$

সুতরাং, উপবৃত্তটির আকার দিগংশীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যার অনুপাতের উপ নির্ভরশীল।

উপরের সমীকরণ (2.30) থেকে দেখা যাচ্ছে যে, মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n হলে সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তরে উপবৃত্তগুলির সংখ্যা n_ϕ-এর ভিন্নতার উপর নির্ভরশীল। অর্থাৎ, n_ϕ যতগুলি ভিন্ন ভিন্ন মান গ্রহণ করে, ততগুলি ভিন্ন ধরণের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ পাওয়া যায়। উপবৃত্তগুলির আকার n_ϕ-এর মানের উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ একটি মুখ্যশক্তিস্তরে উপবৃত্তগুলির সংখ্যা সীমিত এবং আকার নির্দিষ্ট। এক্ষেত্রে n_ϕ নিয়ন্ত্রক কোয়ান্টাম সংখ্যার ভূমিকা পালন করে। কোন একটি মুখ্য শক্তিস্তরে অর্থাৎ n-এর নির্দিষ্ট মানের জন্য উপবৃত্তের মুখ্য অক্ষের মান সুনির্দিষ্ট। কিন্তু, n_ϕ-এর মানের ভিন্নতা অনুসারে উপবৃত্তগুলির উপকেন্দ্রিকতা আলাদা হয়ে থাকে। আমরা জানি, n = 1, 2, 3...ইত্যাদি ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যা। এখন n এর মান শূন্য (0) হওয়া সম্ভব নয়; কেননা $n_\phi = 0$, হলে উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রিকতা $\varepsilon = 1$ হবে, অর্থাৎ উপবৃত্তাকার কক্ষপথের বদলে ইলেকট্রন একটি রৈখিক গতিপথে অবিরত কেন্দ্রকের মধ্যে দিয়ে অবিরত যাতায়াত করবে। আবার n_ϕ, n-এর থেকে বড় হতে পারে না, কেননা, উপবৃত্তের গৌণ অক্ষ সর্বাধিক মুখ্য অক্ষের সমান হতে পারে, কিন্তু তার থেকে বড় হওয়া সম্ভব নয়। অর্থাৎ, n_ϕ এর সর্বোচ্চ মান n হতে পারে। n_ϕ = n হলে সমীকরণ (2.30) থেকে পাই

$$\frac{n_\phi^2}{n^2} = \frac{b^2}{a^2}$$

যেহেতু, $n_\phi = n$

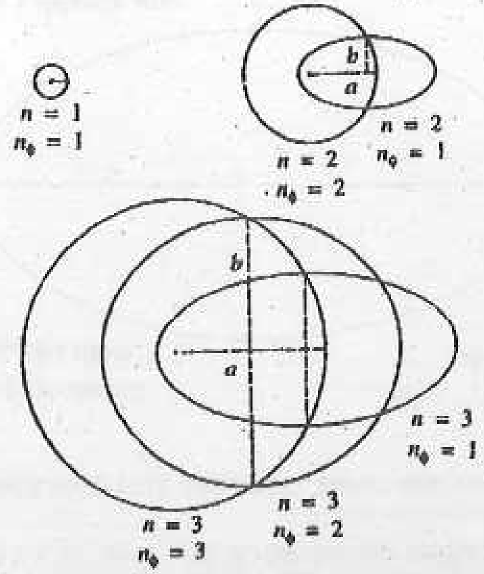
সুতরাং, $\frac{b^2}{a^2} = 1$

$$\therefore \quad b = a$$

স্পষ্টতই এক্ষেত্রে উপবৃত্তাকার কক্ষপথটি বৃত্তে রূপান্তরিত হয়। সুতরাং, n_ϕ এর মান শূণ্য (0) থেকে n অবধি ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যা হতে পারে। যেহেতু n-এর গৃহীত মানের জন্য $n_\phi = 1, 2, ... n$; — সুতবাং, n কোয়ান্টাম সংখ্যাযুক্ত মুখ্যশক্তিস্তরে সর্বমোট nটি ভিন্ন ধরণের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ সম্ভব। n_ϕ এর মান যত বাড়তে থাকে উপবৃত্তাকার পথটির উৎকেন্দ্রিকতা তত কমে এবং ক্রমশ n_ϕ এর সর্বোচ্চ মান n-এর জন্য তা বৃত্তে রূপান্তরিত হয়। নীচের ছবির সাহায্যে ইহা বোঝা যেতে পারে।

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের শক্তি নির্ণয়ক সমীকরণ (2.29) থেকে আমরা দেখেছি যে উপবৃত্তাকার পথগুলির শক্তি কেবলমাত্র মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর উপর নির্ভরশীল, অর্থাৎ উপবৃত্তগুলির আবার ভিন্ন হলেও তাদের শক্তি আলাদা হয় না। আপাতদৃষ্টিতে এটি অদ্ভুত মনে হলেও

এটি গাণিতিক দিক থেকে ত্রুটিহীনভাবে প্রতিষ্ঠিত। প্রাথমিক বিচারে উপবৃত্তগুলি আলাদা হলেও তাদের নিজস্ব শক্তি একই হওয়ায় সূক্ষ্মতম বিচারে তারা বর্ণালীর বিভাজন ঘটাতে সক্ষম হয় না।

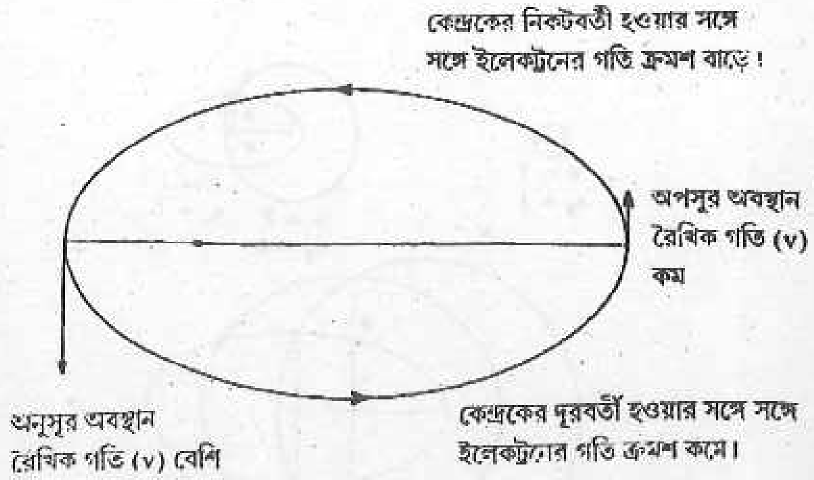


চিত্র—(2.15) : সমারফেল্ড প্রস্তাবিত হাইড্রোজেন পরমাণুর রূপকল্পে বিভিন্ন মুখ্য শক্তিস্তরের অন্তর্গত উপবৃত্তাকার কক্ষপথসমূহ

বর্ণালীরেখার বিভাজন ব্যাখ্যা করার উদ্দেশ্যে সমারফেল্ড আপেক্ষিকতাবাদের প্রয়োগ করেন। উপবৃত্তাকারে পথে পরিক্রমার সময় কেন্দ্রক থেকে ইলেকট্রনের অরীয় দূরত্ব ক্রমাগত বদলায়। ফলে ইলেকট্রনের রৈখিক গতীও উপযুক্তভাবে বদলায়। বস্তুত নাভি থেকে সর্বনিম্ন তথা সর্বাধিক দূরত্বে ইলেকট্রনের গতিবেগের মান উল্লেখযোগ্যভাবে পাল্টায়। নাভির সবথেকে দূরে অপসূর অবস্থানে ইলেকট্রনের গতিবেগ সর্বনিম্ন এবং ইলেকট্রন যতই নাভি তথা কেন্দ্রকের কাছাকাছি আসতে থাকে, ইলেকট্রনের গতিবেগও তত বাড়তে থাকে এবং নাভির সবথেকে কাছে অনুসুর অবস্থানে তা সর্বোচ্চ হয়। চিত্র (2.16) গণনা করে দেখা গেছে নাভির কেন্দ্রকের নিকটতম অবস্থানে ইলেকট্রনের গতিবেগ প্রায় আলোর গতিবেগের তুলনীয়, বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ তত্ত্ব অনুসারে, কোন বস্তুকণার গতিবেগ পাল্টালে তার ভরের পার্থক্য ঘটে। বস্তুত 'v' গতিবেগযুক্ত কোন কণার গতিশীল অবস্থায় ভর m ও সংশ্লিষ্ট নির্দেশতন্ত্রে এর স্থির ভর m_0 হলে,

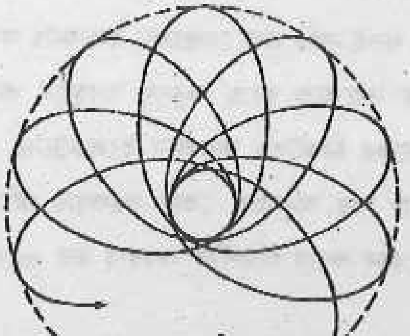
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{..............(2.31)}$$

যেখানে, c = শূণ্যমাধ্যমে আলোকের বেগ।



চিত্র–2.16 : উপবৃত্তাকার কক্ষে কেন্দ্রক থেকে বিভিন্ন দূরত্বে ইলেকট্রনের রৈখিক গতি আলাদা হয়

উপবৃত্তাকার পথে ইলেকট্রনের গতি যত বাড়তে থাকে, অর্থাৎ তা যত কেন্দ্রকের সমীপবর্তী হতে তাকে, ততই তার ভরও বাড়তে থাকে। এই দুই ধরণের পরিবর্তনের ফলে একটি পূর্ণ পর্যায়কালের শেষে ইলেকট্রনটি তার উপবৃত্তাকার পথের পর্যায়কাল শুরুর সংশ্লিষ্ট প্রারম্ভিক বিন্দু থেকে আরও খানিকটা এগিয়ে যায়। বাস্তবিক এই ধরণের গতির ফলে উপবৃত্তাকার কক্ষপথটি প্রতি পর্যায়কাল সম্পূর্ণ হওয়ার সঙ্গে সঙ্গে তার আগের অবস্থান থেকে অল্প সরে যায়। এই সরণকে কক্ষপথের অয়ন চলন বলে।



চিত্র–2.17 : কেন্দ্রককে কেন্দ্র করে ইলেকট্রনীয় উপবৃত্তাকার কক্ষের অয়ন চলন

কক্ষপথের এই অয়নচলনের ফলে উপবৃত্তটির পরোক্ষ নির্দিষ্ট কৌণিক বেগ তথা আয়নচলন বেগ অনুসারে আবর্তিত হতে থাকে। সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রন কেন্দ্রকের কতখানি নিকটবর্তী হতে পারে তার উপর এই কৌণিকবেগ নির্ভর করে, উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রিকতা বেশি হলে অর্থাৎ n_ϕ-এর মান যত কম হয় উপবৃত্তটি তত বেশি চাপা হয়ে থাকে। আবার, উপবৃত্তটি যত চাপা হয়, ততই তা কেন্দ্রকের বেশি কাছাকাছি আসে। সুতরাং, n_ϕ যত কম হয় সংশ্লিষ্ট উপবৃত্তটি তত চাপা এবং তার অয়নচলন গতির জন্য n-এর একটি গৃহীত মানের বিভিন্ন উপবৃত্তগুলিতে আবর্তনরত ইলেকট্রনের মোট শক্তি আলাদা হয়। স্পষ্টতই, এটি সমারফেল্ডের তত্ত্বলব্ধ প্রাথমিক সিদ্ধান্ত থেকে আলাদা।

আপেক্ষিকতাবাদ শাসিত অয়নচলনের ক্ষেত্রে সমারফেল্ড গণনা করে দেখান যে, পরিক্রমারত ইলেকট্রনের মোট শক্তি,

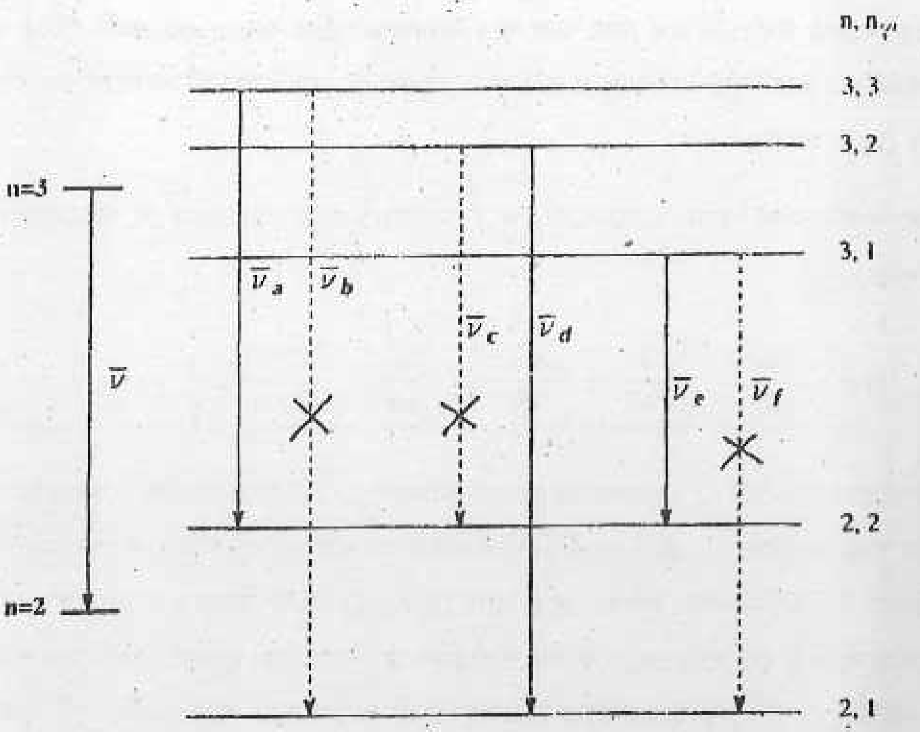
$$E = -\frac{\mu e^4 z^2}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left[\frac{1}{n^2} + \frac{4\pi^2 e^4 z^2}{c^2 h^2}\left(\frac{n}{n\phi} - \frac{3}{4}\right)\frac{1}{n^4}\right] \quad \text{.........(2.32)}$$

উপরের সমীকরণটি (2.32) স্পষ্টতই আগের সমীকরণ (2.29) থেকে আলাদা ; কেননা আগের সমীকরণ অনুসারে শক্তি কেবলমাত্র n-এর উপর নির্ভরশীল হলেও আপেক্ষিকতাবাদ শাসিত সংশোধনের পর তা n এবং n_ϕ-উভয়ের উপরই নির্ভরশীল, সুতরাং, দেখা যাচ্ছে যে, n_ϕ-এর মানের ভিন্নতা তথা উপবৃত্তের আকারের উপর নির্ভর করে সংশ্লিষ্ট মুখ্য শক্তিস্তর n সংখ্যক উপশক্তিস্তরে বিভক্ত হয়। সুতরাং, একটি মুখ্য শক্তিস্তর থেকে অপর একটি মুখ্য শক্তিস্তরে ইলেকট্রনের সংক্রমণ বিভিন্ন ধরণের হতে পারে। এজন্য, দুটি মুখ্য শক্তিস্তরের মধ্যে ইলেকট্রনের সংক্রমণজনিত বর্ণালীরেখা একাধিক উপাংশে বিভক্ত হয়ে পড়ে।

উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে, বামার শ্রেণীর H_α রেখা বোর তত্ত্ব অনুসারে মুখ্য শক্তিস্তর $n = 3$ থেকে $n = 2$-তে ইলেকট্রন সংক্রমণের ফলে সৃষ্টি হয়। সমারফেল্ড রূপকল্প অনুসারে, $n = 3$ মুখ্য শক্তিস্তরটি n_ϕ-এর মানের ভিন্নতা ($n = 3$, $n_\phi = 1, 2, 3$) তিনটি উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। অনুরূপে $n = 2$ মুখ্যশক্তিস্তরটি দুটি উপশক্তিস্তরে ($n = 2$; $n_\phi = 1, 2$) বিভাজিত হয়ে যায়। এই বিভিন্ন উপশক্তিস্তরের মধ্যে ইলেকট্রনের সংক্রমণের ফলে ছয়টি বিভিন্ন শক্তি তথা কম্পাঙ্ক সম্পন্ন বর্ণালীরেখা পাওয়া যেতে পারে। অর্থাৎ বামার শ্রেণীর H_α রেখা সর্বাধিক ছয়টি রেখায় বিভাজিত হতে পারে।

বাস্তবিক, H_α রেখাটি অপেক্ষাকৃত কম সংখ্যক রেখায় বিভাজিত হয়। পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে প্রাপ্ত বর্ণালী রেখার প্রতিটির ক্ষেত্রে কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা n_ϕ-এর পরিবর্তনের মান ± 1 হয় ; অর্থাৎ যদি কক্ষীয়

কোয়ান্টাম সংখ্যা n_ϕ-এর অন্তিম এবং প্রাথমিক মান $(n_\phi)_f$ এবং $(n_\phi)_i$ হলে, কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যার পরিবর্তন $(\Delta n_\phi) = (n_\phi)_f - (n_\phi)_i$। বাস্তবিক, $(\Delta n_\phi) = \pm 1$ হলে সংশ্লিষ্ট সংক্রমণগুলির জন্যই কেবল



চিত্র—(2.18) : সমারফেল্ডের সংশোধনী অনুযায়ী পরমাণুর মুখ্যশক্তিস্তরের বিভাজন ও ইলেকট্রনের সংক্রমণ υ : হাইড্রোজেন পরমাণুর বামার শ্রেণীর H_α রেখার তরঙ্গসংখ্যা υ_a, υ_d, υ_c H_α রেখার বিভাজনে সৃষ্ট সূক্ষ্ম রেখাসমূহের তরঙ্গ সংখ্যা; υ_b, υ_c, υ_f তরঙ্গসংখ্যার সংশ্লিষ্ট সংক্রমণ চয়ননীতি অনুসরণ করে না বলে দেখা যায় না।

রেখাবর্ণালী পাওয়া যায়। অপরাপর যে সমস্ত সংক্রমণের ক্ষেত্রে $\Delta n_\phi \neq \pm 1$, সেগুলি সাধারণত দেখা যায় না। অর্থাৎ সম্ভাব্য সমস্ত বর্ণালী রেখার মধ্যে মাত্র কয়েকটি সুনির্বাচিত রেখাই লক্ষিত হয়। বর্ণালী বিদ্যায় একে চয়ননীতি বা নির্বাচন সূত্র (Selection rule) বলা হয়। উপবৃত্তাকার পথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট চয়ননীতি $\Delta n_\phi = \pm 1$, এই নীতি অনুসারে, বামার শ্রেণীর H_α রেখার বিভাজনের ফলে পাওয়া সূক্ষ্ম রেখার সংখ্যা ছয় থেকে কমে কেবলমাত্র তিন হয়।

বাস্তবে দেখা যায় যে, হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন উপরে উল্লিখিত সূক্ষ্ম গঠনের অবিকল অনুসারী নয়; এমনকি উপশক্তিস্তরগুলির শক্তির সংশ্লিষ্ট সমীকরণ (2.32)-এর থেকে পাওয়া সংশ্লিষ্ট বর্ণালী রেখাগুলির কম্পাঙ্ক পরীক্ষায় পাওয়া ফলের সঙ্গে পুরোপুরি মেলে না। এই গরমিলের কারণ পরবর্তীকালে চিহ্নিত করা সম্ভব হয়েছে। পরবর্তীকালে প্রস্তাবিত ইলেকট্রনের নিজ অক্ষের উপর ঘূর্ণন সূক্ষ্মতর পার্থক্যের কারণ হিসাবে কল্পনা করা হয়েছে। ইলেকট্রনের ঘূর্ণন সম্পর্কে পরবর্তী অংশে আলোচনা করা হবে।

ইলেকট্রন সংক্রমণের ক্ষেত্রে কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যার প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্রের অনুরূপ অপরাপর কোয়ান্টাম সংখ্যার সুনির্দিষ্ট নির্বাচন সূত্র রয়েছে, এগুলি বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যার আলোচনার ক্ষেত্রে পরে পৃথকভাবে উল্লিখিত করা হবে।

কোয়ান্টাম বলবিদ্যার গণনার সঙ্গে সঙ্গতি রাখার জন্য দিগংশীয় কোয়ান্টাম সংখ্যার পরিবর্তে কাক্ষিক কোয়ান্টাম সংখ্যা (l) ব্যবহার করা হয়। বাস্তবিক, $l = n_\phi - 1$, সুতরাং, মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n হলে সংশ্লিষ্ট কাক্ষিক কোয়ান্টাম সংখ্যা $l = 0, 1, 2, \ldots\ldots(n-1)$ অর্থাৎ, l-এর সর্বনিম্ন মান 0 এবং সর্বোচ্চ মান (n – 1), এবং সর্বমোট n সংখ্যক ভিন্ন ভিন্ন মান হতে পারে। l-এর উপর নির্ভর করে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ (L)

$$L = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(2.33)$$

সূত্রানুসারে সংরক্ষিত হয়।

2.7 জীম্যান ক্রিয়া : পারমাণবিক বর্ণালীর উপর চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব : স্থান কোয়ান্টায়ন এবং চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা। (Space quantisation and magnetic quantum number)

কোন পরমাণুকে একটি চুম্বকক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত করে বর্ণালী দ্বিগুণ করলে দেখা যায় যে চুম্বক ক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে পাওয়া পারমাণবিক বর্ণালীর রেখাগুলি কতগুলি উপরেখায় বিভক্ত হয়। আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পারমাণবিক রেখা বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজনকে জীমান ক্রিয়া বলা হয়। আরোপিত চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখের 90% বরাবর দেখলে দেখা যায় যে একটি বর্ণালী রেখা তিনটি

উপাংশ রেখায় বিভক্ত হয়েছে। এই ঘটনাকে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া (Normal Zeeman Effect) বলা হয়।

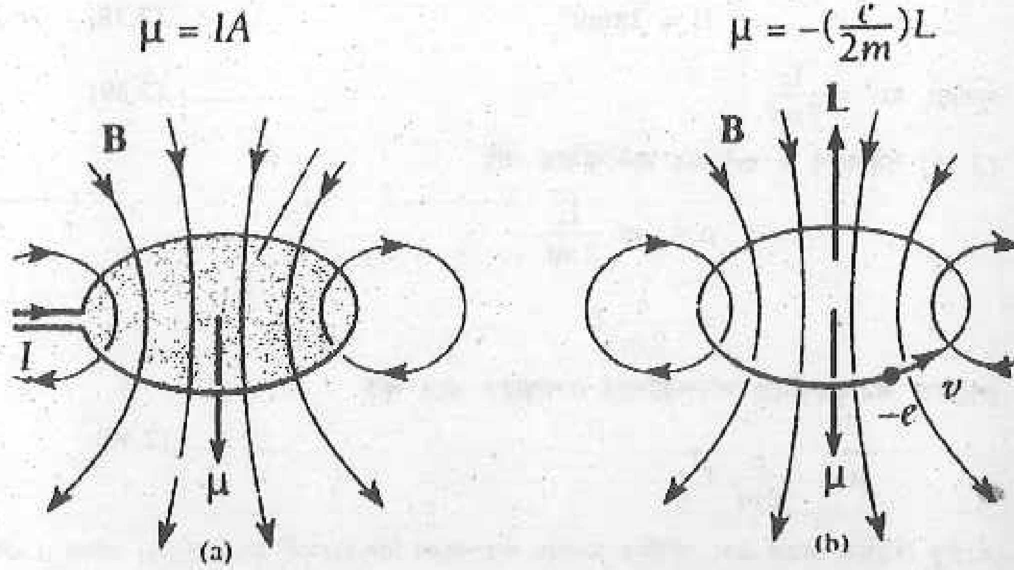
এই বিভাজনের ফলে একথা স্পষ্ট করে বোঝা যায় যে চুম্বক ক্ষেত্রের উপস্থিতিতে একটি পারমাণবিক শক্তিস্তর কতগুলি ভিন্ন শক্তি বিশিষ্ট উপশক্তি স্তরে বিভাজিত হয়। অন্যদিক থেকে দেখতে গেলে একথা বলা চলে যে চৌম্বক ক্ষেত্র না প্রযুক্ত হলে ইলেকট্রনের গতীয় অবস্থার এই ভিন্নতা লক্ষিত হয় না। এবং এই গতীয় অবস্থাগুলি বাইরের চুম্বক ক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে একই শক্তি সম্পন্ন হয়। এই সমশক্তিসম্পন্ন স্তরগুলির প্রতিটি মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা 'n' এবং কাক্ষিক বা গৌন কোয়ান্টাম সংখ্যা 'l' দ্বারা নির্ধারিত হয়। আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একটি মুখ্য শক্তিস্তরের (n) বিভিন্ন উপবৃত্তাকার কক্ষপথগুলি (l) চুম্বকক্ষেত্রটির সাপেক্ষে শূণ্যে বিভিন্ন অবস্থানে অভিবিন্যস্ত হয়। এককথায় কক্ষপথগুলি ত্রিমাত্রিক শূণ্যে বিভিন্ন দিকে অবস্থান করে এবং চুম্বকক্ষেত্রটির সাপেক্ষে এর প্রতিটি অবস্থান আলাদা আলাদা শক্তি সম্পন্ন হয়। সুতরাং একটি বিশেষ কক্ষপথ থেকে অর্থাৎ শূণ্যে বিন্যস্ত কোন একটি মুখ্যশক্তিস্তরের একটি বিশেষ উপবৃত্তাকার কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রন যদি অপর একটি শূণ্যে বিন্যস্ত বিশেষ উপবৃত্তাকার কক্ষপথে গমন করে তবে একটি বর্ণালী রেখার সৃষ্টি হয়। যেহেতু সূক্ষ্ম বিন্যাসগুলি কেবলমাত্র চৌম্বকক্ষেত্রের আরোপনের ফলেই পাওয়া গেছে সুতরাং ভাবা যেতে পারে যে চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে একটি রেখা বর্নালী কতগুলি ক্ষুদ্র অংশে বিভাজিত হয়। বস্তুত চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবেই পারমাণবিক গঠন সম্পর্কে অনেক গুরুত্বপূর্ণ তথ্য জানা যায়।

চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রন কক্ষপথের বিন্যাসকে বুঝতে গেলে একটি আহিত কণার গতীয় অবস্থা থেকে কিভাবে চুম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি হয় তা বোঝা দরকার। ইলেকট্রন কেন্দ্রকের চারপাশে কতগুলি সুনির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তন করে। আলোচনার সুবিধার জন্য ধরে নেওয়া যেতে পারে যে কক্ষপথগুলি বৃত্তাকার। কেন্দ্রকের চারপাশে চক্রপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনকে একটি বর্তনীতে প্রবাহিত তড়িতের সঙ্গে তুলনা করা যেতে পারে। বস্তুত চক্রপথে তড়িৎ প্রবাহের ফলস্বরূপ যে চুম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি হয় তা ওরস্টেডের পরীক্ষার সাহায্যে প্রমাণিত এবং পরীক্ষিত। সুতরাং একই যুক্তিধারা অনুসরণ করে একথা বলা যায় যে কেন্দ্রকের চারপাশে ইলেকট্রনের আবর্তন কক্ষপথের উলম্বদিকে একটি চুম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি করে।

প্রবাহী তড়িতবিদ্যার সূত্র অনুসারে আমরা বলতে পারি একটি 'A' ক্ষেত্রফলযুক্ত বৃত্তাকার কক্ষপথে 'i' প্রবাহমাত্রা যুক্ত তড়িৎ প্রবাহিত হলে 'μ' মাত্রা যুক্ত একটি চুম্বক ভ্রামকের সৃষ্টি হয়। আমরা জানি এক্ষেত্রে

$$\mu = A \times i \qquad \text{............(2.34)}$$

(2.19 নং) ছবিতে চিহ্নিত L এবং μ মূলত সদিশ রাশি (Vector)। তীর চিহ্ন ব্যতিরেকে এগুলির উল্লেখ করা হলে অর্থাৎ L এবং μ সংশ্লিষ্ট সদিশ রাশিগুলির মান বোঝায়। ইলেকট্রনের বৃত্তাকার কক্ষপথের ব্যাসার্ধ



চিত্র–2.19 : (a) চক্রাকার তড়িৎবর্তনীতে সৃষ্ট চৌম্বক ভ্রামক
(b) কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামক

'r' হলে বৃত্তটির ক্ষেত্রফল $A = \pi r^2$। যদি কক্ষপথের ইলেকট্রনটি প্রতি সেকেন্ডে নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে 'f' বার পাক খায় অর্থাৎ ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের কম্পাঙ্ক 'f' হলে বর্তনীতে বাহিত তড়িতের প্রবাহমাত্রা

$i = -ef$ (যেহেতু ইলেকট্রন ঋণাত্মক আধানযুক্ত)

সুতরাং $\mu = -ef\pi r^2$ ....(2.35)

বোর তত্ত্ব অনুসারে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ L,

$L = mvr$ ....(2.36)

v = কক্ষপথে ইলেকট্রনের রৈখিক বেগ

m = ইলেকট্রনের ভর

যেহেতু ইলেকট্রন $2\pi r$ পরিধি যুক্তপথে প্রতি সেকেন্ডে 'f' বার পাক খায় সুতরাং ইলেকট্রনের রৈখিকগতি (v)

$$v = 2\pi rf \qquad ....(2.37)$$

v-এর মান (2.36) সমীকরণে বসিয়ে পাই

$$L = 2\pi mfr^2 \qquad ....(2.38)$$

সুতরাং $\pi r^2 = \frac{L}{2\,mf}$ ....(2.39)

(2.35) সমীকরণ এ πr^2 এর মান বসিয়ে পাই

$$\mu = -ef \cdot \frac{L}{2\,mf}$$

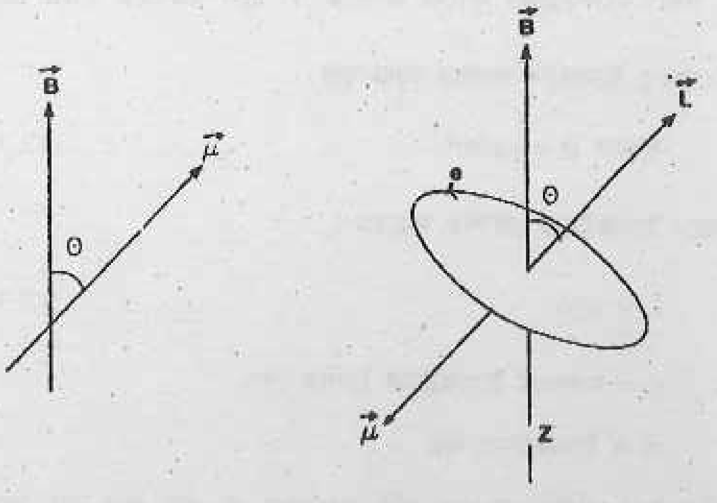
$$= -\frac{e}{2\,m}.L$$

শেষোক্ত সমীকরণটিকে সদিশরাশিতে রূপান্তরিত করে পাই

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2\,m}.\vec{L} \qquad ....(2.40)$$

যেহেতু চৌম্বিক ভ্রামক এবং কৌণিক ভরবেগ পরস্পরের বিপরীতমুখী (চিত্র 2.19) এজন্য μ এবং L এর সম্পর্কটি ঋণাত্মক চিহ্নযুক্ত।

এখন B চৌম্বক ক্ষেত্রসম্পন্ন কোন স্থানে μ ভ্রামক যুক্ত একটি চুম্বকীয় দ্বিমেরু (ক্ষেত্রটির সঙ্গে θ কোণ করে) অবস্থান করলে চুম্বক বলবিদ্যার সূত্র অনুসারে আমরা সংশ্লিষ্ট চৌম্বকদ্বিমেরুর উপর ঐ ক্ষেত্রটির ক্রিয়া (u_m) নিম্নলিখিত সম্পর্কের সাহায্যে প্রকাশ করতে পারি।



চিত্র–2.20 : $\vec{B}$ এবং $\vec{L}$ সদিশ রাশিদ্বয়ের মধ্যে সংক্রিয়া

$$u_m = -B\mu \cos\theta \qquad \text{............(2.41)}$$

একটি বৃত্তাকার পথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগে বৃত্তাকার কক্ষতলের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে। কক্ষতলের সাপেক্ষে কৌণিক ভরবেগের অভিমুখ ভেক্টরের পারস্পরিক ক্রিয়ার ক্ষেত্রে ডান হাতের সূত্র অনুসারে পাওয়া যায়। চৌম্বক ভ্রামকের ($\vec{\mu}$) অভিমুখ কৌণিক ভরবেগের ঠিক বিপরীত। বোঝার সুবিধার জন্য আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রটিকে 'Z' অক্ষ বরাবর রাখা হয়। ইলেকট্রন কক্ষতল আরোপিত চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে কেবলমাত্র কতগুলি সুনির্দিষ্ট কোণেই অবস্থান করে। ইলেকট্রন কক্ষতল বা সংশ্লিষ্ট কৌণিক ভরবেগের এই অবস্থান একটি বিশেষ কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা নিয়ন্ত্রিত। বস্তুত

$$L_z = m_l\hbar \qquad \text{............(2.42)}$$

$m_l = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \pm l$

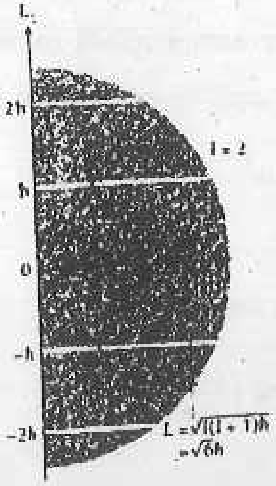
(2.40) এবং (2.41) থেকে পাই

$$u_m = m_l\left(\frac{e\hbar}{2m}\right)B \qquad \text{............(2.43)}$$

এক্ষেত্রে m_l কে চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা বলা হয়। স্পষ্টতই L_z এর যে কোন মান গ্রহণযোগ্য নয়, অর্থাৎ চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে L_z এর অবস্থান বিচ্ছিন্ন সুনির্দিষ্ট অর্থাৎ যে কোন অবস্থানটি গ্রহণযোগ্য নয় বরং তা m_l কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা সুচারুভাবে নিয়ন্ত্রিত। চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রন কক্ষতলের এই বিশেষ অবস্থান গ্রহণ করার ঘটনাকে স্থান কোয়ান্টায়ন বলা হয়। একটি বিশেষ কক্ষপথের আকার কাক্ষিক কোয়ান্টাম সংখ্যার মান 'l' দ্বারা নিয়ন্ত্রিত। বস্তুত আরোপিত চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে বিশেষ কক্ষতলের অবস্থান কোয়ান্টাম সংখ্যা m_l এর মানের বিভিন্নতার উপর নির্ভর করে যেহেতু l এর একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য m_l ; $-l$ থেকে শূণ্য সহ $+l$ অবধি যে কোন পূর্ণ সংখ্যার মান গ্রহণ করে সুতরাং একটি কক্ষতল চুম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে মোট $(2l + 1)$ সংখ্যক ভিন্ন ভিন্ন সুনির্দিষ্ট অবস্থান গ্রহণ করে। এগুলো শূণ্যে এমনভাবে বিন্যস্ত হয় যে সংশ্লিষ্ট কৌণিক ভরবেগ 'Z' অক্ষের সঙ্গে 'θ' কোণে অবস্থান করে। তাহলে স্পষ্টতই দ্বিমের ভ্রামক $\vec{\mu}$ এবং চুম্বকক্ষেত্রে 'B' এর Z অক্ষের অন্তর্গত কোণের মান ও 'θ' কিন্তু 'μ' এবং 'L' পরস্পরের বিপরীতমুখী, আগের সমীকরণ (2.41) থেকে আমরা দেখতে পাই যে ভ্রামকটির ওপর চুম্বকক্ষেত্রের ক্রিয়া 'θ', কোণের মানের ওপর নির্ভরশীল। যেহেতু 'θ' প্রকৃতপক্ষে Lতথা ইলেকট্রনের আবর্তনের কক্ষতলের ওপর নির্ভরশীল সুতরাং একথা বলা যায় যে চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে ইলেকট্রন কক্ষতলের অবস্থানের উপর সংশ্লিষ্ট

ব্যবস্থাটির শক্তি নির্ভর করে। আমরা জানি (সমীকরণ 2.33) যে কোন একটি কক্ষপথের পরিক্রমারত ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ $\vec{L}$ কাক্ষিক কোয়ান্টাম সংখ্যা 'l' এর সঙ্গে নিম্নলিখিতভাবে সম্পর্কিত :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$



চিত্র–2.21 : কাক্ষিক কৌণিক ভরবেগের স্থান কোয়ান্টায়ন

L এর মান আগের সমীকরণ (2.41) তে বসিয়ে পাই

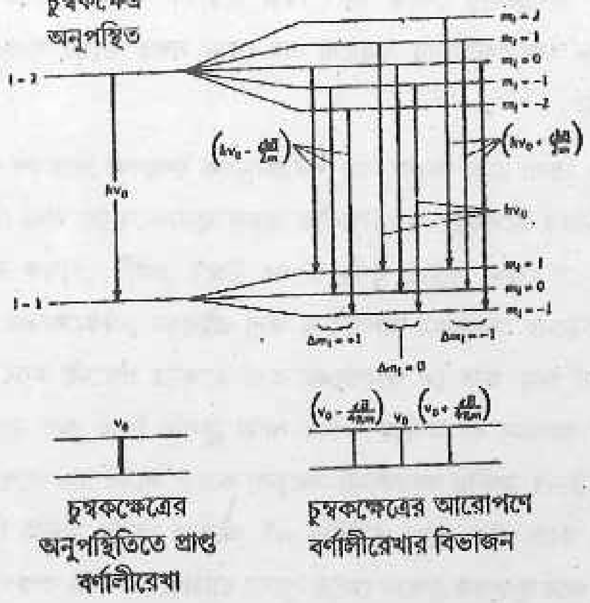
$$u_m = B \times \frac{e}{2m} \times l \times \cos\theta$$

$$= \frac{e}{2m} l_z \times B \qquad \text{.........(2.44)}$$

যেখানে $l_z = l\cos\theta$

আরোপিত চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে কৌণিক ভরবেগের অবস্থান কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা নিয়ন্ত্রিত। অর্থাৎ আরোপিত চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে কৌণিক ভরবেগ (সুতরাং ইলেকট্রন কক্ষতল) যে কোন কোণে অবস্থান করতে পারেনা। স্পষ্টতই এই আলোচনার ফলে বোঝা যায় যে একটি বিশেষ কাক্ষিক কোয়ান্টাম সংখ্যা 'l' যুক্ত কক্ষপথ চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে বিভিন্নভাবে অবস্থান করে। সুতরাং চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ঐ কক্ষপথগুলির

শক্তি বিভিন্ন হয়ে থাকে। সুতরাং চুম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতিতে একটি বিশেষ অবস্থানের ইলেকট্রন কক্ষতল অন্য একটি অবস্থানে পরিবর্তন করলে শক্তির ভিন্নতা অনুসারে তা একটি বর্ণালী রেখার সৃষ্টি করবে। একটি বিশেষ কক্ষপথ থেকে অপর একটি পৃথক আকারের কক্ষপথে ইলেকট্রনকে স্থানান্তরিত করলে যে বর্ণালী রেখার সৃষ্টি হয় তা সামারফিল্ডের তত্ত্ব অনুসারে আগেই ব্যাখ্যা করা হয়েছে। এখন দেখা যাচ্ছে যে চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে সংশ্লিষ্ট কক্ষপথগুলি ভিন্ন ভিন্ন অবস্থান গ্রহণ করে এবং শক্তির ভিন্নতা অনুসারে সংশ্লিষ্ট রেখা বর্ণালীটি কতগুলি সুক্ষতর অংশে বিভাজিত হয়। এক্ষেত্রে একটি কক্ষ থেকে অন্য একটি কক্ষে ইলেকট্রনের স্থানান্তর $\Delta m_l = 0, \pm 1$ এই চয়ন নীতি অনুসারে হয়। নিম্নের (2.22) চিত্রের সাহায্যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার ক্ষেত্রে কিভাবে একটি বর্ণালী রেখা তিনটি রেখায় বিশ্লিষ্ট হয় তা বোঝা যায়।



চিত্র–2.22 : স্বাভাবিক জীম্যান ক্রিয়ার ব্যাখ্যা

2.8 ইলেকট্রনের ঘূর্ণন (Spin of electron)

পারমাণবিক বর্ণালীর উপর আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব বা জীমান ক্রিয়া চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার ধারনা থেকে ব্যাখ্যা করা যায়। বস্তুত চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে ইলেকট্রনের

কক্ষপথগুলির স্থান কোয়ান্টায়নের সূচক অর্থাৎ এই সংখ্যাগুলির সাহায্যে ইলেকট্রনের কক্ষপথগুলির আরোপিত চুম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে গৃহীত ত্রিমাত্রিক অবস্থানের ধারণা তথা ব্যাখ্যা পাওয়া যায়। স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ায় পারমাণবিক বর্ণালীর একটি রেখা তিনটি অংশে বিভক্ত হয়ে যায়। কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রন, যেহেতু একটি আহিত কণা, তার কক্ষপথের উল্লম্বদিকে একটি চুম্বক ক্ষেত্র তথা ভ্রামকের সৃষ্টি করে। ইলেকট্রন আবর্তনের কারণে সৃষ্ট এই চৌম্বক ভ্রামকটির সঙ্গে আরোপিত চৌম্বক ক্ষেত্রের পারস্পরিক ক্রিয়ায় কক্ষীয় ইলেকট্রনের শক্তিস্তর কতগুলি উপশক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে পড়ে। এর ফলেই একটি ইলেকট্রনের অবস্থানের পরিবর্তনজনিত রেখা বর্নালীর কতগুলি উপরেখায় বিভক্ত হয়। এই উপরেখাগুলির কম্পাঙ্ক কাছাকাছি বা কম্পাঙ্কের দিক থেকে এই উপরেখাগুলি পরস্পরের খুবই কাছাকাছি অবস্থান করে। চুম্বকক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে পাওয়া বর্ণালী রেখা চুম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া অনুসারে প্রধানত তিনটি অংশে উপরেখায় ভেঙে যায়। কিন্তু বাস্তবিক অনেক ক্ষেত্রে উপরেখার সং ঊন এর বেশি হয়ে থাকে। স্থান কোয়ান্টায়নের সাহায্যে এর কোন সঙ্গত ব্যাখ্যা পাওয়া যায় না। একে ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়া বলা হয়।

ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়া এবং আরো কিছু পরীক্ষামূলক ফলাফল বিশ্লেষণ করে দেখা যায় যে পরমাণুর মধ্যে কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের চৌম্বকীয় ভ্রামক ছাড়াও আরো অন্য চৌম্বক ভ্রামক থাকতে পারে। একটি আহিত কণার যে কোন ঘূর্ণনই ঘূর্ণন তলের উল্লম্ব একটি চৌম্বক ভ্রামক সৃষ্টি করে। কক্ষপথে আবর্তন ছাড়াও ইলেকট্রনের অন্যরকম আবর্তনের জন্য এইরকম চুম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি হতে পারে। স্বভাবতই কক্ষপথে আবর্তন ছাড়া অন্য আর যে আবর্তনের কথা এক্ষেত্রে প্রথমেই মনে আসে তা হল ইলেকট্রনের নিজের অক্ষের ওপর আবর্তন বা অক্ষীয় ঘূর্ণন। সহজ তুলনা দিয়ে বলা যায় সূর্যের চারপাশে পৃথিবীর বার্ষিক আবর্তন ইলেকট্রনের কক্ষীয় আবর্তনের সমতুল্য আবার সূর্যের চারপাশে প্রদক্ষীণরত অবস্থায় পৃথিবী নিজের অক্ষকে কেন্দ্র করে পাক খায়। পৃথিবীর এই আহ্নিক গতীর জন্যই দিন রাত হয় অর্থাৎ পৃথিবী নিজের অক্ষকে কেন্দ্র করে ঘুরপাক খেতে খেতে সূর্যের চারিদিকে নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তন করে। পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলিও একইভাবে নিজের অক্ষের উপর পাক খেতে খেতে সুনির্দিষ্ট কক্ষপথে কেন্দ্রকের চারপাশে ঘুরতে থাকে। এই তাত্ত্বিক রূপকল্পের একেবারে গোড়ার দিকে ভাবা হয়েছিল যে অক্ষীয় ঘূর্ণনের প্রভাবে সৃষ্ট চৌম্বক ভ্রামকের সঙ্গে আরোপিত চৌম্বক ক্ষেত্রের পারস্পরিক ক্রিয়াই ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়ার কারণ।

1925 খ্রীষ্টাব্দে স্যামুয়েল গাউড্ স্মিট (Samuel Goud Smit) এবং জর্জ উহলেনবেক (George Uhlenbech) ব্যতিক্রান্ত জীমান ক্রিয়ার এবং আরো অন্যান্য প্রাসঙ্গিক পরীক্ষালব্ধ ফলের ব্যাখ্যা প্রসঙ্গে প্রস্তাব করেন যে,

"প্রতিটি ইলেকট্রনের একটি স্বকীয় কৌণিক ভরবেগ বর্তমান। একে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন বলে এবং এর মান সকল ইলেকট্রনের জন্য সমান। এই কৌণিক ভরবেগের কারণে ইলেকট্রনের একটি চৌম্বক ভ্রামকও বর্তমান"।

প্রথমে ধারণা করা হয়েছিল যে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের ধর্মাবলী অনেকাংশে কৌণিক ভরবেগের অনুরূপ। ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ S এর ও একইভাবে কোয়ান্টায়ন চিন্তা করা হয়। বস্তুত ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা S এর সাপেক্ষে সংশ্লিষ্ট সম্পর্কটি নিম্নরূপ।

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar \qquad \text{............(2.45)}$$

প্রসঙ্গক্রমে উল্লেখ করা যায় যে কৌণিক ভরবেগ L এবং কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যার (l) সাপেক্ষে অনুরূপভাবে সম্পর্কিত (সমীকরণ 2.33)

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

বস্তুত ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের ক্ষেত্রেও কাক্ষিক কৌণিক ভরবেগের মতই স্থান কোয়ান্টায়ন কল্পনা করা হয়েছে। m_l -এর মতোই এক্ষেত্রে ঘূর্ণন চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যাটি হল m_S এবং এর সম্ভাব্য মানগুলি $-S$ থেকে $+S$। সুতরাং (m_l -এর তুলনা এনে) বলা যায় যেহেতু m_l -এর সম্ভাব্য মান $-l$- থেকে 0 সহ $+l$ অবধি মোট $(2l+1)$ মানের জন্য কাক্ষিক চৌম্বক ভ্রামকটি আরোপিত চুম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে শূণ্যে $(2l+1)$ সংখ্যক দিকে বিন্যস্ত সেরকমই চুম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর বা সদিশ রাশি শূণ্যে $(2S+1)$ সংখ্যক দিকে অভিবিন্যস্ত।

ঘূর্ণন চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_S-এর সাপেক্ষে ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের Z – অক্ষীয় উপাংশ S_z এর কোয়ান্টায়ন সম্পর্কটি এইরকম,

$$S_z = m_s\hbar \qquad \text{............(2.46)}$$

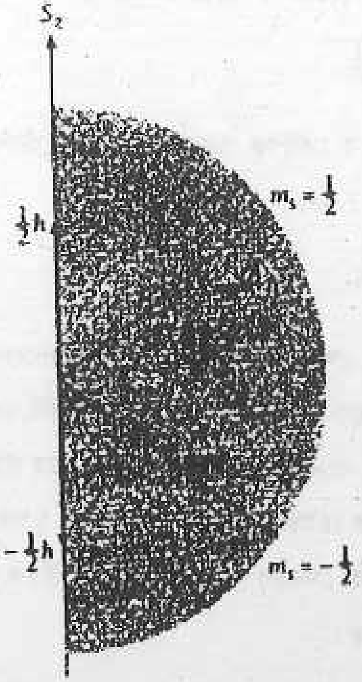
মনে করা যেতে পারে, কাক্ষিক কৌণিক ভরবেগে L-এর সংশ্লিষ্ট Z-উপাংশটি (L_z) ও একইভাবে কৌণিক কোয়ান্টাম সংখ্যা m_l-র সাপেক্ষে অনুরূপ কোয়ান্টায়ন সম্পর্কের দ্বারা সম্পর্কিত। (সমীকরণ 2.42)

$$l_z = m_l\hbar$$

পরীক্ষালব্ধ ফল বিশ্লেষণ করে দেখা যায় যে শূণ্যে ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের সম্ভাব্য বিন্যাস কেবল দুই রকমের হতে পারে অর্থাৎ,

$$2S + 1 = 2$$

$$\text{বা } S = \frac{1}{2}$$



চিত্র--2.23 : ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের দুটি সম্ভাব্য অভিমুখ

সুতরাং বলা যায় নিজের অক্ষের উপর আবর্তনরত ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের দিক নির্দেশকারী সংশ্লিষ্ট কোয়ান্টাম সংখ্যা S-এর সাংখ্য মান $\frac{1}{2}$ এবং সংশ্লিষ্ট ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের মান হল

$$S = \sqrt{S(S+1)}\hbar = \sqrt{\frac{3}{2}}\hbar \qquad \text{.........(2.47)}$$

ঘূর্ণন চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার সম্ভাব্য মানগুলি সেক্ষেত্রে $+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$ । শূন্যে বিন্যস্ত ঘূর্ণন

চৌম্বক ভ্রামকের অভিমুখের সংখ্যাও দুটি। সংশ্লিষ্ট ভ্রামকে অভিবিন্যাস অনুসারে একটি উর্দ্ধাভিমুখী বা উর্দ্ধঘূর্ণন যুক্ত সুতরাং অপরটিকে নিম্নাভিমুখী বা নিম্নঘূর্ণনযুক্ত বলে।

উপরের আলোচনার পরেও বাস্তব দৃষ্টিকোণ থেকে বিচার করলে এই ঘূর্ণন অনেকাংশেই ভ্রান্তনাম্নী বলে মনে হয়। একথা মনে করার কারণ এই যে, যেহেতু ইলেকট্রন একটি অতি অল্প ভরযুক্ত নগণ্য কণা মাত্র তাই ঐ রকম একটি অতি ক্ষুদ্র কণার পক্ষে পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ, প্রয়োজনীয় মানের চৌম্বিক ভ্রামক সৃষ্টি করতে হলে ইলেকট্রনের অক্ষীয় ঘূর্ণন অত্যন্ত বেশি এমনকি আলোর গতির তুলনায়ও কয়েকগুণ হওয়া দরকার। বলাবাহুল্য এটি অসম্ভব।

ঘূর্ণনযুক্ত ইলেকট্রনের সম্ভাবনা বাস্তবানুগ না হলেও ইলেকট্রনের এক ধরণের বাড়তি কৌণিক ভরবেগের বাস্তব অস্তিত্ব আছে। যাকে প্রথানুযায়ী ঘূর্ণন ভরবেগ বলা হয়। বাস্তবিক তথাকথিত ইলেকট্রনের ঘূর্ণনের কোন ধ্রুপদী ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। বস্তুত কাক্ষিক কৌণিক ভরবেগের অতিরিক্ত আরো একটি কৌণিক ভরবেগের উপস্থিতির সঙ্গত ব্যাখ্যা দিতে গেলে আরো একধরণের ঘূর্ণন গতি কল্পনা করতে হয়। নিজ অক্ষের ওপর ইলেকট্রনের আবর্তন এর ধারণা এই সমস্যার সবচেয়ে সহজ সমাধান। কিন্তু এটি শেষ বিচারে বাস্তবানুগ নয়। এই আপাত বিরোধী ধারণার মূল কারণ ইলেকট্রনের তথাকথিত "ঘূর্ণন" আসলে ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার ধারণা দিয়ে ব্যাখ্যা করা যায় না। অর্থাৎ এককথায় ইলেকট্রনের ঘূর্ণনকে ব্যাখ্যা করা যায় এমন কোন ধ্রুপদী রূপকল্প সম্ভব নয়। তবে ঘূর্ণন বা তার ফলে পাওয়া ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ বর্ণালী বিশ্লেষণ থেকে পাওয়া তথ্য দ্বারা সমর্থিত। এমন কি আপেক্ষিক কোয়ান্টাম বলবিদ্যার ওপর নির্ভর করে করা গণনা থেকেও এই সমর্থন পাওয়া যায়। আমাদের আলোচনার এই অংশে এই সংক্রান্ত বিষয়গুলি প্রাসঙ্গিক নয় বলে এখানে এর বিস্তারিত উল্লেখ করা হল না। পরিশেষে বলা যায় ইলেকট্রনের এই বাড়তি বিশেষ কৌণিক ভরবেগ যদিও বা ধ্রুপদী ধারণা অনুসারে যথাযথ "ঘূর্ণন" এমন বলা যায় না, তবুও এর অন্যরকম আরো সঠিক রূপকল্পের অভাবে আমরা এটিকে ঘূর্ণনই বলব। বস্তুত এই ধারণার জনক যারা তারাও এ সম্পর্কে অবহিত হওয়া সত্বেও একে ঘূর্ণনই বলেছিলেন।

2.9 বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস : নির্মান নীতি (Electronic Configuration of many electron atom: Aufbau principle)

পূর্ববর্তী অংশগুলিতে আমরা দেখেছি যে কোন পরমাণুতে একটি ইলেকট্রনের অবস্থা চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা সূচিত হয়। কোন পরমাণুতে ইলেকট্রনের সম্ভাব্য শক্তিস্তরগুলি নির্দিষ্ট এবং হাইড্রোজেন পরমাণুর

ক্ষেত্রে এই শক্তিস্তরগুলির সম্বন্ধে একটি ধারণা আমরা ইতিমধ্যে পেয়েছি। হাইড্রোজেন পরমাণুতে একটিমাত্র ইলেকট্রন বর্তমান এবং হাইড্রোজেন পরমাণুর সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় (ground state) ইলেকট্রনটি সর্বনিম্ন শক্তিস্তরে ($n = 1, l = 0, m_l = 0$) অবস্থান করে। এই শক্তিস্তরে m_s এর মান $+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$ হয়। কোন বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় বিভিন্ন শক্তিস্তরে ইলেকট্রনগুলির বিন্যাস এমন হবে যেন পরমাণুর মোট শক্তি অন্য যে কোন ইলেকট্রন বিন্যাসের তুলনায় কম হয়। কোন পরমাণুতে এই বিশেষ ইলেকট্রন বিন্যাস যে নীতি মেনে হয় তাকে 'আউফবাউ নীতি' (aufbau principle ; জার্মান শব্দ auf bau এর অর্থ building up বা নির্মাণ) বলা হয়। 'আউফবাউ' একটি জার্মান শব্দ। আউফবাউ নীতি বুঝতে হলে পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরের শক্তির ক্রম ব্যতীত আরও দুটি উল্লেখযোগ্য সূত্র যথা—পাউলির 'অপবর্জন নীতি' এবং হুন্ডের 'গরিষ্ঠ বহুকতা সূত্র' জানা প্রয়োজন। আমরা এই অধ্যায়ে সমগ্র আউফবাউ নীতি আলোচনা করব এবং বিভিন্ন পরমাণুর সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় ইলেকট্রন বিন্যাস কিরূপ হবে তা জানব। এখানে একটি উল্লেখযোগ্য বিষয় হল যে যদিও আমরা কেবলমাত্র হাইড্রোজেন পরমাণুর শক্তিস্তর সম্বন্ধে আলোচনা করেছি, বস্তুত বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতেও অনুরূপ শক্তিস্তর বর্তমান এবং কোন শক্তিস্তরের শক্তির মান n এবং l কোয়ান্টাম সংখ্যাদ্বয়ের উপর নির্ভর করে। কোন পরমাণুর $n = 1$ থেকে $n = 4$ প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা চারটির সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তর এবং অন্তর্গত বিভিন্ন উপশক্তিস্তরের বর্ণনা (2.2) সারণীতে দেওয়া হল। কোন শক্তিস্তরের l এর মান 0, 1, 2 হলে এই শক্তিস্তরগুলিকে যথাক্রমে s, p, d এবং f অক্ষরের দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। পারমাণবিক ইলেকট্রন সজ্জা-বর্ণনার সময়ে আমরা একটি বিশেষ n, l এবং m_l এর সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তরটিকে একটি □ (বাক্স) দ্বারা বোঝাব। সুতরাং S শক্তিস্তরে মোট 'বাক্স' হবে একটি, p শক্তিস্তরে মোট 'বাক্সের' সংখ্যা হবে তিনটি ইত্যাদি। আমরা অপবর্জন নীতি আলোচনার সময় দেখব যে এরূপ একটি বাক্সে সর্বমোট দুটি ইলেকট্রন থাকতে পারে যদি তাদের m_s এর মান যথাক্রমে $+ {}^1/_2$ এবং $- {}^1/_2$ হয়। এহেন একটি বাক্সের মধ্যে অবস্থিত একটি ইলেকট্রনের m_s এর মান $+ {}^1/_2$ হলে আমরা ইলেকট্রনটিকে '↿' চিহ্নের দ্বারা প্রকাশ করব। এই একই 'বাক্স' তথা শক্তিস্তরে আরও একটা ইলেকট্রন থাকলে তার m_s এর মান $- {}^1/_2$ হবে (পরে পাউলির অপবর্জন নীতি দ্রষ্টব্য) এবং তাকে আমরা '⇂' চিহ্নের দ্বারা প্রকাশ করব। এরূপ কোন শক্তিস্তরে দুটি ইলেকট্রন থাকলে আমরা লিখব [↿⇂] ।

আগের অনুচ্ছেদ থেকে এটা স্পষ্ট যে আমরা প্রকৃতপক্ষে একটি 'বাক্স' (□) দ্বারা একটা উপশক্তিস্তর তথা একটা উপকক্ষকে প্রকাশ করছি। সমারফেল্ডের তত্ত্ব থেকে আমরা জানি সাধারণভাবে উপবৃত্তাকার বা বৃত্তাকার। বোর-সমারফেল্ডের তত্ত্বে এহেন কক্ষপথের অবতারণার সময় ধরা হয়েছে যে পরমাণুস্থিত ইলেকট্রনের একটি নির্দিষ্ট গতিপথ আছে। বস্তুত এই ধারণা সঠিক নয়। হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী

ইলেকট্রনের ন্যায় ক্ষুদ্রকণার অবস্থান ও ভরবেগ একসাথে নির্ভুলভাবে নির্ধারণ করা যায় না। কোন বস্তুকণার গতিপথ সঠিকভাবে নির্দিষ্ট করতে গেলে কণাটির অবস্থান ও ভরবেগ তথা বেগ একই সাথে জানতে হবে। সুতরাং ইলেকট্রনের এরূপ কক্ষপথের কোন বস্তুর অস্তিত্ব নেই। কোন পরমাণুতে ইলেকট্রনের অবস্থা একটি জটিল গাণিতিক অপেক্ষকের (complex function) দ্বারা প্রকাশ করা হয়। এই অপেক্ষক থেকে আমরা পরমাণুর বিভিন্ন স্থানে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতা গণনা করতে পারি, কিন্তু ইলেকট্রনটির প্রকৃত অবস্থান জানতে পারিনা। হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্র এবং সংশ্লিষ্ট বিষয়গুলি আমরা তৃতীয় এককে আলোচনা করব। ইলেকট্রনের অবস্থা নির্ণায়ক এই অপেক্ষকগুলিকে ইলেকট্রনের কক্ষক (Orbital) বলা হয়। এক গুচ্ছ n, l এবং m_l এর জন্য এক একটি কক্ষক বর্তমান। অর্থাৎ একটি বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে এক একটি ইলেকট্রনের অবস্থা একটি কক্ষক দ্বারা নির্দিষ্ট হয়। সাধারণভাবে একেই আমরা বলে থাকি যে কোন ইলেকট্রন কোন একটি কক্ষক রয়েছে। এর প্রকৃত অর্থ হল যে ইলেকট্রনটির অবস্থা এই কক্ষক দ্বারা নির্দিষ্ট হচ্ছে। যেমন হাইড্রোজেন পরমাণুর সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় ইলেকট্রনটি 1s কক্ষকে থাকে কথার অর্থ হল যে এই ক্ষেত্রে ইলেকট্রনটির অবস্থা 1s কক্ষক দ্বারা নির্দিষ্ট হয়। একটি বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে কোন একটি কক্ষক দ্বারা সর্বাধিক দুটি ইলেকট্রনের অবস্থা নির্দিষ্ট করা যায়, তবে এক্ষেত্রে ইলেকট্রন দুটির m_s কোয়ান্টাম সংখ্যার মান ভিন্ন হতে হবে। বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে কোন একটি কক্ষক দ্বারা নির্দিষ্ট কোন ইলেকট্রনের শক্তি কক্ষকটির n এবং l এর মানের উপর নির্ভর করে। সাধারণ অবস্থান কোন ইলেকট্রনের শক্তি m_l বা m_s এর মানের উপর নির্ভরশীল নয়। বিভিন্ন মুখ্যশক্তিস্তরে কক্ষকের বিন্যাস নিম্নরূপ। (সারণী 2.2)

সারণী (2.2)

বহু ইলেকট্রনীয় পুরমাণুর বিভিন্ন কক্ষক

প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা	কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা	উপকক্ষের মোট ধরণ	চুম্বকীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা	উপশক্তিস্তরের সংখ্যা	কক্ষকের নাম ও সংখ্যা
1	0	1	0	1	1s □
2	0	2	0	1	2s □
	1		−1, 0, +1	3	2p □□□

সারণী (2.2) (*Contd.*)

প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যা	কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা	উপকক্ষের মোট ধরণ	চুম্বকীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা	উপশক্তিস্তরের সংখ্যা	কক্ষকের নাম ও সংখ্যা
3	0	3	+0	1	3s □
	1		−1, 0, +1	3	3p □□□
	2		−2,−1,0, +1, +2	5	3d □□□□□
4	0	4	0	1	4s □
	1		−1, 0, +1	3	4p □□□
	2		−2,−1,0, +1, +2	5	4d □□□□□
	3		−3, −2, −1, 0 +1, +2, + 3	7	4f □□□□□□□

প্রতিটি উপকক্ষ এক বা একাধিক কক্ষকের সমন্বয়ে গঠিত।

যেমন—s উপকক্ষ 1টি s কক্ষক নিয়ে

p উপকক্ষ 3টি p কক্ষকের সমন্বয়ে

এবং d উপকক্ষ 5টি d কক্ষক

আবার f উপকক্ষ 7টি f কক্ষক নিয়ে গঠিত।

বলা বাহুল্য কোন একটি উপশক্তিস্তরে কক্ষকের সংখ্যা সংশ্লিষ্ট উপকক্ষ l এর উপর নির্ভর করে। উপকক্ষের মোট সংখ্যা = $2l + 1$ হয়। যেমন—S উপকক্ষের জন্য $l = 0$, এবং $2l + 1 = 2 \times 0 + 1 = 1$ সুতরাং 'S' উপকক্ষের কক্ষকের সংখ্যা 1টি, একইভাবে দেখানো যায় p উপকক্ষের জন্য $l = 1$ সুতরাং $2l + 1 = 3$ অর্থাৎ p উপকক্ষে উপশক্তিস্তরের সংখ্যা = 3।

2.9.1 পাউলির অপবর্জন নীতি : (Pauli's exclusion principle)

কোন পরমাণুতে ইলেকট্রন বিন্যাস অর্থাৎ বিভিন্ন শক্তিস্তরে কতগুলি ইলেকট্রন কিভাবে থাকে সে সম্পর্কে

পাউলি অপবর্জন নীতি বিশেষ তাৎপর্যপূর্ণ। বস্তুত পরমাণুর মধ্যে একটি ইলেকট্রনের পরিচিতি সংশ্লিষ্ট চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা নির্ণীত হয়। পাউলি অপবর্জন নীতি অনুসারে বলা যায় কোন একটি পরমাণুতে যে **কোন দুটি ইলেকট্রনের চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যা একই হওয়া সম্ভব নয়।** অর্থাৎ দুটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে একটি, দুটি বা সর্বোচ্চ তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যার মান একই হতে পারে কিন্তু কখনই 4টি কোয়ান্টাম সংখ্যা এক হওয়া সম্ভব নয়।

পাউলির অপবর্জন নীতির সাহায্যে একটি কক্ষকে অবস্থানকারী তথা বিভিন্ন কক্ষকে ধৃত ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ সংখ্যা এবং একটি মুক্ত কোয়ান্টাম স্তরে সর্বোচ্চ ইলেকট্রন সংখ্যা গণনা করা যায়। ধরা যাক একটি মুখ্য শক্তি তরঙ্গ-এ অবস্থানকারী ইলেকট্রনের কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি (n, l, m_l, m_s)। আলোচনার সুবিধার জন্য প্রাথমিক পর্যায়ে চতুর্থ কোয়ান্টাম সংখ্যা m_s কে বাদ রাখলে অপরাপর 3টি কোয়ান্টাম সংখ্যা $(n, l,$ ও m_l এর বিভিন্নতা অনুসারে সংশ্লিষ্ট স্তরে কক্ষক ও ইলেকট্রনের সংখ্যা সহজেই নির্ণয় করা যায়।

একটি গৃহিত স্তরে অর্থাৎ নির্দিষ্ট 'n' এর জন্য 'l' এর মান '0' থেকে $(n - 1)$ অবধি যে কোন পূর্ণ সংখ্যা সর্বমোট n-ধরণের হতে পারে। আবার একটি বিশেষ 'l' এর মানের জন্য m_l এর মান $-l$ থেকে '0' সহ $+l$ অবধি পূর্ণসংখ্যাগুলির সমষ্টির সমান অর্থাৎ সর্বমোট $(2l + 1)$ সংখ্যক ভিন্ন ভিন্ন মানের হতে পারে। সুতরাং একটি গৃহিত n এর জন্য m_l এর সর্বমোট বিভিন্নতা

$\sum m_l = \sum 2l + 1$ বা $\sum(2l + L)$

$\sum m_l$ যেখানে 'l' এর সমস্ত সম্ভাব্য মানগুলিই গণনায় ব্যবহৃত হয়েছে। যেহেতু $l = 0, 1, \ldots(n-1)$

সুতরাং $$\sum_{l=0}^{(n-1)} m_l$$

একটি গৃহীত n এর জন্য m_l -এর ভিন্নতা গুলির সমষ্টি অর্থাৎ সর্বমোট ভিন্ন উপশক্তি স্তরগুলির সংখ্যা বোঝায়।

এবং $$\sum_{l=0}^{n-1}(2l + 1)$$

সমান $\{(2 \times 0) + 1\} + \{(2 \times 1) + 1\} + \ldots\ldots\ldots + \{2 \times (n-1) + 1\}$

অর্থাৎ, $1 + 3 + \ldots\ldots\ldots + (2n-1)$

n পদ বিশিষ্ট (যেহেতু l, n সংখ্যক ভিন্ন মান গ্রহণ করতে পারে) এর সমান্তর শ্রেণীর যোগফল।

অথবা $[1 + (2n - 1)] \times n/2$

বা, $\frac{2n.n}{2} = n^2$

অর্থাৎ বলা যায় যে একটি মূলশক্তিস্তরে n সংখ্যক উপশক্তিস্তর এবং একটি উপশক্তিস্তর $(2l + 1)$ সংখ্যক কক্ষক বিশিষ্ট হওয়ার ফলে একটি নির্দিষ্ট প্রাথমিক মুখ্যশক্তিস্তরে কক্ষকের সর্বমোট সংখ্যা n^2। যেকোন একটি কক্ষকের জন্য n, l, m_l এর মান নির্দিষ্ট হওয়ায় পাউলি অপবর্জন নীতি অনুসারে ঐ কক্ষকে অবস্থানকারী ইলেকট্রনের চতুর্থ কোয়ান্টাম সংখ্যা m_s আলাদা হতেই হবে। যেহেতু m_s এর সম্ভাব্যমান $+ 1/2$ অথবা $- 1/2$ এই দুরকমই কেবল হতে পারে তাই বলা যায় প্রতি কক্ষকে ভিন্ন ভিন্ন ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা যুক্ত সর্বোচ্চ দুটি এবং একটি গৃহিত শক্তিস্তরের n^2 সংখ্যক কক্ষকে সর্বমোট $2 \times n^2$ সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে।

যেহেতু l কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা যুক্ত একটি উপশক্তিস্তরে $(2l + 1)$ সংখ্যক কক্ষক থাকে সুতরাং ঐ উপশক্তি স্তরের প্রতিটিতে $2 \times (2l + 1)$ সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে। এইভাবেও কোন একটি মুখ্য-শক্তিস্তরে ধৃত ইলেকট্রনের সংখ্যা স্পষ্টভাবে নির্ণয় করা যায়। (সারণী–2.3) লক্ষ করলে এটি বোঝা যাবে।

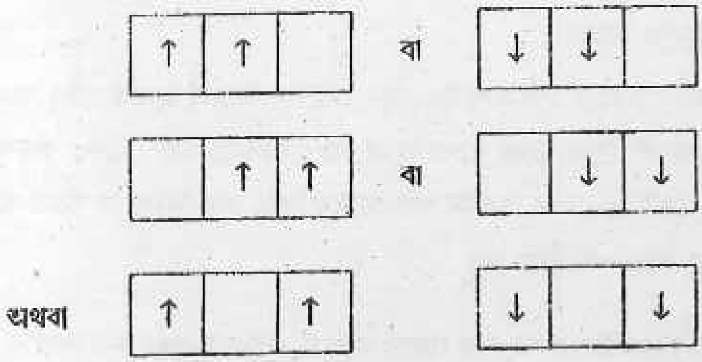
সারণী 2.3 বিভিন্ন উপশক্তিস্তরে ধৃত ইলেকট্রনের সংখ্যা

ইলেকট্রনীয় কক্ষ	মুখ্য কোয়ান্টাম-সংখ্যা n	গৌণ কোয়ান্টাম-সংখ্যা l	চৌম্বক কোয়ান্টাম-সংখ্যা m	ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা s	ইলেকট্রন সংখ্যা
প্রথম কক্ষ বা K কক্ষ	1	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
দ্বিতীয় কক্ষ বা L কক্ষ	2	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2 + 6 = 8
		1	+1, 0, −1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	
তৃতীয় কক্ষ বা M কক্ষ	3	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2 + 6 + 10 = 18
		1	+1, 0, −1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	
		2	+2,+1,0,−1,−2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	
চতুর্থ বা N কক্ষ	4	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2 + 6 + 10 + 14 = 32
		1	+1, 0, −1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	
		2	+2,+1,0−1,−2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	
		3	+3, +2, +1, 0, −1, −2, −3	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	

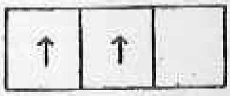
2.9.2 হুন্ডের গরিষ্ঠ বহুকতা সূত্র : (Hunds rule of maximum multiplicity)

এই সূত্র অনুসারে সমশক্তিসম্পন্ন অবজাত (Digenerate) একাধিক কক্ষকে ইলেকট্রনগুলির বিন্যাস নিয়ন্ত্রিত হয়। একই শক্তিসম্পন্ন একাধিক কক্ষকে ইলেকট্রন বিন্যাসের জন্য এই ধরণের কক্ষকগুলির প্রত্যেকটি প্রথমে সমঘূর্ণন সম্পন্ন ইলেকট্রন দ্বারা একাধিকক্রমে পূর্ণ হতে থাকে এবং প্রতিটি কক্ষক একটি করে সমঘূর্ণন যুক্ত ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ হবার পরই কেবল কোন একটি কক্ষকে দ্বিতীয় ইলেকট্রন স্থাপন করে ইলেকট্রন জোড় গঠন সম্ভব হতে পারে। অর্থাৎ কোন একটি উপশক্তি স্তরের সকল কক্ষক অর্ধপূর্ণ না হওয়া পর্যন্ত কোন একটি কক্ষক পূর্ণ বা সম্পৃক্ত হতে পারে না। কোন একটি কক্ষকে দুটি ইলেকট্রন দেওয়ার আগে অপরাপর প্রতিটি কক্ষকে সমঘূর্ণন সম্পন্ন অন্তত একটি ইলেকট্রন স্থাপন করা দরকার। বলা বাহুল্য হুণ্ডের গরিষ্ঠ বহুকতা সূত্র পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাসের ক্ষেত্রে সর্বনিম্ন বা সর্বাধিক সুস্থিত স্বাভাবিক অবস্থা বা ভৌম অবস্থা (Ground State) নির্ণয়ে সাহায্য করে।

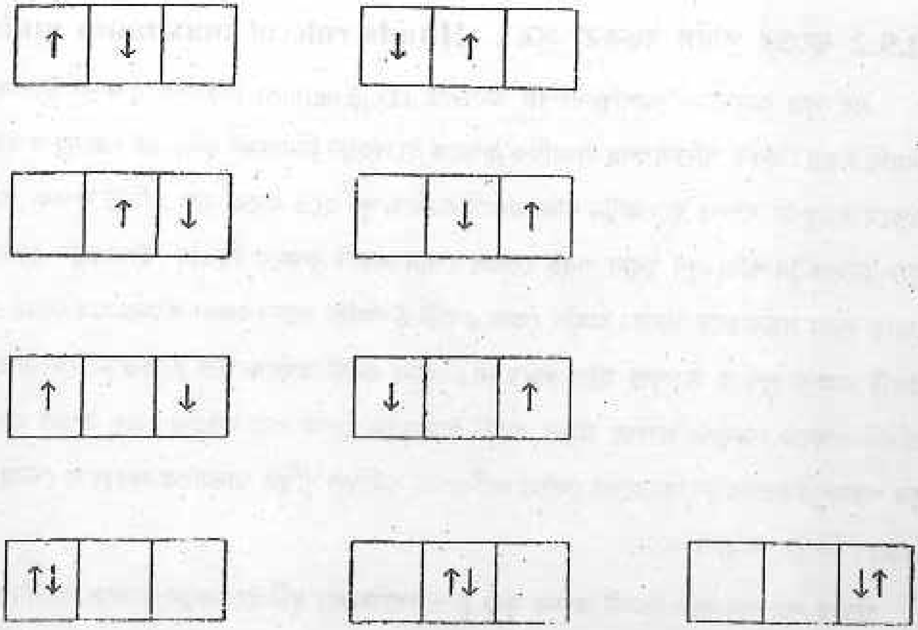
হুণ্ডের সূত্র অনুসারে তিনটি কক্ষক যুক্ত p উপশক্তিস্তরে দুটি ইলেকট্রন রাখলে তা নীচের ছবির মত রাখা যেতে পারে।



বস্তুত চুম্বকক্ষেত্র ব্যতিরেকে p কক্ষকগুলির ভিন্নতা নিরূপণ করা যায় না সুতরাং উপরোক্ত বিন্যাসগুলি একপ্রকার অভিন্ন অর্থাৎ এদের যে কোন একটি স্বাভাবিক ভৌম অবস্থা প্রকাশ করে। এক্ষেত্রে প্রথম বিন্যাসটিকে আদর্শ হিসাবে নেওয়া যেতে পারে।



উল্লেখ করা দরকার যে দুটি ইলেকট্রন যুক্ত বিন্যাসের ক্ষেত্রে নীচের বিন্যাসগুলি যেহেতু হুণ্ডের সর্বোচ্চ বহুকতা সূত্র লঙ্ঘন করে তা ভৌম ইলেকট্রন বিন্যাস হিসাবে গ্রহণযোগ্য নয়।



2.9.3 বহু-ইলেকট্রনীয় পরমাণুর সজ্জা :

একাধিক ইলেকট্রন যুক্ত একটি পরমাণুর ক্ষেত্রে অর্থাৎ কোন মৌলের পরমাণু ক্রমাঙ্ক জানা থাকলে ঐ মৌলের কেন্দ্রকের বাইরে অবস্থানকারী ইলেকট্রনের সংখ্যা জানা যায়; ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন কক্ষপথে ও উপকক্ষে কেমনভাবে বিন্যস্ত হবে সেটি 'aufbau (জার্মান শব্দ আউ(ফ)বাউ, অর্থ নির্মাণ বা গঠন) নীতি বা নির্মাণ নীতি অনুসরণ করলে জানা যায়। এই নীতি হল

(1) কোন একটি শক্তি স্তরে ইলেকট্রন রাখার জন্য প্রথমে সর্বনিম্ন শক্তিস্তর পূরণ করা দরকার অর্থাৎ কোন একটি নিম্ন ক্ষমতা সম্পন্ন শক্তিস্তর পূর্ণ না হওয়া পর্যন্ত তার উপরের শক্তিস্তর পূর্ণ হতে পারে না। এ বিষয়ে দুটি সুস্পষ্ট নীতি রয়েছে।

(ক) কোন পরমাণুর ক্ষেত্রে সর্বনিম্ন শক্তিস্তর নির্ণয়ের জন্য $(n + l)$ কোয়ান্টাম সংখ্যার মানকে নির্দেশক হিসাবে ব্যবহার করা যায়। $(n + l)$ এর মান যত কম হয় সংশ্লিষ্ট উপশক্তিস্তরটি তত কম শক্তিসম্পন্ন হয়।

(খ) দুটি উপশক্তিস্তরের ক্ষেত্রে $(n + l)$ এর সমষ্টি একই হলে যেটির ক্ষেত্রে n এর মান কম সাধারণভাবে সেটি কমশক্তিসম্পন্ন হয়ে থাকে।

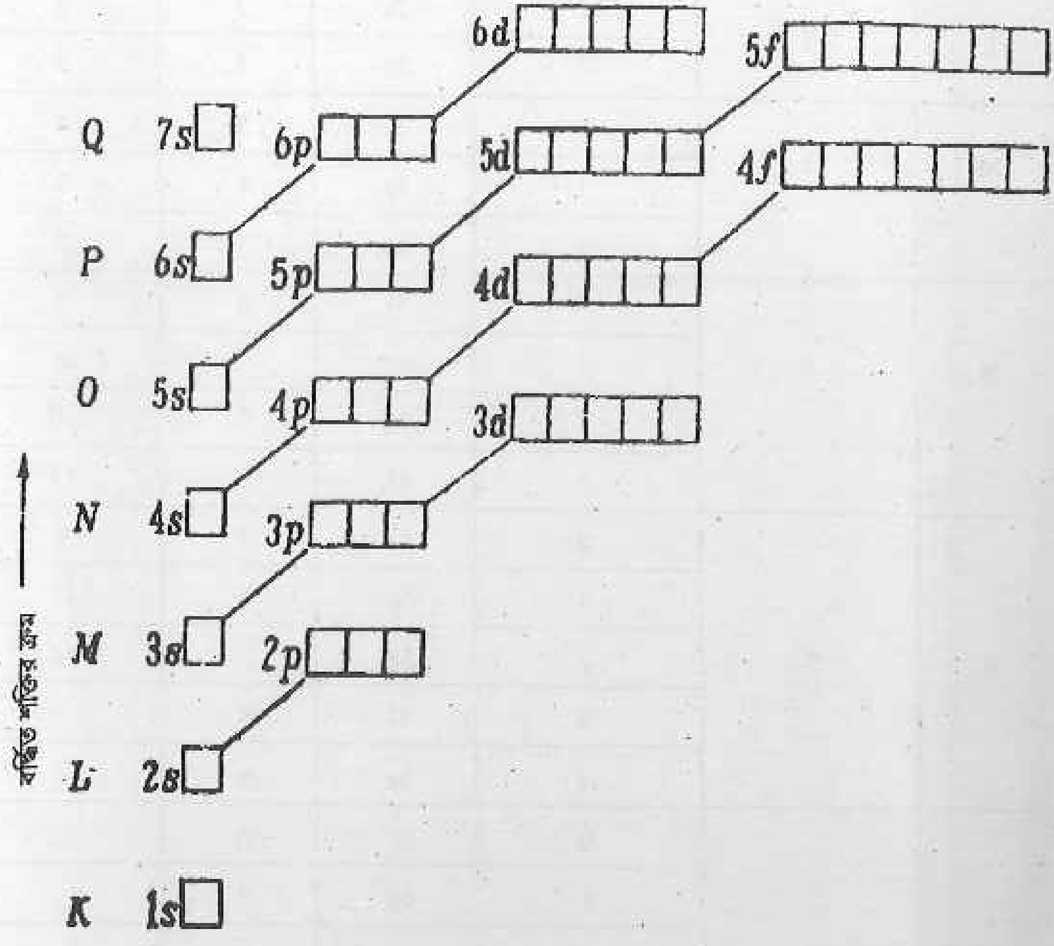
সারণী 2.4

পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরের $(n + l)$ মান ও পূরণ করার ক্রম :

কক্ষ	মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা = n	কক্ষীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা = l	কক্ষক	$n + l$	ইলেকট্রন পূরণ করার ক্রম
K	0	0	1s	1	1
L	2	0	2s	2	2
		1	2p	3	3
M	3	0	3s	3	4
		1	3p	4	5
		2	3d	5	7
N	4	0	4s	4	6
		1	4p	5	8
		2	4d	6	10
		3	4f	7	13
O	5	0	5s	5	9
		1	5p	6	11
		2	5d	7	14
		3	5f	8	
		4	5g	9	
P	6	0	6s	6	12
		1	6p	7	
		2	6d	8	
		3	6f ইত্যাদি	9	
		...	...	...	
		...	...	...	

সারণী 2.11.2 অনুসারে পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরের-উর্ধক্রম হল 1S < 2S < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s < 4f......ইত্যাদি।

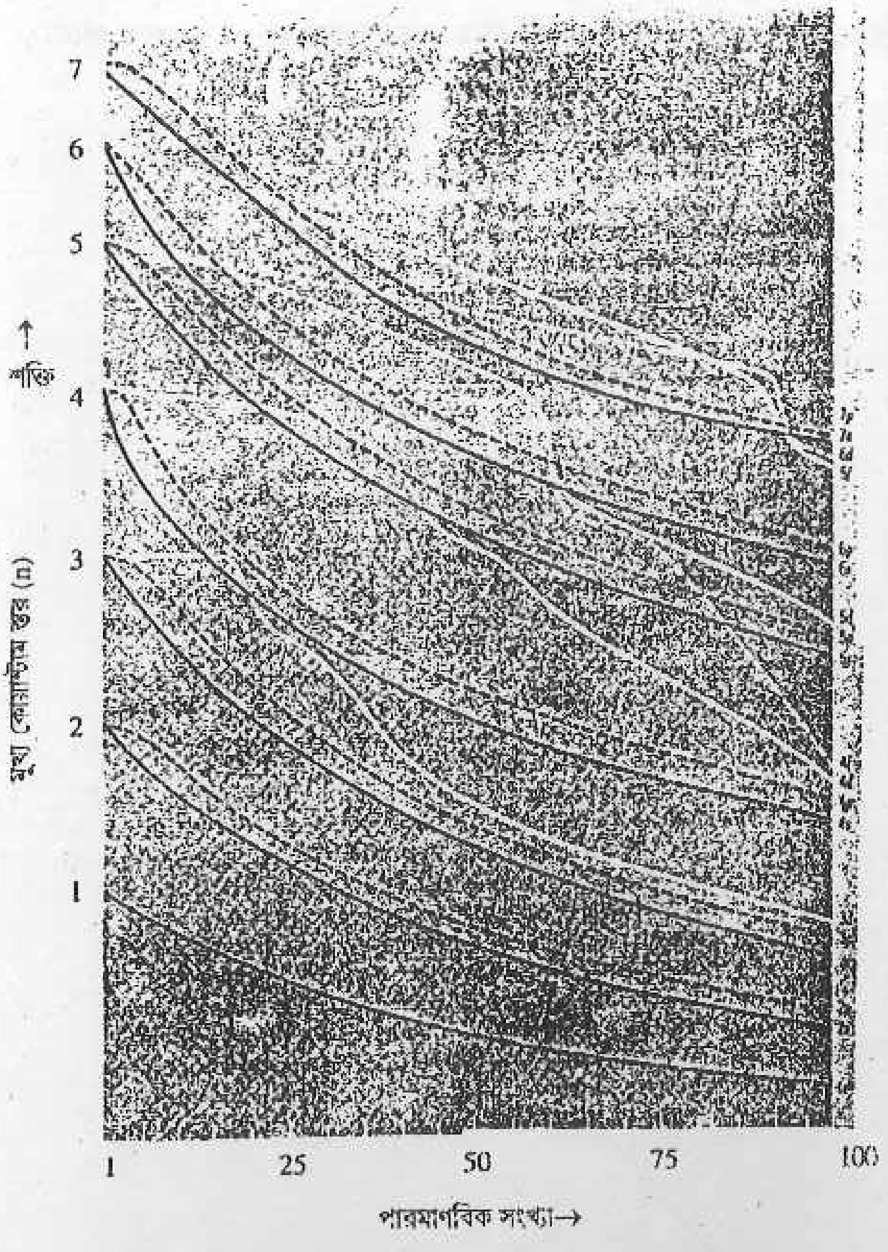
সাধারণ বিচারে বিভিন্ন শক্তিস্তরের তুলনামূলক অবস্থানটি সংশ্লিষ্ট চিত্র 2.24 অনুসরণ করলে বোঝা যাবে।



চিত্র–2.24 : পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরের বিন্যাস

আবার কেন্দ্রকের আধান, অর্থাৎ পারমাণবিক সংখ্যার পরিবর্তন হলে এই শক্তিস্তরগুলির বিন্যাসের বদল

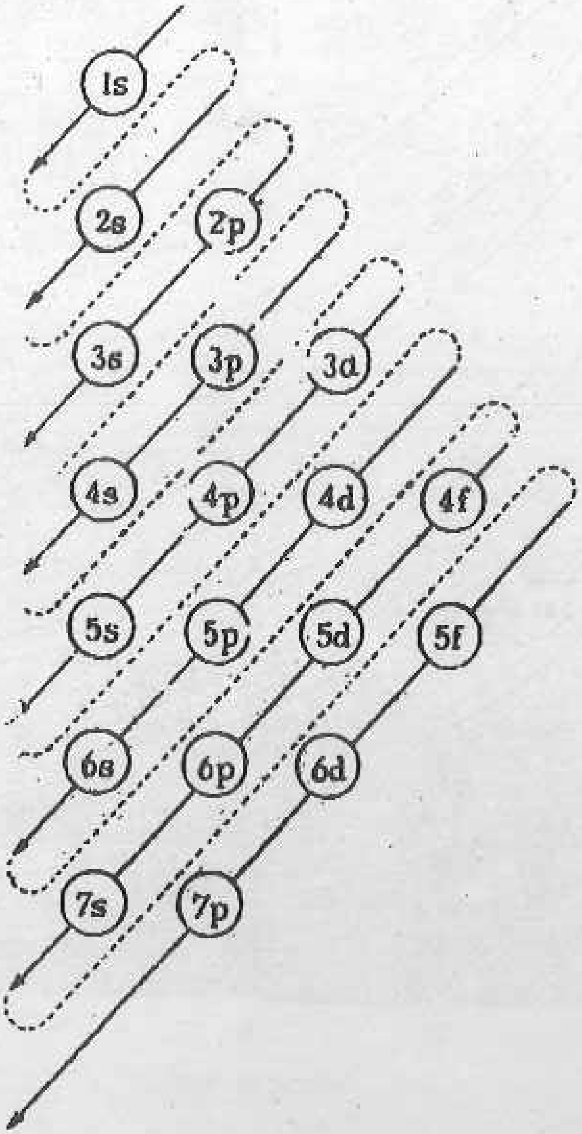
হয়। পারমাণবিক সংখ্যার পরিবর্তনের সাথে শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক বিন্যাস কেমন হয় তা চিত্র 2.25 এ বর্ণনা করা হল।



চিত্র–2.25 : পারমাণবিক সংখ্যার পরিবর্তনের সঙ্গে বিভিন্ন পারমাণবিক শক্তিস্তরের পারস্পরিক বিন্যাস

লক্ষণীয় যে, পরমাণুর বিভিন্ন উপশক্তিস্তর পূরণ করার যে নীতি সারণী 2.4- এর সাহায্যে নিরূপিত হয়েছে তা চিত্র 2.24- তে বর্ণিত শক্তিস্তরের বিন্যাসকে পুরোপুরি মেনে চলে।

। গঠননীতির প্রাথমিক শর্ত হল, অপেক্ষাকৃত নিম্নশক্তি সম্পন্ন স্তর প্রথমে পূরণ করতে হবে। এই নীতি অনুসারে শক্তিস্তর পূর্ণ করার ক্রমটি নীচের রেখাচিত্র অনুসরণ করে মনে রাখা যেতে পারে।



চিত্র-2.26 : গঠন নীতি (auf bau principle) অনুসারে পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তর পূরণ করার ক্রম ঃ ধারাচিত্র

(2) একটি শক্তিস্তর নির্ধারিত হলে সংশ্লিষ্ট কক্ষকে ইলেকট্রনের বিন্যাস হুন্ডের সর্বোচ্চ বহুত্বা সূত্র অনুসরণ করে নির্ণয় করা হয়।

(3) ইলেকট্রন বিন্যাস নির্ণয় এর ক্ষেত্রে পাউলি অপবর্জন নীতি মেনে চলতে হচ্ছে।

নির্মান নীতি অনুসারে কোন একটি পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস লেখবার জন্য নীচের নিয়মগুলি অনুসরণ করা যেতে পারে।

(1) প্রথমে মূল কক্ষের বা প্রধান কোয়ান্টাম সংখ্যার মান লিখতে হবে।

(2) এরপর ইলেকট্রনটি যে কক্ষকে আছে সেই কক্ষকের পরিচায়ক চিহ্ন মুখ্য কোয়ান্টাম স্তরের সংলগ্ন করে লিখতে হবে।

(3) সংশ্লিষ্ট কক্ষকটি নির্দিষ্ট হলে কক্ষকের চিহ্নের ডান দিকে মাস্টার ওপর ঐ কক্ষকে বৃত ইলেকট্রন সংখ্যা লিখতে হবে।

একটি উদাহরণের সাহায্যে বিষয়টি বোঝা যাক—

মনে করা যাক কোন একটি পরমাণুর পারমাণবিক সংখ্যা 14 এক্ষেত্রে নির্মাণনীতি অনুসারে ইলেকট্রন বিন্যাসের ক্রম

$$1s < 2s < 2p < 3s < 3p \text{ ইত্যাদি}$$

যেহেতু s কক্ষকে সর্বোচ্চ 2টি, pতে, 6টি ইলেকট্রন থাকতে পারে সুতরাং ইলেকট্রন বিন্যাসের ভৌম অবস্থাটি

$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2$ হয়। এটি পড়ার ক্ষেত্রে 1s2 2s2 2p6 3s2 3p2 এভাবে উচ্চারণ করা হয়। এইভাবে বিভিন্ন পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস পরের পৃষ্ঠায় দেখান হল।

সারণী 2.5 : কয়েকটি মৌলের ইলেকট্রনীয় বিন্যাস ঃ

পর্যায় (পর্যায় সারণীতে)	মৌলের প্রতীক চিহ্ন	পরমাণু ক্রমাঙ্ক	ইলেকট্রনীয় বিন্যাস									
			K	L		M			N			
			1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f
I	H	1	1									
	He	2	2									
	Li	3	2	1								
	Be	4	2	2								
	B	5	2	2	1							
II	C	6	2	2	2							
	N	7	2	2	3							
	O	8	2	2	4							
	F	9	2	2	5							
	Ne	10	2	2	6							
	Na	11	2	2	6	1						
	Mg	12	2	2	6	2						
	Al	13	2	2	6	2	1					
III	Si	14	2	2	6	2	2					
	P	15	2	2	6	2	3					
	S	16	2	2	6	2	4					
	Cl	17	2	2	6	2	5					
	Ar	18	2	2	6	2	6					
	K	19	2	2	6	2	6		1			
	Ca	20	2	2	6	2	6		2			
	Sc	21	2	2	6	2	6	1	2			
	Ti	22	2	2	6	2	6	2	2			
	V	23	2	2	6	2	6	3	2			
	*Cr	24	2	2	6	2	6	5	1			
	Mn	25	2	2	6	2	6	5	2			
	Fe	26	2	2	6	2	6	6	2			
IV	Co	27	2	2	6	2	6	7	2			
	Ni	28	2	2	6	2	6	8	2			
	**Cu	29	2	2	6	2	6	10	1			
	Zn	30	2	2	6	2	6	10	2			
	Ga	31	2	2	6	2	6	10	2	1		
	Ge	32	2	2	6	2	6	10	2	2		
	As	33	2	2	6	2	6	10	2	3		
	Se	34	2	2	6	2	6	10	2	4		
	Br	35	2	2	6	2	6	10	2	5		
	Kr	36	2	2	6	2	6	10	2	6		

সারণী 2.6 : মৌলসমূহের ইলেকট্রনীয় বিন্যাস ঃ

পরমাণু ক্রমাঙ্ক	মৌল	ইলেকট্রনীয় বিন্যাস	পরমাণু ক্রমাঙ্ক	মৌল	ইলেকট্রনীয় বিন্যাস
1	H	$1s^1$	27	Co	—$3d^7 4s^2$
2	He	$1s^2$	28	Ni	—$3d^8 4s^2$
3	Li	He$3s^1$	29	Cu	—$3d^{10} 4s^1$
4	Be	—$2s^2$	30	Zn	—$3d^{10} 4s^2$
5	B	—$2s^2 2p^1$	31	Ga	—$3d^{10} 4s^2 4p^1$
6	C	—$2s^2 2p^2$	32	Ge	—$3d^{10} 4s^2 4p^2$
7	N	—$2s^2 2p^3$	33	As	—$3d^{10} 4s^3 4p^3$
8	O	—$2s^2 2p^4$	34	Se	—$3d^{10} 4s^2 4p^4$
9	F	—$2s^2 2p^5$	35	Br	—$3d^{10} 4s^2 4p^5$
10	Ne	—$2s^2 2p^6$	36	Kr	—$3d^{10} 4s^2 4p^6$
11	Na	Ne$3s^1$	37	Rb	—Kr$5s^1$
12	Mg	—$3s^2$	38	Sr	—$5s^2$
13	Al	—$3s^2 3p^1$	39	Y	—$4d^1$
14	Si	—$3s^2 3p^2$	40	Zr	—$4d^2 5s^2$
15	P	—$3s^2 3p^3$	41	Nb	—$4d^4 5s^1$
16	S	—$3s^2 3p^4$	42	Mo	—$4d^5 5s^1$
17	Cl	—$3s^2 3p^5$	43	Tc	—$4d^5 5s^2$
18	Ar	—$3s^2 3p^6$	44	Ru	—$4d^7 5s^1$
19	K	Ar $4s^1$	45	Rh	—$4d^8 5s^1$
20	Ca	—$4s^2$	46	Pd	—$4d^{10}$
21	Sc	—$3d^1 4s^2$	47	Ag	—$4d^{10} 5s^1$
22	Ti	—$3d^2 4s^2$	48	Cd	—$4d^{10} 5s^2$
23	V	—$3d^3 4s^2$	49	In	—$4d^{10} 5s^2 5p^1$
24	Cr	—$3d^5 4s^1$	50	Sn	—$4d^{10} 5s^2 5p^2$
25	Mn	—$3d^5 4s^2$	51	Sb	—$4d^{10} 5s^2 5p^3$
26	Fe	—$3d^6 4s^2$	52	Te	—$4d^{10} 5s^2 5p^4$

সারণী 2.6 (*Contd.*)

পরমাণু ক্রমাঙ্ক	মৌল	ইলেকট্রনীয় বিন্যাস	পরমাণু ক্রমাঙ্ক	মৌল	ইলেকট্রনীয় বিন্যাস
53	I	—$4d^{10}5s^{2}5p^{5}$	79	Au	—$4f^{14}5d^{10}6s^{1}$
54	Xe	—$4d^{10}5s^{2}5p^{6}$	80	Hg	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}$
55	Cs	$Xe6s^{1}$	81	Ti	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{1}$
56	Ba	—$6s^{2}$	82	Pb	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{2}$
57	La	—$5d^{1}6s^{2}$	83	Bi	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{3}$
58	Ce	—$4f^{2}6s^{2}$	84	Po	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{4}$
59	Pr	—$4f^{3}6s^{2}$	85	At	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{5}$
60	Nd	—$4f^{4}6s^{2}$	86	Rn	—$4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{6}$
61	Pm	—$4f^{5}6s^{2}$	87	Fr	Rn $7s^{1}$
62	Sm	—$4f^{6}6s^{2}$	88	Ra	—$7s^{2}$
63	Eu	—$4f^{7}6s^{2}$	89	Ac	—$6d^{1}7s^{2}$
64	Gd	—$4f^{7}5d^{1}6s^{2}$	90	Th	—$6d^{2}7s^{2}$
65	Tb	—$4f^{9}6s^{2}$	91	Pa	—$5f^{2}6d^{1}7s^{2}$
66	Dy	—$4f^{10}6s^{2}$	92	U	—$5f^{3}6d^{1}7s^{2}$
67	Ho	—$4f^{11}6s^{2}$	93	Np	—$5f^{4}6d^{1}7s^{2}$
68	Hr	—$4f^{12}6s^{2}$	94	Pu	—$5f^{6}7s^{2}$
69	Tm	—$4f^{13}6s^{2}$	95	Am	—$5f^{7}7s^{2}$
70	Yb	—$4f^{14}6s^{2}$	96	Cm	—$5f^{7}6d^{1}7s$
71	Lu	—$4f^{14}5d^{1}6s^{2}$	97	Bk—	—$5f^{9}7s^{2}$
72	Hf	—$4f^{14}5d^{2}6s^{2}$	98	Cr	—$5f^{10}7s^{2}$
73	Ta	—$4f^{14}5d^{3}6s^{2}$	99	Es	—$5f^{11}7s^{2}$
74	W	—$4f^{14}5d^{4}6s^{2}$	100	Fm	—$5f^{12}7s^{2}$
75	Re	—$4f^{14}5d^{5}6s^{2}$	101	Md	—$5f^{13}7s^{2}$
76	Os	—$4f^{14}5d^{6}6s^{2}$	102	No	—$5f^{14}7s^{2}$
77	Ir	—$4f^{14}5d^{7}6s^{2}$	103	Lr	—$5f^{14}6d^{1}7s^{2}$
78	Pt	—$4f^{14}5d^{9}6s^{1}$			

উপরের সারণীটি লক্ষ করলে দেখা যাবে যে $_{24}$Cr, $_{29}$Cu এর ক্ষেত্রে ইলেকট্রন বিন্যাস সামান্য ব্যতিক্রমী।

$_{24}$Cr এর ক্ষেত্রে ইলেকট্রন বিন্যাস কাঙ্খিত $3d^4 4s^2$ না হয়ে $3d^5 4s^1$ এবং $_{29}$Cu এর ক্ষেত্রে $3d^9 4s^2$ এর পরিবর্তে $3d^{10} 4s^1$ হয়ে থাকে। এর কারণস্বরূপ বলা যায় 3d এবং 4s স্তরের মধ্যে শক্তির পার্থক্য খুবই সামান্য। এজন্য 4s স্তর থেকে 3d স্তরে ইলেকট্রনের স্থান পরিবর্তনের কারণে শক্তির পার্থক্য অতি নগণ্য। আমরা জানি 'd' কক্ষকগুলিতে সর্বোচ্চ 10টি ইলেকট্রন রাখা সম্ভব। কোন কক্ষক সম্পূর্ণ ইলেকট্রন পূর্ণ হয়ে সর্বোচ্চ সংখ্যক ইলেকট্রন ধারণ করলে সংশ্লিষ্ট বিন্যাসটি সর্বাধিক সুস্থিত হয়। আবার কোন কক্ষকে সর্বোচ্চ ধারণ ক্ষমতার ঠিক অর্ধেক সংখ্যক ইলেকট্রন থাকলে অর্থাৎ কক্ষকটি সমান্তরাল ঘূর্ণন যুক্ত ইলেকট্রন দ্বারা অর্ধপূর্ণ হলে সংশ্লিষ্ট বিন্যাসগুলি এর সংলগ্ন পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাস অপেক্ষা অধিক সুস্থিত হয়। বস্তুত সমান্তরাল ঘূর্ণনযুক্ত ইলেকট্রনগুলি পারস্পরিক স্থান পরিবর্তনের সাপেক্ষে সুপ্রতিসম। সুতরাং অধিক সুস্থিত। পূর্ণ বা অর্ধপূর্ণ ইলেকট্রন যুক্ত কক্ষকের এই সুস্থিতি 4s এবং 3d কক্ষকের মধ্যে ইলেকট্রনের স্থান বিনিময়ের জন্য প্রয়োজনীয় শক্তির যথাযথ পরিপূরণ করে। সামগ্রিক বিচারে অর্ধপূর্ণ বা পূর্ণ কক্ষক যুক্ত বিন্যাসটি ব্যতিক্রমী হলেও অধিক সুস্থিত হয়।

2.10 সারাংশ

ঊনবিংশ শতাব্দীর শেষভাগে এমন কিছু পরীক্ষামূলক গবেষণা করা হয় যাদের পরীক্ষালব্ধ ফল তদানীন্তন পদার্থবিদ্যার জ্ঞান দ্বারা ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়নি। এমন একটি ঘটনা হল কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ এবং আর একটি ঘটনা হল আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া। কৃষ্ণবস্তুর বর্ণালী এবং এর উষ্ণতা নির্ভরতা ব্যাখ্যা করতে গিয়ে ম্যাক্স প্লাঙ্ক আলোর কণা ধর্মের অবতারণা করেন। আলোক তড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যায় আইনস্টাইন এই ধারণার প্রয়োগ করে আলোর কণাধর্ম সুপ্রতিষ্ঠিত করেন। যদিও ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার নিরিখে আলোকতড়িৎ ক্রিয়া কোন অপ্রত্যাশিত ঘটনা নয়, কিন্তু আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার কয়েকটি বৈশিষ্ট যথা, আলোকতড়িত ইলেকট্রনের সর্বাধিক গতিশক্তির আলোর কম্পাঙ্ক নির্ভরতা, সূচনা-কম্পাঙ্কের অস্তিত্ব প্রভৃতি আলোর তরঙ্গধর্ম দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায় না। আলোর কোয়ান্টাম তত্ত্বের দ্বারা অর্থাৎ আলোকশক্তি ফোটন কণার দ্বারা পরিবাহিত হয় ধরে নিলে আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার সম্পূর্ণ ব্যাখ্যা সম্ভব।

প্রথম এককে আমরা দেখেছি যে রাদারফোর্ডের পারমাণবিক তত্ত্বের দ্বারা পারমাণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। নীলস বোর হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের কতকগুলি স্থায়ী কক্ষপথের অবতারণা করেন।

এইসকল কক্ষপথে আবর্তনকালীন ইলেকট্রনের মোটশক্তি ধ্রুবক। বোর ইলেকট্রনের কক্ষ তথা শক্তিস্তর পরিবর্তনের ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রয়োগ করে হাইড্রোজেনের রেখা বর্ণালীর ব্যাখ্যা দিতে সফল হন।

বোরের তত্ত্বের অন্যতম সীমাবদ্ধতা হল যে এর সাহায্যে হাইড্রোজেনের পারমাণবিক বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন ব্যাখ্যা করা যায় না। এই সূক্ষ্ম গঠন ব্যাখ্যা করতে সমারফেল্ড উপবৃত্তাকার ইলেকট্রনীয় কক্ষপথের ধারণা করেন এবং এই কক্ষপথে সঞ্চারণশীল ইলেকট্রনের গতি বর্ণনায় আপেক্ষিকতা তত্ত্বের প্রয়োগ করেন। বোরের তত্ত্বে ইলেকট্রনের শক্তি নির্ভর করে ওর কক্ষের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যার উপর। সমারফেল্ডের তত্ত্বে আমরা আরেকটি কোয়ান্টাম সংখ্যা আজিমুথাল কোয়ান্টাম সংখ্যা পাই।

চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পারমাণবিক বর্ণালীর রেখা সমূহ বিশ্লিষ্ট হয়। এই ঘটনার ব্যাখ্যা করতে 'স্থান কোয়ান্টায়নের' অবতারণা করা হয়। এই স্থান কোয়ান্টায়ন নীতির দ্বারা বাহির থেকে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে ইলেকট্রনীয় কক্ষের অবস্থান নির্ণীত হয়। চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার দ্বারা শূন্যে ইলেকট্রনীয় কক্ষের অবস্থান নির্ধারিত হয়।

কোন ইলেকট্রনের কক্ষীয় ভরবেগ ছাড়াও অন্য একটি স্বকীয় ভরবেগ ও সংশ্লিষ্ট একটি চৌম্বক ভ্রামক বর্তমান। ভরবেগকে 'ঘূর্ণন ভরবেগ' বলা হয়। ঘূর্ণন ভরবেগের মান ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যার উপর নির্ভর করে।

পরমাণুস্থিত কোন ইলেকট্রনের অবস্থা নির্দেশ করতে উপরে বর্নিত চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যার প্রয়োজন হয়। মুখ্য, আজিমুথাল ও চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যার একগুচ্ছ মানের জন্য এক একটি উপশক্তি স্তর বর্তমান। বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ক্ষেত্রে এইরূপ বিভিন্ন শক্তিস্তরে ইলেকট্রনের বিন্যাস পাউলির অপবর্জন নীতি ও হুণ্ডের সূত্র তথা আউফবাউ নীতি মেনে হয়।

2.11 প্রশ্নাবলি

(1) তাপীয় বিকিরণের পরীক্ষায় কৃষ্ণবস্তুর ধারণার উপযোগিতা কী?

(2) কোন ধাতুর উপর আপাতিত আলোর কম্পাঙ্ক ধাতুটির সূচনা কম্পাঙ্কের কম হলে কোন ইলেকট্রন নিঃসারিত হয়না কেন?

(3) বোরের তত্ত্বে কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনটির উপর কার্যকারী কেন্দ্রাতিগ বল ও কুলম্বীয় বলের মান সমান এই সিদ্ধান্তে উপনীত হতে বোরের কোন স্বীকার্যটি প্রয়োজনীয়।

(4) নিম্নের কোন আয়নটির ক্ষেত্রে বোরের তত্ত্ব প্রযোজ্য?

$$Li^{+1}\ ,\ Be^{3+}\ ,\ H_2^+$$

(5) একটি 100W বৈদ্যুতিক বাতি থেকে কেবলমাত্র 5890Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো নির্গত হয়। ঐ বাতি থেকে প্রতি সেকেন্ডে মোট কটি ফোটন নির্গত হয়? ($1°A = 10^{-10}$ m)

(6) হাইড্রোজেন পরমাণুর দ্বিতীয় ও তৃতীয় কক্ষে ইলেকট্রনের শক্তি যথাক্রমে -5.42×10^{-19} J এবং -2.41×10^{-19} J। ইলেকট্রনটি তৃতীয় কক্ষ থেকে দ্বিতীয় কক্ষে নেমে এলে কী তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো নিঃসারিত হবে?

(7) কোন পরমাণুর উপর বাহির থেকে প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে পরমাণুটির সংক্রিয়ার কারণ কী?

(8) একই পরমাণুর বিভিন্ন সমস্থানিকগুলির ক্ষেত্রে রিডবার্গ ধ্রুবকের মান বিভিন্ন হওয়ার কারণ কী?

2.12 উত্তরমালা

(1) কৃষ্ণবস্তুর তাপীয় বিকিরণ ধর্ম কেবল উষ্ণতার উপর নির্ভরশীল, বিশেষ কোন পদার্থের ধর্মের উপর নয়।

(2) 2.4 এর আলোকতড়িৎ ক্রিয়ার ব্যাখ্যা দ্রষ্টব্য।

(3) বোরতত্ত্বের চতুর্থ স্বীকার্য।

(4) Be^{3+} ; এটাই প্রদত্ত আয়নগুলির মধ্যে এক ইলেকট্রনীয় পরমাণু।

(5) একটি ফোটনের শক্তি $= \frac{hc}{\lambda} = 3.37691 \times 10^{-19}$J 100 ওয়াট বাতি থেকে প্রতিসেকেন্ডে 100J শক্তি নির্গত হয় সুতরাং ফোটনের সংখ্যা $= \frac{100}{3.37691 \times 10^{-19}} = 2.96\ 10^{20}$

(6) 6.6×10^{-7}m।

(7) কোন পরমাণুতে আবর্তনরত ঋণাত্মক তড়িতাধানযুক্ত ইলেকট্রনটি কোন চক্রাকার পরিবাহীর মধ্যে দিয়ে তড়িৎপ্রবাহের সমতুল। এরূপ তড়িৎপ্রবাহের ফলে একটি চৌম্বকক্ষেত্র তথা চৌম্বক ভ্রামকের সৃষ্টি হয়। এটাই পরমাণুর চৌম্বক ধর্মের একটি অন্যতম কারণ এবং এইজন্যই পরমাণুর সঙ্গে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের সংক্রিয়া সম্ভব।

(8) সমস্থানিকগুলির পরিণত ভর বিভিন্ন হয়।

একক 3 ☐ তরঙ্গবলবিদ্যা : তরঙ্গযান্ত্রিক পরমাণু (Wave mechanics : Wave mechanical atom)

গঠন

3.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

3.2 তরঙ্গকণা দ্বৈধ ও দি ব্রয়ের প্রকল্প

3.3 দ্য ব্রয়ের প্রকল্প ও বোরের কোয়ান্টায়ন সূত্র

3.4 বস্তু তরঙ্গের উপস্থাপনা ও হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্র

3.4.1 বস্তু তরঙ্গের উপস্থাপনা

3.4.2 বস্তুতরঙ্গের প্রকৃতি ও হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্র

3.4.3 গামা রশ্মি অণুবীক্ষণ কল্প পরীক্ষা ও অনিশ্চয়তা সূত্র

3.5 তরঙ্গ সমীকরণ : প্রাথমিক আলোচনা

3.6 শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণ

3.7 কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় সংকারকের ভূমিকা

3.8 তরঙ্গ অপেক্ষকের ভৌত ব্যাখ্যা

3.9 সদাচারী তরঙ্গ অপেক্ষকের ধর্মাবলী

3.10 কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় ব্যবহৃত সংকারকগুলির কিছু গুরুত্বপূর্ণ ধর্মাবলী

3.11 একমাত্রিক কোয়ান্টাম নির্বাধ কণা

3.12 একমাত্রিক পেটিকা বিভব

3.13 দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকা

3.14 ত্রিমাত্রিক বিভব পেটিকা

3.15 হাইড্রোজেনের জন্য শ্রোয়েডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণের সমাধান

3.16 হাইড্রোজেনীয় কক্ষকসমূহ

3.16.1 অরীয় বণ্টন অপেক্ষক

3.16.2 হাইড্রোজেন ও হাইড্রোজেন সদৃশতন্ত্রের বাস্তব কক্ষক সমূহ

3.16.3 কক্ষকের আকৃতি

3.17 হাইড্রোজেন পরমাণু : বোরের প্রতিরূপ ও কোয়ান্টাম চিত্রের মধ্যে পার্থক্য

3.18 বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর কক্ষক

3.19 একমাত্রিক সমাঞ্জস কম্পক

3.20 সময় নির্ভর শ্রোয়েডিঙ্গার সমীকরণ : একটি বিশেষ আলোচনা

3.21 সারাংশ

3.22 প্রশ্নাবলি

3.23 উত্তরমালা

3.1 প্রস্তাবনা

পূর্ববর্তী এককগুলিতে আলোচনায় আমরা আলোর ধর্ম সম্পর্কে জেনেছি। কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ বা আলোকতড়িৎ ক্রিয়া প্রভৃতি পরীক্ষা আলোকের কণাধর্ম প্রকাশ করে। কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আলোকের এই ধর্মের যথাযথ ব্যাখ্যা করা যায়। আবার ব্যতিচার (Interference), ব্যবর্তন (Defraction) ইত্যাদি পরীক্ষা আলোকের তরঙ্গধর্ম প্রতিষ্ঠিত করে। বস্তুত আলোকের স্বরূপ বিশ্লেষণ করে দেখা যায় এটি দ্বৈত সত্তা সম্পন্ন। আলোকের এই দ্বৈত স্বরূপের কথা বিবেচনা করে ফরাসী বিজ্ঞানী লুই দিব্রয় (Louis deBroglie) প্রস্তাব

করেন যে কেবল আলোকীয় কণাই নয়, স্বাভাবিক বস্তু কণাও দ্বৈতসত্তা সম্পন্ন। পরবর্তীকালে ইলেকট্রনের ব্যবর্তন ইত্যাদি পরীক্ষা তাঁর এই প্রস্তাবকে প্রতিষ্ঠিত করে। দিব্রয়ের প্রস্তাব পরমাণুর গঠন আলোচনার একটি সম্পূর্ণ নতুন দৃষ্টিকোণ উন্মোচিত করে। দিব্রয়ের প্রস্তাব অনুসরণ করে বস্তু তরঙ্গের উপস্থাপনা ও সমীকরণ নির্ণায়ন করা হয়। বস্তুর তরঙ্গধর্মের পরিপ্রেক্ষিতে বস্তুটির গতীয় অবস্থা তথা বলবিদ্যার নতুন আঙ্গিক প্রয়োজন। কোন বস্তু কণার গতীয় অবস্থা সুনিশ্চিতভাবে নির্ণয় করা সম্ভব। অপরপক্ষে বস্তুকণার তরঙ্গ যান্ত্রিক ধারণায় কোন বস্তুর একাধিক গতীয় স্থিতিমাপ (Parameter) নির্ণয় অসম্ভব। তরঙ্গ বলবিদ্যায় হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তানীতি গতীয় পরিমাপের সীমাবদ্ধতা সুনির্দিষ্টভাবে চিহ্নিত করে। বস্তু তরঙ্গের সমীকরণ আলোচনার জন্য সর্বপ্রথম প্রয়োজন সংশ্লিষ্ট তরঙ্গ অপেক্ষকের ধারণা। তরঙ্গ অপেক্ষকের ধর্মাবলী এবং বিবিধ সংকারকের প্রয়োগে এর রূপান্তরের আলোচনায় তরঙ্গ অপেক্ষকের ধর্মাবলী ও আচরণ সম্পর্কে একটি সুস্পষ্ট ধারণা হয়। নিউক্লিয় বিভবক্ষেত্রে ইলেকট্রনের অবস্থান তাত্ত্বিক বিচারে একটি ত্রিমাত্রিক বিভব পেটিকায় বদ্ধ তরঙ্গের ধর্ম মেনে চলে। এটি ভালভাবে বুঝে নেওয়ার জন্য প্রথমত একমাত্রিয় কোয়ান্টাম নির্বাধ কণা তথা একমাত্রিক পেটিকা আলোচনার মাধ্যমে উপস্থাপিত হয়েছে। বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর আলোচনা শুরু করার আগে সরলতম পরমাণু হাইড্রোজেনের জন্য তরঙ্গবলবিদ্যার প্রয়োগ করা প্রয়োজন। হাইড্রোজেন পরমাণুর তরঙ্গ যান্ত্রিক (wave mechanical) ব্যাখ্যা তথা শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণের (The Schrödinger Wave Equation) সমাধানের ফলে এটি বোঝা যায়। আগের এককে ইলেকট্রন কণার আবর্তন বা কক্ষের ধারণা উল্লেখ করা হয়েছে। তরঙ্গ যান্ত্রিক পরমাণুর ক্ষেত্রে যেহেতু কোন স্থানে বস্তু তরঙ্গের অবস্থান অনিশ্চিত সুতরাং নিউক্লিয়বিভব ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের অবস্থান সুনিশ্চিতভাবে নির্ণয় করা অসম্ভব। বরং ইলেকট্রনের অবস্থান সম্ভাবনামূলক। সুতরাং কণাধর্মী ইলেকট্রনের কক্ষ তথা পরিক্রমাপথের ধারণারও উপযুক্ত সংস্কার প্রয়োজন। তরঙ্গযান্ত্রিক ব্যাখ্যায় সংশ্লিষ্ট ধারণাটি ইলেকট্রন কণ্ডকের সংজ্ঞা তথা আলোচনার মাধ্যমে প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। হাইড্রোজেন পরমাণুর যথাযথ তরঙ্গ যান্ত্রিক ব্যাখ্যার অনুসারী আলোচনায় বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণু কক্ষক প্রাসঙ্গিকভাবে আলোচিত। এই আলোচনায় একমাত্রিক সমঞ্জস কম্পক তথা সময় নির্ভর শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করে আপনি—

- কোন বস্তু কণার তরঙ্গধর্ম সম্পর্কে অবহিত হবেন এবং কোন কণার সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের নির্ণায়কগুলি যেমন তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করতে পারবেন।

- হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তাসূত্র অনুসরণ করে কোন বস্তুর স্থানাঙ্ক তথা ভরবেগ নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা নির্ণয় করতে পারবেন।
- দিব্রয়ের প্রকল্প অনুসরণ করে বোরের কোয়ান্টাম সূত্রগুলি ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বিবিধ সংকারকের প্রয়োগে তরঙ্গ অপেক্ষকের রূপান্তরণ করতে সক্ষম হবেন।
- কোয়ান্টাম নির্বাধ কণার আলোচনা থেকে কোন তন্ত্রের ক্ষেত্রে শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের প্রয়োগ সমাধান পদ্ধতির সঙ্গে পরিচিত হবেন।
- অসীম বিভব সম্পন্ন পেটিকায় আবদ্ধ কণার ক্ষেত্রে শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের সমাধানের দ্বারা ধ্রুপদী তন্ত্রের সাথে কোয়ান্টাম তন্ত্রের ধর্মের তফাত বুঝতে পারবেন।
- হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের সমাধান করে ইলেকট্রনের সম্ভাব্য শক্তিস্তর সমূহ এবং কক্ষক সম্বন্ধে একটি সুস্পষ্ট ধারণা করতে পারবেন।
- বোর প্রদত্ত হাইড্রোজেন পরমাণুর কোয়ান্টাম চিত্রের তুলনামূলক আলোচনা থেকে হাইড্রোজেন পরমাণুর প্রকৃত গঠন সম্বন্ধে সুস্পষ্ট ধারণা করতে পারবেন এবং পরমাণুর আভ্যন্তরীণ চিত্র অন্যদের বুঝিতে দিতে পারবেন।
- বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর কক্ষক তথা ইলেকট্রন বিন্যাস সম্বন্ধে ধারণা করতে পারবেন।
- আণবিক বর্ণালীর আলোচনায় অন্যতম অপরিহার্যতত্ত্ব একমাত্রিক সমঞ্জস কক্ষকের শক্তিস্তর এবং ধ্রুপদী সমঞ্জস কম্পাঙ্কের সাথে এর পার্থক্য সম্বন্ধে ধারণা করতে পারবেন। এই তত্ত্ব সম্বন্ধে ধারণা থেকে আণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হবেন।
- সময় নির্ভর শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের আলোচনা থেকে কোয়ান্টাম বলবিদ্যা সম্বন্ধে আরো বিস্তৃত ধারণা অর্জন করবেন।

3.2 তরঙ্গ কণা দ্বৈধ এবং দ্যব্রয়ের প্রকল্প (Wave particle duality and DeBroglie's Hypothesis)

পূর্ববর্তী এককে আমরা দেখেছি যে আলো বা অন্যান্য বিকীর্ণ শক্তির দ্বৈত প্রকৃতি রয়েছে। বস্তুত এগুলিতে কণা এবং তরঙ্গ উভয় প্রকার ধর্মই প্রকাশ পায়। পূর্ববর্তী এককে আমরা এও দেখেছি যে হাইড্রোজেন পরমাণুর

গঠন ব্যাখ্যা করার ক্ষেত্রে বোর তত্ত্ব উল্লেখযোগ্য ভাবে সফল এবং বোর তত্ত্বের সাহায্যে হাইড্রোজেনের রেখা বর্ণালীর যথাযথ ব্যাখ্যা করা যায়। বোরের তত্ত্ব অনুসারে হাইড্রোজেনের ইলেকট্রন কতগুলি সুনির্দিষ্ট সুস্থিত কক্ষপথে নিউক্লিয়াসকে আবর্তন করে নিউক্লিয়াসের সাপেক্ষে এই কক্ষপথগুলির অবস্থান বোরের কোয়ান্টায়ন সূত্র দ্বারা নির্ধারিত হয়। এই কক্ষপথগুলিকে সুস্থিত কক্ষপথ বলে। সুস্থিত কক্ষপথে নিউক্লিয়াসের চারিদিকে বৃত্তাকার পথে আবর্তনরত ইলেকট্রন শক্তি বিকিরণ করে না। অর্থাৎ শক্তির বিচারে এই কক্ষপথগুলি যথেষ্ট সুস্থিত। বোরের প্রস্তাবিত রূপকল্পটি প্রাথমিক বিচারে যথাযথ বলে মনে হলেও এই রূপকল্পটির যথার্থতার কোন কারণ বা প্রমাণ বোর তত্ত্বে নেই। সহজভাবে বলতে গেলে বোরের কোয়ান্টায়ন নীতির সাহায্যে সুস্থিত কক্ষপথগুলি যথাযথভাবে নিরূপিত হলেও এইরকম একটি কক্ষপথের যথার্থতার কোন সুস্পষ্ট কারণ বোরের তত্ত্বে নেই। বোরের কোয়ান্টায়ন নীতির প্রয়োগ করে সুস্থিত কক্ষপথগুলিতে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ নির্ণয় করা যায়। কিন্তু বিভিন্ন কক্ষপথে কৌণিক ভরবেগের মানগুলি কেন ঠিক ঐ মানগুলি, অন্য কিছু নয় তার কারণ নির্দেশ করা হয়নি। বোর তত্ত্ব অনুসারে দেখা যায় সুস্থিত কক্ষপথগুলির ব্যাসার্ধের মান ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যার বর্গের সমানুপাত। এই সুনির্দিষ্ট ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যাগুলিকে কোয়ান্টাম সংখ্যা (মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা, n) বলা হয়। প্রকৃতিতে ব্যাতিচার এবং প্রসারিত তন্তুর কম্পনের ক্ষেত্রে এই রকম পূর্ণসংখ্যার ব্যবহার লক্ষ্য করা যায়। ঘটনাক্রমে উভয়ক্ষেত্রেই তরঙ্গধর্মীতা বিশেষভাবে প্রাসঙ্গিক। এই বৈশিষ্ট বিশেষ তাৎপর্যপূর্ণ মনে করে দ্যব্রয় (De Broglie) প্রস্তাব করেন যে সুস্থিত কক্ষে পরিক্রমারত ইলেকট্রনকে কেবল কণা হিসাবে ধারণা করাই যথেষ্ট নয়। বরং ইলেকট্রনের অস্তিত্বের সঙ্গে একধরণের পর্যাবৃত্ত গতির সম্পর্ক রয়েছে এমন কল্পনা করার যথেষ্ট কারণ রয়েছে।

প্রসঙ্গত তিনি প্রস্তাব করেন যে কণা তথা তরঙ্গধর্মীতা কেবল আলো বা বিকীর্ণ শক্তির ক্ষেত্রেই প্রাসঙ্গিক, তা নয়, বরং সাধারণ বস্তুকণার ক্ষেত্রেও এমন দ্বৈতধর্ম একইরকম প্রাসঙ্গিক। একটি গতিশীল বস্তু কণার সঙ্গে তরঙ্গধর্ম অঙ্গাঙ্গিকভাবে জড়িত। গতিশীল বস্তু কণার সঙ্গে যুক্ত এই তরঙ্গকে "বস্তুতরঙ্গ" বলা যেতে পারে। কোন মাধ্যমে আলোর বিস্তারের ক্ষেত্রে আমরা বিভিন্ন ভৌত ঘটনাবলীর ব্যাখ্যা করার জন্য প্রধানত আলোর তরঙ্গধর্ম অনুসরণ করে থাকি। আবার ঐ আলোকরশ্মির ক্ষেত্রে শক্তির বিনিময় ইত্যাদি গণনার প্রয়োজনে আমর, ফোটনের ধারণা বেশি গ্রহণযোগ্য বা উপযোগী বলে মনে করি। এক্ষেত্রে আলোকতরঙ্গের কম্পাঙ্ক υ (নিউ) হলে, সংশ্লিষ্ট ফোটন বাহিত শক্তির পরিমাণ (E) $h\upsilon$ এর সমান বলে মনে করা হয়। এক্ষেত্রে h— প্লাঙ্কের ধ্রুবক। অর্থআৎ $E = h\upsilon$। একইভাবে একটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে আধান, ভর অথবা শক্তির পরিমাণ ইত্যাদি নির্ণয়ের সময় আমরা এক কণা হিসাবে কল্পনা করি। কিন্তু কোন ক্ষেত্রে ইলেকট্রন রশ্মির পথ বা কোন একটি ফলকে ইলেকট্রন রশ্মির আপতন ও প্রতিফলন ইত্যাদির জন্য এবং বিশেষত কোন মাধ্যমে

ইলেকট্রন কণার ব্যবর্তন ইত্যাদি ব্যাখ্যা করার জন্য ইলেকট্রন রশ্মিকে তরঙ্গধর্ম বিশিষ্ট বলে মনে করলে ব্যাখ্যা করা যায়।

এখন আলোক কণিকা ফোটনের ক্ষেত্রে আমরা প্লাঙ্কের সূত্রানুসারে ফোটনের শক্তির (E) তথা কম্পাঙ্ক (υ) কে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করতে পারি।

$$E = h\upsilon \qquad (3.1)$$

এক্ষেত্রে h হল প্লাঙ্কের ধ্রুবক।

আবার আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাবাদ তত্ত্ব অনুসারে আমরা জানি $E = mc^2$ ....(3.2)

এক্ষেত্রে m ফোটন কণার ভর ; এবং c শূণ্য মাধ্যমে আলোর গতিবেগ।

সমীকরণদ্বয় (3.1) এবং (3.2) এর সমন্বয় ঘটিয়ে আমরা পাই

$$E = h\upsilon$$
$$= mc^2$$

অর্থাৎ $h\upsilon = mc^2$

এখন যেহেতু ফোটনের ভর m, গতিবেগ c, সুতরাং একটি ফোটনের ভরবেগ (p) = mc হবে। সুতরাং

$$h\upsilon = p.\ c.$$

আলোকরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হলে

$$\upsilon \times \lambda = c$$

সুতরাং $\upsilon = \dfrac{c}{\lambda}$ । υ এর মান উপরোক্ত সমীকরণে বসিয়ে পাই $\dfrac{hc}{\lambda} = pc$

$$\text{বা } \lambda = \frac{h}{p} \qquad ....(3.3)$$

দ্যব্রয়ের প্রস্তাবনা অনুসারে শেষোক্ত সম্পর্কটি (3.3) এবং এর পূর্ববর্তী সমীকরণ (3.1) কেবল আলোকীয় কোয়ান্টাম বা ফোটনের ক্ষেত্রেই নয় বরং সাধারণভাবে সমস্ত গতিশীল বস্তুকণার ক্ষেত্রে একইভাবে প্রযোজ্য।

1925 খ্রীষ্টাব্দে দিব্রয় প্রস্তাব করেন যে :

প্রতি গতিশীল বস্তু কণার ক্ষেত্রে আবশ্যিকভাবে তরঙ্গ ধর্ম বর্তমান। সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) এবং বস্তুকণার ভরবেগ (p) নিম্নলিখিতভাবে সম্পর্কিত। (সমীকরণ 3.3)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

যদি গতিশীল বস্তুটির গতিবেগ আলোর তুলনায় অনেক কম হয় যা সাধারণভাবে আমাদের চারপাশের বস্তুকণার ক্ষেত্রে হয়ে থাকে তবে

$p = m \times v$; এক্ষেত্রে m বস্তুকণার ভর, v = বস্তুকণার গতিবেগ। সুতরাং এরকম একটি গতিশীল বস্তুকণার ক্ষেত্রের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = \frac{h}{p}$

বা $\lambda = \frac{h}{mv}$ ......(3.4)

বস্তুত আমাদের চারপাশে আলোর তুলনায় অনেক কম গতিবেগ যুক্ত বস্তুকণার জন্য এই তরঙ্গধর্মের প্রাসঙ্গিকতা পরবর্তী অংশে বিবদভাবে আলোচনা করা হবে।

1927 সালে ডেভিসন এবং জারমার (Davisson and Germer) লক্ষ্য করেন যে ইলেকট্রন কণার স্রোত কেলাসের দ্বারা ব্যবর্তিত হয় এবং পরীক্ষার সাহায্যে দেব্রয়ের প্রকল্পটি অভ্রান্ত বলে প্রতিষ্ঠিত করেন।

দ্যব্রয় এর প্রকল্প এবং পরবর্তীকালে ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষা থেকে একথা নিশ্চিতভাবে বলা যায় যে ইলেকট্রনের মত সকল সূক্ষ্মতর কণার ক্ষেত্রে কণা ও তরঙ্গ উভয়ধর্মই প্রাসঙ্গিক এবং ভৌত ঘটনা সমূহের ব্যাখ্যা করার ক্ষেত্রে প্রয়োজন অনুসারে উভয়প্রকার ধর্মের যে কোন একটিকে বিবেচনা করা যেতে পারে অর্থাৎ উভয়ধর্মই সমান প্রাসঙ্গিক বা তাৎপর্যপূর্ণ।

উপরোক্ত আলোচনা এবং বিশেষত সমীকরণ (3.4) থেকে স্পষ্ট বোঝা যায় যে গতিশীল বস্তুকণার ভরবেগ যত বেশি হয় সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য তত ছোট হতে থাকে—অর্থাৎ স্থূল বস্তুকণার ক্ষেত্রে তরঙ্গধর্ম ততই কম প্রাসঙ্গিক বা তাৎপর্যপূর্ণ হয়। এ কারণেই আমাদের চারপাশে সাধারণভাবে যে সমস্ত গতিশীল বস্তু আমাদের চোখে পড়ে সেগুলির ক্ষেত্রে তরঙ্গধর্ম আমরা লক্ষ্য করি না ; বলা চলে যে এগুলির জন্য প্রাসঙ্গিক তরঙ্গধর্মের উপস্থিতি বা ভূমিকা আমাদের কাছে স্পষ্ট নয়। বস্তু খেলার মাঠে একটি ক্রিকেট বলের

গতি কিংবা একটি শহরের রাস্তায় চলমান গাড়ি বা মানুষের জন্য তরঙ্গধর্মের ভূমিকা তথা বস্তুতরঙ্গের দৈর্ঘ্য অতি সামান্য—নিতান্ত তুচ্ছ, একান্ত অবান্তর। কয়েকটি উদাহরণের সাহায্যে আমরা এটি প্রতিষ্ঠা করব।

উদাহরণ 1—মনে করা যাক 60 kg ওজনের একটি মানুষ 1 মিটার / Sec. গতিবেগ কোন রাস্তা দিয়ে চলছেন। এক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট বস্তু তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) মান।

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

এক্ষেত্রে বস্তুর ভর (m) = 60 kg

গতিবেগ (v) = 1 m/s

এবং প্লাঙ্ক ধ্রুবক (h) = 6.626×10^{34} Jule-sec.

এর মান বসিয়ে পাই

$$\lambda = \frac{6.626 \times 10^{34}}{60 \times 1}$$

$$= 1.104 \times 10^{-35}\ \text{m}.$$

স্পষ্টতই বস্তুর আয়তনের তুলনায় এই মান উল্লেখযোগ্যভাবে কম এবং এক্ষেত্রে বস্তুটির তরঙ্গধম আপাতদৃষ্টিতে অতি তুচ্ছ, গ্রহণযোগ্য নয়।

উদাহরণ 2—ধরা যাক একটি ইলেকট্রন নিউক্লিয়াসের চারিদিকে পরিক্রমারত অবস্থায় 10^7 m/s রৈখিক বেগ সহ আবর্তন করে। এক্ষেত্রে ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ)

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

ইলেকট্রন কণার ভর (m) = 9.109×10^{31} kg

গতিবেগ (v) = 10^7 m/s., প্লাঙ্ক ধ্রুবক (h) = 6.626×10^{-34} Jule–Sec.

সুতরাং তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = \frac{6.626 \times 10^{34}}{9.109 \times 10^{-31} \times 10^{7}}$

$$= \frac{6.626 \times 10^{-34}}{9.109 \times 10^{-24}}$$

$$= 7.27 \times 10^{-11}\text{m}$$

আমরা জানি হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্ধ প্রায় = 5.3×10^{-11} m অর্থাৎ ইলেকট্রন বস্তুতরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্ধের সঙ্গে তুলনীয়। এক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান ইলেকট্রন পরিক্রমা পথের মাপের তুলনায় মোটেই উপেক্ষা করার মত নয়। অর্থাৎ ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথেষ্ট প্রাসঙ্গিক।

3.3 দ্যব্রয় এর প্রকল্প ও বোরের কোয়ান্টাম সূত্র (De Broglie's principle and Bohr's quantum principle)

পূর্ববর্তী এককে আলোচিত পরমাণুর গঠন সংক্রান্ত বোর রূপকল্পে আমরা দেখেছি যে হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু তন্ত্রে ইলেকট্রনগুলি কতগুলি সুনির্দিষ্ট সুস্থিত বৃত্তাকার কক্ষপথে কেন্দ্রকের চারিদিকে আবর্তন করে। বোরের কোয়ান্টাম নীতি অনুসারে m ভর যুক্ত একটি ইলেকট্রন কেন্দ্রকের চারিদিকে r ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট বৃত্তাকার পথে V রৈখিক বেগসহ আবর্তন করলে, ঐরকম একটি কক্ষপথে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ mvr, $\frac{h}{2\pi}$ এককের সরল পূর্ণগুণিতক মানের জন্য সংরক্ষিত হয়। অর্থাৎ

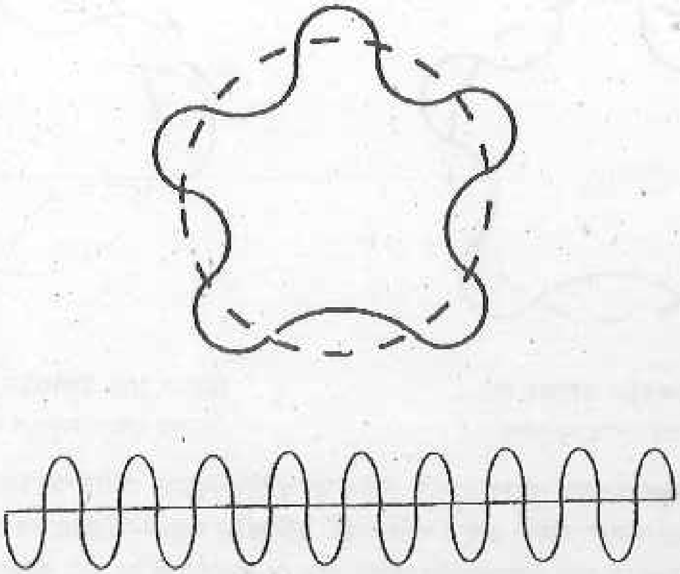
$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \qquad \text{...........(3.5)}$$

এক্ষেত্রে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n, যে কোন ধনাত্মকপূর্ণ সংখ্যা, n = 1, 2, 3 ইত্যাদি, এবং h = প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক। বোরের রূপকল্প অনুসারে এইরকম একটি কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তিও সংরক্ষিত থাকে। বোর রূপকল্পটি পরমাণুর গঠন ব্যাখ্যা করতে সফল হলেও এই তত্ত্বের প্রামাণ্যতার বিষয়ে অর্থাৎ পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণ ছাড়া কোয়ান্টাম নীতির কোন তাত্ত্বিক কারণ বোর তত্ত্বে উল্লিখিত হয়নি। তাই আপাত দৃষ্টিতে বোরের কোয়ান্টাম নীতি-অর্থাৎ পরমাণুর মধ্যে নির্দিষ্ট দূরত্বে সুস্থিত কক্ষপথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের ধারণা সত্য হলেও ঠিক কেন এমনটাই ঘটবে তার কোন তাত্ত্বিক কারণ ব্যাখ্যা করা হয়নি। এমনকি এই নীতির সমর্থনে কোন পরোক্ষ সূত্রেরও প্রস্তাব বোর তত্ত্বে অনুপস্থিত।

দ্যব্রয়ের তরঙ্গ-কণা দ্বৈত ধারণার থেকে বোর তত্ত্বের পরোক্ষ সমর্থন পাওয়া যায়। বস্তুত ইলেকট্রনকে বস্তু তরঙ্গ হিসাবে কল্পনা করলে একটি বোর কক্ষপথের জন্য বোরের কোয়ান্টায়ন সূত্রের যথার্থতা দিব্রয়ের প্রকল্প অনুসরণ করে প্রতিষ্ঠা করা যায়। অর্থাৎ দিব্রয়ের ধারণার সাহায্যে বোরের কোয়ান্টায়ন নীতির সমীকরণ (3.5) এর নির্ণায়ন করা সম্ভব।

যেহেতু একটি সুস্থিত কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তি সংরক্ষিত সুতরাং এইরূপ একটি বদ্ধ পথে অবস্থিত

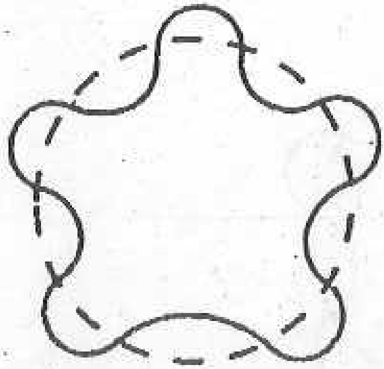
ইলেকট্রন বস্তু তরঙ্গকে একটি প্রসারিত টানটান করা তারের কম্পনের সৃষ্ট স্থানিক তরঙ্গের সঙ্গে তুলনা করা যায়। উভয়ক্ষেত্রেই তরঙ্গের শক্তি সংরক্ষিত থাকে (চিত্র : 3.1).



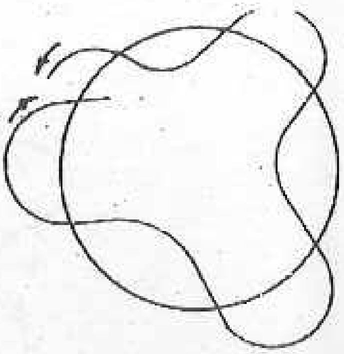
চিত্র-(3.1) :

শক্তির সংরক্ষণের মিল থেকে বৃত্তাকার পথে পরিক্রমারত ইলেকট্রন তরঙ্গকে দুই প্রান্তবদ্ধ প্রসারিত তারের কম্পনের সঙ্গে তুলনা করা যায়। উভয়ক্ষেত্রেই দৈর্ঘ্যের যে মাত্রার মধ্যে তরঙ্গটি বিস্তৃত হয় তা অর্ধতরঙ্গদৈর্ঘ্যের সরল পূর্ণ সংখ্যার গুণিতক হতে হবে। সরলভাবে বলা যায় প্রসারিত তারের দৈর্ঘ্যের মধ্যে এক বা একাধিক তরঙ্গার্ধ অবস্থান করে। অর্থাৎ প্রসারিত তারের দুইপ্রান্ত তরঙ্গের ঘাতের সঙ্গে একই বিন্দুতে মিলিত হবে। বৃত্তাকার পরিক্রমা পথের ক্ষেত্রে সমগ্র পরিক্রমা পথটি বৃত্তের পরিধির দৈর্ঘ্য প্রসারিত তারের দৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয়। সুতরাং বৃত্তাকার পথের পরিধি ইলেকট্রন বস্তু তরঙ্গের তরঙ্গার্ধের পূর্ণসংখ্যার গুণিতক হবে। কিন্তু যেহেতু একটি পূর্ণ পরিক্রমা পথের শেষে ইলেকট্রন তরঙ্গ আবার একই ছন্দে আবর্তিত হয় অর্থাৎ একটি পূর্ণ পরিক্রমার শেষে ইলেকট্রন তরঙ্গের ঘাতগুলি একই বিন্দুতে মিলিত হওয়াই যথেষ্ট নয়। ঐ বিন্দুতে ইলেকট্রন তরঙ্গের দশাও একই হতে হবে। সুতরাং এই উভয় শর্ত মেনে চলতে হলে সমগ্র পরিক্রমা পথটি বা বৃত্তাকার পথের পরিধি ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পূর্ণ সংখ্যার গুণিতক হতে হবে। এক্ষেত্রে সম্পূর্ণ পরিক্রমা পথটি অতিক্রম করার পর ইলেকট্রন আবার পর্যাবৃত্ত গতিতে আবর্তন করতে থাকলে তরঙ্গের দশা বিপর্যস্ত হবেনা। কিন্তু পরিক্রমা পথটি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পূর্ণ সংখ্যার গুণিতক না হলে একটি সম্পূর্ণ পরিক্রমার শেষে একই বিন্দুতে ইলেকট্রন

তরঙ্গের দশা অনুরূপ না হওয়ার ফলে ধ্বংসাত্বক ব্যতিচার এর কারণে সমগ্র তরঙ্গ ব্যবস্থাটি বিপর্যস্ত হয়ে পড়বে (চিত্র 3.2)।

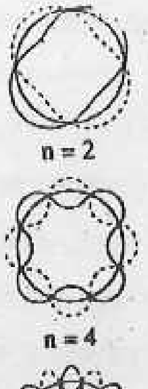


চিত্র–3.2(a) ইলেকট্রন তরঙ্গের দশা পরিক্রমা পথের শেষে অনুরূপ



চিত্র–3.2(b) ইলেকট্রন তরঙ্গের দশা পরিক্রমা পথের শেষে অনুরূপ নয় সুতরাং ধ্বংসাত্মক

হাইড্রোজেন সদৃশ ব্যবস্থায় বৃত্তাকার পথে পরিক্রমারত ইলেকট্রনের গতীয় অবস্থাকে দুই প্রান্ত বদ্ধ তারের কম্পনের সঙ্গে তুলনা করলে আমরা বলতে পারি একটি ইলেকট্রন তরঙ্গ নিউক্লিয়াসের চারপাশে বৃত্তাকার পথে অবস্থান করলে কেবলমাত্র সেই কক্ষপথগুলি সুস্থিত হবে যে কক্ষপথগুলির জন্য কক্ষপথের পরিধি ইলেকট্রন তরঙ্গের পূর্ণসংখ্যার গুণিতক (চিত্র 3.3)।



চিত্র–3.3 : বিভিন্ন কক্ষে ইলেকট্রন তরঙ্গের চিত্র
n : বিভিন্ন কক্ষের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা

সুতরাং এই রকম একটি কক্ষপথের ক্ষেত্রে কক্ষপথের পরিধি ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) পূর্ণসংখ্যার গুণিতক। সুতরাং

$$n\lambda = 2\pi r \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3.6)$$

এক্ষেত্রে n একটি ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যা এবং r পরিক্রমা পথের ব্যাসার্ধ।

আবার আমরা জানি দেব্রয় এর প্রকল্প অনুসারে ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য, λ.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

পূর্বোক্ত (3.6) সমীকরণে λ এর মান বসিয়ে পাই

$$m \times \frac{h}{mv} = 2\pi r$$

বা $mvr = \dfrac{nh}{2\pi}$ ....(3.7)

বলাবাহুল্য শেষোক্ত সমীকরণটি বোরের রূপকল্পের কোয়ান্টাম নীতির গাণিতিক রূপ দেখা যায় যে দেব্রয়ের প্রকল্প বোরের কোয়ান্টায়ন নীতির যথার্থতা প্রমাণ করে।

3.4 বস্তু তরঙ্গের উপস্থাপনা ও হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্র (Presentation of particle wave and Heisenberg's Uncertainty Principle)

3.4.1 বস্তুতরঙ্গের উপস্থাপনা :

যে কোন তরঙ্গের ক্ষেত্রে আমরা দেখতে পাই যে একটি রাশি (মনে করি ϕ) সময়ের সঙ্গে সঙ্গে পুনরাবৃত্ত হয়। অর্থাৎ ত্রিমাত্রিক স্থানাঙ্ক (x, y, z) এবং সময় (t) এর সাপেক্ষে উক্ত রাশিটির তরঙ্গ অপেক্ষকটি অর্থাৎ পর্যাবৃত্ত গতির ধরণটি নিম্নোক্তভাবে প্রকাশ করা যায় :

$$\phi = \phi(x, y, z, t) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.8)$$

পুকুরের শান্ত জলে ঢিল ছুঁড়লে, জলতলের যে অংশে ঢিলটি পড়ল তার চারদিকে বৃত্তাকারে জলের ঢেউ ছড়িয়ে পড়ে। এই ঢেউটির ক্ষেত্রে শান্ত জলতলের সাপেক্ষে জলতলের উপরের একটি বিন্দুর সরণ সময়ের সাথে সাথে পর্যায়ক্রমে পুনরাবৃত্ত হয়। এইরকম একটি ঢেউ-এর জন্য ϕ হল শান্ত জলতলের সাপেক্ষে বিক্ষুব্ধ জলতলের একটি বিন্দুর সরণ। আবার বাতাসবাহিত শব্দ তরঙ্গের জন্য বায়ুস্তম্ভের চাপ পর্যাবৃত্তভাবে বদলায়।

এক্ষেত্রে বায়ুস্তম্ভের চাপকে ϕ ভাবা যেতে পারে। আলো বা অন্যান্য তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের জন্য মাধ্যমের কোন বিন্দুতে তড়িৎ ও চুম্বকক্ষেত্র পর্যায়ক্রমে পুনরাবৃত্ত হয়। বলা বাহুল্য এই ক্ষেত্রে ϕ হল কোন বিন্দুতে আলোক বা চুম্বকক্ষেত্রের মান। এই সমস্ত উদাহরণের জন্যই স্থান ও কালের সাপেক্ষে ϕ-এর মানকে নিচের সাধারণ সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায় :

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2\phi} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} \qquad \text{..............(3.9)}$$

এক্ষেত্রে v : সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের গতি।

দ্য ব্রয়ের প্রকল্প অনুসারে আমরা জানি প্রতিটি বস্তুর সঙ্গে এক ধরণের তরঙ্গ অঙ্গাঙ্গীভাবে সম্পর্কিত। বস্তুকণার ক্ষেত্রে এই বিশেষ তরঙ্গকে আমরা বস্তুতরঙ্গ বলি। কিন্তু পূর্ববর্তী অংশের আলোচনার পরিপ্রেক্ষিতে সুস্পষ্ট ধারণা গড়ে তোলার জন্য আমাদের কতকগুলি বিষয় জানা অত্যন্ত জরুরী। এই পরিপ্রেক্ষিতে বস্তুতরঙ্গের ক্ষেত্রে যে প্রশ্নগুলি সরাসরি ওঠে সেগুলি হল :

- বস্তুতরঙ্গের জন্য ϕ কে কীভাবে প্রকাশ করা যায়?
- বস্তুতরঙ্গের জন্য ϕ এর মান নির্ণায়ক সমীকরণটি কেমন?
- বস্তুতরঙ্গের ক্ষেত্রে কিসের মান পর্যায়ক্রমে পুনরাবৃত্ত হয়? আরও স্পষ্টভাবে বলতে হলে ϕ-এর ভৌত তাৎপর্য কি?

আলোচনার এই অংশে আমরা প্রথম প্রশ্নটির উত্তর পেতে চেষ্টা করব। পরবর্তী প্রশ্নদ্বয় এই এককের যথাক্রমে 3.7 এবং 3.9 অংশে আলোচিত হল।

প্রথমত, আলোচনার সুবিধার জন্য, এমনকি খুব সরলভাবে বিষয়টি বুঝে নিতে আমরা একমাত্রিক তরঙ্গের ক্ষেত্রে ϕ এর স্বরূপ কেমন হতে পারে সেটি বিচার করব। বিশ্লেষণের সূত্রে সাধারণ-ভাবে ত্রিমাত্রিক তরঙ্গের জন্য ϕ কে প্রকাশ করবো। তরঙ্গের ক্ষেত্রে সরলতম সুসমঞ্জস তরঙ্গগতিকে সাধারণত সরল সাইন (sine) বা কোসাইন (cosine) অপেক্ষকের সাহায্যে প্রকাশ করা হয়। একমাত্রিক সরল সমঞ্জস তরঙ্গগতির ক্ষেত্রে ϕ কে নিচের সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়,

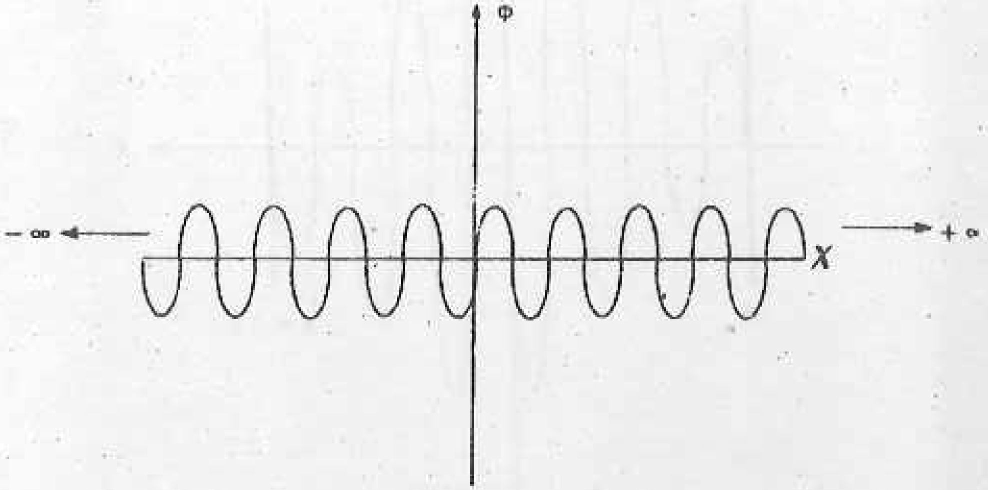
$$\phi = \text{Sin}\,(kx - \omega t) \qquad \text{...........(3.10)}$$

এক্ষেত্রে k : উক্ত তরঙ্গের তরঙ্গসংখ্যা ; তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হলে

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

w : উক্ত তরঙ্গের কৌণিক কম্পাঙ্ক ; তরঙ্গের কম্পাঙ্ক υ হলে $w = 2\pi\upsilon$

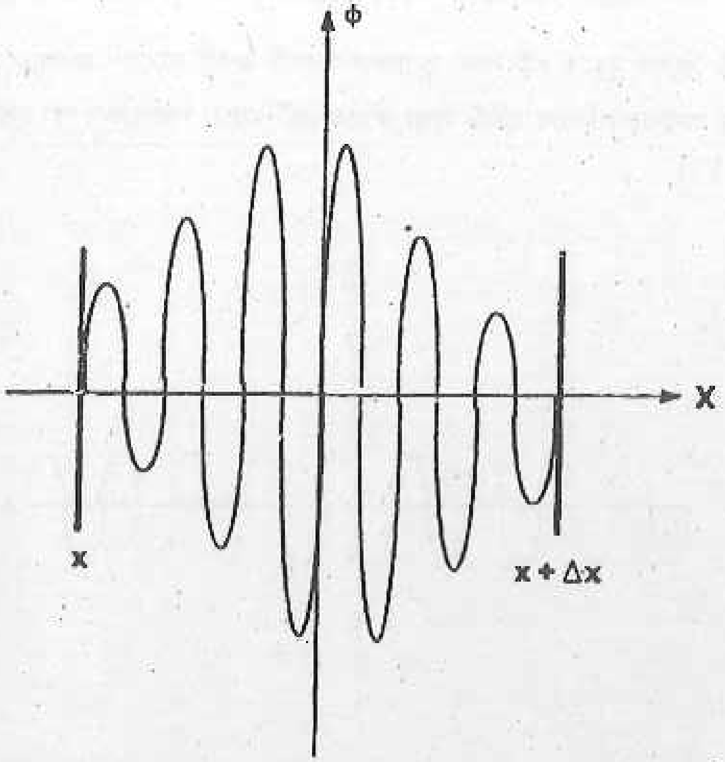
কোনো একটি বিশেষ মুহূর্তে এই সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গটি একটি মাত্রায় (এক্ষেত্রে x অক্ষ বরাবর) $-\alpha$ থেকে $+\alpha$ অবধি প্রসারিত। নিচের ছবিটি লক্ষ্য করলে এটি আরো পরিষ্কার হবে। (চিত্র 3.4) :



চিত্র—3.4 : একটি সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গ (সাইন বা কোসাইন অপেক্ষকের লেখচিত্র): $-\alpha$ থেকে $+\alpha$ অবধি বিস্তৃত

কিন্তু, একটি বস্তু তরঙ্গের ক্ষেত্রে তরঙ্গটি বস্তুর বাস্তব অবস্থানের কাছাকাছিই কেবল থাকা প্রয়োজন। অর্থাৎ বস্তুটির (কণা হিসাবে) বাস্তব অবস্থান ছাড়া অন্যান্য জায়গায় তরঙ্গটি না থাকাই বাঞ্ছনীয়—অর্থাৎ বাস্তব অবস্থান ব্যতীত অন্যত্র তরঙ্গ অপেক্ষকটির মান 0 হতে হবে। ধরা যাক, একটি নির্দিষ্ট মাত্রা x-এর সাপেক্ষে বস্তুটি x এবং $(x + \Delta x)$-এর মধ্যে অবস্থান করে। এক্ষেত্রে তরঙ্গ অপেক্ষকটি এমন হওয়া দরকার যেন x-এর মান x এবং $(x + \Delta x)$-এর মধ্যে অপেক্ষকটির মান 0 না হয়, আবার এই নির্দিষ্ট সীমার বাইরে x-এর অপরাপর মানের জন্য অপেক্ষকটি 0 হয়। সোজা ভাবে বলতে হলে x-এর মান x থেকে $(x + \Delta x)$ এই সুনির্দিষ্ট সীমার মধ্যেই কেবল তরঙ্গটি তথা তরঙ্গ অপেক্ষকটি অবস্থান করে এবং এই সীমার বাইরে x-এর অপরাপর মানের

জন্য অপেক্ষকটির অস্তিত্ব নাই। (চিত্র 3.5) এই আলোচনার ভিত্তিতে এটা স্পষ্ট যে, এমন বস্তু তরঙ্গ মাত্র একটি সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গ হতে পারে না। বস্তুত একাধিক সরল সুসমঞ্জস সাইন এবং কোসাইন (Sine and Cosine)



চিত্র–3.5 : x এবং x + Δx সীমার মধ্যে আবদ্ধ তরঙ্গ। বস্তুতরঙ্গের সম্ভাব্য রূপ হতে পারে।

তরঙ্গের উপযুক্ত সমন্বয়ের মাধ্যমেই এরকম একটি তরঙ্গ সৃষ্টি হতে পারে। একাধিক সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গের উপযুক্ত রৈখিক সমন্বয়ের সাহায্যে যে কোন একটি জটিল লব্ধ তরঙ্গ গঠন করার সুনির্দিষ্ট গাণিতিক সূত্র রয়েছে। সুতরাং বস্তুতরঙ্গের গঠন যত সূক্ষ্ম কিংবা জটিলই হোক না কেন, এটিকে একাধিক সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গের উপযুক্ত রৈখিক সমন্বয় হিসাবে প্রকাশ করা সম্ভব।

বাস্তবিক একটি একমাত্রিক জটিল তরঙ্গ [$\phi = \phi(x, t)$] একটি মাত্রার বিভিন্ন সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গের উপযুক্ত রৈখিক সমন্বয়ের সাহায্যে নিচের সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায় :

$$\phi(x, t) = a_1 \sin (k_1 x - \omega_1 t) + a_2 \text{Sin} (k_2 x - \omega_2 t) + \dots \dots + b_1 \text{Cos} (k_1' x - \omega_1' t) + b_2 \text{Cos} (k_2' x - \omega_1' t) + \dots \dots \qquad \dots\dots\dots(3.11)$$

এক্ষেত্রে a_i এবং b_i ($i = 1, 2, \ldots\ldots n$) রৈখিক সমন্বয়টির উপযুক্ত সহগ।

উপরের সমীকরণ (3.11) থেকে বোঝা যায় যে, যেহেতু তরঙ্গটির তরঙ্গসংখ্যা k-র কেবলমাত্র একটি সুনির্দিষ্ট মান সম্ভব নয়, ($\because k = 2\pi/\lambda$) সুতরাং বস্তু তরঙ্গটি একবর্ণ বিশিষ্ট (monochromatic) বা একক কম্পাঙ্ক তথা তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন হতে পারে না।

এক্ষেত্রে ধরা যাক, বস্তু তরঙ্গটির সংগঠক সরল সুসমঞ্জস তরঙ্গগুলির [$\phi(x, t)$] তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ এবং ($\lambda + \Delta\lambda$)–র মধ্যে থাকে। সুতরাং বলা যায় যে ঐ তরঙ্গগুলির জন্য তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয়ের ক্ষেত্রে অনিশ্চয়তার মাত্রা সর্বাধিক $\Delta\lambda$; যেহেতু বস্তুতরঙ্গের ক্ষেত্রে λ এবং বস্তুর ভরবেগ p পরস্পর সম্পর্কিত সুতরাং বস্তুটির ভরবেগের ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট অনিশ্চয়তার মান Δp, ধরা যেতে পারে। বস্তু তরঙ্গের ক্ষেত্রে যেহেতু λ এবং p ব্যস্তানুপাতী সুতরাং সাধারণ গণনা থেকে এটা সহজেই দেখানো যায় যে, বস্তুটির অবস্থান সম্পর্কিত অনিশ্চয়তা বা Δx এর মান যত কমানো হয় ততই সংগঠক তরঙ্গগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অনিশ্চয়তা $\Delta\lambda$ বিস্তৃত হতে থাকে। এর ফলে, ভরবেগের অনিশ্চয়তা Δp বাড়তে থাকে। আবার অন্য দিক থেকে দেখতে গেলে Δp-এর মান কমিয়ে তরঙ্গগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা $\Delta\lambda$ কমানো হলে বা λ কে যথাসম্ভব নিশ্চিতভাবে নির্ণয় করা যায়। কিন্তু এক্ষেত্রে Δx-এর মান অর্থাৎ যে সীমার [x এবং ($x + \Delta x$)] মধ্যে বস্তুটি অবস্থান করে, তা বিস্তৃত হতে থাকে—অর্থাৎ বস্তুটির অবস্থান সংক্রান্ত অনিশ্চয়তা বাড়তে থাকে। সুতরাং একই সঙ্গে কোন বস্তুকণার অবস্থান এবং ভরবেগ সুনিশ্চিতভাবে নির্ণয় করা অসম্ভব। বাস্তবিক, এটিই বিজ্ঞানী হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির মূল কথা।

3.4.2 বস্তু তরঙ্গের প্রকৃতি ও হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তাসূত্র

বিশিষ্ট জার্মান বিজ্ঞানী হাইসেনবার্গ (Werner Heisenberg) কোন সূক্ষ্মকণার ক্ষেত্রে একই সঙ্গে সঠিক অবস্থান ও ভরবেগ নির্ণয়ের এই মৌলিক অসুবিধা তথা সীমাবদ্ধতা সর্বপ্রথম অনুধাবন করেন। তিনি প্রমাণ করেন যে কোন সূক্ষ্ম কণার জন্য এককালীন অবস্থান ও ভরবেগ নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা যথাক্রমে Δx এবং Δp হলে

$$\Delta x.\ \Delta p \geq h \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.12)$$

সমীকরণ (3.12) হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির (uncertainty principle) গাণিতিক রূপ। এটি অনিশ্চয়তা সম্পর্ক (uncertainty relation) হিসাবে পরিচিত।

ধরা যাক, Δx দৈর্ঘ্যের মধ্যে n সংখ্যক তরঙ্গ বর্তমান। এক্ষেত্রে,

$$\Delta x = n\lambda \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.13)$$

এখানে λ গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য। অন্য একটি ক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্য $(\lambda + \Delta\lambda)$ হলে

$$\Delta x = (n - \Delta n)(\lambda + \Delta\lambda)$$

সুতরাং, $n\lambda + n\Delta\lambda - \lambda\Delta n - \Delta n\Delta\lambda = n\lambda$ সমন্বয়টির বিভিন্ন রাশির মানের তুলনায় $(\Delta n\Delta\lambda)$ কে উপেক্ষা করে পাই,

$$n\Delta\lambda - \lambda\Delta n = 0$$

$$n\Delta\lambda = \lambda\Delta n$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n}{n}$$

আলোচ্য বস্তুতরঙ্গের সমন্বয়ে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অনিশ্চয়তার জন্য Δx দৈর্ঘ্যের মধ্যে তরঙ্গসংখ্যা নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা Δn। এর মান $(\Delta n) = 1$ ধরলে আমরা পাই,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{n}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \therefore \Delta p = \frac{h}{\lambda^2}\Delta\lambda$$

$$\therefore = \frac{\Delta p}{p} = \left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right| = \frac{1}{n}$$

$$\therefore \Delta p = \frac{p}{n} \qquad \text{............(3.14)}$$

আবার, ∵ কণাটির অবস্থান তরঙ্গ সমন্বয়ের রৈখিক বিস্তার x এবং $x + \Delta x$- এর মধ্যে যে কোন স্থানে হতে পারে, সুতরাং এর অবস্থান নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা Δx। এক্ষেত্রে (3.13) এবং (3.14) সমীকরণ দুটির সমন্বয়ে পাই,

$$\Delta x\Delta p = (n\lambda)$$

$$= n\frac{h}{p}\cdot\frac{p}{n}$$

$$= h \qquad \text{............(3.15)}$$

শেষোক্ত সমীকরণটিকে একটি অসমীকরণ হিসাবে উল্লেখ করা উচিত। কেননা $\Delta n \geq 1$ $\therefore$ আমরা দেখি,

$$\Delta x \ \Delta p \geq h$$

বস্তুত, অনিশ্চয়তা নীতি অন্যভাবেও প্রকাশ করা যায়। কোন সময় t-তে একটি ভৌত তন্ত্রের শক্তি E হলে প্রমাণ করা যায় যে,

$$\Delta E \ \Delta t \geq h \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.16)$$

এখানে উল্লেখ করা যেতে পারে যে, অনিশ্চয়তা সূচক রাশিদ্বয়ের গুণফলের মানের কিছুটা অনির্দিষ্টতা আছে। এই অনির্দিষ্টতার মান অনিশ্চয়তার সংজ্ঞার উপর নির্ভরশীল। আলোচ্যক্ষেত্রে অনির্দিষ্টতার মাত্রা 10 গুণ ধরলে, পরিসংখ্যানবিজ্ঞানের প্রমাণ চ্যুতির (Standard deviation) সংজ্ঞার আদর্শে Δx, Δp প্রভৃতি অনিশ্চয়তা সূচক রাশির সঠিক গাণিতিক সংজ্ঞা হল

$$\Delta x . \ \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.17)$$

সুতরাং Δx এবং Δp-র লঘিষ্ঠ মান $\frac{h}{2\pi}$; সাধারণভাবে বলা যায় যদি i এবং j দুটি বিহিত অনুবন্ধী (Canonical conjugate) রাশি হয় যেমন ব্যাপক (generalised) স্থানাঙ্ক ও ভরবেগ, সেক্ষেত্রে

$$\Delta i . \ \Delta j \geq \frac{h}{2\pi} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.18)$$

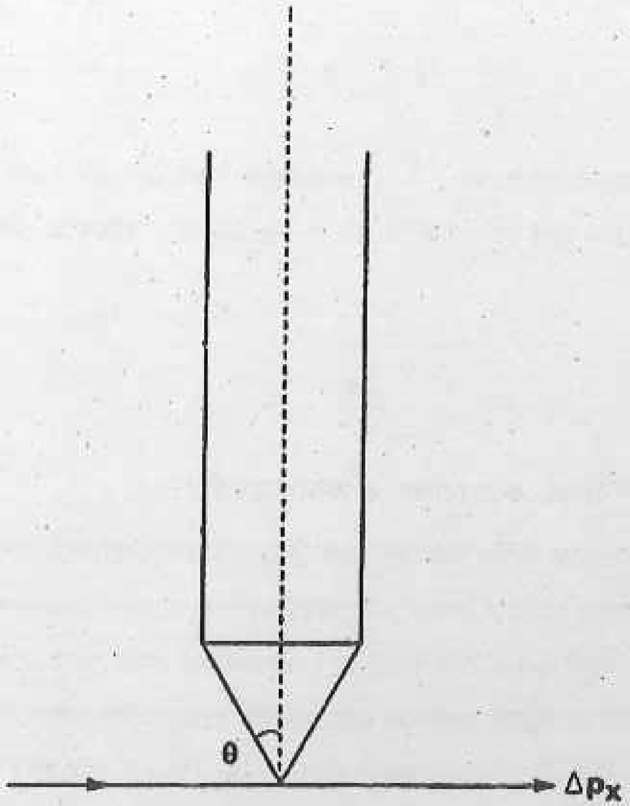
3.4.3 গামা রশ্মি অণুবীক্ষণ কল্পপরীক্ষা ও অনিশ্চয়তানীতি

হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির উদাহরণ স্বরূপ নীচের কাল্পনিক পরীক্ষাটি প্রস্তাব করেন নীলস বোর। ধরা যাক একটি অণুবীক্ষণের সাহায্যে ইলেকট্রনের অবস্থান নির্ণয় করার পরিকল্পনা করা হল। এজন্য একটি উচ্চ বিভেদন ক্ষমতাযুক্ত অণুবীক্ষণ ব্যবহার করতে হবে। উল্লেখ করা যেতে পারে যে দুটি বিন্দুর মধ্যে ন্যূনতম দূরত্ব Δx যদি এমন হয় যে বস্তু দুটিকে অণুবীক্ষণ দ্বারা নিরীক্ষণ করলে আলাদাভাবে চেনা যায় তবে ঐ ন্যূনতম দূরত্বের মাত্রা Δx কে অণুবীক্ষণটির বিভেদন ক্ষমতা (Resolving Power) বলা হয়। স্বভাবতই Δx যত ছোট অণুবীক্ষণটির বিভেদন ক্ষমতা তত বেশি।

ভৌত আলোকবিদ্যার সূত্র অনুসারে আমরা জানি

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

এখানে θ হল আলোকিত বস্তু এক্ষেত্রে ইলেকট্রন থেকে অণুবীক্ষণের অভিলম্ব লেন্সের মধ্যে প্রবিষ্ট আলোকরশ্মির শঙ্কুর অর্ধশীর্ষ কোণ, এবং λ ব্যবহৃত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য। বলাবাহুল্য ইলেকট্রনের অবস্থানের অনিশ্চয়তা কমপক্ষে Δx। এই অনিশ্চয়তার মান আরো কমাতে হলে Δx কমানো প্রয়োজন। সুতরাং λ কমানো উচিত। প্রকৃতিতে সবচেয়ে কম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ হচ্ছে গামা রশ্মি। সুতরাং গামা রশ্মির প্রয়োগে Δx নূন্যতম হবে। মনে রাখা দরকার যে কোন বাস্তব অণুবীক্ষণ দ্বারা গামা রশ্মি ব্যবহার করে কোন বস্তু নিরীক্ষণ করা অসম্ভব। কেননা কোন সাধারণ লেন্স দ্বারা গামা রশ্মির পথকে অভি নির্দিষ্ট (focus) করা যায় না। বাস্তবে না হলেও মনে করা যাক এরকম একটি পরীক্ষা করা সম্ভব। ইলেকট্রন দ্বারা গামা রশ্মি বিক্ষিপ্ত



চিত্র–3.6 : গামারশ্মি অণুবীক্ষণ

হয়ে অণুবীক্ষণের মধ্যে প্রবেশ করার ফলে Δx অনিশ্চয়তার মধ্যে এটির অবস্থান নির্ণয় করা যায়। আবার গামা রশ্মির বিক্ষেপের ফলে ইলেকট্রনটি প্রতিক্ষিপ্ত হয় যে কারণে সেটি কিছুটা ভরবেগ অর্জন করে। সূত্রানুসারে υ কম্পাঙ্ক সম্পন্ন গামা রশ্মির ভরবেগ হচ্ছে $p = \frac{h\upsilon}{c}$। যদি বিক্ষিপ্ত গামারশ্মির ভরবেগও p হয় তা হলে θ কোণে বিক্ষিপ্ত গামা রশ্মির ভরবেগের x উপাংশ হল $P_x = PSin\theta$। এই উপাংশের মান $0°$থেকে $PSin\theta$ সীমার মধ্যে হতে হবে। কারণ অণুবীক্ষণের মধ্যে প্রবেশ করতে হলে গামা রশ্মিটিকে $0°$ থেকে θ কোণের মধ্যে বিক্ষিপ্ত হতে হবে। এক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত গামা রশ্মির তথা প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের 'x' অক্ষ বরাবর ভরবেগের অনিশ্চয়তা হবে

$$\Delta p_x = pSin\theta = \frac{h}{\lambda} \times Sin\theta$$

আগে উল্লিখিত সমীকরণদুটিকে গুণ করে পাই

$$\Delta x \times \Delta p_x = \frac{\lambda}{Sin\theta} \times \frac{h}{\lambda} \times Sin\theta$$

$$= h$$

এটিই হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির গাণিতিক রূপ।

3.5 তরঙ্গ সমীকরণ : প্রাথমিক আলোচনা (Wave equation : preliminary discussion)

আমরা পূর্ববর্তী আলোচনায় দেখেছি যে আণবিক বা পারমাণবিক ক্ষেত্রে ধ্রুপদী বলবিদ্যার তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনের মতো কণার গতিবিধি সঠিকভাবে নির্ধারণ করা যায় না। নিউটনের গতি সংক্রান্ত সূত্রাবলী এরকম ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। সুতরাং এক্ষেত্রে বিষয়টি সঠিকভাবে অনুধাবন করতে হলে অন্য কোন নতুন গতীয় সূত্র তথা নতুন বলবিদ্যার প্রয়োজন। 'কোয়ান্টাম বলবিদ্যা' (Quantum Mechanics) আমাদের এ জাতীয় বিষয়গুলি বুঝতে সাহায্য করে।

বস্তুর তরঙ্গ-কণা দ্বৈত সত্তার কারণে আমরা জানি যে প্রত্যেক বস্তুকণার একটি তরঙ্গধর্ম আছে এবং এই বস্তুতরঙ্গকে আমরা একটি তরঙ্গ অপেক্ষকের সাহায্যে প্রকাশ করতে পারি। এই তরঙ্গ অপেক্ষকের প্রকৃতি কেমন হতে পারে তা আমরা আগের অংশে আলোচনা করেছি। আমরা এও জানি যে একটি ধ্রুপদী তরঙ্গের যথা শব্দ তরঙ্গের গতিবিধি নির্ধারিত হয় ধ্রুপদী তরঙ্গ সমীকরণ (সমীকরণ 3.9) দ্বারা। এই তরঙ্গ সমীকরণ হতে

সংশ্লিষ্ট তরঙ্গ অপেক্ষকটি স্থানাঙ্ক ও সময়ের সাথে কেমন আচরণ করে তা জানা যায়। আমরা বস্তুতরঙ্গের জন্য অনুরূপ একটি তরঙ্গ সমীকরণ নির্ণয় করতে চাই। এই সমীকরণ থেকে আমরা সংশ্লিষ্ট কোয়ান্টাম কণাটির গতীয় আচরণ নির্ধারণ করতে পারব। কারণ কোয়ান্টাম কণাটির গতিবিধি ও সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের গতিবিধি অভিন্ন। এই বস্তুতরঙ্গ সমীকরণটির আবিষ্কর্তা আরউইন শ্রোডিংগারের (Erwin Schrödinger) নাম অনুযায়ী একে শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ (Schrödinger wave equation) বলে। সনাতন বা নিউটনীয় বলবিদ্যায় নিউটনের সূত্রাবলীর যা ভূমিকা, কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণের ভূমিকা সমতুল। প্রসঙ্গ ত উল্লেখযোগ্য যে নিউটনের সূত্রাবলী যেমন অন্য কোন সূত্র হতে নির্ণায়িত নয়, তেমনি শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণও কোন তাত্ত্বিক উপায়ে নির্ণায়ন করা সম্ভব নয়। বস্তুত বিজ্ঞানের কোন মৌলিক সূত্র তথা সমীকরণ নির্ণায়ণ করা যায় না। সংশ্লিষ্ট সমীকরণটি মূলত প্রাকৃতিক ঘটনাটির গাণিতিক ব্যাখ্যা বা বিবরণ। আমরা আগের বিভিন্ন গবেষণালব্ধ জ্ঞান ও যুক্তির সাহায্যে উক্ত সমীকরণটি অনুমান করতে চেষ্টা করব। এ প্রচেষ্টার সাফল্য নির্ভর করবে এর থেকে পাওয়া সিদ্ধান্তগুলি বাস্তব অভিজ্ঞতা ও পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে কতখানি সুসঙ্গত তার উপর।

উপরের আলোচনা থেকে পরিষ্কারভাবে বোঝা যায় যে শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণটি অবস্থান স্থানাঙ্ক ও সময়ের পরিবর্তনের সাথে তরঙ্গ অপেক্ষক $\phi=\phi\ (x, y, z, t)$ কীভাবে পরিবর্তিত হবে তা নির্ধারণ করবে। অর্থাৎ ধ্রুপদী তরঙ্গ সমীকরণের মতো এই তরঙ্গ সমীকরণটিতেও স্থানাঙ্কের সাপেক্ষে Q এর অবকলের যেমন $\partial\phi/\partial x$ স্থানে সময়ের সাপেক্ষে Q এর অবকল $(\partial\phi/\partial t)$ সম্পর্কিত হবে। কোন একটি সময়ে Q জানা থাকলে এই সমীকরণের সাহায্যে পরবর্তী যে কোন সময় Q কি হবে তা জানা যাবে। এইজন্য এই সমীকরণটিকে বিশেষভাবে 'সময়নির্ভর শ্রোডিংগার সমীকরণ' (Time dependent Schrödinger equation) বলে। যদি কোন কোয়ান্টাম তন্ত্রের শক্তি নির্দিষ্ট হয় অর্থাৎ তন্ত্রের মোট শক্তি যদি সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকে, তাহলে Q কে একটি স্থান নির্ভর ও একটি সময়নির্ভর গুণকের গুণফল হিসাবে প্রকাশ করা যায়।

$$Q=Q\ (x, y, z, t) = \psi(x, y, z)\ T(t) \qquad \text{............(3.19)}$$

$\psi(x, y, z)$ হচ্ছে স্থান নির্ভর এবং $T(t)$ হচ্ছে সময় নির্ভর তরঙ্গ অপেক্ষক। এই সকলক্ষেত্রে সময় নির্ভর শ্রোডিংগার সমীকরণটির পরিবর্তে অধিক সরল 'সময় নিরপেক্ষ শ্রোডিংগার সমীকরণ' (Time independent Schrodinger equation) দ্বারা তন্ত্রটির আচরণ ও ধর্ম বর্ণনা করা যায় এবং তন্ত্রটি তরঙ্গ অপেক্ষকটিকে Q এর পরিবর্তে শুধুমাত্র স্থান নির্ভর তরঙ্গ অপেক্ষক $\psi(x, y, z)$ এর দ্বারা প্রকাশ করা যায়। বস্তুত এইক্ষেত্রে বস্তুতরঙ্গটি একটি স্থির তরঙ্গের (Stationary Wave) মতো আচরণ করে। আমাদের কোয়ান্টাম বলবিদ্যা চর্চার

অন্যতম কারণ রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন প্রকৃতি অনুধাবন। সাধারণভাবে বিচ্ছিন্ন অবস্থান অর্থাৎ বর্হিজগতের প্রভাব মুক্ত কোন একক পরমাণু বা অণুর শক্তি সময়-নিরপেক্ষ। সুতরাং রাসায়নিক বন্ধনীর আলোচনায় বা অনুরূপ ক্ষেত্রে আমরা সময় নিরপেক্ষ শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণটিই ব্যবহার করব। শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ বলতে এই আলোচনার পরবর্তী অংশে শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণটিতে উপনীতি হতে প্রয়োজনীয় ধ্রুপদী তরঙ্গ সমীকরণ আলোচনা করব।

আমরা জানি যে ধ্রুপদী তরঙ্গ সমীকরণটি হচ্ছে

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = 0 \qquad \text{............(3.20)}$$

যেখানে $\phi = \phi\ (x, y, z, t)$ হচ্ছে তরঙ্গ অপেক্ষক।

স্থির তরঙ্গের ক্ষেত্রে ϕ কে (3.19) সমীকরণের মতো স্থান নির্ভর ও সময়নির্ভর দুটি ভিন্ন উৎপাদকে বিশ্লিষ্ট করা যায়।

$$\phi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)\ T(t)$$

ϕ এর এই মান (3.20) তরঙ্গ সমীকরণটিতে বসিয়ে নিম্নের সময় নিরপেক্ষ সনাতন তরঙ্গ সমীকরটিতে উপনীত হওয়া যায়।

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{4\pi^2\psi}{\lambda^2} = 0. \qquad \text{............(3.21)}$$

যেখানে $\psi = \psi(x, y, z)$।

3.21 সমীকরণটিকে আমরা অন্যভাবে লিখতে পারি

$$\nabla^2\psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2}\psi = 0 \qquad \text{............(3.22)}$$

যেখানে $\nabla^2\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$

বা $\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

∇^2 (ডেল স্কোয়ার বা del square) কে ল্যাপলাসিয়ান সংকারক (Laplacian operator) বলা হয়। ∇^2'কে ন্যাবলা (Nabla), ∇, গ্রীক অক্ষরের দ্বারাও প্রকাশ করা হয়।

(3.21) বা (3.22) সমীকরণটি হচ্ছে সনাতন সময় নিরপেক্ষ তরঙ্গ সমীকরণ। এটি স্থিরতরঙ্গ অপেক্ষকের স্থান নির্ভরতা প্রকাশ করে।

3.6 শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ (Schrodinger wave equation)

আমরা পূর্বের আলোচনায় জেনেছি যে শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ অন্য কোন সমীকরণ বা সূত্র থেকে সরাসরি নির্ণায়ণ করা যায় না। এটি একটি মৌলিক সমীকরণ বা সূত্র যা কোন বস্তুতরঙ্গ তথা কোয়ান্টাম কণার ধর্ম নির্ধারণ করে। যেমন ধ্রুপদী বলবিদ্যার সঙ্গে তুলনা করে বলা যায়, যে নিউটনের সূত্র ধ্রপদী কণার গতিবিধি ব্যাখ্যা করে এবং এক্ষেত্রে নিউটনের সূত্রও নির্ণায়ন করা যায় না।

নিউটনের সূত্র বিভিন্ন পরীক্ষালব্ধ ফল দ্বারা সমর্থিত তথা পর্যবেক্ষণের সিদ্ধান্তের উপর প্রতিষ্ঠিত। শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণে প্রত্যক্ষভাবে কোন পরীক্ষালব্ধ ফলের দ্বারা প্রতিষ্ঠিত না হলেও সকলক্ষেত্রেই এই সমীকরণ থেকে গণনালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি নির্ভুলভাবে পরীক্ষালব্ধ ফলাফল দ্বারা সমর্থিত। তাই এর যথার্থতায় সন্দেহের অবকাশ নেই।

আমরা ধরে নিচ্ছি যে (3.22) তরঙ্গ সমীকরণটি স্থির বস্তু-তরঙ্গের ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য। তবে এক্ষেত্রে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য (λ) দ্যি ব্রয়ের সূত্র মেনে চলে এবং তরঙ্গ অপেক্ষক $\psi \equiv \psi(x, y, z)$ এর তাৎপর্য ধ্রুপদী তরঙ্গ অপেক্ষকের থেকে সম্পূর্ণ পৃথক। এক্ষেত্রে ψ এর প্রকৃত তাৎপর্য আমরা পরে আলোচনা করব।

মনে করি, কণাটির ভর m, ভরবেগ p এবং কণাটি $V \equiv (x, y, z)$ বিভবক্ষেত্রে অবস্থান করছে। কণাটির মোট শক্তি $E = \frac{p^2}{2m} + V$ ....(3.23)

সুতরাং $p^2 = 2m(E - V)$

দ্যব্রয়ের সূত্র থেকে পাই

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

বা $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{p^2}{h^2} = \frac{2m}{h^2}(E - V)$ ....(3.24)

এখন 3.24 সম্পর্কটি থেকে প্রাপ্ত $\frac{1}{\lambda^2}$ এর মান (3.22) সমীকরণে বসিয়ে পাই।

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\psi = 0$$

$$\text{বা } -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2\psi + V\psi = E\psi \qquad \text{..............(3.25)}$$

(3.25) সমীকরণটিই সময় নিরপেক্ষ শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ। এই সমীকরণটির একটি বহুল প্রচলিত প্রতীকি রূপ হল

$$H\psi = E\psi \qquad \text{..............(3.26)}$$

যেখানে,

$$H \equiv -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V$$

$$\equiv -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) + V \qquad \text{..............(3.27)}$$

H কে হ্যামিলটোনিয়ান সংকারক (Hamiltonian operator) বলা হয়।

3.7 কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় সংকারকের ভূমিকা (Role of operator in quantum mechanics)

কোন সংকারকের কোন অপেক্ষকের উপর ক্রিয়ার ফলে আমরা একটি নতুন অপেক্ষক পাই। অর্থাৎ কোন সংকারক দ্বারা কোন একটি অপেক্ষককে অন্য একটি অপেক্ষকে পরিবর্তিত করা যায়। যেমন অবকলন সংকারক '$\frac{d}{dx}$', x এর অপেক্ষক sinx এর উপর ক্রিয়া করে cosx অপেক্ষকটি উৎপন্ন করে।

$$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x$$

আমরা (3.26) সমীকরণটিতে দেখতে পাই যে শ্রোডিংগার সমীকরণটিতে ψ অপেক্ষকটির উপর H সংকারকটির ক্রিয়ার ফলে Eψ পাওয়া যায় ; যেখানে E হচ্ছে কণাটির মোট শক্তি। সংকারক সমীকরণের (Operator equation) এই বিশেষ রূপকে সংকারক-আইগেন মান (Operator-Eigen value) সমীকরণ বলে। এখানে হ্যামিলটোনিয়ান সংকারক H এর আইগেন মান হচ্ছে মোট শক্তি E, এবং ψ H এর

আইগেন অপেক্ষক। কোন সংকারকের আইগেন মান ও আইগেন অপেক্ষকের সংজ্ঞা পরবর্তী অংশে ব্যাখ্যা করা হল।

কোন সংকারকের কোন অপেক্ষকের উপর ক্রিয়ার ফলে যদি কোন ধ্রুবক (সংখ্যা) গুণিতক ঐ অপেক্ষকটি পাওয়া যায়, তবে ঐ অপেক্ষকটিকে সংকারকটির আইগেন অপেক্ষক এবং প্রাপ্ত সংখ্যাটিকে আইগেন মান বলে।

যেমন $\frac{d(e^{5x})}{dx} = 5e^{5x}$

এখানে e^{5x} অপেক্ষকটি $\frac{d}{dx}$ সংকারকের একটি আইগেন অপেক্ষক এবং সংশ্লিষ্ট আইগেন মান হল 5।

এখন (3.25) এবং (3.23) এর মধ্যে তুলনা করলে দেখা যায় যে $\frac{p^2}{2m}$ এবং $-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2$ সংকারকটি সমতুল্য অর্থাৎ p^2 এবং $-\frac{h^2}{4\pi^2}\nabla^2$

বা $-\hbar^2\nabla^2$ সমতুল্য। আবার

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 \qquad \text{..............(3.28)}$$

যেখানে p_x, p_y এবং p_z যথাক্রমে ভরবেগের x, y ও z অক্ষের উপাংশ অভিমুখী এবং

$$-\hbar^2\nabla^2 \equiv -\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \hbar^2\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \hbar^2\frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad \text{..............(3.29)}$$

(3.28) এবং (3.29) এর মধ্যে তুলনা করে পাই $p_x^2 \equiv -\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}$; $p_y^2 \equiv -\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ এবং $p_z^2 \equiv -\hbar^2\frac{\partial^2}{\partial z^2}$।

আবার, $p_x^2 = p_x \cdot p_x \equiv \left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)$

$$p_y^2 = p_y \cdot p_y \equiv \left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)\cdot\left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)$$

$$p_z^2 = p_z \cdot p_z \equiv \left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)\cdot\left(-i\hbar^2\frac{\partial}{\partial x}\right)$$

অর্থাৎ, $p_x \equiv -i\hbar \dfrac{\partial}{\partial x}$

$$p_y \equiv -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}$$

$$p_z \equiv -i\hbar \frac{\partial}{\partial z} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3.30)$$

সুতরাং আমরা মনে করতে পারি যে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় সনাতন ভরবেগের প্রতিটি উপাংশের সংশ্লিষ্ট এক একটি সংকারক বর্তমান।

আবার আমরা জানি যে মোট শক্তি E হচ্ছে গতীয় শক্তি (E_k) ও স্থিতি শক্তির (E_p) সমষ্টি।

$$E = E_k + E_p$$

$$\text{বা } E = \frac{p^2}{2m} + V = \frac{1}{2m}(px^2 + py^2 + pz^2) + V \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.31)$$

এখন (3.30) অনুযায়ী p এবং তিনটি উপাংশের সংশ্লিষ্ট তিনটি সংকারক থাকে, তবে (3.31) এ p_x, p_y এবং p_z কে সংশ্লিষ্ট সংবারক তিনটি দ্বারা প্রতিস্থাপিত করলে আমরা মোট শক্তি পাব। (3.31) সম্পর্কটির উভয় দিকে ψ গুণ করে পাই।

$$E\psi = \frac{1}{2m}(px^2 + py^2 + pz^2)\psi + v\psi \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.32)$$

(3.32) এ p_x, p_y এবং p_z এর সংশ্লিষ্ট সংকারক তিনটি বসিয়ে পাই,

$$E\psi = \frac{1}{2m}\left\{\left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + \left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial y}\right)^2 + \left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial z}\right)^2\right\}\psi + V\psi$$

$$\text{বা } E\psi = \frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) + V\psi \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.33)$$

কোন কোয়ান্টাম তত্ত্বের এটিই শ্রোডিংগার সমীকরণ, এ থেকে আমরা মোটশক্তি E নির্ণয় করতে পারি। সুতরাং কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় সনাতন ভরবেগের সংশ্লিষ্ট সংবারকের ব্যবহার শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণের সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ।

ধ্রুপদী প্রকৃতপক্ষে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় সকল ভৌতরাশির, যথা—অবস্থান, ভরবেগ, কৌণিক ভরবেগ ইত্যাদি, সংশ্লিষ্ট একটি করে সংকারক আছে। এই সংকারকগুলি ব্যবহার করে আমরা সংশ্লিষ্ট ভৌতরাশিগুলির মান নির্ণয় করতে পারি। এই প্রসঙ্গে আরো আলোচনা আমাদের বর্তমান পাঠক্রমের অন্তর্গত নয়।

3.8 তরঙ্গ অপেক্ষকের ভৌত ব্যাখ্যা (Physical interpretation of wave function)

কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় কোন কণার যাবতীয় ধর্মাবলী কণাটির তরঙ্গ অপেক্ষক থেকে জানা যায়। এই তরঙ্গ অপেক্ষকটি আমরা শ্রোডিংগার সমীকরণ সমাধান করে পাই। কিন্তু এই তরঙ্গ অপেক্ষকটি সর্বদা একটি কাল্পনিক রাশি হয়। অর্থাৎ ψ এর ব্যঞ্জকের মধ্যে $i\ (= \sqrt{-1})$ বর্তমান থাকে। সুতরাং তরঙ্গ অপেক্ষকটির দ্বারা কোন ভৌতরাশি প্রকাশিত হয় না। কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় 'বস্তুত তরঙ্গ অপেক্ষকটি কণাটির দশা (State) নির্দিষ্ট করে। তরঙ্গ অপেক্ষকটি ψ কাল্পনিক রাশি হলেও $|\psi|^2$ = একটি বাস্তব রাশি।

লক্ষণীয়, $|\psi|^2 = \psi^*\psi$

যেখানে ψ^* হচ্ছে ψ এর সংমিশ্রযুগ্ম (Complex conjugate)।

ম্যাক্স বর্ণ (Max Born) $|\psi|^2 = |\psi(x, y, z)|^2$ কে (x, y, z) বিন্দুতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতার (Probability) সঙ্গে তুলনা করেন। এই ব্যাখ্যা কোয়ান্টাম বলবিদ্যার অন্য সকল ধারণার সাথে সম্পূর্ণ সঙ্গতিপূর্ণ এবং অন্য কোন ব্যাখ্যা গ্রহণযোগ্য নয়।

3.9 সদাচারী তরঙ্গ অপেক্ষকের ধর্মাবলী (Well behaved wave function)

কোন তন্ত্রের জন্য শ্রোডিংগার সমীকরণ সমাধান করে আমরা যে তরঙ্গ অপেক্ষকটি পাই তা তন্ত্রটি বা কণাটির অবস্থা (State) নির্দিষ্ট করে এবং এর চরম বর্গ (absolute square) কোন স্থানে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। শ্রোডিংগার সমীকরণ সমাধান করে পাওয়া কোন তরঙ্গ অপেক্ষককে এই ব্যাখ্যার সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ হতে হলে কয়েকটি শর্তপূরণ আবশ্যিক। এই শর্তাবলী নিচে বর্ণনা করা হল। কোন তরঙ্গ অপেক্ষক এইসব শর্ত পূরণ করলে তাকে 'সদাচারী তরঙ্গ' অপেক্ষক' (Well behaved wave function) বলা হয়।

(a) $\psi \equiv \psi$ (x, y, z) এবং $\frac{\partial \psi}{\partial x}$, $\frac{\partial \psi}{\partial y}$, $\frac{\partial \psi}{\partial z}$ কে x, y ও z এর সবমানের জন্য নিরবিচ্ছিন্ন (Continuous) হতে হবে। কারণ অন্যথায় শ্রোডিংগার সমীকরণটি সমাধানযোগ্য হবে না।

(b) ψ কে সর্বদা একমান বিশিষ্ট (single valued) এবং সসীম (finite) হতে হবে।

কারণ কোণ বিন্দুতে ψ এর একাধিক মান থাকার অর্থ ঐ বিন্দুতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা একাধিক। এটি অবাস্তব। আবার ψ এর মান কোন স্থানে অসীম হওয়ার অর্থ ঐ স্থানে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতাও অসীম হওয়া। এটিও সম্ভব নয়।

(c) ψ এর মান অসীম দূরত্বে ($+\alpha$ বা $-\alpha$ তে) শূণ্য হতে হবে।

কারণ কণাটি অসীমে অবস্থান করতে পারে না।

(d) $\int_{-\alpha}^{+\alpha}\int_{-\alpha}^{+\alpha}\int_{-\alpha}^{+\alpha} |\psi(x, y, z)|^2 \, dxdydz = 1$ হতে হবে।

এই সমাকলণটিকে আমরা অন্যভাবেও প্রকাশ করে থাকি। যথা—

$$\int_{\tau} |\psi|^2 d_{\tau} = 1 \qquad \text{............(3.34)}$$

এখানে $\int_{\tau} \equiv \int_{-\alpha}^{+\alpha}\int_{-\alpha}^{+\alpha}\int_{-\alpha}^{+\alpha}$ অর্থাৎ সমাকলণটি সমগ্র স্থানাঙ্ক-দেশ (Coordinate space) ব্যাপী এবং $d_{\tau} \equiv dxdydz$ হচ্ছে আয়তন ক্ষুদ্রাংশ (Volume element)। আমরা জানি যে $|\psi(x, y, z)|^2$ (x, y, z) বিন্দুতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। এর জন্য $|\psi|^2$ কে 'সম্ভাব্যতা ঘনত্ব' (Probability density) বলা হয়। $|\psi|^2 d_{\tau}$ হচ্ছে d_{τ} আয়তন ক্ষুদ্রাংশের মধ্যে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা। কলণ বিদ্যায় $\int_{\tau} |\psi|^2 d_{\tau}$ সমাকলণের অর্থ হল সমগ্র স্থান ব্যাপী অর্থাৎ সকল আয়তন ক্ষুদ্রাংশের প্রতিটিতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতাসমূহের সমষ্টিকরণ। সাধারণত সাংখ্যবিজ্ঞানে (Statistics) কোন ঘটনা (Event) ঘটার মোট সম্ভাব্যতাকে 1(একক) ধরে সম্ভাব্যতার সংজ্ঞা সাম্প্রতিক নির্ধারণ করে থাকি। যেহেতু $|\psi|^2$ কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে, অতএব $|\psi|^2$ কে সম্ভাব্যতার এই সংজ্ঞার সাথে সুসঙ্গতিপূর্ণ হতে হলে সমগ্র স্থানাঙ্ক

দেশের মধ্যে কণাটির অবস্থানের মোট সম্ভাব্যতা অর্থাৎ $\int_{\tau} |\psi|^2 d_{\tau} = 1$ হতে হবে। (3.34)

শর্তটিকে ψ এর পরিমিতকরণ শর্ত (Normalisation condition) বলা হয়।

এখন যদি কোন অপেক্ষক ψ এর জন্য $\int_{\tau} |\psi|^2 d_{\tau} = N$ হয়, যেখানে N একটি সসীম সংখ্যা (শূণ্য ব্যতীত), তাহলে $\int_{\tau} |\psi_N|^2 d_{\tau} = 1$ হবে। যেখানে $\psi_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \psi^*$ । ইহাকে φ এর 'পরিমিতকরণ' (normalisation) বলা হয়। যদি কোন তরঙ্গ অপেক্ষক পরিমিত অপেক্ষক নাও হয়, সেক্ষেত্রেও আমরা ψ কে এইভাবে পরিমিত অপেক্ষক ψ_N এ রূপান্তরিত করে নিতে পারি। যদি কোন অপেক্ষক পরিমিতকরণযোগ্য না হয়, তাহলে ঐ অপেক্ষকটি একটি গ্রহণযোগ্য সদাচারী তরঙ্গ অপেক্ষক হতে পারে না। (a) – (d) এই চারটি শর্ত পূরণ কোন তরঙ্গ অপেক্ষকের সদাচারী হওয়ার জন্য আবশ্যিক।

3.10 কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় ব্যবহৃত সংকারকগুলির কিছু গুরুত্বপূর্ণ ধর্মাবলী (Some important characteristics of operators used in quantum mechanics)

কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় ব্যবহৃত সংকারকগুলি সাধারণত 'রৈখিক সংকারক' (Linear operator) হয়।

(a) $\hat{A}$ যদি একটি রৈখিক সংকারক হয় তবে $\hat{A}$ এবং একটি ধ্রুবক (সংখ্যা) 'ক্রমবিনিময়' (commutative) হয়। যদি f(x) x এর একটি অপেক্ষক হয়, তাহলে

$$\hat{A}\{cf(x)\} = c\{\hat{A} f(x)\} \qquad \text{............(3.35)}$$

যেমন, $\frac{d}{dx}$ একটি রৈখিক সংকারক

$$\frac{d}{dx}\{cf(x)\} = c\frac{df(x)}{dx}$$

(b) রৈখিক সংকারকগুলি বিচ্ছেদ নিয়ম (distributive law) মেনে চলে। যদি $f_1(x)$ এবং $f_2(x)$ দুটি অপেক্ষক হয়, তাহলে ধ্রুবক (সংখ্যা) 'ক্রমবিনিময়' (commutative) হয়। যদি $f_1(x)$ এবং $f_2(x)$ দুটি অপেক্ষক হয়, তাহলে

$$\hat{A}\{f_1(x) + f_2(x)\} = \hat{A}f_1(x) + \hat{A}f_2(x) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.36)$$

যেমন, $\frac{d}{dx}\{f_1(x) + f_2(x)\} = \frac{df_1(x)}{dx} + \frac{df_2(x)}{dx}$

গুণক শ্রেণীর (multiplicative operator) সংকারকসমূহ, যথা x, x^2, e^x ইত্যাদি এবং অবকল সংকারকসমূহ, যথা $\frac{d}{dx}$, $\frac{d^2}{dx^2}$ ইত্যাদি রৈখিক সংকারক। গুণকশ্রেণীর সংকারকগুলি যখন কোন অপেক্ষকের উপর সংকরণ করে তখন যে নতুন সংকারক পাওয়া যায়, তা সংকারক ও অপেক্ষকের গুণফলের সমান।

যথা $\hat{x}\, f(x) = xf(x)$

'অবস্থান সংকারক' (Position operator) একটি গুণক শ্রেণীর সংকারক। তরঙ্গ অপেক্ষকটি যে স্থানাঙ্কের অপেক্ষক সংকারকগুলি কেবলমাত্র সেই স্থানাঙ্কের অপেক্ষক হলে, তারা গুণক শ্রেণীর সংকারক।

কোন একটি সংকারকের বর্গ বলতে, সেই সংকারকটির পরপর দুবার সংকরণ বোঝায়। যেমন, $\hat{A}^2f(x) \equiv \hat{A}\{\hat{A}f(x)\}$

যদি $f(x) = e^{5x}$ হয় এবং $\hat{A} = \frac{d}{dx}$ হয়, তবে

$$\hat{A}^2f(x) = \frac{d}{dx}\left\{\frac{d}{dx}f(x)\right\} = \frac{d}{dx}\left\{\frac{de^{5x}}{dx}\right\}$$

$$= \frac{d(5e^{5x})}{dx}$$

$$= 25e^{5x}$$

এবার আমরা সংকারকের একটি খুব গুরুত্বপূর্ণ ধর্ম আলোচনা করব, কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় যার তাৎপর্য অত্যন্ত গভীর।

যদি $\hat{A}$ ও $\hat{B}$ দুটি রৈখিক সংকারক হয়, তাহলে তাদের গুণফল ক্রম বিনিময় হতেও পারে, আবার নাও হতে পারে।

$$\hat{A}.\hat{B}\, f(x) \neq \hat{B}.\hat{A}\, f(x) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.37)$$

অর্থাৎ দুটি সংকারকের ক্রমিক সংকরণের ফল তাদের সংকরণের ক্রমের উপর নির্ভর করে। (3.37) সমীকরণটিকে পুর্ণবিন্যস্ত করে লিখতে পারি।

$$\hat{A}.\hat{B}f(x) - \hat{B}.\hat{A}f(x) \neq 0$$

$$\text{বা } (\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})f(x) \neq 0$$

$(\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})$ কে $[\hat{A}, \hat{B}]$ প্রতীকের দ্বারা প্রকাশ করা হয়। $[\hat{A}, \hat{B}]$ কে $\hat{A}$ ও $\hat{B}$ সংকারকদুটির ক্রমবিনিময়ক (Commutator) বলে।

$$\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} \equiv [\hat{A}, \hat{B}] \qquad ....(3.38)$$

সাধারণভাবে $[\hat{A}, \hat{B}] \neq 0$ । যদি $\hat{A}$ ও $\hat{B}$ ক্রমবিনিমেয় হয়, তাহলে $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$।

উদাহরণস্বরূপ বলা যেতে পারে, $\hat{A} = \frac{d}{dx}$ এবং $\hat{B} = x$ হলে, $\hat{A}$ ও $\hat{B}$ ক্রমবিনিমেয় হয় না।

$$\hat{A}\hat{B}\,f(x) = \frac{d}{dx}\{xf(x)\} = f(x) + x\frac{df(x)}{dx}$$

আবার $$\hat{B}\hat{A}\,f(x) = x\frac{d}{dx}\{f(x)\} = x\left\{\frac{df(x)}{dx}\right\} = x.\frac{df(x)}{dx}$$

অতএব এক্ষেত্রে $$[\hat{A}, \hat{B}]f(x) \equiv \{\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}f(x)\}$$

$$= f(x) + x\frac{df(x)}{dx} - x\frac{df(x)}{dx}$$

$$= f(x)$$

এক্ষেত্রে এই সম্পর্কটিকে আমরা প্রতীকের মাধ্যমে নিম্নলিখিতভাবে প্রকাশ করব।

$$[\hat{A}, \hat{B}] = 1$$

এখানে f(x) কে উহ্য রাখা হলেও সংকারকগুলির কেবল কোন অপেক্ষকের উপরই সংকরণ ক্রিয়া সম্ভব। ধরে নিতে হবে যে $[\hat{A}, \hat{B}]$ র পরে এবং সমান চিহ্নের ডানদিকে সংকারকটি উহ্য আছে।

এখানে দেখা গেল যে $\hat{x}$ ও $\frac{d}{dx}$ সংকারক দুটি ক্রমবিনিমেয় নয়। আমরা পূর্বের আলোচনায় দেখেছি যে x স্থানাঙ্কের অবস্থান সংকারকটি হল $\hat{x}$ এবং ভরবেগের x উপাংশের সংকারকটি একটি অবকল সংকারক, $\hat{p}_x = i\hbar\frac{d}{dx}$। সুতরাং $\hat{x}$ ও $\hat{p}_x$ ক্রমবিনিমেয় নয়। ইহা হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্রের সাথে সম্পর্কিত। আমরা এ ব্যাপারে এখানে বিশদ আলোচনা করব না। তবে জেনে রাখা ভাল যে কোন দুটি ভৌত রাশির

সংশ্লিষ্ট সংকারকদুটি পরস্পরের সাথে ক্রমবিনিময় না হলে, ঐ ভৌত রাশিগুলিকে একই সাথে সম্পূর্ণ নির্ভূলভাবে পরিমাপ করা যায় না। যেমন, কোন কণার x স্থানাঙ্ক এবং ভরবেগের x উপাংশ একই সাথে নির্ভূলভাবে পরিমাপ করা যায় না।

3.11 একমাত্রীয় কোয়ান্টাম নির্বাধ কণা (One dimensional quantum mechanical free particle) :

আমরা এখন একটি একমাত্রিক মুক্ত বা নির্বাধ কণার (Free particle) ক্ষেত্রে শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণটির প্রয়োগ তথা সমাধান করব।

ধরা যাক কণাটি x অক্ষ বরাবর গতিশীল। যেহেতু কণাটি নির্বাধ, সুতরাং x এর যে কোন মানের জন্য $V = V(x) = 0$ ।এক্ষেত্রে শ্রোডিংগার সমীকরণটির রূপ হবে

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = E\psi \qquad \text{...............(3.39)}$$

$\psi = \psi(x)$ হচ্ছে কণাটির তরঙ্গ অপেক্ষক। কণাটির ভর m এবং মোট শক্তি E।

(3.39) সমীকরণটির পদগুলির পুণর্বিন্যাস করে পাই,

$$\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + E\psi = 0 \qquad \text{...............(3.40)}$$

(3.40) সমীকরণটির দুটি সমাধান সম্ভব। যথা,

$$\psi_1 = Ae^{i\sqrt{2mEx/\hbar}} \qquad \text{...............3.41(a)}$$

$$\text{এবং } \psi_2 = Be^{-i\sqrt{2mEx/\hbar}}$$

যেখানে A এবং B দুটি ধ্রুবক।

ψ_1 এবং ψ_2 দুটি অপজাত (Degenerate) অপেক্ষক। দুই বা ততোধিক আইগেন অপেক্ষকের সংশ্লিষ্ট আইগেন মানগুলি যদি সমান হয়, তবে ঐ অপেক্ষকসমূহকে অপজাত অপেক্ষক বলা হয়।

এখন ψ_1 এর উপরে ভরবেগ সংকারক $\hat{p}_x$ এর ক্রিয়ার ফলে পাই

$$\hat{p}_x \psi_1 = -i\hbar \frac{d\psi_1}{dx}$$

$$= -i\hbar\left(i\sqrt{2mE/\hbar}\right)\psi_1$$

$$= \sqrt{2mE}\,\psi_1$$

সুতরাং ψ_1, $\hat{p}_x$ এর একটি আইগেন অপেক্ষক এবং সংশ্লিষ্ট আইগেন মানটি হল $\sqrt{2mE}$ ।

(সাধারণ কোন সংকারক বোঝাতে আমরা '^' চিহ্নটি ব্যবহার করি।)

অনুরূপভাবে,

$$\hat{p}_x \psi_2 = -\sqrt{2mE}\,\psi_2$$

আবার কণাটি নির্বাধ বলে সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী কণাটির মোটশক্তি হচ্ছে উহার গতীয় শক্তি। অর্থাৎ

$$E = \frac{p_x^2}{2m}$$

যেখানে p_x উহার ভরবেগ। সুতরাং সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী p_x এর মান $p_x = \pm\sqrt{2mE}$ । p_x ধনাত্মক মান দ্বারা $+x$ দিকে সঞ্চারণশীল একটি কণা এবং p_x এর ঋণাত্মক মান $-x$ দিকে সঞ্চারণশীল কণা নির্দেশ করে। সুতরাং ψ_1 কণাটির $+x$ দিকে সঞ্চারণ অবস্থা এবং ψ_2 কণাটির $-x$ দিকে সঞ্চারণ অবস্থা নির্দেশ করে।

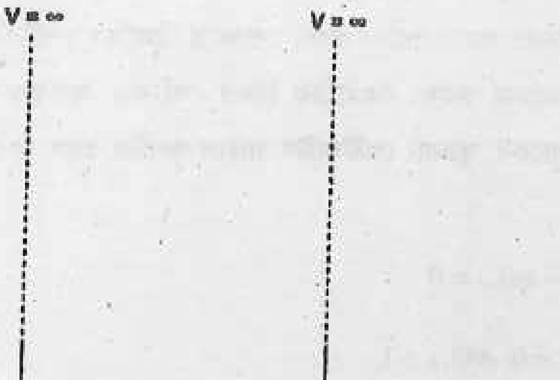
এহেন কণার ক্ষেত্রে মোট শক্তি এবং ভরবেগের যেকোন মান হতে পারে। সুতরাং কোন নির্বাধ কণার শক্তির আইগেন মান নিরবিচ্ছিন্ন অর্থাৎ কোয়ান্টায়িত নয়। কোন আবদ্ধতন্ত্রে বা কণার (Bound system বা Bound particle) ক্ষেত্রেই শক্তির কোয়ান্টায়ন দেখা যায়।

ψ_1 অবস্থায় কণাটির সম্ভাব্যতা ঘনত্ব $\psi_1\psi = |A|^2$ অর্থাৎ ধ্রুবক। সুতরাং সম্ভাব্যতা ঘনত্বের মান x নিরপেক্ষ অর্থাৎ যে কোন স্থানেই কণাটির অবস্থানের সম্ভাবনা সমান। সুতরাং কণাটির ভরবেগের একটি সুনির্দিষ্ট মান থাকলেও, কণাটির অবস্থান সম্পূর্ণ অনিশ্চিত। ইহা হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা সূত্রের সাথে সঙ্গতিপূর্ণ। অনুরূপভাবে ψ_2 অবস্থায় কণাটির সম্ভাব্যতা ঘনত্ব $|B|^2$ অর্থাৎ ধ্রুবক।

প্রসঙ্গত উল্লেখযোগ্য যে ψ_1 এবং ψ_2 নিরবিচ্ছিন্ন, সসীম অপেক্ষক হলেও (3.34) শর্তানুযায়ী এদের সরাসরি পরিমিতকরণ সম্ভব নয়। ψ_1 বা ψ_2 এর ন্যায় অপেক্ষকের পরিমিতকরণের জন্য বিশেষ পদ্ধতি অবলম্বন করা হয়। এটি আমাদের বর্তমান আলোচনা বহির্ভূত।

3.12 একমাত্রিক পেটিকা বিভব (One dimensional potential box) :

বেশির ভাগ ক্ষেত্রেই শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ সমাধানের গাণিতিক পদ্ধতি বেশ জটিল। এই সকল ক্ষেত্রে (যথা : হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে) আমরা শ্রোডিংগার সমীকরণের সমাধান লব্ধ ফল জেনে নিয়ে আমাদের প্রয়োজনে ব্যবহার করব। কেবল বর্তমানে আলোচ্য একমাত্রিক পেটিকা বিভবে অবস্থিত কণার ন্যায় কিছু তন্ত্রের ক্ষেত্রে শ্রোডিংগার সমীকরণের সমাধান পদ্ধতি গাণিতিকভাবে সহজ। এই সমাধান পদ্ধতি থেকে এবং সমাধান লব্ধ ফল বিশ্লেষণ করে আমরা কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাধারণ বৈশিষ্ট্যগুলি সম্বন্ধে অবহিত হতে পারব এবং সনাতন তন্ত্রের সঙ্গে কোয়ান্টাম তন্ত্রের প্রধান পার্থক্যগুলি বুঝতে পারব।



(চিত্র : 3.7) একমাত্রিক বিভব পেটিকা

ধরা যাক m ভর বিশিষ্ট একটি কণার গতি x-অক্ষ বরাবর O স্থানাঙ্ক হতে L স্থানাঙ্কের মধ্যে সীমাবদ্ধ। $x = 0$ থেকে $x = L$ এর মধ্যে বিভব V এর মান শূণ্য এবং $x < 0$ এবং $x > L$ হলে $V = \infty$। সুতরাং $x = 0$ থেকে $x = L$ সীমার মধ্যে কণাটির গতি অবাধ কণাটির উপর কোন বল কাজ করে না। কিন্তু এই সীমার বাইরে বার হতে হলে কণাটি অসীম পরিমাণ কাজ করতে হবে। ইহা একটি সীমিত শক্তি বিশিষ্ট কণার পক্ষে সম্ভব নয়। এইরূপ তন্ত্রের ক্ষেত্রে আমরা মনে করতে পারি যে m ভরের একটি কণা যেন দুর্লঙ্ঘ প্রাচীর বিশিষ্ট একটি এক মাত্রিক পেটিকার মধ্যে আবদ্ধ। এরূপ তন্ত্রকে "একমাত্রিক বিভব পেটিকায় অবস্থিত কণা" তন্ত্র বলা হয়। এই পেটিকার মধ্যে কণাটির শক্তি ধ্রুবক।

বিউটাডাইনের ন্যায় সাংযুগ্মিত অণুর π–ইলেকট্রনের জন্য আমরা এইরূপ একটি প্রতিরূপ কল্পনা করতে পারি। এই ধরণের অণুর π–ইলেকট্রনের জন্য আমরা এইরূপ একটি প্রতিরূপ কল্পনা করতে পারি। এইধরণের অণুর π ইলেকট্রনগুলি পুরো কার্বন শৃঙ্খল বরাবর গতিশীল হওয়ায় আমরা ধরে নিতে পারি যে ইলেকট্রনগুলি বিটাডাইনের কার্বন শৃঙ্খলের মোট দৈর্ঘ্যের সমান দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট একটি একমাত্রিক পেটিকার মধ্যে আবদ্ধ। এর সাহায্যে আমরা একটি π–ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলি নির্ণয় করতে পারি। এছাড়া কোন বদ্ধ পাত্রে অবাধে বিচরণরত পরমাণু বা অণুর, যথা আদর্শ গ্যাসের অণুর ক্ষেত্রে উহাদের চলন শক্তি **(Translational energy)** নির্ণয় করতে পারি। অবশ্য সেক্ষেত্রে ত্রিমাত্রিক পেটিকার কথা বিবেচনা করতে হবে। এটি আমরা পরে আলোচনা করব। একমাত্রিক বিভব পেটিকায় অবস্থিত কণাটি যেহেতু কখনই পেটিকাটির বাহিরে আসতে পারেনা, সুতরাং পেটিকাটির বাহিরে কণাটির তরঙ্গ অপেক্ষকের মান শূণ্য হবে। অতএব

$$\psi(0) = \psi(L) = 0 \qquad \text{............(3.42)}$$

এবং $\psi(x) = 0$ যখন $x < 0$ এবং $x > L$

এইরকম একটি তন্ত্রের ক্ষেত্রে সময় নিরপেক্ষ তরঙ্গ সমীকরণটি হবে

$$\frac{-\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) = E\psi(x) \qquad \text{............(3.43)}$$

যেখানে হ্যামিলটোনিয়ান সংকারক হল

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} \qquad \text{............(3.44)}$$

এবং E কণাটির মোট শক্তি।

(3.43) সমীকরণটির পুণর্বিন্যাস করে পাই

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + k^2\psi(x) = 0 \qquad \text{.......... .(3.45)}$$

যেখানে $K = \frac{\sqrt{2me}}{h}$

(3.45) সমীকরণটির সমাধান হল

$$\psi(x) = A\mathrm{Sin}kx + B\cos kx$$

সীমাল শর্ত (3.42) হতে পাই

x = 0 হলে $\psi(x) = 0$; সুতরাং B = 0।

অতএব $\psi(x) = A \sin kx$ ....(3.46)

আবার x = L বিন্দুতে $\psi(x) = 0$

$$\therefore \psi(L) = 0 = A \sin kL$$

অর্থাৎ, $\mathrm{Sin}kL = \mathrm{Sin}\, n\pi$; n = 1, 2, 3 ....(3.47)

(এখানে n = 0 সমাধানটি গ্রহণযোগ্য নয়। কারণ সেক্ষেত্রে $\psi(x)$ এর মান সর্বত্র শূণ্য হবে।)

(3.47) সমীকরণ হতে পাই

$$kL = n\pi \qquad \text{...........(3.48)}$$

$$\text{বা, } E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2} \qquad \text{...........(3.49)}$$

$(\because k = \frac{\sqrt{2mE}}{h}$; 'n' চিহ্নটি n শক্তিস্তর বোঝায়)

(3.46) সমীকরণে (3.48) হতে k-এর মান বসিয়ে পাই

$$\psi_n(x) = A\ \mathrm{Sin}\frac{n\pi x}{L} \qquad \text{...........(3.50)}$$

A-র মান $\psi_n(x)$ এর পরিমিত করণ শর্ত হতে নির্ণয় করতে হবে।

$$\int_{?}^{\alpha} |\psi_n(x)|^2 dx = \int_0^L |\psi_n(x)|^2 dx$$

$(\because x < 0$ বা $x > L$ হলে $\psi(x) = 0)$

$$\int_{?}^{L} |\psi_n(x)|^2 dx = \int_0^L |A|^2 \mathrm{Sin}^2 \frac{n\pi x}{L} dx$$

$$= |A|^2 \int_0^L \frac{1}{2}\left(1 - \mathrm{Cos}\frac{2n\pi x}{L}\right) dx$$

$$= |A|^2 . \frac{L}{2}$$

পরিমিত করনের শর্তানুযায়ী

$$\int_0^L |\psi_n(x)|^2 dx = |A|^2 . \frac{L}{2} = 1$$

অর্থাৎ, $A = \sqrt{\frac{2}{L}}$

সুতরাং পরিমিত তরঙ্গ অপেক্ষকটি হবে

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \mathrm{Sin} \frac{n\pi x}{L} \qquad \text{.............(3.51)}$$

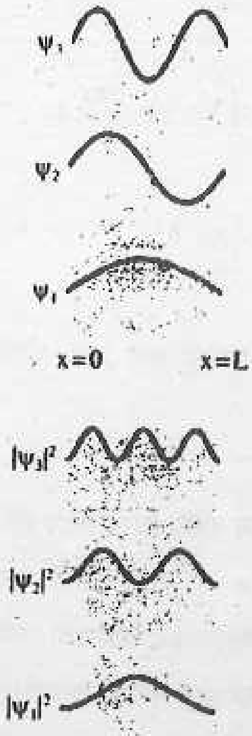
যেখানে $n = 1, 2, 3$ ....

n এর ভিন্ন মানের জন্য ψ_n গুলি পরস্পরের সহিত সমকোণী হয়। অর্থাৎ $m \neq n$ হলে

$$\int_0^L \psi_m(x)\varphi_n(x)\, dx = 0 \qquad \text{............(3.52)}$$

(3.51) সম্পর্কটির প্রমাণ আপনারা নিজে অনুশীলনের জন্য করে দেখতে পারেন। এখানে $\psi(x)$ বাস্তব। (সুতরাং $\psi(x)$ এর জটিল অনুবন্ধী নেওয়ার প্রয়োজন নেই।)

n এর কয়েকটি মানের জন্য $\psi_n(x)$ এবং সংশ্লিষ্ট সম্ভাব্যতা ঘনত্বগুলির $(|\psi_n(x)|^2)$ লেখচিত্র দেওয়া হল। (চিত্র 3.8)



(চিত্র : 3.8) একমাত্রিক বিভব পেটিকায় আবদ্ধ কণার কয়েকটি তরঙ্গ অপেক্ষক ও সংশ্লিষ্ট সম্ভাব্যতা ঘনত্বের লেখচিত্র

চিত্র (3.8) থেকে দেখাবার যে সর্বনিম্ন শক্তিস্তরে কণাটিকে পাবার সর্বাধিক সম্ভাব্যতা হল পেটিকাটির মধ্যস্থলে $\left(x = \frac{L}{2}\right)$। আবার দ্বিতীয় শক্তিস্তরে ঐ স্থানে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা হল শূণ্য। অর্থাৎ কণাটি কখনই ঐ স্থানে থাকতে পারে না। অনুরূপভাবে $n = 3$ স্তরে $x = \frac{L}{3}$ এবং $\frac{2L}{3}$ বিন্দুতে কণাটিকে পাবার সম্ভাব্যতা শূণ্য। ইহা সনাতন বলবিদ্যার ধারণার পরিপন্থী। সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী এরূপ একটি তন্ত্রে কণাটি পেটিকাটির যেকোন স্থানে থাকতে পারে।

উদাহরণ :

L দৈর্ঘ্যের একটি একমাত্রিক পেটিকার মধ্যে অবস্থিত m ভরের একটি কণার x_1 ও x_2 বিন্দুর মধ্যে অবস্থানের সম্ভাব্যতা কত?

dx দৈর্ঘ্যের মধ্যে অবস্থানের সম্ভাব্যতা হল $|\psi_n(x)|^2 dx$। আমরা ধরে নিয়েছি যে কণাটি n স্তরে আছে।

সুতরাং x_1 ও x_2 বিন্দুর মধ্যে অবস্থানের সম্ভাব্যতা

$$P_{x_1, x_2} = \int_{x_1}^{x_2} |\psi_n(x)|^2 dx = \frac{2}{L} \int_{x_1}^{x_2} \text{Sin}^2 = \frac{n\pi x}{L} dx$$

$$= \left[\frac{X}{L} - \frac{1}{2n\pi} \text{Sin} \frac{2n\pi x}{L} \right]_{x_1}^{x_2}$$

এর থেকে x_1 ও x_2 এর যে কোন মানের জন্য এবং কণাটির যেকোন স্তরে অবস্থানের জন্য আমরা $P_{x_1 \cdot x_2}$ গণনা করতে পারি।

চিত্র 3.8 হতে দেখা যায় যে n এর মান বৃদ্ধির সাথে সাথে বিভিন্ন বিন্দুতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা ক্রমশ সমান (সুষম) হয়ে আসে। যেমন n = 1 স্তরে একটি মাত্র বিন্দুতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা সর্বাধিক, কিন্তু n = 3 স্তরে মোট তিনটি বিন্দুতে এই সম্ভাব্যতা সর্বাধিক হয়। অর্থাৎ n এর মান বৃদ্ধির সাথে সাথে কণাটির অবস্থান সম্ভাব্যতার বণ্টন সুষম হতে থাকে। সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী এ ধরণের একটি কণার যে কোন বিন্দুতে অবস্থানের সম্ভাব্যতা সমান। অর্থাৎ n এর মান বৃদ্ধির সাথে সাথে কোয়ান্টাম কণাটি একটি সনাতন কণার ন্যায় আচরণ করে।

3.49 সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে কণাটির কেবলমাত্র কিছু নির্দিষ্ট শক্তিই ধারণ করতে পারে। কিন্তু একটি মুক্ত কণা যে কোণ শক্তিসম্পন্ন হতে পারে। শক্তির কোয়ান্টায়ন হয় কণাটিকে আবদ্ধ করার জন্য।

একটি বদ্ধ কণার শক্তির মান কখনই শূন্য হতে পারেনা, কারণ শক্তির মান শূন্য হলে কণাটির ভরবেগও শূণ্য হবে। $\left(V = 0 \text{ হওয়ায় } E = \frac{p^2}{2m}\right)$। অর্থাৎ সেক্ষেত্রে আমরা কণাটির ভরবেগও নিশ্চিতভাবে জেনে যাব। সুতরাং হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী কণাটির অবস্থানের অনিশ্চয়তা অসীম হওয়া উচিত।

কিন্তু যেহেতু কণাটি পেটিকার বাহিরে আসতে পারে না সুতরাং উহার অবস্থানের অনিশ্চয়তা কখনই পেটিকার দৈর্ঘ্যের বেশী হতে পারে না। সুতরাং কণাটির শক্তির মান শূণ্য হলে, হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি লঙ্ঘিত হবে। অতএব এরূপ একটি কণার শক্তির মান কখনই শূন্য হবে না।

এখানে একটি বিষয় মনে রাখা প্রয়োজন। যে কোন মাপের পেটিকায় যে কোন কণাকে আবদ্ধ রাখলেই ওর শক্তির কোয়ান্টায়ন লক্ষ্য করা যাবে না। যেমন একটি গ্যাস সিলিণ্ডারে বদ্ধ গ্যাসীয় পদার্থের অণুগুলির শক্তি সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ীই গণনা করা যায় এবং উহাদের শক্তি কোয়ান্টায়িত নয়। কারণ প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবকের মান অত্যন্ত কম হওয়ায় **($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J. S.) (3.49)** সমীকরণ থেকে সহজেই বোঝা যায় যে m ও L অতিক্ষুদ্র না হলে শক্তির কোয়ান্টায়ন সম্ভব নয়। সুতরাং পারমাণবিক মাত্রাতেই **(atomic dimension)** এহেন কোয়ান্টায়ন সম্ভব।

এক্ষেত্রে একটি উল্লেখযোগ্য ঘটনা হল যে, এহেন একটি নির্বাধ কণার শক্তি দ্য ব্রয়ের প্রকল্প থেকে সরাসরি নির্ণয় করা যায়। এক্ষেত্রে কণাটির সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গটিকে এমন একটি স্থানিক তরঙ্গ হতে হবে যেন $L = n\lambda$ ($n = 1, 2, 3\ldots$) হয়। অন্যথায় তরঙ্গটির মধ্যে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের ফলে তন্ত্রটি বিপর্যস্ত হয়ে পড়বে, অর্থাৎ সেক্ষেত্রে এটি কোন সুস্থিত তন্ত্রের প্রতিরূপ হতে পারে না।

যদি $L = \frac{n}{2}\lambda$ হয়, তাহলে দ্যি ব্রয়ের প্রকল্প অনুযায়ী বলা যায় যে,

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2}$$

এখন $\lambda = \frac{2L}{n}$ বসিয়ে পাই

$$E = \frac{n^2\hbar^2}{8mL^2}$$

এটিই কণাটির সম্ভাব্য শক্তি (সমীকরণ 3.49) অবশ্যই এখানে তরঙ্গ অপেক্ষকটি নির্ণয় করা সম্ভব নয়।

3.15 দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকা (Two dimensional potential box)

আগের অধ্যায়ে আমরা একমাত্রিক বিভব পেটিকার মধ্যস্থিত কণার ধর্মাবলী আলোচনা করেছি। বাস্তব ক্ষেত্রে বদ্ধপাত্রস্থিত গ্যাসীয় পদার্থের অণুর গতি বা কঠিন পদার্থের কেলাসে মুক্ত ইলেকট্রনের গতি পেটিকা

বিভবের ন্যায় প্রতিরূপ দ্বারা বর্ণনা করতে গেলে ত্রিমাত্রিক বিভব পেটিকা তত্ত্বের অবতারণা প্রয়োজন হয়। এই অধ্যায়ে আমরা প্রথমে দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকাস্থিত কণা তত্ত্বের সমাধান পদ্ধতি আলোচনা করব। এই তত্ত্বের জন্য প্রাপ্ত ফল থেকে সহজেই ত্রিমাত্রিক বিভব পেটিকার তরঙ্গ অপেক্ষক ও শক্তিস্তর সম্বন্ধে ধারণা করতে পারব।

কণাটির বিচরণক্ষেত্র ধরা যাক দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকাস্থিত x অক্ষ বরাবর মূলবিন্দু থেকে L_x দূরত্ব এবং Y-অক্ষ বরাবর L_y দূরত্বের মধ্যে সীমাবদ্ধ। পেটিকাটির ভিতর বিভব $V = 0$ এবং বাহিরে $V = \alpha$।

অর্থাৎ $V = 0$ যখন $0 \le x \le L_x$

এবং $0 \le y \le L_y$

অন্যথায় $V = \alpha$

সুতরাং কণাটির তরঙ্গ অপেক্ষক $\psi(x, y)$ এর ঐ সীমানার বাহিরে অস্তিত্ব থাকবে না। অর্থাৎ এক্ষেত্রে $\psi(x,y)$ এর উপর প্রযোজ্য সীমানা শর্ত হবে

$$\psi(0, Y) = \psi(L_x, y) = 0$$

$$\psi(x, 0) = \psi(x, L_y) = 0 \qquad \text{............(3.53)}$$

এই তত্ত্বের জন্য শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণটি হবে

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x,y) - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}(x,y) = E\psi(x, y) \qquad \text{............(3.54)}$$

এখানে m হচ্ছে কণাটির ভর।

(3.54) সমীকরণটি একটি আংশিক অবকল সমীকরণ (Partial differential equation)। এই সমীকরণটি সমাধানের জন্য আমরা ধরে নেব যে

$$\psi(x, y) = X(x)\, Y(y) \qquad \text{............(3.55)}$$

গাণিতিক পদ্ধতিতে এটা প্রমাণ করা যায় যে 3.54 সমীকরণটির মতো যদি অপেক্ষকের সমীকরণের (3.55) জন্য কোন সদাচারী সমাধান থাকে, তাহলে ঐ সমীকরণের আর অন্য কোন সদাচারী সমাধান

থাকতে পারে না। সমীকরণ (3.54) তে $\psi(x, y) = \psi(x)\ Y(y)$ বসিয়ে এবং সমীকরণটির উভয় দিককে $\psi(x, y)$ দ্বারা ভাগ করে পাই।

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{1}{X(x)}\cdot\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{1}{Y(y)}\cdot\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}=E \qquad ....(3.56)$$

এখন ধরা যাক $-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{1}{X(x)}\cdot\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}=E_x$

$$\text{সুতরাং,}\ -\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{1}{X(x)}\cdot\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}=E_x=E+\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{1}{Y(y)}\cdot\frac{\partial^2 X(y)}{\partial y^2} \qquad ....(3.57)$$

(3.57) সমীকরণটির ডানদিক কেবলমাত্র y রাশির উপর নির্ভর করে (কারণ মোট শক্তি E ধ্রুবক)। আবার E_x এর সংজ্ঞা অনুযায়ী E_x কেবল x এর নির্ভরশীল হবে। এই দুটি ঘটনা একই সাথে সত্য হতে হলে E_x কে ধ্রুবক হতে হবে। একই যুক্তিতে প্রমাণ করা যায় যে $-\frac{1}{Y(y)}\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}=E_y$; যেখানে E_y একটি ধ্রুবক সুতরাং আমরা লিখতে পারি।

$$-\frac{1}{X(x)}\frac{h^2}{2m}\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}=E_x \qquad ....(3.58)$$

$$-\frac{1}{Y(y)}\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}=E_y \qquad ....(3.59)$$

$$\text{এবং}\ -\frac{1}{X(x)}\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}-\frac{1}{Y(y)}\cdot\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}=E_x+E_y=E \qquad ....(3.60)$$

এখন (3.58) এবং (3.59) সমীকরণ দুটিরই প্রত্যেক এক একটি একমাত্রিক বিভব পেটিকার মধ্যস্থিত কণার শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণ। সুতরাং ঐ সমীকরণ দুটির সমাধানগুলি যথাক্রমে

$$X(x)=A_x \operatorname{Sin}\frac{n_x\pi x}{L_x}\ \text{ এবং }\ Y(y)=A_y\operatorname{Sin}\frac{n_y\pi y}{L_y}$$

অনুরূপভাবে E_x ও E_y এর মান হবে

$$E_x=\frac{n_x^2 h^2}{8mL_x^2} \qquad ....(3.61)$$

$$n_x = 1, 2, 3.........$$

এবং $E_y = \frac{n_y^2 h^2}{8mL_y^2}$ ....(3.62)

$n_y = 1, 2, 3........$

$\psi(x, y)$ হলে, $\psi(x, y) = X(x) Y(y)$

$$= A_x A_y \sin\frac{n_x \pi x}{L_x} \sin\frac{n_y \pi y}{L_y} \quad ....(3.63)$$

A_x এবং A_y ধ্রুবক দুটির মান $\psi(x, y)$ এর পরিমিতিকরণ শর্ত হতে নির্ণয় করতে হবে। A_x এবং A_y এর নির্ণেয় মান হবে যথাক্রমে $\sqrt{\frac{2}{L_x}}$ এবং $\sqrt{\frac{2}{L_y}}$

সুতরাং পরিমিত তরঙ্গ অপেক্ষকটি হবে

$$\psi(x, y) = \sqrt{\frac{4}{L_x L_y}} \sin\frac{n_x \pi x}{L_x} \sin\frac{n_y \pi y}{L_y} \quad ....(3.64)$$

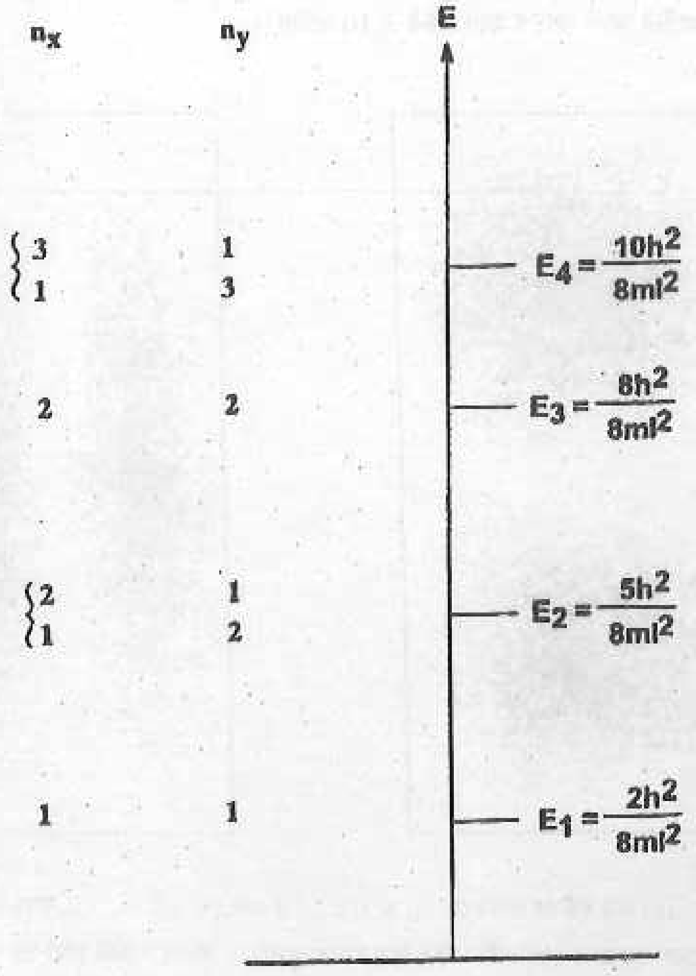
$\psi(x, y)$ এর পরিমিতকরণ আপনারা নিজেরা অনুশীলনের জন্য করে দেখতে পারেন। যে পদ্ধতিতে (3.56) সমীকরণটির সমাধান করা হল তাকে চররাশি পৃথকীকরণ (Separation of variables) পদ্ধতি বলে।

এছেন বহুমাত্রিক বিভব পেটিকার বাহুগুলি সমান হলে শক্তিস্তরগুলির মধ্যে অপজাতীয়তা দেখা যায়। এক্ষেত্রে $L_x = L_y = L$ হলে

$$E = E_x + E_y = \frac{h^2}{8mL^2}\left\{n_x^2 + n_y^2\right\} \quad ....(3.65)$$

এখানে E এর সর্বনিম্ন মান হবে $n_x = n_y = 1$ । এক্ষেত্রে $E = \frac{h^2}{4mL^2}$ হবে। এরপর $n_x = 2, n_y = 1$ এবং $n_x = 1, n_y = 2$ উভয় অবস্থার (State) জন্যই $E = \frac{5h^2}{8mL^2}$ হবে। অর্থাৎ এই অবস্থা (State) দুটি অপজাতীয় হবে (চিত্র 3.9, উচ্চতর অনেক শক্তিস্তরেই এরূপ অপজাতীয়তা লক্ষ করা যায়। শক্তিস্তরের এই অপজাতীয়তা তন্ত্রটির প্রতিসাম্যের (Symmetry) ফল (পেটিকাটির বাহু দুটি সমদৈর্ঘ্যের, $L_x = L_y$)।

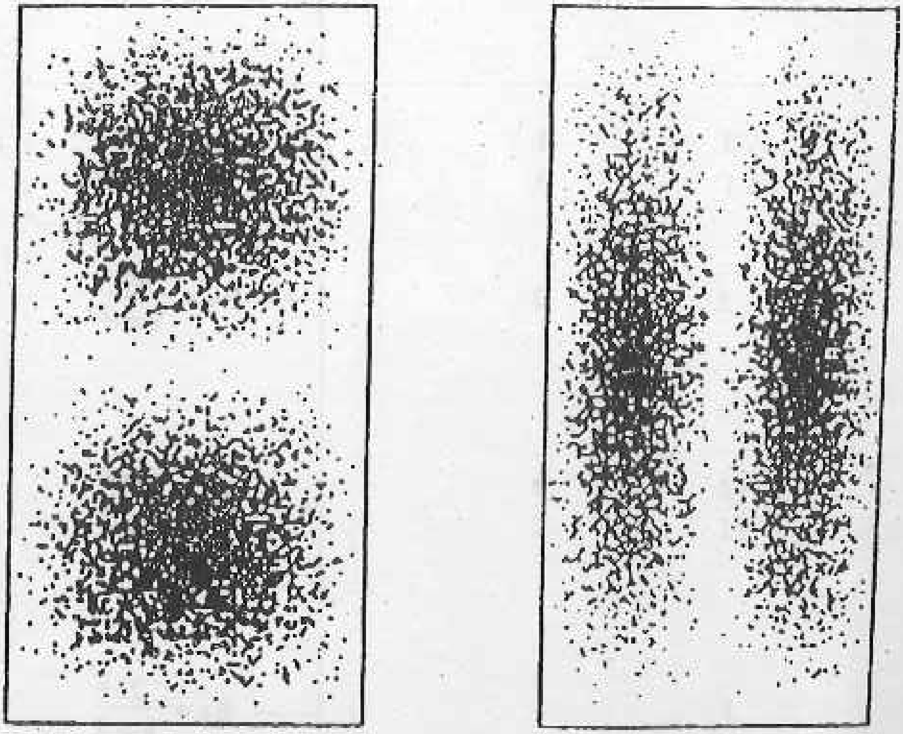
প্রসঙ্গত উল্লেখযোগ্য একমাত্রিক পেটিকার ক্ষেত্রে শক্তিস্তরগুলির মধ্যে কোনরূপ অপজাতীয়তা দেখা যা না। প্রকৃতপক্ষে কোন একমাত্রিক আবদ্ধ তন্ত্রের ক্ষেত্রে শক্তিস্তরের অপজাতীয়তা দেখা যায় না।



(চিত্র : 3.9) একটি সমবাহ দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকার কয়েকটি শক্তিস্তর (যথাযথ স্কেলে আঁকা নয়)

প্রসঙ্গত উল্লেখযোগ্য যে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় অবস্থা (State) এবং শক্তিস্তর (Energy level) কথা দু সমার্থক নয়। এদের অর্থ এবং তাৎপর্য ভিন্ন। কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় একটি নির্দিষ্ট তরঙ্গ অপেক্ষক এক নির্দিষ্ট স্থিরাবস্থা (Stationary state) কে চিহ্নিত করে। আবার কোন একটি শক্তিস্তরকে (Energy leve নির্দিষ্ট করা হয় একটি নির্দিষ্ট শক্তি দ্বারা। যেমন আলোচনা তন্ত্রের ক্ষেত্রে E_2 একটি শক্তিস্তর যার শক্তির ম $\frac{5h^2}{8mL^2}$। আবার $n_x = 2$, $n_y = 1$ এবং $n_x = 1$, $n_y = 2$ দ্বারা দুটি ভিন্ন স্থিরাবস্থাকে নির্দিষ্ট করা হ

ঘটনাচক্র যাদের শক্তির মান সমান। এই দুটি স্থিরাবস্থায় কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা বন্টন পরস্পরের থেকে ভিন্নরূপ হবে। যদিও দুটি স্থিরাবস্থাতেই কণাটির শক্তির মান E_2 । অর্থাৎ $n_x = 2, n_y = 1$ হলে পেটিকাটির যে অংশে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা সর্বাধিক, $n_x = 1, n_x = 2$ স্থিরাবস্থায় এই সম্ভাব্যতার সর্বাধিক মান পেটিকাটির অন্য অংশে হবে (চিত্র 3.10 দ্রষ্টব্য)।



(চিত্র : 3.10) (a) এবং (h) চিত্র দুটিতে যথাক্রমে $n_x = 1, n_y = 2$ এবং $n_x = 2, n_y = 1$ দ্বারা নির্দেশিত অবস্থা দুটিতে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা পেটিকাটির ভিন্ন ভিন্ন অংশে স্থানায়িত, যদিও সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তর দুটি অপভ্রাত।

3.14 ত্রিমাত্রিক বিভব পেটিকা (Three dimensional potential box) :

ধরা যাক কণাটির গতি $x = 0$ থেকে $x = L_x$; $y = 0$ থেকে $y = L_y$ এবং $Z = 0$ থেকে $Z = L_Z$ এর মধ্যে সীমাবদ্ধ। এই স্থানাঙ্কের মধ্যে বিভব শূণ্য ($v = 0$) এবং বাহিরে বিভব অসীম ($v = \infty$)। তরঙ্গ অপেক্ষক $\psi(x, y, z)$ এর উপর আরোপিত সীমানা শর্তগুলি হল

$$\psi(0, y, z) = \psi(L_x, y, z) = 0$$

$$\psi(x, 0, z) = \psi(x, L_y, z) = 0$$

$$\psi(x, y, 0) = \psi(x, y, L_z) = 0$$

এক্ষেত্রে শ্রোডিঙ্গার সমীকরণটি হবে,

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}(xyz) + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}(xyz) + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}(xyz)\right] = E \qquad \text{...........(3.66)}$$

যেখা m হচ্ছে কণাটির ভর এবং E মোট শক্তি চররাশি পৃথকীকরণ পদ্ধতির প্রয়োগ করে (3.66) সমীকরণটির সমাধান করলে তরঙ্গ অপেক্ষকটি হবে

$$\psi(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{L_xL_yL_z}}\ \mathrm{Sin}\frac{n_x\pi_x}{L_x}\ \mathrm{Sin}\frac{n_y\pi_y}{L_x}\ \mathrm{Sin}\frac{n_z\pi_z}{L_z} \qquad \text{...........(3.67)}$$

যেখানে $n_x = 1, 2, 3$...............

$n_y = 1, 2, 3$...............

$n_z = 1, 2, 3$...............

মোট শক্তি E হবে

$$E = \frac{h^2}{8m}\left[\frac{n_x^2}{L^2_x} + \frac{n_y^2}{L^2_y} + \frac{n_z^2}{L^2_y}\right] \qquad \text{...........(3.68)}$$

শ্রোডিঙ্গার সমীকরণটি আপনারা নিজেরা চররাশি পৃথকীকরণ পদ্ধতিতে সমাধান করতে পারেন। সমাধানের পদ্ধতি দ্বিমাত্রিক বিভব পেটিকার অনুরূপ। এইক্ষেত্রেও $L_x = L_y = L_z = L$ হলে কোন কোন শক্তিস্তর অপজাতীয় হবে।

3.15 হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণের সমাধান (Solution to Schrodinger wave equation for Hydrogen atom)

একটি ইলেকট্রন ও একটি প্রোটন দ্বারা হাইড্রোজেন পরমাণু গঠিত। এদের মধ্যে ইলেকট্রনের ভর, প্রোটনের ভরের তুলনায় নগণ্য— প্রোটনের ভরের $\frac{1}{1836}$ অংশ মাত্র। এহেন দ্বি-কণা তন্ত্রের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের প্রকৃত ভরের (m) পরিবর্তে ইলেকট্রন-কেন্দ্রকের (প্রোটনের) পরিণত ভর (μ) ব্যবহার করা প্রয়োজন। কিন্তু এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের ভরের তুলনায় কেন্দ্রকের ভর (M) অত্যন্ত বেশি হওয়ায় আমরা কেন্দ্রকের ভরকে অসীম ধরে নেব এবং ইলেকট্রনের পরিণত ভর ব্যবহার না করে ইলেকট্রনের প্রকৃত ভরই ব্যবহার করব।

$$\mu = \frac{mM}{m + M} = m \text{ ; যখন } M >> m, \qquad \text{............(3.69)}$$

হাইড্রোজেন পরমাণু সংক্রান্ত এই আলোচনায় আমরা ধরে নিচ্ছি যে পরমাণুর বলকেন্দ্র (Centre of force) তথা কেন্দ্রকটি স্থানাঙ্কের মূলবিন্দুতে অবস্থিত। ইলেকট্রনের উপর ক্রিয়াশীল বিভবটি কুলম্বীয় প্রকৃতির এবং এর মান V(r) হচ্ছে।

$$V(r) = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \qquad \text{............(3.70)}$$

এখানে + Ze হচ্ছে হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রীয় আধান এবং r হচ্ছে মূলবিন্দু থেকে ইলেকট্রনটির দূরত্বের মান। হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে Z = 1। বস্তুত শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের এই সমাধান অন্য যে কোন হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু যথা —He^+, Li^{2+} ইত্যাদির ক্ষেত্রে একই রকমভাবে প্রযোজ্য, কেবলমাত্র পারমাণবিক ক্রমাঙ্ক Z-এর যথাযথ মান ব্যবহার করতে হবে।

হাইড্রো জন পরমাণুর ইলেকট্রনটির জন্য ত্রিমাত্রিক শ্রোডিঙ্গার সমীকরণটির রূপ হবে,

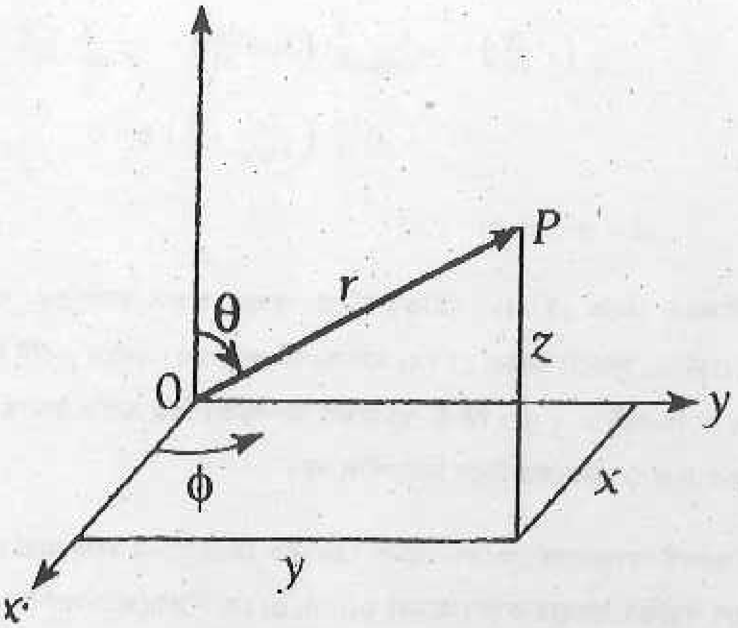
$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2}\psi = 0 \qquad \text{...........(3.71)}$$

যেখানে $\psi = \psi(x, y, z)$ ইলেকট্রনটির তরঙ্গ অপেক্ষক

E = মোট শক্তি

$$V = V(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

x, y, z ইলেকট্রনটির কার্টেজীয় স্থানাঙ্ক এবং $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ । $V(r)$ এর ন্যায় বিভবকে কেন্দ্রীয় বিভব বলা হয়। কারণ ইলেকট্রনটির গতি ইলেকট্রনটির উপর প্রযুক্ত কেন্দ্রাভিমুখী কুলম্বীয় বলের দ্বারা নিয়ন্ত্রিত যা কিনা কেবলমাত্র কেন্দ্র থেকে ইলেকট্রনের দূরত্বের মানের উপর নির্ভর করে এবং এর মান দিকনিরপেক্ষ। এহেন গাণিতিক সমস্যার সমাধানের জন্য কার্টেজীয় নির্দেশ তন্ত্রের পরিবর্তে ধ্রুবীয় নির্দেশতন্ত্র ব্যবহার অধিকতর সুবিধাজনক। সুতরাং আমরা (x, y, z) স্থানাঙ্কের বদলে ধ্রুবীয় স্থানাঙ্কসমূহ (r, θ, ϕ) ব্যবহার করব। (x, y, z) এর সঙ্গে (r, θ, ϕ) এর সম্পর্ক নিম্নরূপ।



$$x = r\sin\theta\cos\phi$$
$$y = r\sin\theta\sin\phi$$
$$z = r\cos\theta$$

(চিত্র : 3.11) ত্রিমাত্রিক কার্টেসীয় নির্দেশতন্ত্রের সাথে গোলকীয় ধ্রুবীয় নির্দেশতন্ত্রের সম্পর্ক

$$x = r\,\mathrm{Sin}\theta\,\mathrm{Cos}\phi$$

$$y = r\,\mathrm{Sin}\theta\,\mathrm{Sin}\phi$$

$$z = r\,\mathrm{Cos}\theta \qquad \text{............(3.72)}$$

এবং বিপরীতক্রমে,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \mathrm{Cos}^{-1}\frac{Z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{y}{x} \qquad \text{............(3.73)}$$

এই গোলকীয় ধ্রুবীয় নির্দেশতন্ত্রে হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য শ্রোডিঙ্গার সমীকরণটির রূপ হবে

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\psi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\mathrm{Sin}\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\mathrm{Sin}\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\mathrm{Sin}\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}$$

$$+\frac{2m}{\hbar^2}\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + E\right)\varphi = 0$$

$$\psi \equiv \psi(r, \theta, \phi) \qquad \text{............(3.74)}$$

(3.71) সমীকরণ থেকে (3.74) সমীকরণটিতে আসার প্রকৃত গাণিতিক পদ্ধতিটি আমাদের আলোচনায় অপ্রয়োজনীয়। সুতরাং আমরা (3.74) সমীকরণটি ধরে নেব। এখানে একটি বিষয় উল্লেখযোগ্য। কার্টেজীয় স্থানাঙ্কে V বিভবটি x, y ও z তিনটি স্থানাঙ্কের অপেক্ষক। কিন্তু ধ্রুবীয় স্থানাঙ্ক তন্ত্রে কেবলমাত্র r স্থানাঙ্কটির অপেক্ষক θ ও φ স্থানাঙ্কের উপর নির্ভরশীল নয়।

(3.74) সমীকরণটি সমাধানের ক্ষেত্রেও আমরা ত্রিমাত্রিক বিভবকূপের মধ্যে অবস্থিত কণাতন্ত্রের ন্যায় চররাশি পৃথকীকরণ পদ্ধতির ব্যবহার করব। আমরা $\psi(r, \theta, \phi)$ কে নিম্নরূপে প্রকাশ করব।

$$\psi = \psi(r, \theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\,\Phi(\phi)$$

$$= R(r)\Theta(\theta)\,\Phi(\phi) \qquad \text{............(3.75)}$$

যেখানে $Y(\theta, \phi) = \Theta(\theta)\,\Phi(\phi)$ ....(3.76)

$R(r) \equiv R$. $\Theta(\theta) \equiv \theta$ এবং $\Phi(\phi) \equiv \Phi$ যথাক্রমে কেবলমাত্র r, θ, এবং Φ–এর অপেক্ষক এবং কোনটিই অন্যদুটি স্থানাঙ্কের উপর নির্ভরশীল নয়।

(3.74) সমীকরণটিতে $\psi = R\Theta\Phi$ বসিয়ে এবং সমগ্র সমীকরণটিকে $R\theta\Phi$ দ্বারা ভাগ করে পাই—

$$\frac{\sin^2\theta}{R}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right) + \frac{\sin\theta}{\Theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right) + \frac{1}{\Phi}\frac{d^2\Phi}{\partial\phi^2}$$

$$+\frac{2mr^2\sin^2\Phi}{\hbar^2}\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + E\right) = 0 \quad \text{............(3 ·7)}$$

(3.77) সমীকরণটির পুনর্বিন্যাস করে লেখা যায়

$$\frac{\sin^2\theta}{R}\cdot\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right) + \frac{\sin\theta}{\Theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right) + \frac{2mr^2\sin^2\theta}{\hbar^2}$$

$$\times\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + E\right) = -\frac{1}{\Phi}\frac{d^2\Phi}{\partial\phi^2} \quad \text{............(3.78)}$$

(3.78) সমীকরণটিতে দেখা যাচ্ছে যে সমান চিহ্নের বাম দিকটি শুধুমাত্র r এবং θ-র অপেক্ষক, কিন্তু ডান দিকটি কেবল ϕ-এর উপর নির্ভর করে — r এবং θ-র উপর নয়। সুতরাং এই সমীকরণটিকে সঠিক হতে হলে সমান চিহ্নের উভয়দিকের মানই একটি ধ্রুবকের সাথে সমান হতে হবে। আমরা এই ধ্রুবকটিতে আমাদের সুবিধার্থে m_l^2 লিখব। সুতরাং (3.78) সমীকরণটির উভয়দিকের মানই m_l^2 লিখব। অর্থাৎ

$$-\frac{1}{\Phi}\frac{d^2\Phi}{\partial\phi^2} = m_l^2 \quad \text{............(3.79)}$$

এবং

$$\frac{\sin^2\theta}{R}\cdot\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right) + \frac{\sin\theta}{\Theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right)$$

$$+\frac{2mr^2\sin^2\theta}{\hbar^2}\cdot\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + E\right) = = m_l^2 \quad \text{............(3.77)}$$

এখন (3.80) সমীকরণটিকে $Sin^2\theta$ দ্বারা ভাগ করে বিভিন্ন পদকে পুণর্বিন্যস্ত করে লেখা যায়

$$\frac{1}{R}\cdot\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right)+\frac{2mr^2}{\hbar^2}\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}+E\right)\frac{m_l^2}{Sin^2\theta}$$

$$-\frac{1}{\Theta Sin\theta}\cdot\frac{d}{d\theta}\left(Sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right) \quad ....(3.81)$$

আমরা আবার একটা সমীকরণ (3.81) পেলাম যেখানে সমান চিহ্নের দুটি দিক দুটি ভিন্ন রাশির উপর নির্ভরশীল। সুতরাং সমীকরণটির উভয়দিককেই কোন একটি ধ্রুবকরাশির সাথে সমান হতে হবে। আমরা এই ধ্রুবকটিকে লিখব $l(l+1)$। এর ফলে Θ এবং R সমীকরণ দুটি হবে।

$$\frac{m_l^2}{Sin^2\theta}-\frac{1}{\Theta Sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(Sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right)=l(l+1) \quad ....(3.82)$$

এবং $\frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right)+\frac{2mr^2}{h^2}\left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}+E\right)=l(l+1)$ ....(3.83)

(3.79), (3.82) এবং (3.83) এই তিনটি সমীকরণ যথাক্রমে Φ, θ এবং r রাশির অপেক্ষক Φ, θ এবং R-এর অবকল সমীকরণ (Differential equation)। R সমীকরণটিকে অরীয় সমীকরণ (Radial equation) এবং R কে অরীয় অপেক্ষক (Radial function) বলা হয়। θ এবং Φ কে কৌণিক অপেক্ষক (Angular function) বলে। এই সমীকরণ ত্রয়ের সমাধান করলে R, θ এবং Φ অপেক্ষক তিনটি এবং মোট শক্তি E পাওয়া যাবে। সমাধানলব্ধ R, θ, Φ তথা ψ কে সদাচারী অপেক্ষক হতে হবে। Φ সমীকরণের সমাধান পদ্ধতি সরল হলেও θ ও R সমীকরণদ্বয়ের সমাধানের গাণিতিক পদ্ধতিটি বেশ জটিল। এরজন্য আমরা Φ সমীকরণটিরই একমাত্র সম্পূর্ণ গাণিতিক সমাধান করব এবং θ ও R সমীকরণদুটির সমাধানলব্ধ ফলাফল ধরে নেব।

3.79 সমীকরণটির সমাধান করে পাওয়া যায়

$$\Phi(\phi)=Ae^{im_l\Phi} \quad ....(3.84)$$

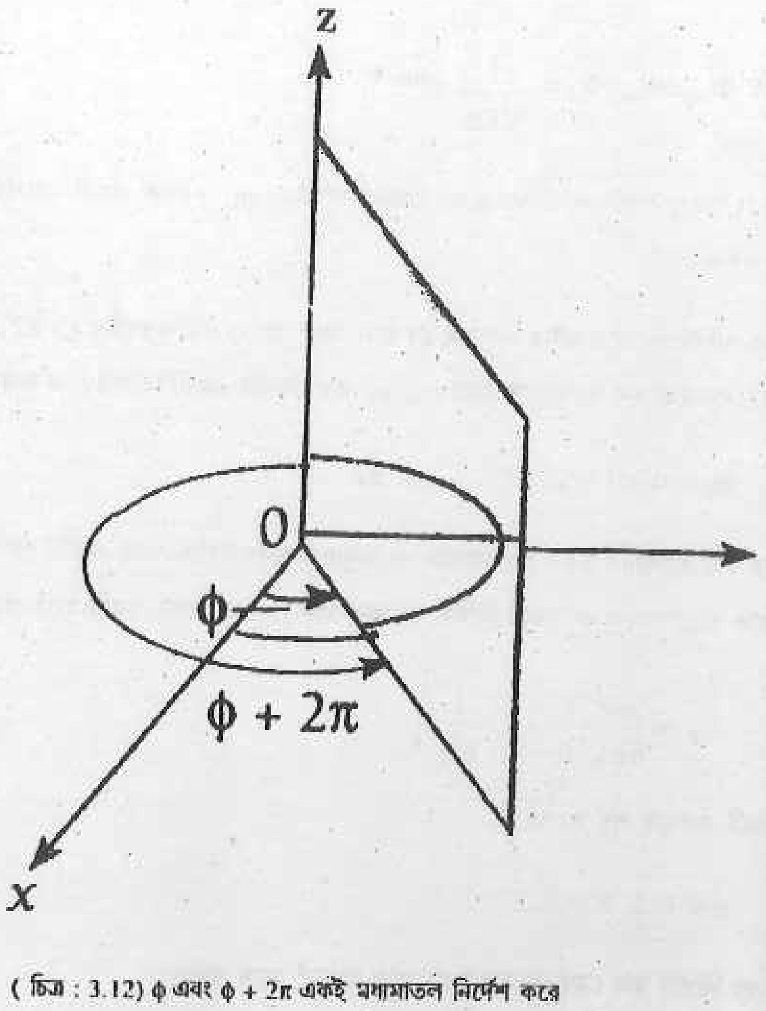
$\Phi(\phi)$ অপেক্ষকটির সদাচারী হওয়ার অন্যতম শর্ত হচ্ছে (ϕ) এর একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য (ϕ) কে একমানী হতে হবে। সুতরাং আমরা বলতে পারি

$$\Phi(\phi) = \Phi(\phi + 2\pi)$$

বা $Ae^{im_l\phi} = Ae^{im_l(\phi + 2\pi)}$ ....(3.85)

কারণ ϕ এবং $\phi + 2\pi$ কোন দুটি একই উলম্ব তলকে নির্দিষ্ট করে (চিত্র 3.12 দ্রষ্টব্য)।

(3.85) সম্পর্কটি সঠিক হতে হলে m_l এর মান 0 অথবা ধনাত্মক পূর্ণসংখ্যা অথবা ঋণাত্মক পূর্ণসংখ্যা হতে হবে। অর্থাৎ m_l এর মান হবে $m_l = 0, \pm1, \pm2$..............



(চিত্র : 3.12) ϕ এবং $\phi + 2\pi$ একই সমমাতল নির্দেশ করে

Φ অপেক্ষকের A ধ্রুবকটির মান ϕ এর পরিমিতিকরণ শর্ত হতে নির্ণয় করা যায়—অর্থাৎ A-র মান এমন হতে হবে, যেন

$$\int_0^{2\pi} \Phi^*\Phi d\varphi = 1 \qquad \text{............(3.86)}$$

হয়। (3.86) শর্তটি থেকে A-র নির্ণেয় মান

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$$

অর্থাৎ $\Phi_{m_l} = \Phi_{m_l}(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{im_l\Phi}$ ....(3.87)

(3.87) সমীকরণটি পরিমিত ϕ অপেক্ষকটির মান। m_l -র এক একটি মানের জন্য আমরা একটি ϕ অপেক্ষক পাবো।

জটিল গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে দেখানো যায় যে θ সমীকরণটির (3.82) একমাত্র সমাধান সম্ভব যদি l একটি ধনাত্মক পূর্ণ সংখ্যা হয় এবং $l \geq m_l$ হয়। অর্থাৎ একটি বিশেষ l -র জন্য m_l এর মান হবে

$$m_l = 0, \pm1, \pm2, \ldots\ldots\ldots\ldots \pm l \qquad \text{............(3.88)}$$

অরীয় সমীকরণটির (3.83) সমাধান ও অনুরূপ শর্তসাপেক্ষ। এর একটি শর্ত হল যে মোট শক্তি E ধনাত্মক হতে পারে অথবা কয়েকটি নির্দিষ্ট ঋণাত্মক মান E_n এর কোন একটি হতে পারে। যেখানে

$$E_n = \frac{me^4z^2}{8\varepsilon_0^2h^2} + \left(\frac{1}{n^2}\right) \qquad \text{............(3.89)}$$

n একটি ধনাত্মক পূর্ণ সংখ্যা।

$$n = 1, 2, 3\ldots\ldots\ldots \qquad \text{............(3.90)}$$

E_n এর নির্ণেয় মান বোরের তত্ত্ব হতে প্রাপ্ত মানের সঙ্গে সমান।

অরীয় সমীকরণটির সমাধানের জন্য আরও একটি শর্ত পূরণ আবশ্যক। শর্তটি হল n এর মান $l + 1$ এর থেকে বড় অথবা $l + 1$ এর সমান হতে হবে। অর্থাৎ $n \geq l + 1$ হতে হবে। অন্যভাবে বলা যায় যে n এর একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য $l = 0, 1, 2, 3, \ldots\ldots n$ ....(3.91)

আমরা আগে দেখেছি যে m_l -র একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য একটি Φ অপেক্ষক পাওয়া যায়। অনুরূপভাবে m_l ও l এর মান দ্বারা এক একটি θ অপেক্ষক নির্দিষ্ট হয় এবং l ও n এর মান দ্বারা R অপেক্ষকগুলি নির্ধারিত হয়। সুতরাং n, l ও m_l এর একপ্রস্থ মানের জন্য আমরা একটি করে R, θ ও Φ অপেক্ষক তথা একটি নির্দিষ্ট $\psi \equiv \psi_{n, m_l, l} = R_{nl}\, \theta_{lm_l}\, \Phi_{m_l}$ অপেক্ষক পাবো। হাইড্রোজেন পরমাণুর তরঙ্গ অপেক্ষকটি ইলেকট্রনটির অবস্থা (State) নির্ধারণ করে। যেহেতু ψ নির্ধারিত হয় n, l ও m_l সংখ্যাত্রয়ীর দ্বারা, অতএব বলা যায় যে n, l ও m_l হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটির অবস্থা সূচিত করে। n, l ও m_l কে কোয়ান্টাম সংখ্যা (Quantum number) বলা হয়। দ্বিতীয় এককের আলোচনা থেকে আমরা সহজেই n, l ও m_l কে যথাক্রমে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা, আজিমুথাল কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং চৌম্বক কোয়ান্টাম সংখ্যা বলে চিহ্নিত করতে পারি।

(3.89) সমীকরণে দেখা যায় যে ইলেকট্রনটির যে কোন অবস্থাতেই মোট শক্তি কেবলমাত্র মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা n এর উপর নির্ভর করে। আবার দ্বিতীয় এককে সমারফেল্ডের তত্ত্ব আলোচনার সময় আমরা দেখেছি যে কোন কক্ষে অবস্থিত ইলেকট্রনটির শক্তি ওই কক্ষের n ও l উভয়ের মানের উপরই নির্ভর করে। এর কারণ সমারফেল্ডের তত্ত্বে ইলেকট্রনের গতি বর্ণনায় আপেক্ষিকতা তত্ত্বের প্রয়োগ করা হয়েছিল। কিন্তু বর্তমানে আলোচ্য শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণ কেবলমাত্র সেই সব ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য যেখানে আপেক্ষিকতা তত্ত্ব প্রয়োগের প্রয়োজন নেই। আপেক্ষিকতাবাদ মেনে যে তরঙ্গ সমীকরণ পাওয়া যায় তাকে আবিষ্কর্তা ডিরাকের (P. A. M. Dirac) নামানুযায়ী ডিরাক সমীকরণ (Dirac equation) বলা হয়। হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য ডিরাক সমীকরণ সমাধান করলে দেখা যায় যে মোট শক্তি n ও l উভয়ের উপরই নির্ভর করে। কিন্তু মোট শক্তির l এর উপর নির্ভরশীলতা খুব কম হওয়ায় আমরা রাসায়নিক বন্ধনী বা আয়নায়ণ শক্তি ইত্যাদির সাধারণ আলোচনার জন্য শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণ এবং এর থেকে প্রাপ্ত ফলাফলেরই প্রয়োগ করব।

প্রসঙ্গত উল্লেখযোগ্য যে আমরা শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান করে n, l ও m_l এই তিনটি কোয়ান্টাম সংখ্যা পেয়েছি। কিন্তু ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা পাইনি। হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য ডিরাক সমীকরণ সমাধান করলে n, l ও m_l এর সাথে ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যাও পাওয়া যায়। আমরা এক্ষেত্রে ধরে নেব যে ইলেকট্রনের আরও একটি কোয়ান্টাম সংখ্যা অর্থাৎ ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যা আছে এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণন অবস্থা ঘূর্ণন অপেক্ষক (Spin function) দ্বারা নির্ণীত হয়। এই ঘূর্ণন অপেক্ষকটি ঘূর্ণন কোয়ান্টাম সংখ্যার উপর নির্ভর করে।

সারণীতে হাইড্রোজেন ও হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ও n = 2 পর্যন্ত পরিমিত Φ, θ ও R অপেক্ষক এবং φ অপেক্ষকগুলির ব্যঞ্জক সমূহ দেওয়া হল। এই সকল φ অপেক্ষকগুলিকে এক একটি কক্ষক (orbital) বলা হয়।

সারণী (3.1) হাইড্রোজেন পরমাণুর কয়েকটি পরিমিত তরঙ্গ অপেক্ষকের ব্যঞ্জক সমূহ

	n	l	m_l	$\Phi(\phi)$	$\Theta(\theta)$	R(r)	$\psi(r, \theta, \phi)$
ψ_{1s}	1	0	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{a_0^{3/2}} e^{-r/a_0}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi} a_0^{3/2}} e^{-r/a_0}$
ψ_{2s}	2	0	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2\sqrt{2} a_0^{3/2}}\left(2-\frac{r}{a_0}\right) e^{-r/2a_0}$	$\frac{1}{4\sqrt{2} a_0^{3/2}}\left(2-\frac{r}{a_0}\right) e^{-r/2a_0}$
ψ_{2p_0}	2	1	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}\cos\theta$	$\frac{1}{2\sqrt{6} a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0}$	$\frac{1}{4\sqrt{2} a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \cos\theta$
$\psi_{2p_{\pm1}}$	2	1	±1	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\pm i\phi}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta$	$\frac{1}{2\sqrt{6} a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0}$	$\frac{1}{8\sqrt{\pi} a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin\theta e^{\pm i\phi}$
ψ_{3s}	3	0	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{81\sqrt{3} a_0^{3/2}}\left(27-18\frac{r}{a_0}+2\frac{r^2}{a_0^2}\right) e^{-r/3a_0}$	$\frac{1}{81\sqrt{3} a_0^{3/2}}\left(27-18\frac{r}{a_0}+2\frac{r^2}{a_0^2}\right) e^{-r/3a_0}$
ψ_{3p_0}	3	1	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}\cos\theta$	$\frac{4}{81\sqrt{6} a_0^{3/2}}\left(6-\frac{r}{a_0}\right)\frac{r}{a_0} e^{-r/3a_0}$	$\frac{\sqrt{2}}{81\sqrt{\pi} a_0^{3/2}}\left(6-\frac{r}{a_0}\right)\frac{r}{a_0} e^{-r/3a_0}\cos\theta$
$\psi_{3p_{\pm1}}$	3	1	±1	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\pm i\phi}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta$	$\frac{4}{81\sqrt{6} a_0^{3/2}}\left(6-\frac{r}{a_0}\right)\frac{r}{a_0} e^{-r/3a_0}$	$\frac{1}{81\sqrt{\pi} a_0^{3/2}}\left(6-\frac{r}{a_0}\right)\frac{r}{a_0} e^{-r/3a_0}\sin\theta e^{\pm i\phi}$
ψ_{3d_0}	3	2	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$	$\frac{\sqrt{10}}{4}(3\cos^2\theta-1)$	$\frac{4}{81\sqrt{30} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}$	$\frac{1}{81\sqrt{6\pi} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}(3\cos^2\theta-1)$
$\psi_{3d_{\pm1}}$	3	2	±1	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\pm i\phi}$	$\frac{\sqrt{15}}{2}\sin\theta\cos\theta$	$\frac{4}{81\sqrt{30} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}$	$\frac{1}{81\sqrt{\pi} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}\sin\theta\cos\theta e^{\pm i\phi}$
$\psi_{3d_{\pm2}}$	3	2	±2	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\pm 2i\phi}$	$\frac{\sqrt{15}}{4}\sin^2\theta$	$\frac{4}{81\sqrt{30} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}$	$\frac{1}{162\sqrt{\pi} a_0^{3/2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-r/3a_0}\sin^2\theta e^{\pm 2i\phi}$

$a_0 = 4\pi\varepsilon_0 h^2 / me^2 = 5.292 \times 10^{-11}$m. এটি বোর রূপকল্পে হাইড্রোজেন পরমাণুর প্রথম কক্ষের ব্যাসার্ধ।

3.16 হাইড্রোজেনীয় কক্ষক সমূহ (Orbitals of Hydrogen and Hydrogen- like atoms)

কোন এক ইলেকট্রনীয় স্থান নির্ভর পারমাণবিক তরঙ্গ অপেক্ষককে কক্ষক বলা হয়। যেহেতু হাইড্রোজেন পরমাণু এক ইলেকট্রনীয় পরমাণু, সেজন্য হাইড্রোজেন ও সকল হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ইলেকট্রনের তরঙ্গ অপেক্ষকসমূহকে কক্ষক বলা হয়। ইলেকট্রনের তরঙ্গ অপেক্ষকটি ইলেকট্রনটির অবস্থা নির্ধারণ করে। $|\psi(r, \theta, \varphi)|^2$, (r, θ, φ) বিন্দুতে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাবাতা নির্দেশ করে।

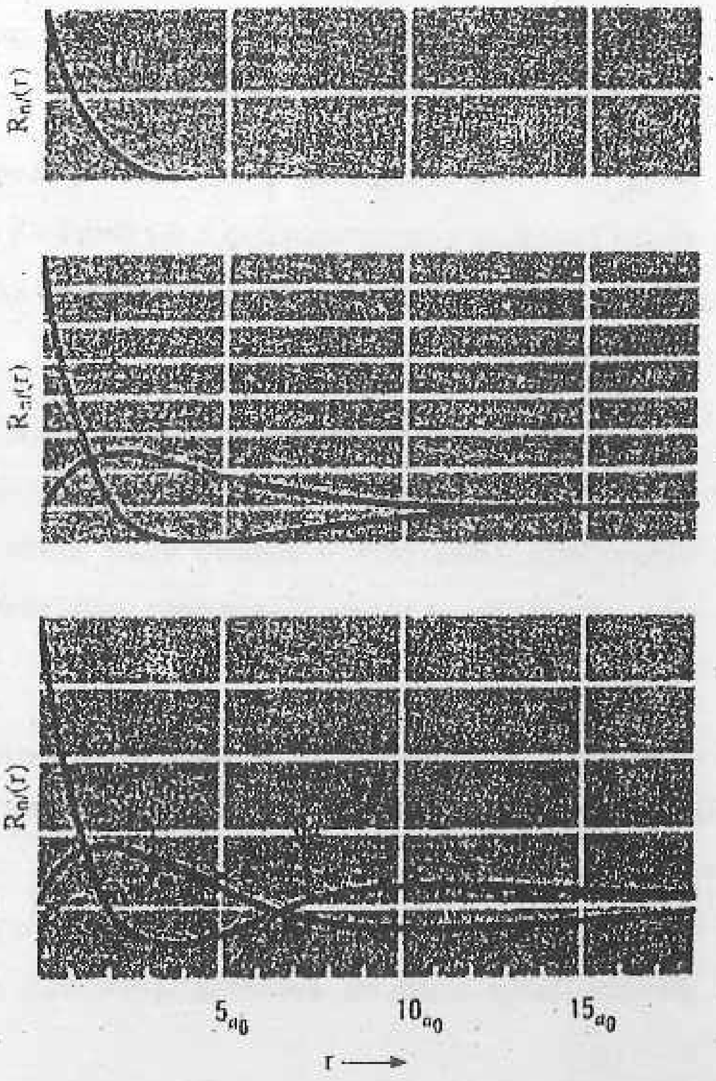
(3.1) সারণীতে দেখতে পাই যে সকল s কক্ষকের জন্য Φ ও θ কৌণিক অপেক্ষকগুলির মান ধ্রুবক। এর বিশেষ তাৎপর্য s কক্ষকের ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতা Φ ও θ-র উপর নির্ভর করে না। অর্থাৎ s ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভব্যতা কেন্দ্রকের চতুর্দিকেই সমান। ইহা কেবল কেন্দ্রক থেকে ইলেকট্রনের দূরত্বের সাথে পরিবর্তিত হয়।

(3.1) সারণীতে প্রদত্ত তরঙ্গ অপেক্ষক সমূহের ব্যঞ্জকগুলি পর্যালোচনা করে দেখা যায় যে একমাত্র ψ_{1s} কক্ষকের মান কেন্দ্রকের উপর অর্থাৎ মূলবিন্দুতেও শূন্য হয় না। অর্থাৎ কেন্দ্রকেও 1s ইলেকট্রন পাবার একটি নির্দিষ্ট সম্ভাব্যতা আছে। বিভিন্ন ভৌত ও রাসায়নিক ঘটনার বিশ্লেষণ ও ব্যাখ্যায় 1s ইলেকট্রনের এই ধর্ম যথেষ্ট গুরুত্বপূর্ণ। চিত্র (3.13) তে বিভিন্ন কক্ষকের অরীয় অপেক্ষকের লেখচিত্র দেওয়া হল :

তরঙ্গ অপেক্ষক বা কক্ষকগুলির একটি বিশেষ বৈশিষ্ট হল এদের নিস্পন্দ (node) সমূহ। কোন অপেক্ষকের মান যেখানে শূণ্য হয় এবং অপেক্ষকটি চিহ্ন পরিবর্তন করে সেই সকল স্থানাঙ্ক বিন্দু বা তলসমূহকে অপেক্ষকটির নিস্পন্দ বলে। সকল কক্ষকের অসীমে এবং 1s ব্যতীত অন্যসব কক্ষকের মূলবিন্দুতে মান শূন্য হলেও, এগুলিকে নিস্পন্দ বলা হয় না। সকল নিস্পন্দে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাবাতা শূন্য হয়। রাসায়নিক বন্ধনীর আলোচনায় কক্ষকগুলির নিস্পন্দ সমূহের ভূমিকা খুবই গুরুত্বপূর্ণ।

কোন কক্ষকের অরীয় নিস্পন্দ (Radial node) বা কৌণিক নিস্পন্দ (Angular node) বা দুই ধরণের নিস্পন্দ একই সাথে থাকতে পারে। অরীয় নিস্পন্দ স্থলে অরীয় অপেক্ষকের মান শূন্য হয় এবং কৌণিক

নিস্পন্দ স্থলে কৌণিক অপেক্ষকের মান শূন্য হয়। একটি কক্ষক ψ_{nlm_l} এর মোট অরীয় নিস্পন্দের সংখ্যা $n-l-1$ এবং মোট কৌণিক নিস্পন্দের সংখ্যা l, সর্বমোট নিস্পন্দের সংখ্যা $n-1$, 1s কক্ষকের কোন নিস্পন্দ নেই। 2s ও 3s কক্ষকদ্বয়ের নিস্পন্দের সংখ্যা যথাক্রমে এক এবং দুই। s কক্ষকের সবকয়টি নিস্পন্দই অরীয় নিস্পন্দ। 2p কক্ষকের অরীয় নিস্পন্দ নেই। কৌণিক নিস্পন্দের সংখ্যা এক।



(চিত্র : 3.13) হাইড্রোজেন পরমাণুর n = 1, 2 এবং 3 মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যার জন্য কক্ষক সমূহের অরীয় অপেক্ষকগুলির লেখচিত্র।

3.16.1 অরীয় বন্টন অপেক্ষক (Radial distribution function)

শূন্যে r এবং r + dr, θ এবং θ + dθ এবং ϕ এবং ϕ + dϕ স্থানাঙ্কের মধ্যবর্তী স্থানে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা হল

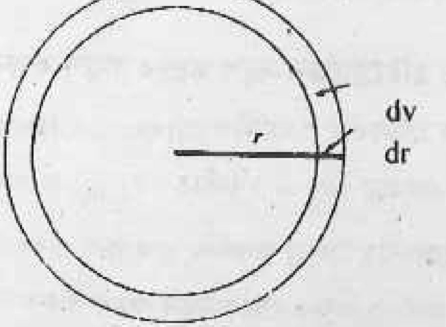
$$|\psi|^2 dr = |R|^2 \ |\theta|^2 \ |\varphi|^2 \ r^2 dr \sin\theta d\theta \ d\phi \quad ....(3.92)$$

গোলকীয় ধ্রুবীয় নির্দেশাঙ্কে আয়তন ক্ষুদ্রাংশ dr এর মান $r^2 dr \sin\theta d\theta d\phi$। সদিশ রাশি কলন বিদ্যার (Vector Calculus) সাহায্যে dc এর এইমান নির্ণয় করা যায়।

এখন আমরা জানতে চাই যে কেন্দ্রক থেকে r দূরত্বে r এবং r + dr অরীয় স্থানাঙ্কের মধ্যে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা কত? এর অর্থ কেন্দ্রকের চতুর্দিকে r ব্যাসার্ধ এবং dr বেধ সম্পন্ন গোলকীয় খোলকের মধ্যে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা জানতে চাওয়া (চিত্র 3.14)। এই সম্ভাব্যতা নির্ণয় করতে হলে r কে নির্দিষ্ট রেখে, θ এবং ϕ স্থানাঙ্কদ্বয়ের সকল সম্ভাব্য মানের জন্য প্রাপ্ত ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতার মান সমূহকে যোগ করতে হবে অর্থাৎ কৌণিক সম্ভাব্যতাকে θ ও ϕ এর উপর সমাকলন করতে হবে। সুতরাং r ও r + dr স্থানাঙ্কের মধ্যে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা হবে –

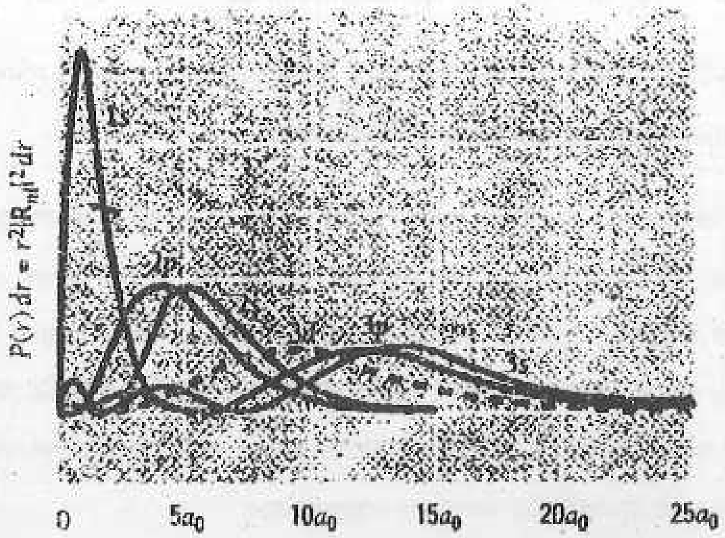
$$P(r)dr = |R|^2 r^2 dr \int_0^{2\pi} |\theta|^2 \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} |\phi|^2 d\phi = |R|^2 r^2 dr \quad ....(3.93)$$

(কারণ θ ও Φ পরিমিত অপেক্ষক)



(চিত্র : 3.14) অরীয় বন্টন অপেক্ষকের দ্বারা r দূরত্বে dr ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট গোলকীয় খোলোকের মধ্যে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা জানা যায়।

$P_r = |R|^2 r^2$ কে অরীয় বন্টন অপেক্ষক বলা হয়। চিত্র (3.15) তে হাইড্রোজেন পরমাণুর বিভিন্ন কক্ষকের অরীয় বন্টন অপেক্ষকের লেখচিত্র দেওয়া হল।



(চিত্র : 3.15) হাইড্রোজেন পরমাণুর n = 1, 2, 3-র জন্য সকল কক্ষকের অরীয় বন্টন অপেক্ষক সমূহের লেখচিত্র

যদিও মূলবিন্দুতে R_{1s} এর মান শূন্য নয়, কিন্তু 1s কক্ষকের অরীয় বণ্টন অপেক্ষকের মান মূলবিন্দুতে শূন্য হয় এবং $r = a_0$ তে এর মান সর্বাধিক হয়।

3.16.2 হাইড্রোজেন ও হাইড্রোজেন সদৃশ তন্ত্রের বাস্তব কক্ষক (Real Orbitals) সমূহ :

$Y_{l, m_l} = \Theta\,\Phi$ কে গোলকীয় হার্মোনিক (Spherical Harmonics) বলা হয়। $Y_{l m_l}$ এ $e^{\pm i m_l \phi}$ গুণকের উপস্থিতির জন্য একমাত্র $m_l = 0$ ব্যতীত Y_{l, m_l} অপেক্ষকসমূহ কাল্পনিক হয়। রাসায়নিক বন্ধনী ও অন্যান্য কিছু আলোচনার ক্ষেত্রে কাল্পনিক কক্ষকের পরিবর্তে বাস্তব কক্ষকের ব্যবহার অধিকতর সুবিধাজনক। এই কারণে কাল্পনিক কক্ষক থেকে নতুন বাস্তব কক্ষক তৈরি করা হয়। আমরা হাইড্রোজেনের $2p_{\pm 1}$ কক্ষক দুটি থেকে দুটি বাস্তব কক্ষক গঠন করার পদ্ধতি আলোচনা করব। এই বাস্তব কক্ষক গঠনে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার একটি উপপাদ্য ব্যবহার করতে হবে। আমরা প্রথমে এই উপপাদ্যটি বিবৃত এবং প্রমাণ করব।

উপপাদ্য : একটি রৈখিক সংকারকের যদি একাধিক অপজাত আইগেন অপেক্ষক থাকে, তবে ঐ সকল আইগেন অপেক্ষকগুলির যেকোন রৈখিক সমন্বয় ঐ সংকারকটির একটি আইগেন অপেক্ষক হবে এবং ঐ আইগেন অপেক্ষকটির সংশ্লিষ্ট আইগেন মানটিও ঐ অপজাত অপেক্ষকগুলির আইগেন মানের সমান হবে।

প্রমাণ : মনে করি $\hat{A}$ সংকারকটির a আইগেন মান বিশিষ্ট দুটি অপজাত অপেক্ষক হল ϕ_1 এবং ϕ_2

অর্থাৎ $$\hat{A}\phi_1 = a\phi_1$$
$$\hat{A}\phi_2 = a\phi_2$$

ϕ_1 এবং ϕ_2 থেকে আমরা একটি নতুন অপেক্ষক ψ তৈরি করলাম,

$$\psi = C_1\phi_1 + C_2\phi_2$$

C_1 এবং C_2 যে কোন দুটি সংখ্যা।

এখন $$\hat{A}\psi = \hat{A}\{C_1\phi_1 + C_2\phi_2\}$$

$\hat{A}$ সংকারকের রৈখিক ধর্ম ব্যবহার করে পাই।

$$\begin{aligned}\hat{A}\psi &= \hat{A}(C_1\phi_1) + \hat{A}(C_2\phi_2)\\ &= C_1\hat{A}\phi_1 + C_2\hat{A}\phi_2\\ &= C_1a\phi_1 + C_2a\phi_2\\ &= a\{C_1\phi_1 + C_2\phi_2\}\\ &= a\psi\end{aligned}$$

সুতরাং ψ অপেক্ষকটিও $\hat{A}$ সংকারকের একটি আইগেন অপেক্ষক এবং সংশ্লিষ্ট আইগেন মানটিও হল a।

এখন ψ_{2p+1} এবং ψ_{2p-1} কক্ষক দুটিই হ্যামিলটোনিয়ান সংকারক H এর অপজাত কক্ষক। ψ_{2p+1} এবং ψ_{2p-1} কক্ষক দ্বয় যথাক্রমে $e^{i\psi}$ এবং $e^{-i\psi}$ গুণক দুটির জন্য কাল্পনিক। আমরা ψ_{2p+1} এবং ψ_{2p-1}

থেকে দুটি নতুন কক্ষক ψ_{2p_x} এবং ψ_{2p_y} গঠন করব যাদের ব্যঞ্জকে কাল্পনিক রাশি i অনুপস্থিত। ψ_{2p_x} এবং ψ_{2p_y} কক্ষক দুটির সংজ্ঞা হল

$$\psi_{2p_x} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\psi_{2p+1} + \psi_{2p-1}\right) = \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{5/2} re^{-\frac{Zr}{2a_0}} \sin\theta\cos\phi \qquad \text{......(3.94)}$$

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ গুণকটি ψ_{2p_x} কে পরিমিত করে।

$$\psi_{2p_y} \equiv \frac{1}{i\sqrt{2}}\left(\psi_{2p+1} - \psi_{2p-1}\right) = \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{5/2} re^{-\frac{Zr}{2a_0}} \sin\theta\sin\phi \qquad \text{......(3.95)}$$

ψ_{2p_x} এবং ψ_{2p_y} এর ব্যঞ্জক দুটিকে লেখা যায়

$$\psi_{2p_x} = \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{5/2} xe^{-\frac{Zr}{2a_0}} \qquad \text{......(3.96)}$$

$$\text{এবং } \psi_{2p_y} = \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{5/2} ye^{-\frac{Zr}{2a_0}} \qquad \text{......(3.97)}$$

[$\therefore$ $r\sin\theta\cos\varphi = x$ এবং $r\sin\theta\sin\varphi = y$] এবং (3.97) ব্যঞ্জক দুটি থেকে যথাক্রমে ψ_{2p_x} এবং ψ_{2p_y} কক্ষক দুটির নামকরণের সার্থকতা বোঝা যায়।

ψ_{2p0} অপেক্ষকটি বাস্তব।

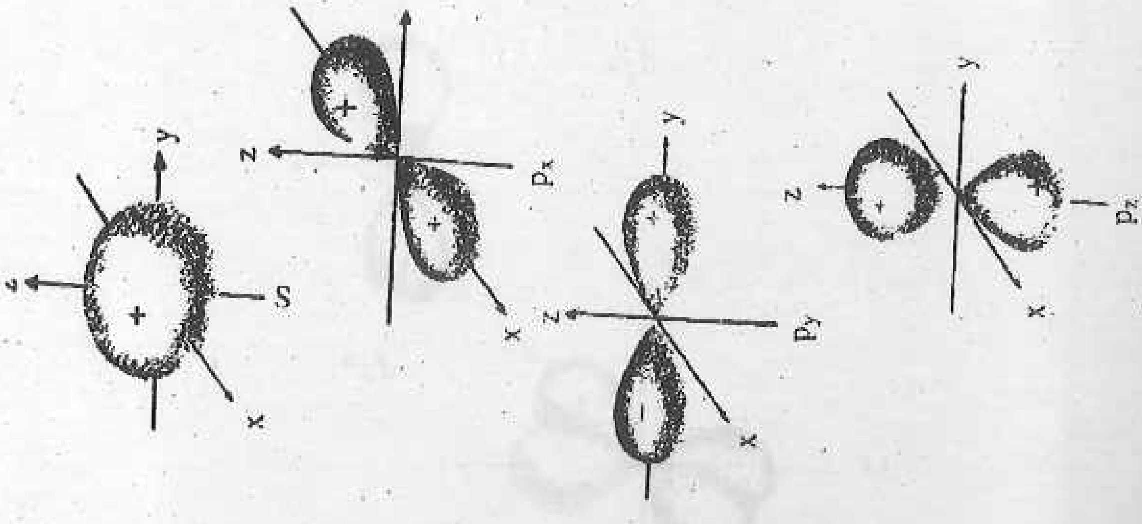
$$\psi_{2p0} = \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{5/2} re^{-\frac{Zr}{2a_0}} \cos\theta$$

$$= \frac{1}{\sqrt{32\pi}}\left(\frac{Z}{2a_0}\right)^{5/2} Ze^{-\frac{Zr}{2a_0}} \quad [\because r\cos\theta = Z]$$

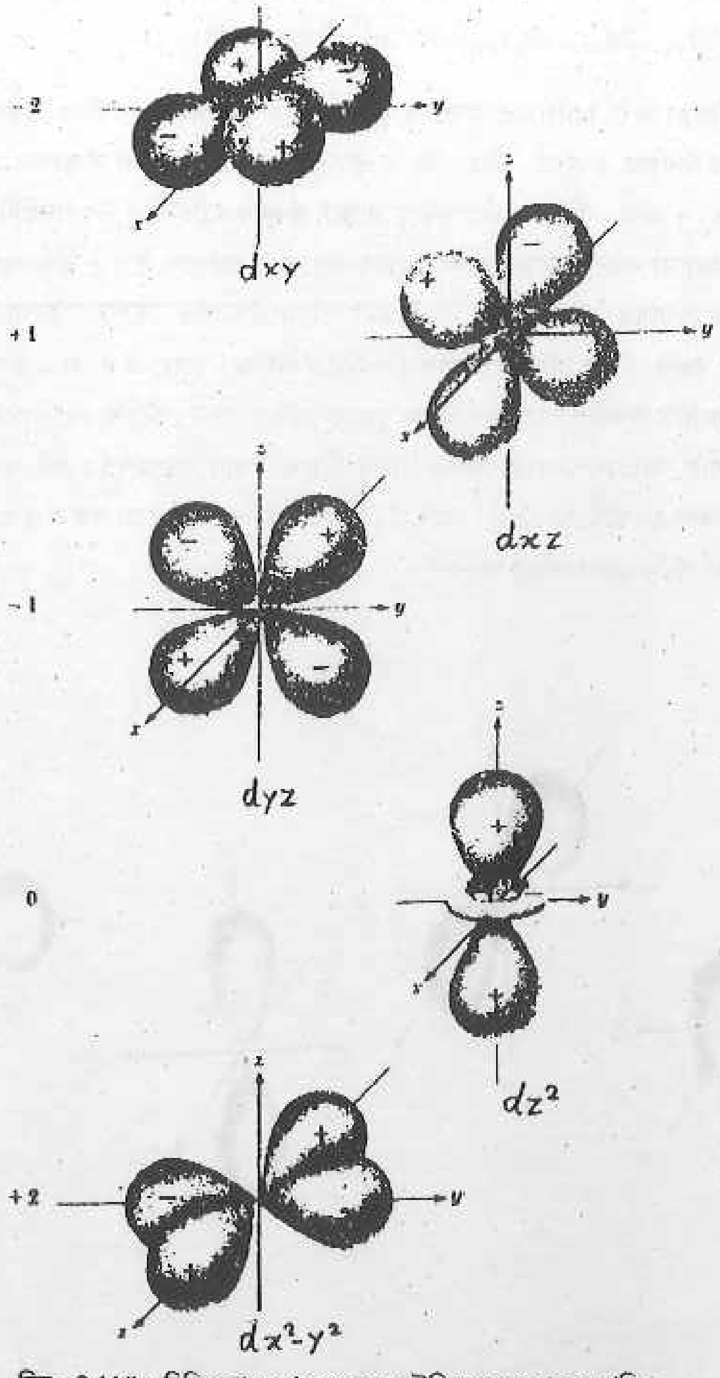
সুতরাং ψ_{2p0} এবং ψ_{2p_z} অভিন্ন।

অনুরূপভাবে আমরা তিনটি বাস্তব 3p কক্ষক যথা $3p_x$, $3p_y$ এবং $3p_z$ এবং পাঁচটি বাস্তব 3d কক্ষক যথা, $3d_{xy}$, $3d_{yz}$, $3d_{zx}$, $3d_{x^2-y^2}$ এবং $3d_{z^2}$ পেতে পারি।

চিত্র 3.16(a) ও 3.16(b)-এ বাস্তব s, p এবং d কক্ষকগুলির কৌণিক সম্ভাব্যতার লেখচিত্র দেওয়া হল। এই চিত্রে ব্যবহৃত + এবং – চিহ্নগুলি ঐ স্থানে তরঙ্গ অপেক্ষক বা কক্ষকের দশা (Phase) বোঝাতে ব্যবহৃত হয়েছে। + এবং – চিহ্নিত অংশসমূহে সংশ্লিষ্ট কক্ষকের কৌণিক উৎপাদকটির চিহ্ন যথাক্রমে + বা – হয়। যদিও সম্ভাব্যতা সর্বদা ধনাত্মক রাশি হওয়ায় সম্ভাব্যতা প্রকাশক চিত্র ± চিহ্ন অর্থহীন, তবুও এক্ষেত্রে ± চিহ্নের ব্যবহার প্রথাগত কারণ রাসায়নিক বন্ধনী গঠনে কক্ষকের কৌণিক উৎপাদকের চিহ্নের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা আছে। বস্তুত কক্ষকগুলির কৌণিক লেখচিত্রে অনুরূপ স্থানে ঐ ± বা – চিহ্নগুলি হয়। কিন্তু বন্ধনী গঠনের সময় সংশ্লিষ্ট কক্ষকগুলির অভিলেপন বুঝতে বিভিন্ন স্থানে কৌণিক সম্ভাব্যতার আপেক্ষিক মান জানা প্রয়োজন। আবার অভিলেপনকারী কক্ষকগুলির চিহ্নও সমান গুরুত্বপূর্ণ। এই কারণে ± চিহ্ন সম্মিলিত কৌণিক সম্ভাব্যতার লেখচিত্রের প্রচলন বেশি। এই কক্ষকগুলির অরীয় অপেক্ষক এবং অরীয় বণ্টন অপেক্ষক সমূহের লেখচিত্র আদি কক্ষকগুলির অনুরূপ।



চিত্র : 3.16(a) বাস্তব s, p কক্ষকগুলির কৌণিক সম্ভাব্যতার লেখচিত্র
(+/– চিহ্নের তাৎপর্য পাঠ্যাংশে উল্লেখ করা হয়েছে।)



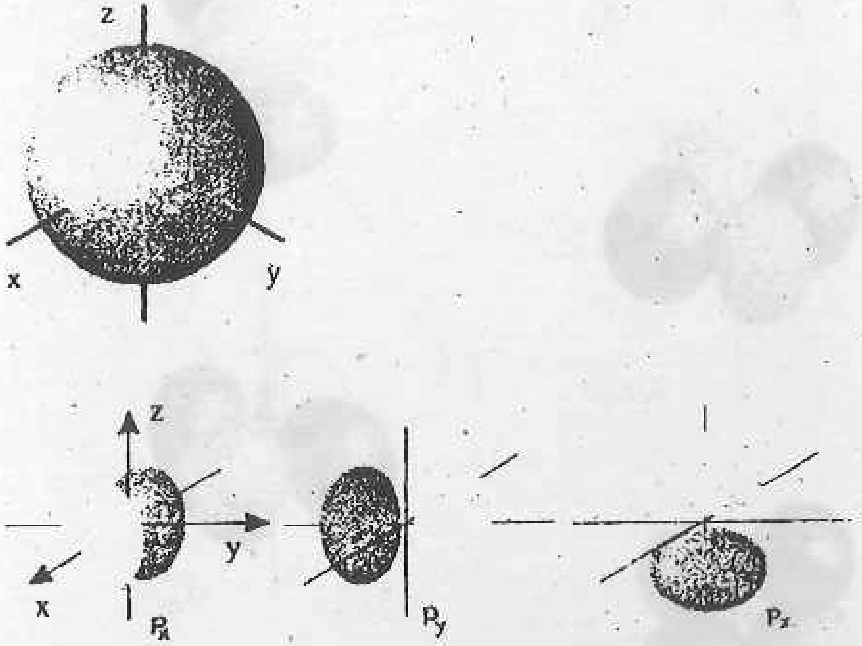
চিত্র : 3.16(b) বিভিন্ন বাস্তব d কক্ষকের কৌণিক সম্ভাব্যতার লেখচিত্র
(+/– চিহ্নের তাৎপর্য্য পাঠ্যাংশে উল্লেখ করা হয়েছে।)

3.16.3 কক্ষকের আকৃতি (Shape of the orbitals) :

কোন পারমাণবিক কক্ষককে একটি মাত্র লেখচিত্রে সম্পূর্ণরূপে প্রকাশ করা সম্ভব নয়। কারণ ψ তিনটি রাশি r, θ ও ϕ এর অপেক্ষক। ψ এর লেখচিত্র আঁকতে চতুর্মাত্রিক নির্দেশাংকের প্রয়োজন, যা ত্রিমাত্রিক স্থানে (Three dimensional space) অসম্ভব। সুতরাং সরাসরি লেখচিত্রের মাধ্যমে ψ এর ছবি এঁকে ψ এর আকৃতি বোঝানো সম্ভব নয়।

কক্ষকের আকৃতি আমরা অন্যভাবে সংজ্ঞায়িত করি। সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রনটির অবস্থানগত সম্ভাব্যতার একটি বড় অংশ (যথা 0.9 অংশ বা 90%) যে আবরক তলসীমার মধ্যে আবদ্ধ থাকে তা সংশ্লিষ্ট কক্ষকের ত্রিমাত্রিক আকার নিরূপণ করে।

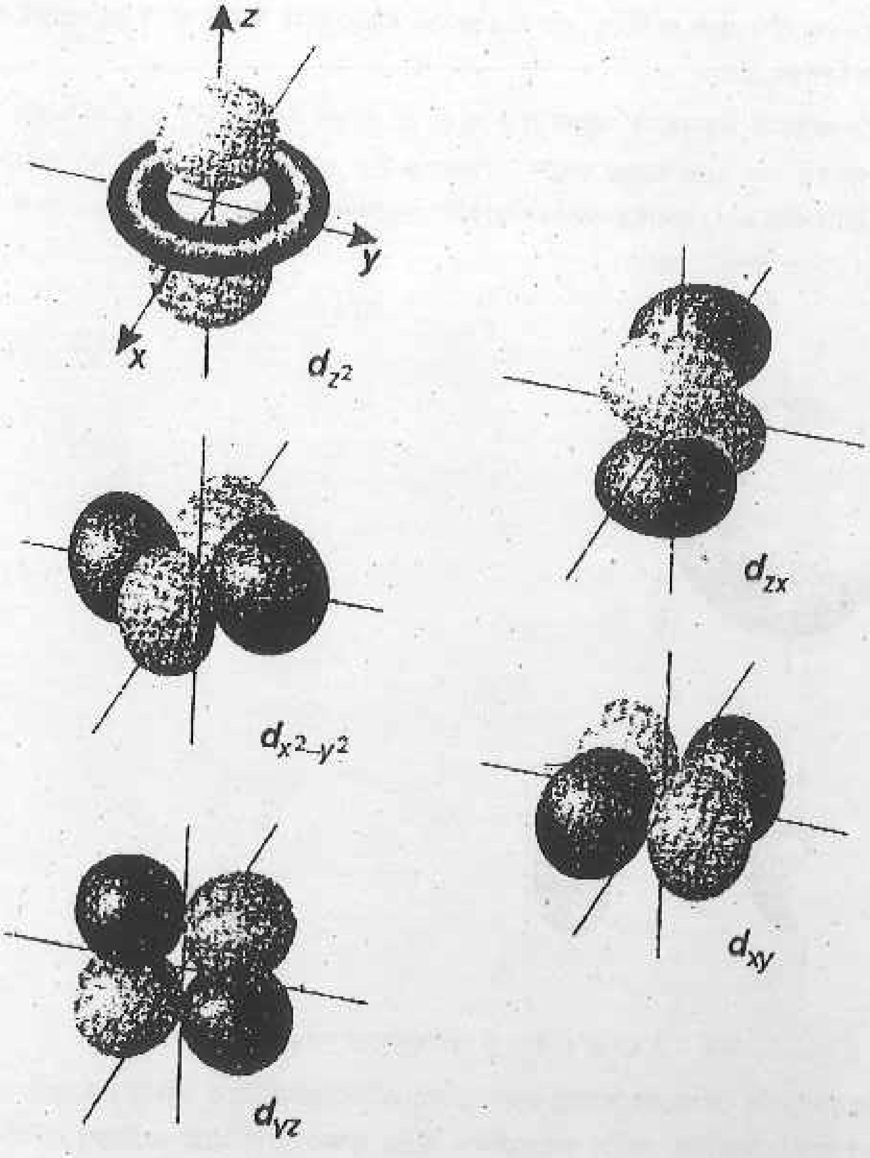
একটি s ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতা θ ও ϕ এর মানের উপর নির্ভর করে না অর্থাৎ তা দিক নিরপেক্ষ। সুতরাং যে তল দ্বারা আবদ্ধ অংশে s ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা 90 শতাংশ, তার আকৃতি অবশ্যই গোলকীয় হবে। অর্থাৎ s কক্ষকের আকৃতি গোলকাকার। কয়েকটি হাইড্রোজেন সদৃশ কক্ষকের আকৃতি চিত্র (3.17) তে প্রদর্শিত হল।



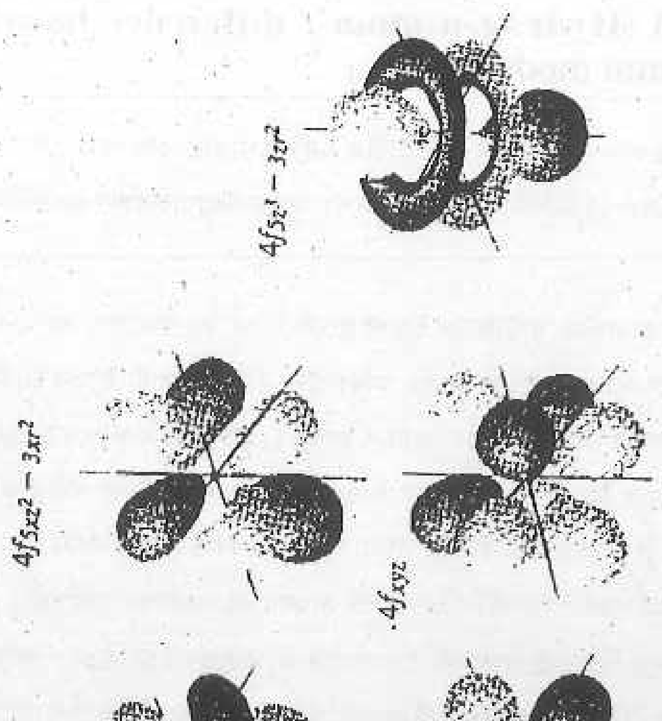
চিত্র : 3.17(a) s এবং p কক্ষকসমূহের আকৃতি

প্রসঙ্গত বলে রাখা ভাল যে অনেক সময়ই কক্ষকগুলির কৌণিক লেখচিত্রকে কক্ষকের আকৃতি বলা হয়। এটি সম্পূর্ণ ভুল। তবে রাসায়নিক বন্ধনীর আলোচনায় বিভিন্ন কক্ষকগুলির মধ্যে সংমিশ্রণ ও অভিলেপন বোঝাতে উহাদের কৌণিক লেখচিত্র বা কৌণিক সম্ভাব্যতা লেখচিত্র ব্যবহার করা হয়। কারণ বন্ধনী গঠনে দুটি

কক্ষকের মধ্যে কোন দিক বরাবর অভিলেপন হচ্ছে তা খুব গুরুত্বপূর্ণ। এক্ষেত্রে কক্ষকের প্রকৃত আকৃতির বিশেষ প্রয়োজন বা ব্যবহার হয় না। সুতরাং আলোচনায় অনেক সময়েই কক্ষকের কৌণিক লেখচিত্র বা কৌণিক সম্ভাব্যতা লেখচিত্রকে সাধারণভাবে কক্ষকের আকৃতি বলা হয়। চিত্র (3.17) এ বিভিন্ন কক্ষকের আকৃতি দেখানো হল।



চিত্র : 3.17(b) বাস্তব d কক্ষকসমূহের আকৃতি সমূহ



চিত্র : 3.17(c) বাস্তব f কক্ষকসমূহের আকৃতি

3.17 হাইড্রোজেন পরমাণু : বোরের প্রতিরূপ ও কোয়ান্টাম চিত্রের মধ্যে পার্থক্য (Hydrogen atom : difference between Bohr and quantum models)

বোরের তত্ত্বে ধারণা করা হয় যে ইলেকট্রনটি বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত হচ্ছে। ইলেকট্রনের গতিপথটি (Trajectory) নির্দিষ্ট এবং কোন বিশেষ সময়ে উহার অবস্থান একটি নির্দিষ্ট স্থানাঙ্ক দ্বারা চিহ্নিত করা যায়।

অপরপক্ষে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় ইলেকট্রনের তরঙ্গ অপেক্ষকের বর্গ কোন স্থানে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা সূচক। হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী ইলেকট্রনটির কোন গতিপথ নির্দিষ্ট করা সম্ভব নয়। সুতরাং বোরের তত্ত্বের অনুরূপ কোন ইলেকট্রনীয় কক্ষপথের ধারণা অবাস্তব। যদি সত্যই ইলেকট্রনটি প্রয়োগকৃত অর্থে কোন কক্ষপথে আবর্তন করত, তাহলে উহার গতির অভিমুখে উহার অবস্থানের সম্ভাব্যতা অর্থাৎ $|\psi|^2$ এর মান সময়ের সাথে বদ্ধিপেত। কিন্তু আমরা জানি যে $|\psi|^2$ সময় নিরপেক্ষ। $|\psi|^2$ এর সম্ভাব্যতা ব্যাখ্যা ইলেকট্রনটির নির্দিষ্ট গতিপথের অস্তিত্বের পরিপন্থী। সুতরাং স্বাভাবিকভাবেই প্রশ্ন ওঠে যে পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনটি প্রকৃতপক্ষে কী করছে? ইহা কিভাবে গতিশীল? বস্তুত কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় এই প্রশ্ন অর্থহীন। কারণ হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী কোন কণার গতিপথ সুনিশ্চিতভাবে নির্ণেয় নয়। কিন্তু যদি কোন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনটির বিভিন্ন সময়ে অবস্থান পরীক্ষা দ্বারা নির্ণয় করা সম্ভব হত, তাহলে দেখা যেত যে কোন সময়ে ইলেকট্রনটি যেখানে রয়েছে পরমুহূর্তে তার অবস্থান হয়ত বদলে গেছে। আবার তার পরমুহূর্তে হয়ত বা ইলেকট্রনটি অন্য কোথাও রয়েছে। অর্থাৎ ইলেকট্রনটির অবস্থান সময়ের সাথে সাথে পরিবর্তিত হয়, যদিও কোন সময় এটি কোথায় থাকবে তা নিশ্চিত কোন পূর্বাভাস সম্ভব নয়। কোয়ান্টাম বলবিদ্যা অনুযায়ী ইলেকট্রনটি এই অর্থে গতিশীল।

আমরা জানি যে ইলেকট্রনের কক্ষকের চরম মানের বর্গ কোন স্থানে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা সূচক। গণনার সাহায্যে দেখানো যায় যে $n = 1$ হলে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সর্বাধিক সম্ভাব্যতা কেন্দ্রক হতে বোর প্রতিরূপের প্রথম কক্ষের ব্যাসার্ধের সমান দূরত্বে অনুরূপভাবে প্রমাণ করা যায় যে 2p এবং 3d অবস্থার অরীয় সম্ভাব্যতা ঘনত্ব সর্বাধিক হয়, যখন r এর মান যথাক্রমে $n = 2$ এবং $n = 3$ বোর কক্ষপথগুলির ব্যাসার্ধের সমান হয়।

বোর প্রতিরূপে বর্নিত কক্ষের সাথে ইলেকট্রনের কক্ষকের যোগসূত্র এইটুকুই। ইহা ব্যতীত শব্দদুটির ধ্বনিগত সাদৃশ্য ভিন্ন অন্য কোনরূপ সম্পর্ক নেই।

3.18 বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর কক্ষক (Many electron atomic orbital)

বহু-ইলেকট্রনীয় পরমাণুর জন্য শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণটির সমাধান পদ্ধতি অত্যন্ত জটিল। কোন পরমাণুতে একাধিক ইলেকট্রন থাকলে ঐ পরমাণুর কক্ষকগুলিকে হাইড্রোজেন পরমাণুর কক্ষকের ন্যায় সঠিকভাবে কোন রূপ বৈশ্লেষিক ব্যঞ্জকের (analytical expression) দ্বারা প্রকাশ করা সম্ভব নয়। বহু-ইলেকট্রনীয় কক্ষকগুলি সকল ইলেকট্রনের স্থানাঙ্ক সমূহের অত্যন্ত জটিল অপেক্ষক। আমরা ধরে নেব যে একটি বহু-ইলেকট্রনীয় পরমাণুর প্রতিটি ইলেকট্রনের অবস্থা এক একটি তরঙ্গ অপেক্ষক বা কক্ষক দ্বারা নির্দেশিত হয়। এহেন কোন একটি ইলেকট্রনের কক্ষক ঐ ইলেকট্রনটিরই স্থানাঙ্কের উপর নির্ভর করে এবং এই কক্ষকটি হাইড্রোজেনের কক্ষকের অনুরূপ। কেবলমাত্র পারমাণবিক ক্রমাঙ্ক z তথা কেন্দ্রীয় আধানটি অন্য একটি কার্যকরী কেন্দ্রীয় আধান Z^* (effective nuclear charge) দ্বারা প্রতিস্থাপিত হয়েছে।

প্রকৃতপক্ষে একটি বহু-ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে একটি ইলেকট্রন কেবলমাত্র কেন্দ্রীয় আকর্যণ বলেরই ক্রিয়াধীন নয়, অন্যান্য সমাধান বিশিষ্ট ইলেকট্রন সমূহের জন্য বিকর্ষণ বলেরও প্রভাবাধীন। কোন ইলেকট্রনের উপর ক্রিয়াশীল মোট বিকর্ষণ বলের প্রভাবকে, ইলেকট্রনটির উপর ক্রিয়াশীল কেন্দ্রীয় আধানমাত্রার কার্যকারী হ্রাস হিসাবে সন্নিকর্ষ করা যায়। এই হ্রাস প্রাপ্ত কার্যকারী কেন্দ্রীয় আধান Z^* হলে

$$Z^* = Z - \sigma$$

σ কে আচ্ছাদনী ধ্রুবক (Screening constant) বলা হয়। কোন ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে এই σ ধ্রুবকটির মান বিজ্ঞানী স্লাটার (slater) প্রবর্তিত সূত্রাবলীর দ্বারা নির্ণয় করা যায়।

বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর ইলেকট্রনগুলি সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থার আউফবাউ নীতি অনুযায়ী বিভিন্ন কক্ষকে বিন্যস্ত থাকে। এ বিষয়ে বিশদ আলোচনা পূর্ববর্তী এককে (2.11) করা হয়েছে।

3.19 একমাত্রিক সমঞ্জস কম্পক (One-dimensional harmonic oscillator)

কোয়ান্টাম পদার্থবিদ্যার বিভিন্ন গুরুত্বপূর্ণ ক্ষেত্রে সমঞ্জস কম্পক প্রতিরূপ হিসাবে ব্যবহৃত হয়। আণবিক বর্ণালীর আলোচনার সময় আমরা আণবিক কম্পনের প্রতিরূপ হিসাবে সমঞ্জস কম্পক ব্যবহার করব।

x-অক্ষ বরাবর গতিশীল একটি কণা যদি মূলবিন্দু হতে উহার সরণের সমানুপাতী এবং মূলবিন্দুমুখী কোন বলের অধীন হয়, তাহলে ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যায় কণাটিকে একটি একমাত্রিক সমঞ্জস কম্পক বলা হয়। কণাটির উপর ক্রিয়াশীল বল যদি F(x) হয়। তাহলে

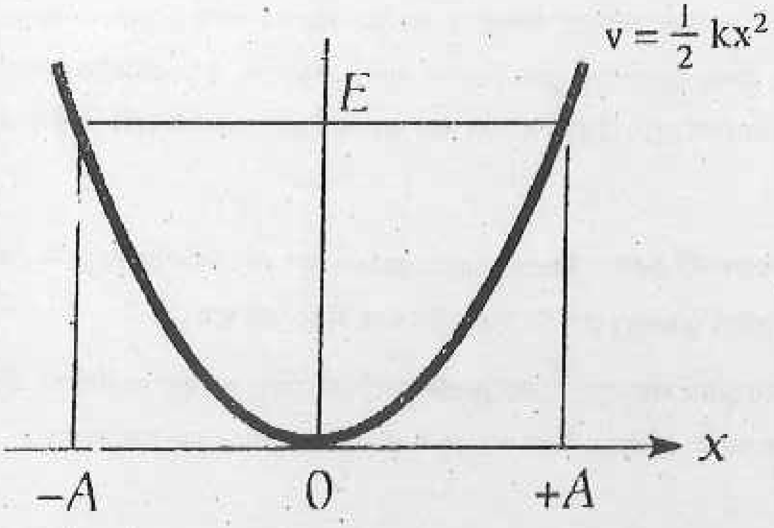
$$F(x) \propto (-x)$$

$$\text{বা } F(x) = -kx \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3.98)$$

এই সূত্রটিকে হুকের সূত্র (Hooke's Law) বলে। k হচ্ছে সমানুপাতী ধ্রুবক। একে বল-ধ্রুবক (Force constant) বলা হয়। এহেন একটি কণার উপর ক্রিয়াশীল বিভব V(x) হচ্ছে।

$$V(x) = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mw^2x^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3.99)$$

যেখানে m হচ্ছে কণাটির ভর এবং w হচ্ছে উহার কৌণিক বেগ ; $w = 2\pi\upsilon$, যেখানে υ কণাটির কম্পাঙ্ক। V(x) বিভবটি অধিবৃত্তাকার (চিত্র 3.18)।



চিত্র : 3.18 : একমাত্রিক সুসমঞ্জস কম্পকের বিভব

ধ্রুপদী বলবিদ্যা অনুযায়ী কণাটির মোট শক্তি $E = \frac{1}{2}kx_0^2$, যেখানে x_0 মূলবিন্দু থেকে কণাটির সর্বাধিক সরণ। সুতরাং একটি ধ্রুপদী সমঞ্জস কম্পক x_0-র মানের উপর নির্ভর করে যে কোন শক্তি সম্পন্ন হতে পারে। অর্থাৎ ধ্রুপদী পদার্থবিদ্যার এহেন একটি কম্পকের মোট শক্তির মান অন্য কোন শর্ত সাপেক্ষ নয়।

কোন কোয়ান্টাম সমঞ্জস কম্পকের মোট শক্তি নির্ণয় করতে হলে এই তন্ত্রের জন্য শ্রোডিঙ্গার সমীকরণটি সমাধান করতে হবে। এমন একটি কণার ক্ষেত্রে হ্যামিলটোনিয়ান সংকারকটি হবে

$$H = \frac{\hat{p}_x^2}{2m} + \hat{V}(x)$$

$$= -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2 \qquad \text{............(3.100)}$$

এই সময় নিরপেক্ষ সমীকরণটি হবে

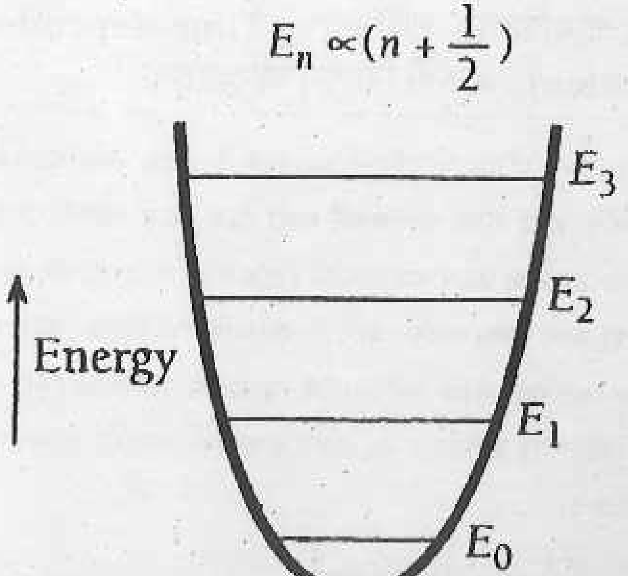
$$H\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2\psi = E\psi \qquad \text{............(3.101)}$$

এখানে E হচ্ছে কম্পকটির মোট শক্তি এবং $\psi \equiv \psi(x)$ হচ্ছে কম্পকটির তরঙ্গ অপেক্ষক।

(3.101) সমীকরণটির সমাধান পদ্ধতিটি বেশ জটিল। এই সমীকরণটি সমাধান করলে মোট শক্তি E-র যে মান পাওয়া যাবে তা হল,

$$E = \left(v + \frac{1}{2}\right)h\upsilon \qquad \text{............(3.102)}$$

যেখানে v একটি কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং v = 0, 1, 2, 3 (চিত্র 3.19)



চিত্র : 3.19 : একমাত্রিক সুসমঞ্জস কম্পকের কয়েকটি শক্তিস্তর

সমীকরণ (3.102) হতে বোঝা যায় যে মোট শক্তি E-র মাত্র কয়েকটি নির্দিষ্ট মানই সম্ভব। ধ্রুপদী কম্পকের মধ্যে কোয়ান্টাম কম্পকের যে কোন মান হতে পারে না। আবার কোয়ান্টাম কম্পকের মোট শক্তি E কখনও শূন্য হতে পারে না। সর্বনিম্ন শক্তিস্তর v = 0 তে E এর মান

$$E = \frac{1}{2} h\upsilon \qquad \text{............(3.103)}$$

E_0 কে শূন্যাংক শক্তি (Zero point energy) বলা হয়। অর্থাৎ সর্বনিম্ন শক্তিস্তরেও কম্পকটির কম্পনগতি অব্যাহত থাকে এবং কম্পকটি কখনই স্থির অবস্থায় থাকতে পারে না। শূন্যাংক শক্তির অস্তিত্ব হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ, কারণ কোন কম্পকের মোট শক্তি শূন্য হওয়া মানে কম্পটির স্থিরাবস্থায় x = 0 অর্থাৎ মূলবিন্দুতে অবস্থিত। সেক্ষেত্রে কম্পকটির অবস্থান নিশ্চিতভাবে জানা আছে। আবার কম্পকটির স্থিতিশক্তি এবং গতিশক্তি উভয়েই ধনাত্মক হওয়ায় ($V_{(x)} = \frac{1}{2}kx^2$ এবং গতিশক্তি $= \frac{p_x^2}{2m}$), E = 0 হলে v(x) এবং p_x উভয়ের মানই শূন্য হবে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে p_x ও নিশ্চিতভাবে জ্ঞাত। ইহা অনিশ্চয়তা নীতির পরিপন্থী। সুতরাং কম্পকটির মোট শক্তির মান কখনই শূন্য হতে পারে না।

3.20 সময়নির্ভর শ্রোয়ডিঙ্গার সমীকরণ (Time-dependent Schrodinger equation) : একটি বিশেষ আলোচনা

কোন কোয়ান্টাম তন্ত্রের বিভব V যদি সময়নির্ভর হয় তবে ঐ তন্ত্রের তরঙ্গ অপেক্ষকটিও সময়নির্ভর হবে। এক্ষেত্রে যদি কোন একটি সময়ে তরঙ্গ অপেক্ষকটি জানা থাকে, তবে পরবর্তী যে কোন সময়ে সময়-নির্ভর শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের সাহায্যে তরঙ্গ অপেক্ষকটি নির্ণয় করা যাবে। অর্থাৎ প্রারম্ভিক সময়ে তথা t = 0 তে কোন তন্ত্রের অবস্থা জানা থাকলে তার পরবর্তী গতিবিধি সময়নির্ভর শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ দ্বারা নির্ণীত হবে। এই সময় নির্ভর শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণটিই কোয়ান্টাম বলবিদ্যার মৌলিক গতীয় সমীকরণ (Equation of motion)। কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় এর গুরুত্ব ও ভূমিকা সনাতনী বলবিদ্যার নিউটনের সূত্রের অনুরূপ। এই সমীকরণটি নিম্নরূপ।

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right] + V\phi = i\hbar\frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad \text{............(3.104)}$$

যেখানে $\phi = \phi(x, y, z, t)$ এবং $V = v(x, y, z, t)$

তরঙ্গ অপেক্ষক ϕ সর্বদা একটি কাল্পনিক রাশি (Imaginary Variable/function) এবং $|Q|^2$ t সময়ে x, y, z স্থানাঙ্কে কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

যদি কোন তন্ত্রের ক্ষেত্রে V সময়নিরপেক্ষ হয় (যেমন হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে), তাহলে তন্ত্রটির মোট শক্তি E ও সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকে অর্থাৎ ধ্রুবক হয়। সেক্ষেত্রে $\phi = \phi\,(x, y, z, t)$ কে একটি সময়নির্ভর এবং একটি স্থাননির্ভর উৎপাদকে বিশ্লিষ্ট করা যায়। এক্ষেত্রে সময়নির্ভর উৎপাদকটি সর্বদা $e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ হয়। অর্থাৎ ϕ কে লেখা যায়

$$\psi = \psi\,(x, y, z, t) = \psi\,(x, y, z)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.105)$$

যেখানে $\psi(x, y, z)$ হল স্থান নির্ভর তরঙ্গ অপেক্ষক।

এক্ষেত্রে লক্ষ্যণীয় যে

$$|Q|^2 = |\,\psi\,(x, y, z)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\,|^2$$

$$= |\,\psi^* e^{+\frac{iEt}{\hbar}}\, \psi\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\,|$$

$$= |\,\psi\,(x, y, z)\,|^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(3.106)$$

অর্থাৎ $|\psi|^2$ এবং $|\psi|^2$ $(\psi = \psi(x, y, z))$ একই সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। (3.105) তে দেখা যায় যে ψ অবশ্যই একটি কাল্পনিক রাশি কারণ এর সময় নির্ভর উৎপাদকটিতে $i\,(=\sqrt{-1})$ উপস্থিত। কিন্তু $|\,\psi\,|$ কাল্পনিক হতে পারে। কিন্তু $|\phi|^2$ এবং $|\psi|^2$ সর্বদাই একই সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

(3.104) সমীকরণে $\phi = \psi\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ বসিয়ে পাই।

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right] + V\psi\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}} = i\hbar\,\frac{\partial(\psi e^{-iEt/\hbar})}{\partial t}$$

$$\text{বা}\ \left(e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\right) - \frac{\hbar^2}{2m}\cdot\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right] + e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\, V\psi \qquad \ldots\ldots\ldots(3.107)$$

$$= E\psi\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

(এখানে $V = V(x, y, z)$ অর্থাৎ V সময় নিরপেক্ষ।)

$$বা \quad -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \left[\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right] + V\psi = E\psi \qquad ....(3.107)$$

ইহাই সময়নিরপেক্ষ শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ, যা আমরা পূর্বে আলোচনা করেছি। (3.107) এবং (3.25) সমীকরণ দুটি অভিন্ন। অর্থাৎ কোন কোয়ান্টাম তন্ত্র সময় নিরপেক্ষ হলে, (3.104) সমীকরণটির পরিবর্তে অধিকতর সরল (3.107) সমীকরণটির দ্বারা তন্ত্রটির শক্তি এবং তরঙ্গ অপেক্ষক নির্ণয় করতে পারি। এক্ষেত্রে সম্পূর্ণ তরঙ্গ অপেক্ষক ϕ এর পরিবর্তে কেবল স্থান নির্ভর অপেক্ষক ψ দ্বারাই তন্ত্রটির অবস্থা প্রকাশ করা যায়। কারণ $|\phi|^2$ এবং $|\psi|^2$ একই সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

3.21 সারাংশ

পূর্ববর্তী দ্বিতীয় এককে আমরা দেখেছি যে আলোর কণা ধর্ম বর্তমান। আলোর সকল ধর্ম এবং প্রকৃতি করতে গেলে আলোর তরঙ্গরূপের সঙ্গে কণাধর্মেরও অবতারণা প্রয়োজন হয়। দ্য ব্রয় আলোর এই দ্বৈত চরিত্র বস্তুকণার ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করেন। দ্য ব্রয়ের তত্ত্বানুযায়ী যে কোন গতিশীল বস্তুকণার তরঙ্গ ধর্ম বর্তমান। তবে কেবলমাত্র ইলেকট্রনের ন্যায় ক্ষুদ্র কণাসমূহের ক্ষেত্রেই এই তরঙ্গধর্মের প্রকাশ লক্ষ্য করা যায়। কোন ভারীকণার ক্ষেত্রে কণাটির তরঙ্গ দৈর্ঘ্য তার আকৃতির তুলনায় অতি নগণ্য।

বস্তুতরঙ্গের প্রকৃতি আমাদের পরিচিত তরঙ্গসমূহ যথা, আলোকতরঙ্গ বা শব্দ তরঙ্গের প্রকৃতি থেকে আলাদা। বস্তুত কেবলমাত্র কোন নির্বাধ কণা ব্যতীত অন্য কোন আবদ্ধ তন্ত্রের সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গের কোন একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্ক তরঙ্গদৈর্ঘ্য থাকে না। অর্থাৎ এহেন তন্ত্রের বস্তুতরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিশ্চিতরূপে নির্ণয় নয়। সুতরাং দ্য ব্রয়ের তরঙ্গ-কণা দ্বৈধ তত্ত্বানুযায়ী কণাটির ভরবেগও কিছু পরিমাণে অনিশ্চিত। ভরবেগের এই অনিশ্চয়তার পরিমাণ কণাটির অবস্থানের অনিশ্চয়তার উপর নির্ভরশীল। হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির মূল বক্তব্য।

কোন বস্তুতরঙ্গকে একটি জটিল তরঙ্গ অপেক্ষক দ্বারা প্রকাশ করা যায়। যেহেতু তরঙ্গ অপেক্ষকটিতে সর্বদা জটিল রাশি $i = \sqrt{i-1}$ বর্তমান। সুতরাং এই অপেক্ষকটি কোন ভৌত রাশিকে প্রকাশ করতে পারে। এই অপেক্ষকটি চরমানের বর্গ কোন স্থানে সংশ্লিষ্ট কণাটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। এই বস্তুতরঙ্গ তথা কণাটির আচরণ নির্ধারিত হয় শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণ দ্বারা। কোন তন্ত্রের জন্য

শ্রোডিঙ্গার তরঙ্গ সমীকরণের সমাধান করলে আমরা তন্ত্রটির তরঙ্গ অপেক্ষক এবং সম্ভাব্যশক্তির মান জানতে পারি। কোন তন্ত্রের অবস্থা নির্দেশক তরঙ্গ অপেক্ষকটিকে অবশ্যই সদাচারী হতে হবে।

কোন নির্বাধ কণার ক্ষেত্রে শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান করলে দেখা যায় যে কণাটির শক্তি কোয়ান্টায়িত নয়, কণাটির কোন শক্তি ধারণ করতে পারে। কিন্তু কোন আবদ্ধ তন্ত্রের ক্ষেত্রে শক্তি কোয়ান্টায়িত হয়। যথা পেটিকা বিভবের অধীন কোন কণা বা কোন সুসমঞ্জস কম্পক কেবলমাত্র কয়েকটি নির্দিষ্টমানের শক্তিস্তরেই থাকতে পারে। এই সকলতন্ত্রের একটি বিশেষ বৈশিষ্ট হল যে এদের ক্ষেত্রে মোট শক্তির মান কখনও শূন্য হতে পারে না। এটা হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির পরিপন্থী। একমাত্রিক আবদ্ধ তন্ত্র যথা একমাত্রিক বিভব পেটিকাধীন কোন কণার সব শক্তিস্তরগুলি অনপজাত। কিন্তু বহুমাত্রিক তন্ত্রের ক্ষেত্রে কোন কোন শক্তিস্তরের মধ্যে অপজাতীয়তা লক্ষ্য করা যায়।

হাইড্রোজেন পরমাণুর জন্য শ্রোডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান করলে আমরা ইলেকট্রনের কক্ষক সমূহ এবং সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তরগুলি জানতে পারি। এক্ষেত্রে কুলম্বীয় বিভবটির গোলকীয় প্রতিসমতার জন্য গোলকীয় ধ্রুবীয় নির্দেশতন্ত্রে শ্রোডিঙ্গার সমীকরণের সমাধান সুবিধাজনক। এই সমাধান চররাশি পৃথকীকরণ পদ্ধতিতে করা হয়। কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় হাইড্রোজেন পরমাণুর যে চিত্র পাওয়া যায় তা বোরের প্রতিরূপ থেকে সম্পূর্ণ পৃথক। বোরের রূপকল্পের ন্যায় ইলেকট্রনের কোন নির্দিষ্ট কক্ষপথের কল্পনা বাস্তবসম্মত নয়। এটা হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতির পরিপন্থী।

বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুর কক্ষকসমূহ হাইড্রোজেন পরমাণুর অনুরূপ কক্ষকগুলি সদৃশ। তবে এক্ষেত্রে কক্ষকের শক্তি মুখ্য এবং আজিমুথাল কোয়ান্টাম সংখ্যা উভয়ের উপর নির্ভরশীল। বহু ইলেকট্রনীয় পরমাণুতে ইলেকট্রন সজ্জা সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় আউফবাউ নীতি মেনে হয়।

3.22 প্রশ্নাবলী

(1) 1.6×10^{-13} J শক্তিসম্পন্ন একটি মুক্ত ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত হবে?

(2) 250 g ভরের একটি বলের অবস্থানের অনিশ্চয়তা 500 nm। বলটির নির্ণীত গতিবেগ 2500 cm s^{-1} হলে, এই গতিবেগ বাস্তবিক কতখানি সঠিক? এ বিষয়ে আপনার মন্তব্য কী?

(3) কোন বস্তুকণার সংশ্লিষ্ট তরঙ্গ অপেক্ষকটির দ্বারা কণাটির কোন ভৌত ধর্ম প্রকাশ করা সম্ভব নয় কেন?

(4) L দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট একটি একমাত্রিক অসীম বিভব সম্পন্ন পেটিকায় একটা কণা আবদ্ধ আছে। কণাটির ন্যূনতম ভরবেগ p হলে L এর মান p এর দ্বারা প্রকাশ করুন। আপনার উত্তরের স্বপক্ষে যুক্তি দিন।

(5) একটি একমাত্রিক বিভবপেটিকা ও সমদৈর্ঘ্য সম্পন্ন একটি সুষম দ্বিমাত্রিক বিভবপেটিকায় দুটি অভিন্ন প্রকৃতির কণা আবদ্ধ আছে। এই দুইক্ষেত্রে কণাগুলির শক্তিস্তরের প্রকৃতির মধ্যে প্রধান তফাৎ কী?

(6) প্রমাণ করুণ যে হাইড্রোজেন পরমাণুস্থিত ইলেকট্রনের কোন স্থানে অবস্থানের সম্ভাব্যতা m কোয়ান্টাম সংখ্যার উপর নির্ভরশীল নয়।

(7) একটি একমাত্রিক সুসমঞ্জস কম্পককে v = 0 শক্তিস্তর থেকে v = 1 স্তরে উন্নীত করতে 3000 cm^{-1} তরঙ্গ সংখ্যার আলো প্রয়োজন হয়। কম্পকটির কম্পনের তরঙ্গ সংখ্যা কত?

(8) কক্ষ ও কক্ষকের মধ্যে সাদৃশ্য কতখানি?

(9) 3d কক্ষকে কৌণিক নিপন্দ ও অরীয় নিস্পন্দের সংখ্যা কত?

(10) $y = Cos^{-1}x$ এই অপেক্ষকটি (–1, 1) সীমার মধ্যে একটি গ্রহণযোগ্য সদাচারী অপেক্ষক কিনা তা যুক্তি সহকারে ব্যাখ্যা করুন।

1.23 উত্তরমালা

1. মুক্ত ইলেকট্রনের ভরবেগ $p = \sqrt{2mE}$

ইলেকট্রনের ভর $m = 9.1 \times 10^{-31}$

$$\text{তরঙ্গদৈর্ঘ্য} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6.62 \times 10^{-34}\ J.\ S}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31}\ kg \times 1.6 \times 10^{-63}\ J}}$$

$$= 3.9 \times 10^{-11} m$$

2. $\Delta x = 500\ nm = 500 \times 10^{-9}\ m$

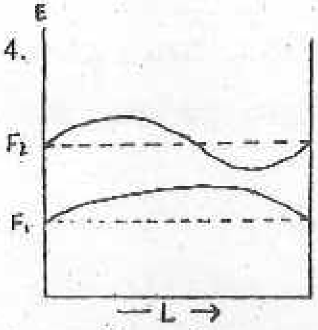
$$\text{গতিবেগের অনিশ্চয়তা} = \frac{6.62 \times 10^{-34}\ JS}{250 \times 10^{3}\ kg \times 500 \times 10^{-9}\ m}$$

$$= 5.296 \times 10^{-27}\ m\ s^{-1}$$

2500 cm s^{-1} গতিবেগের সাপেক্ষে এই অনিশ্চয়তা মাত্র $\frac{5.296 \times 10^{-27}}{2500 \times 10^{-2}} \times 100\%$

বা 2×10^{-30} % বাস্তবে এত ক্ষুদ্র অনিশ্চয়তা পরিমাপ যোগ্য নয়। সুতরাং কণাটির গতিবেগ পরিমাপে অন্য কোন ত্রুটি না থাকলে এটাই কণাটির প্রকৃত গতিবেগ।

3. কারণ তরঙ্গ অপেক্ষকটি সর্বদা একটি জটিল রাশি।

4. 

এক্ষেত্রে একটি তন্ত্র সুস্থিত হতে হলে কণাটির তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda = \frac{2L}{n}$ হতে হবে। কণাটির p নূন্যতম হয়, n = 1 অর্থাৎ সর্বনিম্ন শক্তিস্তরে। সেক্ষেত্রে $\frac{\lambda}{2}$ হবে। আবার $\lambda = \frac{h}{p}$;

সুতরাং $L = \frac{h}{2p}$ ।

5. একমাত্রিক পেটিকার ক্ষেত্রে শক্তিস্তরগুলি অনপজাত। দ্বিমাত্রিক পেটিকার ক্ষেত্রে কোন কোন শক্তিস্তরে অপজাতীয়তা আছে।

6. ইলেকট্রনটির তরঙ্গ অপেক্ষকের $\Phi(\phi)$ অপেক্ষকটি একমাত্র m_l উপর নির্ভর করে। $\Phi(\phi)$ অপেক্ষকটির ব্যঞ্জক নিম্নরূপ।

$$\Phi(\phi) = Ae^{\pm i m_l \phi} \text{ ; A ধ্রুবক}$$

এখন $$\int_0^{2\pi} \Phi^*(\phi)\, \Phi(\phi)\, d\phi = |A|^2$$

সুতরাং ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা m_l এর মানের উপর নির্ভর করে না।

7. $E_V = \left(V + \frac{1}{2}\right)h\upsilon$; কম্পকটির কম্পাঙ্ক υ।

V = 0 থেকে V = 1 উন্নীত হবে। প্রয়োজনীয় শক্তি

$$\Delta E = E_{V=1} - E_{V=0} = 1\tfrac{1}{2}\, h\upsilon - \tfrac{1}{2}\, h\upsilon = h\upsilon$$

কম্পকটির তরঙ্গ সংখ্যা $\bar{\upsilon}$ হলে, $\Delta E = hc\bar{\upsilon}$ এখন শোষিত ফোটনের শক্তি $hc\bar{\upsilon}$ হতে হবে।

সুতরাং $3000\, hc = hc\bar{\upsilon}$ $\therefore \bar{\upsilon} = 300\ cm^{-1}$

8. 3.18 দ্রষ্টব্য।

9. 2 টি কৌণিক নিস্পন্দ আছে এবং কোন অরীয় নিস্পন্দ নেই।

10. না, কারণ অপেক্ষকটি একমানী নয়।

একক 4 □ রাসায়নিক বন্ধনী : আয়নীয় ও সমযোজী বন্ধনী (Chemical bonds : Ionic and Covalent bonds)

গঠন

4.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

4.2 রাসায়নিক বন্ধনী :

4.2.1 রাসায়নিক বন্ধনীর প্রকৃতি

4.2.2 রাসায়নিক বন্ধনীর ইলেকট্রনীয় তত্ত্ব

4.3 তড়িৎযোজনা এবং তড়িৎযোজী বন্ধনী :

4.3.1 তড়িৎযোজ্যতার শর্ত

4.3.2 একই মৌলের একাধিক তড়িৎযোজনা

4.4 আয়নীয় ব্যাসার্ধ

4.4.1 আয়নীয় ব্যাসার্ধের ভিন্নতা ও তার কারণ

4.4.2 বহুপরমানুক আয়নের ব্যাসার্ধ

4.5 ব্যাসার্ধ অনুপাতও কেলাস সর্বগাংক বা সন্নিবেশ সংখ্যা

4.6 আয়নীয় পদার্থের গঠন ও কেলাসাকৃতি

4.7 জালকশক্তি ও বর্ণ-হ্যাবের সমীকরণ

4.7.1 বর্ণ-হেবার চক্র

4.7.2 বর্ণ হেবার চক্রের উপযোগিতা

4.8 আয়নীয় বন্ধনীর সমযোজী চরিত্র

4.8.1 মেরুকরণ বা ধ্রুবণ এবং ধ্রুবণশীলতা

4.8.2 আয়নীয় বন্ধনীর সমযোজী চরিত্রের ব্যাখ্যা

4.8.3 ফাজানের সূত্রাবলী

4.8.4 মেরুকরণের প্রভাব

4.9 সমযোজ্যতা এবং সমযোজী বন্ধন

4.10 অসমযোজ্যতা এবং অসমযোজী বন্ধন

4.11 যোজ্যতাবর্ষীয় ইলেকট্রন জোড় বিকর্ষণ তত্ত্ব

4.11.1 যোজ্যতাকর্ষীয় ইলেকট্রন জোড় বিকর্ষন তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা

4.12 যোজ্যতা বন্ধনীর আয়নীয় চরিত্র, ধ্রুবীয়তা বা মেরুধর্মীতা

4.13 সমযোজী পদার্থ ও তড়িৎযোজী পদার্তের ধর্মাবলীর তুলনা

4.14 সারাংশ

4.15 প্রশ্নাবলি

4.16 উত্তরমালা

4.1 প্রস্তাবনা

রসায়নবিদ্যায় কোরান্টাম তত্ত্ব অধ্যয়নের প্রদান উদ্দেশ্য হল রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যা করা। যাহার দ্বারা দুটি অণু কোন অণু বা আয়নীয় জোটে একত্রে গ্রথিত থাকে, তাকে রাসায়নিক বন্ধনী বলে। সাধারণ রাসায়নিক বন্ধনী এবং সমযোজী বন্ধনী। এছাড়া কোন ধাতুতে ধাতুর পরমাণুগুলি পরস্পরের সাথে এক প্রকার সুদৃঢ় বন্ধনী দ্বারা আবদ্ধ থাকে, যাকে ধাতব বন্ধনী বলা হয়। এই এককে আমরা প্রধানত সমযোজী ও তড়িৎযোজী বন্ধনীর গঠন ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যার চেষ্টা করব।

বিজ্ঞানী লুই বা লিউইস (Lewis) এবং কোসেল (Kossel) সর্বপ্রথম রাসায়নিক বন্ধনীর ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের অবতারণা করেন। এই তত্ত্বানুযায়ী পরমাণুর সর্ববহিস্থ কক্ষের এবং তার অব্যবহিত পূর্বের কক্ষের ইলেকট্রন সমূহ বন্ধনী গঠনে অংশগ্রহণ করে। এই ইলেকট্রনগুলিকে যোজ্যতা ইলেকট্রন বলা হয়। আমরা এই এককে যোজ্যতা ইলেকট্রনের সংযোগে রাসায়নিক বন্ধনী গঠন তথা অণুর গঠন আলোচনা করব।

কোন আয়নীয় যৌগে প্রকৃতপক্ষে কোন স্বতন্ত্র অণুর অস্তিত্ব থাকে না। আয়নীয় যৌগগুলি অনেকগুলি বিপরীত তড়িতাধানযুক্ত আয়নের সমন্বয়ে গঠিত হয়। কোন আয়নীয় যৌগের কেলাসে আয়নগুলি জালিকাকারে সুসজ্জিত থাকে। আমরা এই এককে কেলাস জালকের বিষয়ে বিশেষ আলোচনা করব।

সমযোজী বন্ধনী গঠিত হয় ইলেকট্রন জোড় দ্বারা। এই বন্ধনী সংযোগী পরমাণুটির মধ্যে সীমাবদ্ধ থাকে এবং শূন্যে বিশেষ দিকে নির্দেশিত থাকে। সমযোজী যৌগের অনুগুলি একক, স্বতন্ত্র ও বিচ্ছিন্ন অবস্থায় থাকে। সমযোজী বন্ধনীর দিকনির্দেশী (Directional) ধর্ম থাকায় সমযোজী বহু-পরমাণুক অনুগুলি বিভিন্ন আকৃতি বিশিষ্ট হয়। এই আকৃতি নির্ধারণে বন্ধনী গঠনকারী বিভিন্ন ইলেকট্রন জোড়গুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল বিকর্ষণ বলের প্রভাব খুবই গুরুত্বপূর্ণ। আমরা এই এককে ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে সমযোজী বন্ধনী গঠন এবং সমযোজী পদার্থের আণবিক গঠন ব্যাখ্যা করব।

বস্তুত সমযোজী বন্ধনী এবং তড়িৎযোজী বন্ধনী এই দুটি ধারণা রাসায়নিক বন্ধনীর দুটি চরম অবস্থা। একমাত্র সমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমানুক অণুর মধ্যেই প্রকৃত সমযোজী বন্ধনী গঠিত হয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে বন্ধণীর ইলেকট্রন জোড়ের উপর সংযোগী পরমানুর উপর দুটি সংযোগী পরমানুর আকর্ষণ সমান হওয়ায় জোড়টি পরমানু দুটির ঠিক মাঝখানে অবস্থান করে। অন্যান্য ক্ষেত্রে ইলেকট্রন জোড়ের একপেশে অবস্থানের ফলে বন্ধনীটিতে দ্বিধ্রুবীয়তার সৃষ্টি হয়। আবার NaCl এর ন্যায় কিছু আয়নীয় যৌগ বাদ দিলে অন্যান্য ইলেকট্রনপুঞ্জের মেরুকরণের ফলে বেশ কিছুটা সমযোজী চরিত্র আরোপিত হয়। এর ফলে বেশীরভাগ যৌগই আংশিক সমযোজী এবং আংশিক তড়িৎযোজী চরিত্র বিশিষ্ট হয়। আমরা এই এককে বিভিন্ন অণুর আদর্শ সমযোজী এবং আদর্শ তড়িযোজী চরিত্র থেকে বিচ্যুতি এবং অণুগুলির ধর্মের উপর এর প্রভাব ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে আলোচনা করব।

এককথায় বলতে গেলে এই একক অধ্যয়নের উদ্দেশ্য হচ্ছে ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে সমযোজী ও তড়িৎযোজী বন্ধনীর গঠন ও উৎপন্ন পদার্থসমূহের ধর্মাবলীর ব্যাখ্যা।

উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করে আপনি—

- ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে রাসায়নিক বন্ধনীর প্রকৃতি বুঝাতে পারবেন।
- সমযোজী, তড়িৎযোজী ও অসমযোজী বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- সমযোজী, তড়িৎযোজী ও অসমযোজী পদার্থ-সমূহের ধর্মাবলী ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- আদর্শ সমযোজী ও তড়িৎযোজী বন্ধনী থেকে বিচ্যুতির কারণ ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- আংশিক সমযোজী ও আংশিক তড়িৎযোজী পদার্থ-সমূহের ধর্মাবলী বুঝতে এবং ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বন্ধনী ভ্রামক এবং দ্বিমেরু ভ্রামকের উৎপত্তি ব্যাখ্যা এবং পদার্থের ধর্মের উপর এর প্রভাব ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

4.2 রাসায়নিক বন্ধনী (Chemical Bond)

যে আকর্ষণের কারণে দুটি পরমাণু কোন অণুতে (মৌল বা যৌগ) বা আয়ণীয় জোটে একত্রে গ্রথিত থাকে তাকে রাসায়নিক বন্ধনী বলে। যেহেতু রাসায়নিক বন্দনী এক ধরমের আকর্ষণ সুতরাং একে তাপীয় বা যান্ত্রিক শক্তির এককে পরিমাপ করা যেতে পারে। পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে একটি রাসায়নিক বন্ধনীর প্রয়োজনীয় শক্তি বন্ধনী পিছু কয়েক ইলেকট্রন ভোল্ট (eV) বা মৌল প্রতি কয়েকশত কিলো ক্যালরি (K_{cal}) তথা কিলোজুল (kJ) হয়ে থাকে।

1টি রাসায়নিক বন্ধন = 1-10 ইলেকট্রন ভোল্ট (eV)/বন্ধন

= 100 কিলো ক্যালরি (kcal)/মোল

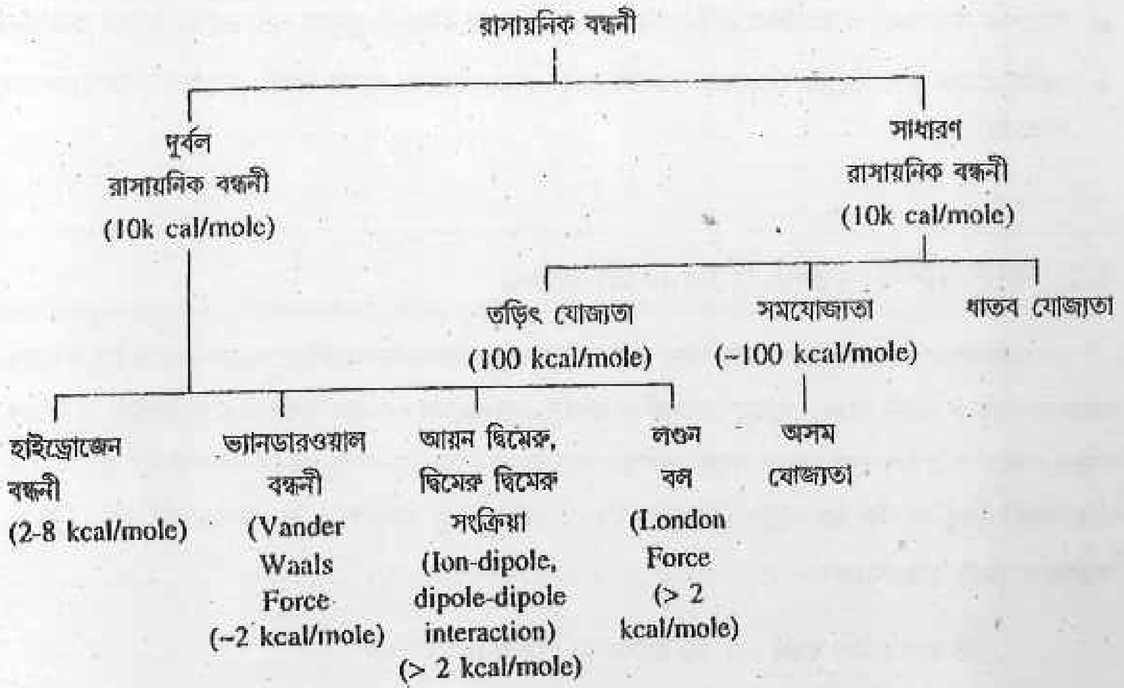
= 500-1000 কিলো জুল (kJ)/মোল

রাসায়নিক বন্ধনী সংক্রান্ত আলোচনার শুরুতেই প্রশ্ন ওঠে পরমাণুগুলির আদৌ রাসায়নিকভাবে সংযুক্ত হবার প্রবণতার কারণ কী? প্রাথমিক উত্তর হিসাবে বলা যায় যে রাসায়নিক সংযোগ গঠনের মাধ্যমে সংশ্লিষ্ট পরমাণুগুলি অধিকতর সুস্থিতি অর্জন করে। পরীক্ষার সাহায্যে প্রমাণিত যে রাসায়নিক সংযোগ গঠিত হলে সংযোগী পরমাণুর সমন্বিত তন্ত্রটি প্রাক্ সংযোগ অবস্থার পরমাণুগুলি অপেক্ষা অধিক সুস্থিত। অর্থাৎ রাসায়নিক বন্ধন গঠিত হলে শক্তি বির্নিগত হয়—এবং তন্ত্রটি অর্থাৎ সংযুক্ত পরমাণুগুলি সমন্বিত অবস্থাটি সুস্থিতি অর্জন করে। যেহেতু

পারমাণবিক গঠনের মূল বিষয় ইলেকট্রনিক বিন্যাস সুতরাং রাসায়নিক বন্ধনী গঠিত হলে সংশ্লিষ্ট পরমাণুগুলির ইলেকট্রন বিন্যাস প্রভাবিত বা পুর্ণবিন্যস্ত হয়ে থাকে। যেহেতু পরমানুর গঠনের সংশ্লিষ্ট উপাদান ইলেকট্রন তথা প্রোটন তাড়িতিক গুণ সম্পন্ন, সুতরাং বলা যায় রাসায়নিক বন্ধনী তাড়িতিক গুণসম্পন্ন। বলা বাহুল্য যে একত্রে গ্রথিত পরমাণুগুলির ইলেকট্রন বিন্যাসের ওপর রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন তথা চরিত্র নির্ভর করে। পরবর্তী অংশে আমরা বিভিন্ন ধরনের রাসায়নিক বন্ধনীর সম্পর্কে জানব।

4.2.1 রাসায়নিক বন্ধনীর প্রকৃতি

বন্ধনীর শক্তির বিচারে রাসায়নিক বন্ধনীকে প্রধানত কয়েকটি ভাগে ভাগ করা যেতে পারে। এগুলি হল—



4.2.1 রাসায়নিক বন্ধনীর ইলেকট্রনীয় তত্ত্ব

পরমাণুর গঠন সংক্রান্ত ইলেকট্রন বিন্যাস সম্পর্কে সুস্পষ্ট ধারণার ভিত্তিতে যোজ্যতার একটি ইলেকট্রনীয় তত্ত্ব পাওয়া যায়। এই তত্ত্বের মূল প্রবক্তা হলেন লিউইস (Lewis) এবং কোসেল (Kossel)। পরবর্তীকালে এই তত্ত্বটিকে পরিবর্ধিত করেন ল্যাঙ্গম্যুর (Langmuir)। এই তত্ত্বের মূল ভিত্তি হল :

- পরমাণুর যোজ্যতার জন্য দায়ী পরমাণুর ইলেকট্রনসমূহ—মূলত সর্ববহিস্থ কক্ষের এবং বিশেষ ক্ষেত্রে সর্ববহিস্থ কক্ষের অব্যবহিত পূর্ববর্তী কক্ষের কয়েকটি ইলেকট্রন এই যোজ্যতার নিয়ন্ত্রক। এগুলি সংশ্লিষ্ট পরমাণুর যোজক ইলেকট্রন বলে পরিচিত (Valance electrons)।

● লক্ষ্য করে দেখা গেছে যে পর্যায়সারণীর প্রান্তে অবস্থিত বর গ্যাস (noble gas) মৌলগুলি সাধারণত রাসায়নিক সংযোগ গঠন করার বিষয়ে উদাসীন। সে কারণে এই পরমানুগুলির ইলেকট্রনীয় বিন্যাস অত্যন্ত সুস্থিত প্রকৃতির বলে মনে করা হয়। এই পরমানুগুলির ইলেকট্রন বিন্যাস লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে এদের যোজ্যতা কক্ষগুলি সম্পৃক্ত। যেমন হিলিয়াম : He এর যোজক কক্ষের ইলেকট্রনীয় বিন্যাস $1s^2$ আবার নিয়ন (Ne) এর যোজক কক্ষের ইলেকট্রনীয় বিন্যাস $2s^2\ 2p^6$; অনুরূপে আরগন (18^{Ar}) বা ক্রিপটন (36^{Kr}) তথা জেনন কিংবা রেডন এর যোজ কক্ষের ইলেকট্রন বিন্যাস যথাক্রমে $3s^23p^6$, $4s^24p^6$, $5s^25p^6$, $6s^26p^6$

$${}_2He \equiv 1s^2$$

$${}_{10}Ne \equiv [{}_2He]\ \underline{2s^22p^6}$$

$${}_{18}Ar \equiv [{}_{10}Ne]\ \underline{3s^23p^6}$$

$${}_{36}Kr \equiv [{}_{18}Ar]\ 3d^{10}\underline{4s^24p^6}$$

$${}_{54}Xe \equiv [{}_{36}Kr]\ 4d^{10}\underline{5s^25p^6}$$

$${}_{86}Rn \equiv [54Xe]\ 4f^{14}5d^{10}\ \underline{6s^26p^6}$$

যেহেতু বর গ্যাসগুলি সাধারণত রাসায়নিক বন্ধন গঠন প্রক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে না সুতরাং এই পরমাণুগুলি যোজক কক্ষের ইলেকট্রন বিন্যাসকে অত্যন্ত সুস্থিত প্রকৃতির তথা আদর্শ বলে গ্রহণ করা যেতে পারে। অর্থাৎ বলা যায় যে রাসায়নিক বন্ধন গঠনের প্রক্রিয়ায় কোন পরমাণু তার নিকটতম নিষ্ক্রিয় মৌলের ইলেকট্রন বিন্যাস অর্জন করে সুস্থিতি লাভ করার চেষ্টা করে। বস্তুত মৌল সমূহের পরমাণুর সুস্থিত ইলেকট্রন বিন্যাসলাভের স্বাভাবিক প্রবণতাই মৌলগুলির রাসায়নিক সক্রিয়তার কারণ। রাসায়নিক বন্ধন আলোচনার সময় আমরা দেখব যে সাধারণ মৌলগুলির (respresentative elements) পরমাণুগুলি নিকটস্থ বর গ্যাস পরমাণুর মত সুস্থিত ইলেকট্রনীয় গঠন লাভের প্রবণতা দেখায়। মৌল সমূহের পরমাণুগুলির যোজক কক্ষে ৪টি ইলেকট্রন রাখার তথা অষ্টক পূর্ণ করার এই প্রবণতাকে অষ্টকসূত্র বলা হয়।

আবার পর্যায় সারণীতে হিলিয়ামের নিকটবর্তী কয়েকটি মৌল হিলিয়ামের মত ইলেকট্রন বিন্যাস অর্থাৎ মাত্র 2টি ইলেকট্রন সহ সুস্থিত বিন্যাস ($1S^2$) অর্জন করার প্রবণতা দেখায়। একে দ্বৈতসূত্র (Rule of Duplet) বলে।

কোন পরমাণু তার ইলেকট্রনীয় বিন্যাসের ওপর নির্ভর করে নিম্নলিখিত যে কোন পদ্ধতিতে সুস্থিতি অর্জন করে।

- যোজ্যতা কক্ষের এক বা একাধিক ইলেকট্রন সরাসরি বর্জন করে ক্যাটায়ন বা যোজ্যতা কক্ষে এক বা একাধিক ইলেকট্রন গ্রহণ করে অ্যানায়ন গঠনের মাধ্যমে রাসায়নিক সংযোগ গঠন।

- অপর কোন পরমাণুর সঙ্গে এক বা একাধিক ইলেকট্রন জোড় যোজ্যতা কক্ষে সাধারণভাবে সমবায়ী ব্যবহারের মাধ্যমে বা ভাগাভাগি করে রাসায়নিক সংযোগ গঠন।

প্রথম ক্ষেত্রে তড়িৎ যোজ্যতা ও দ্বিতীয় ক্ষেত্রে সমযোজ্যতা প্রকাশিত হয়। অসম যোজ্যতা এক বিশেষ ধরণের সমযোজ্যতা বলে মনে করা যায়। ধাতব বন্ধনী যোজ্যতার একটি বিশেষ রূপ একে সাধারণভাবে তড়িৎ যোজ্যতা বা সমযোজ্যতার কোন একটির মধ্যে গণনা করা যায় না। বিশদ আলোচনার সময় আমরা এর সামগ্রিক রূপটি জানব।

দুর্বল রাসায়নিক বন্ধনী মূলত পরমাণু, অণু, আয়নের মধ্যে স্থায়ী বা সাময়িক তড়িৎ আকর্ষণের ফলে সৃষ্টি হয়। এর পরবর্তী এককে (5.14) এ বিষয়ে বিশদভাবে উল্লেখ করা হল।

4.3 তড়িৎ যোজ্যতা একক তড়িৎ যোজী বন্ধনী (Electrovalency and Electrovalent bond)

সুস্থিতি লাভের জন্য কোন পরমাণু সরাসরি ইলেকট্রন গ্রহণ করে এক বা একাধিক আধান যুক্ত অ্যানায়ন কিংবা কোন কোন পরমাণু এক বা একাধিক ইলেকট্রন বর্জন করে ক্যাটায়ন গঠন করে। ভিন্নধর্মী আয়ন গঠনের পরবর্তী পর্যায়ে উপযুক্ত ক্যাটায়ন এবং অ্যানায়ন পরস্পরের সঙ্গে মূলত তড়িৎ আকর্ষণ এর মাধ্যমে সংযুক্ত হয়ে যৌগ গঠন করার প্রক্রিয়াকে তড়িৎ যোজ্যতা বা আয়নীয় যোজ্যতা বলা হয়। এই যোজ্যতার মাধ্যমে বিপরীতধর্মী আয়নের মধ্যে যে বন্ধনীর সৃষ্টি হয় তাকে তড়িৎযোজী বন্ধনী বা আয়নীয় বন্ধনী এবং সংশ্লিষ্ট বন্ধনটিকে আয়নীয় বন্ধন এবং গঠিত যৌগটিকে ধ্রুবীয় যৌগ (Polar Compound) বলা হয়। বন্ধন গঠনের প্রয়োজনে আয়ন গঠনের জন্য সংযোগী পরমাণুটি যত সংখ্যক ইলেকট্রন বর্জন করে ক্যাটায়ন বা গ্রহণ করে অ্যানায়ন গঠন করে সেই সংখ্যাকে যথাক্রমে পরমানুটির তড়িৎযোজ্যতা বলা হয়। একটি উদাহরণের সাহায্যে এটি সহজে বোঝা যায়।

সোডিয়াম ক্লোরাইড একটি ধ্রুবীয় যৌগ। কঠিন সোডিয়াম ক্লোরাইডের উপাদান একযোজী সোডিয়াম (Na^+) এবং ক্লোরাইড (Cl^-) আয়ন। সোডিয়াম পরমাণুর সুস্থিত ইলেকট্রন বিন্যাস হল $1S^2 2S^2 2p^6 3S^1$। সর্ববহিস্থ কক্ষ 3S এর একমাত্র ইলেকট্রনটিকে বর্জন করলে সংশ্লিষ্ট আয়নের ইলেকট্রন বিন্যাস হয় $1S^2 2S^2 2p^6$।

স্পষ্টতই এই ইলেকট্রন বিন্যাসটি সোডিয়াম এর সবচেয়ে কাছের নিষ্ক্রিয় বিন্যাসের অনুরূপ। সুতরাং সুস্থিতি অর্জন করার পক্ষে একটি ইলেকট্রন বর্জন করে সোডিয়াম আয়ন গঠন করাই সোডিয়াম পরমাণুর পক্ষে সর্বাধিক বাস্তব সম্মত উপায়।

আবার একটি ক্লোরিন পরমাণুর সুস্থিত ইলেকট্রন বিন্যাস $1S^2 2S^2 2p^6 3S^2 3p^5$। দৃশ্যতই যোজ্যতা একটি ইলেকট্রন গ্রহণ করলে সর্ববহিস্থ কক্ষের ইলেকট্রন বিন্যাস সন্নিকটবর্তী নিষ্ক্রিয় গ্যাস আরগনের মত (অর্থাৎ $1S^2 2S^2 2p^6 3S^2 3p^6$) ইলেকট্রন বিন্যাস অর্জন করতে পারে। এক্ষেত্রে সোডিয়াম আয়নের গঠনকালে বর্জিত ইলেকট্রনটি ক্লোরাইড আয়ন গঠনের জন্য ব্যবহৃত হতে পারে।

সহজভাবে বলা যায় সোডিয়াম পরমাণুর যোজক 3S ইলেকট্রনটি ক্লোরিন পরমাণুতে স্থানান্তরিত হলে উভয় পরমাণুই তাদের নিকটবর্তী নিষ্ক্রিয় মৌলের মত ইলেকট্রন বিন্যাস সহ আয়ন গঠন করতে পারে। লক্ষ্যণীয় যে একটি ইলেকট্রন ত্যাগ করার ফলে সোডিয়াম পরমাণু একক পরা আধান যুক্ত সোডিয়াম আয়নে (Na^+) এবং ক্লোরিন পরমাণু একটি ইলেকট্রন গ্রহণ করার কারণে একক অপরা আধানবাহী ক্লোরাইড আয়নে (Cl^-) রূপান্তরিত হয়।

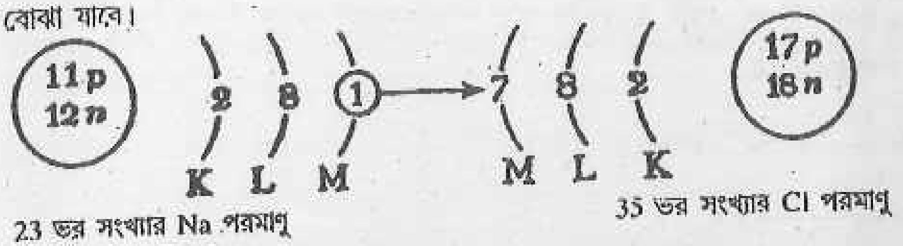
$$Na \longrightarrow Na^+ + e$$

$$Cl + e \longrightarrow Cl^-$$

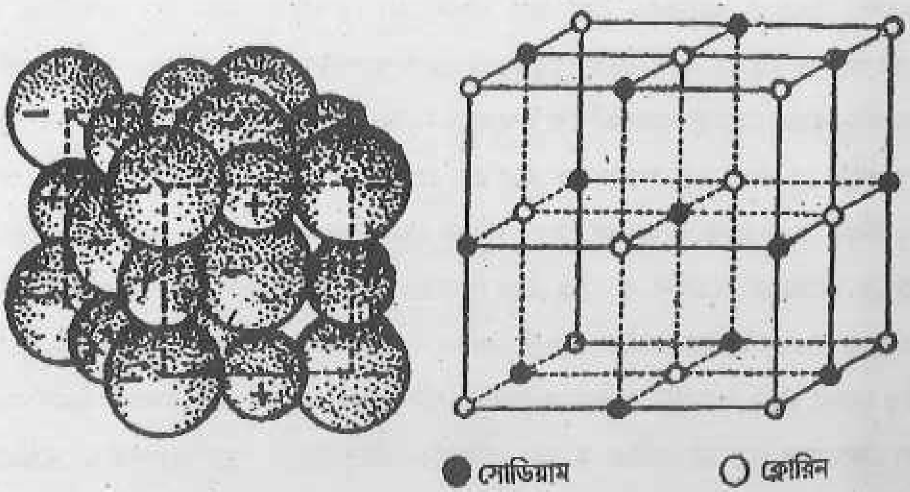
$$Na^+ + Cl^- \longrightarrow [Na^+ Cl^-]$$

পরস্পর বিপরীত আধানযুক্ত সোডিয়াম আয়ন এবং ক্লোরাইড আয়ন স্থির তাড়িতিক আকর্ষণ দ্বারা পরস্পরের প্রতি আকৃষ্ট হয় এবং নির্দিষ্ট দুরত্ব বজায় রেখে পরস্পরের প্রতি আর্কষনের মাধ্যমে ধ্রুবীয় সোডিয়াম ক্লোরাইড গঠন করে। যেহেতু আয়নগুলিকে বিন্দু আধান (Point Charge) বলে কল্পনা করা হয়, স্বাভাবিকভাবে মনে হতে পারে যে একক পরা আধানযুক্ত Na^+ এবং অপরা আধন যুক্ত Cl^- পরস্পরের প্রতি প্রবল আর্কষণে ক্রমশ নিকটবর্তী হতে থাকবে। সংশ্লিষ্ট আয়নগুলিকে সরল কিন্তু আধান বলে কল্পনা করলে এটা মনে হওয়া স্বাভাবিক যে আয়নগুলি যতক্ষণ না পর্যন্ত একে অপরের ওপর আরোপিত হচ্ছে ততক্ষণ অবধি তারা ক্রমশ আকর্ষিত হতে থাকবে। বাস্তব চিত্রটি পুরোপুরি এরকম নয়। মনে রাখতে হবে যে আয়ন গঠন কালে ইলেকট্রন স্থানান্তরিত হলেও উভয় পরমাণুর কেন্দ্রক পরা তড়িৎ ধর্মী। কেন্দ্রকের বাইরের ইলেকট্রন বিন্যাসের অদল বদল ঘটলে তা কেন্দ্রকের পরাতড়িৎধর্মীতা বা তার পরিমাণের বদল ঘটাতে পারে না। অর্থাৎ সোডিয়াম পরমাণুর তথা সোডিয়াম আয়নের কেন্দ্রে অবস্থিত কেন্দ্রকে 11টি প্রোটন এবং 12টি নিউট্রন বর্তমান। সোডিয়াম আয়নে

কেন্দ্রকের বাইরে 10টি ইলেকট্রন থাকে বলে সমগ্র ব্যবস্থাটি (11টি প্রোটন, 10টি ইলেকট্রন) একক পর আধান যুক্ত হয়। আবার একই যুক্তি অনুসরণ করে ক্লোরাইড আয়নের ক্ষেত্রে কেন্দ্রকে 17টি প্রোটন এবং 18টি নিউট্রন তথা কেন্দ্রকের বাইরের বিভিন্ন কক্ষে 18টি ইলেকট্রন এর উপস্থিতির কারণে ক্লোরাইড আয়ন একক অপরা আধানযুক্ত হয়। পরস্পরের প্রতি আকর্ষণকালে সোডিয়াম আয়ন Na^+ এবং ক্লোরাইড আয়ন Cl^- ক্রমশ নিকটবর্তী হতে থাকলে সমতড়িৎ আধানযুক্ত পরস্পরের কেন্দ্রক এবং বহিস্থ সংশ্লিষ্ট আয়নগুলির ইলেকট্রন মহল পরস্পরকে যথাযোগ্য তীব্রভাবে বিকর্ষণ করে। অর্থাৎ বিপরীতধর্মী আয়নের আকর্ষণের বিপরীতে ভিন্নধর্মী আয়নের গঠনের অনুরূপ অংশগুলি (কেন্দ্রক, ইলেকট্রন মহল) পরস্পরকে বিকর্ষণ করতে থাকে। এই বিপরীত ধর্মী বলদ্বয়ে প্রভাবে আয়নদ্বয় একটি প্রকৃষ্ট দূরত্ব পর্যন্ত পরস্পরের নিকটবর্তী হয়ে থাকে। এই বিশেষ দূরত্বে উপনীত হলে আয়নগুলির মধ্যে আয়নগুলির অনুরূপ অংশে পারস্পরিক বিকর্ষণ সত্ত্বেও তাদের পারস্পরিক আর্কষণ সর্বাধিক প্রবল হয়। অবশ্য এই জন্য আয়নগুলিকে যথাযথভাবে ত্রিমাত্রিক শূণ্যে সুনির্দিষ্টভাবে বিন্যস্ত করা প্রয়োজন। অর্থাৎ কেবলমাত্র আয়ন গঠনই নয় গঠিত আয়নগুলির সুসম বিন্যাসের মাধ্যমে আর্কষণ বলকে প্রকৃষ্ট মাত্রায় এনে যৌগ গঠনের সামগ্রিক প্রক্রিয়াটি তড়িৎযোজ্যতার অবিচ্ছেদ্য অঙ্গ। চিত্র (4.1) লক্ষ্য করলে এটি সহজে বোঝা যাবে।



চিত্র–4.1a Na^+ ও Cl^- আয়ন গঠন



চিত্র–4.1b NaCl কেলাসের গঠন

উপরের আলোচনা থেকে স্পষ্ট বোঝা যাচ্ছে যে তড়িৎযোজী যৌগ গঠনের প্রক্রিয়াটি দুটি প্রধান অংশে বিভক্ত। প্রাথমিক পর্যায়ে সরাসরি প্রয়োজনীয় সংখ্যক ইলেকট্রন গ্রহণ তথা বর্জনের মাধ্যমে আয়ন গঠন এবং পরবর্তীতে আয়নগুলিকে উপযুক্তভাবে বিন্যস্ত করে একটি প্রকৃষ্ট অবস্থায় উপনীত হওয়া। বলা বাহুল্য যে শেষোক্ত প্রক্রিয়াটি তড়িৎ যোজ্যতা গঠনের একটি গুরুত্বপূর্ণ এবং অবিচ্ছেদ্য প্রক্রিয়া। এই পর্যায়ের পরবর্তী অংশে আমরা এ সম্পর্কে বিশদভাবে জানব। কিন্তু তার আগে আমাদের ধারণা করা উচিত সাধারণত কোন মৌলগুলি তড়িৎযোজ্যতা ক্ষেত্রে অধিক সক্রিয় এবং তড়িৎ যোজ্যতার ভিন্নতা, বিশেষত একই মৌলের ক্ষেত্রে তা কেমন হওয়া সম্ভব, সেটি পরীক্ষা করে দেখা উচিত।

4.3.1 তড়িৎ যোজ্যতার শর্ত

তড়িৎযোজী যৌগগুলি পরীক্ষা করে দেখা যায় যে,

(ক) তড়িৎ যোজ্যতা গঠনের ক্ষেত্রে ক্যাটায়ন সৃষ্টিকারী পরমাণুটি আয়নী করণ বিভব (ionization potential) যথাসম্ভব কম হওয়া প্রয়োজন। অর্থাৎ যে সমস্ত মৌলগুলির আয়নীকরণ বিভব কম, উদাহরণস্বরূপ পর্যায়সারণীর শ্রেণী 1, 2 অর্থাৎ ক্ষার ধাতু এবং ক্ষার মৃত্তিকা ধাতুগুলি সবিশেষ উপযোগী। আবার অ্যানায়ন সৃষ্টিকারী পরমাণুটির ইলেকট্রন আসক্তির (Electron affinity) মান বেশী হলে তা আয়ন গঠনের ক্ষেত্রে সুবিধাজনক। স্পষ্টতই পর্যায়সারণীর ডান প্রান্তে 16, 17 শ্রেণীভুক্ত পরমাণুগুলি অর্থাৎ চ্যালকোজেন (Chalcogen) তথা হ্যালোজেন (Halogen) মৌলগুলি অধিক উপযোগী।

(খ) তড়িৎযোজী পরমাণু দ্বয়ের মধ্যে তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্মের পার্থক্য বেশী (অন্তত পক্ষে 2 এর কাছাকাছি হওয়া প্রয়োজন)।

(গ) অংশগ্রহণকারী আয়নের ক্যাটায়নটি আকারে বড়, অ্যানায়নটি আকারে ছোট হলে তা ধ্রুবীয় যৌগ গঠনে বিশেষ উপযোগী নয়।

(ঘ) পরা এবং অপরা আয়নের আধান কম হলে তা আয়নীয় বন্ধন গঠনের ক্ষেত্রে সাহায্য করে। আপাতদৃষ্টিতে এটি বিভ্রান্তিকর মনে হলেও মনে রাখতে হবে যে উচ্চ আধান সম্পন্ন পরা আয়নগঠনের জন্য ক্রমাগত ইলেকট্রন অপসারণ শক্তির বিচারে কেবল দুঃসাধ্যই নয় সংশ্লিষ্ট আয়নের সুস্থিতিও প্রশ্নাতীত নয়।

(ঙ) সর্বোপরি সংশ্লিষ্ট ক্যাটায়নটি এবং অ্যানায়নটি ত্রিমাত্রিক শূন্যে উপযুক্তভাবে বিন্যস্ত করা প্রয়োজন কেননা যৌগ গঠনের ক্ষেত্রে এই পর্যায়েই শক্তির বিচারে সুস্থিতি অর্জিত হয়। উপযুক্ত বিন্যাসে আয়নীয় কেলাস

গঠিত হলে কেলাস গঠন কালে প্রচুর শক্তি নির্গত হয়ে সংশ্লিষ্ট যৌগটিকে সুস্থিতি প্রদান করে। কেলাসগঠন কালে নির্গত শক্তির পরিমাণ যত বেশী হয় ধ্রুবীয় যৌগটি তত সুস্থিত হয়ে থাকে।

4.3.2 একই মৌলের একাধিক তড়িৎ যোজ্যতা

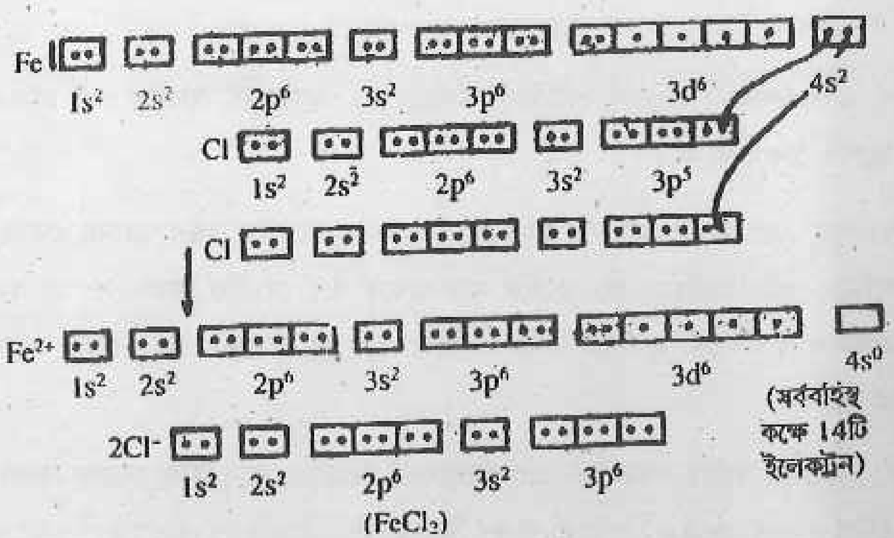
কখনও কখনও ভিন্ন ভিন্ন যৌগ গঠন কালে একই পরমাণুর একাধিক তড়িৎ যোজ্যতা প্রকাশিত হয়। যেহেতু যৌগ গঠনের শর্তগুলি প্রতি ক্ষেত্রে আলাদা সুতরাং বিভিন্ন শর্তে একই মৌলের পরমাণু বিভিন্ন সংখ্যক ইলেকট্রন ত্যাগ করতে পারে। প্রধানত সন্ধিগত মৌলের পরমাণুর ক্ষেত্রেই এটি বেশী করে লক্ষ্য করা যায়। উল্লেখ করা যেতে পারে যে এসব ক্ষেত্রে সর্বদা নিকটবর্তী নিষ্ক্রিয় মৌলের মত ইলেকট্রন বিন্যাস অর্জন করা সম্ভব হয় না। সুতরাং এক্ষেত্রে অষ্টক গঠিত হয় না বা অষ্টক সূত্রের ব্যতিক্রম ঘটে। উদাহরণ স্বরূপ বলা যায় ফেরাস ক্লোরাইড বা ফেরাস সালফেট ধ্রুবীয় যৌগে ফেরাস [Fe(II)] আয়ন বা Fe^{2+} আয়ন বর্তমান। আবার ফেরিক ক্লোরাইড বা ফেরিক সালফেট যৌগে ফেরিক [Fe(III)] আয়ন বা Fe^{3+} আয়ন উপস্থিত। বলা বাহুল্য ফেরাস [Fe(II)] আয়ন গঠনের জন্য আয়রন পরমাণু 2টি এবং ফেরিক আয়ন গঠনের জন্য 3টি ইলেকট্রন বর্জন করে। সংশ্লিষ্ট আয়নগুলির ইলেকট্রন বিন্যাস নিম্নরূপ

Fe^{2+} : $[_{18}Ar]\ 3d^6$

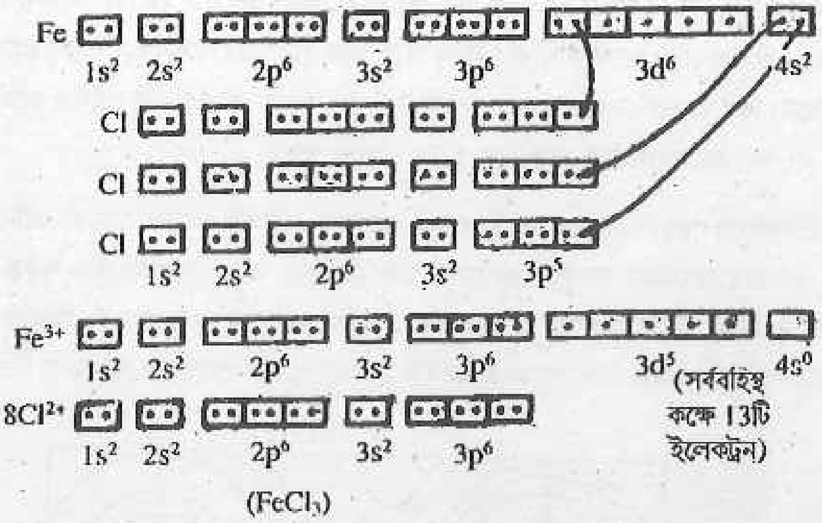
Fe^{3+} : $[_{18}Ar]\ 3d^5$

চিত্র 4.2 সাহায্যে ফেরাস এবং ফেরিক ক্লোরাইড গঠনের প্রাথমিক প্রক্রিয়াটি দেখান হল

Fe(II) ক্লোরাইড গঠন :



আয়রন (III) ক্লোরাইড গঠন :



চিত্র–4.2 : ফেরাস ও ফেরিক ক্লোরাইড গঠনের প্রক্রিয়ায় আয়নের উৎপত্তি

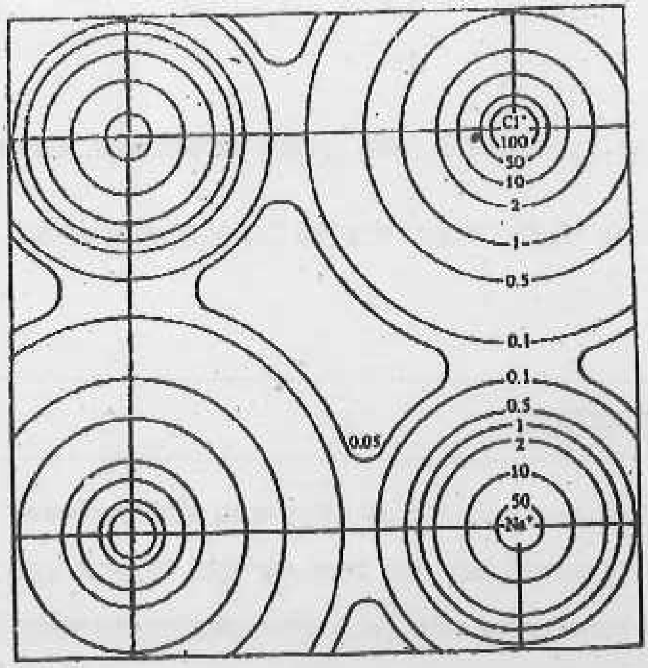
একইভাবে অন্যান্য সন্ধিগত মৌলের ক্ষেত্রে ভিন্ন ভিন্ন তড়িৎ যোজ্যতা সম্ভব। বাস্তবে এর অজস্র উদাহরণ জানা আছে।

4.4 আয়নীয় ব্যাসার্ধ

আয়নীয় যৌগ গঠনের প্রক্রিয়ার প্রাথমিক পর্যায়ে আয়ন গঠিত হলে পরবর্তী ধাপে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানগুলি পরস্পরকে আকর্ষণ করে এবং ক্রমশ পরস্পরের নিকটবর্তী হতে থাকে—যতক্ষণ পর্যন্ত না সংশ্লিষ্ট আয়নগুলির ইলেকট্রনসমূহ অথবা কেন্দ্রে রক্ষিত কেন্দ্রকের পারস্পরিক বিকর্ষণ আয়নদ্বয়কে একটি প্রকৃষ্ট দূরত্বে স্থাপন করে। এই অবস্থানে আয়ন জোড়ের মধ্যে আকর্ষণ এবং বিকর্ষণ এমন হয় যে উভয় আয়নের সংক্রিয়ার লব্ধি বল সর্বোচ্চ হয়। এই আলোচনা থেকে এটা স্পষ্ট যে ধনাত্মক বা ঋণাত্মক আয়নগুলিকে বিন্দুপ্রতিম না ভেবে গোলকাকৃতি বলে কল্পনা করা হয়েছে। বস্তুত কেলাসের গঠনে উপাদান হিসাবে আয়নগুলির পারস্পরিক পরিমাপ তথা আয়নীয় ব্যাসার্ধের বিশেষ উল্লেখযোগ্য ভূমিকা রয়েছে। সুতরাং সর্বপ্রথম জানা প্রয়োজন আয়নীয় ব্যাসার্ধ বলতে কী বোঝায়।

একটি আয়নের কেন্দ্রে রয়েছে আয়নটির প্রায় সমগ্র ভর এবং প্রোটনের উপস্থিতির কারণে কেন্দ্রকটি ধনাত্মক আধানযুক্ত। এই ধণাত্মক ভারী কেন্দ্রকের বাইরের বিভিন্ন স্তরে একাধিক ইলেকট্রন বর্তমান। যেহেতু বাইরের এই স্তরগুলি ইলেকট্রনের অবস্থান তথা পরিক্রমা পথের উপর নির্ভর করে সুতরাং তা স্বভাবতই অসংকোচনশীল অথবা অপ্রসারণযোগ্য নয়। উপযুক্ত বলের প্রভাবে তা সংকুচিত বা প্রসারিত হয়। বলাবাহুল্য এর ফলে আয়নীয় আয়তনেরও হেরফের ঘটে। আয়নগুলিকে গোলকাকার ভাবা হলে, এর ব্যসার্ধও উপযুক্তভাবে পাল্টায়। অর্থাৎ আয়নের গঠনের দিক থেকে দেখতে গেলে, এগুলি ক্রিকেট বল বা বল বিয়ারিং গুলির মতো শক্ত নয়—বরং নরম তুলো বা স্পঞ্জের গোলকের সঙ্গে এর তুলনা চলতে পারে।

এই পরিস্থিতিতে স্বভাবতই প্রশ্ন ওঠে একটি আয়নের পরিমাপ কালে আমরা এটিকে কতদূর পর্যন্ত বিস্তৃত বলে ধরবো। আয়নীয় যৌগের কেলাসের গঠন বিশ্লেষণ করে আন্তঃআয়নিক দূরত্ব নির্ণয় করা যায়। এমনকি এই দূরত্বের বিভিন্ন প্রসারে আয়নগুলির ইলেকট্রনসমূহের তুলনামূলক বিস্তৃতিও পরিমাপ করা সম্ভব। NaCl কেলাসের গঠন বিশ্লেষণ করে এরকম যে ছবি পাওয়া গেছে তা অনেকটা চিত্র 4.3 এর মতো।



চিত্র–4.3 : সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাসে ইলেকট্রন ঘনত্বের সমোন্নতি রেখা। সংখ্যাগুলি ইলেকট্রন ঘনত্বের সূচক (10^{-6} ইলেকট্রন pm^{-3})। Na^+Cl^- আন্তঃআয়নিক দূরত্ব 281pm

এই ছবি লক্ষ্য করলে দুটি আয়নের মধ্যবর্তী অংশে আয়নদ্বয়ের বিভাজক অঞ্চলটি সহজেই বোঝা যায়। আন্তঃআয়নিক সংযোজক রেখা বরাবর একটি আয়নের কেন্দ্র থেকে ক্রমশ অগ্রসর হতে হতে যে সর্বনিম্ন

দূরত্বে ঐ আয়নের ইলেকট্রন ঘনত্ব কার্যকরীভাবে শূন্য হয় সেই দূরত্বকে সংশ্লিষ্ট আয়নের আয়নীয় ব্যাসার্ধ বলা চলে।

4.4.1 আয়নীয় ব্যাসার্ধের ভিন্নতা ও তার কারণ

আগেই উল্লেখ করা হয়েছে যে আয়নীয় ব্যাসার্ধ পরিবর্তনশীল। আয়নের গঠন বোঝাতে উপমা হিসাবে নরম গোলকের উল্লেখ করা হয়েছে। পরীক্ষা করে দেখা হয়েছে একই মৌলের আয়নীয় ব্যাসার্ধ নানান কারণে আলাদা হতে পারে। এখানে অতি সংক্ষিপ্ত আকারে আমরা এগুলির উল্লেখ করবো।

- **মৌলের কার্যকরী নিউক্লীয় আধান :**

যেহেতু পারমানবিক ব্যাসার্ধ প্রাথমিকভাবে নিউক্লিয় আধানের উপর নির্ভরশীল, সুতরাং যে প্রক্রিয়ায় কার্যকরী নিউক্লীয় আধান বাড়ে, তা আয়নীয় ব্যাসার্ধ কমায়। আবার যে কারণগুলির বলে কার্যকরী নিউক্লীয় আধান কমে তা আয়নের ব্যাসার্ধ বিবর্ধিত করে! যেমন—

(ক) সমসংখ্যক ইলেকট্রন যুক্ত আয়নের ক্ষেত্রে যে আয়নগুলিতে কেন্দ্রকের আধান বেশি সেগুলির কার্যকরী নিউক্লীয় আধান বেশি হয় সুতরাং আয়ন আকারে ছোট হবে। উদাহরণ—19^{K+} এবং 17^{Cl^-} উভয়ের ক্ষেত্রেই নিউক্লিয়াস বহিঃস্থ ইলেকট্রনের সংখ্যা 18 কিন্তু K^+ আয়নে নিউক্লীয় আধান (19) ক্লোরিনের (17) তুলনায় বেশি হওয়ায়, K^+ আয়নটি ছোট এবং Cl^- আয়নটি ওর তুলনায় বড় হবে।

(খ) একই যুক্তিতে বলা যায় কোন পরমাণুর জারণ স্তর বাড়লে যোজক ইলেকট্রনের সংখ্যা কমে। সুতরাং কার্যকরী নিউক্লীয় বল বাড়ে। অর্থাৎ জারণস্তর বাড়লে আয়নের ব্যাসার্দ কমে। উদাহরণ স্বরূপ Fe(II) যৌগে Fe^{2+} আয়নের তুলনায় Fe(III) যৌগের Fe^{3+} আয়নের ব্যাসার্ধ কম।

(গ) একই আধানযুক্ত হলেও আদর্শ মৌলগুলির তুলনায় সন্ধিগত মৌলগুলি আয়তনে ছোট হয়. একই পর্যায়ভুক্ত Ca^{2+} আয়তনের তুলনায় Cu^{2+} বা Fe^{2+} আয়তনে ছোট হবে।

- **সর্ববহিঃস্থ যোজক কক্ষের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা :**

একই আধানযুক্ত আয়নের ক্ষেত্রে যে আয়নটির যোজক কক্ষের মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা বেশি সেটি আকারে বড় হবে। একই শ্রেণীভুক্ত আয়নের ক্ষেত্রে এটি বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। যেমন একই শ্রেণীভুক্ত Na^+ এর তুলনায় K^+ ; F^- এর তুলনায় Cl^- বড় হবে।

উপরে উল্লিখিত যুক্তিগুলি বিচার করলে দেখা যায় একই পর্যায়ভুক্ত আয়নগুলির ক্ষেত্রে (সুতরাং যোজক কক্ষের একই মুখ্য কোয়াটাম সংখ্যা যুক্ত) শ্রেণী সংখ্যা বাড়তে থাকলে কার্যকরী নিউক্লীয় বল বাড়ে। সুতরাং আয়তন কমে। অর্থাৎ Fe^{2+}-এর তুলনায় Cu^{2+} আয়ন ছোট হবে।

● আয়নের পরিমণ্ডলে অবস্থিত অপরাপর আয়নের সংখ্যা বা সহযোজন সংখ্যা (Cordination number) :

একটি আয়নের চতুর্দিকে অন্যান্য বিপরীতধর্মী আয়নের সংখ্যা বাড়লে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয়ক্ষেত্রেই আয়নীয় ব্যাসার্ধ বাড়ে। বস্তুত বিপরীতধর্মী আয়নগুলি কেন্দ্রীয় আয়নের সংক্রিয়ায় শেষোক্ত আয়ন থেকে ইলেকট্রন নিজেদের দিকে আকর্ষণ করে ; আবার পরিমণ্ডলের সমধর্মী আয়নগুলি পরস্পরকে বিকর্ষণ করার ফলে তাদের নিজেদের মধ্যে দূরত্ব বাড়ে, এবং এর ফলে মধ্যবর্তী আয়নটি প্রসারিত হয়েছে বলে মনে হয়। সহযোজন সংখ্যা কম হলে কম সংখ্যক আয়ন অধিকতর দৃঢ়ভাবে বিপরীতধর্মী কেন্দ্রীয় আয়ন দ্বারা আকর্ষিত হয়। ফলে কেন্দ্রীয় আয়নটির ব্যাসার্ধ কমে।

● সন্ধিগত মৌলের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন দশা :

সন্ধিগত মৌলগুলির ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট আয়নটির ইলেকট্রনগুলির ঘূর্ণন দশার উপর নির্ভর কেন্দ্রীয় আয়নের চতুর্দিকে লিগাণ্ড বা সংলগ্নক আয়নগুলির সমাবেশ নির্ভর করে। এর ফলে আয়নীয় ব্যাসার্ধেরও উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন লক্ষিত হয়। এই পর্যায়ে বিশদ আলোচনা নির্ধারিত কার্যক্রমের সীমার মধ্যে না হওয়ায় তা পরিহার করা হলো।

4.5.2 বহুপরমাণুক আয়নের ব্যাসার্ধ :

বহু পরমাণুক আয়ন বিশিষ্ট যৌগ যেমন $(NH_4)_2SO_4$ ইত্যাদির ক্ষেত্রে আয়নগুলি একাধিক পরমাণুর সংযোজনে গ্রথিত। সুতরাং এগুলির আয়তন নির্ধারণ আয়াসসাধ্য—এবং বলা বাহুল্য এই পরিমাপ যৌগবিশেষে পরিবর্তনশীল। এজন্য এগুলির ব্যাসার্ধ নির্ণয়ের ক্ষেত্রে এগুলির জ্যামিতিক আকার বিশেষভাবে অনুধাবন করা প্রয়োজন। বস্তুত এগুলির ক্ষেত্রে পরীক্ষামূলক প্রক্রিয়াটি জটিল এবং পরোক্ষ তাপরাসায়নিক গণনা নির্ভর।

4.5 ব্যাসার্ধ অনুপাত ও কেলাস সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা (Coordination Number)

কোন আয়নীয় কেলাসে বিপরীতধর্মী আয়নগুলি পরপর একটি সুনির্দিষ্ট নকশা অনুসারে সজ্জিত থাকে। এক্ষেত্রে একটি পরাধর্মী আয়ন একাধিক অপরাধর্মী আয়ন দ্বারা, সুতরাং, প্রতিটি অপরাধর্মী আয়ন আবার পরাধর্মী আয়ন দ্বারা পরিবেষ্টিত থাকে। কোন একটি আয়নকে বিপরীতধর্মী যে কটি আয়ন সবচেয়ে কাছাকাছি অবস্থানে ঘিরে থাকে তাকে সংশ্লিষ্ট কেন্দ্রীয় আয়নটির সবর্গাঙ্ক বলা হয়। বলা বাহুল্য কোন আয়ন জোড়ের সবর্গাঙ্ক নির্ণয়ের

ক্ষেত্রে সেগুলির তুলনামূলক আয়নীয় ব্যাসার্ধ বা ব্যাসার্ধ অনুপাত জানা প্রয়োজন। বিভিন্ন ব্যাসার্ধ অনুপাতের ক্ষেত্রে সবর্গাঙ্কের মান কিভাবে পরিবর্তীত হয় তা পাঠক্রমের পৃথক অংশে [ECH O2 ; Block 1 2.5, অংশ পৃ. 48 এবং ECH O6 ; Block 1, পৃ. 129] উল্লেখ করা হয়েছে।

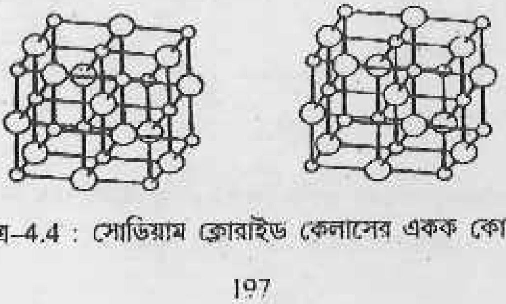
4.6 আয়নীয় পদার্থের গঠন ও কেলাসাকৃতি

আয়নীয় পদার্থের উপাদানগত ভিন্নতার বিচারে সংখ্যাটি বিপুল। উপাদানগত ভিন্নতা সত্ত্বেও আয়নীয় পদার্থ সমূহ গঠিত হবার প্রক্রিয়ায়, বিপরীতধর্মী আয়নগুলি একটি সুনির্দিষ্ট নিয়মিত পর্যাবৃত্ত সজ্জা অনুসারে বিন্যস্ত হয়ে কেলাস গঠন করে। এই সজ্জাকে জালক বলে। আয়নীয় পদার্থ আলাদা হলেও কেলাস গঠনের ক্ষেত্রে তাদের বিন্যাস প্রতিটি ভিন্ন পদার্থের জন্য, আলাদা নয়। কঠিন পদার্থের সংগঠনের কেলাসের ভূমিকা বিশ্লেষণ করলে কতকগুলি সীমিত সজ্জা বা শ্রেণী লক্ষ্য করা যায়। আয়নীয় পদার্থগুলির গঠন প্রক্রিয়ায় কেলাস গঠিত হবার কালে, বিপরীতধর্মী আয়নগুলি কত রকমে সুবিন্যস্ত হতে পারে তা পাঠক্রমের পৃথক অংশ [ECH O6, Block 1, একক 5, পৃ. 105-] উল্লিখিত। উপরোক্ত আলোচনার পরিপূরক অংশ হিসাবে এখানে আমরা কতগুলি আদর্শ আয়নীয় কেলাসের সংগঠন সম্পর্কে জানবো।

এই পর্যায়ের প্রথম উদাহরণগুলি সমসংখ্যক ধনায়ন ও ঋণায়নের সন্নিবেশে সংগঠিত হয়। গঠনগত বিচারে আধানের দিক থেকে এগুলি 1 : 1 (যেমন NaCl) বা 2 : 2 (যেমন ZnS) জাতীয় লবণ। এখানে এরকম চারটি আদর্শ গঠন বেছে নেয়া হল। সাধারণত, এ জাতীয় অন্যান্য আয়নীয় পদার্থগুলি গঠনের দিক থেকে এগুলির মধ্যে যেটি উপযোগী সেটির গঠন অনুসরণ করে কেলাসিত হয়। গঠনগুলি পরীক্ষা করলে সহজেই আয়নগুলির সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যার পার্থক্য লক্ষ্য করা যায়। তুলনামূলক আকৃতির ভিন্নতা অনুসরণ সবর্গাঙ্ক 4, 6 বা 8 হতে পারে।

1. সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাস :

আয়নীয় সংগঠন (1 : 1), পার্শ্বকেন্দ্রিক ঘনকাকার ধনায়ান ও ঋণয়ান উভয়ের সবর্গাঙ্ক 6.

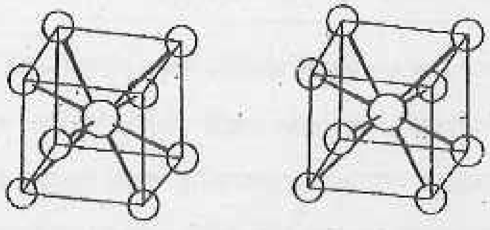


চিত্র–4.4 : সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাসের একক কোষ

সাধারণত বিভিন্ন ক্ষারধাতুর হ্যালাইডগুলি (লিথিয়াম, সোডিয়াম, পটাশিয়াম, রুবিডিয়াম আদির সব হ্যালাইডগুলি ও সিজিয়াম ক্লোরাইড) এবং ক্ষারমৃত্তিকা ধাতুসমূহ ম্যাগনেসিয়াম, ক্যালসিয়াম, ষ্ট্রনসিয়াম, বেরিয়াম ও ক্যাডমিয়ামের অক্সাইডগুলি এই ধরনের সজ্জা অনুসরণ করে।

2. সিজিয়াম ক্লোরাইড কেলাস :

আয়নীয় সংগঠন (1 : 1), অবয়বকেন্দ্রিক, ধনয়ান ও ঋণয়ান উভয়ের সবর্গাঙ্ক 8.



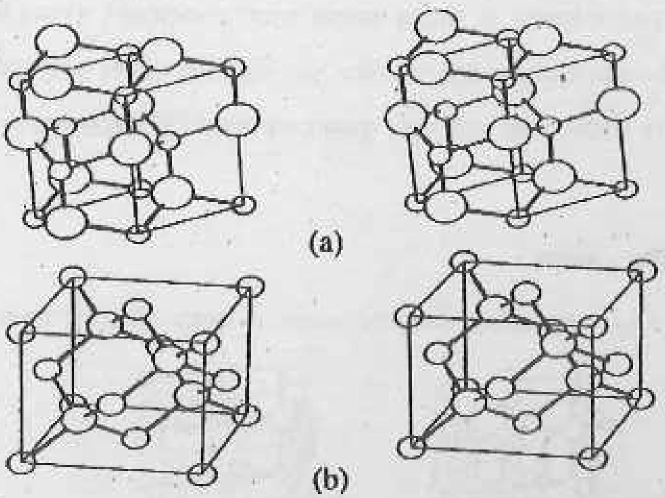
চিত্র–4.5 : CsCl কেলাসের একক কোষ

ক্ষারধাতুর হ্যালাইডগুলির ভিতর CsCl, CsBr, CsI সাধারণ চাপে এই ধরনের সজ্জায় সজ্জিত হয়। উচ্চচাপ প্রয়োগে লিথিয়াম ছাড়া অন্যান্য ক্ষারধাতুর হ্যালাইডগুলি CsCl-এর মতো গঠন লাভ করে। NH_4F ছাড়া অন্যান্য অ্যামোনিয়াম হ্যালাইডগুলি, TlCl, TlBr, Tl(CN), CsCN, $CsNH_2$-র গঠনও CsCl-এর অনুরূপ।

3. জিঙ্কব্লেণ্ড ও ভুর্জাইট (Wurtzite) গঠন

রাসায়নিক সংকেত ZnS

আয়নীয় সংগঠন (1 : 1), ভুর্জাইট : ষটকোণীয়, সর্বগাঙ্ক 4 জিঙ্ক ব্লেণ্ড : ঘনকাকার, সবর্গাঙ্ক 4



চিত্র–4.6 : জিঙ্ক সালফাইড কেলাসের একক কোষ (a) ভুরজাইট (b) জিঙ্ক ব্লেন্ড অপেক্ষাকৃত ছোট গোলকটি Zn^{2+} এবং অন্যটি S^{2-}

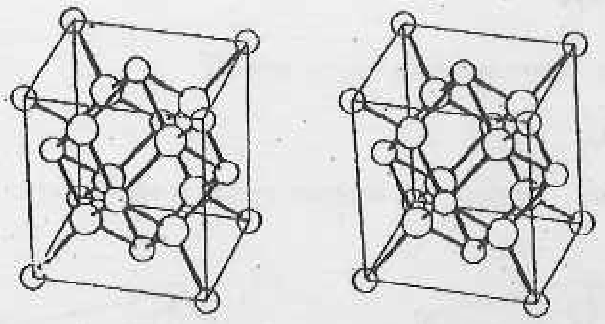
BaO, ZnO, BeS, MnS, CdS, HgS আদি বিভিন্ন দ্বিযোজী ধাতব অক্সাইড ও সালফাইডগুলি সাধারণত ভুর্জাইট বা জিঙ্ক ব্লেণ্ডের মতো গঠন অনুসরণ করে।

এই পর্যায়ে পরবর্তী উদাহরণগুলিতে ধনায়ন ও ঋণায়নের সাংখ্য অনুপাত 1 : 2 ; স্পষ্টতই এক্ষেত্রে ধনায়নের সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা ঋণায়নের দ্বিগুণ। যেমন—8 : 4, 6 : 3, 4 : 2 ইত্যাদি। কোন কোন ক্ষেত্রে ধনায়ন ও ঋণায়নের পারস্পরিক স্থানবদলের মাধ্যমে বিপরীতধর্মী সংগঠন ও লক্ষিত হয়। বলাবাহুল্য শেষোক্ত ক্ষেত্রে ধনায়ন ও ঋণায়নের সাংখ্য অনুপাতটি 2 : 1 এবং ধনায়নের সবর্গাঙ্ক ঋণায়নের অর্ধেক হবে।

● ফ্লুওরাইট গঠন :

রাসায়নিক সংকেত CaF_2

আয়নীয় সংগঠন (ধনায়ন : ঋণায়ন) 1 : 2. ঘনকাকার ; ধনায়নের সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা 8 (ধনায়নের পরিমণ্ডলে ঋনায়নের ঘননাকার সমাবেশ) ও ঋণায়নের 4 (ঋনায়নের পরিমণ্ডলে ধনায়নের চতুস্তলকীয় সমাবেশ)।



চিত্র-4.7 : ফ্লুওরাইট কেলাসের একক কোষ। ছোট এবং বড় গোলকটি যথাক্রমে Ca^{2+} এবং F^- আয়ন

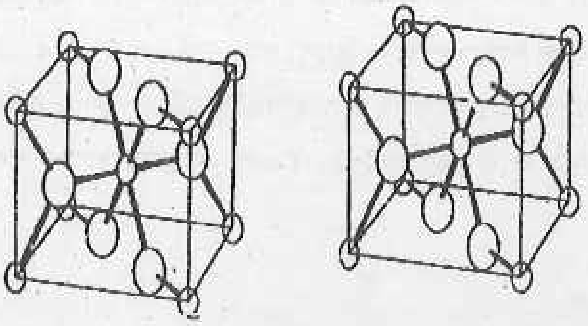
একাধিক ডাইফ্লোরাইড ও ডাইআথাইড CaF_2 সদৃশ গঠনে কেলাসিত হয়। Sr, Cd, Hg, Pb-প্রভৃতির ফ্লুরাইড এবং Zr, Hf ইত্যাদির ডাই অক্সাইড কয়েকটি উল্লেখযোগ্য উদাহরণ। আবার Li, Na, K প্রভৃতির অক্সাইড সমূহ প্রতিফ্লোরাইট (Antifluorite) গঠনে কেলাসিত হয়।

● রুটাইল গঠন :

স্বাভাবিক চাপে টাইটানিয়াম ডাই অক্সাইডের-র বিভিন্ন কেলাস গঠনের অন্যতম হল রুটাইল।

রাসায়নিক সংকেত TiO_2,

আয়নী সংগঠন (ধনায়ন : ঋণায়ন) 1 : 2 চতুষ্কৌণিক ধনায়নের সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা 6 (ধনায়নের পরিমণ্ডলে ঋণায়নের অষ্টতলকীয় সমাবেশ) ও ঋণায়নের 3 (ঋণায়নের পরিমণ্ডলে ধনায়নের ত্রিকোণাকার সমাবেশ)।



চিত্র–4.8 : রুটাইল কেলাসের একক কোষ

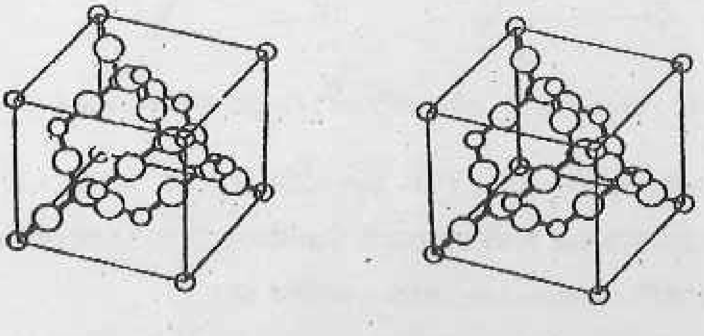
রুটাইল গঠনের উদাহরণ : Cr, Mn, Ge, Ru, Rh, Sn, Os, Ir, Pt ও Pb-এর ডাই অক্সাইড।

- β-ক্রিস্টোব্যালাইট গঠন :

সিলিকার বিভিন্ন ধরনের কেলাস সংগঠনের অন্যতম হল এটি।

রাসায়নিক সংকেত SiO_2

আয়নীয় সংগঠন (ধনায়ন : ঋণায়ন 1 : 2) ধনায়নের সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা 4 ও ঋণায়নের 2.



চিত্র–4.9 : বিটা ক্রিস্টোব্যালাইট (SiO_2) এর একক কোষ

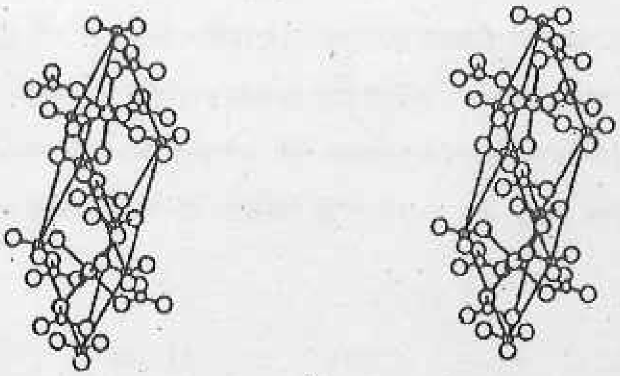
গঠনগতভাবে ZnS (জিঙ্ক ব্লেণ্ডের)-এর সাথে মিলটি লক্ষ্যনীয়। এজাতীয় কেলাসের কয়েকটি উল্লেখযোগ্য উদাহরণ হল BeF_2, $ZnCl_2$ Be $(OH)_2$ ও $Zn(OH)_2$।

● ক্যালসাইট এবং অ্যারাগোনাইট গঠন :

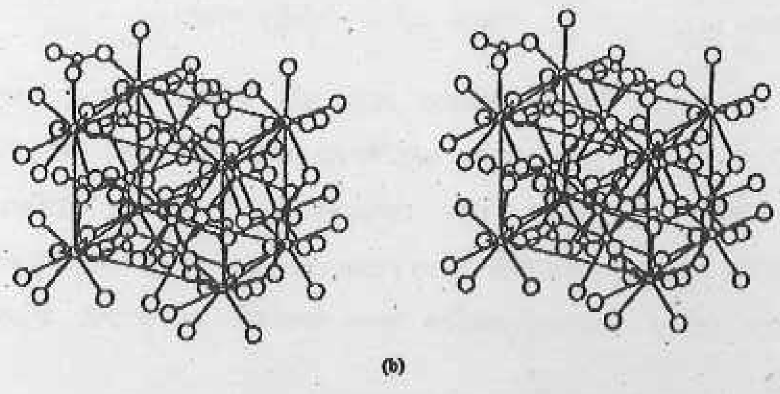
এ পর্যন্ত প্রায় সমস্ত উদাহরণেই সরল এক আয়নীয় ধনায়ন ও ঋণায়ন বেছে নেওয়া হয়েছে। যদিও সাধারণভাবে এই গঠনগুলি বহু পরমানুক আয়ন দ্বারা গঠিত কঠিনের সংগঠনেও একইভাবে প্রযোজ্য—যদিও শেষোক্ত ক্ষেত্রে আয়নীয় সন্নিবেশ স্বভাবতই জটীলতর। এ পর্যায়ের আলোচনার শেষ উদাহরণ হিসাবে একটি বহুপরমানুক আয়নযুক্ত কঠিনের উল্লেখ করা হল।

রাসায়নিক সংকেত $CaCO_3$

আয়নীয় সংগঠন (ধনায়ন : ঋনায়ন) 1 : 1 ; ক্যালসাইট রম্বতলবীয় (rhombohedral) অ্যারাগোনাইট : একাক্ষনতিক (Orthorhombic) ধনায়নের সবর্গাঙ্ক বা সন্নিবেশ সংখ্যা 6. ধনায়নের আকৃতি বড় হলে সাধারণত 9 সন্নিবেশ সংখ্যাযুক্ত অ্যারাগোনাইট গঠন লক্ষিত হয়।



(a)



(b)

চিত্র–4.10 (a) : ক্যালসাইট, (b) আরাগোনাইট এর একক কোষ। বড় থেকে ছোট আকারের বৃত্তগুলি যথাক্রমে অক্সিজেন, ক্যাসসিয়াম ও কার্বন পরমাণু

সাধারণত $NaNO_3$, $FeCO_3$, $LiNO_3$, $MgCO_3$ প্রভৃতি ক্যালসাইটের মতো এবং $SrCO_3$, KNO_3 ইত্যাদির ক্ষেত্রে অ্যারাগোনাইট গঠন লক্ষ্য করা যায়।

4.7 জালক শক্তি ও বর্ণ-ল্যাণ্ডে সমীকরণ (Lattice energy and Born-Lande equation

আয়নীয় যৌগগুলির উপাদান আয়নগুলি গঠিত হবার পর, অর্থাৎ উপাদান মৌলের পরমাণুগুলি প্রয়োজনমত ইলেকট্রন গ্রহণ বা বর্জন করে আয়ন গঠিত হবার পর সুস্থিতি অর্জনের উদ্দেশ্যে আয়নগুলি একটি সুনির্দিষ্ট পর্যাবৃত্ত সজ্জায় সজ্জিত হয়। যেহেতু এই সমাবেশে নির্দিষ্ট দূরত্ব অন্তর আয়নগুলি পর্যায়ক্রমে একটির পর অন্যটি অবস্থান করে—ত্রিমাত্রিক শূন্যে এই বিশিষ্ট সজ্জাকে আয়নীয় কেলাসের ত্রিমাত্রিক জালক বলা হয়। প্রকৃতপক্ষে আয়নীয় যৌগের গঠন প্রক্রিয়ায় জালকের নির্মাণের মধ্যে দিয়েই যৌগটি সুস্থিতি লাভ করে। আয়নীয় জালকের সংগঠনে যে শক্তি নির্গত হয় তাই সংশ্লিষ্ট জালককে সুস্থিতি দান করে। জালকের নির্মাণের জন্য, অসীম দূরত্ব (অর্থাৎ তাড়িতিক স্থিতিশক্তির বিচারে শূন্য অবস্থান) থেকে উপাদান আয়নগুলিকে কেলাসিত জালকের সজ্জায় সন্নিবিষ্ট করলে যে পরিমান শক্তি বিনির্গত হয় তাকে জালক শক্তি বলে : নিচের সরল সমীকরণের সাহায্যে

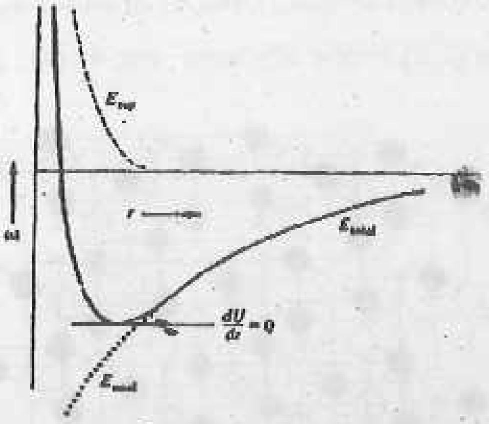
$M^+ (g)$	+	$X^- (g)$	$MX(s)$	......................(4.1)
গ্যাসীয় উপাদান আয়ন (+)		গ্যাসীয় উপাদান আয়ন (–)	কেলাস-জলকে সন্নিবিষ্ট কঠিন MX	

এটি বোঝা যেতে পারে। উপরের প্রক্রিয়ায় মোল প্রতি বিনির্গত শক্তিকে জালক শক্তি বলে। সম্পূর্ণ বিষয়টি ভালো করে বুঝে নেওয়ার জন্য আমরা একটি অতি সরল স্থিরতাড়িতিক রূপকল্পের সাহায্য নেব। উল্লেখ করা দরকার, বাস্তব কেলাসের গঠনে একাধিক নিস্তাড়িত শক্তির বিষয়, যেমন—বিচ্যুতি বল, অনেপক্ষ শূন্যাঙ্ক শক্তি (Zero Point energy) ইত্যাদির মান জানা দরকার। কিন্তু এসব বিবেচনার বাইরে রেখেও আমাদের প্রস্তাবিত সরল রূপকল্পটি অনেকাংশেই সঠিক—বস্তুত যথেষ্ট ব্যবহারোপযোগী।

আয়নীয় কেলাসের জালকশক্তির গননা সর্বপ্রথম করেন বর্ণ ও ল্যাণ্ডে (Born and Lande) এজন্য সংশ্লিষ্ট সমীকরণটি বর্ণ-ল্যাণ্ডে সমীকরণ হিসাবে পরিচিত।

ধরা যাক E_0 পরাবৈদ্যুত স্থিরাঙ্ক (dielectinc constant) যুক্ত কোন মাধ্যমে এক জোড়া আয়ন যথাক্রমে M^+, X^- পরস্পরের কেন্দ্র থেকে r দূরত্বে অবস্থান করে। কুলম্ব সূত্র অনুসারে সংশ্লিষ্ট আয়ন জোড়ের শক্তি (Ec) হল :

$$E_C = \frac{Z_+ Z_-}{4\pi\varepsilon_0 r} \quad \ldots \quad \ldots \quad [4.2]$$



চিত্র–4.11 : একটি আয়ন জোড়ের শক্তি লেখ

যেহেতু আয়নগুলি পরস্পর বিপরীতধর্মী সুতরাং তাদের অসীম পারস্পরিক ব্যবধানে তুলনা: অবস্থানজনিত শক্তির সংশ্লিষ্ট বিন্যাসে শক্তির মান ঋণাত্মক। অসীম দূরত্ব থেকে আয়নগুলি পরস্পরের দিকে এগোতে থাকলে তাদের পারস্পরিক আকর্ষণ বাড়তে থাকে। চিত্র (4.11)-তে সংশ্লিষ্ট শক্তিটি বিন্দুচিহ্নিত রেখা (E_{Coul}) দেখানো হয়েছে। যেহেতু আয়নীয় আধানসমূহ ইলেকট্রনের আধানের (e) সাপেক্ষে নির্ধারিত হয় সুতরাং,

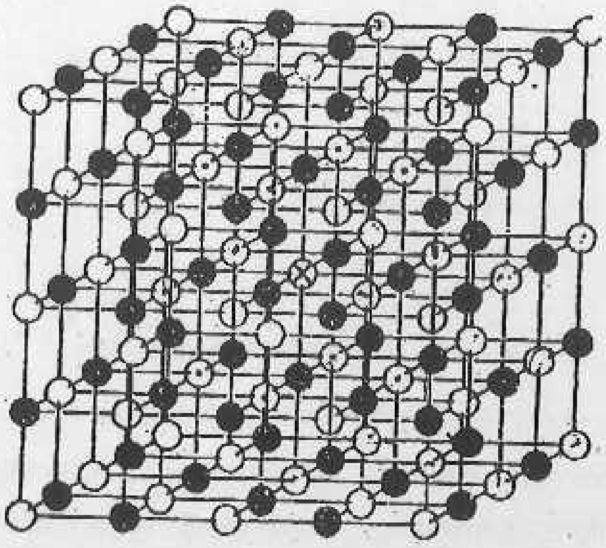
$$E_C = \frac{Z_+ Z_- e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \quad \ldots \quad \ldots \quad [4.3]$$

আমাদের আলোচ্য সরল কেলাসে এরকম অজস্র পারস্পরিক সংক্রিয়াবত আয়ন জোড় বর্তমান। উদাহরণস্বরূপ NaCl কেলাসে চিত্র 4.12। এক্ষেত্রে প্রতিটি আয়নের তড়িৎ আকর্ষণ, আবার এর পরের স্তরের 12 টি সম তড়িৎধর্মী আয়নের কারণে বিকর্ষণ বর্তমান। সংক্রিয়ারত আয়নের স্তর এখানেই শেষ নয়—পর্যায়ক্রমে আকর্ষণ, বিকর্ষণরত আয়নগুলি কেলাস মাপের সাপেক্ষে অবধি বিস্তৃত। সম্মিলিতভাবে এই পারস্পরিক প্রভাব সংজ্ঞাপক রাশিটিকে একটি অসীম গাণিতিক শ্রেণীর যোগফল হিসাবে ধ্রুবকরূপে প্রকাশ

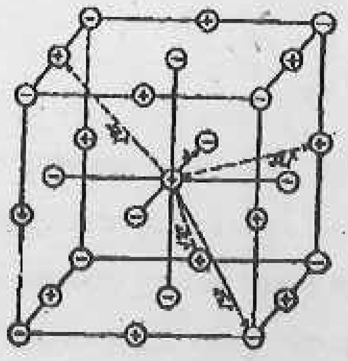
করা হয়। একে মাডেলাঙ ধ্রুবক (A) [Madelung Cosntant] বলে। কেলাসের অন্তবর্তী একজোড়া আয়নের কুলম্বীয় শক্তিকে মাডেলাঙ ধ্রুবকের সাহায্যে,

$$E_C = \frac{A.\ Z_+ Z_- e^2}{4\pi\varepsilon_o r} \quad \ldots \quad \ldots \quad [4.4]$$

উপরের সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। একটি নির্দিষ্ট কেলাসের জন্য মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান নির্ণয়ের পদ্ধতিটি অপেক্ষাকৃত সরল। উদাহরণস্বরূপ NaCl কেলাসের মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান নির্ণয় করা যেতে পারে। এজন্য আগের সরল চিত্রটিকে [4.4] বিবর্ধিত করে আবার আকা দরকার। [চিত্র 4.12 (a, b)]



চিত্র–4.12a : সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাসের বিবর্ধিত চিত্র



চিত্র—4.12b : সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাসের আন্তঃআয়নিক দূরত্ব

4.12(a) চিত্রের কেন্দ্রে কেলাসের একটি কোণে ⊗ চিহ্নযুক্ত আয়নটি Na^+। এর সবচেয়ে কাছেই পার্শ্বকেন্দ্রিক অবস্থানে রয়েছে 6টি (●) এ চিহ্নিত Cl^-। বলা বাহুল্য আয়নদ্বয়ের পারস্পরিক দূরত্ব কেলাসের তথা উপাদানগুলির প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল। পরবর্তী পর্যায়ে রয়েছে 12টি চিহ্নিত Na^+ আয়ন। এগুলি একক কোষের সংযোজক বাহুর প্রত্যেকটির মধ্য বিন্দুতে অবস্থিত। সরল জ্যামিতির সূত্র অনুসারে সহজেই এই বিকর্ষণরত আয়নজোড়ের পারস্পরিক দূরত্ব জানা যেতে পারে। একইভাবে পরবর্তীস্তরে অবস্থিত আরো 8টি Cl^- আয়নের দূরত্বও নির্ণয় করা যায়। বিপরীত ধর্মী বলে এক্ষেত্রে আয়নগুলি পরস্পরকে আকর্ষন করবে। এইভাবে গণনাটি ক্রমশ বিস্তৃত করতে করতে জালকের সমস্ত আয়নগুলিকে অন্তর্ভুক্ত করে নিলে মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান জানা যাবে। অর্থাৎ A হল সমগ্র সংক্রিয়া প্রকাশকারী রাশিগুলির যোগফল :

$$A = 6 - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{ইত্যাদি} \quad \ldots \quad \ldots (4.5)$$

যেহেতু মাডেলাঙ ধ্রুবককে একটি অভিসারী গাণিতিক শ্রেণী হিসাবে প্রকাশ করা যায়। আধুনিক যন্ত্রগণকের সাহায্যে শ্রেণীগুলির মানও জানা দরকার। নীচে কতগুলি কেলাসের জন্য মাডেলাঙ ধ্রুবকের নির্ণীত মান উল্লেখ করা হল। (সারনী 4.1)

সারণী 4.1

কতগুলি প্রচলিত কেলাসের মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান

কেলাস	সন্নিবেশ সংখ্যা	মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান
সোডিয়াম ক্লোরাইড	6 : 6	1.74756
সিজিয়াম ক্লোরাইড	8 : 8	1.76267
জিঙ্ক ব্লেণ্ড	4 : 4	1.63806
ভুর্জাইট	4 : 4	1.64132
ফ্লোরাইট	8 : 4	2.51939
রুটাইল	6 : 3	2.408*
β-ক্রিস্টোব্যালাইট	4 : 2	2.298
কোরান্ডাম	6 : 4	4.1719*

* সঠিকমান প্রকৃত কেলাসের বিশদ গঠনের উপর নির্ভর করে।

স্পষ্টতই মাডেলাঙ ধ্রুবকের মান কেলাসের জ্যামিতিক গঠনের উপর নির্ভরশীল ; এবং তা কেলাসে উপাদান আয়তনের আয়তন বা অন্যান্য ভৌত বৈশিষ্ট্য তথা আধানের উপর নির্ভরশীল নয়।

আগেই (4.4 অংশে) উল্লেখ করা হয়েছে যে বিপরীতধর্মী আয়নের পারস্পরিক আকর্ষণ ছাড়াও ঐ আয়নগুলির অবিচ্ছেদ্য অংশ হিসাবে কেন্দ্রক ও কেন্দ্রকবহিস্থ ইলেকট্রন মহলগুলি সমতড়িৎধর্মী হওয়ায় পরস্পরকে বিকর্ষণও করে। বস্তুত এই বিকর্ষণের কারণেই বিপরীতধর্মী আয়নগুলি শেষ পর্যন্ত আকর্ষণের প্রভাবে পরস্পরের উপর আরোপিত হয় না—আকর্ষণের কারণে বিপরীতধর্মী আয়নদ্বয় পরস্পরের খুব কাছাকাছি চলে এলে বিকর্ষনও প্রবলতর হয়। আবার বিকর্ষনের প্রভাবে আয়নদ্বয় বহু দূরে সরে গেলে বিকর্ষণ বলও সবিশেষ হ্রাস পায়। শক্তি লেখচিত্র (4.11) এ এই বিকর্ষণ খণ্ডরেখা দ্বারা চিহ্নিত করা হয়েছে।

বর্ণের সূত্রানুসারে এই বিকর্ষন জনিত শক্তিকে (E_R)

$$E_R = \frac{B}{r^n} \qquad \text{......[4.6]}$$

উপরের সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়। এক্ষেত্রে Bকে বর্ণ ধ্রুবক বলে। পরীক্ষার সাহায্যে আয়নসমূহের সংনম্যতা (Compressibility) সংক্রান্ত তথ্য থেকে বর্ণ ঘাতাঙ্কের (exponent) n-এর মান নির্ণয় করা যায়। এগুলি সারণী 4.2 তে উল্লেখ করা হল। এক মোল কেলাসের জন্য অ্যাভোগাড্রো সংখ্যক (N) সংক্রিয়া যুক্ত ক্ষেত্রে মোট শক্তির পরিমাণ (u) হলে,

$$u = E_C + E_R$$

$$= \frac{ANZ_+Z_-e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + \frac{NB}{r^n} \qquad \text{......[4.7]}$$

লেখচিত্র 4.11 এ সংশ্লিষ্ট রেখাটি গাঢ় রেখাঙ্কিত। এই শক্তির সর্বনিম্ন মানটি অর্থাৎ শক্তির বিচারে প্রকৃষ্ট অবস্থায় তথা সাম্যের জন্য,

$$\frac{du}{dr} = 0$$

$$\therefore = -\frac{ANZ_+Z_-e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} - \frac{nNB}{r^{n+1}} = 0 \qquad \text{......[4.8]}$$

এই অবস্থায় বিপরীতধর্মী আয়নগুলির পারস্পরিক আকর্ষণ ও ভিন্ন ভিন্ন আয়নগুলির অবিচ্ছেদ্য অংশসমূহের মধ্যে সমআধানের বিকর্ষণ পরস্পর সমান হওয়ায় আয়নগুলি একটি যান্ত্রিক সাম্যে উপনীত হয়। এক্ষেত্রে বর্ণ ধ্রুবক B-এর মান সহজেই নির্ণয় করা যায়, কেননা,

$$B = \frac{AZ_+Z_-e^2 r^{n-1}}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad \ldots \quad \ldots \quad 4.9$$

$$\therefore u_0 = \frac{AZ_+Z_-Ne^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0} - \frac{ANZ_+Z_-e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0 n} \qquad \ldots \quad \ldots \quad 4.10$$

এখানে u_0 ও r_0 যথাক্রমে সাম্য অবস্থায় সংশ্লিষ্ট শক্তি ও আন্তআয়নিক দূরত্ব নির্দেশ করে।

$$\therefore u_0 = \frac{AZ_+Z_-e^2N}{4\pi\varepsilon_0 r_0}\left(1-\frac{1}{n}\right) \qquad \ldots \quad \ldots \quad 4.11$$

উপরোক্ত সমীকরণটিকে আয়নীয় যৌগের জালক শক্তি প্রকাশকারী বর্ণ-ল্যাণ্ডে সমীকরণ বলে। যদিও সূক্ষ্ম বিচারে এটির নির্ণায়নে কতকগুলি শক্তিকে বিবেচনায় করা হয় নি, তবুও সামগ্রিকভাবে এটি জালকশক্তির মোটামুটি গ্রহণযোগ্য মানই নির্দেশ করে। স্পষ্টতই কোন আয়নীয় কেলাসের জালকশক্তি জানার জন্য কেলাসের গঠন তথা মাডেলাঙ ধ্রুবক A ও আন্তআনবিক দূরত্ব r_0 এবং আয়নের প্রকৃতি অনুসারে বর্ণ ঘাতাঙ্কের মান জানাই যথেষ্ট।

জালকশক্তির গণনায় প্রয়োজনীয়, বর্ণ ঘাতাঙ্কের জন্য, আয়নের প্রকৃতি জানা প্রয়োজন। অপেক্ষাকৃত বড় আয়নের জন্য নিউক্লিয়াসের বাইরের মহলে যথেষ্ট ইলেকট্রনের উপস্থিতির কারণে n-এর মানও বেশি হয়। অধিকাংশ গনণায় পাউলিং প্রস্তাবিত মানই গ্রহণযোগ্য বলে বিবেচিত হয়। ইলেকট্রন সজ্জার উপর নির্ভর করে পাউলিং প্রস্তাবিত n-এর মানগুলি সারণী 4.2 তে সন্নিবেশিত হল :

সারণী 4.2 : **বর্ণ ঘাতাঙ্কের মান**

আয়নের ইলেকট্রন বিন্যাস	n
He	5
Ne	7
Ar, Cu^+	9
Kr, Ag^+	10
Xe, Au^+	12

বর্ণ ল্যাণ্ডে সমীকরণ (4.11)-তে সোডিয়াম ক্লোরাইডের জন্য বিভিন্ন ধ্রুবকের নিম্নলিখিত মান বিষয়ে সোডিয়াম ক্লোরাইডের জালক শক্তি $u_0 = 755$ kJmol-1 নির্ণয় করা হয়েছে।

এক্ষেত্রে,

A = 1.74756 [সারণী 4.1 দ্রষ্টব্য]

$N = 6.022 \times 10^{23}$

$Z_+ = +1$ [Na^+ আয়নের আধান]

$Z_- = -1$ [Cl^- আয়নের আধান]

$e = 1.60218 \times 10^{-19}$ কুলম্ব [ইলেকট্রনীয় আধান]

$\varepsilon_0 = 8.854188 \times 10^{-12}$ কুলম্ব^2 জুল$^{-1}$ মিটার$^{-1}$

$r_0 = 2.814 \times 10^{-10}$ [সোডিয়াম ক্লোরাইড কেলাসে আন্তর্আয়নীয় দূরত্ব]

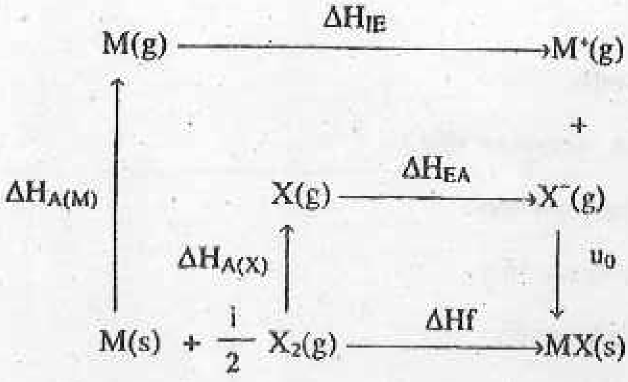
n = 8 [Na^+ ও Cl^- আয়নের বর্ণ ঘাতাঙ্কের গড়]

মানগুলি ব্যবহার করা হয়েছে। উল্লেখ করা যেতে পারে এটি সর্বোত্তম পরীক্ষামূলক মান ~770 kJ mole^{-1} এর অতি নিকটবর্তী। সুতরাং বর্ণ-ল্যাণ্ডে সমীকরণটি একই সঙ্গে যথেষ্ট সরল এবং ব্যবহারোপযোগী।

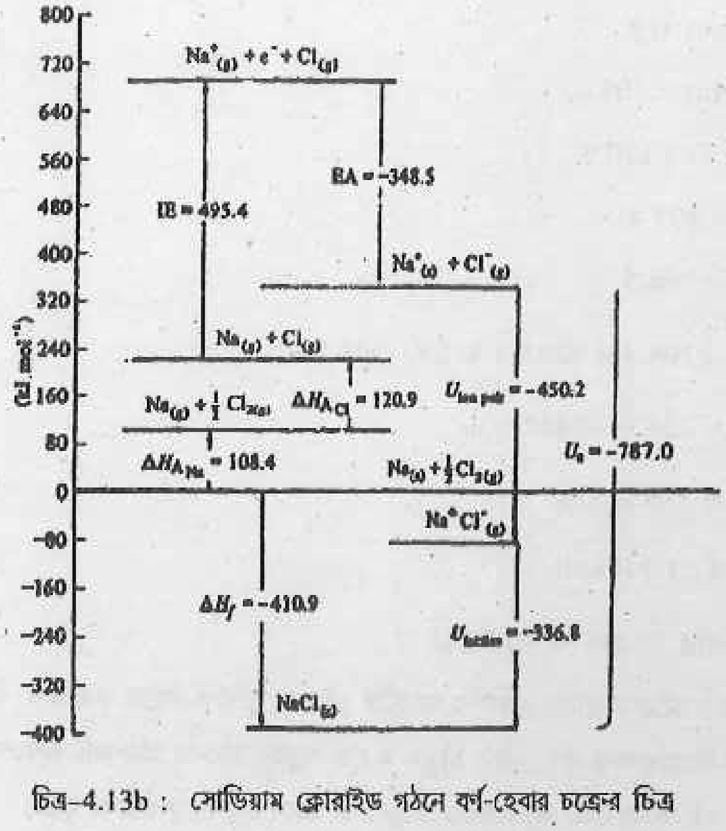
4.7.1 বর্ণ-হেবার চক্র

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুসারে কোন প্রক্রিয়া এক বা একাধিক খাপে নিষ্পন্ন হলে, সংশ্লিষ্ট এনথ্যালপির পরিবর্তন একই হয়। একে হেসের সূত্র (Hess's law) বলা হয়। বলা বাহুল্য হেসের সূত্র শক্তির নিত্যতার উপর আধারিত, নতুবা চক্রাকার প্রক্রিয়ার মাধ্যমে শক্তি উৎপন্ন করা যেত—যা অসম্ভব। মৌলগুলির পারস্পরিক আয়নীয় কঠিনের গঠন প্রসঙ্গে শক্তির বিষয়টি ব্যাখ্যা করার জন্য বর্ণ ও হেবার (Haber) হেসের সূত্র প্রয়োগ করে একটি চক্রাকার প্রক্রিয়ার প্রস্তাব করেন। একে বর্ণ হেবার চক্র বলে।

কোন মৌল *M* এবং অপর একটি মৌল X-এর বিক্রিয়ায় একটি আয়নীয় কঠিন MX উৎপন্ন হবার প্রক্রিয়াটি বর্ণ হেবার প্রস্তাবিত চক্র অনুসারে নিম্নলিখিত ভাবে দেখানো যেতে পারে।



চিত্র–4.13a বর্ণ-হেবার চক্র : M ও X_2-র বিক্রিয়ায় MX গঠন



চিত্র–4.13b : সোডিয়াম ক্লোরাইড গঠনে বর্ণ-হেবার চক্রের চিত্র

এক্ষেত্রে স্পষ্টতই,

$$\Delta Hf = \Delta H_{A(M)} + \Delta H_{A(X)} + \Delta H_{IE} + \Delta H_{EA} + u_0 \quad \ldots \quad 4.12$$

যখন,

ΔHf = MX-এর গঠনশক্তি

$\Delta H_{A(M)}$ = M কঠিনের পরমাণুকরণ শক্তি

$\Delta H_{A(X)}$ = X-এর পরমাণুকরণ শক্তি

ΔH_{IE} = M-এর প্রথম আয়নন শক্তি

ΔH_{EA} = X-এর ইলেকট্রন আসক্তি

u_0 = MX-এর জালিক শক্তি

NaCl গঠনের ক্ষেত্রে এই মানগুলি যথাক্রমে, (kJ/mole এককে)

$\Delta H_f = -410.9$

$\Delta H_A(Na) = 108.4$

$\Delta H_H(Cl) = 120.9$

$\Delta H_{IE} = 495.4$

$\Delta H_{EA} = 348.5$

$\therefore -410.9 = 108.4 + 120.9 + 495.4 - 348.5 + u_0$

$\therefore -410.9 = 724.7 - 348.5 + u_0$

$\therefore -410.9 = 376.2 = u_0$

$\therefore u_0 = -787.1$ kJ/mole.

4.7.2 বর্ণ-হেবার চক্রের উপযোগিতা

- বর্ণ-হেবার চক্রে সাহায্যে একাধিক আয়নীয় যৌগের সুস্থিতি ব্যাখ্যা করা যায়। উদাহরণ স্বরূপ MgO যৌগের উল্লেখ করা যায়। বস্তুত Mg^{2+} ও O^{2-} আয়ন গঠনের প্রক্রিয়াটি সবিশেষ শক্তিগ্রাহী, এক্ষেত্রে MgO-এর অতি উচ্চ জালকশক্তি MgO-র গঠনে বিশেষ সহায়তা করে।

- বর্ণ-হেবার চক্রের সাহায্যে অজ্ঞাত আয়নীয় যৌগের সম্ভাব্য গঠন শক্তি তথা সেটি সুস্থিত হবে কিনা জানা যায়। গণনার সাহায্যে প্রমাণ করা যায় $NaCl_2$ গঠিত হওয়া অসম্ভব. আবার তেমন MgCl যৌগটি সম্ভব নয়।

- বর্ণ হেবার চক্রের ব্যবহারিক প্রয়োগে প্রমাণ করা যায় অপেক্ষাকৃত নিম্ন জারণস্তরে গঠিত যৌগ স্বতঃ জারণ বিজারণ বিক্রিয়ার মাধ্যমে বিয়োজিত হয়ে মৌল ও মৌলের উচ্চ জারণস্তরের যৌগে রূপান্তরিত হয়। দেখানো যায় CaF যৌগটি নিম্নলিখিত

$$2CaF = Ca + CaF_2$$

স্বতঃ জারণ-বিজারন বিক্রিয়ার সাপেক্ষে দুঃস্থিত।

- বর্ণ-হেবার চক্রের সাহায্যে পরোক্ষভাবে ইলেকট্রন আসক্তি নির্ণয় করা যায়।

- কোন কঠিনের কোন দ্রাবকের জন্য দ্রাবণশক্তির মান জানা থাকলে, বর্ণ-হেবার চক্রের সাহায্যে জালকশক্তির মান নির্ণয় করে ঐ কঠিনটি সংশ্লিষ্ট দ্রাবকে দ্রবীভূত হতে পারে কিনা তা নির্ধারণ করা যায়।

- বর্ণ-হেবার চক্রের সাহায্যে জালকশক্তির মান নির্ণয় করে কোন কোন যৌগ যেমন বিভিন্ন ধাতব ক্লোরাইড ধাতুর উচ্চ জারণস্তরে উত্তরণের তথা সুস্থিতির ব্যাখ্যা করা যায়।

4.8 আয়নীয় বন্ধনীর সমযোজী চরিত্র (Covalent character of ionic bond)

4.8.1 মেরুকরণ বা ধ্রুবণ এবং ধ্রুবনশীলতা (Polarization and Polarizability)

কোন তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে কোন অণু বা পরমাণু অবস্থান করলে ঐ তড়িৎকেন্দ্রের প্রভাবে ঐ অণু বা পরমাণুর ইলেকট্রন পুঞ্জের স্বাভাবিক বিন্যাস বিকৃত হয়। এমতাবস্থায় অনুটির ধনাত্মক আধানের কেন্দ্র ধনাত্মক (কেন্দ্রীয়) আধানের কেন্দ্র থেকে প্রতিসারিত হওয়ার জন্য অনুটির মধ্যে একটি দ্বিধ্রুবীয়তার সৃষ্টি হয়। এই ঘটনাকে মেরুকরণ বা ধ্রুবন (Polarization) বলে। এই দ্বিধ্রুবীয়তার জন্য সৃষ্ট দ্বিধ্রুবীয় ভ্রামক μ_i কে আহিত দ্বিধ্রুবীয়ভ্রামক (induced dipole moment) বলে। এই দ্বিধ্রুবীয় ভ্রামক অণুটির স্থায়ী ধ্রুবীয় ভ্রামকের থেকে পৃথক এবং অধ্রুবীয় অণু এবং পরমাণুর ক্ষেত্রেও তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে এই দ্বিধ্রুবীয়তার সৃষ্টি হয়। তড়িৎক্ষেত্রটি অপসারনের সঙ্গে সঙ্গে এই দ্বিধ্রুবীয়তারও অবসান ঘটে। তড়িৎ ক্ষেত্রের তীব্রতা

(Electric field strength) ε হলে এবং ক্ষেত্রটি বেশী তীব্র না হলে μ_i আহিত ধ্রুবীয় ভ্রামক, ε এর সাথে সমানুপাতী।

$$\mu_i \propto \varepsilon$$

$$\text{বা, } \mu_i = \alpha\varepsilon \qquad \text{......... (4.13)}$$

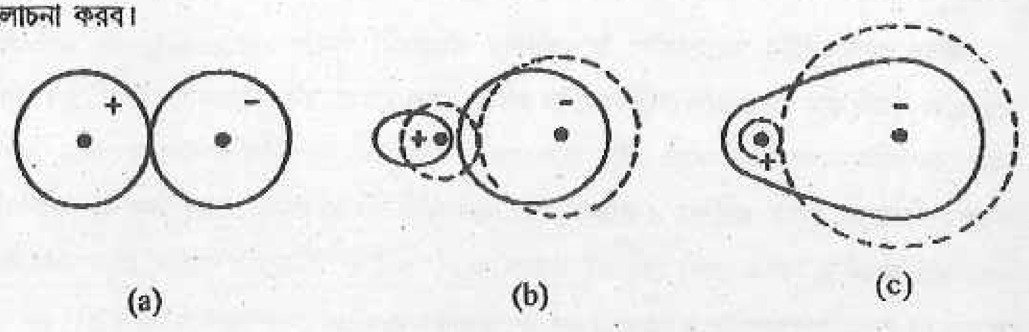
α হচ্ছে সমানুপাতী ধ্রুবক। α কে ধ্রুবনশীলতা (Polarizability) বলে। α অণুটির ধর্ম। ε এর নির্দিষ্টমানের জন্য α এর মান বেশী হলে কোন অণুর মেরুকরণ ও বেশী হবে।

বস্তুত এহেন মেরুকরণ ε কেবলমাত্র বাহির থেকে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের দ্বারাই সম্ভব এমন নয়। কোন আয়ন বা ধ্রুবীয় অণুর দ্বিধ্রুবের দ্বারাও অপর অণুর মেরুকরণ সম্ভব। এরূপ মেরুকরণের ফলে সৃষ্ট দ্বিধ্রুবের সঙ্গে অপর কোন অণুর দ্বিধ্রুব বা কোন আয়নের আধানের সাথে সংক্রিয়া (interaction) সম্ভব। প্রকৃতপক্ষে আন্তঃআণবিক আকর্ষণ (বা বিকর্ষণ) বলের উৎস কোন অণু বা আয়ন দ্বারা অন্য কোন অণুর তড়িতাবেশন (electric induction)। তবে এইধরনের আন্তঃআণবিক বলের মান খুবই কম, যদিও এদের গুরুত্ব যথেষ্ট। আমরা পরবর্তী এককে এই ধরণের দুর্বল আন্তঃআণবিক আকর্ষণ বল সম্বন্ধে আলোচনা করব। এখন আমরা মেরুকরণের দ্বারা কিভাবে কোন আয়নীয় বন্ধনী সমযোজী চরিত্র অর্জন করে তা আলোচনা করব।

4.8.2 আয়নীয় বন্ধনীর সমযোজী চরিত্রের ব্যাখ্যা

ধরা যাক A এবং B পরমাণুদুটি যথাক্রমে A^+ ও B^- আয়নদ্বয় গঠন করে। এখন A^+ ও B^- একে অপরের কাছে এলে তাদের স্থির তাড়িতিক আকর্ষণ বলে আবদ্ধ হয়ে আয়নীয় বন্ধনী গঠন করার কথা। কিন্তু এরা কাছাকাছি আসার সাথে সাথে A^+ ধনাত্মক আয়নটি B^- ঋণাত্মক আয়নটির ইলেকট্রনপুঞ্জকে নিজের দিকে আকর্ষণ করবে। এই আকর্ষণ বলের ফলে B^- এর ইলেট্রনপুঞ্জ A^+ আয়নের দিকে কিছুটা সরে যেতে পারে। অর্থাৎ A^+ আয়নটির দ্বারা B^- মেরুকরণের হবে। এই মেরুকরণের ফলে যথার্থ আয়নের ন্যায় B^- এর সম্পূর্ণ ঋণাত্মক আধান B^- পরমাণুর উপর থাকবে না, বরঞ্চ A ও B মধ্যবর্তী স্থানে ঋণাত্মক আধানের পরিমাণ বৃদ্ধি পাবে। একটি সমযোজী বন্ধনীতে দুটি পরমাণুর মধ্যবর্তী স্থানে ইলেকট্রন জোড় তথা ঋণাত্মক আধান কেন্দ্রীভূত থাকে। সুতরাং আমরা ভাবতে পারি যে A^+ দ্বারা B^- এর মেরুকরণের ফলে AB বন্ধনী সম্পূর্ণরূপে আয়নীয় না হয়ে কিছুটা সমযোজী চরিত্র অর্জন করবে। মনে রাখা ভালো যে সর্বদা যেকোন আয়ন যুগলের জন্যই তাদের মধ্যে বন্ধনী পুরোপুরি আয়নীয় না হয়ে কিছুটা সমযোজী প্রকৃতির হবে তা নয়। কোন কোন ক্ষেত্রে এই ধরণের মেরুকরণের ফলে কোন আয়নীয় বন্ধনীর কার্যকরী সমযোজী চরিত্র অর্জন করা সম্ভব হবে তা ফ্যাজানের সূত্রের

(Fajan's rule, বিজ্ঞানী Fajan-এর নাম অনুযায়ী) সাহায্যে জানা যায়। আমরা এখন ফ্যাজানের সূত্রাবলী আলোচনা করব।



চিত্র–4.14 : মেরুকরণের প্রভাব

(a) আদর্শ আয়ন জোড়, মেরুকরণ অনুপস্থিত

(b) পারস্পরিক ধ্রুবিত আয়ন জোড়

(c) মেরুকরণের প্রভাবে সমযোজী বন্ধন

4.8.3 ফ্যাজানের সূত্রাবলী : (Fajan's rule)

ফ্যাজানের নিয়ম অনুযায়ী যে সকল ক্ষেত্রে আয়নীয় বন্ধনীর উপর কিছুটা সমযোজী চরিত্র আরোপিত হবে সেগুলি বিবৃত করা হল।

(i) উচ্চ আধান প্রযুক্ত এবং ক্ষুদ্র আকারের ক্যাটায়নের (Cation, ধনাত্মক আয়ন) দ্বারা অ্যানায়নের (anion, ঋণাত্মক আয়ন) মেরুকরণ বেশী কার্যকরী হবে।

কোন ক্যাটায়নের আধান (Z^+) এবং ব্যাসার্ধের (r) অনুপাত ক্যাটায়নটির মেরুকরণ ক্ষমতার একটি মাপকাঠি বলে ধরা হয়। এই অনুপাতটিকে ক্যাটায়নের আয়নীয় বিভব (ionic potential) বলে অভিহিত করা হয়।

$$Q = Z^+/r$$

Z^+ এর মান বেশী হলে এবং r এর মান কম হলে Q এর মান বেশী হবে। সুতরাং বলা যেতে পারে যে কোন ক্যাটায়নের আয়নীয় বিভব বেশী হলে তার মেরুকরণ বা ধ্রুবণ ক্ষমতাও বেশী হবে।

(ii) উচ্চ আধানযুক্ত এবং বড় আকারের অ্যানায়ন বেশী ধ্রুবণশীল (Polarizable) হবে। কারণ ঋণাত্মক আধান বেশী এবং আকার বড় হলে কোন অ্যানায়নের ইলেকট্রনপুঞ্জের উপর কেন্দ্রীণের আকর্ষণ শিথিল হবে। ফলে কোন ক্যাটায়নের পক্ষে অ্যানায়নটির ধ্রুবন সহজতর হবে।

(iii) কোন ক্যাটায়নের মেরুকরণ ক্ষমতা ক্যাটায়নটির ইলেকট্রন বিন্যাসের উপর নির্ভর করবে।

কারণ ক্যাটায়নটির অন্তঃকক্ষীয় ইলেকট্রনের আচ্ছাদনী ক্ষমতা (shielding or screening capacity) যদি কম হয় তাহলে কেন্দ্রীকরণের ধনাত্মক আধানের প্রভাবে ক্যাটায়নটির উপরিস্থিত ধনাত্মক আধানের পরিমান কার্য্যকরী ভাবে বেড়ে যাবে। যেমন সন্ধিগত মৌলগুলির আনয়নের ক্ষেত্রে যোজ্যতা কক্ষের ভিতরের কক্ষে অবস্থিত d ইলেকট্রনের আচ্ছাদনী ক্ষমতা কম হওয়ার জন্য ঐ আয়নগুলির কার্য্যকরী আয়নীয় বিভব বেশী হবে এই কারণে Mg^{2+} ও Ca^{2+} উভয়ের ব্যাসার্ধ প্রায় সমান হওয়া সত্ত্বেও Mg^{2+} এ অন্তঃকক্ষীয় d ইলেকট্রনের উপস্থিতির জন্য ওর মেরুকরণ ক্ষমতা Ca^{2+} এর চেয়ে বেশী হবে।

প্রশ্ন উঠতে পারে যে ক্যাটায়ন দ্বারা অ্যানায়নে মেরুকরণের মতো একইভাবে অ্যানায়নের দ্বারা ক্যাটায়নের মেরুকরণ সম্ভব কিনা। বস্তুত এই বিপরীত ধরণের মেরুকরণের কোন উদাহরণ দেখা যায় না। কারণ হিসাবে বলা যেতে পারে যে ক্যাটায়নের ধনাত্মক আধান ওর ইলেকট্রনপুঞ্জকে টেনে রাখতে চেষ্টা করবে অর্থাৎ মেরুকরণ হতে দেবে না। অনুরূপভাবে একটি ক্ষুদ্র অ্যানায়নে ঋণাত্মক আধানের ঘনত্ব বেশী হওয়ায় অপর ইলেকট্রনকে বিকর্ষণ করবে। সুতরাং ক্যাটায়নের ইলেকট্রনপুঞ্জ অ্যানায়নের দিকে এগিয়ে আসবে না।

4.8.4 মেরুকরণের প্রভাব

পর্যায়সারণীতে পরস্পরের সাথে কৌণিকভাবে অবস্থিত কয়েকটি মৌল যুগলের মধ্যে ধর্মের বিশেষ সাদৃশ্য লক্ষ্য করা যায়। একে কৌণিক সম্পর্ক বলা হয়। যেমন—লিথিয়াম ও ম্যাগনেসিয়াম এবং বেরিলিয়াম ও অ্যালুমিনিয়াম। কারণ Be^{2+} ও Al^{3+} এর মান প্রায় সমান। বস্তুত Be^{2+} এর Q এর মান সমশ্রেণীভুক্ত Ca^{2+} এর Q এর চেয়ে অনেক বেশী। এই কারনে Be ও Al এর প্রধান জারণ অবস্থা (যথাক্রমে = 2 এবং +3) আলাদা হলেও ওদের রাসায়নিক ধর্মের মধ্যে প্রচুর সাদৃশ্য লক্ষ্য করা যায়। অন্যান্য কৌণিক সম্বন্ধযুক্ত মৌলগুলির ক্ষেত্রেও একই যুক্তি প্রযোজ্য।

NaBr, $MgBr_2$ এবং $Al\ Br_3$ এর গলনাংক যথাক্রমে 755°C, 700°C এবং 97.5°C। এই যৌগগুলির গলনাংকের এই ক্রম ফ্যাজানের সূত্রের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। Na^+ এর তুলনায় Mg^{2+} এবং তার তুলনায় Al^{3+} এর আধান বেশী হওয়ায় সংশ্লিষ্ট ব্রোমাইডগুলির সমযোজী চরিত্র ক্রমান্বয়ে বৃদ্ধি পাবে এবং ফলস্বরূপ গলনাংক কমবে। কারণ সাধারণত আয়নীয় যৌগের গলনাংক সমযোজী যৌগের তুলনায় বেশী হয়। আবার LiCl, LiBr এবং LiI এর গলনাঙ্ক সমূহ যথাক্রমে 613°C, 547°C এবং 446°C। কারণ Cl^- এর তুলনায়

Br^- এবং তার তুলনায় I^- আকারে বড় হওয়ায় LiCl এর চেয়ে LiBr এবং তার তুলনায় LiI বেশী সমযোজী চরিত্রের হবে। Hg^{2+} আয়নে অন্তঃকক্ষীয় d ইলেকট্রনের উপস্থিতির জন্য ধ্রুবন ক্ষমতা বেশী হওয়া $CaCl_2$ $HgCl_2$ এর তুলনায় উচ্চগলনাংক বিশিষ্ট।

আবার হ্যালাইডগুলির মধ্যে AgF জলে দ্রাব্য এবং হ্যালাইড অ্যানায়নগুলির আকার বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে দ্রাব্যতাও হ্রাস পায়। বলা যেতে পারে যে সমযোজ্যতা বৃদ্ধি পাওয়ার সাথে সাথে ধ্রুবীয় দ্রাবক জলে দ্রাব্যতা হ্রাস পাচ্ছে।

এখানে জেনে রাখা প্রয়োজন যদিও সাধারণ ভাবে বলা হয়ে থাকে যে সমযোজী যৌগগুলি তড়িৎযোজী যৌগগুলির তুলনায় কম গলনাংক বিশিষ্ট হয়, কিন্তু সমযোজ্যতার সঙ্গে গলনাংক সরাসরি সম্পর্কিত নয়। এটি আন্তঃআণবিক আকর্ষণ বলের উপর নির্ভর করে। অনুরূপভাবে সমযোজী যৌগগুলি অধ্রুবীয় দ্রাবকে বেশী দ্রাব্য একথা বলা হলেও সমযোজ্যতার সঙ্গে দ্রাব্যতার প্রত্যক্ষ সম্পর্ক নেই। তবে আমরা সাধারণ ভাবে কাজ চালানোর জন্য এই নিয়মাবলীর প্রয়োগ করতে পারি।

লেড টেট্রাহ্যালাইডগুলির তাপীয় স্থায়িত্ব ফ্যাজানের সূত্রের সাহায্যে ভালোভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। PbX_2 (X = F, Cl, Br, I) PbX_4 এর তুলনায় অধিক সুস্থিত। PbF_4 সর্বাপেক্ষা স্থায়ী টেট্রাহ্যালাইড। $PbCl_4$ 0°C উষ্ণতার নীচে সুস্থিত হলেও 50°C উষ্ণতার উর্দ্ধে $PbCl_2$ ও Cl_2 তে ভেঙ্গে যায়। $PbBr_4$ অত্যন্ত সুস্থিত যৌগ এবং PBI_4 এর অস্তিত্ব নিশ্চিতরূপে প্রমাণ করা যায়নি। এখানে দেখা যাচ্ছে যে অ্যানায়নের আকার বৃদ্ধির সাথে সাথে PbX_4 এর স্থায়ীত্ব কমে যাচ্ছে। উদাহরণস্বরূপ ধরা যাক $PbCl_4$ এর $PbCl_2$ তে বিয়োজন। Pb^{+4} Cl^- আয়নের মেরুকরণের ফলে দুটি Cl^- আয়ন থেকে দুটি ইলেকট্রন Pb^{+4} এ চলে এসে Pb^{2+} এ পরিণত করে এবং Cl_2 নির্গত হয়। হ্যালাইড আয়নগুলির ধ্রুবনশীলতা আকার বৃদ্ধির সাথে বৃদ্ধি পায় বলে ফ্লুরাইড থেকে আয়োডাইড তাপীয় স্থায়িত্ব ক্রমান্বয়ে হ্রাস পায়।

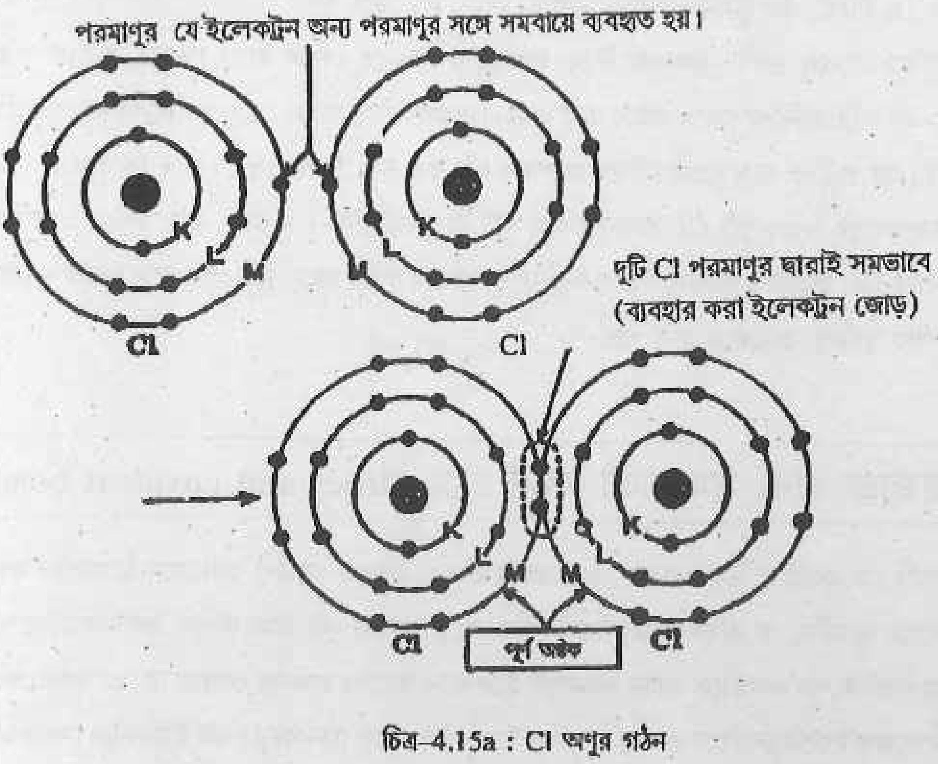
4.9 সমযোজ্যতা এবং সমযোজী বন্ধনী (Covalency and covalent bond)

আমরা দেখেছি যে একটি তড়িৎ ধনাত্মক এবং একটি তড়িৎ ঋণাত্মক পরমাণু যথাক্রমে ইলেকট্রন বর্জন করা গ্রহণের মাধ্যমে আয়নীয় বা তড়িৎযোজী বন্ধনী গঠন করে। আবার দুটি উচ্চ তড়িৎ ঋণাত্মকতা সম্পন্ন পরমাণুর মধ্যে রাসায়নিক সংযোগকালে কোন পরমাণুই ইলেকট্রন ত্যাগের প্রবণতা দেখায় না। এ সকলক্ষেত্রে দুটি পরমাণুই সমসংখ্যক ইলেকট্রন দিয়ে এক বা একাধিক ইলেকট্রন জোড় গঠন করে। এই ইলেকট্রন জোড়গুলি

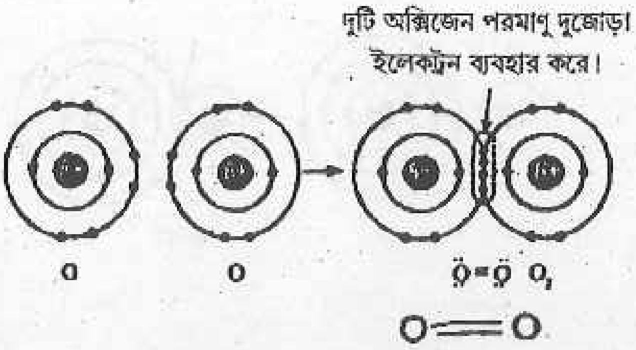
দুটি পরমাণুর মধ্যে অবস্থান করে এবং পরমাণুদুটি প্রতিটি জোড়কেই সমভাবে ব্যবহার করে পরস্পরের সঙ্গে আবদ্ধ থাকে। এইভাবে ইলেট্রন জোড় গঠনের মাধ্যমে যে বন্ধনী গঠিত হয় তাকে সমযোজী বন্ধনী এবং উৎপন্ন অণুটিকে সমযোজী অণু বলে। সমযোজী বন্ধনীতে ইলেকট্রন জোড়ের সংখ্যা এক হলে তাকে একবন্ধনী, হলে দুই হলে দ্বিবন্ধনী এবং তিন হলে ত্রিবন্ধনী বলা হয়।

যেমন হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে (যদিও হাইড্রোজেন তড়িৎঋণাত্মক নয়) একটি ইলেকট্রন থাকায় দুটি হাইড্রোজেন পরমাণু মিলিতভাবে একটি ইলেকট্রন জোড় গঠনের মাধ্যমে উভয়েই সর্ববহিস্থ কক্ষে নিষ্ক্রিয় গ্যাসের পরমাণু He এর ন্যায় ইলেকট্রন বিন্যাস অর্জন করে সুস্থিতি লাভ করে, অন্যান্য পরমাণুর ক্ষেত্রেও এই ধরনের ইলেকট্রন জোড় গঠনের মাধ্যমে সর্ববহিস্থ কক্ষে অষ্টক পূর্তি হয় এবং কোন সুস্থিত অনুগঠিত হয়।

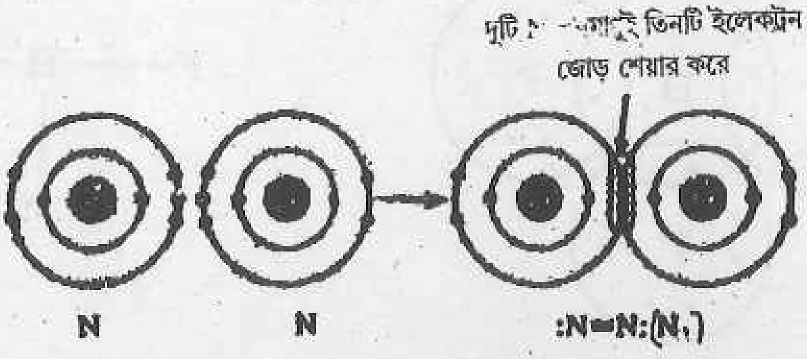
চিত্র [4.15 (a-g)] তে কতকগুলি সমযোজী অণুগঠন চিত্রের মাধ্যমে দেখানো হল। এইভাবে গঠন বর্ণনার সময় ইলেকট্রনকে বিন্দু দিয়ে চিহ্নিত করা হয় এবং একটি সমযোজী বন্ধনী বোঝাতে এক জোড়া বিন্দু ব্যবহার করা হয়। অনেক সময় দুটি ভিন্ন পরমাণুর ইলেকট্রনকে আলাদা করে দেখানোর জন্য ভিন্ন চিহ্নের ব্যবহার করা হয় (যেমন x চিহ্ন)। যদিও ইলেকট্রনগুলির মধ্যে প্রকৃতপক্ষে কোন পার্থক্য নেই।



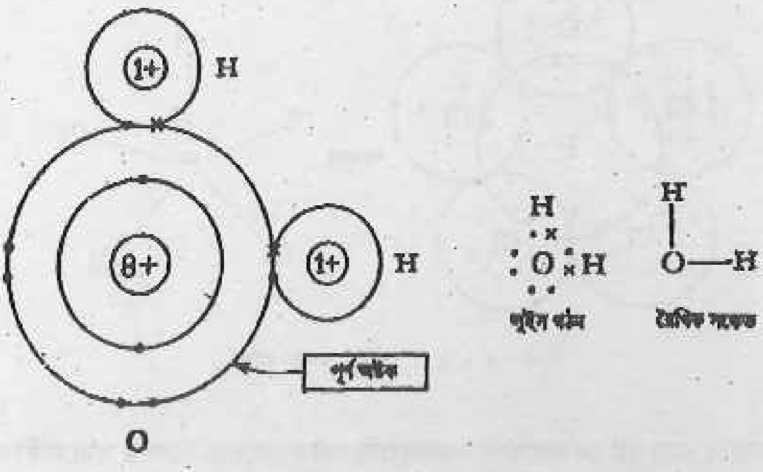
চিত্র–4.15a : Cl অণুর গঠন



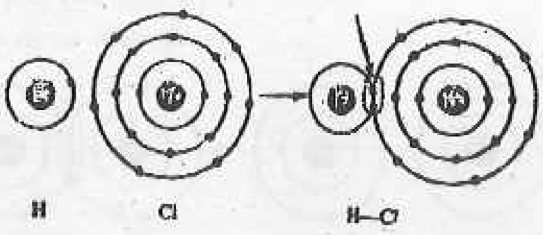
চিত্র–4.15b : O_2 এর গঠন



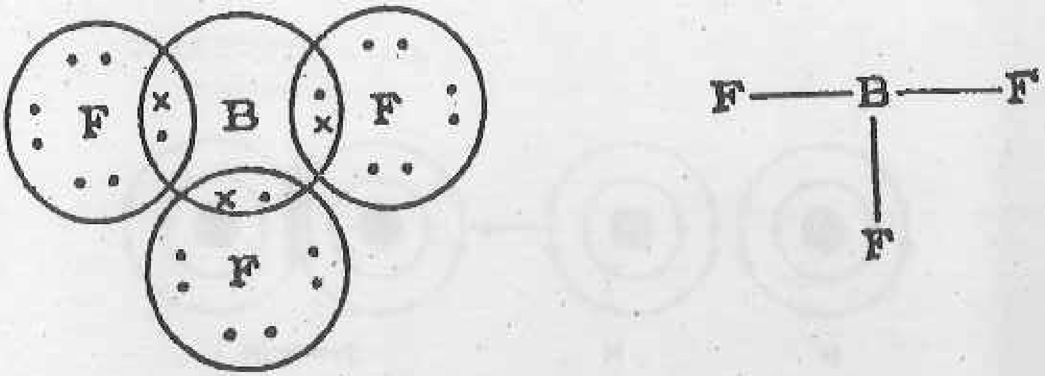
চিত্র–4.15c : নাইট্রোজেনের অণুর গঠন



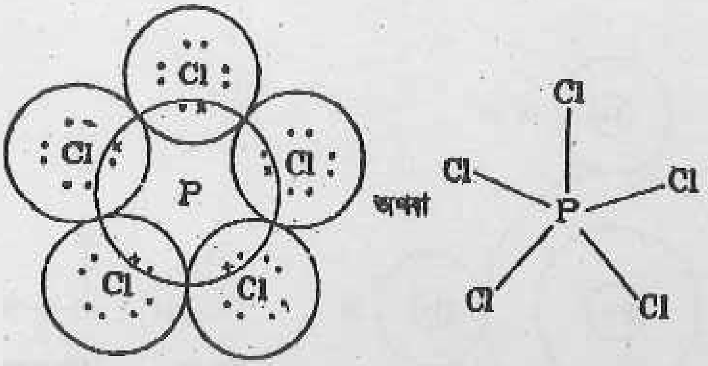
চিত্র–4.15d : H_2O অণুর গঠন



চিত্র—4.15c : HCl অণুর গঠন



চিত্র—4.15f : BF_3 অণুর গঠন



চিত্র—4.15g : PCl_5 অণুর গঠন

যদিও প্রাথমিকভাবে বলা হয় যে সংযোগী পরমাণুগুলি অষ্টক লাভের উদ্দেশ্যে সমযোজী বন্ধনী গঠন করে, কিন্তু অনেক ক্ষেত্রেই এর ব্যতিক্রম পরিলক্ষিত হয়। যেমন BF_3 অণুতে B-এর যোজ্যতা মোট ইলেকট্রনের

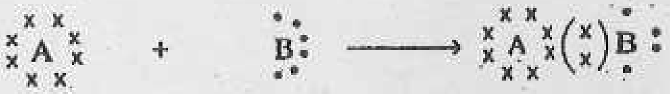
সংখ্যা 6 (চিত্র 4.15f) এবং PCl_5 অণুতে P এর যোজ্যতা কক্ষে মোট ইলেকট্রন জোড়ের সংখ্যা 10, (4.15 g)।

4.10 অসম যোজ্যতা এবং অসমযোজী বন্ধনী (Co-ordinate covalency and Co-ordinate bond)

সমযোজ্যতার আলোচনাকালে আমরা দেখেছি যে বন্ধীয় (bonded) পরমাণুদুটির প্রত্যেকে একটি করে ইলেকট্রন দিয়ে ইলেকট্রন জোড় গঠন করে। উভয় পরমাণুই এই ইলেকট্রন জোড়ের অংশীদার হওয়ায় উভয়েই একসাথে অষ্টক লাভ করে। এখন যদি দুটি ইলেকট্রনই একই পরমাণু থেকে আসে, কিন্তু ইলেকট্রন জোড়ের উপর উভয় পরমাণুরই অধিকার থাকে তাহলেও দুটি পরমাণুর পক্ষেই অষ্টক লাভ সম্ভব হতে পারে।

এইভাবে রাসায়নিক সংযোগে অংশগ্রহণকারী দুটি পরমাণুর মধ্যে একজোড়া ইলেকট্রন দান করলে এবং উভয় পরমাণুই ঐ ইলেকট্রন জোড় সমভাবে ব্যবহার করে শুদেরে বহিস্তম কক্ষে অভিজাত মৌলের সুস্থিত ইলেকট্রন-বিন্যাস লাভ করলে ঐ পরমাণুদ্বয়ের মধ্যে যে বন্ধনীর সৃষ্টি হয় তাকে অসমযোজী বন্ধনী (Co-ordinate bond) বলে। এই বন্ধনী গঠনে যে প্রকার যোজ্যতার প্রকাশ ঘটে তাকে অসমযোজ্যতা (Co-ordinate covalency) বলা হয়।

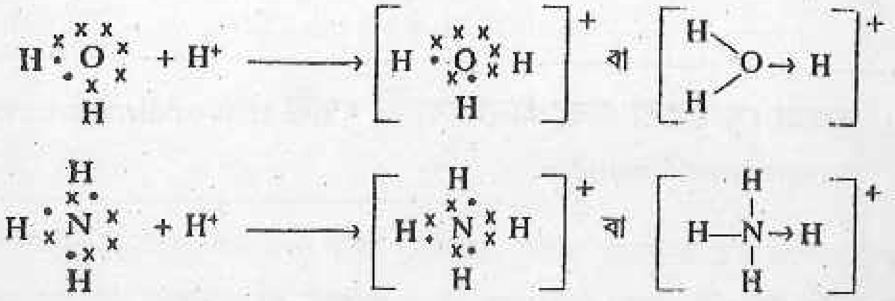
A ও B দুটি মৌলের মধ্যে অসমযোজী বন্ধনী গঠন চিত্রের মাধ্যমে দেখানো হল।



4.16a A এবং B পরমাণুদ্বয়ের অসমযোজী বন্ধন A দাতা এবং B গ্রহীতা পরমাণু।

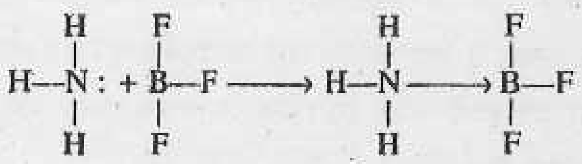
সাধারণতঃ যেসব অণু বা আয়নের কোন পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষে নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন যুগল থাকে তারা দাতা হিসাবে এবং যে সকল অণুর কোন পরমাণুর সর্ববহিস্থ কক্ষে ইলেকট্রন-ষষ্টক (Electron sextet) থাকে তারা গ্রহীতা হিসাবে অসমযোজী বন্ধনী গঠন করে। H^+ আয়ন একটি ইলেকট্রন জোড় গ্রহণের মাধ্যমে He পরমাণুর ন্যায় সুস্থিত ইলেকট্রন বিন্যাস অর্জন করতে পারে। এই কারণে H^+ আয়ন গ্রহীতা হিসাবে অসমযোজী বন্ধনে অংশগ্রহণ করে।

অসমযোজী বন্ধনের মাধ্যমে অ্যামোনিয়াম আয়ন (NH_4^+) এবং হাইড্রোনিয়াম আয়ন (H_3O^+) গঠন চিত্রের মাধ্যমে বর্ণনা করা হল।



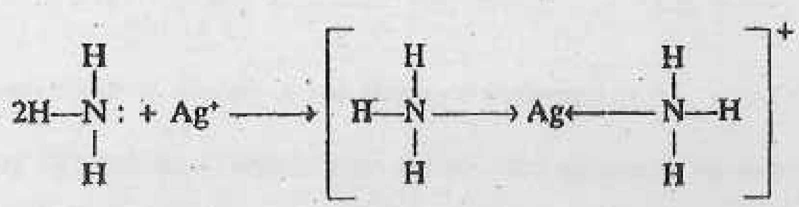
চিত্র 4.16b H_3O^+ এবং NH_4^+ আয়নের গঠন ; H_2O এর O এবং NH_3 এর N দাতা পরমাণু উভয়ক্ষেত্রেই H^+ গ্রহীতা আয়ন চিহ্ন দ্বারা অসমযোজী বন্ধনী বোঝানো হয়। চিহ্নের অভিমুখ দাতা থেকে গ্রহীতার দিকে নির্দেশিত থাকে।

এই অসমযোজী বন্ধনীর মাধ্যমে যুত যৌগও গঠিত হয়। যেমন—



চিত্র 4.16c NH_3 এবং BF_3-র মধ্যে অসমযোজী বন্ধন গঠন।

জটিল আয়ন যেমন সিলভার অ্যাম্মিন আয়ন গঠিত হয় অসমযোজী বন্ধনীর মাধ্যমে।



চিত্র 4.16 d NH_3 অনুর N পরমাণুর নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় দানের মাধ্যমে অসমযোজী বন্ধনের সৃষ্টি ; $[Ag(NH_3)_2]$ জটিল গঠন।

অসমযোজী বন্ধনীর ধর্ম সমযোজী বন্ধনীর অনুরূপ। সমযোজী বন্ধনী ধ্রুবীয় বা অধ্রুবীয় দুই হতে পারে। কিন্তু অসমযোজী বন্ধনী সর্বদা ধ্রুবীয় হয়।

4.11 যোজ্যতাকক্ষীয় ইলেকট্রন জোড় বিকর্ষণ তত্ত্ব (Valence Shell Electron Pair Repulsion (VSEPR) Theory)

কোন সমযোজী অণুর গঠনের ক্ষেত্রে মুলত দুটি বিষয় জানা বিশেষ জরুরী। একটি অনুটির মধ্যে ইলেকট্রনগুলি অর্থাৎ একক অথবা নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় ও বন্ধনজোড়গুলি বিভিন্ন পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষে কেমনভাবে বিন্যস্ত। এই ইলেকট্রন বিন্যাসের ওপর নির্ভর করে সংশ্লিষ্ট অনুটির জ্যামিতিক গঠন ও নির্দিষ্ট হয়। অর্থাৎ কোন অণুর সামগ্রিক চেহারাটি তথা তার জ্যামিতিক আকৃতিটি জানার ক্ষেত্রে অনুটির বিশেষত অনুটির কেন্দ্রীয় পরমাণুর চারদিকে ইলেকট্রন বিন্যাস সম্পর্কে সুস্পষ্ট ধারণা করা দরকার। এ প্রসঙ্গে বিগত শতকের চারের দশকে প্রাথমিক তাত্ত্বিক ধারনা দেন সিজউইক (Sidgwick) এবং পাউয়েল (Powell)। যদিও এ বিষয়ে প্রাসঙ্গিক তত্ত্বটি পরবর্তীকালে (1957) গিলেসপি (R.J. Gillespie) এবং নাইহোম (R. S. Nyholm) কর্তৃক পূর্ণরূপে বিকশিত হয়। তাঁদের প্রস্তাবিত তত্ত্ব (VSEPR) অনুসারে কোন সমযোজী অনুর গঠন মূলত কেন্দ্রীয় পরমাণু যোজ্যতা কক্ষে অবস্থিত ইলেকট্রন তথা ইলেকট্রন জোড়ের সংখ্যা ও পারস্পরিক সংক্রিয়া তথা বিকর্ষণের ওপর নির্ভর করে। বস্তুত এই তত্ত্বটি সম্পূর্ণভাবে অনুধাবণ করতে গেলে নীচের উল্লিখিত সরল সূত্রগুলি অনুসরণ করা দরকার।

প্রথম সূত্র : যোজ্যতা কক্ষের ইলেকট্রন জোড়গুলি সমতড়িৎধর্মী (ঋণাত্মক) হওয়ায় পরস্পরকে বিকর্ষণ করে, ফলতঃ যোজ্যতা কক্ষে ইলেকট্রন জোড়গুলি এমনভাবে বিন্যস্ত হয় যাতে তারা পরস্পর থেকে সবচেয়ে বেশী দূরে থাকতে পারে। (অর্থাৎ তাদের পারস্পরিক বিকর্ষণ সবচেয়ে কম হতে পারে) কোন পরমাণুর চারদিকে যোজ্যতা কক্ষের ইলেকট্রন জোড়গুলি সুনির্দিষ্টভাবে উপযুক্ত কক্ষকে বিন্যস্ত থাকে। যোজ্যতা কক্ষের ঐ অংশে আর কোন ইলেকট্রন থাকে না বা অপরাপর কোন ইলেকট্রনের কার্যকরী প্রভাব অনুপস্থিত বলে ধরে নেওয়া যেতে পারে। যোজ্যতা কক্ষে ইলেকট্রন জোড়ের সংখ্যার ওপর নির্ভর করে কোন জ্যামিতিক আকারের ক্ষেত্রে তাদের পারস্পরিক বিকর্ষণ সবচেয়ে কম অথবা কোন অবস্থানে ইলেকট্রন জোড়গুলির দূরত্ব সর্বাধিক তা নীচের সারণী 4.3-তে উল্লেখ করা হল।

সারণী 4.3

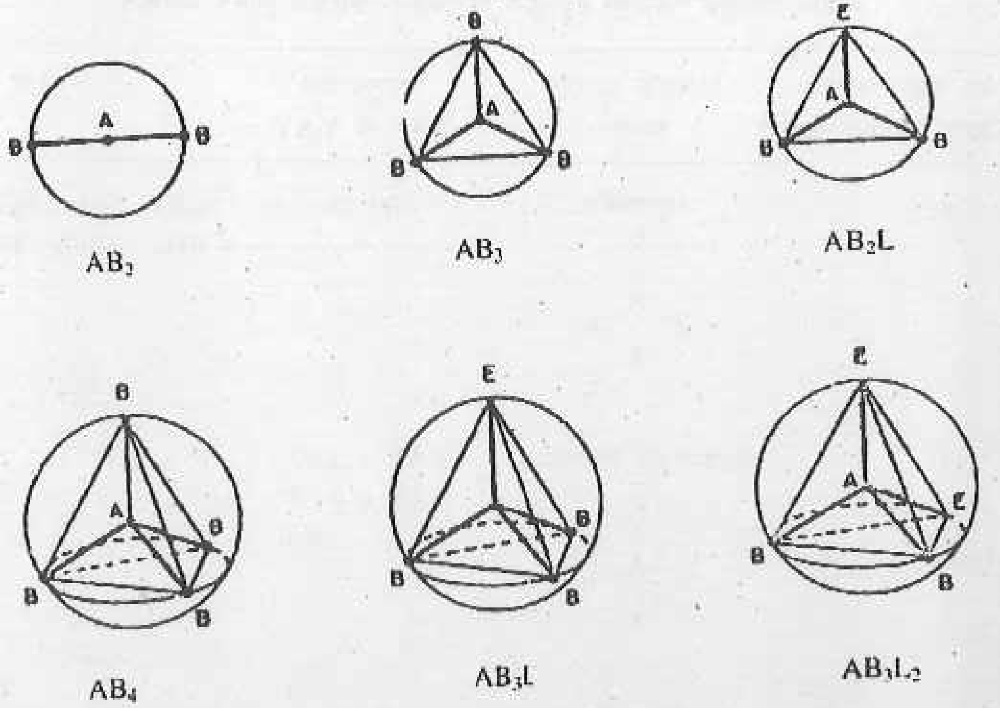
যোজ্যতা কক্ষে ইলেকট্রন জোড়ের সংখ্যার ওপর নির্ভর করে ত্রিমাত্রিক বিন্যাস

ইলেকট্রনের জোড়ের সংখ্যা	ইলেকট্রন জোড়ের ত্রিমাত্রিক বিন্যাস
2.	রৈখিক
3.	সমবাহু ত্রিভুজ
4.	সমাতুস্তলক
5.	ত্রিকোণাকৃতি দ্বি পিরামিড
6.	অষ্টতলক
7.	একাবরিত অষ্টতলক (monocapped octahedron)
8.	বর্গাকৃতি প্রতিলিপির (Square antiprism)

মনে রাখতে হবে এই সূত্রটি প্রয়োগের ক্ষেত্রে কেবলমাত্র এক বন্ধনী অর্থাৎ T বন্ধন এবং নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়ই বিবেচনা করা হয়েছে। যোজাতা কক্ষের ইলেকট্রন জোড়-গননার ক্ষেত্রে বন্ধনীতে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড় এবং অব্যবহৃত মুক্ত ইলেকট্রন জোড়ের কথাই ভাবা হয়েছে। উদাহরণ স্বরূপ বলা যেতে পারে কোন অণুর সংকেত AB_4 হলে। A-র যোজ্যতা কক্ষে নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়ের অনুপস্থিতিতে অনুটি চতুস্তলকীয় হবে. আবার কোন অণুর আণবিক সঙ্কেত AB_3 হলে অনুটি সমত্রিকোণাকার হবে। কিন্তু ঐ অণুতে যদি একটি নিসঃঙ্গ ইলেকট্রন জোড় (L) উপস্থিত থাকে সেক্ষেত্রে তিনটি ইলেকট্রন বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড় (AB_3) এবং অপর নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় অর্থাৎ সর্বমোট চারটি ইলেকট্রন জোড়ের (AB_3L) উপস্থিতির কারণে অণুগুলির ইলেকট্রনীয় জোড়গুলি চতুস্তলকীয় বিন্যাসে অবস্থান করবে। এই চতুস্তলকের চারটি প্রান্তের কেবল তিনটিতে ও পরমাণু থাকার কারণে অণুটির জ্যামিতিক আকার পিড়ামিডের মত হবে। একই যুক্তিতে AB_3l_2 অণুটি কৌনিক হবে। বাস্তবিক এই সূত্রের সরল প্রয়োগে কোন ব্যতিক্রম জানা নাই।

কোন অণুর কেন্দ্রীয় পরমাণুর 5 জোড়া ইলেকট্রন থাকলে সূত্র অনুসারে সেটি ত্রিকোণাকার দ্বি পিরামিড বিন্যাস সম্পন্ন হয়ে থাকবে। এই ইলেকট্রন জোড়গুলি মধ্যে এক বা একাধিক নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় উপস্থিত থাকলে সংশ্লিষ্ট অণুটির জ্যামিতিক আকৃতি সঠিকভাবে নির্ণয় করতে হলে আরো একটি সূত্র জানা দরকার। এটি পরবর্তী 5.7.4 অংশে উল্লেখ করা হল।

একাধিক ইলেকট্রন জোড়গুলির ত্রিমাত্রিক বিন্যাস চিত্র 4.17 তে দেখানো হল।



চিত্র–4.17 : দুটি, তিনটি, চারটি ইলেকট্রন জোড় যুক্ত অণুর আকৃতি

এই সূত্র অনুসরণ করে বিভিন্ন বাস্তব অণুর আদর্শ জ্যামিতিক আকার সারণী উল্লেখ করা হল।

সারণী 4.4

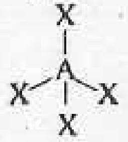
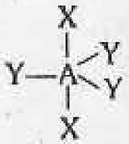
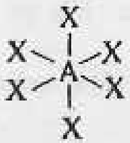
একটি কেন্দ্রীয় পরমাণুর চতুর্দিকে ইলেকট্রন জোড়ের আদর্শ অবস্থান

এক বন্ধনে আবদ্ধ ইলেকট্রনের জোড়ের সংখ্যা*	ইলেকট্রন জোড়ের অবস্থান	কোণের মান XAX বা YAY	উদাহরণ
2	রৈখিক X—A—X	180°	N_2O, CO_2, CdI_2 ইত্যাদি।
3	সমতলীয় ত্রিকোণাকার X, X >A—X	120°	BX_3 (X = F, Cl, Br, R) SO_3^-, CO_3^{2-}, CH_3^+ ইত্যাদি।

* এক্ষেত্রে কোন নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় নেই বলে ধরা হয়েছে।

সারণী 4.4 (*Contd.*)

একটি কেন্দ্রীয় পরমাণুর চতুর্দিকে ইলেকট্রন জোড়ের আদর্শ অবস্থান

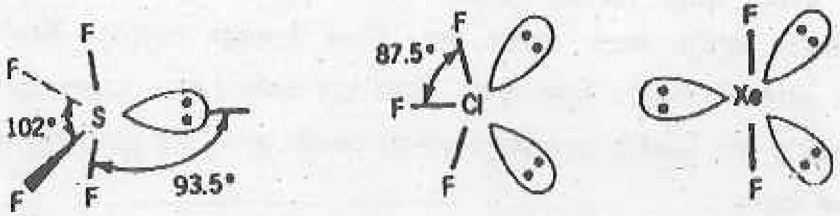
এক বন্ধনে আবদ্ধ ইলেকট্রনের জোড়ের সংখ্যা*	ইলেকট্রন জোড়ের অবস্থান	কোণের মান XAX বা YAY	উদাহরণ
4	চতুস্তলকীয় 	109°28	CH_4 , NH_4^+, BF_4^-, BH_4^- , ClO_4^- ইত্যাদি।
5	ত্রিকোণাকৃতি দ্বিপিরামিড 	$X\hat{A}X = 180°$ $Y\hat{A}Y = 120°$ $X\hat{A}Y = 90°$	PCl_5 , $SbCl_5$
6	অষ্টতলকীয় 	90°	SF_6 , PF_6^- , ইত্যাদি

* এক্ষেত্রে কোন নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় নেই বলে ধরা হয়েছে।

দ্বিতীয় সূত্র : বন্ধনে অব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড় কেন্দ্রীয় পরমাণুর উপর বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রনের জোড়ের তুলনায় বেশী আয়তন জুড়ে থাকে।

উপরের সূত্রটির থেকে একথা সুস্পষ্ট যে বিকর্ষণের ক্রমাণুসারে ইলেকট্রন জোড়গুলিকে সাজালে নিঃসঙ্গ—নিঃসঙ্গ > নিঃসঙ্গ—বন্ধন > বন্ধন—বন্ধন। এইভাবে পাওয়া যাবে। বস্তুত কোন পরমাণুর ইলেকট্রন জোড় বন্ধনে ব্যবহৃত হলে ইলেকট্রনগুলি অংশত অপর পরমাণুর নিউক্লিয়াসের দিকে আকৃষ্ট হয়। ফলে ইলেকট্রন জোড়ের ত্রিমাত্রিক কোণ অপেক্ষাকৃত ছোট হয়ে থাকে।

এই সূত্র প্রয়োগ করে আমরা AB_4L, AB_3L_2 এবং AB_2L_3 ইত্যাদি অণুগুলির আকার সম্পর্কে ধারণা করতে পারব। এ পর্যায়ের আদর্শ উদাহরণগুলি চিত্র 4.17 তে দেখানো হল।



চিত্র–4.18 : AB_4L, AB_3L_2, AB_2L_3 জাতীয় অণুর আকার

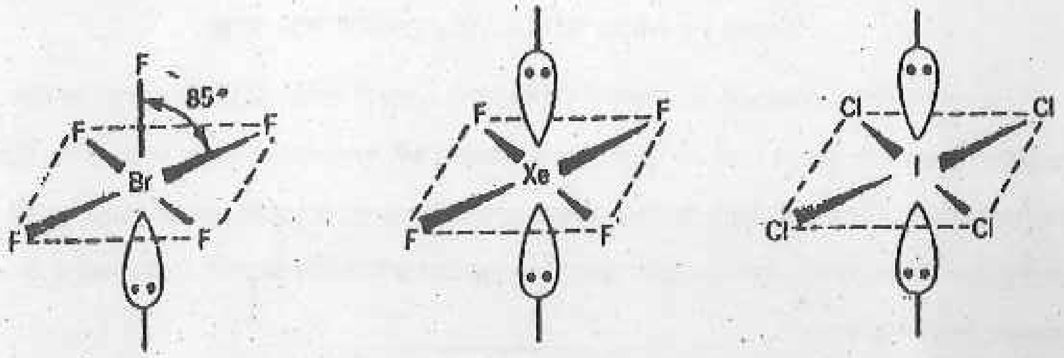
নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়গুলি অপেক্ষাকৃত বেশি জায়গা নেওয়ায় এগুলি নিরক্ষীয় অঞ্চলে অবস্থিত হবে। বন্ধনীতে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়ের তুলনায় অপেক্ষাকৃত বেশী আয়তনের হওয়ায় পারস্পরিক বিকর্ষণের বিচারে নিরক্ষীয় অবস্থানেই এগুলি সর্বাধিক সুস্থিত হবে। এই ধরণের অণুগুলির ক্ষেত্রে আরো একটি লক্ষণ বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। এক্ষেত্রে বন্ধন জোড়ে ব্যবহৃত ইলেকট্রনগুলির মধ্যবর্তী কোন আদর্শ অবস্থানের তুলনায় সর্বদা কম হবে।

সারণী (4.5)

কয়েকটি AB_2L_2 এবং AB_3L অণুর আন্তর পরমাণু কোণ

AB_2L_2		AB_3L					
অণু	কোণ	অণু	কোণ	অণু	কোণ	অণু	কোণ
H_2O	104.5°	NH_3	107.3°	NF_3	102.1°		
H_2S	92.2°	PH_3	93.3°	PF_3	97.8°	PCl_3	100.3°
H_2Se	91.0°	AsH_3	91.8°	AsF_3	96.2°	$AsCl_3$	98.7°
H_2Te	89.5°	SbH_3	91.3°	SbF_3	88.0°	$SbCe_3$	99.5°
OF_2	103.2°						
OCl_2	111.0°						

যে সমস্ত অণুর ক্ষেত্রে কেন্দ্রীয় পরমাণুর যোজক কক্ষে 6 জোড়া ইলেকট্রন থাকে সেগুলির ক্ষেত্রেও এই সূত্র অনুসরণ করে কোণগুলির মান তথা অণুর আকৃতি বোঝা যায়। এই পর্যায়ের অনুগুলির সাধারণ আণবিক সঙ্কেত AB_6, AB_5L, AB_4L_2 ইত্যাদি। AB_5L অণুতে নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়টি স্বাভাবিকভাবেই আক্ষীয় অংশে অবস্থিত হবে। নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়টির প্রভাবে বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়গুলি বিপরীত দিকে সামান্য বিচ্যুত হবে অর্থাৎ LAB কোণের মান 90°র কম এবং BAB (অক্ষীয় এবং নিরক্ষীয় B পরমাণুর ক্ষেত্রে) কোনটি 90°-র কম হবে। চিত্র 4.19 লক্ষ্য করলে এটি বোঝা যাবে।



চিত্র—4.19 : ছটি যোজক ইলেকট্রন জোড় যুক্ত অণুর আকার

এই পর্যায়ে আরো দুটি সূত্র যুক্ত হলে তত্ত্বটি ব্যবহারিক দিক থেকে বিশেষ উপযোগী হয়ে উঠবে।

তৃতীয় সূত্র : লিগ্যান্ড এর তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্ম বৃদ্ধি পাওয়ার সাথে সাথে বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়ের আয়তন কমে।

এই সূত্রটির সাহায্যে আগে উল্লিখিত সারণী (4.5) তে প্রকাশিত বন্ধন কোনগুলির পারস্পরিক মানের তুলনামূলক ভিত্তি পাওয়া যেতে পারে। যেমন NF_4 ও F_2O বন্ধন কোণের মান NH_3 রাও জলের তুলনায় কম। অনুরূপে হ্যালোজেন যুক্ত AB_2L_2 বা AB_3L অনুগুলির ক্ষেত্রে BAB কোণের মান $F > Cl > Br \simeq I$ ক্রমাণুসারে বাড়তে থাকে। যদিও উল্লেখ করা দরকার হাইড্রাইড গুলির ক্ষেত্রে এই সূত্রের ক্ষেত্রে ব্যতিক্রম দেখা যায়। সারণীতে উল্লিখিত PH_3, ASH_3, SH_2 কোণগুলির মান পরীক্ষা করলে এটা স্পষ্টভাবে বোঝা যাবে। এটি আরো পরিষ্কার করে বুঝে নেওয়ার জন্য নীচের সারণী (4.6) তে উল্লিখিত ক্রমগুলি পরীক্ষা করলে বোঝা যাবে।

সারণী (4.6)

বিভিন্ন অণুর বন্ধণ কোণের পারস্পরিক তুলনা

PI_3 (~102°) > PBr_3 (~101.5°) > PCl_3 (~100°) > PF_3 (~98°)

ASI_3 (~101°) > $ASBr_3$ (~100°) > $AsCl_3$ (~98°)

NH_3 (~107°) > NF_3 (~102°)

OH_2 (~104.5°) > OF_2 (~104°)

NH_3 (~107°) > PH_3 (94°) > AsH_3 (92°) ~ SbH_3 (~92°)

H_2O (~104.5°) > H_3S (92°) > H_3Se (91°) > H_3Te (89.5°)

চতুর্থ সূত্র : দ্বিবন্ধনে ব্যবহৃত দুটি ইলেকট্রন জোড় অথবা ত্রিবন্ধনে ব্যবহৃত তিনটি ইলেকট্রন জোড় এক বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়ের তুনায় বেশী আয়তন অধিকার করে। চতুর্থ সূত্রটির সাহায্যে দুটি পরমাণুর ক্ষেত্রে একাধিক বন্ধনযুক্ত অণুর উদাহরণগুলি ব্যাখ্যা করা যায়। বস্তুত বহুবন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়গুলি এক বন্ধনের তুলনায় অনেক বেশী আয়তন অধিকার করে। এ পর্যায়ের কতগুলি আদর্শ উদাহরণ সারণী (4.7) তে উল্লেখ করা হল

সারণী : 4.7

দ্বি বন্ধনযুক্ত কয়েকটি অণুতে বন্ধন কোণের মান

অণু	বন্ধন কোন		
	$B\hat{A}B$	$B\hat{C}O$	$B\hat{C}C$
F_2CO	108°	126°	
Cl_2CO	111°	124°	
$(NH_2)_2CO$	118°	121°	
F_2SO	93°	107°	
Br_2SO	96°	108°	
$CH_2 = CF_2$	110°		125°
$CH_2 = CCl_2$	114°		123°
OPF_3	103°		
$OPCl_3$	104°		

সারণীটি লক্ষ্য করলে দেখা যাবে যে দ্বি বন্ধনে যুক্ত প্রান্তিক পরমাণুটি এক বন্ধনে যুক্ত প্রান্তিক পরমাণুর তুলনায় কম তড়িৎ ঋণাত্মক হলে তৃতীয় সূত্রটি চতুর্থ সূত্রটিকে আরো প্রতিষ্ঠিত করে।

সারণী 4.8 লক্ষ্য করলে আলোচ্য বিষয়টি আরো স্পষ্টভাবে বোঝা যায়।

সারণী 4.8

বন্ধন কোণের ওপর দ্বিবন্ধনের প্রভাব

অণু	XÂX	অণু	XÂX
$O=PF_3$	102·5°	$O=SF_2$	92·5°
$O=PCl_3$	103·5°	$O=SBr_2$	96°
$O=PBr_3$	108°		
$S=PF_3$	100°	$O=CF_2$	108°
$S=PBr_3$	106°	$O=CCl_2$	100°
		$O=SF_4$	115° (X নিরঃ Â Xনিরঃ)
			164° (X অক্ষ Â X অক্ষ)

এই তত্ত্ব অনুসরণ করে কোন কোন ক্ষেত্রে বিভিন্ন বন্ধনে তুলনামূলক দূরত্ব সম্পর্কেও পূর্বাভাস দেওয়া যায়। বস্তুত AB_5, AB_4L, AB_3L_2 বা AB_5L অণুগুলিতে বিভিন্ন ধরনের বন্ধনগুলির অর্থাৎ অক্ষীয় ও নিরক্ষীয় বন্ধনগুলির দূরত্বের মধ্যে প্রায় 10 p.m. পার্থক্য লক্ষ্য করা যায়। ত্রিকোণাকার দ্বিপিরামিড অণুগুলির ক্ষেত্রে অনুভূমিক বন্ধনগুলি দীর্ঘতর হয়ে থাকে। বস্তুত ত্রিকোণাকার দ্বিপিরামিড অণুগুলির ক্ষেত্রে অক্ষীয় ইলেকট্রন জোড়গুলির নিকটবর্তী তিনটি নিরক্ষীয় ইলেকট্রন জোড় কেবলমাত্র 90° কোণে সরে থাকে। যদিও নিরক্ষীয় বন্ধনগুলির তুলনায় 90° কোণে অবস্থিত মাত্র দুটি বন্ধন জোড় বর্তমান। এক্ষেত্রে অক্ষীয় পরমাণুগুলি কেন্দ্রীয় পরমাণুর থেকে দূরে সরে গেলে, অর্থাৎ অক্ষীয় বন্ধনগুলি দীর্ঘতর হলে সাম্য রক্ষিত হয়। অপরপক্ষে AB_5L অণুর ক্ষেত্রে L নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়টি একই দিকে অবস্থানকারী বন্ধন জোড়কে তীব্রতর ভাবে প্রভাবিত করে এজন্য অনুভূমিক বন্ধনগুলি দীর্ঘতর হয়।

4.11.1 যোজ্যতা কক্ষীয় ইলেকট্রন জোড় বিকর্ষণ তত্ত্বের সীমাবদ্ধতা

যোজ্যতা কক্ষীয় ইলেকট্রন জোড় বিকর্ষণতত্ত্বের সূত্রগুলির সরলতা থেকে বোঝা যায় যে এই সূত্রগুলি তথা সমগ্র তত্ত্বটি সকল অণুর ক্ষেত্রে যথাযতভাবে উপযোগী নয়। এক্ষেত্রে সম্ভাব্য অপব্যবহার এড়ানোর জন্য সূত্রগুলির সীমাবদ্ধতা বিশেষ করে জেনে রাখা দরকার।

- অত্যন্ত ধ্রুবীয় পরিস্থিতির ক্ষেত্রে আয়নীয় উপস্থাপনা অধিকতর উপযোগী। উল্লেখ করা যেতে পারে Li_2O অণুটি AB_2L_2 জাতীয় অণু হওয়া সত্ত্বেও কৌণিক নয় বরং রৈখিক। বস্তুত একক ধনাত্মক আধানগ্রস্ত Li^+ আয়ন কেন্দ্রীয় অক্সাইড আয়নের পরস্পর বিপরীত প্রান্তিক অবস্থানে থাকে।
- দ্বিতীয় শ্রেণী (শ্রেণী II, S বর্গীয়) ক্ষার মৃত্তিকা মৌলগুলির দ্বি হ্যালাইডগুলির ক্ষেত্রে আণবিক গঠনের ধারাটি VSEPR অথবা অপর কোন সরল রূপকল্প অণুসরণ করে সম্পূর্ণ যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না। এবিষয়ে প্রাসঙ্গিত তথ্যগুলি সারণী (4.9) তে উল্লেখ করা হল।

সারণী ; (4.9)

দ্বিতীয় পর্যায়ের মৌলগুলির দ্বিহ্যালাইড অনুগুলির আনবিক গঠন

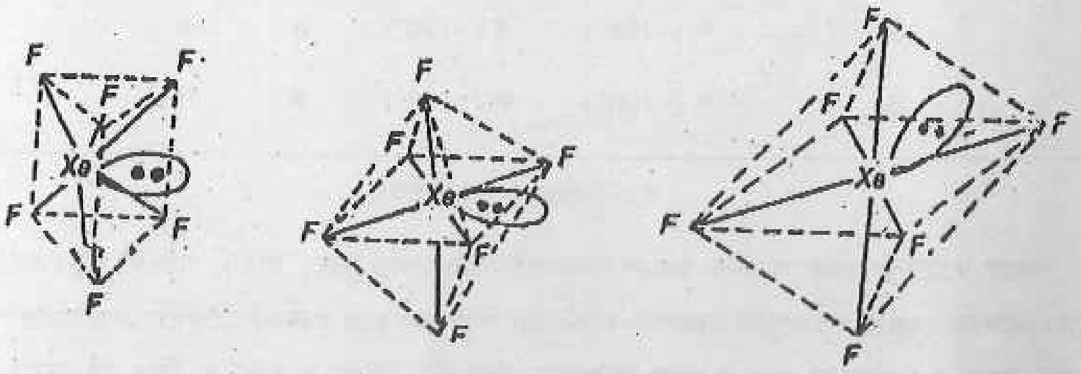
	F	Cl	Br	I
Be	র	র	র	র
Mg	ক (~100°?)	র	র	র
Ca	ক (~140°)	র	র	র
Sr	ক (~108°)	ক (~120°)	র	র
Ba	ক (~100°)	ক (~100°)	ক	ক

র = রৈখিক ক = কৌণিক

বস্তুত VSEPR অথবা আয়নিক বন্ধনের উভয়তাই সকল ক্ষেত্রে সরল, রৈখিক, আণবিক গঠন প্রস্তাবিত হয়। এক্ষেত্রে কেন্দ্রীয় পরমাণুটির যোজ্যতা কক্ষের Sp সংকরায়ন হলে বন্ধনগুলি রৈখিক হবে আবার বন্ধন গঠনে বিশুদ্ধ 'p' কক্ষকের অংশ অনুসারে ইলেকট্রন জোড়গুলি কৌণিক হতে পারে। কিন্তু এই পর্যায়ে এই ধারণাটি নেহাতই প্রয়োজনীয়।

সারণীটি অনুসরণ করে রৈখিক অবস্থান বিচ্যুতিগুলির ধরণ লক্ষ্য করলে উপরোক্ত দুটি কারণই যথার্থ বলে মনে হতে পারে। যদি একটি আয়নীয় অণুর প্রস্তাব মেনে নেওয়া হয় সেক্ষেত্রে প্রান্তিক ঋণায়নগুলির দ্বারা কেন্দ্রীয় ধনায়নটির ধ্রুবনের পরিমাণ বিবেচনা করা দরকার। এ জাতীয় ধ্রুবনের কারণে অনুটি কৌণিক হতে পারে। ক্যাটায়নের আকৃতি যত বড় হবে স্বভাবতই বক্রতার পরিমান ততই বৃদ্ধি পাবে। বিপরীতক্রমে এমনও ভাব যেতে পারে যে ধাতুটির 'd' কতকগুলি বন্ধন গঠনে যতবেশী করে অংশগ্রহণ করে ততই অনুটি বক্রাকার হয়ে থাকে। শেষোক্ত ধারণাটি বলা বাহুল্য সমযোজী বন্ধন গঠনের দৃষ্টিকোণ থেকে প্রস্তাবিত।

- কোন কোন অণুর ক্ষেত্রে যোজ্যতা কক্ষে ইলেকট্রন যোড় উপস্থিত থাকলেও তা রাসায়নিক ভাবে নিষ্ক্রিয়, এই পর্যায়ের অনুগুলির মধ্যে পর্যায়সারণীর আদর্শ মৌলগুলির (Representative Elements) ভারী পরমাণুগুলির যৌগগুলি উল্লেখ করা যেতে পারে। উদাহরণস্বরূপ (In^{I}, Tl^{I}, Sn^{II}, Pb^{II}, Sb^{III}, Bi^{III}, Te^{IV}, Po^{IV} যৌগগুলির ক্ষেত্রে যোজ্যতা কক্ষে উপস্থিত একজোড়া ইলেকট্রন S কক্ষক টি অধিকার করে থাকে এক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট অণুর জ্যামিতিক আকৃতি নির্ণয়ে ক্ষেত্রে লিগ্যাণ্ড অণুর অবস্থান যোজ্যতা কক্ষের ইলেকট্রন জোড় দ্বারা কোনভাবেই প্রভাবিত হয় না। কার্যত $SeBr_6^{2-}$, $TeBr_6^{2-}$, $SbCl_6^{3-}$ অথবা $BiCl_6^{3-}$ সকলক্ষেত্রেই সুসম অষ্টতলক আকৃতির অণু গঠিত হয়। যদিও প্রকৃতিগতভাবে এই অণুগুলি AB_6L জাতীয়। XeF_6 অণুর বিষয়টি বিশেষত প্রান্তিক। XeF_6 অণুটি সুষ্মঅষ্টতলক নয় বস্তুত গ্যাসীয় অবস্থায় অণুটি এককভাবে অবস্থান করে এই দশায় নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়টি ত্রিমাত্রিক গঠনের দিক থেকে সক্রিয় এবং চিত্র 4.20 তে উল্লিখিত প্রস্তাব অনুসারে একাধিক আকার গ্রহণ করে থাকে।



চিত্র—4.20 : XeF_6 এর তিনটি সম্ভাবনা আকার

In^I, Te^I এর ক্ষেত্রে যোজক কক্ষের ইলেকট্রন জোড়টি নিষ্ক্রিয় এবং সে কারণে সুস্থিত থাকে। আবার Sn^{II} এর কোন কোন যৌগে, উদাহরণ স্বরূপ $SnCl_3$ আয়নের ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রন জোড়টি ত্রিমাত্রিক আকৃতির ক্ষেত্রে সক্রিয় আবার $SnCl_6^{2-}$ ক্ষেত্রে নিষ্ক্রিয় হয়ে থাকে।

- যে সমস্ত অত্যন্ত দৃঢ় 'π' বন্ধন গঠিত হয় সেক্ষেত্রে অণুটির আকৃতি নির্ণয় করা শক্ত হয়ে পড়ে। উদাহরণস্বরূপ AB_3L জাতীয় $C(CN)_3$ আয়নের উল্লেখ করা যায়। এক্ষেত্রে আয়নটি সামতলিক। কোন কোন অ্যামিন জাতীয় যৌগ পিরামিড আকার অথবা সমতলীয় এই দুধরনের জ্যামিতিক গঠনের যে কোন একটির আকৃতি গ্রহণ করে। ফলত $N(SiH_3)_3$ অণুটি সম্ভবত 'π' বন্ধন গঠনের কারনেই সামতলিক।

- N_2H_4 অণুর বিভিন্ন নাইট্রোজেন পরমাণুগুলির সঙ্গে যুক্ত নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়দ্বয় পরস্পরের সাপেক্ষে সম্পূর্ণ বিপরীত অবস্থানের বদলে কৌণিক অবস্থানের যথাযথ ব্যাখ্যা দিতে VSEPR সম্পূর্ণ ব্যর্থ হয়। বস্তুত H_2O_2 অণুর ক্ষেত্রেও VSEPR এর প্রস্তাবিত ব্যাখ্যা সম্পূর্ণ প্রশ্নাতীত নয়।

- এই তত্ত্বের সাহায্যে সন্ধিগত মৌলের যৌগ বা আয়নগুলির গঠন ব্যাখ্যা করা যায় না।

- VSEPR তত্ত্বের সাহায্যে কোন মাত্রিক গণনা বা নির্ভুলভাবে বন্ধন কোনগুলির পরিমাণ সম্ভব নয়। বস্তুত VSEPR কেবলমাত্র গুণগত ব্যাখ্যাই করতে পারে।

4.12 যোজ্যতা বন্ধনের আয়নীয় চরিত্র, ধ্রুবীয়তা বা মেরুধর্মীতা (Ionic character of covalent bond, polarity)

দুটি পরমাণুর মধ্যে সরাসরি ইলেকট্রন বর্জন ও গ্রহনের মাধ্যমে অর্থাৎ দুটি পরমাণুর মধ্যে এক বা একাধিক ইলেকট্রনের সম্পূর্ণরূপে স্থানান্তরের মাধ্যমে আয়নীয় বন্ধন গঠিত হয়। যে আয়নটি ইলেকট্রন বর্জন করে সেটি পরা তড়িৎগ্রস্ত আয়নে রূপান্তরিত হয়। এক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট বন্ধনটি স্বভাবতই মেরুধর্মী।

দুটি পরমাণুর মধ্যে সমযোজী বন্ধন গঠিত হলে সমযোজী বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়টি সংশ্লিষ্ট পরমাণুদ্বয় তাদের তড়িৎ ধনাত্মক ধর্মের ভিন্নতা অনুসারে ব্যবহার করে থাকে। যদি পরমাণুদ্বয় তড়িৎ ধণাত্মক ধর্ম সমান হয় অর্থাৎ পরমাণু দ্বয় একই মৌলের হলে ইলেকট্রন জোড়গুলি সমভাবে ব্যবহৃত হয়। এই ধরণের

সমযোজী বন্ধনে ইলেকট্রন আধান উভয় পরমাণুর মধ্যে সমভাবে বিন্যস্ত হওয়ায় সংশ্লিষ্ট বন্ধনটি অধ্রুবীয় অথবা বিশুদ্ধ সমযোজী বন্ধনী ও সংশ্লিষ্ট অণুটি অধ্রুবীয় হয়ে থাকে।

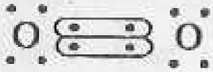
$$A \bullet\bullet A$$

চিত্র–4.21 : সমপরমাণুক অধ্রুবীয় বন্ধন

ইলেকট্রন জোড় দুটি A পরমাণুর মধ্যে সমভাবে ব্যবহৃত সুতরাং অণুটি অধ্রুবীয়।

উদাহরণ : H_2, F_2, Cl_2, Br_2, I_2 ইত্যাদি

বলা বাহুল্য এ ধরণের অধ্রুবীয় অণুর ধারণাটি কেবলমাত্র একযোজী অণু নয় দ্বিযোজী যেমন O_2 এবং ত্রিযোজী N_2 ইত্যাদি অণুর ক্ষেত্রে একইভাবে প্রযোজ্য।

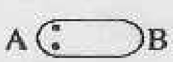


দ্বিযোজী বন্ধনযুক্ত অধ্রুবীয় O_2 অণু

দ্বিযোজী বন্ধনযুক্ত অধ্রুবীয় O_2 অণু

চিত্র–4.22 : বহুযোজী সমপরমাণুক অণু ও অধ্রুবীয় হয়

কিন্তু দুটি ভিন্ন পরমাণু A এবং B সমযোজী বন্ধনে যুক্ত হলে যদি তাদের তড়িৎ ধনাত্মকতার মান ভিন্ন হয় সেক্ষেত্রে AB অণুর গঠনে ব্যবহৃত সমযোজী ইলেকট্রন জোড় পরমাণু দ্বয়ের মধ্যে সমান ভাবে বন্টিত হয় না। স্বভাবতই সংশ্লিষ্ট অণুটি বিশুদ্ধ, সমযোজী হতে পারে না। সেক্ষেত্রে ঐ পরমাণু দ্বয়ের মধ্যে যেটি বেশী তড়িৎ ধনাত্মক সেটি বন্ধনীর ইলেকট্রন জোড়কে নিজের দিকে বেশী পরিমাণে আকর্ষণ করে রাখে। বলা বাহুল্য এক্ষেত্রে সমযোজী বন্ধনের ইলেকট্রন জোড় অধিক তড়িৎ ধনাত্মক পরমাণুটির উপর অপেক্ষাকৃত বেশী পরিমানে সরে আসে।সুতরাং ঐ পরমাণুটি আংশিক ঋণ আধানগ্রস্ত হয়ে পড়ে। বলা বাহুল্য বন্ধনীর ওপর প্রান্তিক পরমাণুটি সমপরিমান অংশে ইলেকট্রন আধান বঞ্চিত সুতরাং ধন আধান গ্রস্ত হয়। ফলত সংশ্লিষ্ট সমযোজী বন্ধনীতে আংশিক আয়নীয় প্রকৃতি লক্ষ্য করা যায়।



বিসম পরমাণুদ্বয়ের মধ্যে সমযোজী বন্ধন

$$\overset{-\delta}{A}\!:\!\!-\!\!\!-\!\!\!-\overset{+\delta}{B}$$

ইলেকট্রন জোড়ের অসম বণ্টনে বন্ধনীতে ব্যবহৃত পরমাণুদ্বয় আংশিক আধানগ্রস্ত

চিত্র–4.23 : বিসম পরমাণুদ্বয়ের সমযোজী বন্ধনের ধ্রুবীয়তা এক্ষেত্রে A-পরমাণুটি B অপেক্ষা অধিক তড়িৎ ঋণাত্মক

উদাহরণস্বরূপ HF, HCl, $>C{=}O$, $-C{\equiv}N$ ইত্যাদি বন্ধনের উল্লেখ করা যেতে পারে। A—B সমযোজী বন্ধনটি আয়নীয় প্রকৃতির পরিমান A ও B এর তড়িৎ ঋণাত্মকতার পার্থক্যের ওপর নির্ভরশীল। পার্থক্যের পরিমান বেশী হলে বন্ধনীর আয়নীয় প্রকৃতিও বেশী হবে। বিপরীত ক্রমে পার্থক্যের পরিমাণ কম হলে ধ্রুবীয়তার পরিমাণও কম হবে। উদাহরণত হ্যালোজেন মৌলগুলির তড়িৎ ধণাত্মকতার ক্রম F > Cl > 3r > I। স্বভাবতই সংশ্লিষ্ট হাইড্রাইড যৌগগুলির ধ্রুবীয়তার ক্রম H—F > H—Cl > H—Br > H—I. দুটি পরমাণুর তড়িৎ ঋণাত্মকতার পার্থক্য পাউলিং স্কেলে 1.7 হলে সমযোজী বন্ধনের আয়নীয় প্রকৃতি কম বেশী 50% হয়।

আংশিক আধান গ্রস্ত এই ধরণের সমযোজী বন্ধনীকে মেরুধর্মী বন্ধনী বা ধ্রুবীয় বন্ধনী বলা হয়। এ ধরনের বন্ধনযুক্ত অণুকে ধ্রুবীয় অণু বলা হয়। যেহেতু একটি চুম্বকের উভয় প্রান্তে বিপরীত মেরুদ্বয় বর্তমান সুতরাং চুম্বকের সঙ্গে গঠিত গত সাদৃশ্য লক্ষ্য করে এই ধরণের অণুকে মেরুধর্মী (Polar) বলা হয়। চুম্বকের অনুসরণে পরাআধান গ্রস্ত পরমাণু বা অপরা আধান গ্রস্ত পরমাণুর যে কোনটির উপর আধানের পরিমান (qe) এবং প্রান্ত দ্বয়ের মধ্যবর্তী বন্ধন দূরত্বের (d) গুণফলকে বলা হয় দ্বিমেরু ভ্রামক (Dipole moment)। সুতরাং দ্বিমেরু ভ্রামক (μ)

$$\mu = (qe) \times (d)$$

দ্বিমেরু ভ্রামকের C.G.S একক—ডি বাই (Debye, D) দ্বিমেরু ভ্রামক সম্পর্কিত উল্লেখযোগ্য গবেষণার অধিকারী বিজ্ঞানী ডি বাই এর সম্মানার্থে এই এককটি উৎসর্গীকৃত। যেহেতু ইলেকট্রন আধানের মাত্রা 10^{-10}esu এবং বন্ধন দূরত্বের মাত্র A° বা 10^{-8}cm সুতরাং $1d = 10^{-10}\ esu \times 10^{-8}\ cm$

$$= 10^{-8}\ esu \cdot cm.$$

S.I. এককে আধানের মাত্রা 10^{-19} কুলম্ব এবং বন্ধনী দূরত্ব 10^{-10} মিটার হওয়ায় S.I. এককে ধ্রুবীয়তা কুলম্ব মিটার মাত্রায় প্রকাশিত হয়। পারস্পরিক তুলনায় বলা যায় ধ্রুবীয়তা S.I. এককে 10^{-29} কুলম্ব মিটার মাত্রায় পরিমিত এক্ষেত্রে একক দ্বয়ের পারস্পরিক সম্পর্ক হল

$$1d = 10^{-10}\ esu \times 10^{-8}\ cm$$

$$= \frac{1.602}{4.8} \times 10^{-19} \text{ কুলম্ব} \times 10^{-10} \text{ মিটার}$$

$$= 0.33375 \times 10^{-29} \text{ কুলম্ব-মিটার} = 3.3375 \times 10^{-30} \text{ কুলম্ব-সেমি}$$

যদিও বর্তমান S.I. এককের তুলনায় এখনও ডি বাই এককটি অধিকতর জনপ্রিয় ও প্রচলিত। এজন্য দ্বিমেরু ভ্রামক সম্পর্কিত পরবর্তী আলোচনায় ডি বায এককটি ব্যবহার করব।

কোন বন্ধনীর দ্বিমেরু ভ্রামকের মান থেকে বন্ধনীর আয়নিক চরিত্র বা সমযোজী চরিত্রের শতকরা মান নির্ণয় করা যায়। একটি বিসম দ্বিপরমাণুক অণুর যথা HX. (X = F, Cl, Br, I) উপাদান পরমাণুদ্বয়ের দুটি কেন্দ্রকের অন্তবর্তী দূরত্ব বা বন্ধন দূরত্ব জানা থাকলে দ্বিমেরু ভ্রামকের পরিমাণ নির্ধারনের মাধ্যমে ঐ অণুর শতকরা ধ্রবীয়তা জানা যায়। উদাহরণ স্বরূপ HF এর বন্ধন দূরত্ব 0.92 i বা 92pm এবং দ্বিমেরু ভ্রামকের পরিমাণ 1.91 D. HF অণুটি সম্পূর্ণ-(100%) আয়নীয় হলে অর্থাৎ 92pm বন্ধনের দুই প্রান্তে পূর্ণ ইলেকট্রনীয় আধানযুক্ত H^+ ও F^- উপস্থিত হলে দ্বিমেরু ভ্রামকের মান হত ইলেকট্রনীয় আধান ও বন্ধন দূরত্বের গুণফল। অর্থাৎ 100% আয়নীয় বন্ধনের জন্য দ্বিমেরু ভ্রামকের মান ($\mu_{100\%}$)

$$\mu_{100\%} = 0.92 \times 10^{-8} \times 4.8 \times 10^{-10} \text{ esu -cm}$$

$$= 0.92 \times 4.8 \times 10^{-18} \text{ esu - cm}$$

$$= 0,92 \times 4.8 \text{ D}$$

$$= 4.416 \text{ D}$$

বাস্তবিক μ_{HF} = 1.91 D. কেননা HF অণুর প্রান্তিক পরমাণুগুলিতে সঞ্চিত আধানের পরিমান ইলেকট্রনীয় আধানের একটি অংশমাত্র। সুতরাং HF অণুর আয়নীয় অংশের পরিমাণ (P)

$$P = \frac{\mu_{HF}}{\mu_{100\%}} \times 100$$

$$= \frac{1.91}{4.416} \times 100$$

$$= 44.83 \simeq 45$$

অর্থাৎ HF এর শতকরা আয়নিক চরিত্র প্রায় 45%। সুতরাং বলা যায় HF অণুটি (100-45)% = 55% সমযোজী।

যেহেতু দ্বিমেরু ভ্রামক একটি আধান ও নির্দেশিত দিক বিশিষ্ট দূরত্বের গুণফল [অর্থাৎ একটি সদিশ

রাশি বা ভেক্টার] সুতরাং দ্বিমেরু ভ্রামক একটি সদিশ রাশি। এক্ষেত্রে ভ্রামকের দিকটি পরা ও অপরা ও আধানের কেন্দ্রকের সংযোজক রেখা বরাবর পড়াতড়িৎগ্রস্ত আধানের সরণের দিক নির্দেশ করে অর্থাৎ HF অণুতে যেহেতু অধিক তড়িৎ ঋণাত্মক XF প্রান্তটি। অপেক্ষাকৃত কম তড়িৎ ঋণাত্মক H প্রান্তের সাপেক্ষে অপরা বা ঋণাত্মক আধান গ্রস্ত সুতরাং ভ্রামকের দিক H এবং F পরমাণুর সংযোজক রেখা বরাবর H থেকে F এর দিকে বিস্তৃত।

$$\overset{+\delta}{H}—\overset{-\delta}{F}$$

$$X_H < X_F$$

$$\xrightarrow{\mu}$$
$$H—F$$

দ্বিমেরু ভ্রামক (μ)

চিত্র—4.24 : HF অণুর দ্বিমেরু ভ্রামকের দিক

দ্বিমেরু ভ্রামকের মান (সাংখ্য মান) বেশি হলে সংশ্লিষ্ট অণুটিও বেশি মেরুধর্মী বা ধ্রুবীয় হবে। এক কথায় দ্বিমেরু ভ্রামকের মান বড় হওয়ার অর্থ সংশ্লিষ্ট বন্ধনীটি বেশি মেরুধর্মী, আবার দ্বিমেরু ভ্রামক কম হলে বন্ধনীটি, কম মেরুধর্মী হবে। একই যুক্তি অনুসরণ করে বলা যায়, দ্বিমেরু ভ্রামকের মান শূন্য হলে বন্ধনীটি অধ্রুবীয় (non-polar) বা মেরুধর্মহীন হবে।

একটি পরমাণু যদি একাধিক ভিন্ন পরমাণুর সঙ্গে যুক্ত থাকে সেক্ষেত্রে ঐ পরমাণুকেন্দ্রিক সামগ্রিক দ্বিমেরু ভ্রামকের মান বিভিন্ন দিকে প্রসারিত দ্বিমেরু ভ্রামকগুলির লব্ধি বা সদিশ রাশির যোগফল (Vector sum)। এই ধারণা থেকে বলা যায় যে, কোন অণু গঠনকারী সমযোজী বন্ধনগুলি ধ্রুবীয় হলেও সামগ্রিক বিচারে অণুটি ধ্রুবীয় হবে কিনা তা নির্ভর করে অনুটির জ্যামিতিক গঠনের উপর। ধরা যাক, একটি AB_2 অনু—গঠনগতভাবে এটি প্রতিসম B-A-B অথবা অপ্রতিসম A-B-B হতে পারে। প্রতিসম AB_2 অনুটির A-B বন্ধন ধ্রুবীয় হলে, AB_2 অনুর ধ্রুবীয়তা A কেন্দ্রীয় পরমাণুর সাপেক্ষে A-B দ্বিমেরু ভ্রামকের অবস্থানের উপর নির্ভর করে। যদি A-B ভ্রামকদ্বয় পরস্পর বিপরীতমুখী অর্থাৎ B-A-B-এর পারস্পরিক বিন্যাস রৈখিক হয়, তবে AB_2 অনুর লব্ধি ভ্রামকের মান শূন্য হবে। এক্ষেত্রে পরস্পর বিপরীতমুখী ভ্রামকদ্বয় একে অপরকে প্রশমিত করবে। [চিত্র 4.25] উদাহরণ স্বরূপ BeF_2 বা CO_2 অণুর উল্লেখ করা যায়।

μAB μAB

$\longleftarrow\!\!+ \quad +\!\!\longrightarrow$

$+\delta \quad -\delta$

B——A——B

$\mu AB_2 = 0$

μAB $+\!\!\longrightarrow$ AB বন্ধনের দ্বিমেরু ভ্রামক

$-\delta \quad +\delta \quad -\delta$

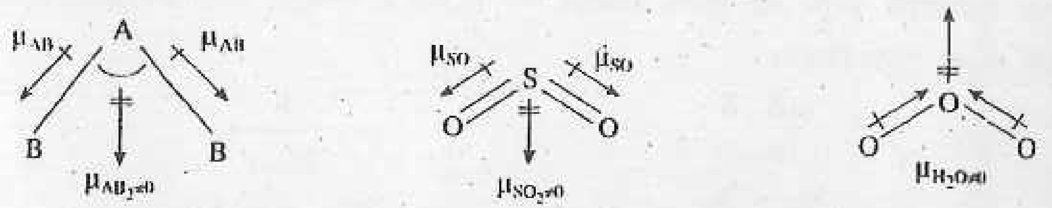
O$=$C$=$O

$\mu CO_2 = 0$

পরস্পর বিপরীতমুখী সমদ্বিমেরু ভ্রামক একে অপরকে প্রশমিত করে।

চিত্র—4.25 : প্রতিসম AB_2 অণুর দ্বিমেরু ভ্রামক

আবার প্রতিসম গঠন সত্ত্বেও AB_2 অনুর দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য না হলে, বুঝতে হবে, A—B বন্ধনের ভ্রামকদ্বয় পরস্পরকে প্রশমিত করতে পারেনি। সুতরাং ভ্রামকদ্বয় এক সরলরেখা বরাবর পরস্পর বিপরীতমুখী নয়—অর্থাৎ AB_2 অনুটি রৈখিক নয়। অতএব এক্ষেত্রে B—A বন্ধনগুলি পরস্পরের সঙ্গে একটি কৌণিক অবস্থানে নিবদ্ধ। এককথায় AB_2 অনুটি কৌণিক। SO_2, H_2O এ জাতীয় অনুর উদাহরণ। [চিত্র 4.26]



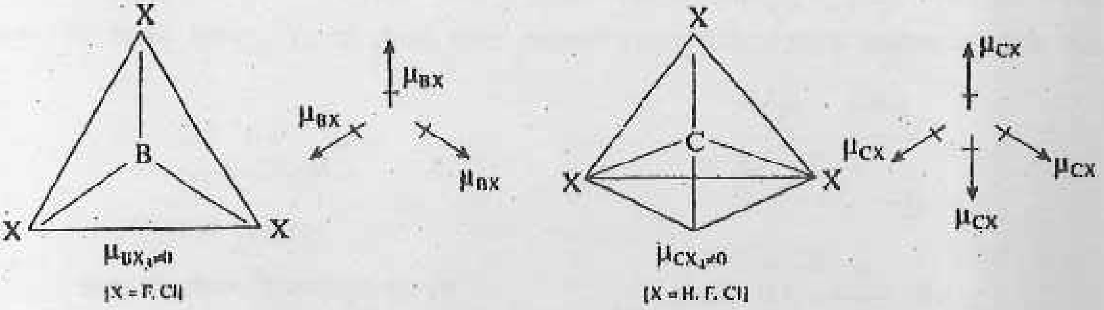
চিত্র 4.26 কৌণিক প্রতিসম AB_2 অনুর দ্বিমেরু ভ্রামক বর্তমান

এই আলোচনা থেকে এখন সহজেই বোঝা যায় যে অপ্রতিসম A—B—B অনুর গঠনের ক্ষেত্রে AB_2 অনুটির দ্বিমেরু ভ্রামকের মান শূন্য হতে পারে না, কারণ এক্ষেত্রে বন্ধনী দ্বিমেরু ভ্রামক একইদিকে শূন্য হতে পারে না, কারণ এক্ষেত্রে বন্ধনী দ্বিমেরু ভ্রামক একইদিকে ক্রিয়া করে। [চিত্র 4.27] বলা বাহুল্য এক্ষেত্রে অনুটি রৈখিক

চিত্র : 4.27 অপ্রতিসম AB_2 অনুর দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য নয়।

হলেও যেহেতু এখানে একটিমাত্র বন্ধনীভ্রামক μAB ক্রিয়াশীল সুতরাং অনুটি ধ্রুবীয় হবে।

বহুপরমাণুক BF_3 বা BCl_3 অনুগুলি সমতলীয় ত্রিকোণাকৃতি হওয়ায় এগুলির দ্বিমেরু ভ্রামকের মান শূন্য হয়। একই যুক্তিতে প্রতসম সমচতুস্তলকীয় CCl_4, CH_4, CF_4 অনুগুলির দ্বিমেরু ভ্রামকের মান শূণ্য হয়। প্রতিসম গঠনের কারণে অনুগুলিতে ক্রিয়াশীল স্বতন্ত্র বন্ধনগুলির দ্বিমেরু ভ্রামক পরস্পরকে প্রশমিত করে। [চিত্র 4.28]



চিত্র 4.28 প্রতিসম BX_2 বা CX_4 এর দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য হয়।

4.13 সমযোজী পদার্থ ও তড়িৎযোজী পদার্থের ধর্মাবলীর তুলনা (Comparison between characteristics of covalent and electrovalent compounds)

সমযোজী ও তড়িৎযোজী পদার্থের মধ্যে তুলনামূলক আলোচনায় প্রবেশ করার পূর্বে সমযোজী বন্ধনী ও তড়িৎযোজী বন্ধনীর প্রকৃতিগত পার্থক্য জানা আণবিক বন্ধনীর প্রকৃতির গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে।

সাধারণভাবে বলা যায় যে সমযোজী বন্ধনী তড়িৎযোজী বন্ধনীর তুলনায় বেশী শক্তিশালী। যদিও পদার্থের ধর্ম বন্ধনীর অন্যান্য প্রকৃতির উপর বেশী নির্ভরশীল।

তড়িৎযোজী যৌগে স্থিরতাড়িতিক আকর্ষণ বল বিপরীত আধানযুক্ত আয়নগুলিকে একত্রে ধরে রাখে। কিন্তু এই বল উৎস আধানের চতুর্দিকেই ক্রিয়াশীল থাকায় কোন বিশেষ আয়ন যুগলের মধ্যে সীমাবদ্ধ থাকে না এবং বিশেষ দিকে নির্দেশিত থাকে না। এই জন্য তড়িৎযোজী যৌগ একক স্বতন্ত্র অণুরূপে বর্তমান থাকে না। কোন তড়িৎযোজী যৌগে কোন একটি আয়নের চতুর্দিকে বিপরীত আধানযুক্ত একাধিক আয়ন সজ্জিত থাকে। এইভাবে প্রত্যেকটি আয়নের চতুর্দিকে তার বিপরীত আধানযুক্ত আয়নসমূহ বিশেষ সজ্জায় সজ্জিত থাকে। সুতরাং তড়িৎযোজী যৌগগুলি প্রকৃতপক্ষে কতকগুলি ক্যাটায়ন ও অ্যানায়নের সমাহার।

সমযোজী পদার্থ বিচ্ছিন্ন, স্বতন্ত্র সমযোজী অণুরূপে বর্তমান থাকে। একটি সমযোজী বন্ধন গঠিত হয় দুটি পরমাণুর প্রত্যেকটি থেকে আসা ইলেকট্রন সমূহের জোড় দিয়ে। এই ইলেকট্রন জোড়গুলির সংযোগী পরমাণুদুটির মধ্যবর্তী স্থানে শূণ্যে নির্দিষ্ট দিকে নির্দেশিত থাকে। একই সমযোজী পদার্থের অণুগুলি দুর্বল আকর্ষন বল দ্বারা সংযুক্ত থাকে। এজন্য অণুগুলির মধ্যে ব্যবধান বাড়াতে বেশী শক্তির প্রয়োজন হয় না। তবে যে সমস্ত সমযোজী পদার্থ অতিকায় অণু গঠন করে (যেমন হীরক) বা অণুগুলি পরস্পরের সাথে অন্য কোন বন্ধনী দ্বারা যুক্ত থাকে তাদের ক্ষেত্রে অবশ্য অধিক শক্তির প্রয়োজন হয়। তড়িৎযোজী পদার্থে অনেকগুলি আয়ন একইসঙ্গে পরস্পরের সাথে স্থিরতাড়িতিক বল দ্বারা আবদ্ধ থাকায় অণুগুলিকে (অর্থাৎ আয়নযুগলগুলিকে) পরস্পরের থেকে পৃথক করতে অনেক বেশী শক্তির প্রয়োজন হয়। এর জন্য তড়িৎযোজী পদার্থগুলি সাধারণত সমযোজী পদার্থের তুলনায় উচ্চ গলনাংক ও স্ফুটনাংক বিশিষ্ট হয়।

তড়িৎযোজী পদার্থগুলি সাধারণতঃ ধ্রুবীয় দ্রাবকে দ্রবীভূত হয়, অধ্রুবীয় দ্রাবকে অদ্রাব্য বা দ্রাব্যতা কম হয়, কারণ ঐ পদার্থের গঠনকারী আয়নগুলির সঙ্গে দ্রাবকের ধ্রুবীয় অণুগুলির স্থিরতাড়িতিক সংক্রিয়া (Electro static interaction) সম্ভব। অপরপক্ষে সমযোজী পদার্থগুলি সাধারণত অ-মেরুধর্মী দ্রাবকে দ্রবীভূত হয়

ধ্রুবীয় দ্রাবকে দ্রবীভূত হয় না। যে সকল সমযোজী অণু অতিমাত্রায় ধ্রুবীয় তারা অবশ্য ধ্রুবীয় দ্রাবকে দ্রবীভূত হয়।

তড়িৎযোজী যৌগগুলি বিগলিত অবস্থায় বা দ্রবণে আয়নে বিশ্লিষ্ট হওয়ায় ঐ অবস্থায় তড়িৎ-পরিবাহী। সমযোজী পদার্থগুলি তড়িৎ অপরিবাহী। তবে HCl এর মতো যে সকল সমযোজী পদার্থ জলীয় দ্রবণে আয়নিত হয় ($HCl + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + Cl^-$) তারা ঐ দ্রবণ তড়িৎ পরিবহণ করতে পারে।

দ্রবণে বা তরল অবস্থায় তড়িৎযোজী যৌগগুলির বিক্রিয়া হল আয়নীয় বিক্রিয়া এবং এই বিক্রিয়া হল আয়নীয় বিক্রিয়া এবং এই বিক্রিয়া সাধারণতঃ দ্রুত গতিতে হয়। সমযোজী যৌগের বিক্রিয়া সাধারণতঃ পারমাণবিক বিক্রিয়া এবং মৃদুগতিতে সংঘটিত হয়।

আয়নীয় যৌগের ক্ষেত্রে সমাবয়বতা (isomerism) ধর্ম দৃষ্ট হয় না। অনেক সমযোজী যৌগের ক্ষেত্রেই সমবায়বতা দেখা যায়। এর একটি কারন হল আয়নীয় বন্ধনী নির্দিষ্ট দিকে নির্দেশিত থাকে না, কিন্তু সমযোজী বন্ধনী নির্দিষ্ট দিকে নির্দেশিত থাকে।

4.14 সারাংশ

এই এককে আমরা ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ও চরিত্র আলোচনা করেছি। আমরা দেখেছি যে বন্ধনীর প্রকৃতির উপর উৎপন্ন যৌগের ধর্মাবলী বিশেষভাবে নির্ভর করে। এই কারণে সমযোজী ও তড়িৎযোজী পদার্থের সাধারণ ধর্মাবলী একে অপরের থেকে পৃথক হয়। আবার অনেক সমযোজী যৌগে বন্ধনীর ইলেকট্রন জোড়ের একপেশে অবস্থানের ফলে বন্ধনীতে ধ্রুবীয়তার উদ্ভব হয়। এর ফলস্বরূপ কোন কোন যৌগ দ্বিধ্রুবীয়তা অর্জন করে প্রধানত সমযোজী হওয়া সত্ত্বেও খানিকটা আয়নীয় পদার্থের ধর্ম বিশিষ্ট হয়। অন্যদিকে কোন কোন আয়নীয় যৌগে ধণাত্মক আয়ন দ্বারা ঋণাত্মক আয়নের মেরুকরণের ফলে যৌগগুলি খানিকটা সমযোজী চরিত্র প্রাপ্ত হয়। ফ্যাজানের সূত্রের সাহায্যে আমরা আয়নীয় বন্ধনীর সমযোজী ধর্ম আলোচনা করেছি। আমরা এই একককে আংশিক তড়িৎযোজী ও আংশিক সমযোজী চরিত্র বিশিষ্ট যৌগসমূহের বৈশিষ্ট সমূহও আলোচনা করেছি। এই একক অধ্যায়নের ফলে আমরা সমযোজী ও তড়িৎযোজী যৌগের সাধারণ ধর্মাবলী ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের আলোকে ব্যাখ্যা করতে পারব।

4.15 অনুশীলনী

(1) সালফেট আয়নের লুই গঠন চিত্রের সাহায্যে বর্ণনা করুন। এই আয়নের প্রতিটি পরমাণুর ফর্মাল আধান কত?

(2) ম্যাডেলুঙ ধ্রুবক আয়নের রাসায়নিক চরিত্রের উপর নির্ভর করে না কেন?

(3) আয়নীয় যৌগ গঠনে জালকশক্তির ভূমিকা আলোচনা করুন।

(4) অসমযোজী বন্ধন মাত্রই ধ্রুবীয় হয় কেন?

(5) কোন পরমাণুর আয়নীয় ব্যাসার্ধ ধ্রুবক নয়—ব্যাখ্যা করুন।

(6) কোনো অ্যানায়নের দ্বারা ক্যাটায়নের মেরুকরণ লক্ষ্য করা যায় না কেন?

(7) NH_3 এর তুলনায় NF_3 এর দ্বিধ্রুবীয় ভ্রামকের মান কম হওয়ার কারণ কী?

(8) প্যারাডাইক্লোরো বেঞ্জিন ও অর্থোডাইক্লোরো বেঞ্জিনের মধ্যে কোনটির দ্বিধ্রুবীয় ভ্রামক বেশী হবে এবং কেন?

(9) নিম্নলিখিত অণুগুলিকে বন্ধন কোনের ক্রমানুযায়ী সাজান এবং আপনার প্রস্তাবিত ক্রমের সপক্ষে উপযুক্ত কারন দর্শান।

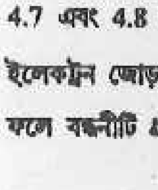
CH_4, NH_3, H_2O

(10) VSEPR তত্ত্ব অনুসারে নীচের অণুগুলির গঠন ব্যাখ্যা করুন।

SF_4, ClF_3, XeF_2

কোন কোন ক্ষেত্রে আদর্শ বন্ধন কোন থেকে বিচ্যুতি লক্ষিত হবে বলুন। এরূপ বিচ্যুতির কারন কী?

উত্তরমালা

1)  ; ফর্মাল আধান : পরবর্তী এককের 5.7.5 অংশ দেখুন।

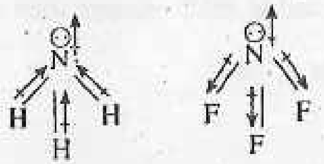
2) 4.8 অংশ দ্রষ্টব্য।

3) 4.7 এবং 4.8 অংশ দেখুন।

4) ইলেকট্রন জোড় দান করার ফলে দাতা পরমানুটি ধনাত্মক এবং গ্রহীতা পরমাণুটি ঋণাত্মক আধানগ্রস্ত হওয়ার ফলে বন্ধনীটি ধ্রুবীয় হয়।

5) 4.6 অংশ দেখুন।

6) 4.9.3 অংশ দ্রষ্টব্য

7) 

NH_3 তে সকল দ্বিমেরুভ্রামক সমমুখী।

8) অর্থো ডাইক্লোরো বেঞ্জিন

9) $CH_4 > NH_3 > H_2O$

10) 4.12 অংশে দেখুন।

একক 5 ❑ রাসায়নিক বন্ধনীর তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা (Theoretical explanation of chemical bonding)

গঠন

5.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

5.2 রাসায়নিক বন্ধনীর কোয়ান্টাম তত্ত্ব : প্রারম্ভিক আলোচনা

5.3.1 অণুর ধারণা

5.3.2 রাসায়নিক বন্ধনী গঠনের কারণ

5.3.3 সরলতম অণু H_2^+ -এর সুস্থিতির শর্ত : স্থির তড়িৎবিদ্যার আলোকে ব্যাখ্যা

5.3 দ্বিপরমাণুক অণুর স্থিতিশক্তির লেখচিত্র :

5.4 ইলেকট্রনীয় তরঙ্গ অপেক্ষকের আধানপুঞ্জ ব্যাখ্যা

5.5 রাসায়নিক বন্ধনীর তত্ত্বাবলী : প্রারম্ভিক আলোচনা

5.6 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব

5.6.1 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের আলোকে H_2 অণুর গঠন ব্যাখ্যা

5.6.2 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের বিস্তারিত আলোচনা : কতকগুলি প্রয়োজনীয় ধারণা

5.6.3 সংকরায়ণ : প্রারম্ভিক আলোচনা

5.6.4 বিভিন্ন ধরণের সংকরায়ণ

5.6.5 সংস্পন্দন

5.7 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও যৌগের তড়িৎ ঋণাত্মকতা

5.8 আণব কক্ষক তত্ত্ব : প্রাথমিক আলোচনা

5.8.1 H_2^+ অণুর গঠন

5.8.2 H_2^+ অণুর শক্তিস্তর চিত্র

5.8.3 H_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র

5.8.4 H_2^- অণুর শক্তিস্তর চিত্র

5.8.5 He_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র

5.9 আণবকক্ষক তত্ত্ব এবং অণুর বন্ধনীক্রম

5.10 পারমাণবিক কক্ষক সমূহের রৈখিক সংযোগনীতি

5.11 বিভিন্ন প্রকৃতির আনব কক্ষকসমূহ ও তাদের নামকরণ

5.12 আণব কক্ষকতত্ত্বের প্রাথমিক স্বীকার্যসমূহ

5.13 বিভিন্ন দ্বিপরমাণুক অণুর আনব কক্ষকের বর্ণনা

5.13.1 কক্ষক শক্তির ক্রম

5.13.2 বিভিন্ন দ্বিপরমাণুক অণুর আনব কক্ষক সমূহে ইলেকট্রন বিন্যাস

5.13.3 বিভিন্ন আনব কক্ষকের বিন্যাসগত সংক্রিয়া

5.13.4 আরো কয়েকটি সমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণুক অণুর আনব কক্ষক চিত্র

5.14 বিষমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণু অণুর আনব কক্ষক চিত্র

5.14.1 CO এবং HCl অণুর আনব কক্ষক

5.15 যোজ্যতা বন্ধনীতত্ত্ব ও আণব কক্ষক তত্ত্বের তুলনা

5.16 হাইড্রোজেন বন্ধনী

5.17 দুর্বল রাসায়নিক বন্ধনী

5.18 ধাতব বন্ধনী

5.19 সারাংশ

5.20 প্রশ্নাবলি

5.21 উত্তরমালা

5.1 প্রস্তাবনা

চতুর্থ এককে আমরা রাসায়নিক বন্ধনীর ইলেকট্রনীয় তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করেছি। সেখানে আমরা ইলেকট্রনটিকে সনাতন কণার হিসাবে গণ্য করেছি। কিন্তু এইভাবে রাসায়নিক বন্ধনীর শক্তি নির্ণয় এবং যথার্থ ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। বস্তুত ইলেকট্রন একটি কোয়ান্টাম কণা এবং বস্তু তরঙ্গ দ্বৈত সত্বা বিশিষ্ট। সুতরাং রাসায়নিক বন্ধনী গঠন ব্যাখ্যায় ও শক্তি নির্ণয় কোয়ান্টাম বলবিদ্যার প্রয়োগ আবশ্যক। এই এককে আমরা কোয়ান্টাম বলবিদ্যার আলোকে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন আলোচনা করব। এক্ষেত্রে আমরা রাসায়নিক বন্ধনী বলতে আমাদের পূর্বের ধারণা অনুযায়ী যাকে প্রধানত সমযোজী বন্ধনী বলেছি সেই ধরনের বন্ধনীর গঠনই আলোচনা করব।

স্থিরতড়িৎ বিদ্যার সাহায্যে সহজেই বোঝা যায় যে কোন অণু, যেমন H_2^+, গঠন সম্ভব যদি ইলেকট্রনটি দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রকের মধ্যবর্তী স্থানে অবস্থান করে। কেন্দ্রকদ্বয় ও ইলেকট্রনটির একমাত্র এইরূপ আপেক্ষিক অবস্থানের জন্যই H_2^+ অণুটি সুস্থিতি অর্জন করবে। সুতরাং রাসায়নিক বন্ধনীর কোন গ্রহণযোগ্য তত্ত্বকে অবশ্যই দুটি পরমাণুর কেন্দ্রকদুটির মধ্যবর্তী স্থানে ইলেকট্রনপুঞ্জের আধিক্য ব্যাখ্যা করতে হবে। প্রধানতঃ দুটি তত্ত্বের সাহায্যে এইভাবে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যা করা যায়। একটি তত্ত্বকে যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব (Valence bond theory) বলে। এই তত্ত্বটির প্রবক্তা হুণ্ড (Hund), মুলিকেন (Mulliken) এবং পাউলিং (Linus Pauling) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ। অপরতত্ত্বটি হল আণব কক্ষক তত্ত্ব (Molecular orbital theory)।

যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব অনুযায়ী সংযোগী পরমাণুগুলির কক্ষকের অভিলেপন এবং যোজ্যতা ইলেকট্রনের যুগ্মনের দ্বারা রাসায়নিক বন্ধনী গঠিত হয়। বন্ধনীর দিক নির্দেশী ধর্ম এবং আণবিক আকৃতি ব্যাখ্যা করার জন্য কক্ষকের সংকরায়ণ তত্ত্বের উপস্থাপনা করা হয়। যোজ্যতা বন্ধনীর তত্ত্বের অন্যতম বৈশিষ্ট হল সংস্পন্দনের সাহায্যে অণুর সুস্থিতির ব্যাখ্যা এবং মৌলের তড়িৎ ঋণাত্মকতা ধর্মের অবতারণা।

আণব কক্ষক তত্ত্বে পারমাণবিক কক্ষকের অভিলেপনের মাধ্যমে বহুকেন্দ্রীয় আনব কক্ষক সমূহের গঠন কল্পনা করা হয়। এরপর আউফবাউনীতি অনুযায়ী এই আনবকক্ষকগুলিকে ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ করা হয়। এই তত্ত্বানুযায়ী অণুগুলিতে পরমাণুর ন্যায় কেন্দ্রকগুলির চতুর্দিকে বিস্তৃত আণবকক্ষক সমূহে ইলেকট্রনগুলি অবস্থান করে।

এই পর্যায়ে আমরা যোজ্যতা বন্ধনীতত্ত্ব এবং আণবকক্ষক তত্ত্বের সাধারণ বৈশিষ্ট্যগুলি আলোচনা করব পরিশেষে দুর্বল বন্ধনী, হাইড্রোজেন বন্ধনী এবং ধাতব বন্ধনীর উৎস, ধর্মাবলী এবং গুরুত্ব আলোচনা করব।

উদ্দেশ্য

এই এককটি অধ্যয়ন করলে আপনি—

- কেন রাসায়নিক বন্ধনী গঠিত হয় জানতে পারবেন।
- কী অবস্থায় একটি অণু সুস্থিতি অর্জন করবে তা জানতে পারবেন।
- বিভিন্ন রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ও প্রকৃতি জানতে পারবেন।
- যোজ্যতা-বন্ধনী তত্ত্বের সাহায্যে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- সংস্পন্দন ও সংকরায়ণ সম্বন্ধে ধারণা করতে পারবেন। এগুলি জৈব ও অজৈব রসায়ণে অধ্যয়নের জন্য বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ।
- আণব কক্ষক তত্ত্বের সাহায্যে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হবেন।
- অক্সিজেন অণুর অণুচুম্বকীয় ধর্মের কারণ জানতে পারবেন।
- হাইড্রোজেন বন্ধনীর গঠন ও প্রভাব জানতে পারবেন।
- আন্তঃআণবিক আকর্ষনের উৎস ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হবেন।
- ধাতব বন্ধনীর উৎস ও ধর্মাবলীর সম্বন্ধে জ্ঞানলাভ করতে পারবেন।

5.3 রাসায়নিক বন্ধনীর কোয়ান্টাম তত্ত্ব : প্রারম্ভিক আলোচনা

5.2.1 অণুর ধারণা :

অণু বলতে আমরা বুঝি একাধিক পরমাণুর এমন একটি সুস্থিত সমন্বয় যার স্বাধীন স্বত্তা আছে এবং যা কিছু বিশিষ্ট ধর্মের অধিকারী।

অণুর এই সংজ্ঞা থেকে এটা পরিষ্কার যে একটি অণু গঠনের অন্যতম শর্ত হচ্ছে অণুটির স্থায়িত্ব। কিন্তু কোন একটি অণু সাধারণ উষ্ণতা ও চাপে স্থায়ী নাও হতে পারে। কোন কোন অণু যথা KrF_2 0°C উষ্ণতার নীচে সুস্থিত, আবার LiF গঠিত হয় 1000°C উষ্ণতায়। কোন একটি অণুর কোন বিশেষ অবস্থায় স্থায়ীত্বের অর্থ হচ্ছে যে অণুটি গঠনকারী পরমাণুসমূহে আপনা থেকে বিশ্লিষ্ট হয়ে যায় না অথবা গঠনকারী পরমাণুগুলি পূণর্বিন্যস্ত হয়ে নতুন অণুতে পরিবর্তিত হয়ে যায় না। এই প্রসঙ্গে কোন পদার্থের অণুর রাসায়নিক স্থায়ীত্বের সঙ্গে রাসায়নিক সক্রিয়তার তফাৎ জেনে রাখা ভালো। CO_2 প্রকৃতিতে স্বাধীনভাবে বিচরণ করতে পারে। কিন্তু NO ভর্তি একটি গ্যাসজার খোলামাত্রই NO বায়ুর অক্সিজেনের সঙ্গে বিক্রিয়া করে NO_2 তৈরি করে। এর কারণ NO অণুর O_2 এর সাপেক্ষে সক্রিয়তা (reactivity) CO_2-এর তুলনায় বেশি। কিন্তু CO_2 এবং NO উভয়েই যথেষ্ট সুস্থিত পদার্থ। বায়ুশূণ্য স্থানে রেখে দিলে দুটি পদার্থের অণুই স্বাধীনসত্ত্বা বজায় রেখে বর্তমান থাকে।

যার সাহায্যে কতকগুলি পরমাণু পরস্পরের সঙ্গে সংযুক্ত থেকে একটি অণু গঠন করে তাকে রাসায়নিক বন্ধনী (Chemical bond) বলে। কোন অণুর ধর্মাবলী জানতে গেলে অণুটির বন্ধনীর প্রকৃতি জানা একান্ত প্রয়োজনীয়।

5.2.2 রাসায়নিক বন্ধনী গঠনের কারণ :

তাপগতিবিদ্যা থেকে আমরা জানি যে কোন স্বতঃস্ফূর্ত ভৌত বা রাসায়নিক পরিবর্তন সংগঠিত হওয়ার অন্যতম শর্ত হচ্ছে এই প্রক্রিয়ার ফলে মহাবিশ্বের (universe) এনট্রপি (entropy) বৃদ্ধি পাওয়া। কোন প্রক্রিয়ায় এনট্রপির বৃদ্ধি দু-রকমভাবে হতে পারে। প্রথমতঃ যদি কোন পদার্থ বিশ্লিষ্ট হয়ে একাধিক পদার্থ উৎপন্ন করে, তাহলে উৎপন্ন পদার্থ কণাগুলির এলোমেলো বা অনিয়মিত (random) গতির জন্য এনট্রপি বৃদ্ধি পায়। দ্বিতীয়ত : যদি কোন প্রক্রিয়ায় তাপ উৎপন্ন হয়, তাহলে উদ্ভূত তাপ দ্বারা পরিপার্শ্বের অণুসমূহের তাপীয় অনিয়মিত গতিবৃদ্ধির ফলে এনট্রপি বৃদ্ধি পায়।

F_2 অণু সাধারণ অবস্থায় যথেষ্ট সুস্থিত। ফ্লুরিণ গ্যাসের মধ্যে তীব্র আলোকরশ্মি পাঠালে F_2 অণু দুটি F পরমাণুতে ভেঙ্গে যায়। কিন্তু আলোকরশ্মি অপসারণের সাথে সাথেই আবার দুটি F পরমাণু সংযুক্ত হয়ে পুনরায় F_2 অণু গঠন করে। অর্থাৎ

F (গ্যাস) + F (গ্যাস) ⟶ F_2 (গ্যাস) এই প্রক্রিয়াটি একটি স্বতঃস্ফূর্ত প্রক্রিয়া।

দুটি F পরমাণু মিলে F—F বন্ধনী গঠন একটি স্বতস্ফূর্ত প্রক্রিয়া হলেও, এই প্রক্রিয়ায় মুক্ত কণার সংখ্যা হ্রাস পায়। অর্থাৎ একদিক থেকে বিচার করলে রাসায়নিক বন্ধনী গঠনের মাধ্যমে মহাবিশ্বের এনট্রপি কিছুটা হ্রাস পায়। সুতরাং এহেন বন্ধনী গঠন একমাত্র সম্ভব যদি দুটি F পরমাণুর মিলিত শক্তির চেয়ে একটি F_2 অণুর শক্তি কম হয় এবং অতিরিক্ত শক্তি অপরাপে পরিপার্শে বিলীন হয়ে যায়। এইভাবে বৃদ্ধিপ্রাপ্ত এনট্রপি যদি দুটি কণা তেকে একটি কণা উৎপন্ন হওয়ার দরুন এনট্রপি হ্রাসের পরিমাণের চেয়ে অধিক হয়, তবেই বন্ধনী গঠন সম্ভব।

আমরা জানি যে যে কোন তন্ত্রের মোট শক্তি তন্ত্রটির অন্তঃস্থিত কণাসমূহের মোট গতীয় শক্তি ও স্থিতি শক্তির সমষ্টি। রাসায়নিক বন্ধনী গঠনের সময়ে উভয়প্রকার শক্তিরই পরিবর্তন ঘটে। যদি একটি বন্ধনী গঠনের দরুন স্থিতিশক্তির পরিবর্তন ΔVহয় এবং গতীয়শক্তির পরিবর্তন ΔT হয়, তবে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার সাহায্যে দেখানো যায় যে

$$\Delta T = -\frac{1}{2}\Delta V \qquad \text{.........(5.1)}$$

মোট শক্তির পরিবর্তন ΔE হলে

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta T + \Delta V \\ &= -\frac{1}{2}\Delta V + \Delta V \\ &= \frac{1}{2}\Delta V \qquad \text{.........(5.2)}\end{aligned}$$

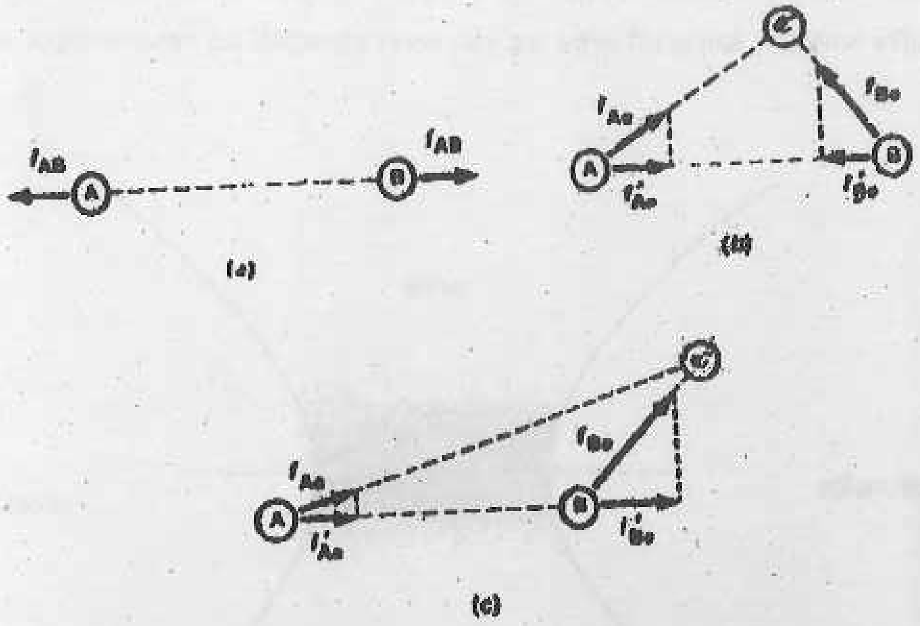
(5.2) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে ΔE ও ΔV সমচিহ্ন যুক্ত। সুতরাং কোন বন্ধনী গঠনের দরুণ ΔVকমলেই ΔE হ্রাস পাবে। এইজন্য আমরা রাসায়ণিক বন্ধনী গঠনের আলোচনায় সাধারণভাবে স্থিতি শক্তির পরিবর্তনই আলোচনা করব।

বস্তুত কতকগুলি পরমাণু থেকে অণু গঠনের সময় কেন্দ্রক ও ইলেকট্রন সমূহের আপেক্ষিক অবস্থানের

পরিবর্তন ঘটে। এর ফলে অণুগঠনের সময় কেন্দ্রক সমূহ এবং ইলেকট্রন সমূহের মধ্যে ক্রিয়াশীল কুলম্বীয় তথা স্থিরতাড়িতিক বলের মাত্রার পরিবর্তন ঘটে। কুলম্বীয় বলের পরিবর্তনের জনাই শক্তির পরিবর্তন হয়।

5.2.3 সরলতম অণু H_2^+-এর সুস্থিতির শর্ত : স্থিরতড়িৎ বিদ্যার আলোকে ব্যাখ্যা

H_2^+ অণুতে (বস্তুতঃ এটা একটা আণবিক আয়ন) দুটি ধনাত্মক তড়িতাধান যুক্ত প্রোটন এবং একটি ঋণাত্মক তড়িতাধান যুক্ত ইলেকট্রন আছে। এই অণুটিতে ক্রিয়াশীল কুলম্বীয় বলগুলি হল দুটি প্রোটন-ইলেকট্রন আকর্ষণ বল এবং একটি প্রোটন-প্রোটন বিকর্ষণ বল। যদি প্রোটন-ইলেকট্রন আকর্ষণ বল দুটির প্রভাব প্রোটন-প্রোটন বিকর্ষণ বলের তুলনায় বেশি হয় তবেই দুটি প্রোটন ও একটি ইলেকট্রন মিলে একটি সুস্থিত সমন্বয় তথা H_2^+ অণু গঠন করবে। আমরা দেখতে চাই যে ইলেকট্রন ও প্রোটনদ্বয়ের কিরূপ আপেক্ষিক অবস্থানের জন্য একটি সুস্থিত তন্ত্র গঠন সম্ভব।



চিত্র–5.1 : H_2^+ অণুতে ক্রিয়াশীল বলসমূহ

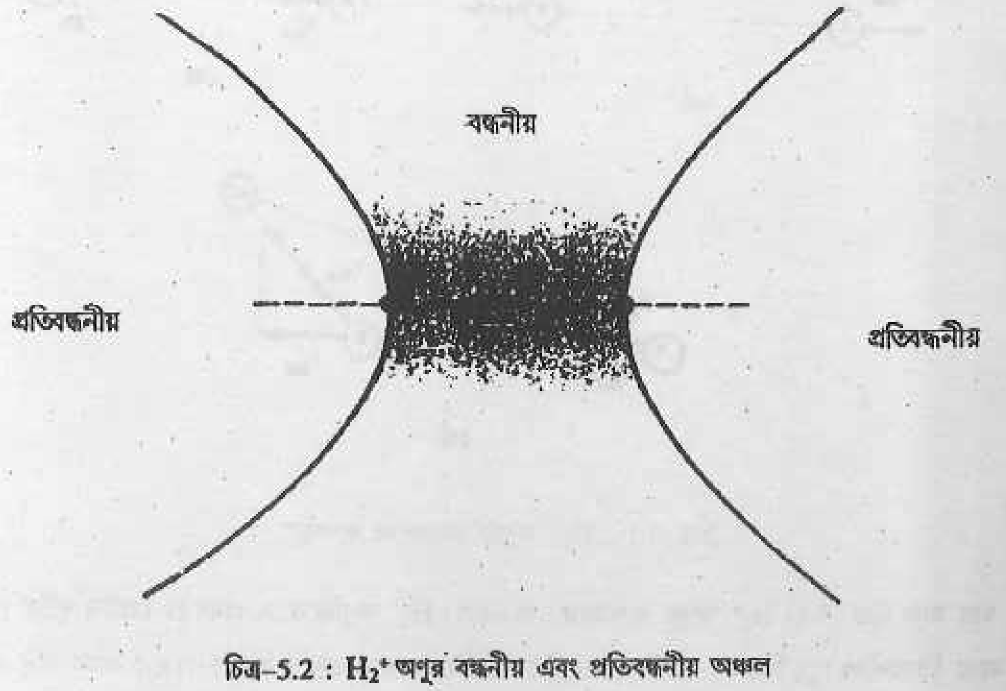
ধরা যাক চিত্র (5.1) H_2^+ অণুর রূপকল্পের চিত্ররূপ। H_2^+ অণুটিতে A এবং B প্রোটন দুটির (কেন্দ্রক দ্বয়) মধ্যে ক্রিয়াশীল f_{AB} বিকর্ষণ বলটি কেন্দ্রদুটিকে বিচ্ছিন্ন করতে চায় [চিত্র 5.1(a)] এখন যদি A ও B

প্রোটন এবং এবং ইলেকট্রনের (e^-) মধ্যেকার আকর্ষণ বল দ্বারা কেন্দ্রক-কেন্দ্রক বিকর্ষন বলকে অতিক্রম করা সম্ভব হয়, তবেই একটি সুস্থিত অণু গঠন সম্ভব।

5.1(b) চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে A ও B এবং e^- এর মধ্যে যথাক্রমে f_{Ae} ও f_{Be} আকর্ষণ বল দুটি ক্রিয়াশীল। এই দুটি বলেরই A–B অক্ষ বরাবর যথাক্রমে f'_{Ae} ও f'_{Be} উপাংশদুটি বর্তমান। f'_{Ae} উপাংশটি A প্রোটনটিকে B এর দিকে এবং ও f'_{Be} বলটি B প্রোটনকে A এর দিকে টেনে রাখে। অর্থাৎ f'_{Ae} এবং f'_{Be} দ্বারা f_{AB} বলটি প্রশমিত হয়। সুতরাং e^- এর এহেন অবস্থানের জন্য একটি সুস্থিত অণু গঠন সম্ভব।

আবার চিত্র 5.1(c) তে বর্ণিত অবস্থায় f'_{Ae} ও f'_{Be} উপাংশদুটি A ও B উভয়কেই একইদেক আকর্ষণ করে। e^- B এর বেশি কাছে হওয়ায় $f'_{Be} > f'_{Ae}$, অর্থাৎ e^- টি B কে A-এর তুলনায় অধিক বল দ্বারা ডানদিকে আকর্ষণ করে। সুতরাং এক্ষেত্রে f'_{Ae} এবং f'_{Be} উপাংশদুটির সম্মিলিত প্রভাবে কার্যকরীভাবে B কে A-এর থেকে দুরে সরিয়ে নিয়ে যেতে চায়। A ও B-এর সাপেক্ষে e^- টির এরূপ অবস্থান একটি সুস্থিত তন্ত্র গঠনের প্রতিকূল।

গণনার সাহায্যে দেখানো যায় যে H_2^+ অণুর ক্ষেত্রে চিত্র (5.2) তে ছায়াচিত্রিত অঞ্চলের যে কোন স্থানে ইলেকট্রনটির অবস্থানের জন্য একটি সুস্থিত তন্ত্র গঠন সম্ভব। ইলেকট্রনটি এই অঞ্চলের বাহিরে অবস্থিত হলে



চিত্র–5.2 : H_2^+ অণুর বন্ধনীয় এবং প্রতিবন্ধনীয় অঞ্চল

একটি সুস্থিত অণু গঠন সম্ভব নয়। সুতরাং আমরা ধারণা করতে পারি যে দুটি পরমাণু মিলে একটি অণু গঠনের জন্য পরমাণু দুটির কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থানে ঋণাত্মক তড়িতাধান তথা ইলেকট্রনের উপস্থিতি একান্ত প্রয়োজনীয়।

5.4 দ্বিপরমাণু অণুর স্থিতিশক্তি লেখচিত্র : (Potential energy curve of diatomic molecules)

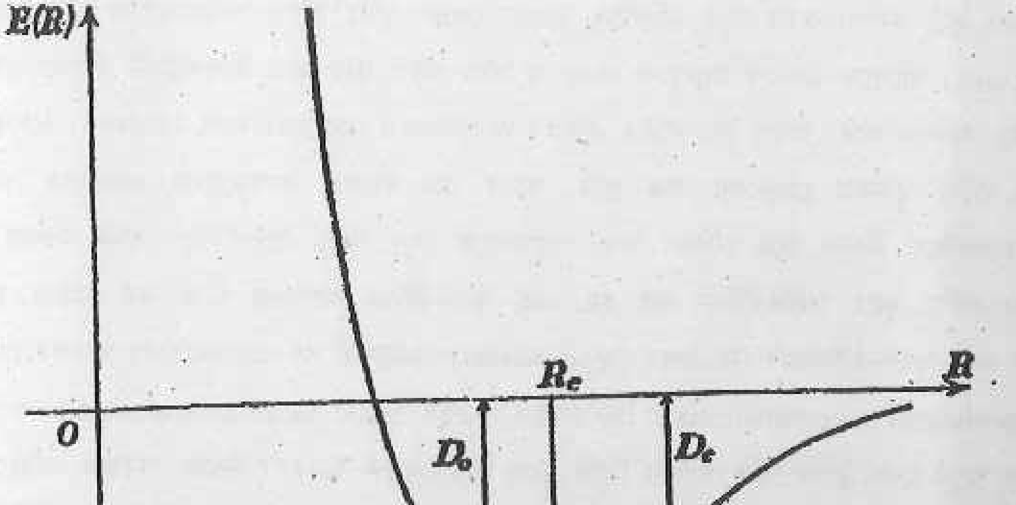
কোন একটি অণুর মোট স্থিতিশক্তির পরিমাণ অণুর মধ্যস্থিত ইলেকট্রন-কেন্দ্রক আকর্ষণ শক্তি এবং ইলেকট্রন-ইলেকট্রন ও কেন্দ্রক-কেন্দ্রক বিকর্ষণ শক্তির সমষ্টি। ইলেকট্রন ও কেন্দ্রক সমূহ সকলেই গতিশীল হওয়ায় ওদের আপেক্ষিক দূরত্ব পরিবর্তনের সাথে সাথে এই শক্তির মানও পরিবর্তিত হয়। কিন্তু কেন্দ্রকগুলি ইলেকট্রনের তুলনায় অধিক ভরযুক্ত হওয়ায়, কেন্দ্রকের গড় গতি ইলেকট্রনের গড় গতির অতিক্ষুদ্র অংশমাত্র। এইজন্য কেন্দ্রকের সঞ্চরণের একটি পর্যায় সম্পূর্ণ হওয়ার মধ্যে ইলেকট্রনের সঞ্চারণের অনেকগুলি পর্যায় সম্পূর্ণ হয়ে যায়। সাধারণভাবে বোঝার সুবিধার জন্য যদি ধরে নেওয়া যায় যে H_2^+ অণুতে ইলেকট্রন এবং কেন্দ্রক দুটি সনাতন কণার ন্যায় গতিশীল, তাহলে কেন্দ্রক দুটির তাদের সাম্যাবস্থানের (equilibrium position) সাপেক্ষে একবার দোলনের জন্য যে সময় লাগে, তার মধ্যে ইলেকট্রনটি নিজের কক্ষপথে বহুবার আবর্তন করে। অর্থাৎ ইলেকট্রনে একবার আবর্তনকালে কেন্দ্রীনের সরণ যৎসামান্য। ইলেকট্রনের গড় গতির তুলনায় কেন্দ্রকের গড় গতি অনেক কম হওয়ায়, ইলেকট্রনের সঞ্চরণের সাপেক্ষে কেন্দ্রকগুলিকে নিশ্চল ধরে নেওয়া যায়। প্রকৃতপক্ষে কোন অণুর ইলেকট্রনীয় শক্তি গণনার সময় আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্ব অপরিবর্তিত ধরা হয়। এই সমাকর্ষটিকে আবিষ্কর্তা ম্যাক্স বর্ন (Max Born) এবং রবার্ট ওপেনহাইমারের (Robert Oppenheimer) নামানুযায়ী বর্ণ ওপেনহাইমার সমাকর্ষ (Born-Oppenheimer approximation) বা স্থির কেন্দ্রক সমাকর্ষ (Static nuclei approximation) বলা হয়। কোন অণুর ইলেকট্রনীয় শক্তি গণনার ভিত্তি হচ্ছে স্থির কেন্দ্রক সমাকর্ষ। নিশ্চল অবস্থায় আন্তঃকেন্দ্রক বিকর্ষণ অপরিবর্তিত থাকে। সুতরাং ইলেকট্রনীয় শক্তির সাথে এই বিকর্ষণ শক্তি যোগ দিলে মোট শক্তি পাওয়া যায়।

ধরা যাক A ও B দুটি পরমাণু অসীম দূরত্ব থেকে পরস্পরের প্রতি আন্তকেন্দ্রীয় অক্ষবরাবর অগ্রসর হচ্ছে। অসীম দূরত্বে থাকাকালীন দুটি পরমাণুর সম্মিলিত মোট শক্তি E, A এবং B পরমাণুদ্বয়ের শক্তি

E_A এবং E_B এর সমষ্টি। এই অবস্থায় A এবং B পরমাণুদুটির শক্তি একে অপরের উপর নির্ভর করে না।

$$E = E_A + E_B \qquad \text{.........(5.3)}$$

পরমাণুদুটি পরস্পরের নিকটবর্তী হওয়ার সাথে সাথে A এবং B পরস্পরের শক্তিকে প্রভাবিত করে থাকে। এমত অবস্থায় আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্ব R হলে, ধরা যাক মোট ইলেকট্রনীয় শক্তি E(R)। প্রথাগতভাবে A ও B অসীম দূরত্বে পরস্পরের থেকে বিচ্ছিন্ন অবস্থায় থাকাকালীন মোট ইলেকট্রনীয় শক্তি $E(\alpha) = 0$ ধরে নিয়ে তার সাপেক্ষে কোন সসীম দূরত্ব R এর জন্য ইলেকট্রনীয় শক্তি E(R) গণনা করি। কোন সুস্থিত অণু গঠনের সময় A ও B পরস্পরের নিকটবর্তী হওয়ার সাথে সাথে E(R) ক্রমাগত কমতে থাকে। এইভাবে R এর যে মানের জন্য E(R) এর মান সর্বনিম্ন হয়, সেই আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্বকে সাম্য আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্ব (equilibrium internuclear distance) R_e বলা হয়। সাধারণভাবে আমরা একেই বন্ধনী দূরত্ব (Bond distance) বলে থাকি।) R এর মান R_e এর থেকে কম হলে E(R) বৃদ্ধি পায় (চিত্র 5.3)। কারণ অতি কম আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্বে ...ড়িত ধনাত্মক কেন্দ্রকদুটির মধ্যে বিকর্ষণ বল প্রবল হয়ে ওঠে।



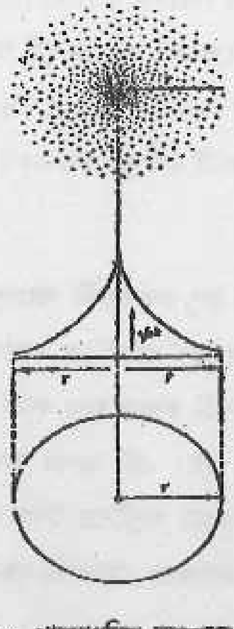
চিত্র–5.3 : দ্বিপরমাণুক অণুর স্থিতিশক্তির লেখচিত্র

R এর সাপেক্ষে E(R) এর লেখচিত্রকে AB দ্বিপরমাণু অণুর স্থিতিশক্তি লেখচিত্র বলে। R_c স্থানাঙ্কে লেখচিত্রটির গভীরতা D_c কে অণুটির বন্ধনী বিয়োজন শক্তি (Bond dissociation energy) বলা হয়। যে বন্ধনীর D_cএর মান যত বেশি হয়, সেই বন্ধনী তত বেশি শক্তিশালী বা দৃঢ় হয়। রাসায়নিক বন্ধনীর কোন তত্ত্বের অন্যতম উদ্দেশ্য হল স্থিতিশক্তি লেখচিত্র গণনার মাধ্যমে নির্ণয় করা। আণবিক বর্ণালীর অধ্যয়নে এই লেখচিত্রের গুরুত্ব অপরিসীম।

5.4 ইলেকট্রনীয় তরঙ্গ-অপেক্ষকের আধানপুঞ্জ ব্যাখ্যা : (Charge-cloud interpretation of the electronic wave function)

তৃতীয় এককের আলোচনা থেকে আমরা জানি যে কোন পারমাণবিক ইলেকট্রনের অবস্থা (state) একটি তরঙ্গ অপেক্ষকের (ψ) দ্বারা বর্ণনা করা হয় : $|\psi|^2 d\tau$ । $d\tau$ আয়তন ক্ষুদ্রাংশের ভিতর ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

ধরা যাক কোন একটি নির্দিষ্ট মুহূর্তে একটি হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনের অবস্থান সঠিকভাবে নির্ণয় করা সম্ভব। আমরা ইলেকট্রনটির নির্ণীত অবস্থান একটি লেখচিত্রে একটি বিন্দু দ্বারা নির্দেশ করলাম। যদি আমরা এই পরীক্ষাটি বহুবার পুনরাবৃত করে ইলেকট্রনের অবস্থান লেখচিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করি তাহলে চিত্র (5.4) এর ন্যায় একটি চিত্র পাওয়া যাবে। কেন্দ্রকের চতুর্দিকে যে স্থানে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতা



চিত্র–5.4 : s পারমাণবিক কক্ষকের আধানপুঞ্জ চিত্র

বেশি সেই সকল স্থানে অবস্থান প্রকাশক বিন্দুর সংখ্যাও বেশি হবে। অর্থাৎ যদি বেশ কিছু সময় ধরে ইলেকট্রনটির গতিবিধি পর্যবেক্ষণ করা সম্ভব হয় তাহলে দেখা যাবে যে এই সকল স্থানে ইলেকট্রনটি সর্বাধিক সময় অতিবাহিত করছে। অর্থাৎ ইলেকট্রনের গড় অবস্থান এই স্থানে বেশি হবে। যেহেতু ইলেকট্রন ঋণাত্মক তড়িতাধান যুক্ত সুতরাং বলা যায় যে লেখচিত্রের যে অংশে বিন্দুগুলি ঘনসন্নিবিষ্ট সেই স্থানে গড় ঋণাত্মক তড়িতাধানের মান ও বেশি হবে। আমাদের আলোচনার সুবিধার জন্য আমরা মনে করতে পারি যে ইলেকট্রনটির সংশ্লিষ্ট তড়িতাধান যেন মেঘপুঞ্জের ন্যায় কেন্দ্রের চারিদিকে ছড়িয়ে আছে। যে সকল স্থানে অবস্থান নির্দেশকারী বিন্দুর ঘনত্ব বেশি অর্থাৎ $|\psi|^2$ এর মান বেশি। সে সকল স্থানে ঋণাত্মক তড়িতাধানের আপেক্ষিক পরিমাণও বেশি।

5.5 রাসায়নিক বন্ধনীর তত্ত্বাবলী ; প্রারম্ভিক আলোচনা (Theories of Chemical bonding ; Introductory discussions)

আমরা জানি যে কোন পরমাণু বা অণুর শক্তিস্তর ঐ তন্ত্রের জন্য সময় নিরপেক্ষ শ্রোয়ডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান করে পাওয়া সম্ভব। কিন্তু বাস্তবে কেবলমাত্র হাইড্রোজেন এবং হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু ব্যতীত অন্য কোন পারমাণবিক বা আণবিক তন্ত্রের ক্ষেত্রে শ্রোয়ডিঙ্গার সমীকরণের সঠিক সমাধান (exact solution) সম্ভব নয়। সেই সকল ক্ষেত্রে আমরা বিভিন্ন সমাকর্ষ পদ্ধতির সাহায্যে (approximation method) শ্রোয়ডিঙ্গার সমীকরণের সমাধান করি। রাসায়নিক বন্ধনীর ক্ষেত্রেও প্রধানত দুটি সমাকর্ষ পদ্ধতির সাহায্য নেওয়া হয়। এই দুটি তত্ত্বের একটি হল যোজ্যতা-বন্ধনী তত্ত্ব (Valence Bond Theory) এবং অপরটি আণব-কক্ষক তত্ত্ব (Molecular Orbital Theory)। অনেক ক্ষেত্রেই এই দুটি তত্ত্ব একই সিদ্ধান্তে উপনীত হয়। যদিও দুটি তত্ত্বের কোনটিই সম্পূর্ণ নয়।

যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে ধরা হয় যে একটি অণু কতকগুলি পরমাণুর সমন্বয়ে গঠিত এবং এই অণুর মধ্যে পরমাণুগুলির কিছুটা স্বাধীন সত্ত্বা বজায় আছে। অন্যদিকে আণব কক্ষক তত্ত্বে একটি অণুতে একটি ইলেকট্রনের অবস্থা (State) পরমাণুর ন্যায় একটি কক্ষক দ্বারা বর্ণনা করা হয়। এই ইলেকট্রনীয় কক্ষকটিকে আণব কক্ষক (molecular orbital) বলা হয়। এই আণব কক্ষকটি অণুটির উপাদান পরমাণুগুলির কেন্দ্রক সমূহকে কেন্দ্র করে বিস্তৃত থাকে। এছাড়া অণুটিতে উপাদান পরমাণুগুলির অন্য কোনরূপ অস্তিত্ব থাকে না। পরবর্তী অধ্যায়গুলিতে আমরা ক্রমান্বয়ে যোজ্যতা-বন্ধনী তত্ত্ব এবং আনব কক্ষক তত্ত্ব দুটি আলোচনা করব।

5.6 যোজ্যতা-বন্ধনী তত্ত্ব : (Valence Bond Theory)

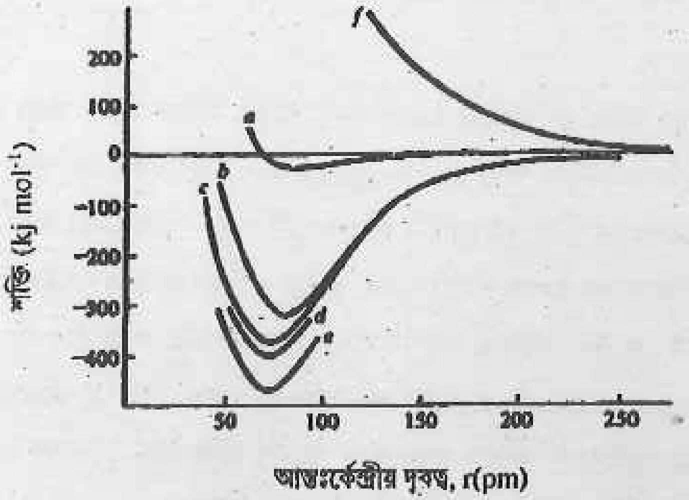
যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে ধরে নেওয়া হয় যে বন্ধনী গঠনকারী পরমাণুগুলির একে অপরের সঙ্গে সংক্রিয়ার ফলে বন্ধনী গঠিত হয়। এর ফলে সৃষ্ট অণুটির ভিতর পরমাণুগুলির অস্তিত্ব কিছুটা বজায় থাকে। আমরা প্রথমে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার আলোকে H_2 অণুর জন্য যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব আলোচনা করব।

5.6.1 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের আলোকে H_2 অণুর গঠন ব্যাখ্যা

ধরা যাক অসীম দূরত্ব থেকে দুটি হাইড্রোজেন পরমাণু (A এবং B) একটি সরলরেখা বরাবর পরস্পরের দিকে অগ্রসর হয়ে বন্ধনী তৈরি করবে। অসীম দূরত্বে থাকাকালীন যখন তাদের মধ্যে কোন রকম সংক্রিয়া সম্ভব নয় তখন তাদের মোট শক্তি দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুর শক্তির সমষ্টি। এমত অবস্থায় সম্মিলিত হাইড্রোজেন পরমাণুদুটির তরঙ্গ অপেক্ষক ψ কে A ও B নামাঙ্কিত হাইড্রোজেন পরমাণু দুটির তরঙ্গঅপেক্ষক ψ_A এবং ψ_B এর গুণফল হিসাবে লেখা যায়।

$$\psi' = \psi_A^{(1)}\,\psi_B^{(2)} \qquad \text{..................(5.4)}$$

এখানে A এবং B দ্বারা পরমাণুটি এবং 1 এবং 2 দ্বারা ইলেকট্রন দুটি চিহ্নিত করা হয়। অসীম দূরত্বে থাকাকালীন 1 নং ইলেকট্রনটি A চিহ্নিত হাইড্রোজেন পরমাণুতে এবং 2 নং ইলেকট্রনটি B চিহ্নিত হাইড্রোজেন পরমাণুতে অবস্থান করে। এই ψ দ্বারা H_2 অণুর জন্য শ্রোয়ডিঙ্গার সমীকরণ সমাধান করলে যে বন্ধনীশক্তি পাওয়া যায় (-24 kJ mol^{-1}) তা পরীক্ষালব্ধ প্রকৃত বন্ধনী শক্তির (-458 KJ mol^{-1}) প্রায় $^1/_{20}$ অংশ এই গণনার দ্বারা আমরা চিত্র (5.5) এর a লেখটি (graph) পাই। e হল পরীক্ষালব্ধ লেখ। সুতরাং ψ H_2 অণুর জন্য সঠিক তরঙ্গ অপেক্ষক হতে পারে না।



চিত্র–5.5 : হাইড্রোজেন অণুর শক্তির লেখচিত্র

(5.4) ব্যঞ্জককে আমরা ধরে নিয়েছিলাম যে 1 নং ইলেকট্রনটি A পরমাণুতে এবং 2 নং ইলেকট্রনটি B পরমাণুতে অবস্থিত। A ও B পরমাণু দুটি পরস্পরের নিকটবর্তী হওয়ার সঙ্গে সঙ্গে দুটি ইলেকট্রনই দুটি পরমাণুর কেন্দ্রক দ্বারা আকর্ষিত হবে। সুতরাং এক্ষেত্রে আমরা ধরে নিতে পারি না যে 1 নং ইলেকট্রনটি সর্বদা A পরমাণুতে এবং 2 নং ইলেকট্রনটি সর্বদা B পরমাণুতেই থাকবে—1 নংটি B পরমাণুতে এবং 2 নং A পরমাণুতে কখনই চলে আসবে না। সুতরাং ψ এবং ব্যঞ্জক উপর থেকে এই শর্ত তুলে নিয়ে ψ কে যথাযথভাবে লিখতে হবে, যাতে ψ দ্বারা 1 নং ইলেকট্রনের B পরমাণুতে এবং 2 নং ইলেকট্রনটির A পরমাণুতে সম্ভাব্য অবস্থান ও সূচিত হয়! এইভাবে ψ' এর ব্যঞ্জক হওয়া উচিত।

$$\psi' = C_1\psi_A(1)\ \psi_B(2) + C_2\psi_A(2)\ \psi_B(1) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5.5)$$

যেখানে C_1 ও C_2 দুটি সংখ্যা। গণনার সাহায্যে দেখানো যায় যে $C_1 = \pm C_2$। অর্থাৎ এই সংশোধনের ফলে আমরা দুটি তরঙ্গ অপেক্ষক ψ_+ এবং ψ_- পাই। যেখানে

$$\psi_+ = \psi_A(1)\ \psi_B(2) + \psi_A(2)\ \psi_B(1) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 5.5\ (a)$$

$$\psi_- = \psi_A(1)\ \psi_B(2) - \psi_A(2)\ \psi_B(1) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 5.5\ (b)$$

ψ_+ নিয়ে H_2 অণুর বন্ধনী শক্তি গণনা করলে দেখা যায় যে নির্ণীত শক্তি পূর্বের তুলনায় প্রকৃত বন্ধনী শক্তির অনেক কাছে। ψ_- ব্যবহার করলে নির্ণীত শক্তি অনেক বেশি হয়। প্রকৃতপক্ষে ψ_- তরঙ্গ অপেক্ষকটি H_2 অণুর একটি উত্তেজিত অবস্থা (Excited State) নির্দেশ করে। আমরা পরবর্তী আলোচনায় ψ_+ নিয়ে কাজ করব।

শক্তি নির্ণয়ে ψ এর বদলে ψ_+ ব্যবহার করলে বন্ধনী শক্তির নির্ণীত মানের যতটা পরিবর্তন হয় (হ্রাস পায়) সেই পরিমাণ শক্তিকে বিনিময় শক্তি (exchange energy) বলা হয়। এই শক্তিহ্রাসের কারণ স্বরূপ বলা যেতে পারে যে ইলেকট্রন দুটিই দুটি প্রোটন দ্বারা আকর্ষিত হয়। তাছাড়া ইলেকট্রন দুটি এখন অনেক বেশি আয়তনের মধ্যে ঘোরাফেরা করতে পারে। আমরা তৃতীয় এককে ত্রিমাত্রিক পেটিকা বিভবে আবদ্ধ কণার শক্তি নির্ণয় করতে গিয়ে দেখেছি পেটিকার আয়তন বৃদ্ধির সাথে কণাটির শক্তি হ্রাস পায়। অর্থাৎ ইলেকট্রন দুটির স্বাতন্ত্র্য সংখ্যা (degree of freedom) বাড়ার জন্য শক্তি হ্রাস পাবে। বিনিময় শক্তির দ্বারা বিনিময় সুস্থিতি (Exchange stabilisation) অর্জন করতে প্রকৃতপক্ষে পরমাণু দুটির মধ্যে কোনরূপ ইলেকট্রনের বিনিময় হয় না। এইভাবে আমরা (চিত্র 5.5) এর b লেখটি (graph) পাই।

একটি হাইড্রোজেন পরমাণুতে একটি ইলেকট্রন থাকার জন্য কেন্দ্রকের ধনাত্মক আধানের জন্য আকর্ষণ বল সম্পূর্ণ মাত্রার একমাত্র ইলেকট্রনটিকেই আকর্ষণ করে। কিন্তু দুটি হাইড্রোজেন পরমাণু পরস্পরের নিকটবর্তী হলে একসাথে দুটি ইলেকট্রনের উপস্থিতির জন্য কোন একটির কার্যকারী কেন্দ্রীয় ধনাত্মক আধানের মাত্রা হ্রাস পায়। এরজন্য কেন্দ্রীয় আধান মাত্রার প্রয়োজনীয় সংশোধন করলে আমরা C লেখটি পাই।

বিনিময় শক্তি আলোচনার সময়ে আমরা জেনেছি যে ইলেকট্রন দুটির মধ্যে যে কোনটি A বা B যে কোন পরমাণুতে থাকতে পাবে। এখন এমন হতেই পারে যে কখনও দুটি ইলেকট্রনই A বা B কোন একটি পরমাণুর মধ্যে থাকবে। এইজন্য প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী H_2 অণুকে সম্পূর্ণরূপে সমযোজী বলে ধরে নেওয়া অনুচিত হবে। অর্থাৎ ইলেকট্রন দুটি সর্বদা A ও B প্রোটন দুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলে না থেকে সম্পূর্ণরূপে কোন একটি পরমাণুর ভিতর চলে আসতে পারে। এমত অবস্থায় H_2 অণুটিকে একটি H^+ আয়ন ও একটি H^- আয়নের সমাহার হিসাবে গণ্য করা উচিত। 1 নং এবং 2 নং ইলেকট্রন দুটি একই সাথে যথাক্রমে A তে এবং B তে থাকাকালীন সম্মিলিত তরঙ্গ অপেক্ষকদুটি হবে $\psi_A(1)$ এবং $\psi_A(2)$ (যখন 1 এবং 2 দুটিই A তে) এবং $\psi_A(1)$ $\psi_B(2)$ (যখন 1 এবং 2 দুটিই B তে) সুতরাং H_2 অণুর তরঙ্গ অপেক্ষকটি ψ কে লেখা উচিত।

$$\psi = \psi_{cov} + \psi_{ion} \qquad \text{............5.6}$$

যেখানে $\psi_{cov} \equiv \psi_+ = \psi_A(1)\psi_B(2) + \psi_B(1)\psi_A(2)$ ....5.6(a)

এবং $\psi_{ion} \equiv \psi_A(1)\ \psi_A(2) + \psi_B(1) + \psi_B(2)$ ....5.6(a)

λ একটি সংখ্যা। আমরা পরবর্তী আলোচনায় দেখব কোন অণুর ধ্রুবীয় চরিত্রের (dipolar character) মাত্রা λ-র মানের উপর নির্ভর করে। ψ_{cov} এবং ψ_{ion} নাম দুটির তাৎপর্য হচ্ছে যে ψ_{cov} H_2 অণুর সমযোজী বা Covalent চরিত্র বর্ণনা করে এবং ψ_{ion} তড়িৎযোজী বা আয়নীয় চরিত্র বর্ণনা করে।

এই ψ ব্যবহার করে শ্রোডিংগার সমীকরণ সমাধান করলে আমরা (চিত্র 5.5) এর লেখটি পাই। d লেখটি পরীক্ষালব্ধ লেখ e এর খুবই কাছে। এইভাবে আমরা যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের সাহায্যে H_2 অণুর গঠন বর্ণনা এবং বন্ধনী শক্তি গণনা করতে পারি।

আমাদের আলোচনা থেকে এটা স্পষ্ট যে রাসায়নিক যোজ্যতা ও বন্ধনীর সনাতন ধারণা দিয়ে H_2 অণুর প্রকৃত গঠন কখনই সঠিকভাবে বর্ণনা করা যাবেনা। H_2 অণুকে লুইয়ের তত্ত্ব অনুযায়ী সম্পূর্ণ সমযোজী ($H_A : H_B$ বা $H_A : H_B$; A ও B চিহ্ন হিসাবে ব্যবহৃত) বা সম্পূর্ণ তড়িৎযোজী ($H_A^+\ H_B^-$ বা $H_A^-\ H_B^+$) কোন ভাবেই সঠিকরূপে প্রকাশ করা সম্ভব নয়। বরঞ্চ আমরা বলতে পারি যে H_2 অণুর $H_A : H_B$,

$H_A^+ H_B^-$ এবং $H_A^- H_B^+$ এই তিনটি গঠন সংকেত দ্বারা প্রকাশ সম্ভব হলে H_2 অণুটি যে যে ধর্মের অধিকারী হত H_2 অণুতে সেই সবকটি ধর্ম কিছুমাত্রায় বর্তমান। বস্তুত কোন অণুকেই লুইয়ের নীতি অনুযায়ী সম্ভাব্য কোন ইলেকট্রন বিন্দু চিত্র দ্বারা সম্পূর্ণ সঠিকভাবে প্রকাশ করা সম্ভব নয়।

যদিও H_2 অণুর প্রকৃত গঠন একটিই (যা চিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করা সম্ভব নয়) যা একটি তরঙ্গ অপেক্ষক ψ দ্বারা প্রকাশ করা যায়। কিন্তু ψ কে আমরা এমন কয়েকটি বিভিন্ন তরঙ্গ অপেক্ষকের সংমিশ্রণ হিসাবে ভাবতে পারি যার প্রত্যেকটি কেবলমাত্র অংশত H_2 অণুকে বর্ণনা করতে পারে। এমন হতে পারে যে এই সকল তরঙ্গ অপেক্ষক সমূহের সংশ্লিষ্ট একটি করে লুই ইলেকট্রন-বিন্দু আণবিক গঠন কল্পনা করা সম্ভব। কোন অণুর প্রকৃত গঠনকে এইভাবে প্রকাশ করাকে সংস্পন্দন (resonance) বলে। এটি আমরা পরে বিস্তারিতভাবে আলোচনা করব।

প্রসঙ্গত উল্লেখযোগ্য যে পাউলির অপবর্জন নীতি অনুযায়ী H_2 অণুর ইলেকট্রন দুটির অবস্থা (state) ψ তরঙ্গ অপেক্ষকের দ্বারা নির্দেশ করা সম্ভব যদি ইলেকট্রন দুটির ঘূর্ণন পরস্পরের বিপরীতমুখী হয় অর্থাৎ যদি তাদের ঘূর্ণন যুগ্মিত (spin paired) হয়। এটা ইলেকট্রনের ঘূর্ণন যুগ্মীকরণের (spin pairing) মাধ্যমে সমযোজী বন্ধনী গঠনের পুরাতন ধারণার সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ।

5.6.2 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের বিস্তারিত আলোচনা : কতগুলি প্রয়োজনীয় ধারণা

(ক) অভিলেপন ও ঘূর্ণন যুগ্মন :

এ পর্যন্ত যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের আলোচনায় আমরা এর তাত্ত্বিক দিকটির উপর বিশেষ গুরুত্ব দিয়েছি। একটি সমযোজী বন্ধন দুটি পরমাণুর মধ্যে একজোড়া ইলেকট্রনের সমব্যয়ী জোড়। ইলেকট্রনকে আধানপুঞ্জ হিসাবে কল্পনা করলে এটি পরমাণুদ্বয়ের কেন্দ্রকের মধ্যবর্তী স্থানে ঘনীভূত হয়। এজন্য কেন্দ্রকদ্বয়ের চতুর্দিকে সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রন কক্ষকগুলির পুর্ণবিন্যাস ঘটে। এজাতীয় বন্ধনীগঠনের ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রনীয় কক্ষকদ্বয়ের পারস্পরিক সংক্রিয়া বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। ভাবা যেতে পারে যে কক্ষকগুলি একে অপরের উপর অভিলেপিত বা আরোপিত হয়। এর ফলে যে সমন্বয়ী কক্ষকটি গঠিত হয় তা বন্ধনীতে ব্যবহৃত ইলেকট্রন দ্বয়কে ধারণ করে।

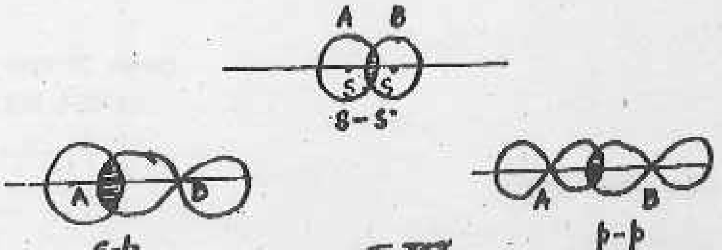
যেহেতু যে কোন একটি কক্ষকে মাত্র দুটি ইলেকট্রনের সংকুলান হয় সেজন্য সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রন দ্বয়ের ঘূর্ণন পরস্পরের বিপরীতমুখী হওয়া আবশ্যক। সমগ্র ব্যবস্থাটিকে পরমাণুদ্বয়ের মধ্যে ইলেকট্রনের সমব্যয় বা বিনিময় বলে কল্পনা করা যেতে পারে। অর্থাৎ একটি সমযোজী বন্ধন গঠনের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনীয় কক্ষকের অভিলেপন ও অভিলেপিত কক্ষকে ধৃত ইলেকট্রনদ্বয়ের ঘূর্ণনের যুগ্মন বিশেষ জরুরী।

(b) বিভিন্ন ধরণের সমযোজী বন্ধনী ; σ (সিগমা) বন্ধনী ও π (পাই) বন্ধনী

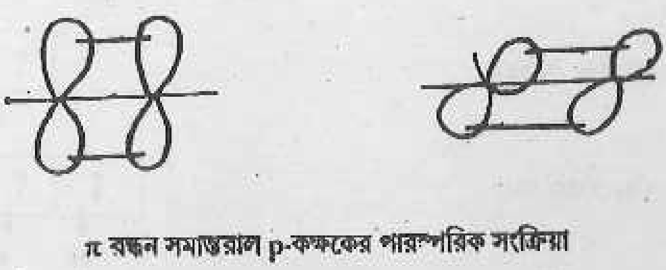
যখন কোন পরমাণুদ্বয় সমযোজী বন্ধনে আবদ্ধ হয় তখন ঐ পরমাণুদুটির কেন্দ্রকের সংযোজী অক্ষ বরাবর ইলেকট্রনের ঘনত্ব বৃদ্ধি পায়। যেহেতু কোন সমযোজী বন্ধন কক্ষক দ্বয়ের সরাসরি অভিলেপন বা পারস্পরিক আরোপনের মাধ্যমেই গড়ে ওঠে সুতরাং এই বন্ধনী গঠনের ভৌত প্রক্রিয়াটি। সরলভাবে বিচার করলে, প্রধানত দুভাবে সংঘটিত হয়।

(i) কেন্দ্রক দ্বয়ের সংযোজী অক্ষ বরাবর সমঅক্ষীয় (Coaxial) অভিলেপন। এজাতীয় অভিলেপনের ফলে গঠিত বন্ধনকে σ–(সিগমা) বন্ধনী বলা হয়। এর ফলে সৃষ্ট বন্ধনীটির সংযোজী অক্ষের সাপেক্ষে বেলনাকার প্রতিসাম্য (Cylindrical symmetry) অর্জন করে। উল্লেখ করা যেতে পারে দুটি পরমাণুর মধ্যে এ জাতীয় অভিলেপন মাত্র একভাবেই সংঘটিত হতে পারে। অর্থাৎ দুটি পরমাণুর মধ্যে সর্বাধিক একটি σ—বন্ধনী হতে পারে।

(ii) দুটি পরমাণুর মধ্যে একটি σ—বন্ধনী গঠিত হবার পর যদি পরমাণুদ্বয়ের উপর উপযুক্ত কক্ষক পরস্পরের সমান্তরালভাবে অবস্থান করে সেক্ষেত্রে ঐ কক্ষকদ্বয়ের পারস্পরিক সংক্রিয়ায় যে বন্ধনী গঠিত হয় তাকে π-বন্ধনী বলে। স্পষ্টতই পারস্পরিক সংক্রিয়ার বিচারে σ—বন্ধনী, π—বন্ধনী অপেক্ষা সুদৃঢ়। π—বন্ধনী গঠিত হওয়ার পূর্বে একটি σ—বন্ধনী গঠিত হওয়া প্রয়োজন। অর্থাৎ একটি π—বন্ধনী দুটি পরমাণুর মধ্যে একটি σ—কাঠামোর উপর গড়ে ওঠে।



σ-বন্ধন
অক্ষবরাবর অভিলেপন



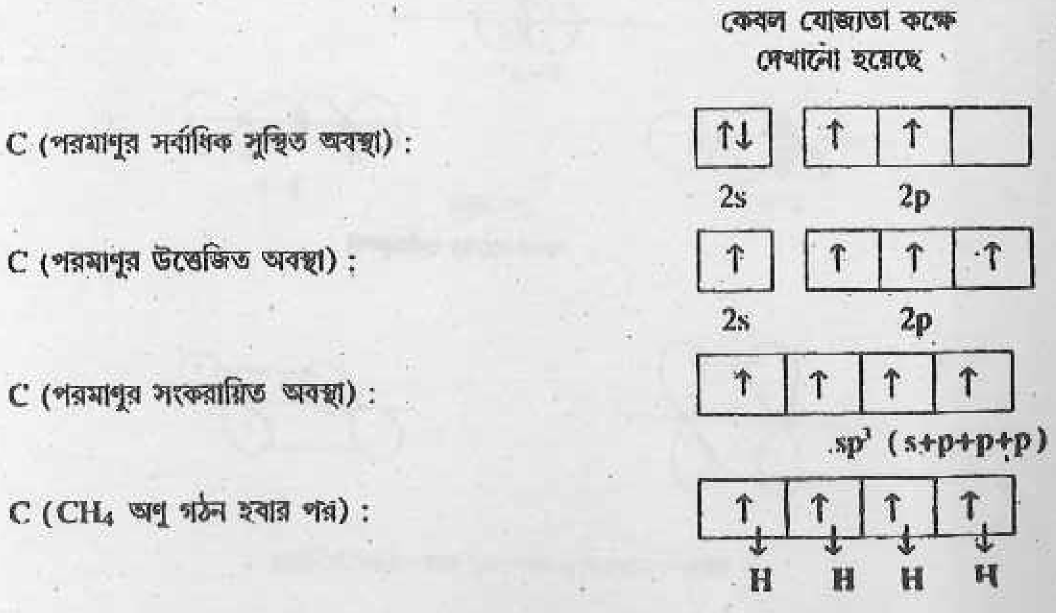
π বন্ধন সমান্তরাল p-কক্ষকের পারস্পরিক সংক্রিয়া

চিত্র–5.6 : বিভিন্ন ধরনের অভিলেপন σ ও π বন্ধন গঠন

5.6.3 সংকরায়ন প্রারম্ভিক আলোচনা

পূর্ববর্তী অংশে সমযোজী বন্ধনীর গঠন বর্ণনায় আমরা পারমাণবিক কক্ষকের অভিলেপন ও ইলেকট্রন ঘূর্ণনের যুগ্ম উল্লেখ করেছি। অর্থাৎ সমযোজী বন্ধনী গঠনের বিচারে কোন পরমাণুর উপর অযুগ্ম ইলেকট্রনের অবস্থান বিশেষ জরুরী। একটি পরমাণু কতগুলি সমযোজী বন্ধন গঠন করে তা প্রাথমিকভাবে সংশ্লিষ্ট পরমাণুটির যোজক কক্ষে অবস্থিত অযুগ্ম ইলেকট্রনের সংখ্যার উপর নির্ভর করে। প্রয়োজন বোধে অণু গঠনের কারণে যোজক ইলেকট্রন জোড় বিযুগ্মীকরণের মাধ্যমে উপযুক্ত কক্ষকে উন্নীত করা প্রয়োজন। একটি উদাহরণের সাহায্যে এটি বোঝা যেতে পারে। কার্বন পরমাণুর যোজক কক্ষের ইলেকট্রন বিন্যাস $2s^2 2p^2$ অর্থাৎ সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় কার্বন পরমাণুর জোজক কক্ষে মাত্র দুটি অযুগ্ম ইলেকট্রন বর্তমান। বলাবাহুল্য এই দুটি ইলেকট্রনই কেবল সমযোজী বন্ধনে আবদ্ধ হলে কার্বন পরমাণুর অষ্টক পূর্তি হবে না এবং কার্বনের সমযোজ্যতা দুই হবে। কিন্তু আমরা জানি কার্বনের সমযোজ্যতা সাধারণভাবে চার। বন্ধন গঠনের প্রক্রিয়ায় কার্বন পরমাণুর যোজক কক্ষে $2s^2$ ইলেকট্রন জোড়কে বিযুগ্মিত করে লব্ধ ইলেকট্রন দুটি একদিকে ঐ পরমাণুরই উচ্চতর কক্ষকে উন্নীত করা হয়। এর ফলে কার্বনের সর্ববহিস্থ কক্ষকে মোট চারটি অযুগ্ম ইলেকট্রন অবস্থান করে। এর ফলে সৃষ্ট উত্তেজিত পরমাণুটি চারটি সমযোজী বন্ধন গঠন করতে সক্ষম হয়। এইভাবে কার্বনের সমযোজ্যতা চার হয়ে থাকে।

চতুর্যোজী কার্বন পরমাণুর একটি উদাহরণ হল মিথেন (CH_4) । মিথেন অণুটিতে চারটি C–H বন্ধনী বর্তমান। আমরা



চিত্র–5.7 : CH_4 গঠনকালে কার্বন পরমাণুর যোজক কক্ষের বিভিন্ন পর্যায়

সমযোজী বন্ধনগুলি নির্দিষ্ট দিকে বিন্যস্ত হয়। যেহেতু মিথেন অণুর গঠনে ব্যবহৃত কার্বন পরমাণুটি তার তিনটি p কক্ষক এবং একটি s কক্ষক ব্যবহার করে সুতরাং সংশ্লিষ্ট চারটি σ-বন্ধনী p কক্ষক গুলির বিন্যাসের দিক বরাবর অর্থাৎ মিথেনের চারটি C–H বন্ধনীর অন্তত তিনটির পরস্পরের সাপেক্ষে উলম্বভাবে অবস্থান করা উচিত। চতুর্থ বন্ধনীটি যেহেতু একটি s অক্ষকের অভিলেপনে সৃষ্ট সুতরাং তা এই তিনটি বন্ধনীর মত কোন একটি সুনির্দিষ্ট দিকে বিন্যস্ত নয়। বলা বাহুল্য যে এ ধরনের অভিলেপনে মিথেন অণুর চারটি বন্ধনীর তিনটি একধরণের এবং চতুর্থটি অন্যরকম হওয়ার কথা। কিন্তু পরীক্ষার মাধ্যমে দেখা গেছে যে মিথেন অণুটির চারটি C–H বন্ধনীই সমতুল্য এবং এগুলি পরস্পরের সাপেক্ষে একটি সমচতুস্তলকের চারটি শীর্ষ বিন্দু বরাবর অবস্থান করে। এক্ষেত্রে H–C–H বন্ধন কোণের মান 109°28′। সুতরাং এটা স্পষ্ট যে মিথেন অণুর গঠন প্রক্রিয়ায় s এবং p কক্ষকগুলি স্বতন্ত্রভাবে অভিলেপিত হওয়ার পূর্বে পরস্পরের সহিত সংমিশ্রিত হয়। উল্লেখ করা যেতে পারে যে এ ধরণের সংমিশ্রিত কক্ষকের সংক্রিয়ায় যে অভিলেপন ঘটে তা অসংমিশ্রিত কক্ষকের অভিলেপনের তুলনায় অধিক দৃঢ়। সুতরাং অধিকতর সুস্থিত (চিত্র 5.7) অধিকতর সুস্থিতি অর্জনের উদ্দেশ্যে পারমাণবিক কক্ষকগুলির পারস্পরিক সংমিশ্রণকে সংকরায়ন (hybridization) বলা হয়। এই আলোচনার পরবর্তী অংশে আমরা কতকগুলি সংকরায়নের উদাহরণ উল্লেখ করব।

মনে রাখতে হবে :

- সংমিশ্রণের প্রয়োজনে সুস্থিত পরমাণুটিকে উত্তেজিত করা প্রয়োজন। অনেকক্ষেত্রেই এজন্য ইলেকট্রন জোড়কে বিযুগ্মীকরণ তথা সবচেয়ে নিকটবর্তী শূণ্য কক্ষকে উন্নীত করার প্রয়োজন হয়।
- সংকরায়নের ফলে সংমিশ্রিত কক্ষকগুলি ইলেকট্রনপুঞ্জের ঘনত্ব অসংমিশ্রিত কক্ষকের তুলনায় বেশি হয়।
- সংকরায়িত কক্ষকের অভিলেপনে সৃষ্টবন্ধনী দৃঢ়তর হয়।

অণু গঠনের প্রয়োজনে সংকরায়ন হলে প্রয়োজনীয় শক্তি পরবর্তীকালে বন্ধনী গঠনের মাধ্যমে উপযুক্ত প্রশমিত হয়। মনে রাখা দরকার সংকরায়িত কক্ষকগুলি কেবলমাত্র

(i) σ–বন্ধনীতে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়

(ii) সক্রিয় নিসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় (যা পরবর্তী রাসায়নিক বন্ধনী গঠন প্রক্রিয়ায় এবং অণুটির জ্যামিতিক আকার নির্ধারণে সক্রিয় ভূমিকা পালন করে।)

এবং (iii) অযুগ্ম ইলেকট্রন ধারণের কাজে ব্যবহৃত হয়।

উল্লেখ করা দরকার π বন্ধনে ব্যবহৃত কক্ষকগুলির জন্য সংকরায়নের প্রয়োজন হয় না।

5.6.4 বিভিন্ন ধরণের সংকরায়ন :

সংকরায়নের প্রকৃতি বা সংকরায়নে অংশগ্রহনকারী পারমাণবিক কক্ষকের চরিত্র অনুসারে সংকরায়িত কক্ষকের জ্যামিতিক আকার নির্ধারিত হয়। সারণী (5.1) তে এগুলি উল্লেখ করা হল।

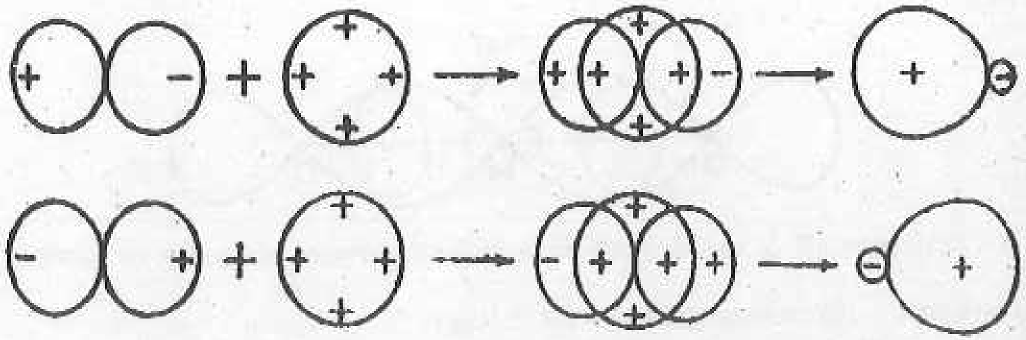
সারণী 5.1

সংকরায়ন ও জ্যামিতিক আকার

সংকরায়ন	অংশগ্রহণকারী পারমাণবিক কক্ষক	সংকরায়িত কক্ষকের জ্যামিতিক আকার	উদাহরণ*
sp	s, p_i i = x বা y বা z	i অক্ষ বরাবর রৈখিক	$BeCl_2$, C_2H_2
sp^2	s, p_i, p_j i ≠ j i = x বা y বা z j = x বা y বা z	i ; তলে অবস্থিত সামতলিক ত্রিকোণাকার	BF_3, C_2H_4
sp^3	s, p_x, p_y, p_z	সমচতুস্তলকীয়	CH_4, NH_3 H_2O
sp^3d	s, p_x, p_y, p_z, dz^2	ত্রিকোণাকৃতি দ্বিপিরামিড (পিরামিডের শীর্ষ বিন্দুদ্বয় z-অক্ষ বরাবর)	PCl_5, ClF_3 SF_4
sp^3d^2	s, p_x, p_y, p_z, dz^2 $dx^2 - y^2$	অষ্টতলকীয়	SF_6

*যে সমস্ত অণুতে সক্রিয় নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় বর্তমান সেগুলির জ্যামিতিক আকার সংকরায়িত কক্ষকের জ্যামিতিক আকারের থেকে আলাদা হবে।

● sp সংকরায়ন : (রৈখিক বা কৌণিক সংকরায়ন) চিত্র (5.8), (i) ও (ii) উদাহরণ : $BeCl_2$



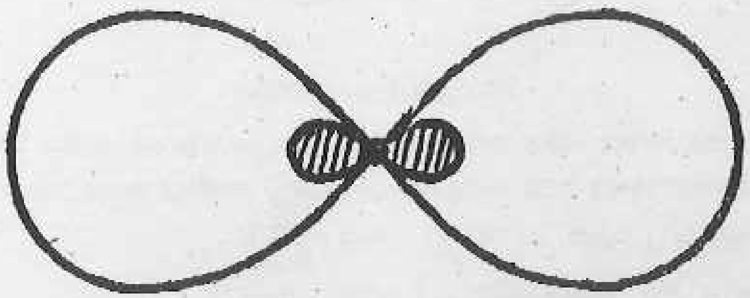
(i)

চিত্র–5.8 : একটি s ও p কক্ষকের সমন্বয়ে দুটি sp সংকরায়িত কক্ষকের গঠন :

সংশ্লিষ্ট তরঙ্গ অপেক্ষকগুলি হল :

$$\psi_{sp}(1) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{2s} + \psi_{2p})$$

$$\psi_{sp}(2) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{2s} - \psi_{2p})$$

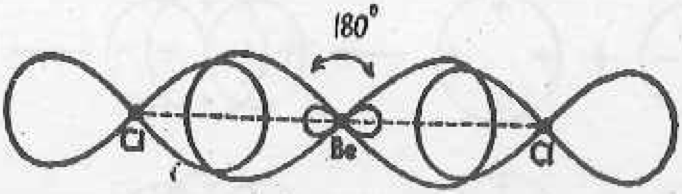


(ii)

চিত্র–5.8 : sp সংকরায়নের ফলে উদ্ভূত কক্ষক দ্বয়

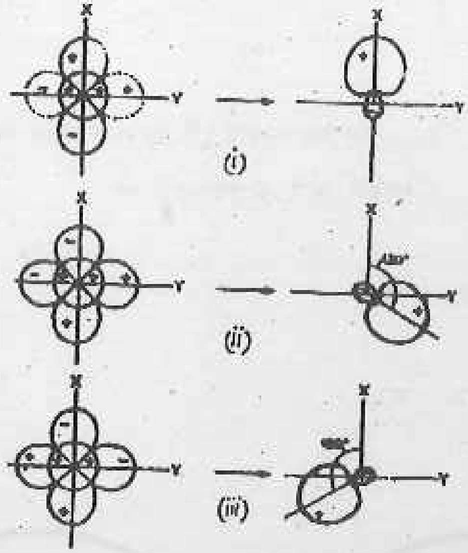
(–) দশা যুক্ত অংশকে ▨ চিহ্নিত করা হয়েছে।

কঠিন $BeCl_2$ একটি বহুলীভূত (Polymeric) যৌগ। কঠিন অবস্থায় $(BeCl_2)_2$ এইভাবে অবস্থান করে। গ্যাসীয় অবস্থায় অণুটি নিম্নরূপ। চিত্র (5.9)



চিত্র–5.9 : বেরিলিয়ামের দুটি sp সংকরায়িত কক্ষকের ও ক্লোরিনের p কক্ষকের অভিলেপনে $BeCl_2$ অণুর গঠন

● sp^2 সংকরায়ন : (ত্রিকোণাকার সংকরায়ন) চিত্র 5.10(a)



চিত্র–5.10(a) sp^2 সংকরায়ন

(i) 2s ও 2px-এর সমন্বয়ে গঠিত কক্ষক। এটির গঠনে 2py কক্ষকের অবদান নাই; 2py কক্ষকের দুটি ভিন্ন বিপরীত দশার সঙ্গে s-এর অভিলেপন খণ্ড রেখাঙ্কিত অংশে দেখানো হয়েছে। তরঙ্গ অপেক্ষক $\Psi sp^2(1)$, $\psi sp^2(1) = \frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{2s} + \sqrt{\frac{2}{3}} \psi_{2px}$

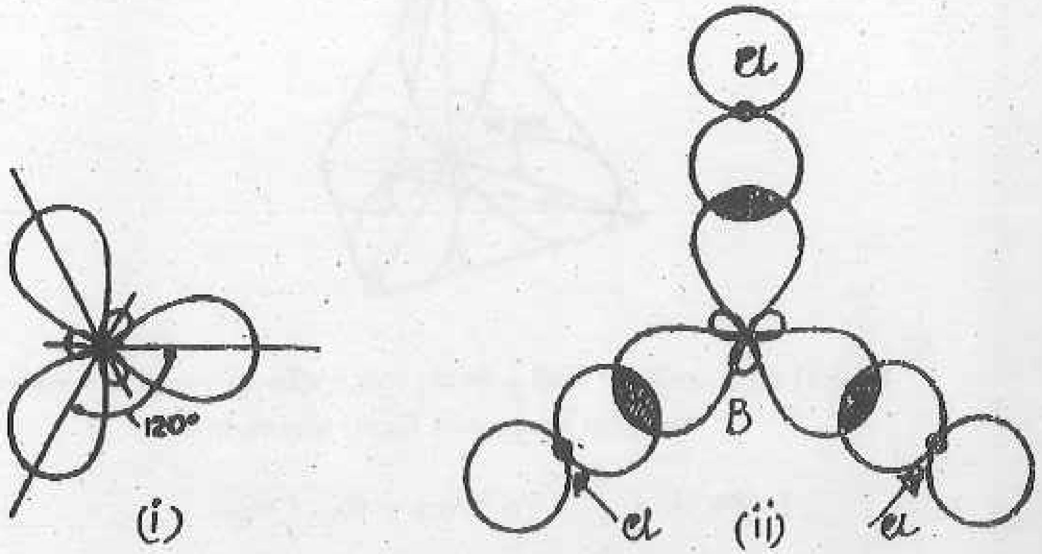
(ii) 2s – 2px + 2py সমন্বয়ে গঠিত sp^2 কক্ষক, $\psi sp^2(2)$

$$\psi sp^2(2) = \frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{2s} - \frac{1}{\sqrt{6}} \psi_{2px} + \frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{2py}$$

(iii) 2s – 2px – 2py সমন্বয়ে গঠিত sp^2 কক্ষক, $\psi sp^2(3)$

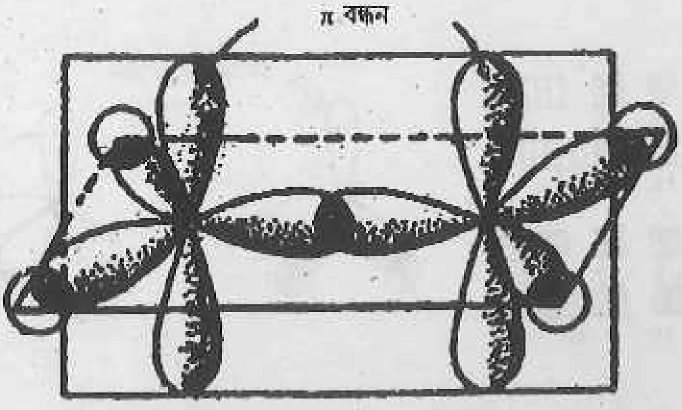
$$\psi sp^2(3) = \frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{2s} - \frac{1}{\sqrt{6}} \psi_{2px} - \frac{1}{\sqrt{2}} \psi_{2py}$$

উদাহরণ : BCl_3, C_2H_4 চিত্র 5.10(b), 5.10(c)



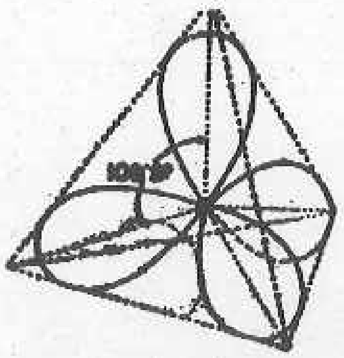
চিত্র-5.10(b) : (i) বোরনের তিনটি sp^2 সংকরায়িত কক্ষক

(ii) বোরনের sp^2 সংকরায়িত কক্ষকের সাথে তিনটি ক্লোরিন পরমাণুর অভিলেপনে গঠন BCl_3 গঠন



চিত্র—5.10(c) : ইথিলিনে কার্বন পরমাণুর sp^2 সংকরায়নের মাধ্যমে অভিলেপন; σ ও π বন্ধন গঠন

● sp^3 সংকরায়ন : (সমচতুঃস্তলকীয় সংকরায়ন) চিত্র 5.11(a)



চিত্র–5.11 (a) : একটি s ও তিনটি p কক্ষকের সমন্বয়ে গঠিত sp^3 সংকরায়ণ। সংকরায়িত কক্ষকগুলির সমচতুস্তলকীয় বিন্যাস। তরঙ্গ অপেক্ষকগুলি,

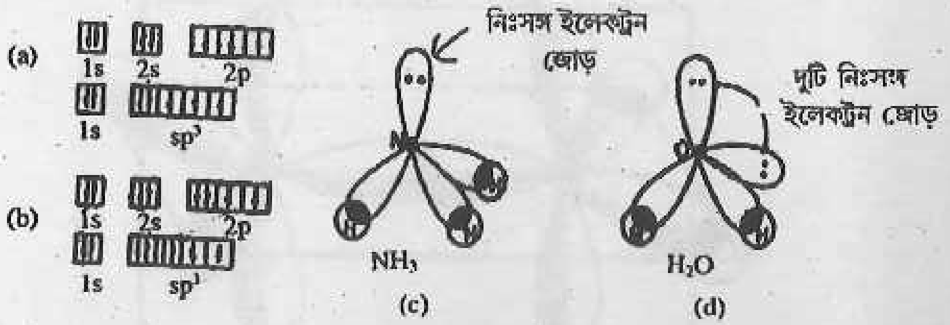
$$\psi sp^3(1) = \frac{1}{2} \left(\psi_{2s} + \psi_{2px} + \psi_{2py} + \psi_{2pz} \right)$$

$$\psi sp^3(2) = \frac{1}{2} \left(\psi_{2s} + \psi_{2px} - \psi_{2py} - \psi_{2pz} \right)$$

$$\psi sp^3(3) = \frac{1}{2} \left(\psi_{2s} - \psi_{2px} + \psi_{2py} - \psi_{2pz} \right)$$

$$\psi sp^3(4) = \frac{1}{2} \left(\psi_{2s} - \psi_{2px} - \psi_{2py} + \psi_{2pz} \right)$$

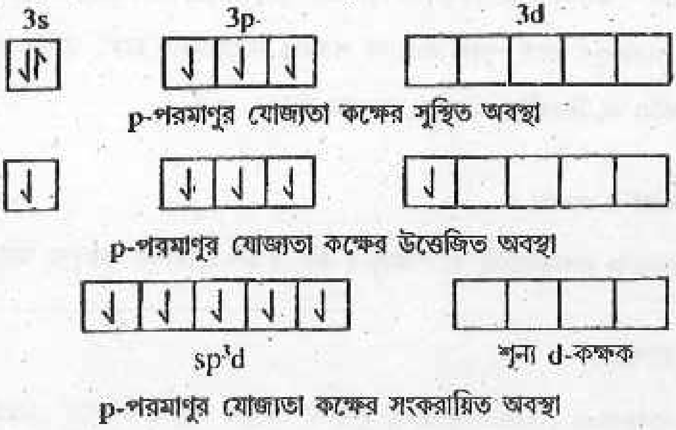
উদাহরণ : NH_3, H_2O চিত্র 5.11(b)



চিত্র–5.11(b) : (i) N-এর sp^3 সংকরায়নের মাধ্যমে NH_3 গঠন

(ii) O-এর sp^3 সংকরায়নের মাধ্যমে H_2O গঠন

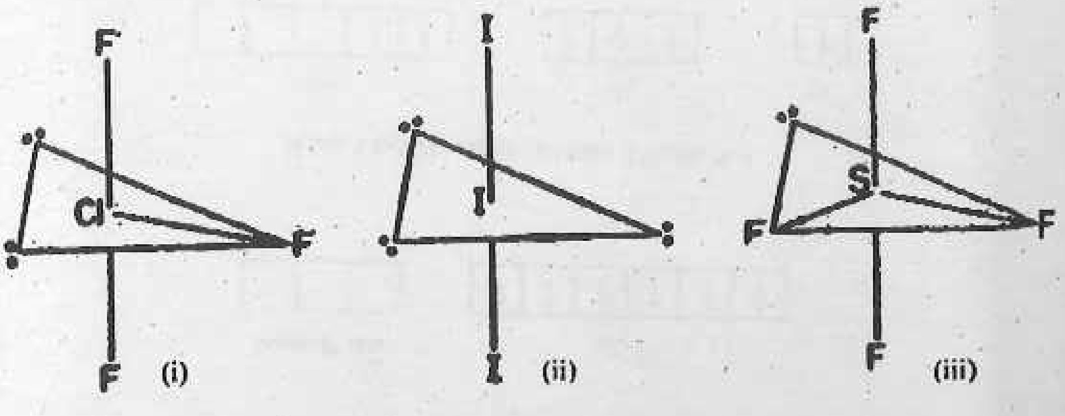
● sp^3d সংকরায়ন : (ত্রিকোণাকার দ্বিপিরামিড আকৃতি সংকরায়ন) চিত্র 5.12(a)



চিত্র–5.12(a) : ফসফরাস পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষের sp^3d সংকরায়ণ

এ পর্যন্ত সংকরায়নের উদাহরণগুলিতে প্রাপ্ত কক্ষকগুলি পরস্পরের সমতূল্য। কিন্তু এক্ষেত্রে এর ব্যতিক্রম লক্ষ্য করা যায়। সমতলীয় ত্রিকোণাকার নিরক্ষীয় অবস্থানে বিস্তৃত তিনটি কক্ষক পরস্পরের সমতূল্য (তুলনীয় : sp^2)। এই সমতলের উলম্ব অক্ষ বরাবর অপর দুটি কক্ষক বিস্মৃত। এই কক্ষকদ্বয় আবার পরস্পরের সমতূল্য। অর্থাৎ sp^3d সংকরায়ণের ক্ষেত্রে তিনটি সমতূল্য নিরক্ষীয় কক্ষক এবং দুটি পৃথক কিন্তু পরস্পরের সমতূল অক্ষীয় কক্ষক বর্তমান।

উদাহরণ : ClF_3, SF_4 , I_3^- চিত্র 5.12(b)



চিত্র–5.12(b) (i) ClF_3 , (ii) I_3^- ও (iii) SF_4 অণু / আয়ন

লক্ষণীয় : (ক) বেশি তড়িৎ ঋণাত্মক F পরমাণু প্রাথমিকভাবে অক্ষীয় অবস্থান অধিকার করে।
(খ) নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়সলি অপেক্ষাকৃত কম বিকর্ষণের কারণে নিরক্ষীয় অংশে অবস্থান করে।

sp^3d সংকরায়নকে সামতলিক ত্রিকোণাকার sp^2 এবং অক্ষীয় pd সংকরায়নের সমন্বয় হিসাবে কল্পনা করা যায়। একটি কেন্দ্রীয় পরমাণুর সঙ্গে পৃথক ধরনের পরমাণু সংযোজিত হলে, তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্মের ভিন্নতা অনুসারে সেগুলি অক্ষীয় বা নিরক্ষীয় অঞ্চলে অবস্থান করে।

বেন্টের সূত্র (Bent's rule) :

অধিক ড়িৎ ঋণাত্মক পরমাণুগুলি অপেক্ষাকৃত কম s চরিত্র বিশিষ্ট কক্ষকে অবস্থান করে।

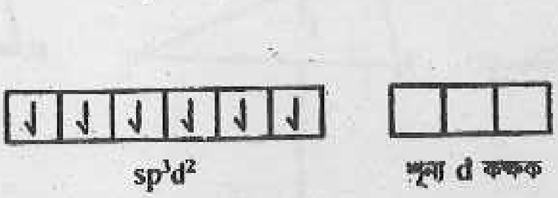
বেন্টের সূত্রের ব্যাখ্যা :

যেহেতু অক্ষীয় কক্ষকদ্বয় s চরিত্র ন্যূনতম, সুতরাং অধিক তড়িৎ ঋণাত্মক মৌলগুলি প্রথমত অক্ষীয় কক্ষকগুলি অধিকার করে। সংশ্লিষ্ট অনুটির কেন্দ্রীয় পরমাণুতে নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড় উপস্থিত থাকলে তা নিরক্ষীয় অংশে অবস্থান করে (পূর্ববর্তী পর্যায়ে VSEPR দ্রষ্টব্য)।

sp^3d^2 : অষ্টতলকীয় সংকরায়ন [চিত্র 5.13(a)]

s-পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষের সুস্থিত অবস্থা

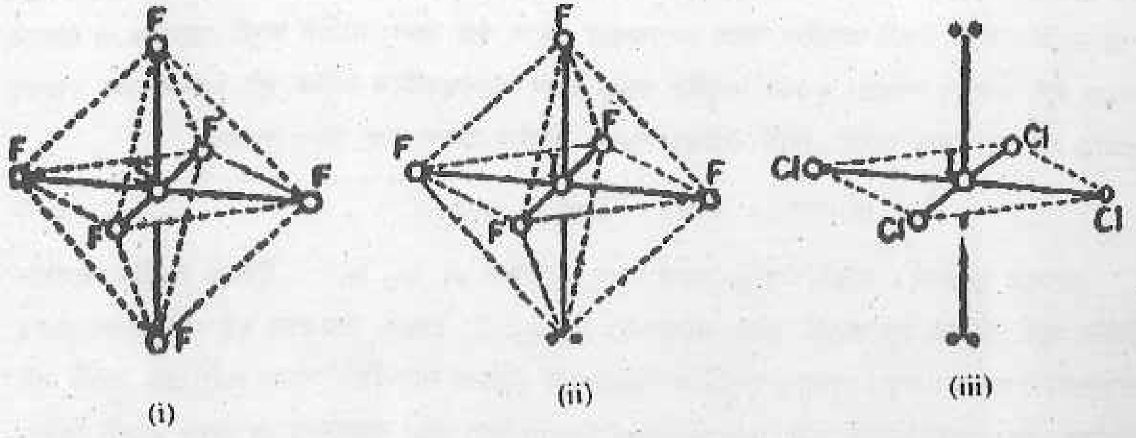
s-পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষের উত্তেজিত অবস্থা



s-পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষের sp^3d^2 সংকরায়িত অবস্থা

চিত্র–5.13(a) : সালফার পরমাণুর যোজ্যতা কক্ষের sp^3d^2 সংকরায়ণ

উদাহরণ : SF_6 , IF_5 , ICl_4^- [চিত্র 5.13(b)]



চিত্র–5.13(b) (i) SF_6 (ii) IF_5 ও (iii) ICl_4^- অণু / আয়নের গঠন

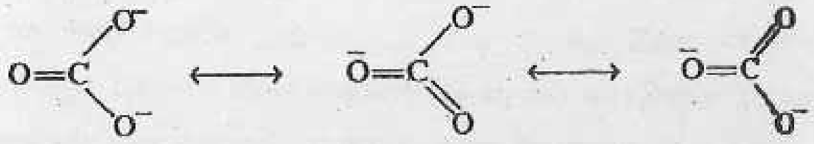
5.6.5 সংস্পন্দন (Resonance)

পূর্ববর্তী 5.7.1 অংশে হাইড্রোজেন অণুর গঠন সংক্রান্ত আলোচনায় অণুটির সমযোজী (H—H) চরিত্রের পাশাপাশি কতগুলি আয়নীয় সমাহার যেমন (H^+ H^-) অথবা (H^- H^+) ইত্যাদি বিবেচনা করা হয়েছিল বস্তুত H_2 অনুর তরঙ্গ অপেক্ষকটি (ψ) কে $\psi = \psi_{cov} + \lambda_{ion}$ এইরূপে প্রকাশ করা হয়েছিল (সমীকরণ 5.6)। এক্ষেত্রে λ গুণাঙ্কটির মান 1এর কম এবং তুলনামূলক বিচারে λ গুণাঙ্কটি H_2 অণুতে আয়নীয় সমাহার দ্বয়ের মোট গুরুত্বের বাঞ্জক। সুতরাং এটা স্পষ্ট বোঝা যায় যে হাইড্রোজেন অণুর গঠন ব্যাখ্যার ক্ষেত্রে শুধুমাত্র সমযোজী H—H অথবা আলাদাভাবে কেবলমাত্র আয়নীয় H^+ H^- বা H^- H^+ এর সম্পূর্ণ বাস্তব অবস্থাটি ব্যাখ্যা করতে অপারগ। সুতরাং বোঝা যায় হাইড্রোজেন অণুর গঠনের ক্ষেত্রে সমযোজী ও আয়নীয় উভয় ব্যবস্থারই গুরুত্ব রয়েছে। বাস্তবিক এই দুই বন্ধনের সমন্বয়কে সমযোজী আয়নীয় সংস্পন্দন বলা হয়। ভিন্ন তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্ম বিশিষ্ট পরমাণুর সমন্বয়ে গঠিত অণুর ক্ষেত্রে সমযোজী বন্ধনের প্রান্তে আয়নীয় আধানের বিভাজন আরো স্পষ্ট হয়। অর্থাৎ অণুটির গঠনের ক্ষেত্রে আয়নীয় অংশের গুরুত্ব তথা তা প্রকাশকারী গুণাঙ্কের মান বৃদ্ধি পায়। এ ধরনের সমযোজী আয়নীয় সংস্পন্দন ছাড়াও বহু পরমাণুক সমযোজী অণুর ক্ষেত্রে যোজ্যতা বন্ধন তত্ত্বের আলোকে একাধিক সমযোজী বন্ধন গঠন বিবেচনা করা যায়। এ ধরনের অণুগুলির ক্ষেত্রে অণুটির

পারমাণবিক কাঠামো তথা মুল জ্যামিতিক গঠন বজায় রেখে অর্থাৎ দুটি পরমাণুর কেন্দ্র সংযোজক 'σ' বন্ধনটিকে ব্যাহত না করে পরমাণু দ্বয়ের মধ্যবর্তী 'π' বন্ধনগুলির স্থানান্তর ঘটিয়ে অন্যভাবে অণুটির গঠন ব্যাখ্যা করা যায়। এ ধরনের প্রতিটি গঠনের জন্যই একটি লুই গঠন পাওয়া যাবে সুতরাং প্রতিটি লুই গঠনের উপযোগী একটি আণবিক তরঙ্গ অপেক্ষকও প্রকাশ করা সম্ভব। সংশ্লিষ্ট অণুটি বাস্তবিক এ ধরণের সমস্ত লুই গঠনের সমন্বয়। সুতরাং অণুটির প্রকৃত তরঙ্গ অপেক্ষকটিকে বিভিন্ন লুই অপেক্ষকের যথাযথ গুরুত্ব সহ অপেক্ষক গুলির একটি রৈখিক সমন্বয় হিসাবে প্রকাশ করা যায়। সুতরাং

$$\psi\ (\text{অণু}) = \lambda_1\psi_1 + \lambda_2\psi_2 + \lambda_3\psi_3 \qquad \text{..............(5.7)}$$

এক্ষেত্রে ψ (অণু) সংশ্লিষ্ট অণুটির প্রকৃত তরঙ্গ অপেক্ষক ψ_1, ψ_2, ψ_3 ...... ইত্যাদি অণুটির সংগঠনে বিভিন্ন লুই গঠনের প্রকাশকারী তরঙ্গ অপেক্ষক। λ_1, λ_2, λ_3 ইত্যাদি যথাক্রমে লুই গঠনগুলির গুরুত্ব প্রকাশকারী গুণাঙ্ক। প্রকৃত প্রস্তাবে অণুটিকে বিভিন্ন লুই গঠনের সংস্পন্দিক সংকর এবং এক একটি লুই গঠনকে এক একটি বিহিত গঠন (Cannonical form) বলা হয়। বলাবাহুল্য যে কোন একটি বিহিত গঠন তা যতই গুরুত্বপূর্ণ হোক না কেন তা এককভাবে সমগ্র অণুটির সমস্ত আচরণের ব্যাখ্যা দিতে পারে না। এজন্য বিভিন্ন বিহিত গঠনের রৈখিক সমন্বয় প্রয়োজন। এজন্যই কোন একক লুই গঠন অণুটির সংস্পন্দিত সংকরের তুল্য হতে পারে না। একটা উদাহরণের সাহায্যে ব্যাপারটি বোঝা যেতে পারে। এজন্য আমরা কার্বনেট আয়নটির সংগঠন আলোচনা করব। কার্বনেট (Co_3^{2-}) আয়নটি তিনটি বিহিত গঠনের সমন্বয় হিসাবে প্রকাশ করা যায়। এগুলি নীচে (চিত্র 5.14) উল্লেখ করা হল।



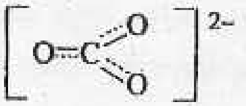
ψ_1 ψ_2 ψ_3

চিত্র–5.14 : কার্বনেট আয়নের বিভিন্ন বিহিত গঠন ও তরঙ্গ অপেক্ষক। ছবিতে বিভিন্ন বিহিত গঠনের রূপান্তর বোঝাতে দু দিক বিশিষ্ট তীর চিহ্ন (⟷) ব্যবহার করা হয়েছে।

এক্ষেত্রে $\psi(Co_3^{2-})$ অপেক্ষকটিকে

$$\psi(Co_3^{=}) = \lambda_1\psi_1 + \lambda_2\psi_2 + \lambda_3\psi_3 \qquad \text{..............(5.8)}$$

আকারে প্রকাশ করা চলে। এক্ষেত্রে λ_1 , λ_2 ইত্যাদি যথাক্রমে ψ_1 , ψ_2 ইত্যাদি তরঙ্গ অপেক্ষকের গুরুত্ব প্রকাশকারী গুণাঙ্ক স্পষ্টতই এক্ষেত্রে প্রতিটি বিহিত গঠনই পরস্পরের তুল্য। সুতরাং সমান গুরুত্ব সম্পন্ন। অর্থাৎ $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ ধরা যেতে পারে। স্পষ্টতই কার্বনেট অণুর একটি মাত্র C=O 'π' বন্ধন তিনটি অক্সিজেন পরমাণুর উপর সমানভাবে বিস্তৃত। সংশ্লিষ্ট সংস্পন্দিত সংকরটিকে সাধারণত নীচের চিত্রের মত প্রকাশ করা যায়। (চিত্র 5.15)



চিত্র-(5.15) : কার্বনেট আয়নের সংস্পন্দিত সংকরের চিত্ররূপ

এই ছবিটি লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে কার্বন এবং অক্সিজেন বন্ধনের ক্ষেত্রে 'π' বন্ধনটি 3টি অক্সিজেনের মধ্যে সমান ভাগে বিস্তৃত এবং 'π' বন্ধনের ক্রম $^1/_3$ । এখানে উল্লেখ করা যেতে পারে সংস্পন্দিত সংকরের অংশ স্বরূপ বিহিত গঠন গুলির কোন ভৌত তাৎপর্য নাই। এজাতীয় কোন একটি বিহিত গঠনকে কোন ভৌত প্রক্রিয়ায় পৃথকীকরণ সম্ভব নয়।

(a) সংস্পন্দন শক্তি (Resonance energy)

সংস্পন্দন এর আলোচনায় আমরা কোন অণুর সর্বাধিক গ্রহণযোগ্য গঠন হিসাবে সংস্পন্দিত সংকরের উল্লেখ করেছি। বস্তুত সংস্পন্দিত সংকরের শক্তির বিচারে এটি অণুটির সর্বাধিক সুস্থিত রূপ। অর্থাৎ সবচেয়ে কমশক্তিসম্পন্ন। অন্যভাবে বলা যায় যে, যে কোন একটি বিহিত গঠনের শক্তি সংস্পন্দিত সংকরটির তুলনায় বেশি হয়। অর্থাৎ যে কোন একটি বিহিত গঠনের তুলনায় সংস্পন্দিত সংকরটি অধিকতর সুস্থিত। বাস্তবিক কোন অণুর সংস্পন্দন শক্তি সংস্পন্দনের কারণে সংশ্লিষ্ট অণুটির স্বাভাবিক সংগঠনে সুস্থিতির তুলনায় বাড়তি সুস্থিতি বোঝায়। কার্বন ডাই অক্সাইড অণুর সংস্পন্দন শক্তি 154 k.J./ mole বলতে বোঝায় যে CO_2 অণুর তাত্ত্বিক গঠন শক্তির তুলনায় সংস্পন্দিত সংকর অণুটি 154 k.J. অধিক সুস্থিত। সংস্পন্দিত অণুটির প্রস্তাবিত তরঙ্গ অপেক্ষকটির বিচারে সংস্পন্দন শক্তির ব্যাখ্যা করা যায়। উপরোক্ত আলোচনা থেকে এটা পরিষ্কার যে সংস্পন্দিত সংকরটির শক্তি যে কোন একটি বিহিত গঠনের শক্তির তুলনায় কম। যেহেতু ψ (অণু) = $\lambda_1\psi_1 + \lambda_2\psi_2 + \lambda_3\psi_3$ (সমীকরণ 5.7) সুতরাং বলা যায় E (অণু) < E_1 বা E_2 বা E_3 ইত্যাদি। এক্ষেত্রে E (অণু) এবং E_1, E_2 ইত্যাদি

যথাক্রমে সংস্পন্দিত সংকর এবং বিহিত গঠনগুলির শক্তি বোঝায়। সংস্পন্দিত সংকরটির সংস্পন্দন শক্তিকে গাণিতিকভাবে

$E_{(\text{সংস্পন্দন})}$ = (সর্বাধিক সুস্থিত বিহিত গঠনের শক্তি) – (প্রকৃত অণুটির শক্তি)

= (অণুটির তাত্ত্বিক নির্ণীত শক্তি) – (পরীক্ষামূলক শক্তি)

হিসাবে প্রকাশ করা যায়। সংস্পন্দন জনিত অধিক সুস্থিতির কারণ হিসাবে বিভিন্ন বিহিত গঠনের পারস্পরিক সংক্রিয়া তথা রূপান্তরের কথা ভাবা হয়েছে। বিভিন্ন বিহিত গঠনের মধ্যে বন্ধনের ইলেকট্রনগুলি ব্যপ্ত তথা বিস্তৃত হওয়ায় ইলেকট্রনগুলি ধারণের জন্য অনেকবেশি আয়তন ব্যবহৃত হয়। যেহেতু বিভিন্ন গঠনগুলির মধ্যে ইলেকট্রনীয় বিনিময়ের মাধ্যমে এই সুস্থিতি অর্জিত হয় এজন্য সংস্পন্দিত শক্তিকে অনেক ক্ষেত্রে বিনিময় শক্তি হিসাবে উল্লেখ করা হয়ে থাকে।

b) সংস্পন্দনের সুস্থিত বিহিত গঠনের আবশ্যিক শর্তাবলী

(1) সংস্পন্দনে ব্যবহৃত বিহিত গঠনগুলির ক্ষেত্রে বিভিন্ন পরমাণুর পারস্পরিক বিন্যাস বা অবস্থানের পরিবর্তন করা চলেনা। কেবলমাত্র বিভিন্ন পরমাণুর মধ্যে বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রনগুলির (প্রধানত π ইলেকট্রনের) বিতরনের বদল করা যায়।

(2) সংস্পন্দনে অংশগ্রহণকারী বিভিন্ন বিহিত গঠনগুলির শক্তি তুলনীয় হতে হবে।

(3) বিভিন্ন বিহিত গঠনগুলিতে অযুগ্ম ইলেকট্রন সংখ্যা (যদি থাকে) তা সমান হতে হবে।

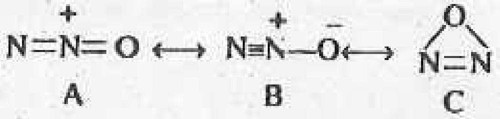
(4) কোন বিহিত গঠনের শক্তি যত কম হয় সংস্পন্দিত সংকরটিতে ঐ গঠনের অংশ তত বেশি হয়ে থাকে। অর্থাৎ সংশ্লিষ্ট ব্যঞ্জকটি অপেক্ষাকৃত বড় হয়। বিপরীত ক্রমে বলা যায় যে সমস্ত বিহিত গঠনের শক্তি অনেক বেশি সেগুলি সংস্পন্দিত সংকরের ক্ষেত্রে তত গুরুত্বপূর্ণ নয়।

(5) বিহিত গঠনগুলি পরস্পরের তুল্য হলে সংস্পন্দন জনিত সুস্থিতি বেশি হয়।

(6) কোন অণুর গঠনে পরমাণুগুলি তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্মের পার্থক্য বেশি হলে আয়নীয় বিহিত গঠনের গুরুত্ব বাড়ে।

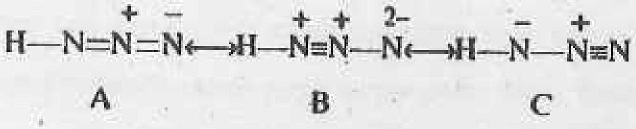
(7) বিহিত গঠনগুলির ক্ষেত্রে সমযোজী বন্ধনের সংখ্যা যতদূর সম্ভব বাড়ানো যায়। ততই সংস্পন্দিত সংকরটি সুস্থিতি অর্জন করে। সমযোজী বন্ধনের সংখ্যা কোন বিহিত গঠনে কম হলে সেটি কম সুস্থিত হয়। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় CO_2 অণুর গঠনে $O{=}C{=}O \longleftrightarrow O{=}\overset{+}{C}{-}\overset{-}{O}$ বিহিত গঠনদ্বয়ের মধ্যে শেষোক্তটিতে একটি সমযোজী বন্ধন কম থাকার ফলে সংস্পন্দনে এই গঠনটির ভূমিকা অকিঞ্চিৎকর।

(8) বিহিত গঠনগুলির পারস্পরিক পারমাণবিক বিন্যাস একরকম হলেও তাদের জ্যামিতিক আকার তথা বন্ধন কোণের কোন বড় রকমের পরিবর্তন বাঞ্ছনীয় নয়। উদাহরণ স্বরূপ N_2O এর গঠনের ক্ষেত্রে C বিহিত গঠনটির ভূমিকা প্রায় অনুপস্থিত।



চিত্র–5.16 : N_2O এর বিভিন্ন বিহিত গঠন

(9) যে সমস্ত ক্ষেত্রে বিহিত গঠনগুলির মধ্যে আধান বিভাজন ঘটে সেগুলির ক্ষেত্রে পাশাপাশি পরমাণুগুলিতে সম আধানের অবস্থান সংশ্লিষ্ট বিহিত গঠনটিকে দুস্থিত করে। বিপরীতক্রমে পাশাপাশি পরমাণুতে বিপরীতধর্মী আধানের অবস্থান তন্ত্রটিকে সুস্থিত করে। নীচে উল্লিখিত অবিয়োজিত হাইড্রাজয়িক অ্যাসিডের উদাহরণটি লক্ষ করলে স্পষ্ট বোঝা যায় যে বিহিত গঠন 'B'

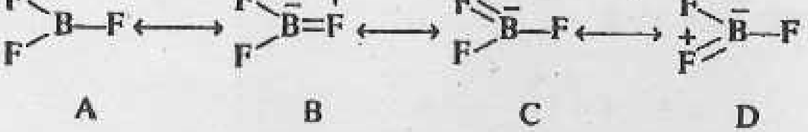


চিত্র–5.17 : HN_3 এর কয়েকটি বিহিত গঠন

সংস্পন্দনে সামান্যই অংশগ্রহণ করে।

(10) যে সমস্ত বিহিত গঠনে তড়িৎ ঋণাত্মক পরমাণুর উপর ঋণাত্মক আধান অবস্থিত হয় সেগুলি অপেক্ষাকৃত অধিক সুস্থিত ও সংস্পন্দনে সংশ্লিষ্ট বিহিত গঠনের অবদান বেশি হয়।

(11) যে সমস্ত বিহিত গঠনে সমযোজী বন্ধনের সংখ্যা তুলনামূলকভাবে বেশি সেগুলি সংস্পন্দনে অপেক্ষাকৃত বেশি অংশগ্রহণ করে। উদাহরণস্বরূপ BF_3 এর সংস্পন্দনে যে বিহিত গঠনগুলিতে



চিত্র–5.18 : BF_3 অণুর সংস্পন্দন

BF দ্বিবন্ধন গঠিত হয় সেগুলি অধিকতর সুস্থিত। প্রাথমিক বিচারে F এর উপর সঞ্চিত আধান ধনাত্মক হবার কারণে অণুটি দুস্থিত বলে মনে হলেও বাড়তি 'π' বন্ধনের কারণে অণুটি সুস্থিত লাভ করবে।

(12) যেহেতু দ্বিতীয় পর্যায়ের মৌলগুলি 'π' বন্ধন গঠনের ক্ষেত্রে 'sp' এবং 'sp^2' সংকরায়নই একমাত্র সম্ভব, এজন্য সামতলিক অণুর গঠন বা সংস্পন্দনের জন্য অণুটির একতলীয় হওয়া সবিশেষ প্রয়োজন। যদিও পরবর্তী পর্যায়ের মৌলগুলির ক্ষেত্রে বিশেষত যেগুলির জন্য 'd' কক্ষকের মাধ্যমে 'π' বন্ধন গঠিত হয় সেগুলির জন্য একতলীয় অবস্থান আবশ্যিক শর্ত নয়।

(c) ফর্মাল আধান (Formal charge)':

সংস্পন্দনে বিভিন্ন বিহিত গঠনে পরমাণুর উপর কার্যকরী আধানের ধারণা (Concept of formal charge in resonance) প্রচলিত নিয়ম অনুসারে অসমযোজী বন্ধনী গঠনের প্রয়োজনে দাতা পরমাণুটি গ্রহিতা পরমাণুটিকে । জোড়া ইলেকট্রন প্রদানের মাধ্যমে বন্ধনী গঠন করে। যেহেতু এই বন্ধনের ফলে ব্যবহৃত ইলেকট্রন জোড়টি উভয় পরমাণু সমানভাবে ব্যবহার করে সুতরাং কার্যক্ষেত্রে দাতা পরমাণুটির একটি ইলেকট্রন কম অধিকার করে। এজন্য একক ধনাত্মক আধান বিশিষ্ট ও গ্রহীতা পরমাণুটি সমপরিমাণ ঋণ আধান বিশিষ্ট হয়। দাতা এবং গ্রহীতা পরমাণুর তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্ম তুলনীয় হলে এ ধরণের গণনা মোটামুটিভাবে সঠিক হয়ে থাকে। যদিও আধান বিতরণের ক্ষেত্রে তড়িৎ ঋণাত্মক ধর্মের পার্থক্য সাধারণত বিবেচনা করা হয় না। কোন একটি আণবিক সজ্জায় কোন পরমাণুর প্রকৃত আধানের পরিমাণ Q_F হলে

$$Q_F = N_A — N_{LP} — \frac{1}{2} N_{BP} \qquad ....(5.9)$$

এক্ষেত্রে N_A নিস্তড়িৎ অবস্থায় পরমাণুটির যোজক কক্ষের ইলেকট্রন সংখ্যা। N_{LP} সংশ্লিষ্ট পরমাণুটির অধিকৃত নিঃসঙ্গ ইলেকট্রন জোড়ে অবস্থিত ইলেকট্রন সংখ্যা এবং N_{BP} ঐ পরমাণুটির বিভিন্ন বন্ধনী জোড়ের সংখ্যা। উদাহরণ স্বরূপ NH_4^+ আয়নে $N_A = 5$, $N_{LP} = 0$, $N_{BP} = 8$

সুতরাং $Q_F = 5 - 0 - \frac{1}{2}$ (8)

$= 5 - 4 = 1$

এইভাবে SF_4^- এর ক্ষেত্রে Q_F (S) = 0, Q_F (F) = 0 ;

$OPCl_3$ অণুতে Q_F (P) = 1, Q_F (Cl) = 0 ; এবং Q_F (O) = –1 হয়।

5.7 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও মৌলের তড়িৎ ঋণাত্মকতা (Valence bond theory and electronegativity of elements)

আমরা সাধারণভাবে জানি যে মৌলের তড়িৎ ঋণাত্মকতা (electronegativity) হচ্ছে কোন সমযোজী বন্ধনীতে উপস্থিত ইলেকট্রন জোড় বা ইলেকট্রনের আধান পুঞ্জকে ঐ মৌলটির নিজের দিকে আকর্ষণের ক্ষমতা। বস্তুত পাউলিং যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে কোন সমযোজী বন্ধনীর আয়নীয় চরিত্র বর্ণনার সময় তড়িৎ ঋণাত্মকতা ধারণাটির অবতারণা করেন। পাউলিং লক্ষ্য করেন যে একটি বিষমকেন্দ্রীয় অণু AB এর বন্ধনীশক্তি A_2 ও B_2 এর বন্ধনী শক্তির চেয়ে বেশি হয়। যেমন ClF অণুর বন্ধনী শক্তি 255 KJ mol^{-1} এবং Cl_2 এবং F_2 অণুর বন্ধনী শক্তি যথাক্রমে 242 KJ mol^{-1} এবং 153 KJ mol^{-1} পাউলিং ধারণা করেন যে ClF অণু বন্ধনী শক্তি তুলনামূলকভাবে বেশি হওয়ার কারণ CLF বন্ধনীর আয়নীয় চরিত্র। অর্থাৎ বলা যেতে পারে যে AB ধরণের অণুর আংশিক আয়নীয় চরিত্র AB অণুকে A_2 এবং B_2 অণুর তুলনায় অধিক সুস্থিতি দান করে।

যেহেতু AB অণুর আয়নীয় চরিত্র A এবং B পরমাণুর সমবন্ধনীর ইলেকট্রনপুঞ্জকে নিজের দিকে আকর্ষণ করার আপেক্ষিক ক্ষমতার উপর নির্ভর করবে। যদি x কোন পরমাণুর এহেন ইলেকট্রনপুঞ্জ আকর্ষণের ক্ষমতা প্রকাশের মাপকাঠি হয়, তাহলে AB বন্ধনীর আয়নীয় চরিত্র $|x_A \sim x_B|$ এর মানের উপর নির্ভর করবে। x_A এবং x_B যথাক্রমে A এবং B পরমাণুর সমযোজী বন্ধনীর ইলেকট্রনপুঞ্জকে নিজের দিকে আকর্ষণের ক্ষমতা প্রকাশ করে। x_A এবং x_B কে যথাক্রমে A এবং B পরমাণুর তড়িৎ ঋণাত্মকতা বলে।

ধরা যাক AB বন্ধনীর প্রকৃত বন্ধনী শক্তি M এবং AB বন্ধনীটি যদি সত্যই প্রকৃত সমযোজী বন্ধনী হত, তাহলে তার বন্ধনী শক্তি হত Q_1 এখন AB বন্ধনীতে খানিকটা আয়নীয় চরিত্র থাকার জন্য H এর মান এর চেয়ে বেশি হবে। H এবং Q এর পার্থক্যকে আয়নীয় সংস্পন্দন শক্তি (Ionic resonance energy) বলে। আয়নীয় সংস্পন্দন শক্তি Δ হল

$$\Delta = H - Q \qquad \text{............(5.10)}$$

AB অণুটি কাল্পনিক বিশুদ্ধ সমযোজী AB অণুর তুলনায় Δ পরিমাণ শক্তির দ্বারা বেশি সুস্থিত হবে। যেহেতু AB এর আয়নীয় চরিত্রই AB অণুকে এই সুস্থিতি দান করে সুতরাং বলা যায়

$$\Delta \alpha \, | x_A \sim x_B | \qquad \text{............(5.11)}$$

এখন বিশুদ্ধ সমযোজী AB অণুটি বাস্তবে গঠিত হয়না বলে কোন পরীক্ষার দ্বারা Q এর মান নির্ণয়

সম্ভব নয়। পাউলিং Q কে A_2 এবং B_2 অণুর বন্ধনীশক্তি যথাক্রমে E_A এবং E_B এর জ্যামিতিক গড় রূপে সংজ্ঞায়িত করেন।

$$\Delta = \sqrt{E_A \times E_B} \qquad \text{...........(5.12)}$$

এখন বোঝাই যাচ্ছে যে এইভাবে x_A এবং x_B এর চরম মান (absolute value) গণনা করা সম্ভব নয়। সেইজন্য সর্বাপেক্ষা তড়িৎঋণাত্মকতা মৌলটির তড়িৎ ঋণাত্মকতার মান এমনভাবে নির্ধারণ করা হয় যাতে তার সাপেক্ষে সর্বাপেক্ষা তড়িৎধনাত্মক মৌলটির তড়িৎঋণাত্মকতার মান ও ধনাত্মক হয়। পাউলিং প্রবর্তিত স্কেলে সর্বাপেক্ষা তড়িৎঋণাত্মক মৌল ফ্লুরিনের তড়িৎ ঋণাত্মকতার মান 4.0 ধরা হয়।

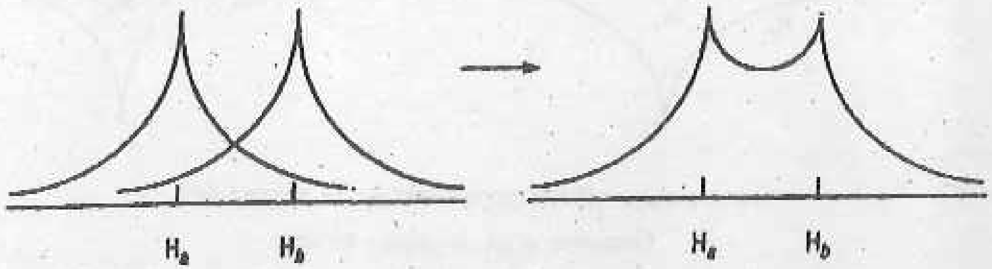
5.8 আণব-কক্ষক তত্ত্ব (Molecular Orbital Theory)

5.8.1 H_2^+ অণুর গঠন :

আমরা পূর্ববর্তী (5.3.3) অংশে দেখেছি যে H_2^+ অণুটি সুস্থিত হওয়ার আবশ্যিক শর্ত হচ্ছে প্রোটন দুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলে ঋণাত্মক আধানের উপস্থিতি। এই ঋণাত্মক আধানের উপস্থিতি প্রোটন দুটির মধ্যে বিকর্ষণ বলের তীব্রতা কমিয়ে দিয়ে অণুটিকে সুস্থিত করে। চিত্র (5.2) অনুযায়ী H_2^+ অণুতে দুটি প্রোটনের মধ্যবর্তী ছায়াচিত্রিত অঞ্চলে ঋণাত্মক আধানের ঘন সন্নিবেশ প্রোটন দুটির মধ্যে বন্ধনী রচনা করে। এই স্থানে ঋণাত্মক আধানের ঘনত্ব বৃদ্ধির অর্থ উক্ত অঞ্চলে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা বৃদ্ধি পাওয়া। অর্থাৎ মধ্যবর্তী ছায়াচিহ্নিত অঞ্চলটিতে $|\psi|^2$ তথা ψ এর মান বৃদ্ধি। ψ তরঙ্গ অপেক্ষকটি H_2^+ অণুতে ইলেকট্রনটির অবস্থা নির্দেশ করে। আণব-কক্ষক তত্ত্বে ψ কে আণব-কক্ষক বলে।

ধরা যাক অসীম দূরত্ব থেকে A ও B দ্বারা চিহ্নিত H_A হাইড্রোজেন পরমাণু এবং H_B^+ প্রোটন দুটি পরস্পরের দিকে অগ্রসর হচ্ছে। অনুরূপভাবে H_A^+ এবং H_B থেকে শুরু করলেও একই অণু গঠিত হবে। অসীম দূরত্বে অবস্থান কালে ইলেকট্রনটির অবস্থা যথাক্রমে ϕ_A^+ এবং ϕ_B^+ পারমাণবিক কক্ষক তথা তরঙ্গ অপেক্ষক দ্বারা সূচিত হয়। H_A এবং H_B সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় থাকলে ψ_A এবং ψ_B উভয় অপেক্ষকই হাইড্রোজেন পরমাণুর 1s তরঙ্গ অপেক্ষক। H_A এবং H_B^+ নিকটে আসার সাথে সাথে ইলেকট্রনটির উপর H_B পরমাণুর প্রোটনটি দ্বারা আকর্ষিত হবে। এমত অবস্থায় ইলেকট্রনটি আর কেবলমাত্র H_A প্রোটনের প্রভাবাধীন থাকবে না। আবার সম্পূর্ণরূপে H_B প্রোটনের প্রভাবাধীন হবে না। A এবং B দুটি পরমাণুতেই ইলেকট্রনটির

অবস্থানের সম্ভাবনা সমান হবে। সুতরাং ইলেকট্রনটির অবস্থা ϕ_A বা ϕ_B কোন একটি তরঙ্গ অপেক্ষক ২ কক্ষক দ্বারা সম্পূর্ণরূপে বর্ণনা করা যাবে না। এক্ষেত্রে একটি সুস্থায়ী অণু গঠন করতে হলে ইলেকট্রনটিকে H_A বা H_B কোন একটি পরমাণুর মধ্যে না থেকে H_A এবং H_B পরমাণুর প্রোটন দুটির মধ্যবর্তী অংশে অর্থাৎ কিছুটা H_A এবং H_B পরমাণুর মধ্যে এমনভাবে থাকতে হবে যাতে চিত্র (5.2) এর ছায়াচিহ্নিত অঞ্চলে ঋণাত্মক তড়িতাধানের ঘনত্ব তথা ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা বেশি হয়। এটি সম্ভব যদি H_A পরমাণু এবং H_Bপরমাণুর ইলেকট্রনীয় বস্তু তরঙ্গ ϕ_A এবং ϕ_B দুটির মধ্যে এমন গঠনমূলক উপরিপাত হয় যে লব্ধি তরঙ্গ ψ_B এর বিস্তার H_A এবং H_B এর মধ্যবর্তী ছায়াচিহ্নিত অঞ্চলে বেশি হয় [চিত্র 5.19(a)]।



চিত্র–5.19(a) : দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুর 1s কক্ষকের মধ্যে সমদশীয় (in-phase) সংযোগ

এক্ষেত্রে উক্ত অঞ্চলে $|\psi_A|^2$ এর মান $|Q_A|^2$ বা $|Q_B|^2$ এর চেয়ে বেশি হবে। এই উপরিপাতের গাণিতিক রূপ হবে

$$\psi_b = N(Q_A + Q_B). \qquad \text{............(5.13)}$$

যেখানে N হচ্ছে পরিমিতকরণ ধ্রুবক। দেখানো যায় যে N এর মান হবে $\frac{1}{\sqrt{2}}$ । অর্থাৎ

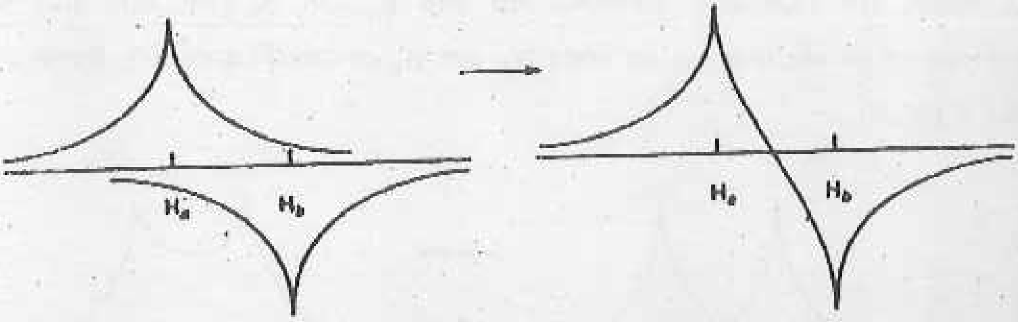
$$\psi_b = \frac{1}{\sqrt{2}}(Q_A + Q_B) \qquad \text{...........(5.14)}$$

ψ_b হচ্ছে H_2^+ অণুস্থিত ইলেকট্রনের আণব কক্ষক। $|\psi_b|^2$ H_2^+ অণুর বিভিন্ন স্থানে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

আবার Q_A এবং Q_B ইলেকট্রনীয় বস্তুতরঙ্গ দুটির মধ্যে ধ্বংসাত্মক উপরিপাত হলে ধরা যাক ψ_a লব্ধিতরঙ্গ

টি সৃষ্টি হয়। চিত্র 5.19(b) তে দেখা যায় যে এক্ষেত্রে উপরিপাতের ফলে H_A এবং H_B এর মধ্যবর্তী স্থানে $|\psi_b|^2$ এর মান তথা ঋণাত্মক আধানের ঘনত্ব হ্রাস পায়। সুতরাং এইরূপ উপরিপাত সুস্থিত অণু গঠনের অনুকূল নয়। এখানে ψ_a এর গাণিতিক রূপ হবে।

$$\varphi_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(Q_A - Q_B) \qquad \text{............(5.15)}$$

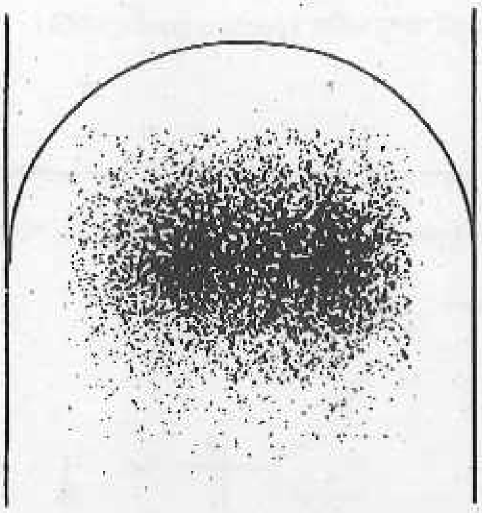


চিত্র–5.19(b) : দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুর 1s কক্ষকের মধ্যে
বিষমদশীয় (Out-of-phase) সংযোগ

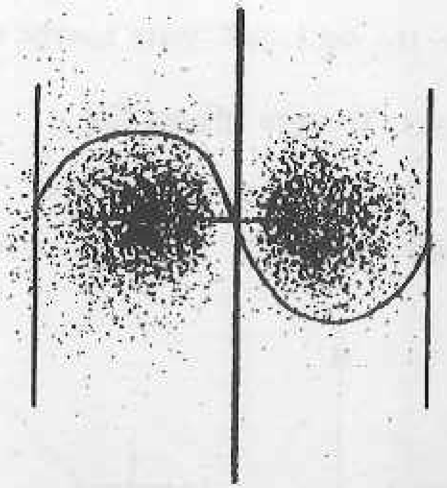
আমরা দেখলাম যে Q_A এবং Q_B এর মধ্যে গঠনমূলক উপরিপাতের দ্বারা সৃষ্ট ψ_b তরঙ্গ অপেক্ষক দ্বারা ইলেকট্রনের অবস্থা নির্ণীত হলে H_A এবং H_B এর মধ্যে একটি সুস্থিত বন্ধনী গঠন সম্ভব। অন্যথায় ψ_a অবস্থা বন্ধনী গঠনের প্রতিকূল। এই কারণে ψ_b এবং ψ_a কে যথাক্রমে বন্ধন আণব কক্ষক (bonding molecular orbital) এবং প্রতিবন্ধন আণব কক্ষক (antibonding molecular orbital) বলে। পারমাণবিক কক্ষকের ন্যায় আণবকক্ষকগুলিও আণবিক ইলেকট্রনের অবস্থা নির্দেশ করে। আণব কক্ষকের চরম বর্গ কোন স্থানে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে।

বন্ধন আণব কক্ষকশক্তি সংশ্লিষ্ট পারমাণবিক কক্ষকের কক্ষকশক্তির তুলনায় কম। অর্থাৎ এটি মুক্ত পরমাণু গুলির তুলনায় অধিকতর সুস্থিত। অপরদিকে প্রতিবন্ধন আণব কক্ষকের কক্ষকশক্তি সংশ্লিষ্ট পারমাণবিক কক্ষকের তুলনায় বেশি। ψ_b এবং ψ_a এর শক্তির তফাৎ ইলেকট্রনটিকে একটি বস্তুতরঙ্গ হিসাবে কল্পনা করলে সহজেই অনুমান করা যায়। চিত্র (5.20) তে দেখা যাচ্ছে যে বন্ধন অবস্থায় ইলেকট্রনটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) প্রতিবন্ধন অবস্থায় ইলেকট্রনটির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় বেশি। বস্তুতরঙ্গ দ্বৈত সত্ত্বা থেকে আমরা বলতে পারি

যে প্রতিবন্ধন অবস্থার শক্তি বন্ধন অবস্থার শক্তির তুলনায় বেশি। কারণ দ্য ব্রয়ের তত্ত্বানুযায়ী ইলেকট্রনটির শক্তি $E \propto \frac{1}{\lambda}$ ।



চিত্র–5.20 (a) : বন্ধন অবস্থায় ইলেকট্রন বস্তুতরঙ্গ

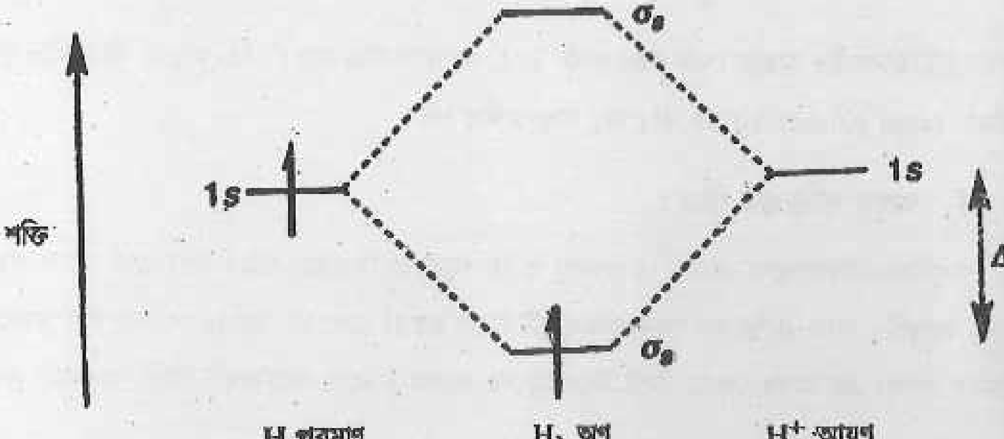


চিত্র–5.20 (b) : প্রতিবন্ধন অবস্থায় ইলেকট্রন বস্তুতরঙ্গ

5.8.2 H_2^+ অণুর শক্তিস্তর চিত্র :

(Energy level diagram of H_2^+ molecule)

H_2^+ অণুর ψ_b এবং ψ_a আণবকক্ষকের সংশ্লিষ্ট শক্তিস্তরের বিন্যাস চিত্র (5.21) দেখানো হল।

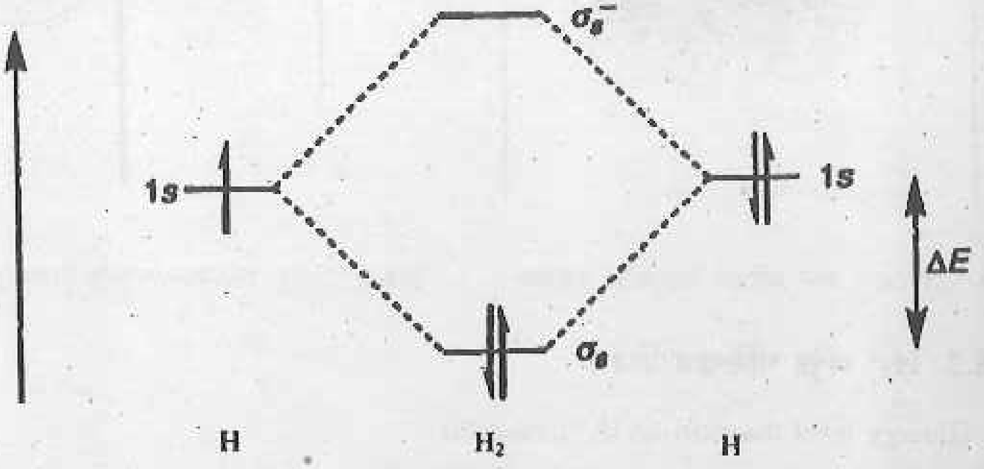


চিত্র–5.21 : H_2^+ অণুর শক্তিস্তর চিত্র

বন্ধন কক্ষক ψ_b এর শক্তি হাইড্রোজেন পরমাণুর 1s কক্ষকের শক্তির চেয়ে ΔE পরিমাণ কম। ΔE হল H_2^+ অণুর বন্ধন শক্তি (Binding energy). H_2^+ এর একমাত্র ইলেকট্রনটি ψ_b কক্ষকে থাকে এবং ψ_a কক্ষকটি ফাঁকা থাকে। কোন অণুর আণবকক্ষকসমূহে ইলেকট্রন বিন্যাস পরমাণুর ন্যায় aufbau নীতি অনুযায়ী হয়। H_2^+ অণুতে একটি বিজোড় ইলেকট্রন থাকায় H_2^+ অণুটি অণুচুম্বকীয় (paramagnetic) হবে।

5.8.3 H_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র :

H_2 অণুর শক্তিস্তর H_2^+ অণুর অনুরূপ (চিত্র 5.22)। পারমাণবিক কক্ষকের মত একটি আণবকক্ষকেও পাউলির অপবর্জন নীতি অনুযায়ী দুটি মাত্র বিপরীত ঘূর্ণনের ইলেকট্রন একসাথে থাকতে পারে। H_2 অণুতে



চিত্র–5.22 : H_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র

ψ_b কক্ষকে দুটি ইলেকট্রন থাকায় মোট বন্ধন শক্তি 2ΔE এর কাছাকাছি হবে।* H_2 অণুতে ইলেকট্রন দুটির ঘূর্ণন যুগ্মিত (spin paired) হওয়ায়, H_2 অণু অণুচুম্বকীয় নয়।

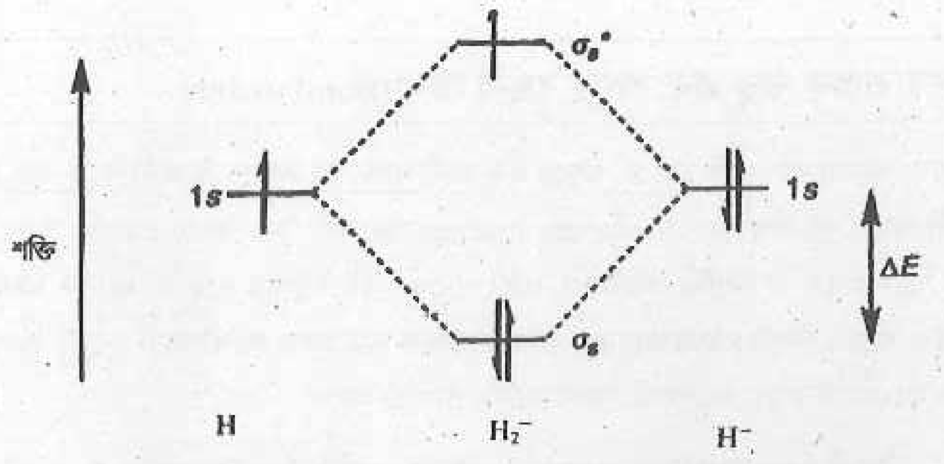
5.8.4 H_2^- অণুর শক্তিস্তর চিত্র :

H_2^- অণুটিকে (প্রকৃতপক্ষে আয়ন) H পরমাণু ও H^- আয়নের সংযোগে গঠিত বলে ভাবা যেতে পারে। H_2^+ ও H_2 অণুদুটির মতো এক্ষেত্রেও আণবকক্ষক দুটি তৈরি হয় H এবং H^- এর 1s পারমাণবিক কক্ষকের উপরিপাতের ফলে। এই অণুর ক্ষেত্রে মোট ইলেকট্রনের সংখ্যা 3 এবং আউফবাউ নীতি অনুযায়ী একটি

---

*যদিও এটি সম্পূর্ণ সঠিক নয়।

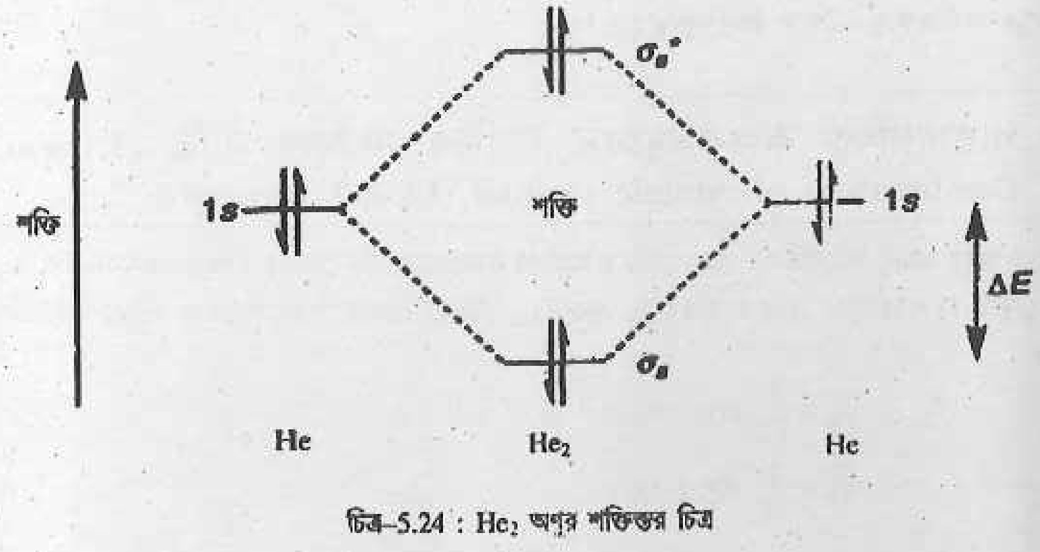
ইলেকট্রন ψ_a কক্ষকে থাকে থাকে। (চিত্র 5.23) ψ_a-এর কক্ষক শক্তি H পরমাণুর 1s কক্ষকের তুলনায় ΔE পরিমাণ বেশি। সুতরাং মোটামুটিভাবে বলা যায় যে H_2^- অণুটির বন্ধন শক্তি ~ 2ΔE – ΔE = ΔE।



চিত্র–5.23 : H_2^- অণুর শক্তিস্তর চিত্র

5.8.5 He_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র :

বাস্তবে He_2 অণু গঠিত হয় না। হিলিয়াম একটি এক পরমাণুক গ্যাস। He_2 অণু গঠিত না হওয়ার কারণ আণব কক্ষক তত্ত্বের সাহায্যে বর্ণনা করা যায়। He_2 অণু গঠিত হলে দুটি He পরমাণুর 1s কক্ষকের উপরিপাতের ফলে H_2^- অণুর অনুরূপ। দুটি আণব কক্ষক এবং সংশ্লিষ্ট দুটি শক্তিস্তর থাকত (চিত্র 5.24)। He_2 অণুতে চারটি



চিত্র–5.24 : He_2 অণুর শক্তিস্তর চিত্র

ইলেকট্রন থাকায় φ_b কক্ষক দুটি এবং φ_a কক্ষকও দুটি ইলেকট্রন ধারণ করত। সেক্ষেত্রে মোট বন্ধনশক্তি $2\Delta E - 2\Delta E = 0$ হবে। সুতরাং He_2 অণু গঠিত হয় না। নিষ্ক্রিয় গ্যাস সমূহের একপরমাণুক হওয়ার কারণ এইভাবে ব্যাখ্যা করা যায়।

5.9 আণব কক্ষক তত্ত্ব এবং অণুর বন্ধনী ক্রম (Bond order)

সাধারণভাবে আমরা বলে থাকি যে H_2 অণুতে এক বন্ধনী থাকে O_2 বিন্দুতে দ্বিবন্ধনী থাকে এবং N_2 অণুতে ত্রিবন্ধনী থাকে। লুই-বিন্দু গঠন (Lewis-dot structure) অণুযায়ী কোন অণুতে যতগুলি ইলেকট্রন জোড় বন্ধনী থাকে তাকে ঐ অণুটির বন্ধনীক্রম বলে। পুরাতন এই ধারণার সঙ্গে রাসায়নিক বন্ধনীর কোয়ান্টাম তত্ত্বীয় ব্যাখ্যার কিছুটা সমন্বয়সাধনের জন্য আণব কক্ষক তত্ত্বে কোন অণুর 'বন্ধনী ক্রমে'র ধারণার অবতারণা করা হয়। আণব কক্ষক তত্ত্বানুযায়ী 'বন্ধনী ক্রমে'র সংজ্ঞা নিম্নরূপ।

$$\text{বন্ধনী ক্রম} = \frac{\text{বন্ধন কক্ষকে ইলেকট্রনের সংখ্যা } (N_b) - \text{প্রতিবন্ধন কক্ষকে ইলেকট্রনের সংখ্যা } (N_a)}{2} \quad \text{............(5.16)}$$

এই সংজ্ঞানুযায়ী H_2^+, H_2 এবং H_2^- অণুত্রয়ের বন্ধনীক্রম যথাক্রমে $\frac{1}{2}$, 1 এবং $\frac{1}{2}$। He_2 অণুর বন্ধনীক্রম শূণ্য। অর্থাৎ দুটি He পরমাণু মিলিত হয়ে কোন He—He বন্ধনী বা He_2 অণু গঠন করে না। এটি আমাদের পুরাতন ধারণার সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ।

অণুর বন্ধনীক্রম বৃদ্ধি পেলে বন্ধনী দূরত্ব হ্রাস পায়।

5.10 পারমাণবিক কক্ষকসমূহের রৈখিক সংযোগ নীতি (Linear Combination of Atomic Orbital, LCAO principle)

H_2^+ অণুর বন্ধনী আলোচনার সময় (5.9.1 অংশে) আমরা দেখেছি যে H_2^+ অণুর আণবকক্ষক ψ_b এবং ψ_a দুটি H পরমাণুর 1s কক্ষকের (Q_A এবং Q_B) উপরিপাতের ফলে সৃষ্ট এবং ওদের গাণিতিক রূপ হল

$$\psi_b = \frac{1}{\sqrt{2}}(Q_A + Q_B)$$

$$\psi_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(Q_A - Q_B)$$

এই গাণিতিক ব্যঞ্জকগুলি দুটি (তরঙ্গ) অপেক্ষকের রৈখিক সংযোগের ফলে অন্য একটি (তরঙ্গ) অপেক্ষকের উৎপত্তি ব্যক্ত করে। (5.9.1 অংশে) আলোচিত দুটি বস্তুতরঙ্গর উপরিপাত তথা দুটি পারমাণবিক কক্ষকের মিলনে আণবকক্ষকের উৎপত্তির ঘটনাকে গাণিতিকভাবে সংশ্লিষ্ট দুটি পারমাণবিক ইলেকট্রনীয় তরঙ্গ অপেক্ষকের রৈখিক সমন্বয় হিসাবে প্রকাশ করা যায়। এই পদ্ধতিকে 'পারমাণবিক কক্ষক সমূহের রৈখিক সমন্বয়' নীতি বা সংক্ষেপে LCAO নীতি বলা হয়। আমরা এই অধ্যায়ে কেবলমাত্র দুটি সম বা ভিন্ন প্রকৃতির পারমাণবিক কক্ষকের মধ্যে রৈখিক সমন্বয়ের বর্ণনা চিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করব। পারমাণবিক কক্ষকের এইরূপ সংযোজনকে অভিলেপন (Overlap) বলা হয়ে থাকে।

যে কোন দুটি পারমাণবিক কক্ষকের কার্যকারী রৈখিক সমন্বয় হতে গেলে তিনটি শর্তপূরণ প্রয়োজনীয় শর্ত তিনটি হল—

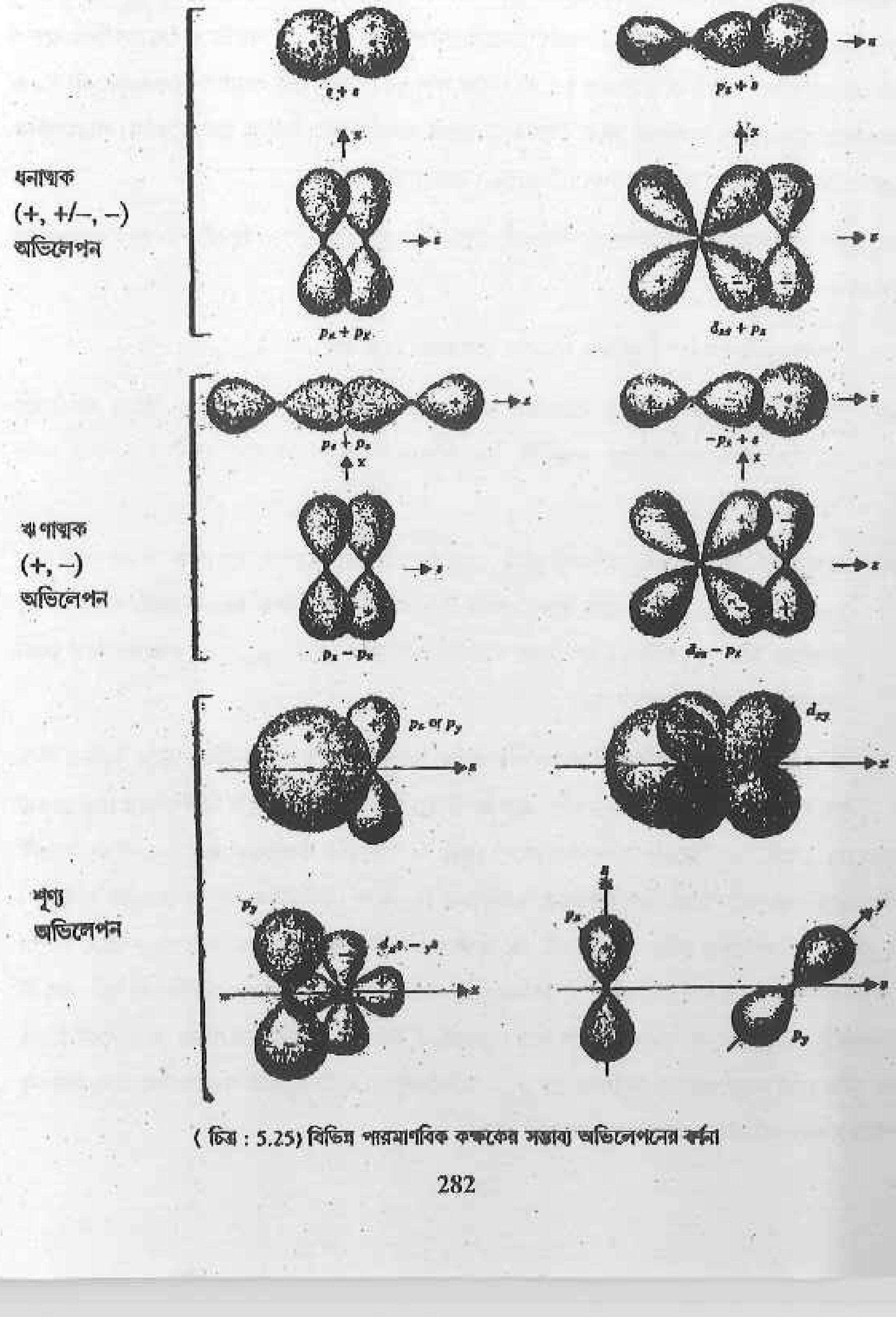
(1) কক্ষক দুটির কক্ষক শক্তির মান সমান বা প্রায় সমান হতে হবে।

(2) কক্ষক দুটি একে অপরের সঙ্গে যত বেশি সম্ভব অভিলেপন হতে হবে। (বস্তুত যত বেশি অভিলেপন হবে, উৎপন্ন বন্ধনীটি তত শক্তিশালী হবে। অর্থাৎ বন্ধনীশক্তি তত বেশি হবে।)

(3) কক্ষক দুটিকে সংশ্লিষ্ট পরমাণু দুটির কেন্দ্রক সংযোগী অক্ষের সাপেক্ষে একই প্রতিসাম্য (symmetery) বিশিষ্ট হতে হবে। যেমন উক্ত অক্ষটিকে 2-অক্ষ ধরলে একটি পরমাণুর p_z কক্ষকের সঙ্গে অপরটির p_z কক্ষকেরই কার্যকরী অভিলেপন সম্ভব, p_y বা p_x কক্ষকের সঙ্গে কোন কার্যকরী অভিলেপন সম্ভব নয়।

আমরা জানি যে পারমাণবিক কক্ষকগুলির তরঙ্গ অপেক্ষক সমূহের বিভিন্ন স্থানে বিভিন্ন চিহ্ন (+ বা –) যুক্ত হয়। যদি তরঙ্গ অপেক্ষকগুলি এক একটি ইলেকট্রনীয় বস্তুতরঙ্গকে নির্দেশ করে ধরে নেওয়া যায়, তাহলে একটি '+' চিহ্নের কক্ষকের সঙ্গে একটি '–' চিহ্নিত কক্ষকের তফা়ৎ হল যে সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গগুলির দশা পরস্পরের বিপরীত এবং সমচিহ্নের (+, + বা –, –) অর্থ হল তারা একই দশাযুক্ত। সুতরাং একটি '+' কক্ষকের সহিত আর একটি '+' কক্ষকের অভিলেপন হলে, অভিলেপনের স্থানে উৎপন্ন আণব কক্ষকের বিস্তার বেশি হবে। অর্থাৎ ঐ স্থানে সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গের মধ্যে ধনাত্মক উপরিপাত হবে এবং ঐ স্থানে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাবনা বেশি হবে। সুতরাং +, + বা –, – অভিলেপনের ফলে বন্ধন আণব কক্ষকের সৃষ্টি হবে। অনুরূপভাবে বলা যায় যে +, – অভিলেপনের ফলে সংশ্লিষ্ট বস্তুতরঙ্গের মধ্যে ঋণাত্মক উপরিপাতের ফলে প্রতিবন্ধন আণবকক্ষকের সৃষ্টি হবে।

চিত্র (5.25) তে বিভিন্ন কক্ষকের মধ্যে সম্ভাব্য ধনাত্মক অভিলেপন (+, + বা –, –) , ঋণাত্মক অভিলেপন (+, –) এবং শূন্য অভিলেপনের উদাহরণ চিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করা হল। শূন্য অভিলেপনের

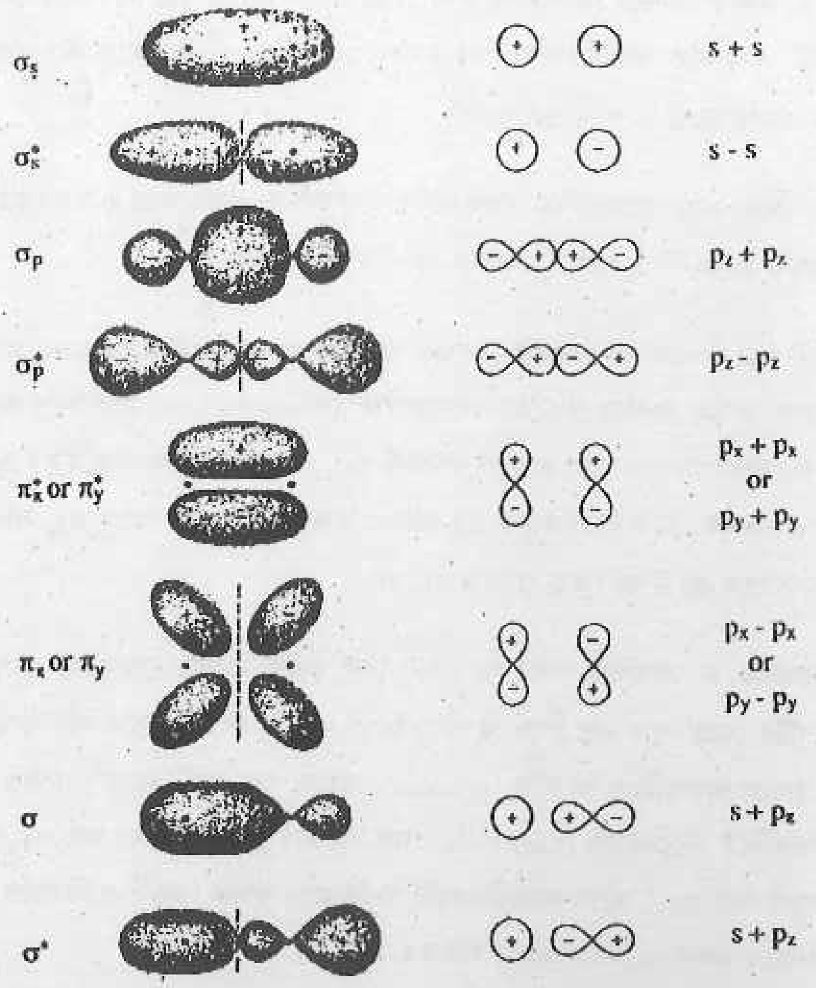


(চিত্র : 5.25) বিভিন্ন পারমাণবিক কক্ষকের সম্ভাব্য অভিলেপনের বর্ণনা

ক্ষেত্রে বাস্তবিকই কোন অভিলেপন না হতে পারে, আবার সমপরিমাণ ধনাত্মক ও ঋণাত্মক অভিলেপনের ফলে কোন কার্যকরী অভিলেপন না হতে পারে।

5.11 বিভিন্ন প্রকৃতির আণবকক্ষক সমূহ ও তাদের নামকরণ (Different types of molecular orbitals and their nomenclature

s ও p কক্ষকের অভিলেপনের ফলে উদ্ভূত সম্ভাব্য আণবকক্ষক সমূহের প্রকৃতি চিত্র (5.26) এর মাধ্যমে দেখানো হল। আণব কক্ষক সমূহের প্রতিসাম্য অনুযায়ী কক্ষকগুলিকে বিভিন্ন শ্রেণীতে ভাগ করা হয়।



(চিত্র : 5.26) বিভিন্ন পারমাণবিক কক্ষকের মধ্যে অভিলেপনের ফলে উৎপন্ন বিভিন্ন আণবকক্ষকের প্রকৃতি

কোন আণব কক্ষক যদি আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষের সাপেক্ষে বেলন বা সিলিন্ডারের (cylinder) ন্যায় প্রতিসম হলে কক্ষকটিকে একটি σ—আণবকক্ষক (σ=সিগমা) বলা হয়। অর্থাৎ একটি σ আণব কক্ষকের মধ্যস্থিত কোন একটি বিন্দু থেকে আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষের উপর একটি লম্ব এঁকে রেখাটিকে আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষের বিপরীত পার্শ্বে সমদূর পর্যন্ত বাড়ালে যে বিন্দুতে উপনীত হবে, সেই বিন্দুটিতে কক্ষকটির চিহ্ন প্রারম্ভের বিন্দুটির কক্ষকের চিহ্নের সমান হবে। যদি ঐ বিন্দুদুটিতে কক্ষকের চিহ্ন পরস্পরের বিপরীত হয় তাহলে কক্ষকটিকে π-আণব কক্ষক (π=পাই) বলা হয়। দুটি পারমাণবিক কক্ষকের আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষ বরাবর মুখোমুখি অভিলেপন হলে σ-কক্ষকের উদ্ভব হয়। সংশ্লিষ্ট বন্ধনীকে σ–বন্ধনী বলে। দুটি পারমাণবিক কক্ষকের (যথা দুটি p_x বা p_y কক্ষক পার্শ্বীয় অভিলেপনের ফলে π-আণবকক্ষকের সৃষ্টি হয়। সংশ্লিষ্ট বন্ধনীটিকে π-বন্ধনী বলে। একটি σ-কক্ষকে আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষ বরাবর কোন নিস্পন্দ তল থাকে না। একটি π-কক্ষকে আন্তকেন্দ্রীয় অক্ষ বরাবর একটি নিস্পন্দ তল থাকে।

σ-কক্ষকের গঠনের সময় পারমাণবিক কক্ষকগুলির মধ্যে অভিলেপনের মাত্রা π-কক্ষকের তুলনায় বেশি হওয়ার জন্য σ-বন্ধনী π-বন্ধনীর তুলনায় অধিক দৃঢ় বা শক্তিশালী বন্ধনী।

যে কোন প্রতিবন্ধন কক্ষকে আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষের সঙ্গে উলম্বভাবে একটি নিস্পন্দতল থাকে। প্রতিবন্ধন কক্ষক নির্দেশ করতে * চিহ্ন ব্যবহার করা হয়। সমকেন্দ্রীয় (homonuclear) দ্বিপরমাণু অণুর ক্ষেত্রে 1s পারমাণবিক কক্ষক থেকে গঠিত হয়েছে তাহলে কক্ষকটি σ_{1s} নাম দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। 2p পারমাণবিক কক্ষকের সমন্বয়ে σ–কক্ষক গঠিত হলে তাকে 2p এবং π-কক্ষক গঠিত হলে তাকে π_{2p} দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। প্রতিবন্ধন কক্ষক হলে এর উপর *চিহ্ন ব্যবহার করা হয়।

কোন পারমাণবিক বা আণবিক কক্ষকের কোন বিন্দু থেকে একটি সরলরেখা বরাবর যথাক্রমে পরমাণুটির বা অণুটির কেন্দ্রবিন্দুর মধ্য দিয়ে বিপরীত দিকে সমান দূরবর্তী বিন্দুতে যদি কক্ষকটির চিহ্নের পরিবর্তন না হয় তাহলে কক্ষকটিকে জিরাডে (gerade ; জার্মান শব্দ, অর্থ 'জোড়') কক্ষক বলে। চিহ্নের পরিবর্তন হলে কক্ষকটিকে উনজিরাডে (ungerade ; অর্থ 'বিজোড়') কক্ষক বলে। যথা σ_{1s} আণবকক্ষকটি একটি জিরাডে কক্ষক এবং σ_{1s}^* আণবকক্ষকটি একটি উনজিরাডে কক্ষক, একটি σ জিরাডে কক্ষককে σ_g দ্বারা এবং σ উনজিরাডে কক্ষক σ_u দ্বারা চিহ্নিত করা হয়।

কোন আণব কক্ষকে যে কটি ইলেকট্রন রয়েছে তা কক্ষকটির নাম প্রকাশক চিহ্নের উপর সংখ্যার দ্বারা প্রকাশ করা হয়। যেমন σ_{1s}^* কক্ষকে একটি ইলেকট্রন থাকলে আমরা তাকে σ_{1s}^{*1} দ্বারা প্রকাশ করব।

5.12 আণব কক্ষক তত্ত্বের প্রাথমিক স্বীকার্য সমূহ : (Preliminary postulates of molecular orbital theory)

আণব কক্ষকের গঠন ও প্রকৃতি সম্বন্ধে আমরা পূর্ববর্তী আলোচনা থেকে কিছু ধারণা পেয়েছি। তার উপর ভিত্তি করে আণবকক্ষক তত্ত্ব দ্বারা আণবিক গঠন বর্ণনার মূল নীতিগুলি স্বীকার্যের আকারে বিবৃত করা হল।

(i) একটি অণুর মধ্যস্থিত প্রত্যেকটি ইলেকট্রনের অবস্থা (state) এক একটি তরঙ্গ অপেক্ষক ψ এর দ্বারা নির্দেশ করা হয়, তরঙ্গ অপেক্ষক ψ কে আণবকক্ষক (molecular orbital = m.o.) বলা হয়। $|\psi|^2 d\Gamma$ $d\Gamma$ আয়তন ক্ষুদ্রাংশে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। আণব কক্ষক ψ বহুকেন্দ্রীক। *

(ii) প্রত্যেকটি ψ কয়েকটি কোয়ান্টাম সংখ্যা দ্বারা নির্দিষ্ট হয়। ψ এর শক্তি এবং আকৃতি কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির উপর নির্ভর করে।

(iii) প্রত্যেকটি আণবকক্ষক ψ এর শক্তি নির্দিষ্ট। অণুটির মোট ইলেকট্রনীয় শক্তি ইলেকট্রন দ্বারা অধিকৃত আণব কক্ষকগুলির মোট শক্তির সমান।

(iv) কোন অণুর বিভিন্ন আণব কক্ষকে ইলেকট্রনের বিন্যাস পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাসের ন্যায় আউফবাউ (aufbau) নীতি বা নির্মাণ নীতি অনুযায়ী হয়। পাউলির অপবর্জন নীতি অনুযায়ী কোন একটি কক্ষকে দুটির বেশি ইলেকট্রন থাকতে পারে না এবং সেক্ষেত্রে ইলেকট্রন দুটির ঘূর্ণন অবশ্যই পরস্পরের বিপরীত মুখী হতে হবে।

5.13 বিভিন্ন দ্বিপরমাণুক অণুর আণব কক্ষকের বর্ণনা : (Description of the molecular orbitals of different diatomic molecules)

5.13.1. কক্ষক শক্তির ক্রম :

এই অধ্যায়ে আমরা আণবকক্ষক তত্ত্বের স্বীকার্য বা মূল নীতিগুলির উপর ভিত্তি করে হাইড্রোজেন থেকে নিয়ন অবধি মৌলগুলির দ্বারা গঠিত সমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণু অণুগুলির গঠন আলোচনা করব। এই অণুগুলিতে যে সমস্ত আণব কক্ষকসমূহ বর্তমান, পারমাণবিক কক্ষক থেকে তাদের উৎপত্তি নীচে বর্ণনা করা হল।

$\sigma_{1s} = 1s + 1s$

$\sigma_{1s}{}^* = 1s - 1s$

$\sigma_{2s} = 2s + 2s$

$\sigma_{2s}{}^* = 2s - 2s$

$\sigma_{2p_z} = 2p_z + 2p_z$ (আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষকে আমরা z অক্ষ বলব)

$\sigma_{2p_z}{}^* = 2p_z - 2p_z$

$\pi_{2p_y} = 2p_y + 2p_y$

$\pi_{2p_x} = 2p_x + 2p_x$

$\pi^*_{2p_y} = 2p_y - 2p_y$

$\pi^*_{2p_x} = 2p_x - 2p_x$

এই সকল আণব কক্ষকসমূহকে ওদের কক্ষকশক্তির উর্দ্ধক্রমানুযায়ী সাজানো হল।

$$\sigma_{1s} < \sigma_{1s}{}^* < \sigma_{2s} < \sigma_{2s}{}^* < \sigma_{2p_z} < \pi_{2p_y} = \pi_{2p_x} < \pi^*_{2p_y} = \pi^*_{2p_x} < \sigma^*_{2p_z}$$

$\longrightarrow$

শক্তির উর্দ্ধক্রম

5.13.2. আণব কক্ষক সমূহে ইলেকট্রন বিন্যাস :

(i) H_2 অণু : আমরা পূর্বের আলোচনায় দেখেছি যে H_2 অণুতে দুটি ইলেকট্রন σ_{1s} কক্ষকে থাকে। সুতরাং H_2 অণুর ইলেকট্রন বিন্যাস হবে $\sigma_{1s}{}^2$। বন্ধনীক্রম 1।

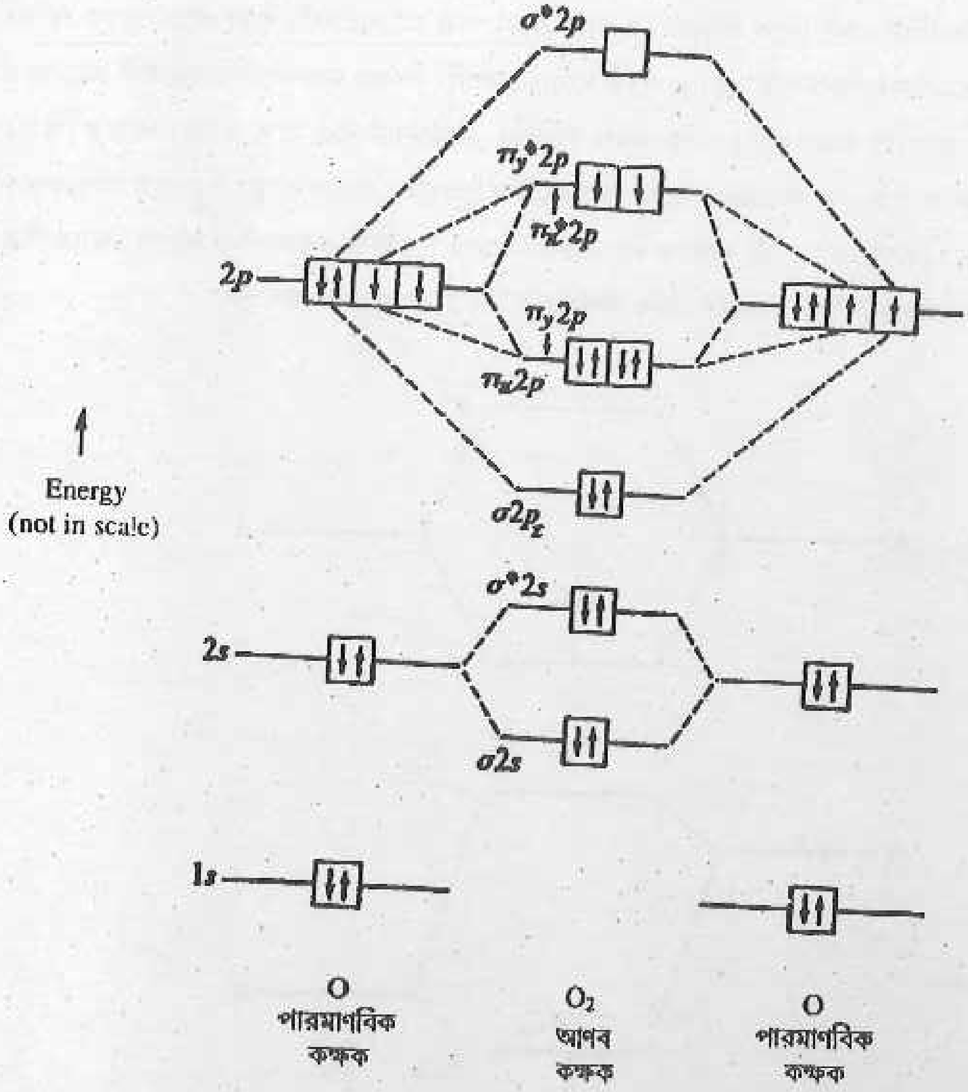
(ii) He_2 অণু : $\sigma_{1s}{}^2\ \sigma_{1s}{}^{*2}$। বন্ধনী ক্রম O। He_2 গঠিত হয় না।

(iii) Li_2 অণু : $\sigma_{1s}{}^2\ \sigma_{1s}{}^{*2}\ \sigma_{2s}{}^2$। বন্ধনী ক্রম 1, Li_2 অণুর ইলেকট্রন বিন্যাস অন্যভাবে প্রকাশ করা যায়। যেমন $KK\sigma_{2s}{}^2$। $KK \equiv \sigma_{1s}{}^2\ \sigma_{1s}{}^{*2}$ (K=K শক্তিস্তর)।

(iv) Be_2 অণু : $KK\ \sigma_{2s}{}^2\ \sigma_{2s}{}^{*2}$। বন্ধনী ক্রম 0। সুতরাং গ্যাসীয় অবস্থায় বেরিলিয়াম এক-পরমাণুক হবার কথা। এ বিষয়ে আমরা পরে আবার আলোচনা করব।

(v) B_2, C_2 এবং N_2 অণু সম্পর্কে আমরা পরে আলোচনা করব।

(vi) O_2 অণু : KK $\sigma_{2s}{}^2\ \sigma_{2s}{}^{*2}\ \sigma_{2p_z}{}^2\ \pi_{2p_y}{}^2\ \pi_{2p_x}{}^2\ \pi_{2p_y}{}^{*1}\ \pi_{2p_x}{}^{*1}$। বন্ধনী ক্রম 2। অক্সিজেন দ্বিপরমাণুক গ্যাস এবং অণুচুম্বকীয় ধর্ম বর্তমান। কারণ π^* কক্ষকে দুটি বিযুগ্ম (unpaired) ইলেকট্রন আছে। $\pi^*_{2p_y}$ এবং $\pi^*_{2p_x}$ কক্ষক দুটি অপজাত হওয়ায় হুণ্ডের নীতি অনুযায়ী ইলেকট্রন দুটি ঘূর্ণন বিযুগ্ম অবস্থায় এক একটি করে একটি π^* কক্ষকে থাকবে।



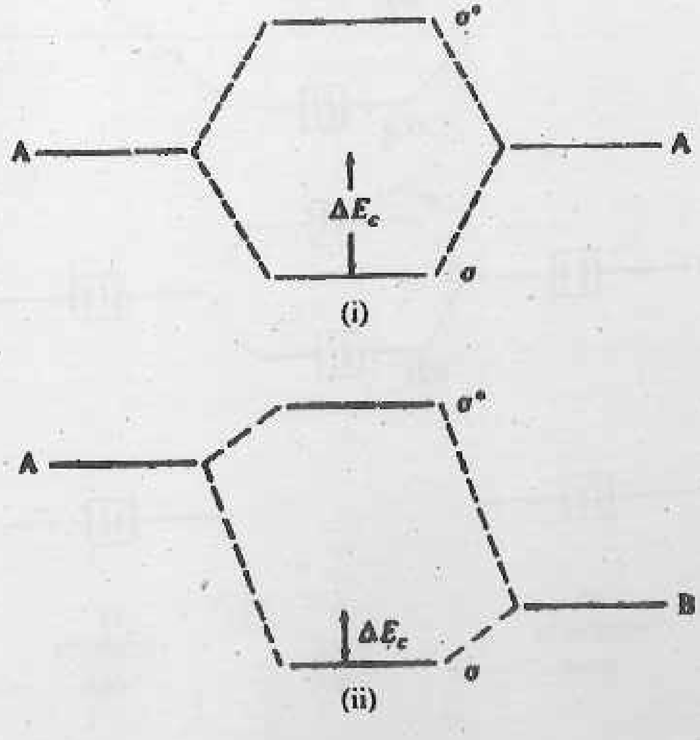
(চিত্র : 5.27) অক্সিজেন অণুর আণব কক্ষক শক্তিস্তর

(vii) F_2 অণু : $KK\,\sigma_{2s}^2\,\sigma_{2s}^{*2}\,\sigma_{2p}^2\,\pi_{2p}^4\,\pi_{2p}^4$। বন্ধনী ক্রম 1। ফ্লুরিন গ্যাস দ্বিপরমাণুক।

(viii) Ne_2 অণু : Ne_2 অণু গঠিত হলে ওর ইলেকট্রন বিন্যাস হত $KK\,\sigma_{2s}^2\,\sigma_{2s}^{*2}\,\sigma_{2p}^2\,\pi_{2p}^4\,\pi^*_{2p}{}^4\,\sigma_{2p}^{*2}$ অর্থাৎ বন্ধনী ক্রম 0। সুতরাং নিয়ন গ্যাস এক পরমাণুক।

5.13.3 বিভিন্ন আনবকক্ষকের বিন্যাসগত সংক্রিয়া ও কক্ষকশক্তির সংশোধিত ক্রম :

আনবকক্ষক গঠনের আবশ্যিক শর্ত হল উপাদান কক্ষকগুলির (ক) তুলনীয় শক্তি, (খ) তুলনীয় প্রতিসাম্য এবং (গ) কক্ষকগুলির একই দিকে বিস্তার। যে সমস্ত কক্ষকগুলি এই শর্তাবলী পূরণ করে তাদের রৈখিক সমন্বয়ের মাধ্যমে আনবকক্ষক সৃষ্টি হয়। এ পর্যন্ত আমরা সমশক্তি সম্পন্ন কক্ষকগুলির সংযোগী আলোচনা করেছি। কিন্তু সংযোগী কক্ষকগুলির শক্তি সর্বদা অবিকল একইরকম নাও হতে পারে। শক্তির বিচারে কক্ষকগুলি তুলনীয় হলে এবং সংযোগের অপর দুই আবশ্যিক শর্তপালন করলে তাদের সংযোগে আণবকক্ষক গঠিত হতে পারে। গুণগতভাবে এই কক্ষকগুলি একরকম হলেও সংযোগী কক্ষকগুলির শক্তির বিচারে ভিন্ন অবস্থানে থাকায় তাদের রৈখিক সংযোগে গঠিত কক্ষকগুলি চিত্র 5.28-এ বর্ণনা করা হল।



(চিত্র : 5.28) (i) সম (ii) বিসম শক্তির কক্ষকগুলির সংক্রিয়ায় গঠিত আণব কক্ষক

উপরের ছবিটি লক্ষ্য করলে দেখা যায় সংযোগী কক্ষকদ্বয়ের গঠনমূলক সমন্বয় সৃষ্ট বন্ধনী কক্ষক দুটি সংযোগী কক্ষক দ্বয়ের মধ্যে নিম্নতমটির থেকেও অধিক সুস্থিত হয়। একইভাবে সংযোগী কক্ষকদ্বয়ের ধ্বংসাত্মক সমন্বয়ে গঠিত প্রতিবন্ধন কক্ষকটি শক্তির বিচারে উচ্চতম সংযোগী কক্ষকটির থেকে উচ্চতর স্থানে অবস্থান করে। অর্থাৎ বলা যায় এ ধরনের সংযোগে নিম্নতম কক্ষকটি আরও বেশি সুস্থিত এবং উচ্চতম কক্ষকটি আরও বেশি সুস্থিত হয়।

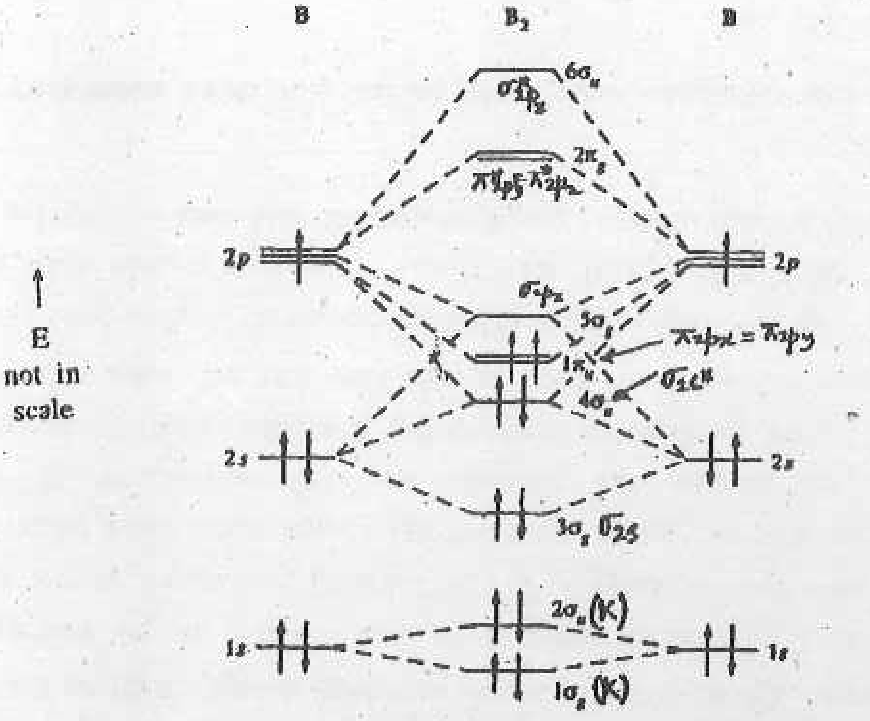
উপরের আলোচনার পরিপ্রেক্ষিতে আমরা কয়েকটি দ্বিপরমাণু অণুর যোজক আণবকক্ষকের সৃষ্টি পুনর্বিবেচনা করব।

B_2 অণুর গঠনকালে সংযোগী পারমাণবিক কক্ষকগুলির সমন্বয়ে যে আণব কক্ষক গড়ে ওঠে যেটি হল $KK\sigma_{2s}\sigma_{2s}{}^{*}\,\sigma_{2p_z}(\pi_{2p_y}\ \pi_{2p_x})\ (\pi^{*}2p_x\ \pi^{*}2p_y)\ \sigma^{*}2p_z$। লক্ষণীয় যে B_2 অণুর প্রান্তিক আনব কক্ষকগুলির মধ্যে σ_{2s} এবং σ_{2p_z} জোড় বা জিরাডে সাম্য সম্পন্ন। (উভয়েই σ_g)। যেহেতু বোরণ পরমাণুর কার্যকরী কেন্দ্রীয় আধান অপেক্ষাকৃত কম, সুতরাং এই আনব কক্ষক দ্বয়ের মধ্যে শক্তির পার্থক্য অতি সামান্য। বলাবাহুল্য যে উভয় আনবকক্ষকই অণুর সংগঠনে একই দিকে বিস্তৃত। সুতরাং এই কক্ষকদ্বয়ের রৈখিক সংযোগের তিনটি আবশ্যিক শর্তই উপযুক্তভাবে পূরণ করে। ফলত নিম্নতম শক্তির σ_{2s} অধিকতর সুস্থিতি লাভ করে এবং উচ্চতর শক্তির σ_{2p_z} দুস্থিতি জনিত কারণে শক্তির বিচারে আর একটু উপরে সরে যায়—বস্তুত তা পরবর্তী $\pi^{*}2p_y\,\pi^{*}2p_x$ অপজাত কক্ষকদ্বয়কেও অতিক্রম করে! একইভাবে $\sigma_{2s}{}^{*}$ এবং $\sigma^{*}2p_z$ যথাক্রমে সামান্য পরিমাণ সুস্থিত ও দুঃস্থিত হয়, এর ফলে সংশ্লিষ্ট অণুটির আণবকক্ষকগুলির শক্তিক্রম সংশোধনের প্রয়োজন হয়। এক্ষেত্রে সংশোধিত ক্রমটি হল $KK\sigma_{2s}$ $\sigma_{2s}{}^{*}\,\pi_{2p_y}\pi_{2p_x}\sigma_{2p_z}\ \pi^{*}2p_y\,\pi^{*}2p_x\,\sigma^{*}2p_z$। বিভিন্ন আণবকক্ষকের এ ধরণের বিন্যাসগত সংক্রিয়া B_2, C_2 এবং N_2 অণুর সংগঠনে পরিলক্ষিত হয়। B, C এবং N পরমাণুর ক্ষেত্রে ক্রমশ কার্যকরী কেন্দ্রীয় আধানের পরিমাণ বাড়তে থাকে। ফলে সংযোগী কক্ষকগুলিও ক্রমশ পরস্পরের থেকে শক্তির বিচারে দূরে সরে আসতে থাকে। বস্তুত O_2 এবং তার পরবর্তী অণুগুলির এই সংক্রিয়ার ভূমিকা তেমন উল্লেখযোগ্য নয়। সুতরাং শক্তির সংশোধিত ক্রমটি অনুসরণ করার প্রয়োজন নেই। অর্থাৎ এক্ষেত্রে শক্তির আদি ক্রমটি অনুসৃত হয়। এর ফলে B_2 থেকে N_2 অবধি শক্তিস্তরের সংশোধিত ক্রমটি অনুসৃত হয়।

5.13.4 আরও কয়েকটি সমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণুক অণুর আণবকক্ষক চিত্র :

পূর্বের (5.14.3) আলোচনার পরিপ্রেক্ষিতে আমরা লক্ষ্য করি যে সরল B_2, C_2 এবং N_2 অণুর আণবকক্ষকগুলির শক্তিক্রম O_2 এবং F_2 এর তুলনায় ভিন্নতর। এখানে আমরা পৃথকভাবে প্রতিটি অণুর আণবকক্ষক চিত্র পর্যালোচনা করব।

B_2 অণু : $KK\sigma 2s^2 \sigma s^{*2} \pi^1 2p_y \pi^1 2p_x$ । বন্ধনীক্রম 1। অণুটিতে প্রান্তিক সর্বোচ্চ কক্ষক দ্বি অপভ্রাত হওয়ার ফলে হুণ্ডের সূত্র অনুযায়ী সমশক্তি সম্পন্ন কক্ষকদ্বয় সমঘূর্ণন যুক্ত ইলেকট্রন দ্বারা অধিকৃত হবে। ফলত দ্বিপরমাণুক অণুটি অনুচুম্বকীয় হবে।



(চিত্র : 5.29) বোরন অণুর আণব কক্ষকের শক্তিস্তর

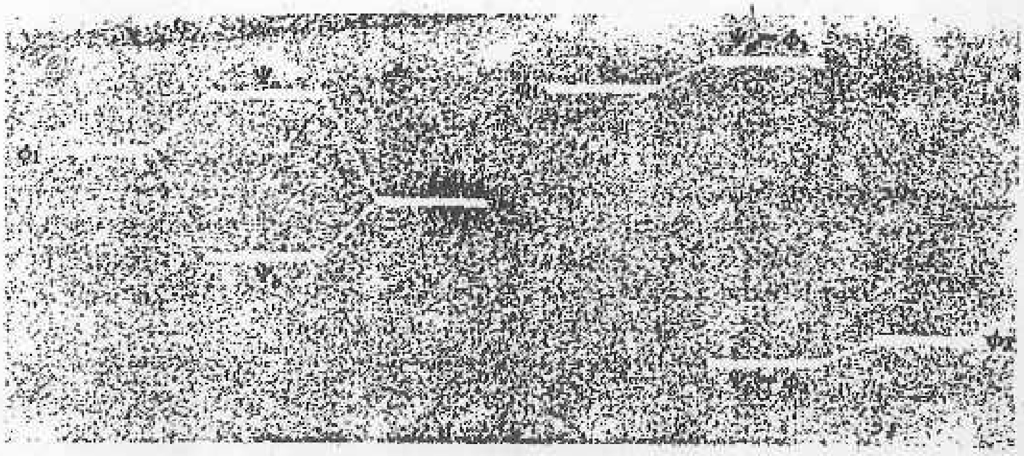
C_2 অণু : $KK\sigma 2s^2 \sigma 2s^{*2} \pi^1 2p_y \pi^2 2p_x$ । বন্ধনীক্রম 2।

N_2 অণু : $KK\sigma 2s^2 \sigma 2s^{*2} \pi^2 2p_{xy} \pi^2 2p_x \sigma^2 2p_z$ । বন্ধনীক্রম 3।

5.14 বিষম কেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণুক অণুর (Heteronuclear diatomic molecule) আণব কক্ষক চিত্র

সমকেন্দ্রীয় দ্বিপরমাণু অণুর ক্ষেত্রে দুটি পরমাণুরই কক্ষক শক্তি সমান হয়। সুতরাং দুটি পারমাণবিক কক্ষকের সংযোগ উৎপন্ন আণবকক্ষকের মধ্যে দুটি পরমাণুর কক্ষকের অবদান সমান হয়। কিন্তু দুটি ভিন্ন

পরমাণুর ক্ষেত্রে কক্ষকশক্তি আলাদা হওয়ার জন্য কোন একটি আণবকক্ষকে দুটি পারমাণবিক কক্ষকের অবদান সমান নাও হতে পারে। (চিত্র 5.30)



(চিত্র : 5.30) দুটি ভিন্ন শক্তির পারমাণবিক কক্ষক ϕ_1 ও ϕ_2 এর সংযোগে
ψ_b ও ψ_a বন্ধন কক্ষক ও প্রতিবন্ধন কক্ষক গঠন

আবার কখনও একটি পরমাণুর কোন একটি কক্ষকের শক্তি অপর পরমাণুর অন্য কোন একটি কক্ষকের শক্তির সমান বা কাছাকাছি হতে পারে। যেমন কার্বনের 2s কক্ষকের শক্তি অক্সিজেনের 2s কক্ষকের শক্তির তুলনায় বেশ বেশী, কিন্তু 2p কক্ষকের শক্তির কাছাকাছি। এজন্য CO অণু গঠনে C এর 2s কক্ষক O-এর 2p কক্ষকের সঙ্গে সংযুক্ত হয়ে σ শ্রেণীর আণবকক্ষক গঠন করে। O এর 2s কক্ষকের শক্তি অনেক কম হওয়ার 2s কক্ষকটি C এর কোন কক্ষকের সঙ্গেই সংযুক্ত হয়না। CO অণুতে O এর 2s কক্ষকটি অবন্ধনীয় (non-bonding) অবস্থায় থাকে। একে σ শ্রেণীর অবন্ধনীয় কক্ষক বলা হয়।

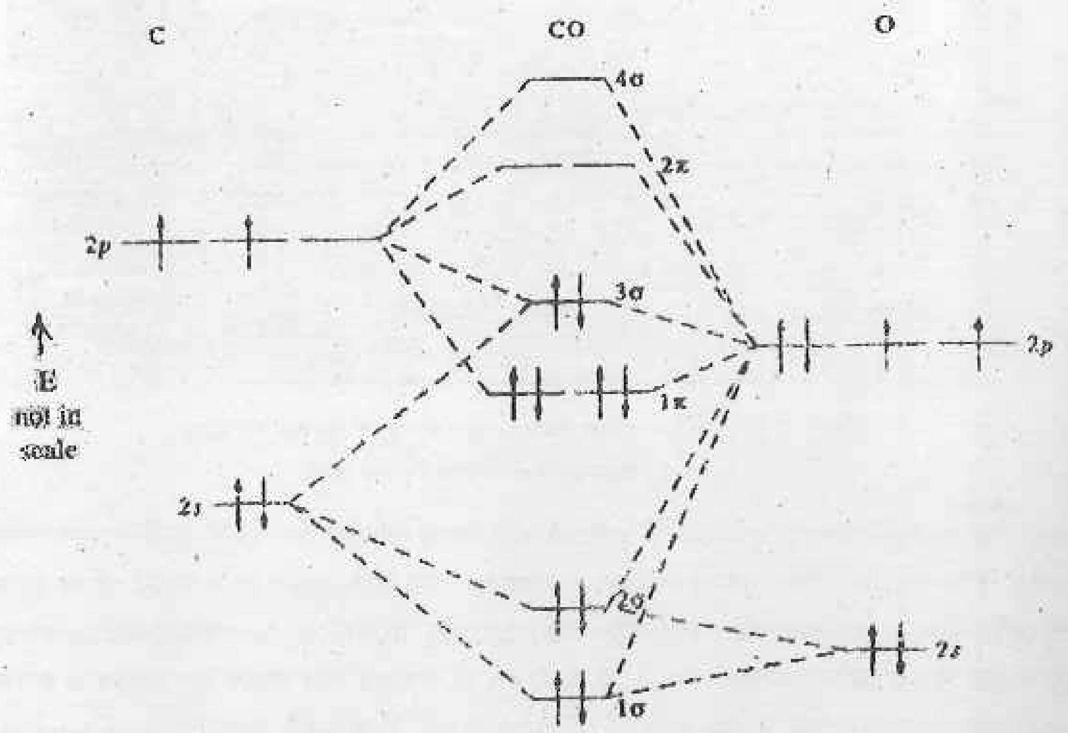
চিত্র (5.30) থেকে দেখা যাচ্ছে যে বন্ধন কক্ষক ψ_b এর শক্তি ϕ_2 এর শক্তির সঙ্গে তুলনীয়। আবার প্রতিবন্ধনকক্ষক ψ_a এর শক্তি ϕ_1 এর শক্তির কাছাকাছি। এরজন্য ψ_b আণবকক্ষকটির ধর্ম ϕ_1 পারমাণবিক কক্ষকের ধর্মের সঙ্গে বেশী সাদৃশ্যপূর্ণ হবে। আবার ψ_a এবং ϕ_1 এর ক্ষেত্রেও একই কথা প্রযোজ্য।

5.14.1. CO এবং HCl অণুর আণব কক্ষক চিত্র

CO অণু :

CO অণুটি N_2 অণুর সাথে সম ইলেকট্রনীয়। যেহেতু সংযোগী O পরমাণুটি C এবং তুলনায় বেশি তড়িৎঋণাত্মক সুতরাং CO এর বন্ধনে সুস্থিত বন্ধন কক্ষকগুলি অধিকাংশ অক্সিজেনের পারমাণবিক কক্ষকগুলির নিকটবর্তী হবে। ফলত বন্ধন ইলেকট্রনগুলি অধিকাংশই অক্সিজেন পরমাণুর কাছে অবস্থান করবে। স্বভাবতই অক্সিজেনের উপর কার্বনের তুলনায় বন্ধন ইলেকট্রনের ঘনত্ব বেশি হবে। যেহেতু CO এ বন্ধন আণবকক্ষকগুলি অক্সিজেনের নিকটবর্তী সুতরাং এগুলির গঠনে অক্সিজেনের অবদানই সর্বাধিক।

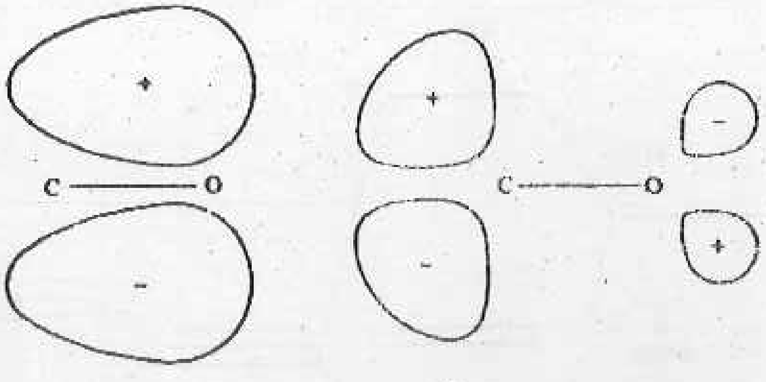
বিপরীতক্রমে প্রতিবন্ধন কক্ষকগুলিতে কার্বনের অবদান বেশি হবে। CO অণুর আণবকক্ষকের শক্তিস্তর চিত্র [চিত্র (5.31)] এ উল্লেখ করা হল।



(চিত্র : 5.31) কার্বন মনোক্সাইড অণুর আণব কক্ষকের শক্তিস্তর চিত্র

এটি লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে প্রান্তিক কক্ষকগুলির (frontier orbital) মধ্যে অধিকৃত সর্বোচ্চ কক্ষকটি 3σ এবং এটির গঠনে কার্বনের $2p_z$ (Z অক্ষকে অণুটির আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষ বলে ধরা হয়েছে) কক্ষকটির অবদান সর্বাধিক। বস্তুত এটি প্রায় একটি অবন্ধন কক্ষক যেটি চরিত্রগতভাবে কার্বনের $2p_z$ কক্ষকের অনুরূপ। সুতরাং CO অণুটি রাসায়নিক বিক্রিয়ায়, বিশেষতঃ যে সমস্ত প্রক্রিয়ায় ইলেকট্রন জোড় প্রদান করা প্রয়োজন সেগুলির ক্ষেত্রে এটিই প্রধান ভূমিকা পালন করবে। CO অণুর প্রান্তিক কক্ষকগুলির চিত্ররূপ চিত্র (5.32) তে দেখানো হল। CO-এ সর্বনিম্ন অনধিকৃত কক্ষক 2π। এটির গঠনে কার্বন পরমাণুর অবদান অক্সিজেনের তুলনায় বেশি। CO ঘটিত জটিল যৌগে সুস্থিতির ক্ষেত্রে এটির অবদান উল্লেখযোগ্য। যেহেতু CO অণুটির প্রতিসাম্য কেন্দ্র। (Centre of symmetry) এর কক্ষকগুলির নামকরণে g বা u চিহ্ন বর্জনীয়। অণুটির কক্ষকের সংগঠনে C এবং O উভয় পরমাণুর ভিতরের 1s কক্ষকের ভূমিকা উপেক্ষণীয়। এক্ষেত্রে σ

এবং π বন্ধনগুলিকে তাদের অবস্থান ক্রম অনুসারে নিম্ন শক্তি থেকে উপরের দিকে যথাক্রমে 1, 2 প্রভৃতি সংখ্যা দ্বারা চিহ্নিত করা হয়। এক্ষেত্রে σ_{2s} বা π_{2py} নামকরণ অযৌক্তিক। যদিও π বন্ধনীর তল xz এবং yz, কেননা এগুলি যথাক্রমে পরমাণুদ্বয়ের p_x এবং p_y সমান্তরাল কক্ষকদ্বয়ের সমন্বয়ে গঠিত হয়।



(a) (b)

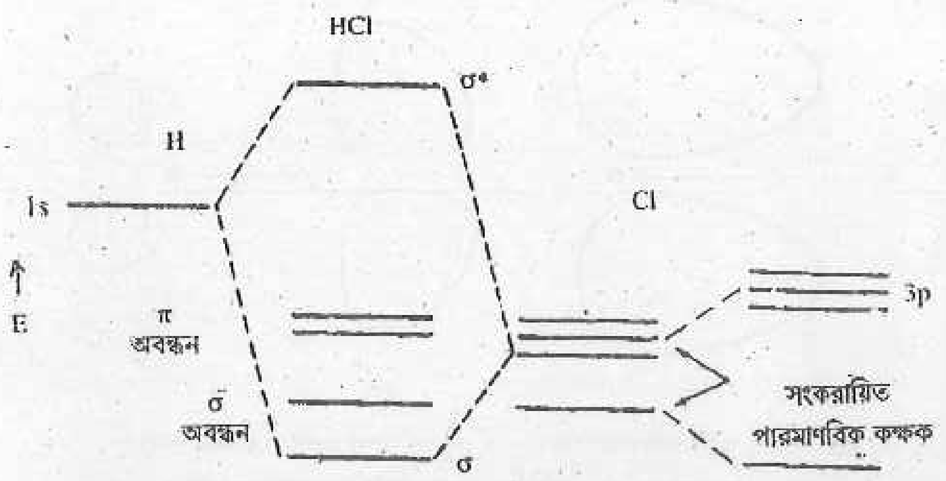
(চিত্র : 5.32) কার্বন মনোক্সাইডের (a) 1π (b) 2π আণব কক্ষক। π বন্ধন কক্ষকে অক্সিজেনের অবদান ও 2π প্রতিবন্ধন কক্ষকে কার্বনের অবদান লক্ষ্যণীয়

একই যুক্তি অনুসরণ করে NO অণুটির আণবকক্ষক চিত্র রচনা করা যায়। CO অণুটির তুলনায় NO অণুতে একটি বাড়তি ইলেকট্রন থাকে। এই কারণে NO অণুচুম্বকীয় এবং NO^+, CO এর সঙ্গে সমইলেকট্রনীয় হওয়ায় CO এর মতই জটিল যৌগ গঠন করে।

HCl অণু :

যেহেতু ক্লোরিণ হাইড্রোজেনের তুলনায় অধিক তড়িৎ ঋণাত্মক এবং Cl পরমাণুর কার্যকরী কেন্দ্রীয় আধান হাইড্রোজেনের তুলনায় বেশি। সুতরাং কেন্দ্রীয় আধান হাইড্রোজেনের তুলনায় বেশি, সুতরাং শক্তির বিচারে Cl^- এর যোজক কক্ষের 3s এবং 3p কক্ষক হাইড্রোজেন পরমাণুর 1s কক্ষকের সঙ্গে তুলনীয়। ক্লোরিনের ভিতরের কক্ষের কক্ষকগুলি বন্ধন গঠনে অংশগ্রহণ করে না। HCl এর আণব কক্ষক চিত্র। চিত্র (5.33) তে দেখানো হল। HCl অণুর সংগঠনে একটি মাত্র σ বন্ধন বর্তমান। যোজক ইলেকট্রনগুলির অবশিষ্ট ছয়টি Cl পরমাণুর অবন্ধন কক্ষকগুলির অধিকার করে। এগুলিকে যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে উল্লেখিত ইলেকট্রনের জোড়ের সঙ্গে তুলনা করা যেতে পারে। তিনটি অবন্ধনী ইলেকট্রন জোড়ের দুটি HCl এর আন্তঃকেন্দ্রীয় অক্ষের সঙ্গে উলম্বভাবে অবস্থান করে। সুতরাং তা কোনক্রমেই বন্ধন গঠনে কোন ভূমিকা পালন করে না। তৃতীয় ইলেকট্রন জোড়টি কিয়দংশে সংকেরায়িত হবার ফলে এটির ক্ষেত্রে ক্লোরিণের যোজক কক্ষের s এবং p_z উভয় কক্ষকের ভূমিকা রয়েছে, যদিও আদর্শ s–p মিশ্রণ থেকে অনেকাংশেই বিচ্যুত এবং সামগ্রিক

বিচারে মোটামুটি একটি s কক্ষকের সদৃশ। এই গোলকাকার কক্ষকটি মূলতঃ ক্লোরিণ পরমাণুর উপর কেন্দ্রীভূত।



(চিত্র : 5.33) HCl অণুর আণব কক্ষকের শক্তিস্তর

5.15 যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও আণব কক্ষক তত্ত্বের তুলনা (Comparison of valence bond theory and molecular orbital theory)

রাসায়নিক বন্ধনীর দুটি প্রধান তত্ত্ব হচ্ছে যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও আণবকক্ষক তত্ত্ব। এই দুটি তত্ত্বের কোনটাই সম্পূর্ণ নয়—দুটি কার্যকরী সমাকর্ষ মাত্র। এই তত্ত্ব দুটিতে রাসায়নিক বন্ধনীর গঠন ব্যাখ্যার প্রকৃতি সম্পূর্ণ আলাদা, যদিও বেশিরভাগ ক্ষেত্রেই এই দুটি তত্ত্ব মোটামুটি একই সিদ্ধান্তে উপনীত হয়।

যোজ্যতা বন্ধনী ও আণব কক্ষক উভয় তত্ত্বই সংযোগী পরমাণু দুটি মধ্যবর্তী স্থানে এর ফলে সৃষ্ট অণুটি স্থায়িত্ব অর্জন করে।

আণব কক্ষক তত্ত্বে H_2 অণুর বন্ধন আণবকক্ষকে আউফবাউ নীতি অনুযায়ী দুটি ইলেকট্রন থাকায় পাউলির অপবর্জন নীতি মেনে ওদের ঘূর্ণন যুগ্মিত হতে হয়। আবার যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে পারমাণবিক কক্ষক দুটি মিলে বন্ধনী গঠন করার পর পাউলির অপবর্জন নীতি অনুযায়ী ইলেকট্রন দুটির ঘূর্ণন পরস্পরের বিপরীতমুখী হতে হয়। এক্ষেত্রেও ঘূর্ণনের যুগ্মিতা বন্ধনী গঠনের প্রাথমিক শর্ত নয়।

যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে সংস্পন্দনের মাধ্যমে বন্ধনীর আয়নিক চরিত্র তথা দ্বিধ্রুবীয়তার উৎস ব্যাখ্যা করা হয়। এইজন্য পরমাণুর তড়িৎ ঋণাত্মকতা ধর্মের অবতারণা করা হয়। আণবকক্ষক তত্ত্বে আণব কক্ষকটি (ψ) বস্তুত দুটি ভিন্ন পরমাণুর কক্ষক ϕ_A ও ϕ_B এর ভারযুক্ত যোগফল।

$$\psi = C_1\phi_A + C_2\phi_B$$

C_1 এবং C_2 এর আপেক্ষিক মানের উপর কোন বিষমকেন্দ্রীয় অণুর ক্ষেত্রে ψ কতটা Q_A বা Q_B এর ধর্মের অধিকারী হবে তা নির্ভর করে ψ এর মধ্যে Q_A ও Q_B এর অবদানের তারতম্যই বন্ধনীর ধ্রুবীয়তার উৎস।

অল্প আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্বের জন্য যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও আণবকক্ষক তত্ত্ব হতে নির্ণীত বন্ধনী শক্তির তফাৎ অল্প যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব থেকে নির্ণীত বন্ধনী শক্তির মান আণব কক্ষক তত্ত্ব থেকে মানের চেয়ে অপেক্ষাকৃত ভালো। কিন্তু আন্তঃকেন্দ্রীয় দূরত্ব বাড়ার সাথে সাথে বন্ধনী শক্তি নির্ণয়ে যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের প্রয়োগ ভালো ফল দেয়।

কোন অণুর সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় শক্তি নির্ণয়ে যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব অধিকতর নির্ভরযোগ্য। কিন্তু উত্তেজিত অবস্থায় শক্তি গণনায় আণবকক্ষক তত্ত্বই একমাত্র প্রযোজ্য। যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব বস্তুত উত্তেজিত অবস্থার শক্তি নির্ণয়ে একেবারেই অক্ষম। এর কারণ খুব সহজেই বোঝা যায়। যেমন HCl অণুর গঠন বর্ণনায় যোজ্যতা বন্ধনীতত্ত্বে আমরা সহজেই ধরে নিতে পারি যে সর্বাধিক সুস্থিত অবস্থায় HCl এর প্রকৃত আণবিক গঠনে $H^+ Cl^-$ আয়নিক গঠনটির অবদান $H^- Cl^+$ এর চেয়ে অনেক বেশি। $H^- Cl^+$ এর অবদান নগন্য। কারণ আমাদের রসায়নের জ্ঞান থেকে আমরা জানি যে Cl, H অপেক্ষা অনেক বেশি তড়িৎ ঋণাত্মক। কিন্তু উত্তেজিত অবস্থায়, যখন অণুটির মোট শক্তি বেশি, তখন HCl এর প্রকৃত আণবিক গঠনে $H^+ Cl^-$ এবং $H^- Cl^+$ এই দুটি আণবিক গঠনের আপেক্ষিক অবদান আদৌ আগে থেকে বলা সম্ভব নয়। আণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যায় উত্তেজিত শক্তিস্তরগুলির শক্তি জানা প্রয়োজনীয় বলে আণবিক বর্ণালীর ব্যাখ্যায় আণবকক্ষক তত্ত্বের সাহায্য নিতে হয়।

আণবকক্ষকগুলি বহুকেন্দ্রীয় হওয়ায়, ইলেকট্রনগুলি সবকটি কেন্দ্রীন দ্বারা আকর্ষিত হয়। বোরের তত্ত্বের মতো যদি আমরা ইলেকট্রনের একটি কক্ষপথের কথা চিন্তা করি, তাহলে সেই কক্ষপথটি সব কেন্দ্রকের চারিপাশে বিস্তৃত হবে। আণব কক্ষক তত্ত্ব অনুযায়ী অণুস্থিত বন্ধীয় (bonded) ইলেকট্রনগুলি অস্থানী ভূত (delocalized)। আবার যোজ্যতাবন্ধনী তত্ত্বানুযায়ী বন্ধীয় ইলেকট্রনের অস্থানীকরণ হয় 'বিনিময়' ও 'সংস্পন্দনের' মাধ্যমে।

আনবকক্ষক তত্ত্বানুযায়ী বন্ধনীক্রম হচ্ছে বন্ধন ইলেকট্রন ও প্রতিবন্ধন ইলেকট্রনের সংখ্যার পার্থক্যের অর্ধেক। আবার যোজ্যতাবন্ধনী তত্ত্বে বন্ধনীক্রম হ'ল মোট বন্ধীয় ইলেকট্রন যুগ্ম সংখ্যা। যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বে যেতে বন্ধনী গঠন মানে ইলেকট্রনের যুগ্মন (pairing). সুতরাং যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব দ্বারা অযুগ্ম বিজোড় সংখ্যক (যথা এক বা তিন) ইলেকট্রনের অস্তিত্ব বর্ণনা করা, কিন্তু O_2 , NO ইত্যাদি অণুগুলির অণুচুম্বকীয় ধর্ম অণুগুলিতে অযুগ্ম ইলেকট্রনের অস্তিত্ব প্রমাণ করে। আমরা দেখেছি যে আণব কক্ষক তত্ত্বের দ্বারা খুব সহজেই এর ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব।

5.16 হাইড্রোজেন বন্ধনী (Hydrogen Bond)

কটি হাইড্রোজেন পরমাণু একইসাথে দুটি ভিন্ন পরমাণু দ্বারা আকর্ষিত হতে পারে। এরকম অবস্থায় হাইড্রোজেন পরমাণুটি দুটি অণু বা আয়নের মধ্যে সেতু হিসাবে কাজ করতে পারে। ধরা যাক একই মাধ্যমে X—H অণু এবং Y—Z অণু দুটি রয়েছে। X—H এবং Y—Z কাছাকাছি এলে X—H এবং Y—Z মিলে একজোট হয়ে অবস্থান করতে পারে। এই জোটের গঠন নিম্নরূপ।

X—H.........Y—Z

এখানে H, X পরমাণুর সঙ্গে সমযোজী বন্ধনে আবদ্ধ এবং একই সাথে Y–Z অণুর Y পরমাণু দ্বারা আকর্ষিত হচ্ছে। X—H অণুর H পরমাণুর Y—Z অণুর Y পরমাণুর সাথে যেভাবে আবদ্ধ থাকে তাকে হাইড্রোজেন বন্ধনী বলে।

যদি X এবং H এর মধ্যে তড়িৎঋণাত্মকতার পার্থক্য খুব বেশি হওয়ার ফলে X—H বন্ধনীটি ধ্রুবীয় হয়ে H পরমাণুটি সন্নিকটে ঋণাত্মক আধান কমে যায় অর্থাৎ H পরমাণুটি আংশিক ধনাত্মক আধান বহন করে সেক্ষেত্রে অন্য একটি ধ্রুবীয় অণু Y–Z এর ঋণাত্মক প্রান্ত Y পরমাণুর সঙ্গে স্থির তাড়িতিক আকর্ষণ বল দ্বারা আবদ্ধ হয়ে জোট গঠন করতে পারে।

$$\overset{\delta-}{X}\text{———}\overset{\delta+}{M}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\overset{\delta-}{Y}\text{———}\overset{\delta+}{Z}$$

হাইড্রোজেন বন্ধনীতে H পরমাণু এবং Y পরমাণুর মধ্যে বন্ধনী NaCl অণুতে Na^+ এবং Cl^- আয়নের মধ্যেকার বন্ধনীর প্রকৃতি একইরকম। যদিও NaCl এর বন্ধনী শক্তি হাইড্রোজেন বন্ধনীর বন্ধনীশক্তির

তুলনায় যথেষ্ট বেশি। হাইড্রোজেন বন্ধনী সাধারণ সমযোজী বন্ধনী ও তড়িৎযোজী বন্ধনী উভয়প্রকার বন্ধনীর তুলনায় যথেষ্ট কম শক্তিশালী।

হাইড্রোজেন বন্ধনী গঠন যেহেতু X—H এবং Y—Z উভয় অণুর ধ্রুবীয়তার উপর নির্ভর করে, সেজন্য Y, Z এবং X, H এর মধ্যে তড়িৎঋণাত্মকতার তফাৎ খুব বেশি হলেই হাইড্রোজেন বন্ধনী গঠন সম্ভব।

একমাত্র হাইড্রোজেন পরমাণু ছাড়া অন্য কোন পরমাণু এই ধরনের বন্ধনী গঠন করতে পারে না। কারণ হাইড্রোজেন পরমাণুর আকার খুব ছোট হওয়ার জন্য এটি অন্য অণুর কোন পরমাণুর খুব কাছে আসতে পারে যার ফলে বন্ধনীগঠন সম্ভব হয়।

হাইড্রোজেন বন্ধনীর অস্তিত্বের সপক্ষে সবচেয়ে বড় প্রমাণ হল এক ক্ষারীয় হাইড্রোফ্লুরিক অ্যাসিডের (HF) KHF_2 এর মতো অ্যাসিড লবণ গঠন করা। KHF_2র গঠন হাইড্রোজেন বন্ধনীর সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। H ও F পরমাণুর মধ্যে তড়িৎ ঋণাত্মকতার তফাৎ খুব বেশি হবার জন্য H—F বন্ধনী অতিমাত্রায় ধ্রুবীয় হয় এবং H—F অণুগুলি পরস্পরের সঙ্গে হাইড্রোজেন বন্ধনীর মাধ্যমে যুক্ত হয়ে থাকে।

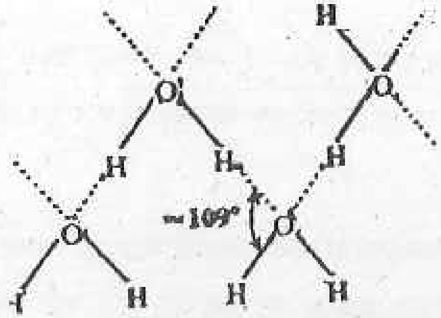
$$\overset{\delta+}{H}—\overset{\delta-}{F}\cdots\cdots\cdots\overset{\delta+}{H}—\overset{\delta-}{F}\cdots\cdots\overset{\delta+}{H}—\overset{\delta-}{F}\cdots\cdots$$

সাধারণত দ্রবণে হাইড্রোফ্লুরিক অ্যাসিড আয়নিত হয়ে HF_2^- (F^-...H—F) আয়ন হিসাবে থাকে। তাই KOH এর ন্যায় ক্ষারের সাথে KHF_2 গঠন করে।

রসায়নে হাইড্রোজেন বন্ধনীর গুরুত্ব অপরিসীম। আমরা তার কিছু উদাহরণ এখানে আলোচনা করব।

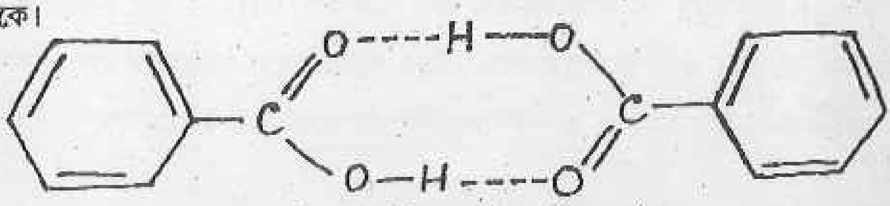
সাধারণভাবে আমরা জানি যে কোন যৌগের স্ফুটনাঙ্ক আণবিক ওজনের সমানুপাতিক। কিন্তু নাইট্রোজেন, অক্সিজেন এবং ফ্লুরিনের হাইড্রাইডগুলির (NH_3, H_2O এবং HF) স্ফুটনাঙ্ক তাদের সঙ্গে পর্যায় সারণীর সমশ্রেণীভুক্ত মৌলগুলির উচ্চতর আণবিক ওজনের হাইড্রাইডগুলির স্ফুটনাঙ্কের তুলনায় বেশি। কারণ N, O এবং F খুব তড়িৎ ঋণাত্মক হবার ফলে তরল NH_3, H_2O এবং HF অণুগুলি হাইড্রোজেন বন্ধনীর মাধ্যমে সংযুক্ত থাকে। সুতরাং তাদের গ্যাসীয় অবস্থায় নিয়ে যেতে

গেলে হাইড্রোজেন বন্ধনী ভাঙ্গার জন্য অধিক শক্তি ব্যয়িত হয়। তাই এই যৌগগুলির স্ফুটনাঙ্ক অপেক্ষাকৃত বেশি।



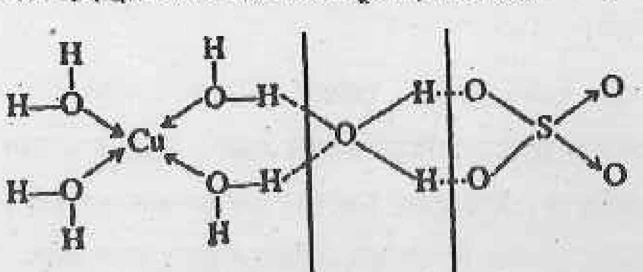
(চিত্র : 5.34) জলে আন্তঃ-আণবিক H-বন্ধনী

কিছু কার্বক্সিলিক অ্যাসিড যেমন বেনজয়িক অ্যাসিড জৈব মাধ্যমে হাইড্রোজেন বন্ধনীর মাধ্যমে দ্বিলোক (dimer) করে থাকে।



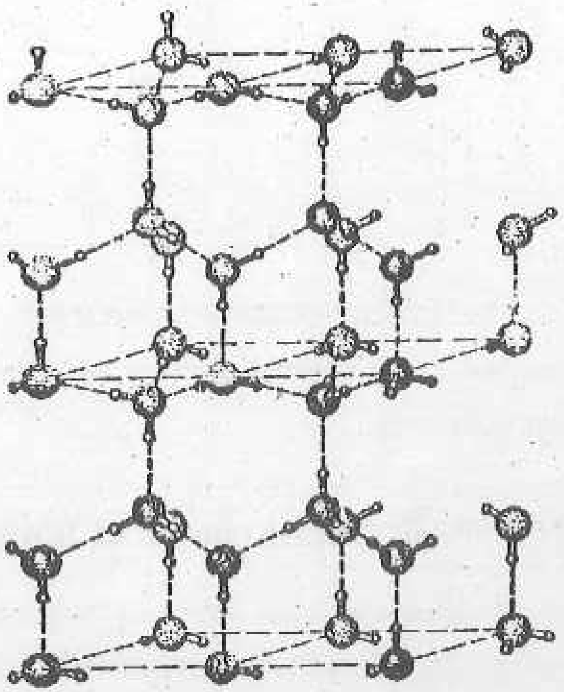
(চিত্র : 5.35) বেঞ্জিনে বেঞ্জয়িক অ্যাসিডের দ্বিলক গঠন

কিউপ্রিক সালফেট পেন্টাহাইড্রেটে ($CuSO_4$, $5H_2O$) দেখা যায় একটি কেলাস অণু জল বাকি চারটির তুলনায় ভিন্ন প্রকৃতির। এই কেলাসটিকে উত্তপ্ত করলে চার অণু জল সহজেই বেরিয়ে যায়। অধিক উত্তাপে পঞ্চমটি নির্গত হওয়ার সাথে সাথে $CuSO_4$, $5H_2O$ এর কেলাসাকার বিনষ্ট হয়। কারণ চার অণু জল Cu^{2+} আয়নের সাথে অসমযোজী বন্ধন দ্বারা যুক্ত থাকে। কিন্তু পঞ্চম H_2O অণুটি SO_4^{2-} আয়ন ও চার অণু কেলাস জলের দুই অণুর সঙ্গে হাইড্রোজেন বন্ধনীর মাধ্যমে যুক্ত। (চিত্র 5.36)



(চিত্র : 5.36) $CuSO_4$, $5H_2O$ কেলাসের গঠনচিত্র

বরফের ঘনত্ব জলের ঘনত্ব অপেক্ষা কম হওয়ার কারণ ও হাইড্রোজেন বন্ধনীর মাধ্যমে ব্যাখ্যা করা যায়। বরফ কেলাসের গঠন চিত্র (5.37) তে দেখানো হল।

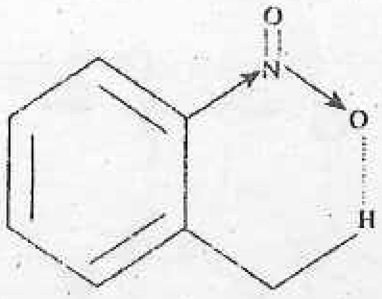


(চিত্র : 5.37) বরফের কেলাসের হাইড্রোজেন বন্ধন

এইধরণের খোলামেলা চতুস্তলকীয় গঠনের জন্য চতুস্তলকের শীর্ষে অবস্থিত অণুগুলির মধ্যে অনেকটা ফাঁক থাকে। বরফ গলে জলে পরিণত হলে কেন্দ্রে অবস্থিত H_2O অণুটির হাইড্রোজেন বন্ধনী ভেঙ্গে যাবার ফলে অণুগুলি পরস্পরের কাছে চলে আসতে পারে এবং ফলস্বরূপ ঘনত্ব বৃদ্ধি পায়।

আমরা এতক্ষণ দুটি অণুর মধ্যে হাইড্রোজেন বন্ধনী আলোচনা করেছি। এই ধরণের হাইড্রোজেন বন্ধনীকে আন্তঃআণবিক (Intermolecular) হাইড্রোজেন বন্ধনী বলা হয়। আবার একই অণুর দুটি অংশের মধ্যে হাইড্রোজেন বন্ধনী গঠনও সম্ভব। এই ধরণের হাইড্রোজেন বন্ধনীকে অন্তঃআণবিক (intramolecular) হাইড্রোজেন বন্ধনী বলে। যেমন অর্থোনাইট্রোফেনলের স্ফুটনাঙ্ক পারা নাইট্রোফেনলের স্ফুটনাঙ্কের তুলনায় কম। কারণ অর্থোনাইট্রোফেনলে $—NO_2$ কার্যকরী মূলক এবং —OH কার্যকরী মূলক দুটি কাছাকাছি থাকায় এঁদের মধ্যে অন্তঃআণবিক হাইড্রোজেন বন্ধনী গঠিত হয়। চিত্র (5.37) এইজন্য অর্থোনাইট্রোফেনল জলের সঙ্গে H—বন্ধনী গঠন করতে পারে না এবং এটি জলে কম দ্রাব্য। আবার প্যারা-নাইট্রোফেনলে $—NO_2$ ও —OH মূলক দুটি পরস্পরের থেকে দূরে থাকায় অন্তঃআণবিক H—বন্ধনী গঠন সম্ভব হয়না, আন্তঃআণবিক H—বন্ধনী গঠিত হয়। এরজন্য প্যারানাইট্রোফেনলের অণুগুলি পরস্পরের সঙ্গে সংযুক্ত হয়ে থাকে এবং এর

স্ফুটনাঙ্ক অপেক্ষাকৃত বেশী হয় এবং জলে দ্রাব্যতাও বেশী হয়। কারণ এক্ষেত্রে H_2O অণুর সঙ্গে H—বন্ধনী গঠন সম্ভব হয়।



(চিত্র : 5.37) অর্থো নাইট্রোফেনলে অণু-মধ্যস্থ H বন্ধনী

জীববিদ্যায় হাইড্রোজেন বন্ধনীর গুরুত্ব অপরিসীম। প্রোটিন ও DNA অণুর গঠনে এবং ধর্ম নির্ধারণে হাইড্রোজেন বন্ধনীর গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা আছে।

5.17 দুর্বল রাসায়নিক বন্ধনী (Weak chemical bonding)

আমরা যে রাসায়নিক বন্ধনীর সাহায্যে বিভিন্ন পরমাণু যুক্ত হয়ে অণু গঠন করে তার প্রকৃতি আলোচনা করেছি। আমরা দেখেছি সমযোজী বন্ধনী ও তড়িৎযোজী বন্ধনী। এই ধরণের বন্ধনীর মাধ্যমে কোন অণুর মধ্যে পরমাণুগুলির আবদ্ধ থাকে। কিন্তু এর সাহায্যে বিভিন্ন অণুর মধ্যে ক্রিয়াশীল বিভিন্নপ্রকার বলের ব্যাখ্যা করা যায় না। এই বলসমূহকে একসাথে আন্তঃআণবিক বল (Intermolecular forces) বলে। এই আন্তঃআণবিকবলের অস্তিত্বের জন্যই প্রকৃত গ্যাসের আচরণ আদর্শ গ্যাসের চেয়ে আলাদা এবং এই কারণেই কোন দ্রাব কোন দ্রাবকে দ্রবীভূত হয়। এই আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বলগুলি কুলম্বীয় প্রকৃতির হলেও এদের মান এবং সংশ্লিষ্ট সংক্রিয়া শক্তির (Interaction energy) মান অত্যন্ত কম। তাই এদের সাধারণভাবে দুর্বল রাসায়নিক বন্ধনী বলে।

দুর্বল রাসায়নিক বন্ধনী সমূহকে প্রধানত তিনটি শ্রেণীতে ভাগ করা যায়।

(i) আয়নের সঙ্গে অণুর বন্ধনী। এটি দুই প্রকারের—

(a) আয়ন-দ্বিধ্রুব বন্ধনী (ion-dipole bond)

(b) আয়ন-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী (ion-induced dipole bond)

(ii) ধ্রুবীয় অণুর সঙ্গে ধ্রুবীয় অণুর বন্ধনী। ইহাও দুই প্রকারের—

(a) দ্বিধ্রুব-দ্বিধ্রুব বন্ধনী (dipole-dipole bond)

(b) দ্বিধ্রুব-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী (dipole-induced dipole bond)

(iii) অধ্রুবীয় অণুর সঙ্গে অধ্রুবীয় অণুর বন্ধনী।

(ঘ) আহিত দ্বিধ্রুব-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী (induced dipole-induced dipole bond)

আমরা জানি যে বিপরীত তড়িতাধান যুক্ত বস্তু একে অপরকে আকর্ষণ করে। আবার একটি তড়িতাধান যুক্ত বস্তু অপর একটি নিস্তড়িত বস্তুকে তড়িতাহিত করতে পারে। যার ফলে একটি আপাত নিস্তড়িত বস্তু একটি তড়িতগ্রস্ত বস্তু দ্বারা আকর্ষিত হতে পারে। এই ধারনার ভিত্তিতে উপরে উল্লেখিত সকলপ্রকার দুর্বল বন্ধনীর ব্যাখ্যা করা যায়। এই সকলপ্রকার বন্ধনীর উৎস হচ্ছে স্থিরতাড়িতিক আকর্ষণ।

আয়ন-দ্বিধ্রুব বন্ধনী—একটি আয়ন সহজেই কোন একটি ধ্রুবীয় অণুর আয়নটির আধানের বিপরীত আধানযুক্ত মেরুকে আকর্ষণ করে। এই ধরনের আকর্ষণ বলের জন্যই জলীয় দ্রবণে প্রোটন জলের অণুর সাথে হাইড্রোনিয়াম আয়ন (H_3O^+) গঠন করে। আয়নিক যৌগের ধ্রুবীয় সমযোজী দ্রাবকে (যেমন জলে খাদ্যলবনের দ্রবণ) দ্রবীভূত হওয়ার কারণ ও আয়ন-দ্বিধ্রুব বন্ধনী।

আয়ন-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী—কোন বড় মাপের অণুর বহির্কক্ষের ইলেকট্রন সমূহের উপর ধনাত্মক আধানযুক্ত কেন্দ্রীনগুলির আকর্ষণ বল কিছুটা শিথিল হয়। সুতরাং অণুর ইলেকট্রনপুঞ্জ সহজেই কোন আয়ণের উপস্থিতিতে মেরুকৃত হয়। ইলেকট্রন পুঞ্জের এই মেরুকরণের ফলে অণুটি কিছুটা ধ্রুবীয়তা অর্জন করে। অণুটির এই আহিত দ্বিধ্রুবের সঙ্গে আয়নটির একটি আকর্ষণ বল স্থাপিত হয়। এটিই আয়ন-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনীর উৎস। জলীয় দ্রবণের KI এর সঙ্গে I_2 এর বিক্রিয়ায় KI_3 তৈরী হয়। I^- ও I_2 এর সংযোগে I_3 তৈরীর কারণ হচ্ছে আয়ন-দ্বিধ্রুব বন্ধনী।

আয়নের সঙ্গে কোন অণুর এই দুপ্রকার বন্ধনীর গড় সংক্রিয়া শক্তি $\langle V \rangle \propto \frac{1}{r^2}$ যেখানে r আয়ন ও অণুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব।

দ্বিধ্রুব-দ্বিধ্রুব বন্ধনী—একটি ধ্রুবীয় অণুর কোন একটি মেরুর দ্বারা অন্য একটি ধ্রুবীয় অণুর বিপরীত মেরুকে আকর্ষণ করতে পারে। এর ফলে একাধিক ধ্রুবীয় অণু পরস্পরের সঙ্গে সংযুক্ত অবস্থায় থাকতে পারে। HCN গ্যাসে HCN অণুগুলির মধ্যে এই ধরনের বল ক্রিয়াশীল।

দ্বিধ্রুব-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী—আয়নের মতো একটি ধ্রুবীয় অণু ও একটি অধ্রুবীয় অণুকে ইলেকট্রন পুঞ্জের মেরুকরণের মাধ্যমে অণুটির মধ্যে ধ্রুবীয়তা সৃষ্টি করতে পারে। এর ফলে একে অপরকে আকর্ষণ করে।

আহিত দ্বিধ্রুব-আহিত দ্বিধ্রুব বন্ধনী—কোন পরমাণু বা অধ্রুবীয় অণুর কোন স্থায়ী ধ্রুবীয়তা তথা ধ্রুবীয় ভ্রামক থাকে না। কিন্তু এইরকম পরমাণু বা অণুর মধ্যেও এক প্রকার আকর্ষণ বল ক্রিয়া করে। এই আকর্ষণ বলের উৎস পরমাণুর ও অণুর মধ্যের উচ্চাবচনশীল (fluctuating ; fluctuation ≡ উচ্চাবচন) দ্বিধ্রুবীয়তা ধরে নেওয়া যাক যে একটি H পরমাণুতে ইলেকট্রনটি কেন্দ্রকের চতুর্দিকে ঘুরছে। সুতরাং কোন একটি বিশেষ ক্ষণে কেন্দ্রকের সাপেক্ষে ইলেকট্রনটির একটি বিশেষ অবস্থানের জন্য পরমাণুটির ভিতরে ধনাত্মক ও ঋনাত্মক তড়িতাধান দুটি একটি নির্দিষ্ট দূরত্বের ব্যবধানে রয়েছে। এর ফলে পরমাণুটিতে একটি ক্ষণিক (Instantaneous)

ধ্রুবীয় ভ্রামকের সৃষ্টি হবে। এই ধ্রুবীয় ভ্রামকটি ইলেকট্রনটির স্থান পরিবর্তনের সাথে সাথে পরিবর্তিত হবে। অর্থাৎ পরমাণুটিতে উচ্চাবচনশীল ধ্রুবীয় ভ্রামক উৎপন্ন হবে। কোন অধ্রুবীয় অণুর দ্বিধ্রুবীয়তা আহিত করবে এবং নিজেও অন্যটির দ্বারা আহিত হবে। এর ফলে একে অপরকে আকর্ষণ করবে। এই আকর্ষণ বলকে আবিষ্কর্তা বিজ্ঞানী লন্ডনের (F. London) নামে লন্ডন পরিক্ষেপন (dispersion) বল বলা হয় এবং আকর্ষণ জনিত সংক্রিয়া শক্তিকে পরিক্ষেপন শক্তি (dispersion energy) ববলা হয়। নিষ্ক্রিয় গ্যাস যেমন আর্গনের পরমাণুর মধ্যে এই বল ক্রিয়াশীল। কম উষ্ণতায় আর্গনের তরলীভবন এবং কেলাসগঠনের কারণ ও এই পরিক্ষেপন বল। এটি অবশ্যই খুব দুর্বল প্রকৃতির বল।

স্থায়ী বা আহিত দ্বিধ্রুবীয়-দ্বিধ্রুবীয় আকর্ষণের ক্ষেত্রে গড় সাংক্রিয়া শক্তি $<V>$, অণুদুটির মধ্যেকার দূরত্ব r এর –6 ঘাতের সঙ্গে পরিবর্তিত হয়।

$$<V> \propto \frac{1}{r^6}$$

এই সকল বলকে একসাথে ভ্যান ডার ওয়ালস বল (Van der Waals forces) বলা হয়। বাস্তব গ্যাসের ধর্ম আদর্শ গ্যাসের ধর্মের সঙ্গে আলাদা হওয়ার কারণ এই ভ্যান ডার ওয়ালস বলসমূহ।

একমাত্র উচ্চ ধ্রুবীয় ভ্রামক বিশিষ্ট ছোট অণু বাদ দিয়ে, অন্যান্য ক্ষেত্রে পরিক্ষেপন বল অন্যান্য আন্তঃ আণবিক বলের তুলনায় বেশী হয়। আবার পরিক্ষেপন বল পরস্পরকে আকর্ষণকারী অণুগুলির ধ্রুবনশীলতা (Polarizability) সহিত সমানুপাতী। উচ্চ আণবিক ওজনের অণুর আয়ন বেশী হওয়ায় ধ্রুবনশীলতাও বেশি হয়। অর্থাৎ আন্তঃআণবিক পরিক্ষেপন বলও বেশী শক্তিশালী হয়। এই কারনে সাধারণত যৌগের স্ফুটনাংক আণবিক ওজনের সাথে বৃদ্ধি পায়।

5.18 ধাতব বন্ধন (Metallic Bonding)

মৌলিক পদার্থগুলির মধ্যে গঠন এবং গুণাবলীর বিচারে ধাতুগুলি অনন্য। সমস্ত ধাতুই, দুই একটি বিরল ব্যতিক্রম ছাড়া উজ্জ্বল, কেলাসিত কঠিন পদার্থ, নমনীয়, প্রসার্থশীল তাপ ও তড়িতের সুপরিবাহী। বস্তুত বিদ্যুৎ পরিবাহীতা ধাতব গুণাবলীর মধ্যে অন্যতম প্রধান। অধাতুগুলির মধ্যে কার্বন (গ্রাফাইট) তড়িৎ পরিবহনে সক্ষম কিন্তু একে অধাতুর পক্ষে একটি ব্যতিক্রমী উদাহরণ হিসাবে ভাবা যেতে পারে। আবার জার্মেনিয়াম, সিলিকণ ইত্যাদি মৌলগুলি অর্ধপরিবাহী পরিস্থিতির উপর নির্ভর করে এগুলি কখনও সহজে অথবা কোন কোন ক্ষেত্রে কঠিন বাধা অতিক্রম করে বিদ্যুৎ পরিবহন করে।

গঠনগত বিচারে ধাতুর বন্ধন বিশেষভাবে উল্লেখের দাবী করে। এই অংশে আমরা আদর্শ ধাতুগুলির ক্ষেত্রে

বন্ধন কেমন হয়ে থাকে তা আলোচনা করব। এই আলোচনার দুটি প্রধান অংশ প্রথমত ধাতুর কেলাসের মধ্যে অবস্থানকারী ধাতুর পরমাণুগুলির মধ্যে ইলেকট্রন বিন্যাস ; দ্বিতীয়ত ধাতব কেলাসে ধাতুর পরমাণুর সুনির্দিষ্ট সজ্জা। ধর্মের বিচারে ধাতুর নমনীয়তা তথা প্রসার্যশীলতা কেলাসগঠনের ওপর এবং তড়িৎ ও তাপের পরিবাহীতা ইলেকট্রন বিন্যাসের ওপর নির্ভর করে। এই পর্যায়ে আমরা বিশেষ করে শেষোক্ত ধর্মের ব্যাখ্যা করার চেষ্টা করব।

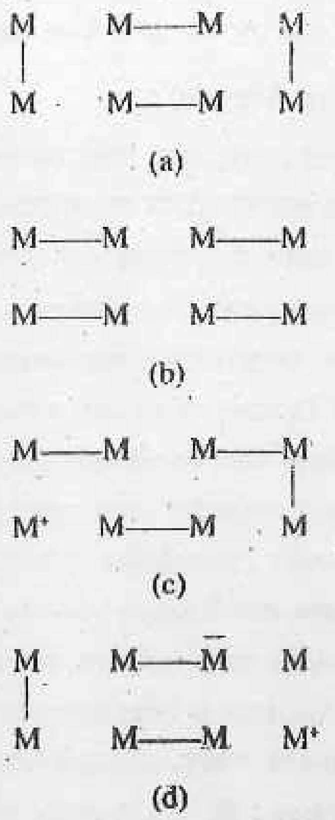
5.18.1 ধাতু পরমাণুর বন্ধন তত্ত্ব (Bonding in Metals)

যেহেতু ধাতু সমূহ তড়িতের সুপরিবাহী সুতরাং ধরে নেওয়া যেতে পারে যে ধাতব কেলাসের মধ্যে ইলেকট্রন সহজেই এক অংশ থেকে অন্য অংশে সঞ্চালিত হতে পারে। কোন পরমাণু থেকে ইলেকট্রন পুরোপুরি মুক্ত না হলে ইলেকট্রন অবশ্যই কোন একটি কক্ষকের অন্তর্গত হবে। সুতরাং ভাবা যেতেই পারে, ধাতুগুলির মধ্যে কতগুলি বিশেষ কক্ষকে এ জাতীয় ইলেকট্রন অবস্থান করে। বিংশ শতাব্দির একেবারে শুরুতে ড্রুড (Drude) প্রস্তাব করেন যে ধাতুব কেলাসে ইলেকট্রনগুলি সম্পূর্ণ স্বাধীন ও মুক্ত অবস্থায় বিচরণ করে। তিনি এই অবস্থাটিকে আদর্শ গ্যাসের সঙ্গে তুলনা করে বলেন যে আদর্শ গ্যাসের মধ্যে যেভাবে গ্যাসের অনুগুলি অবস্থিত তেমনই ধাতুর কেলাসের মধ্যে ইলেকট্রনগুলি বিচরণ করে। পরবর্তী কালে 1923 খ্রীষ্টাব্দের লোরেঞ্জ (Lorentz) এই ধারণাটিকে আরো পরিশীলিত করে বলেন যে গঠনের দিক থেকে দেখতে গেলে আদর্শ গ্যাসের মত মুক্ত ইলেকট্রনের সমুদ্রে ধাতু পরমাণুর আয়নগুলি (ইলেকট্রনমুক্ত ধণাত্মক বর্তুলাকার ধাতব নিউক্লিয়াসগুলি) প্রোথিত। কেলাসের মধ্যে নিউক্লিয়াসগুলির অন্তবর্তী অঞ্চলে ইলেকট্রন সমূহ বিচরণ করতে পারে। ধাতব ধর্মের ব্যাখ্যার ক্ষেত্রে এই রূপকল্পটি ইলেকট্রনের স্বাধীন সঞ্চালনের তথা ধাতুর সংশক্তি ধর্মের মোটামুটি কারণ নির্ণয়ে সক্ষম। ধাতব কেলাসে ধণাত্মক নিউক্লিয়াস ও ইলেকট্রনের পারস্পরিক আসক্তি যে যে সংশক্তিধর্মের মূল কারণ তা সহজেই বোঝা যায়। এমন কি যোজক ইলেকট্রনে সংখ্যা বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে ধাতুর সংশক্তির প্রাবল্য বৃদ্ধির কারণও সঠিকভাবে ব্যাখ্যাত হয়। বস্তুত এই রূপকল্পের প্রধান সীমাবদ্ধতা হল পরিমানগত বিচারে এর গাণিতিক অসম্পূর্ণতা। অর্থাৎ সংশক্তি তথা পরিবাহীতার পরিমাণ নির্ধারণের প্রয়োজনীয় গণনা প্রায়শই বাস্তব অবস্থা থেকে বহুদূরে বিচ্যুত।

5.18.2 যোজ্যতা বন্ধন তত্ত্বের প্রয়োগ

ধরা যাক কোন একটি ধাতব কেলাসে ধাতুগুলি অতি সাধারণ দেহকেন্দ্রিক ঘণকাকার (body centred cubic) সজ্জায় বিন্যস্ত থাকে। এক্ষেত্রে একক একটি ধাতু পরমাণুর সবর্গাঙ্ক—8 এবং পরবর্তী পর্যায়ে এটি আরো 6টি পরমাণু দ্বারা পরিবেষ্টিত। ধাতুটি প্রথম শ্রেণীভুক্ত কোন ক্ষারধাতু হলে এর যোজক কক্ষে একটি মাত্র ইলেকট্রন বর্তমান। সুতরাং এই একমাত্র ইলেকট্রনটি ধাতু পরমাণু তার চার পাশের অপরাপর পরমাণুর সাথে ভাগ করে নেয়। যদি পরমাণুটি তার কাছের কোন একটি অন্য পরমাণুর সাথে বন্ধন রচনা করে তবে ঐ পরমাণু দ্বয়ের মধ্যে একটি স্বাভাবিক দুই ইলেকট্রন সমযোজী বন্ধন গঠিত হয়। বলা বাহুল্য যে এমন সমযোজী বন্ধন ঐ কেন্দ্রীয় পরমাণুর সহযোজন বৃত্তে অবস্থিত যেকোন একটি পরমাণুই গঠন করতে সক্ষম। আলোচ্য

কেলাস গঠনে এমন সম্ভাবনার সংখ্যা = 8। যেহেতু সবর্গাঙ্ক = 8। এরকম কয়েকটি সম্ভাবনা চিত্র 5.38-এ দেখানো হল।



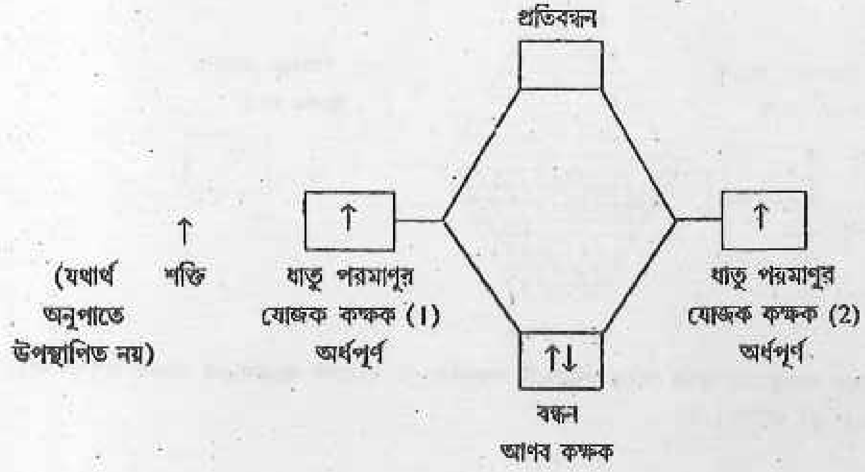
চিত্র–5.38 : M ধাতুর বিভিন্ন পরমাণুর মধ্যে বন্ধনী গঠনের কয়েকটি সম্ভাব্য অবস্থার চিত্ররূপ

ধাতুটির যোজক কক্ষের ইলেকট্রনটি অপসারিত করে অন্য একটি পরমাণুতে যুক্ত করলে M^+ ও M আয়ন উৎপন্ন হয়। এক্ষেত্রে M^- আয়নটি অন্তত দুটি নিকটতম পরমাণুর সাথে সমযোজী বন্ধনে আবদ্ধ থাকে। সম্ভাব্য অবস্থাটি চিত্র 5.38(c) এবং 5.38(d)-তে দেখানো হয়। পাউলিং এর প্রস্তাব অনুসারে ধাতু কেলাসের মধ্যে বাস্তব অবস্থাটি চিত্র 5.38(a), (b), (c), (d)-এর সংমিশ্রণ। বলাবাহুল্য এই সংমিশ্রণের মাত্রা যত বাড়বে ধাতুর গঠনও তত সুস্থিত অর্থাৎ ধাতব বন্ধন তত দৃঢ় এবং শক্তি তত নিম্ন হবে। স্পষ্টতই বন্ধনের সংখ্যা যত বাড়ে ততই কেলাসটি বেশী সুস্থিত হতে থাকে। অর্থাৎ দ্বিপরমাণুক M_2 এর থেকে বহু পরমাণুক Mn অধিকতর সুস্থিত। যোজক কক্ষের ইলেকট্রন সংখ্যা বাড়ার সাথে সাথেও সুস্থিতি বাড়ে। সুতরাং প্রথম শ্রেণীভুক্ত ক্ষার ধাতুগুলির তুলনায় দ্বিতীয় শ্রেণীভুক্ত ক্ষার মৃত্তিকা ধাতু সমূহ পর্যায়ক্রমে অধিকতর এবং তৃতীয় শ্রেণীভুক্ত

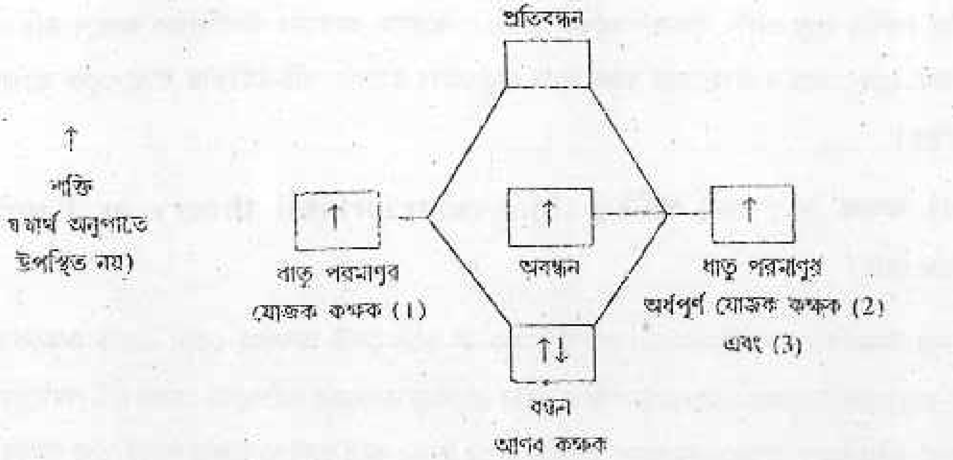
ধাতুগুলিও দ্বিতীয় শ্রেণীর ধাতু গুলির তুলনায় অধিক সুস্থিত। কেলাসে আয়নের উপস্থিতির কারণে তড়িৎ-পরিবাহীতা ব্যাখ্যাত হলেও ধাতব ঔজ্জ্বল্যের কারণ তথা ধাতুগুলির তাপের পরিবাহীতার যথোপযুক্ত ব্যাখ্যা এই তত্ত্বে অনুপস্থিত।

5.18.3 আণব কক্ষক তত্ত্ব তথা পটিতত্ত্ব (Molecular orbital thoery or Band thoery of metals)

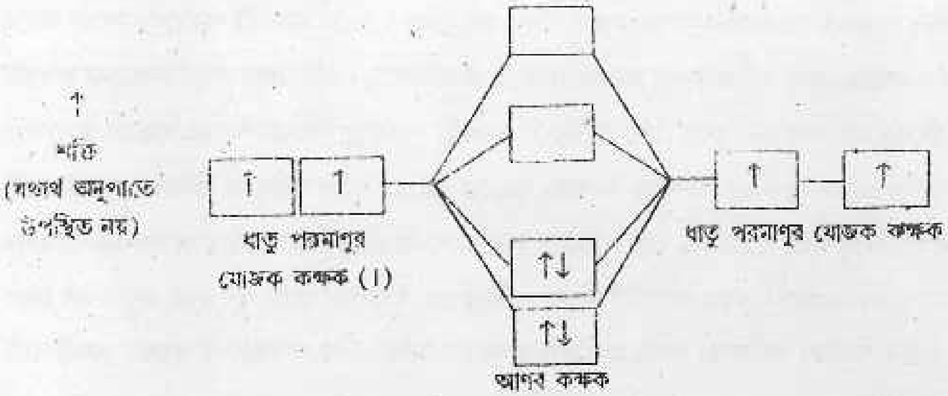
কোন পরমাণুর আকর্ষণ থেকে ইলেকট্রন সম্পূর্ণ বিমুক্ত না হলে সেটি অবশ্যই কোন একটি কক্ষকের অন্তর্ভুক্ত। সুতরাং ধাতুর বন্ধনে ব্যবহৃত ইলেকট্রনগুলিও কোন না কোন কক্ষকের অংশভুক্ত। যখন দুটি পরমাণুর সমন্বয়ে অণ্য কক্ষক গঠিত হয় সেক্ষেত্রে সমন্বয়ের প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে আণব কক্ষের সংখ্যা তথা প্রকৃতি নির্ধারিত হয়, যেমন ক্ষার ধাতুর ক্ষেত্রে যোজক স্তরের 'S' কক্ষকটি প্রধানতম। দুটি যোজক 'S' কক্ষকের সমন্বয়ে একটি বন্ধন ও একটি প্রতিবন্ধন আণব কক্ষক গঠিত হয় (চিত্র 5.3a)। সমন্বয়ী পরমাণুর সংখ্যা আরো একটি বৃদ্ধি পেলে সমন্বয়ের ফলে গঠিত আণব কক্ষের সংখ্যাও একটি বাড়ে। এটি বন্ধন ও প্রতিবন্ধনের মধ্যবর্তী অংশে অবন্ধন কক্ষকের মত অবস্থান করে (চিত্র 5.39b)। সমন্বয়ী পরমাণুর সংখ্যা আরো বাড়লে স্বভাবতই সমন্বয়ের ফলে উৎপন্ন আনব কক্ষকও উপযুক্ত সংখ্যায় বাড়তে থাকে। ফলে বন্ধন ও প্রতিবন্ধনের মধ্যবর্তী অংশে কক্ষকের সংখ্যা সমানুপাতী হারে বৃদ্ধি পায়। (চিত্র 5.30C)। সমন্বয়ের চূড়ান্ত অবস্থায় বা সংখ্যক পরমাণুর সমন্বয়ে বন্ধন ও অবন্ধনের মধ্যবর্তী সমগ্র অংশটিই বিভিন্ন শক্তিস্তরের কক্ষকের দ্বারা পূর্ণ হয়ে ওঠে। এর ফলে সর্বনিম্ন শক্তিস্তর থেকে সর্বোচ্চ শক্তিস্তর পর্যন্ত কতগুলি কক্ষকের অতি ঘনিষ্ঠ অবস্থানের কারণে একটি পটি গঠিত হয় (চিত্র 5.39d)।



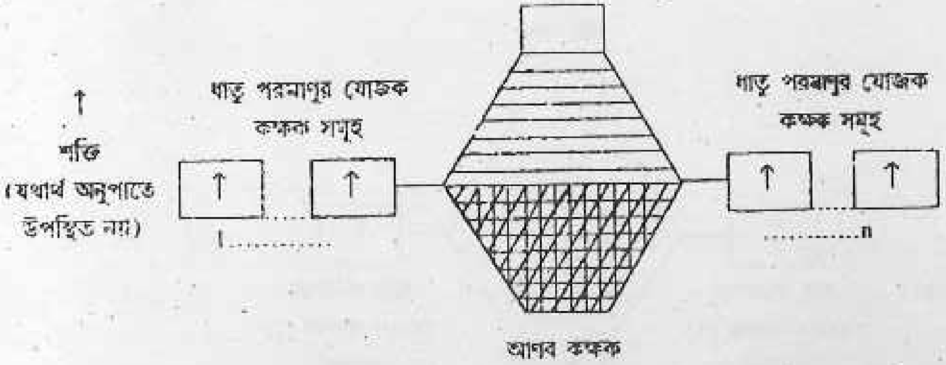
(a)



(b)



(c)

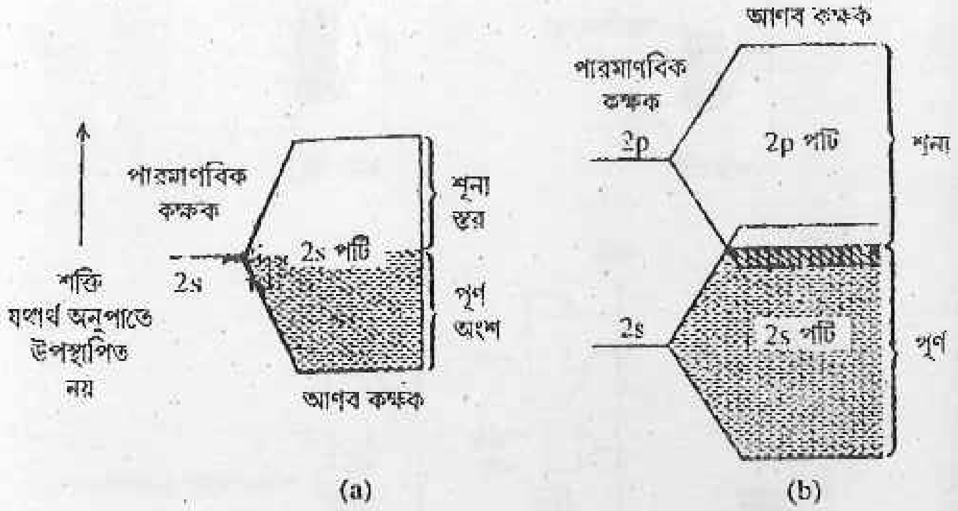


যদি নিকটবর্তী আনব কক্ষকের অবস্থানের ফলে গঠিত বন্ধনপটি লক্ষ্যণীয় যে, যোজক পারমাণবিক কক্ষক অর্ধপূর্ণ বলে আনবকক্ষক পটির অর্ধাংশ মাত্র পূর্ণ হয়েছে।

(d)

চিত্র-5.39 ধাতু পরমাণুর যোজক কক্ষকের [illegible] পর্যায়

ক্ষার ধাতুর ক্ষেত্রে যেহেতু অংশগ্রহণকারী পরমাণুগুলির যোজক কক্ষে ইলেকট্রন বিন্যাস ns। অর্থাৎ ns কক্ষকটি অর্ধ পূর্ণ থাকে সুতরাং সমন্বিত পটির অর্ধেক অংশই মাত্র পূরণ হয় (চিত্র 5.40a) বস্তুত পটিতে অবস্থানকারী ইলেকট্রনগুলিকে উপযুক্তভাবে উত্তেজিত করলে অর্থাৎ তড়িৎ ক্ষেত্রের প্রভাবে তারা পটির অবশিষ্ট অঞ্চলগুলিতে উন্নিত হতে পারে। যেহেতু স্থানগত বিচারে এই পটিটি ধাতব কেলাসের বিস্তীর্ণ অঞ্চল জুড়ে থাকে সুতরাং ইলেকট্রনগুলি কেলাসের মধ্যে একস্থান থেকে অন্যস্থানে সহজেই সঞ্চালিত হয়। ক্ষার মৃত্তিকা ধাতু বা অন্য ধাতুর ক্ষেত্রে যোজক ns কক্ষকগুলির সমন্বয়ে ns যোজক পটি এবং np বা অপরাপর পটি গঠিত হয়। ধাতুর ক্ষেত্রে প্রায়শই ns এবং np পটির প্রান্তিক অংশগুলি একে অপরকে অতিক্রম করে যায় (চিত্র 5.41b)। ফলে সামগ্রিকভাবে পটিটি নিম্নতম কক্ষক থেকে উচ্চতম অংশ পর্যন্ত প্রায় নিরবিচ্ছিন্নভাবে অবস্থান করে। যেহেতু ধাতুর ক্ষেত্রে যোজক কক্ষক সর্বদাই আংশিকপূর্ণ। সুতরাং এই বিস্তীর্ণ পটির অংশমাত্র ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ হয় এবং অবশিষ্ট অংশে ইলেকট্রন উপযুক্ত শক্তির মাধ্যমে সঞ্চালিত হতে পারে।

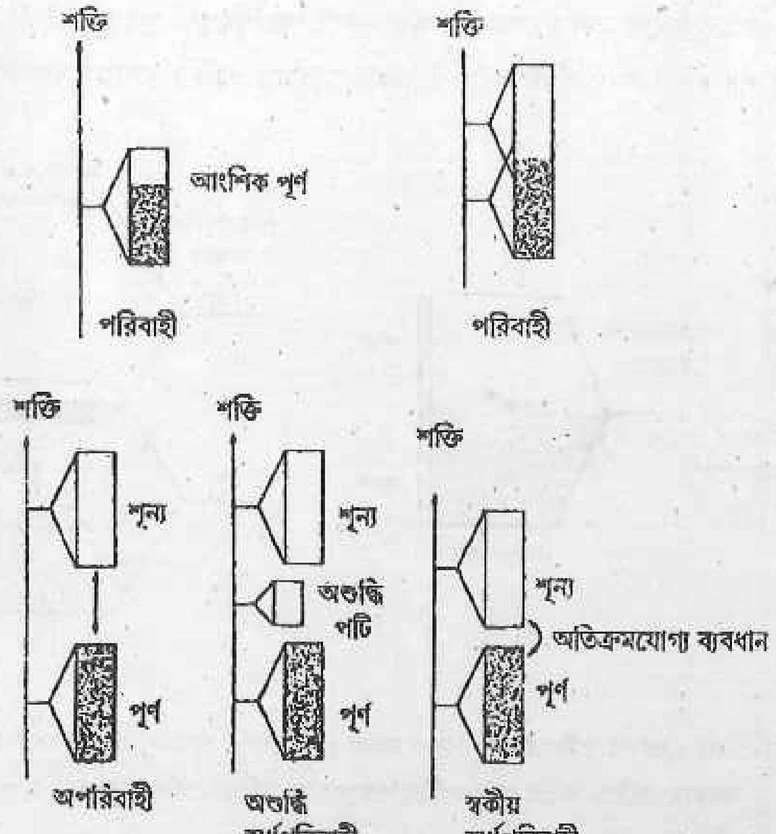


চিত্র–5.40 : ধাতব পরিবাহীতার বিবিধ কারণ (a) অর্ধপূর্ণ পারমাণবিক যোজক কক্ষকের সমন্বয়ে গঠিত বিভিন্ন আণবপটির পরস্পরকে অতিক্রমণের ফলে গঠিত পটি

পটি তত্ত্ব অনুসারে যেহেতু যোজ্যতা কক্ষকসমূহ ধাতু কেলাসের মধ্যে বিস্তৃত তা ধাতুর প্রবল সংশক্তি এবং বিপুল সংখ্যক ইলেকট্রন বন্ধনে ব্যবহৃত হবার কারণে তা প্রসার্যশীলতা কে উপযুক্তভাবে ব্যাখ্যা করে। আবার ধাতুর ওপর আলো পড়লে আলোক শক্তিবাহী ফোটনের শোষণে ইলেকট্রনগুলি উত্তেজিত হয়ে যোজ্যতা কক্ষের অনধিকৃত অংশে উন্নিত হয়—পরবর্তী পর্যায়ে ঐ ইলেকট্রনগুলি শক্তি বিকিরণের মাধ্যমে নিরুত্তেজিত হলে আগের অবস্থায় ফেরত আসে। এজন্য ধাতুর ওপর আলো পড়লে তা ধাতব ঔজ্জ্বল্য প্রকাশ করে।

5.18.4 পরিবাহী, অপরিবাহী ও অর্ধ পরিবাহী

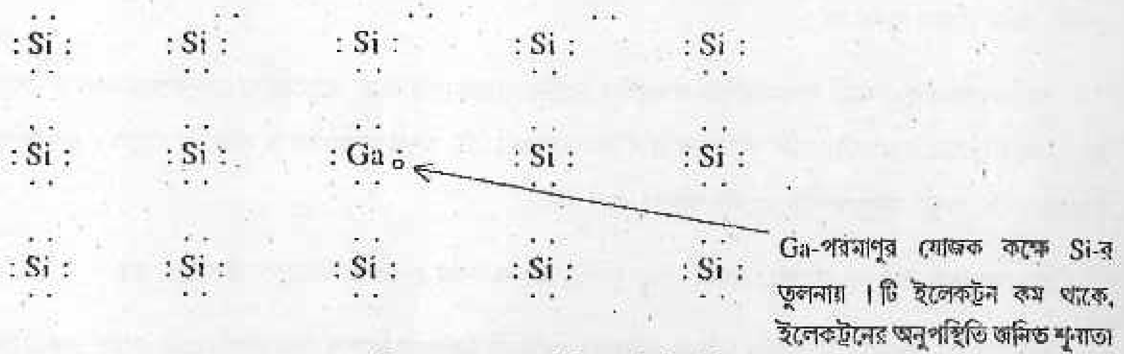
তড়িৎ পরিবাহী পদার্থের ক্ষেত্রে যোজক কক্ষের পূর্ণ অংশ তথা যোজক পটি এবং অপূর্ণ অঞ্চল-এর (পরিবাহী পটি) মধ্যেশক্তির পার্থক্য থাকে না। অর্থাৎ অপরিবাহী পটির নীচের অঞ্চল এবং যোজকপটির ওপরের অঞ্চলটি পরস্পরকে অতিক্রম করে যায়। অংশগ্রহণকারী পরমাণুগুলির চরিত্রের ওপর যোজক ও পরিবাহী পটির পারস্পরিক অবস্থান নির্ভর করে। (চিত্র 5.41) যোজক পটির উর্ধ্বাংশ থেকে পরিবাহী পটির নিম্নাংশ যদি যথেষ্ট দূরে আহ্বান করে এবং সমগ্র অঞ্চলটি তাপীয় উদ্দিপনের সীমার বাইরে হয় তবে কোন অবস্থাতেই যোজক পটির ইলেকট্রনগুলি পরিবাহী পটিতে উন্নিত করা সম্ভব হয় না। এগুলি অপরিবাহী পদার্থ। আবার



চিত্র–5.41 : অপরিবাহী ও বিভিন্ন ধরণের অর্ধপরিবাহীর আনব কক্ষকপটির অবস্থান

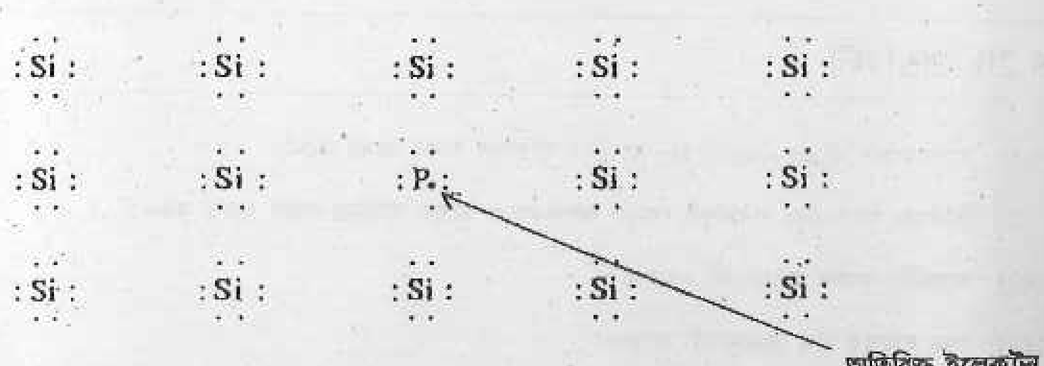
যোজক পটি এবং পরিবাহী পটির মধ্যে শক্তির পার্থক্য তাপীয় উদ্দিপনের সীমার মধ্যে হলে সাধারণ অবস্থায় পদার্থটি তড়িতের কুপরিবাহী হলেও উষ্ণতা বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে পরিবাহী পটিতে ইলেকট্রন উন্নিত হয় বলে

পদার্থটির পরিবাহীতা বৃদ্ধি পায়, এগুলি স্বকীয় অর্ধ পরিবাহী সিলিকণ, জার্মেরিয়াম ইত্যাদি স্বকীয় অর্ধ পরিবাহীর উদাহরণ। যোজকপটি এবং পরিবাহী পটির মধ্যবর্তী অঞ্চলে যদি কৃত্রিমভাবে কোন একটি পটি সংযোজন করা সম্ভব হয়। সেক্ষেত্রে মধ্যবর্তী পটিটি যোজকপটি এবং পরিবাহী পটির মধ্যে সংযোগকারী সেতু হিসাবে বিবেচ্য। এজন্য সংশ্লিষ্ট পদার্থটিতে উপযুক্ত অশুদ্ধি পরমাণু সংযোগ করে এ জাতীয় কৃত্রিম বা অশুদ্ধ অর্ধ পরিবাহী পদার্থ প্রস্তুত করা যায়। মূল পদার্থের তুলনায় অশুদ্ধি পদার্থে যোজক ইলেকট্রনের সংখ্যা কম থাকলে পরিবাহী পদার্থের মধ্যে ইলেকট্রনের অংশে শূন্যস্থান বা গহ্বর লক্ষ করা যায়। এক্ষেত্রে অর্ধ পরিবাহীটিকে p জাতীয় অর্ধপরিবাহী (p প্রোটন, ধনাত্মক আধান) সুতরাং ইলেকট্রন বঞ্চিত গহ্বরের সঙ্গে তুলনীয়। (চিত্র 5.42) আবার



চিত্র–5.42 : p-জাতীয় অর্ধপরিবাহী

সিলিকন কেলাসের মধ্যে গ্যালিয়াম অশুদ্ধি যুক্ত করলে এজাতীয় অর্ধ পরিবাহী সৃষ্টি হয়। আবার অশুদ্ধি পরমাণুটিকে যোজক ইলেকট্রনের সংখ্যা বেশী থাকলে তা ইলেকট্রন পরিবহনের মাধ্যমে অর্ধপরিবাহীতা প্রদর্শন করে। সিলিকনের মধ্যে ফসফরাস অশুদ্ধি যোগ করলে এ জাতীয় অর্ধপরিবাহী সৃষ্টি হয়। একে n-জাতীয় অর্ধ পরিবাহী (n : নেগেট্রন, ঋণ কনা বাড়তি ইলেকট্রন) বলে। (চিত্র 5.43)



চিত্র–5.43 : n-জাতীয় অর্ধপরিবাহী: p অশুদ্ধিযুক্ত Si

5.19 সারাংশ

এই এককে আমরা প্রধানত যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্ব ও আণব কক্ষক তত্ত্ব আলোচনা করেছি। যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বানুযায়ী অণুর ভিতর সংযোগী পরমাণুগুলির সত্ত্বা কিয়দংশে বর্তমান থাকে এবং বন্ধনী গঠিত হয়। ঐ পরমাণুগুলির যোজ্যতা ইলেকট্রনগুলির যুগ্মনের মাধ্যমে কোন অণুর সুস্থিতি এবং ধ্রুবীয় চরিত্র ব্যাখ্যা করার জন্য সংস্পন্দন তত্ত্বের অবতারণা করা হয়। বিশুদ্ধ পারমাণবিক ক্ষেত্রে অভিলেপনের দ্বারা বন্ধনীর দিকনির্দেশী ধর্ম এবং অণুর আকৃতি যথাযথ বর্ণনা সম্ভব না হওয়ায় সংকরায়িত পারমানবিকক্ষেত্রের অভিলেপনের মাধ্যমে বন্ধনী গঠন কল্পনা করা হয়।

আণবকক্ষ তত্ত্বানুযায়ী পারমাণবিক কক্ষকের রৈখিক সংযোগের ফলে বহুকেন্দ্রীয় আণবকক্ষকসমূহ উৎপন্ন হয়। অণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি আউফবাউ নীতি অনুযায়ী এই আণবকক্ষকগুলিতে সজ্জিত থাকে। এই তত্ত্বের সাহায্যে O_2 অণুর অনুচুম্বকীয় ধর্মের ব্যাখ্যা করা যায়।

আণবকক্ষক তত্ত্ব ও যোজ্যতাবন্ধনী তত্ত্ব দুটিই অনেক ক্ষেত্রে একই সিদ্ধান্তে উপনীত হয়।

হাইড্রোজেন বন্ধনীর উপস্থিতি বিভিন্ন পদার্থের ধর্মাবলী নির্ধারণে বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। এটি বস্তুত একটি স্থির তাড়িতিক বন্ধনী।

কোন পদার্থের অণুগুলি পরস্পরের সাথে দুর্বল আকর্ষণ বল দ্বারা যুক্ত থাকে। এই বলের প্রকৃতির উপর পদার্থটির সামগ্রিক ধর্ম অনেকাংশে নির্ভর করে। সমযোজী বা তড়িৎযোজী বন্ধনীর তুলনায় এ আকর্ষণ বলসমূহ যথেষ্ট দুর্বল।

5.20 প্রশ্নাবলী

(1) আণবকক্ষক চিত্রের সাহায্যে H_2 আয়নের সুস্থিতির কারণ ব্যাখ্যা করুন।

(2) হিলিয়াম গ্যাস এবং পরমাণুক কেন? আণবকক্ষক তত্ত্বের সাহায্যে কারণ ব্যাখ্যা করুন।

(3) অবন্ধনীয় কক্ষক বলতে কী বোঝায়?

(4) বন্ধন দূরত্বের ঊর্দ্ধ ক্রমানুযায়ী সাজান।

O_2, O_2^{-2}, O_2^{-}

(5) CO অণুটি কম তড়িৎ ঋণাত্মক C পরমাণুর মাধ্যমে অসমযোজী বন্ধনী গঠন করে। কারণ সহ ব্যাখ্যা করুন।

(6) PCl_3F_2 অণুর আকৃতি যোজ্যতা বন্ধনী তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করুন।

(7) বেঞ্জিন অণুর নিহিত গঠনগুলি আঁকুন এবং এর সাহায্যে বেঞ্জিন অণুর সুস্থিতি ব্যাখ্যা করুন।

(8) বরফ জলে ভাসার কারণ উপযুক্ত বন্ধন তত্ত্বের আলোকে ব্যাখ্যা করুন।

(9) বেঞ্জয়িক অ্যাসিড জলীয় দ্রবণে একলক (monomer) হিসাবে থাকে, কিন্তু বেঞ্জিন দ্রবণে দ্বিলক (dimer) হিসাবে থাকে—কারন সহ ব্যাখ্যা করুন।

(10) কোন ধরণের আন্তঃআণবিক বলের প্রভাবে আর্গনকে তরলে রূপান্তরিত করা যায়?

5.21 উত্তরমালা

(1) 5.9.4 অংশে দ্রষ্টব্য

(2) 5.9.5 অংশে দ্রষ্টব্য

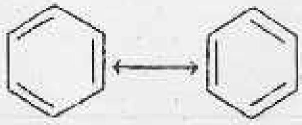
(3) 5.15 অংশে দেখুন

(4) $O_2 < O_2^- < O_2^{2-}$

(5) 5.15.1 অংশে দ্রষ্টব্য

(6) 5.7.4 অংশে বেন্টের সূত্র দ্রষ্টব্য

(7) নিহিত গঠন :



5.7.5 অংশে আলোচনা দেখুন।

(8) 5.17 অংশে দ্রষ্টব্য

(9) 5.17 অংশে দ্রষ্টব্য

(10) 5.18 অংশে (আহিত দ্বিধ্রুব-আহিত দ্বিধ্রুব বল)

NOTE

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। নুতন 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. 150.00

(NSOU-র ছাত্রছাত্রীদের কাছে বিক্রয়ের জন্য নয়)

Published by Netaji Subhas Open University, DD-26, Sector-I, Salt Lake, Kolkata - 700064 & Printed at Gita Printers, 51A, Jhamapukur Lane, Kolkata-700 009.