

## 7.8 উত্তরমালা

### অনুশীলনী 1

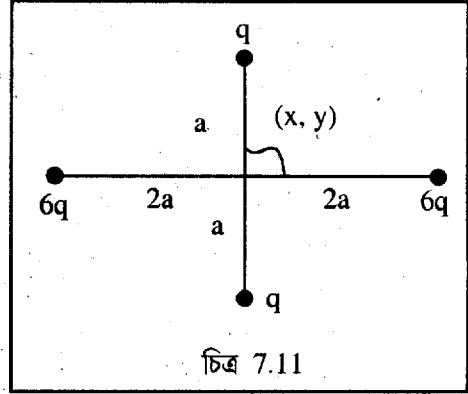
(i) সমীকরণগুলি প্রতিষ্ঠিত করতে আমরা স্থৈতিক শক্তির রাশিমালা 'q' এর তৃতীয় ও তদূর্ধ্ব যাত, অর্থাৎ  $q_1^3, q_1^2q_2, q_1q_2q_3$  প্রভৃতি রাশিগুলিকে উপেক্ষা করেছি। কেবলমাত্র অতি অল্পবিস্তারের কম্পনের ক্ষেত্রেই এটি করা যুক্তিযুক্ত।

(ii)  $w^2$  এর কোনও একটি মান যদি ঋণাত্মক হয় তবে ধরুন সেটি হল  $-w_k^2$ । সেক্ষেত্রে  $q_i$  (i) এর অন্তর্গত একটি রাশি হবে  $A_{ik}e^{i(\pm iw_k)t}$  বা  $A_{ik}e^{\pm w_k t}$  এই রাশিটি কোনও কম্পন নির্দেশ করে না বরং বস্তুর ক্রমবর্ধমান বা ক্রমহ্রাসমান সরণ নির্দেশ করে। সুতরাং  $w^2$  এর মান ভৌত কারণেই ঋণাত্মক হতে পারে না।

### অনুশীলনী 2

(i) 7.11 চিত্রে আধানগুলির অবস্থান দেখানো হয়েছে।

x ও y এর মান 'a' এর তুলনায় ক্ষুদ্র হলে (x, y) অবস্থানে তড়িৎ বিভবের মান  $\cup$  লেখা যায় :



চিত্র 7.11

$$4\pi\epsilon_0 \cup$$

$$= \frac{6q}{AP} + \frac{6q}{BP} + \frac{q}{CP} + \frac{q}{DP}$$

$$= 6q \left[ (2a+x)^2 + y^2 \right]^{-1/2} + 6q \left[ (2a-x)^2 + y^2 \right]^{-1/2}$$

$$+ q \left[ (a+y)^2 + x^2 \right]^{-1/2} + q \left[ (a-y)^2 + x^2 \right]^{-1/2}$$

$$= \frac{6q}{2a} \left[ \left( 1 + \frac{x}{2a} \right)^2 + \left( \frac{y}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} + \frac{6q}{2a} \left[ \left( 1 - \frac{x}{2a} \right)^2 + \left( \frac{y}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

$$+ \frac{q}{a} \left[ \left( 1 + \frac{y}{a} \right)^2 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^{-1/2} + \frac{q}{a} \left[ \left( 1 - \frac{y}{a} \right)^2 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{6q}{2a} \left[ 1 + \frac{x}{a} + \frac{x^2}{4a^2} + \frac{y^2}{4a^2} \right]^{-1/2} + \frac{6q}{2a} \left[ 1 - \frac{x}{a} + \frac{x^2}{4a^2} + \frac{y^2}{4a^2} \right]^{-1/2} \\
&\quad + \frac{q}{a} \left[ 1 + \frac{2y}{a} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{a^2} \right]^{-1/2} + \frac{q}{a} \left[ 1 - \frac{2y}{a} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{a^2} \right]^{-1/2} \\
&= \frac{q}{a} \left[ 1 - \frac{x}{2a} - \frac{x^2}{8a^2} - \frac{y^2}{8a^2} + \frac{3}{8} \frac{x^2}{a^2} \right] + \frac{q}{a} \left[ 1 + \frac{x}{2a} - \frac{x^2}{8a^2} - \frac{y^2}{8a^2} + \frac{3}{8} \frac{x^2}{a^2} \right] \\
&\quad + \frac{q}{a} \left[ 1 - \frac{y}{a} - \frac{y^2}{2a^2} - \frac{x^2}{2a^2} + \frac{3}{2} \frac{y^2}{a^2} \right] + \frac{q}{a} \left[ 1 + \frac{y}{a} - \frac{y^2}{2a^2} - \frac{x^2}{2a^2} + \frac{3}{2} \frac{y^2}{a^2} \right] \\
&= \frac{3q}{a} \left[ 2 - \frac{x^2}{4a^2} - \frac{y^2}{4a^2} + \frac{3}{4} \frac{x^2}{a^2} \right] + \frac{q}{a} \left[ 2 - \frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{a^2} + 3 \frac{y^2}{a^2} \right] \\
&= \frac{8q}{a} + \frac{q}{4a^3} [-3x^2 - 3y^2 + 9x^2 - 4y^2 - 4x^2 + 12y^2] \\
&= \frac{8q}{a} + \frac{q}{4a^3} (2x^2 + 5y^2)
\end{aligned}$$

$$\text{সুতরাং } U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^3} \left( 8a^2 + \frac{x^2}{2} + \frac{5}{4} y^2 \right)$$

(ii) মূলবিন্দুতে ( $x=0, y=0$ )  $\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial y} = 0$ , সুতরাং ঐ বিন্দুতে অবস্থিত আধানের উপর কোনও বল কাজ করে না। উপরন্তু ঐ বিন্দুতে তড়িৎ বিভবের মান সর্বনিম্ন কেননা  $x^2$  ও  $y^2$  রাশিগুলি সর্বত্রই ধনাত্মক। সুতরাং মূলবিন্দুতে আধানটি সুস্থিত সাম্যে থাকবে।

(iii)  $x$  ও  $y$  কে সাধারণীকৃত নির্দেশাঙ্ক হিসাবে ধরে নেওয়া যাক। তড়িৎ বিভব হিসাবে  $U$  এর পরিবর্তে

$$U' = U - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^3} \cdot 8a^2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^3} \left( \frac{x^2}{2} + \frac{5}{4} y^2 \right)$$

ব্যবহার করলে  $q$  আধানের স্খিতিক শক্তি

$$V = qU' = \frac{1}{2} \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a^3} (2x^2 + 5y^2)$$

$$\therefore \text{মোটরিক্স } V = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a^3} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix} \text{ ধরুন।}$$

$m$  ভরের বিন্দুবস্তুর গতিশক্তি  $\frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \frac{1}{2} m\dot{y}^2$

সুতরাং গতিশক্তির মেট্রিক্স  $T = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}$

এখন  $|T^{-1}V - w^2I| = 0$  সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\begin{vmatrix} \frac{2C}{m} - w^2 & 0 \\ 0 & \frac{5c}{m} - w^2 \end{vmatrix} = 0$$

বা  $w^2 = \frac{2C}{m}$  বা  $\frac{5}{6} m$ , অর্থাৎ  $\frac{2q^2}{8\pi\epsilon_0 a^3 m}$  বা  $\frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a^3 m}$

সুতরাং  $w_1^2 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a^3 m}$ ,  $w_2^2 = \frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a^3 m}$  হলে

স্বাভাবিক কম্পাঙ্কগুলি হল

$$\frac{w_1}{2\pi} \text{ এবং } \frac{w_2}{2\pi}$$

### অনুশীলনী 3

টান দেওয়া তারে সংলগ্ন বিন্দুভরগুলির মাঝেরটির ভর  $M$  এবং অন্য দুটির ভর  $m$  হলে  $T$  মেট্রিক্সটি হবে

$$T = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & m \end{pmatrix}$$

$$\therefore T^{-1}V - w^2I = \frac{F}{ml} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} - w^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= w_0^2 \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -k & 2k & -k \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} - w^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(এখানে  $M/m = k$  লেখা হয়েছে)

$$= \begin{pmatrix} 2w_0^2 & -w_0^2 & 0 \\ -kw_0^2 & 2kw_0^2 - w^2 & -kw_0^2 \\ 0 & -w_0^2 & 2w_0^2 - w^2 \end{pmatrix}$$

সুতরাং নির্ণেয় সমীকরণটি হল  $\begin{vmatrix} 2w_0^2 & -w_0^2 & 0 \\ -kw_0^2 & 2kw_0^2 - w^2 & -kw_0^2 \\ 0 & -w_0^2 & 2w_0^2 - w^2 \end{vmatrix} = 0$

সর্বশেষ প্রস্তাবলী

1. 7.2 অনুচ্ছেদে এ বিষয়ে আলোচনা করা হয়েছে।
2. 7.4.1 অনুচ্ছেদটি দেখুন।

প্রশ্নের দ্বিতীয় অংশের উত্তর দিতে লক্ষ্য করুন যে স্প্রিংটি অত্যন্ত দুর্বল হলে  $k$  অত্যন্ত ক্ষুদ্র হবে এবং  $w_1^2 \ll w_0^2$  হবে। এর ফলে  $w_2 \approx w_0$  এবং  $w_0' \approx w_0$  ধরা যাবে। আবার  $\sin$  (বা  $\cos$ )  $\frac{w_1^2}{2w_0} t$  রাশিটি সময়ের সঙ্গে অত্যন্ত ধীরে পরিবর্তিত হবে। মোটের উপর বলা যায় যে দোলক দুটিই প্রায়  $w_0$  কৌণিক কম্পাঙ্কে আন্দোলিত হবে এবং তাদের দোলনের বিস্তার অত্যন্ত ধীরগতিতে  $a$  এবং শূন্যের মধ্যে ওঠানামা করবে।

3. প্রশ্নের প্রথম অংশের উত্তর 7.4.2 অনুচ্ছেদে পাবেন।

দ্বিতীয় অংশের উত্তর : যদি  $M = m, L = 2l$  হয় তবে  $e = 1, w_1^2 = \frac{g}{L} = \frac{g}{2l} = \frac{1}{2} w_0^2$ ।

ধরুন,  $w_2^2 = 2w_0^2, w_1^2 = w_0^2$ । 7.31 সমীকরণটি এখন দাঁড়ায়

$$w^4 - 2w^2(w_0^2 + 2w_0^2) + 2w_0^2 \cdot 2w_0^2 = 0$$

$$\text{বা } w^4 - 6w^2w_0^2 + 4w_0^4 = 0$$

$$\therefore w^2 = (3 \pm \sqrt{5})w_0^2$$

$w^2$  এর এই মান দুটি থেকে স্বাভাবিক কম্পাঙ্কগুলির মান পাওয়া যাবে।

4. প্রশ্নের প্রথম অংশের উত্তর 7.4.3 অনুচ্ছেদে পাবেন। কম্পাঙ্ক দুটির অনুপাত  $(w_1^2 + 2w_2^2)$  এবং  $w_1^2$  এর পাওয়া যাবে। এই অনুপাত

$$\frac{\sqrt{w_1^2 + 2w_2^2}}{w_1^2} = \sqrt{1 + 2 \frac{w_2^2}{w_1^2}} = \sqrt{1 + 2 \frac{m}{M}} = \sqrt{\frac{19}{3}} = 2.52$$

$$(\because \text{CS}_2 \text{ অণুর ক্ষেত্রে } \frac{m}{M} = \frac{32}{12} = \frac{8}{3})$$

5. প্রশ্নটির উত্তর 7.3 অনুচ্ছেদে পাবেন।  
6. 7.5 অনুচ্ছেদে প্রশ্নটির উত্তর পাওয়া যাবে।

---

## একক ৪ □ কণা ও তরঙ্গের দ্বিচারিতা

---

### গঠন :

- 8.1 প্রস্তাবনা ও উদ্দেশ্য
  - 8.1.1 প্রস্তাবনা
  - 8.1.2 উদ্দেশ্য
  
- 8.2 পদার্থের কণাতত্ত্ব
  - 8.2.1 প্রাচীন কণাতত্ত্ব
  - 8.2.2 ডালটনের পরমাণুতত্ত্ব
  - 8.2.3 অ্যাবোগেড্রোর প্রকল্প
  - 8.2.4 সনাতন বলবিদ্যা
  - 8.2.5 ব্রাউনীয় গতি
  - 8.2.6 গ্যাসের গভীয় তত্ত্ব
  - 8.2.7 আয়নের গতি
  - 8.2.8 ইলেকট্রনের আবিষ্কার
  - 8.2.9 এক্স-রশ্মির আবিষ্কার
  - 8.2.10 সনাতন বলবিদ্যা ও বিশেষ আপেক্ষিকতা
  
- 8.3 আলোকের তরঙ্গ-তত্ত্ব
  - 8.3.1 আলোকের ধর্মের প্রাচীন ধারণা ও ফারমাটের নীতি
  - 8.3.2 হাইগেনসের নীতি
  - 8.3.3 নিউটনের পরীক্ষা ও করপাসকল তত্ত্ব
  - 8.3.4 আলোকের ব্যবর্তন ও ব্যতিচার
  - 8.3.5 আলোকের সমবর্তন
  - 8.3.6 ফ্রেনেলের ইথার তত্ত্ব
  - 8.3.7 ম্যাক্সওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ তত্ত্ব
  - 8.3.8 তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের কয়েকটি সিদ্ধান্ত

- 8.4 তরঙ্গের কোয়ান্টাম তত্ত্ব
  - 8.4.1 কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ ও প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্ব
- 8.5 আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া ও আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব
  - 8.5.1 আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য
  - 8.5.2 আইনস্টাইনের ফোটনতত্ত্ব ও আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার সমীকরণ
  - 8.5.3 আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব ও প্ল্যাঙ্কের কম্পক তত্ত্বের তুলনা
  - 8.5.4 আইনস্টাইনের ফোটনতত্ত্ব ও নিউটনের করপাস্কুল তত্ত্বের তুলনা ও ফোটনের দ্বিচারিতা
- 8.6 বোহরের হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্ব
- 8.7 কম্পটন ক্রিয়া
  - 8.7.1 কম্পটনের আবিষ্কার
  - 8.7.2 কোটনের ভরবেগ
  - 8.7.3 কম্পটন ক্রিয়ার তত্ত্ব
- 8.8 তরঙ্গের দ্বিচারিতা
- 8.9 পদার্থের তরঙ্গ ধর্ম
  - 8.9.1 ডি ব্রগলির প্রকল্প
  - 8.9.2 ডি ব্রগলির প্রকল্পের সত্যতা পরীক্ষা
  - 8.9.3 কণার দ্বিচারিতা
- 8.10 সারাংশ
- 8.11 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি
- 8.12 অনুশীলনী ও সর্বশেষ প্রশ্নাবলির উত্তর

### 8.1.1 প্রস্তাবনা

আপনারা জানেন যে পদার্থ অণু এবং অণুগুলি পরমাণুরূপে কণার দ্বারা গঠিত। পরমাণুগুলিও আবার ইলেকট্রন, প্রোটন, নিউট্রন প্রভৃতি অধিকতর মৌলিক কণার দ্বারা গঠিত। অপরপক্ষে আলোক হল একপ্রকার তরঙ্গ। নিউটনের সময়কালেই আলোকের তরঙ্গ ধর্ম আবিষ্কৃত হয়। ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্ব অনুযায়ী আলোক হল তড়িচ্চুম্বকীয়

তরঙ্গ। তরঙ্গধর্ম কণাধর্ম থেকে সম্পূর্ণ পৃথক। কিন্তু পরবর্তীকালে দেখা যায় যে আলোক তরঙ্গ হলেও কোনও কোনও ক্ষেত্রে তা কণার মতো আচরণ করে। একেই আলোকের দ্বিচারিতা বলে। অদৃশ্য অতিবেগুনীরশ্মি, এক্সরশ্মি ও গামারশ্মিগুলিও আলোকের চেয়ে ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ। কিন্তু আলোকের মতো এই রশ্মিগুলিও কোনও কোনও ক্ষেত্রে কণার অনুরূপ ক্রিয়া করে। তরঙ্গের এই দ্বিচারিতাধর্ম লক্ষ করে ডি ব্রগলি প্রস্তাব করেন যে কণারও দ্বিচারিতা অর্থাৎ তরঙ্গধর্ম আছে। পরে পরীক্ষার দ্বারা ডি ব্রগলির এই প্রকল্প সত্য প্রমাণিত হয় এবং কোয়ান্টাম বলবিদ্যার ভিত্তি স্থাপিত হয়।

### 8.1.2 উদ্দেশ্য

এই এককটি আয়ত্ত্ব করলে আপনি—

- পদার্থের কণাগুলি কি ও কিভাবে আবিষ্কৃত হয় ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- নিউটনের বলবিদ্যা কণার ক্ষেত্রে কতটা প্রযোজ্য, তা বুঝতে পারবেন।
- আলোকের তরঙ্গতত্ত্বের কিভাবে উদ্ভব হয় এবং এই তত্ত্বের সাফল্যের দিকগুলি ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- তরঙ্গতত্ত্বের ব্যর্থতা ও প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টামতত্ত্বের সাফল্য ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- আইনস্টাইনের ফোটনতত্ত্ব কি ও এর সাফল্য ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- প্ল্যাঙ্ক ও আইনস্টাইনের কোয়ান্টাম তত্ত্ব বোহরের হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্ব ও কম্পটনের ইলেকট্রন নিক্ষেপনের তত্ত্বদ্বারা কিরূপ সমর্থিত হয়, তা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- আলোক ও অন্যান্য তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের দ্বিচারিতা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- ডি ব্রগলির প্রকল্প কি ও এর সত্যতা কিভাবে পরীক্ষিত হয়, তা জানতে পারবেন এবং কণার দ্বিচারিতা ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

## 8.2 পদার্থের কণাতত্ত্ব (Particle Theory of Matter) ও কণার গতিবিদ্যা (Particle Dynamics)

### 8.2.1 প্রাচীন কণাতত্ত্ব

আপনারা জানেন যে, পদার্থের ক্ষুদ্রতম কণা হল ‘অণু’ এবং এই অণুগুলি এক বা একাধিক ‘পরমাণু’ দ্বারা গঠিত। কিন্তু খুবই আশ্চর্যের বিষয়, পরীক্ষার দ্বারা এই অণু ও পরমাণুর আবিষ্কার করতে মানুষের দু-হাজার বৎসরের চেয়েও বেশী সময় লেগেছে। প্রাচীন গ্রীক দার্শনিকগণ মনে করতেন যে মাটি, জল, অগ্নি ও বায়ু — এই চারটি হল সকল পদার্থের উপাদান এবং এগুলি নিরবচ্ছিন্ন, অর্থাৎ এগুলির কোনও ক্ষুদ্রতম কণা নেই। বিখ্যাত প্রাচীন গ্রীক পণ্ডিত অ্যারিস্টটল (Aristotle, 384—322 B.C.)-ও এই মতবাদে বিশ্বাসী ছিলেন। অপরপক্ষে অপর একজন গ্রীক



দার্শনিক ডেমোক্রিটাস (Democritus, about 420 B.C.)-এর মতবাদ ছিল যে পদার্থ অতি ক্ষুদ্রক্ষুদ্র বিভিন্ন আকৃতির কণা দ্বারা গঠিত যেগুলিকে আর বিভক্ত করা যায় না। এরূপ অবিভাজ্য বলে ডেমোক্রিটাস এই কণাগুলির নাম দেন 'অ্যাটম' (atom)।

যদিও ডেমোক্রিটাসের মতবাদ ছিল খুবই বৈপ্রবিক, তবুও এর কোনও বৈজ্ঞানিক ভিত্তি না থাকায়, এই দার্শনিক মতবাদ দ্বারা তদানিন্তন অ্যারিস্টটলীয় মতবাদকে খণ্ডন করা যায়নি এবং কোনও বৈজ্ঞানিক অগ্রগতিও সম্ভব হয়নি।

আনুমানিক 600 খ্রীষ্টপূর্বাব্দে ভারতীয় দার্শনিক মহর্ষি কণাদ রচিত 'বৈশেষিক দর্শনম'-এ পদার্থের উপাদান, অণু প্রভৃতি সম্বন্ধে আলোচনা পাওয়া যায়। কিন্তু এই সকল আলোচনার মধ্যে মন, অদৃষ্ট, কর্মফল প্রভৃতি অভৌতিক বিষয়গুলিও যুক্ত হওয়ায় কণাদের তত্ত্বের কোনও বৈজ্ঞানিক মূল্য নেই।

### 8.2.2 ডালটনের পরমাণুতত্ত্ব

1808 খ্রীষ্টাব্দে জন ডালটন (John Dalton, 1766—1844) বিভিন্ন রাসায়নিক পরীক্ষালব্ধ ফল ব্যাখ্যা করার জন্য তাঁর প্রায় দু'হাজার দুশ বৎসর পূর্বের ডেমোক্রিটাসের অ্যাটমের ধারণা অনুসরণে একটি নতুন অ্যাটমতত্ত্ব গঠন করেন, যাকে ডালটনের পারমাণবিক তত্ত্ব (Dalton's atomic theory) অ্যাখ্যা দেওয়া হয়। এই তত্ত্বে ডালটন ধরেন যে প্রত্যেক মৌলিক পদার্থই অতিক্ষুদ্রক্ষুদ্র অবিভাজ্য একপ্রকার কণা—'অ্যাটম' (পরমাণু)-দ্বারা গঠিত / প্রত্যেক মৌলিক পদার্থের এই অ্যাটমগুলির ওজন ও ধর্ম অভিন্ন, কিন্তু বিভিন্ন মৌলিক পদার্থের অ্যাটমগুলির ওজন ও ধর্ম বিভিন্ন / রাসায়নিক ক্রিয়ায় এই অ্যাটমগুলি সরল অনুপাতে যুক্ত হয়ে কোনও যৌগ গঠন করে।

### 8.2.3 অ্যাভোগেড্রোর প্রকল্প

ডালটনের এই তত্ত্ব সেই সময়ের জানা রাসায়নিক বিক্রিয়াগুলি সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হয়। ফলে এই তত্ত্ব প্রতিষ্ঠালাভ করে। কিন্তু পরবর্তীকালে দেখা যায় যে এই তত্ত্ব দ্বারা গেই-লুস্যাক (L.J. Gay-Lussac 1778—1850) আবিষ্কৃত গ্যাস-আয়তন সূত্র ব্যাখ্যা করা যায় না। ডালটন তত্ত্বের এই অসুবিধা দূর করার জন্য অ্যামিদিও অ্যাভোগেড্রো (Count Amedeo Avogadro di Quaregna, 1776—1856) 1811 খ্রীষ্টাব্দে ডালটন তত্ত্ব সংশোধন করে একটি প্রকল্প উপস্থাপন করেন, যাকে বলা হয় অ্যাভোগেড্রোর প্রকল্প (Avogadro's hypothesis)। এই প্রকল্প অনুযায়ী পদার্থের অভিন্ন ধর্মসহ ক্ষুদ্রতম কণা হল 'মলিকিউল' (Molecule), যাকে আমরা 'অণু' বলে থাকি এবং এই অণুগুলিই ডালটন কথিত এক বা একাধিক পরমাণু দ্বারা গঠিত। অ্যাভোগেড্রোর প্রকল্প দ্বারা রাসায়নিক বিক্রিয়া ব্যাখ্যার যাবতীয় অসুবিধা দূর হয়, ফলে অণুতত্ত্ব প্রতিষ্ঠিত হয়।

### 8.2.4 সনাতন বলবিদ্যা (Classical Mechanics)

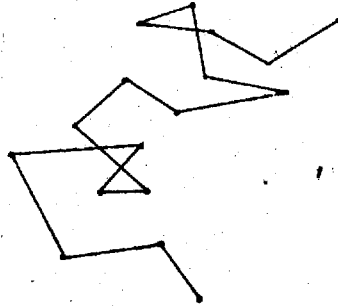
কণার গতি বিষয়ক বিজ্ঞানকে আমরা কণার গতিবিদ্যা বা গতিবিজ্ঞান (Particle Dynamics) বলে থাকি। এটি বৃহত্তর বলবিদ্যা বা বলবিজ্ঞানের (Mechanics) একটি শাখা। গ্যালিলিও (Galileo Galilei, 1564—1642) তাঁর রচিত Dialogues Concerning Two New Sciences গবেষণাগ্রন্থের দ্বারা এই বিজ্ঞানের সূত্রপাত করেন এবং নিউটন (Sir Isaac Newton, 1642—1727) 1686 খ্রীষ্টাব্দে প্রকাশিত তাঁর Principia Mathematica Philosophiae Naturalis গবেষণাগ্রন্থের দ্বারা এই বিজ্ঞানকে একটি ছয় ভিত্তির ওপর প্রতিষ্ঠা করেন। এজন্য এই বিজ্ঞানকে নিউটনীয়

বলবিদ্যা (Newtonian Mechanics)-ও বলা হয়। নিউটনীয় বলবিদ্যাকে আমরা বর্তমানে সনাতন বলবিদ্যা আখ্যা দিয়ে থাকি। কারণ, পরবর্তীকালে নিউটনীয় বলবিদ্যার নানারূপ পরিবর্তন ঘটেছে, এবং সে অনুযায়ী বলবিদ্যার নামকরণও বদলেছে। পরবর্তী অধ্যায় সমূহে আপনারা এ বিষয়ে আরও জানতে পারবেন।

নিউটনীয় বলবিদ্যার মূল ভিত্তি হল এর তিনটি গতিসূত্র। আপনারা নিশ্চয় পূর্বেই এই গতিসূত্রগুলি অধ্যয়ন করেছেন। আপনারা নিশ্চয়ই লক্ষ করেছেন যে প্রথম গতিসূত্র থেকে আমরা বস্তুর জাড্য ও বলের সংজ্ঞা, দ্বিতীয় গতিসূত্র থেকে বলের মান ও দিক এবং তৃতীয় সূত্র থেকে রৈখিক ভরবেগের সংরক্ষণ সূত্র পাই। নিউটন পরবর্তীকালে মহাকর্ষ সূত্র (Law of Gravitation) আবিষ্কার করেন, এবং এই সূত্রও বলবিদ্যার অন্তর্গত হয়। নিউটন গণনা করে দেখিয়েছেন যে সৌর মণ্ডলের প্রতিটি গ্রহ ও উপগ্রহ থেকে শুরু করে পৃথিবীর উপরিস্থিত ক্ষুদ্র বা বৃহৎ প্রতিটি বস্তুই তাঁর এই সূত্রগুলি নির্ভুলভাবে মেনে চলে। জ্যোতির্বিদ্যায় প্রমাণিত হয় যে মহাবিশ্বের প্রতিটি জ্যোতিষ্ক নিউটনের বলবিদ্যার দ্বারা পরিচালিত। বর্তমান যুগে আমরা মহাকাশে যে রকেট ও কৃত্রিম উপগ্রহ প্রেরণ করে থাকি, সেগুলির গতি নিউটনের বলবিদ্যার দ্বারা নির্ভুলভাবে পাওয়া যায়। নিউটন মনে করতেন যে তাঁর সূত্রগুলি পদার্থের ক্ষুদ্রতম কণার ক্ষেত্রেও সমভাবে প্রযোজ্য হবে। কিন্তু তাঁর সময়ে অণু ও পরমাণু আবিষ্কার হয়নি। সুতরাং এরূপ ক্ষুদ্র কণার ক্ষেত্রে তাঁর গতিবিদ্যা খাটে কিনা তা পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ হয়নি।

### 8.2.5 ব্রাউনীয় গতি (Brownian Motion)

অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে দেখা যায়—এরূপ অতি ক্ষুদ্রক্ষুদ্র কণা কোনও তরলের ভিতর ভাসমান অবস্থায় থাকলে দেখা যায় যে প্রতিটি কণা তরলের মধ্যে সর্বদা অনিয়মিতভাবে এদিক-ওদিক ছোটোছুটি করছে (চিত্র 8.2.1)। রবার্ট ব্রাউন (Robert Brown) 1827 খ্রীষ্টাব্দে কণার এই গতি আবিষ্কার করেন এবং এজন্য এই গতিকে ব্রাউনীয় গতি এবং কণাগুলিকে ব্রাউনীয় কণা বলা হয়। যদি ধরা হয় যে তরল অণুর দ্বারা গঠিত এবং এই অণুগুলি সর্বদা চতুর্দিকে গতিশীল, তাহলে ব্রাউনীয় কণাগুলি অণুগুলির তুলনায় বহুগুণ বড় হওয়ায় প্রতি মুহূর্তে চতুর্দিক থেকে বহু সংখ্যক অণুর দ্বারা আঘাত প্রাপ্ত হবে। কিন্তু কণার আকার যথেষ্ট বড় না হলে অণুগুলির দ্বারা আঘাতজনিত বল সব দিকে সমান হবে না। ফলে যে দিকে বল সমূহের লব্ধি ক্রিয়া করবে ব্রাউনীয় কণাটিও সেই দিকে চলবে। কিন্তু যেহেতু লব্ধি



চিত্র 8.2.1 ব্রাউনীয় গতি

বলের দিক যেকোন সময় পরিবর্তিত হতে পারে, কণাটিরও গতির দিক সে অনুযায়ী পরিবর্তিত হবে এবং এভাবে কণাটি সতত বিরামহীনভাবে বিভিন্ন দিকে ছোটোছুটি করতে থাকবে। ব্রাউনীয় গতি পর্যবেক্ষণ করে গ্যাসের গতীয়

তত্ত্বের সাহায্যে তরলের প্রতি মোল আয়তনে কত সংখ্যক অণু আছে, তা গণনা করা যায়। এই সংখ্যাকে অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা ( $N_0$ ) বলে। দেখা গেছে ব্রাউনীয় গতির সাহায্যে প্রাপ্ত এবং রাসায়নিক পরীক্ষার দ্বারা প্রাপ্ত  $N_0$ -র মান পরস্পর সমান ( $N_0 = 6.03 \times 10^{23} / \text{mole}$ )। এর দ্বারা তরল যে অণুর দ্বারা গঠিত এবং অণুগুলি যে নিউটনীয় গতিবিদ্যা অনুসরণ করে তা প্রমাণিত হয়।

### 8.2.6 গ্যাসের গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory of Gases)

গ্যাসের গতীয় তত্ত্বে একটি পাত্রের মধ্যে আবদ্ধ গ্যাসকে স্বাধীনভাবে যেকোন দিকে ভ্রমণশীল ক্ষুদ্রক্ষুদ্র বিন্দুবৎ নিরেট গ্যাসীয় অণুর সমষ্টিক্রমে ধরা হয়। এই তত্ত্বে নিউটনীয় বলবিদ্যার সূত্রগুলি প্রয়োগ করে বিভিন্ন উষ্ণতায় গ্যাসের আয়তন চাপের পরিবর্তনে কিরূপ পরিবর্তিত হয়, তার সূত্র নির্ণয় করা যায়। এই সূত্র পরীক্ষালব্ধ বয়েল ও চার্লসের সূত্রের সঙ্গে অভিন্ন। এছাড়া এই তত্ত্বদ্বারা আরও বহু সূত্র (যেমন, ডালটনের আংশিক চাপ সূত্র, ব্যাপন ও সাদ্রতার সূত্র, ম্যাক্সওয়েলের আণবিক বেগ বণ্টন সূত্র, ড্যান-ডার-ওয়ালের সমীকরণ প্রভৃতি) নির্ণয় করা যায় এবং এগুলি পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সম্পূর্ণ সঙ্গতিপূর্ণ। এই সূত্রগুলি হিলিয়াম, নিয়ন, আর্গন প্রভৃতি এক পরমাণুক অণুর ক্ষেত্রেও সমভাবে প্রযোজ্য। সুতরাং নিঃসন্দেহে প্রমাণ হয় যে অণু ও পরমাণুর মতো অতিক্ষুদ্র কণাগুলিও নিউটনীয় বলবিদ্যা অনুসরণ করে।

### 8.2.7 আয়নের গতি (Motion of Ions)

দুটি সমধর্মী চুম্বকীয় মেরু পরস্পরকে বিকর্ষণ করে, কিন্তু দুটি বিপরীতধর্মী মেরু পরস্পরকে আকর্ষণ করে। দুটি চুম্বকীয় মেরুর মধ্যে আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বল কুলম্বের চুম্বকীয় বলের সূত্র (Coulomb's law of magnetic force)-দ্বারা নির্ধারিত হয়। অনুরূপে দুটি তড়িৎ আধানের মধ্যে আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বল কুলম্বের স্থিরতড়িৎ বলের সূত্র (Coulomb's law of electrostatic force)-দ্বারা নির্ধারিত হয়। মহাকর্ষীয় বলের মতো চুম্বকীয় বল বা তড়িৎ বলের ক্ষেত্রেও নিউটনীয় বলবিজ্ঞান সমভাবে প্রযোজ্য হয়। স্বাভাবিক অবস্থায় একটি অণু বা পরমাণুর তড়িৎধর্ম নেই। কিন্তু তড়িৎ-আধানদ্বারা আহিত হলে অণু বা পরমাণুটি ধনাত্মক বা ঋণাত্মক আয়নে (ion) পরিবর্তিত হয়। এরূপ একটি আয়ন (ion) তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যদিয়ে গেলে এর গতি নিউটনীয় বলবিদ্যার দ্বারা নির্ণয় করা যায়। একটি চুম্বকীয় ক্ষেত্রের দ্বারাও একটি আয়নের গতির পরিবর্তন ঘটে। এক্ষেত্রেও নিউটনীয় বলবিদ্যা প্রযোজ্য।

### 8.2.8 ইলেকট্রনের আবিষ্কার (Discovery of Electron)

একটি কাঁচের নলে অত্যন্ত নিম্নচাপে আবদ্ধ গ্যাসের মধ্যদিয়ে তড়িৎমোক্ষণ (electric discharge) ঘটালে নলের ক্যাথোড-তল থেকে একপ্রকার অদৃশ্য রশ্মির উদ্ভব ঘটে। প্লুয়েকার (Pluecker) 1859 খ্রীষ্টাব্দে এই ঘটনা প্রথম লক্ষ করেন। কিন্তু তখন এর গুরুত্ব বিশেষ উপলব্ধি হয়নি। ক্যাথোড-তল থেকে উৎপন্ন হয় বলে এই রশ্মির নাম দেওয়া হয় ক্যাথোড রশ্মি (cathode rays)। প্রথমে ভাবা হয়েছিল যে বিকীর্ণ তাপ বা আলোকের মতো ক্যাথোড রশ্মিও একপ্রকার বিকীর্ণ শক্তি। কিন্তু উনবিংশ শতাব্দির শেষ দিকে ব্রুক্স, জে জে থমসন, পেরিন ও অন্যান্য বৈজ্ঞানিকগণের বিভিন্ন পরীক্ষার দ্বারা নিশ্চিতভাবে প্রমাণিত হয় যে বস্তুকণার মতো ক্যাথোড রশ্মিরও যথেষ্ট ভরবেগ আছে এবং এই রশ্মিকে তড়িৎক্ষেত্র বা চুম্বকীয় ক্ষেত্রের মধ্যদিয়ে পাঠালে এদের গতিপথের বিচ্যুতি (deflection) হয়। এই বিচ্যুতির দিক থেকে প্রমাণিত হয় যে রশ্মিগুলি ঋণাত্মক তড়িৎধর্মী। ক্যাথোড রশ্মিগুলির এ সমস্ত ধর্ম থেকে জে জে থমসন (Sir Joseph John Thomson, 1856—1940) সিদ্ধান্ত গ্রহণ করেন যে এই

রশ্মিগুলি বস্তুত অতি উচ্চবেগে গতিশীল একপ্রকার অতিক্রম ঋণাত্মক তড়িৎধর্মী কণার প্রবাহ। জনস্টোন স্টোনি (Johnstone Stoney) এই কণাগুলির নাম দেন 'ইলেকট্রন' (electron)। 1897 খ্রীষ্টাব্দে থমসন তাঁর উদ্ভাবিত একটি ক্যাথোড নলের মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র ও চুম্বকীয় ক্ষেত্রের প্রয়োগে ক্যাথোড রশ্মির বিচ্যুতি ঘটিয়ে ইলেকট্রনের আধান ( $e$ ) ও ভর ( $m$ )-এর অনুপাত ( $e/m$ ) নির্ণয় করতে সক্ষম হন এবং এভাবেই ইলেকট্রনের আবিষ্কার নিশ্চিত হয়। জে. জে. থমসনের এই অসাধারণ আবিষ্কারের জন্য 1906 খ্রীষ্টাব্দে তাঁকে নোবেল পুরস্কারে ভূষিত করা হয়।

1913 খ্রীষ্টাব্দে মিলিকান (Robert Andrews Millikan) তাঁর উদ্ভাবিত 'তৈলবিন্দু পরীক্ষার' (Oil-drop experiment)-দ্বারা ইলেকট্রনের আধানের মান অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নির্ণয় করতে সমর্থ হন। তিনি তাঁর পরীক্ষায় বিভিন্ন তৈলবিন্দুর আধান নির্ণয় করতে গিয়ে দেখেন যে সেটি ইলেকট্রন আধান বা তার অখণ্ড গুণিতকের সমান। তার ফলে ইলেকট্রনের  $e/m$  এর মান থেকে এর ভরও সঠিকভাবে গণনা করা সম্ভব হয়। নীচে এই রাশিগুলির মান দেওয়া হল

$$\text{ইলেকট্রনের } e/m = 5.1 \times 10^7 \text{ e.s.u.} = 1.76 \times 10^7 \text{ e.m.u.}$$

$$\text{ইলেকট্রনের আধান } e = 4.8036 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.} = 1.6012 \times 10^{-20} \text{ e.m.u.}$$

$$\text{ইলেকট্রনের ভর } m = \frac{e}{e/m} = \frac{1.6012 \times 10^{-20}}{1.76 \times 10^7} = 9.0977 \times 10^{-28} \text{ gm} \approx 9.1 \times 10^{-28} \text{ gm.}$$

এখন, সব মৌলের মধ্যে হাইড্রোজেনই সবচেয়ে হালকা। এর একটি পরমাণুর ভর  $M_H = 1.67 \times 10^{-24} \text{ gm.}$

$$\text{সুতরাং } \frac{M_H}{m_e} = \frac{1.67 \times 10^{-24}}{9.1 \times 10^{-28}} = 1836$$

অর্থাৎ একটি হাইড্রোজেনের পরমাণু একটি ইলেকট্রনের চেয়ে প্রায় 1836 গুণ ভারী।

মিলিকান ইলেকট্রনের আধানের মান নিরূপণ ছাড়াও আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার বিভিন্ন ধর্ম নিপুনভাবে নির্ণয় করেন (এ বিষয়ে পরে আরও আলোচনা পাবেন)। তাঁর এরূপ দুটি অসাধারণ কাজের জন্য 1923 খ্রীষ্টাব্দে তাঁকে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

এখানে যে বিষয়টি লক্ষণীয়, তা হল যে ইলেকট্রনের উপরি উল্লেখিত ধর্মগুলির পরীক্ষায় নিউটনীয় বলবিদ্যা সম্পূর্ণরূপে প্রযোজ্য হয়। যেমন, থমসনের  $e/m$  নির্ণয়ের পরীক্ষায় প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্র বা চুম্বকীয় ক্ষেত্রের মধ্যদিয়ে যাওয়ার সময় ইলেকট্রনের গতিপথের যে বক্রতা হয় নিউটনের বলবিদ্যার সাহায্যে তা নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা যায়, এবং এই পরিমাপ থেকেই  $e/m$  নির্ণীত হয়। ইলেকট্রন এতই ক্ষুদ্র এবং উচ্চগতিসম্পন্ন যে এর প্রকৃত গতিপথ সরাসরি দৃষ্টিগোচর হওয়া সম্ভব নয়। কিন্তু তড়িৎদ্বারা আহিত হওয়ায় একটি উচ্চগতিসম্পন্ন ইলেকট্রনকে একটি উইলসনের (C.T.R. Wilson, 1869—1959) মেঘ প্রকোষ্ঠের (cloud chamber) ভিতর পাঠালে, তা এর গতিপথের সন্নিকটবর্তী গ্যাসীয় অণুগুলিকে আয়নিত করে। এই সময়ে প্রকোষ্ঠের চাপ অকস্মাৎ কমিয়ে দিলে প্রকোষ্ঠে বর্তমান সংপৃক্ত জলীয় বাষ্প শীতল হয়ে আয়নগুলির ওপর ক্ষুদ্রক্ষুদ্র জলবিন্দু গঠন করে। উপযুক্ত আলোকদ্বারা এই জলবিন্দুগুলি দৃশ্যমান হয় এবং এভাবে ইলেকট্রনের গতিপথ সূচিত হয়। এই গতিপথই ইলেকট্রনের কণা ধর্ম প্রমাণিত করে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে উইলসন 1897 খ্রীষ্টাব্দে তাঁর মেঘ প্রকোষ্ঠ উদ্ভাবন করেন এবং এজন্য 1927 খ্রীষ্টাব্দে নোবেল পুরস্কার লাভ করেন।

### 8.2.9 এক্স-রশ্মির আবিষ্কার ও এর ধর্ম (Discovery of X-rays and their properties)

এক্স-রশ্মির ধর্ম আলোচনা করলে ইলেকট্রনের কণাধর্ম আরও পরিষ্কৃত হবে। 1895 খ্রীষ্টাব্দে রন্টজেন (Wilhelm Konrad Rontgen, 1845—1923) ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন করার একটি মোক্ষণ-নলে (discharge tube) অতি উচ্চগতির ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন করে দেখতে পান যে এই রশ্মি যখন অ্যানোড তড়িৎ-দ্বারকে (Anode plate)-কে সরাসরি আঘাত করে, তখন ঐ অ্যানোড থেকে একটি নতুন অজানা রশ্মির সৃষ্টি হয়। অজানা হওয়ায় রন্টজেন এই রশ্মির নামকরণ করেন 'এক্স-রশ্মি' (X-rays)। রন্টজেনের এই অভূতপূর্ব আবিষ্কারের জন্য তাঁকে 1901 খ্রীষ্টাব্দে পদার্থবিজ্ঞানের প্রথম নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

ক্যাথোড রশ্মির সঙ্গে এক্স-রশ্মির পার্থক্য হল যে এক্স-রশ্মির ভরবেগ নেই এবং কোনও আধান নেই। সুতরাং নিউটনীয় গতিসূত্রগুলি এক্ষেত্রে প্রযোজ্য হয় না। ক্যাথোড রশ্মির বেগ বিভিন্ন হতে পারে, কিন্তু এক্স-রশ্মির বেগ অভিন্ন এবং তা আলোকের বেগের সমান। আলোকের মতোই এক্স-রশ্মিরও তরঙ্গধর্ম আছে, তবে আলোকের তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের চেয়ে এক্স-রশ্মির তরঙ্গ দৈর্ঘ্যগুলি অনেক কম। সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে ইলেকট্রনের প্রকৃতি এবং এক্স-রশ্মির প্রকৃতি পরস্পর থেকে সম্পূর্ণ ভিন্ন এবং উভয়কে একই বলবিদ্যার অন্তর্গত করা যায় না।

### 8.2.10 সনাতন বলবিদ্যা ও বিশেষ আপেক্ষিকতা (Classical Mechanics and Special Theory of Relativity)

পূর্ববর্তী খণ্ডে (Block-I) আপনারা বিশেষ আপেক্ষিকতা বিষয়ে অধ্যয়ন করেছেন। আপনারা অবশ্যই লক্ষ করেছেন যে যখন কোনও কণার বেগ  $V$  আপেক্ষিকতার চরম বেগ (অর্থাৎ শূন্য মাধ্যমে আলোকের বেগ)  $c$ -র নিকটবর্তী হয় ( $V \approx c$ ), তখন সনাতন বলবিদ্যার সূত্রগুলি অর্থাৎ নিউটনের সূত্রগুলি আর খাটে না, সেন্ধলে কণার সঠিক অবস্থান নিরূপনের জন্য বিশেষ আপেক্ষিকতার সূত্রগুলি ব্যবহার করতে হয়।  $c$ -র মানের নিকটবর্তী কণার এরূপ বেগকে আপেক্ষিকীয় (relativistic) বেগ বলা হয়। আবার অপরপক্ষে  $V$ -এর মান  $c$ -র মানের চেয়ে খুব কম হলে ( $V \ll c$ ) বিশেষ আপেক্ষিকতার সমীকরণগুলি সনাতন বলবিদ্যার সমীকরণগুলির সঙ্গে অভিন্ন হয়। সুতরাং বলা যায় যে বিশেষ আপেক্ষিকীয় গতিবিদ্যা হল সনাতন গতিবিদ্যারই একটি সাধারণীকৃত রূপ যখন  $V \approx c$ । অথবা বিপরীতভাবে বলা যায় যে সনাতন গতিবিদ্যা হল বিশেষ আপেক্ষিকীয় গতিবিদ্যারই একটি বিশেষ রূপ যখন  $V \ll c$ । সুতরাং যখন কোনও কণা আপেক্ষিকীয় বেগে চলে, তখন এর ভর, ভরবেগ, গতি শক্তি ইত্যাদির বৃদ্ধি ঘটে বটে, কিন্তু তাহলেও সনাতন গতিবিদ্যার মতো আপেক্ষিকীয় গতিবিদ্যার দ্বারাও যেকোন সময়ে কণার অবস্থান, ভরবেগ বা শক্তির মান যুগপৎ নির্ভুলভাবে নির্ণয় করা যায়। অর্থাৎ আপেক্ষিকীয় গতিবিদ্যাতেও একটি কণার কণারূপ ধর্ম বজায় থাকে।

#### অনুশীলনী—1

- অনুশীলনী 8.2.1 ডালটনের পরমাণু তত্ত্ব কি? ডেমোফ্রিটাসের অ্যাটম তত্ত্ব থেকে এর পার্থক্য কোথায়?
- অনুশীলনী 8.2.2 অ্যাভোগেড্রোর প্রকল্পটি বলুন। অণু ও পরমাণুর মধ্যে পার্থক্য কি?
- অনুশীলনী 8.2.3 ব্রাউনীয় গতি কি? এই গতির দ্বারা অণুগুলি যে নিউটনীয় গতিবিদ্যা মেনে চলে, তা কিভাবে বোঝা যায়?
- অনুশীলনী 8.2.4 ইলেকট্রনের আবিষ্কার কিভাবে হয় বর্ণনা করুন।

## 8.3 আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব (Wave Theory of Light)

সপ্তদশ শতাব্দীতে হাইগেনস (Huygens, 1629—1695) প্রথম আলোকের তরঙ্গ তত্ত্বের সূচনা করেন। সে সময়ে আলোকের সরলরৈখিক গতি, প্রতিফলন ও প্রতিসরণ—প্রধানতঃ এই তিনটি ধর্মই জানা ছিল। পরবর্তীকালে ইয়ং, ফ্রেনেল, ফ্রাউন হপার প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ আলোকের আরও বিভিন্ন ধর্ম আবিষ্কার করেন এবং তরঙ্গ তত্ত্বের প্রসার ঘটান। ঊনবিংশ শতাব্দীতে ম্যাক্সওয়েল তাঁর তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ তত্ত্ব দ্বারা পূর্বের তরঙ্গ তত্ত্বের আমূল পরিবর্তন সাধন করেন এবং তরঙ্গ তত্ত্বের পরিপূর্ণতা আনয়ন করেন। আপনি অবশ্যই আলোকের বিভিন্ন ধর্ম ও তরঙ্গ তত্ত্বসম্বন্ধে অবহিত আছেন। সেজন্য এই ধর্ম ও তত্ত্বগুলি এখানে বিস্তৃতভাবে আলোচনার প্রয়োজন নেই। তবে আলোকের দ্বিচারিতা বোঝার জন্য আমরা এখানে এইসব ধর্ম ও তত্ত্বগুলির ঐতিহাসিক পটভূমিকা সংক্ষেপে আলোচনা করব।

### 8.3.1 আলোকের ধর্মের প্রাচীন ধারণা ও ফারমাটের নীতি (Properties of light known to ancient people and Fermat's Principle)

আলোকের সরলরৈখিক গতির ফলে বস্তুর ছায়া গঠিত হয়। আলোকের এই ধর্মকে অবলম্বন করে প্রায় তিন হাজার বৎসর পূর্বে ব্যাবিলনে ও তারপর মিশরে সূর্যঘড়ি (Sundial) উদ্ভাবিত হয়। সম্ভবত ইউক্লিড (Euclid) (আনুমানিক ৩০০ খ্রীঃপূঃ) এবং আর্কিমিডিস (Archimedes) (আনুমানিক ২০০ খ্রীঃপূঃ) উভয়েই আলোকের প্রতিফলনের নিয়মগুলি জানতেন। সপ্তদশ শতাব্দীর প্রথমার্ধে স্নেল (Willebrod Snell, 1591—1626) পরীক্ষামূলকভাবে আলোকের প্রতিসরণের সূত্রগুলি আবিষ্কার করেন।

1650 খ্রীষ্টাব্দে ফারমাট (Pierre Fermat) একটি গুরুত্বপূর্ণ নীতি উদ্ভাবন করেন, যাকে ফারমাটের নীতি (Fermat's Principle) বলা হয়। নীতিটি এভাবে বিবৃত করা যায় : আলোক এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে কেবল ঐ পথেই যায়, যার জন্য সময় ন্যূনতম বা সবচেয়ে কম (বা ক্ষেত্রবিশেষ সবচেয়ে বেশী) লাগে। ফারমাটের এই নীতির দ্বারা আলোকের সরলরৈখিক গতি, প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্রগুলি সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। ফারমাটের নীতিটি হল আলোকের তিনটি ধর্মের প্রথম বৈজ্ঞানিক সংশ্লেষণ। পরবর্তীকালে এই নীতিকে অনুসরণ করেই গতিবিদ্যায় 'ন্যূনতম ক্রিয়ার নীতি' (Principle of least action) প্রবর্তিত হয়।

### 8.3.2 হাইগেনসের নীতি (Huygens' Principle)

ফারমাটের নীতিতে আলোকের প্রকৃতি সম্বন্ধে কিছু জানা যায় না। বহু প্রাচীনকাল থেকে মানুষের ধারণা ছিল যে আলোক হল একপ্রকার অতি ক্ষুদ্রক্ষুদ্র কণা (corpuscles) যা উৎস থেকে অতি দ্রুতবেগে ছুটে আসে এবং আমাদের চোখে প্রবেশ করে আলোকের অনুভূতি জাগায়। 1678 খ্রীষ্টাব্দে হাইগেনস প্রস্তাব করেন যে আলোক হল জলতরঙ্গ বা শব্দতরঙ্গের অনুরূপ 'লুমিনিফেরাস ইথার' (Luminiferous ether) নামক মাধ্যমের কম্পনজাত একটি তরঙ্গ বিশেষ এবং এর বিস্তার একটি নীতির দ্বারা বিবৃত করা যায়। হাইগেনসের এই নীতিটি এরূপ : বিস্তারশীল তরঙ্গমুখের (wave front) প্রতিটি বিন্দু একটি গৌণ অন্তরঙ্গের (secondary wavelet) উৎসরূপে ক্রিয়া করে। সময় পর এই গৌণ অন্তরঙ্গগুলির কেবল সম্মুখের স্পর্শকতলই হল তরঙ্গমুখটির নতুন অবস্থান। হাইগেনসের

এই নীতির দ্বারা জ্যামিতিক অঙ্কনের সাহায্যে আলোকের সরলরৈখিক গতি, প্রতিফলন ও প্রতিসরণ সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। হাইগেনসের নীতিটি খুবই সরল হওয়ায় এখনও সাধারণ স্তরের পাঠ্যপুস্তকে এই নীতির সাহায্যে আলোকের বিভিন্ন ধর্মগুলি ব্যাখ্যা করা হয়। তবে এখানে উল্লেখযোগ্য যে প্রতিসরণ ব্যাখ্যার জন্য এই নীতিতে আলোকের বেগ ঘনতর মাধ্যমের চেয়ে শূন্যমাধ্যমে বেশী ধরতে হয়। কিন্তু ঐ সময়ে আলোকের বেগ জানা না থাকায় এই ফলটি সঠিক কিনা, তা প্রমাণ করা সম্ভব ছিল না।

### 8.3.3 নিউটনের পরীক্ষা ও 'করপাস্কল' তত্ত্ব (Newton's Experiments and Corpuscular Theory)

নিউটন আলোক সম্বন্ধে দুটি বিখ্যাত পরীক্ষা করেন। প্রথম পরীক্ষায় তিনি সূর্যের আলোক একটি প্রিজমের মধ্যদিয়ে পাঠিয়ে প্রমাণ করেন যে সাদা আলোক প্রকৃতপক্ষে সাতটি বর্ণের (লাল, কমলা, হলুদ, সবুজ, নীল, অতিনীল ও বেগুনি) সমষ্টি। দ্বিতীয় পরীক্ষায় তিনি একটি কাঁচের সমতল প্লেটের ওপর একটি উত্তল লেন্স রেখে তার ওপর লম্বভাবে আলোক ফেলে দেখলেন যে প্রতিফলিত আলোক বহু সংখ্যক সমকেন্দ্রিক বলয়ে বিভক্ত। এই বলয়গুলিকে নিউটনের বলয় (Newton's rings) বলে।

হাইগেনসের তরঙ্গ তত্ত্বে তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বিভিন্নতা ও ব্যাতিচার ধরে নিলে নিউটনের উভয় পরীক্ষাই সঠিক ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু নিউটন হাইগেনসের তত্ত্ব গ্রহণ করেন নি। তার কারণ নিউটনের শব্দের বেগ তত্ত্ব ছিল হাইগেনসের ইথার তত্ত্বের বিরোধী।

নিউটন কোনও মাধ্যমে তরঙ্গের যে বেগ হয়, তার গাণিতিক সূত্র নির্ধারণ করেছিলেন। যদি  $E$  স্থিতিস্থাপক গুণাঙ্ক ও  $p$  ঘনত্বযুক্ত কোনও মাধ্যমে কোনও তরঙ্গ  $V$  বেগে বিস্তারলাভ করে, তবে

$$V = \sqrt{\frac{E}{p}} \quad \dots \dots (8.3.1)$$

নিউটন বায়ুতে শব্দের বিস্তারের ক্ষেত্রে প্রমাণ করেন যে বায়ুর চাপ  $P$  ধরলে,  $E = P$  এবং এ থেকে তিনি বায়ুতে শব্দের বেগ  $V = 280 \text{ m/sec}$  নির্ণয় করেন। [এখানে উল্লেখ্য, বায়ুতে শব্দের বেগ নির্ণয়ে নিউটনের সমীকরণে সামান্য ত্রুটি ছিল, পরে ল্যাপলাস এই ত্রুটি সংশোধন করে পান  $E = vP$ , যেখানে  $v$  হল গ্যাসের দুটি আপেক্ষিক তাপের অণুপাত এবং সে অনুযায়ী  $V = 331.4 \text{ m/sec}$ , যা পরীক্ষালব্ধ ফলের সমান।]

নিউটন লক্ষ করেন যে সূর্য ও নক্ষত্র থেকে আমরা যে আলোক পাই তা শূন্যের ভিতরদিয়ে আসে। নিউটনের সময়েই 1675 খ্রীষ্টাব্দে রোমার (Ole Roemer) বৃহস্পতির চাঁদগুলির গ্রহণকাল পরিমাপ করে প্রথম শূন্যমাধ্যমে আলোকের বেগ পরিমাপ করতে সমর্থ হন। এই মান হল  $c = 2 \times 10^8 \text{ m/sec}$  (পরবর্তীকালে নির্ণীত নির্ভুল মান  $c = (2.997929 \pm 0.000002) \times 10^8 \text{ m/sec}$ )। এখন যদি হাইগেনসের ইথার মাধ্যমের  $E = 0$ ,  $P = 0$  ধরা হয়, তবে (8.3.1) সমীকরণ অনুযায়ী  $V$  অনির্ণেয় হয়। আবার যদি  $E$  ও  $P$  শূন্য না হয়, তবে আলোকের বেগের মান পেতে গেলে  $E$ -র তুলনায়  $P$ -কে অত্যন্ত ক্ষুদ্র ধরতে হয়। কিন্তু বাস্তবক্ষেত্রে দেখা যায় যে কোনও গ্যাসের ঘনত্ব যত কমতে থাকে, তার চাপ বা স্থিতিস্থাপকতা গুণাঙ্কও তত কমে যায়। সুতরাং ইথার মাধ্যমের ক্ষেত্রে (8.3.1) সমীকরণ প্রযোজ্য হয় না এবং আলোককেও ইথারের তরঙ্গরূপে ধরা যায় না।

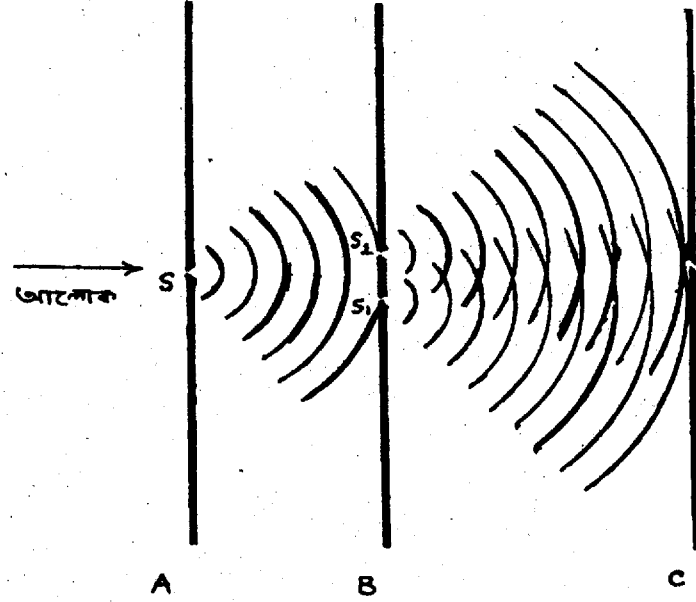
এই অবস্থায় নিউটন পূর্বের কণাতত্ত্বকেই পুনরায় নতুনভাবে গ্রহণ করেন। নিউটন কণাগুলির নাম দেন করপাসকল (corpuscle) এবং এজন্য এই তত্ত্বকে বলা হয় করপাস্কুলীয় তত্ত্ব (corpuscular theory)। এই তত্ত্ব অনুযায়ী আলোক অতি ক্ষুদ্রক্ষুদ্র করপাস্কুলদ্বারা গঠিত যেগুলি উৎস থেকে নির্গত হয়ে আলোকের বেগে শূন্য বা অন্যকোনও মাধ্যমের মধ্যদিয়ে বিস্তৃত হয়। এই তত্ত্বদ্বারা আলোকের সরলরৈখিক গতি ও প্রতিফলন সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু প্রতিসরণের সূত্রগুলি পেতে ধরতে হয় যে শূন্য মাধ্যমের চেয়ে ঘনতর মাধ্যমে আলোকের বেগ বেশী। তাছাড়া বিভিন্ন প্রকারের করপাস্কুল ধরে নিয়ে আলোকের বর্ণগুলিও ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু এই তত্ত্বদ্বারা তাঁরই আবিষ্কৃত বলয় গঠন পরীক্ষাটির কোনও ব্যাখ্যা পাওয়া যায় না। তাছাড়া হাইগেনসের তত্ত্বদ্বারা প্রতিসরণের ব্যাখ্যা করতে হলে ধরতে হয় যে আলোকের বেগ ঘনতর মাধ্যমের চেয়ে শূন্য মাধ্যমেই বেশী। আমরা বর্তমানে জানি যে শূন্য মাধ্যমেই আলোকের বেগ সর্বোচ্চ এবং অন্যকোনও ঘনতর মাধ্যমে এই বেগ শূন্য মাধ্যমে বেগের চেয়ে অনেক কম। এথেকে আমরা এখন এই সিদ্ধান্তে পৌঁছাতে পারি যে হাইগেনসের তরঙ্গ তত্ত্বই বরং ঠিক এবং নিউটনের করপাস্কুল তত্ত্বই ভুল। কিন্তু নিউটনের সময়ে বিভিন্ন ঘন মাধ্যমে আলোকের বেগ সম্বন্ধে কোনও ধারণা ছিল না (একমাত্র রোমার নির্ণীত শূন্য মাধ্যমে বেগের আসন্ন মান ছাড়া)। আলোকের ব্যতিচার ধর্ম তখনও আবিষ্কৃত হয়নি। তাছাড়া হাইগেনসের তত্ত্বে আলোক তরঙ্গের স্বরূপ, এর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য, বেগ এবং শূন্য মাধ্যমে কিরূপে এই তরঙ্গ উৎপন্ন হয়, সে বিষয়ে কোনও উল্লেখ নেই। এর উপর নিউটন ছিলেন সে যুগের সর্বশ্রেষ্ঠ বিজ্ঞানী। সেজন্য হাইগেনসের চেয়ে নিউটনের তত্ত্বই সেযুগে অধিকতর মর্যাদা লাভ করে।

### 8.3.4 আলোকের ব্যবর্তন ও ব্যতিচার (Diffraction and Interference of light)

1801 খ্রীষ্টাব্দে টমাস ইয়ং (Thomas Young) একটি পরীক্ষা করেন। এই পরীক্ষায় সূর্যের আলোক A পর্দার একটি ক্ষুদ্র ছিদ্র S (চিত্র 8.3.1)-র মধ্যদিয়ে গিয়ে B পর্দার ওপর আপতিত হয়। B পর্দাটি A পর্দার সমান্তরাল এবং এর ওপর দুটি ক্ষুদ্র ছিদ্র S<sub>1</sub> ও S<sub>2</sub> পরস্পরের কাছাকাছি এবং S থেকে সমান দূরত্বে আছে। B পর্দার পিছনে C আর একটি সমান্তরাল পর্দা। যদি সূর্যের সমান্তরাল রশ্মিগুলি A পর্দার ওপর লম্বভাবে আপতিত হয়, তবে নিউটনের করপাস্কুল তত্ত্ব অনুযায়ী যে রশ্মিগুলি S ছিদ্রের মধ্যদিয়ে যায়, সেগুলি B পর্দার S<sub>1</sub> ও S<sub>2</sub> ছিদ্রদুটির মধ্যবর্তী অংশে বাধা পাবে এবং S<sub>1</sub> ও S<sub>2</sub>-র মধ্যদিয়ে কোনও রশ্মিই C পর্দার দিকে যেতে পারবে না। সুতরাং C পর্দাটি সম্পূর্ণ অন্ধকার থাকবে। কিন্তু ইয়ং-এর পরীক্ষায় দেখা যায় যে আলোক প্রকৃতপক্ষে B পর্দারদ্বারা বাধাপ্রাপ্ত না হয়ে S<sub>1</sub> ও S<sub>2</sub>-র মধ্যদিয়ে যায় এবং C পর্দার ওপর কোথাও আলোক, কোথাও অন্ধকারের ঝালরের বিন্যাস বা নকশা তৈরী করে। এই নকশার অন্তর্গত আলোক ও অন্ধকারের ঝালরগুলিকে ব্যতিচার ঝালর (Interference fringes) বলে। ব্যতিচার ঝালরগুলি নিউটনের করপাস্কুল তত্ত্বের ব্যর্থতা ও হাইগেনসের তত্ত্বের সত্যতা প্রমাণিত করে। কারণ হাইগেনসের তত্ত্ব অনুযায়ী আলোক S ছিদ্রের মধ্যদিয়ে গেলে ছিদ্রটি একটি বিন্দু উৎসরূপে ক্রিয়া করবে এবং আলোকের গোলাীয় তরঙ্গমুখ S থেকে B পর্দার দিকে বিস্তৃত হবে। কোনও ক্ষুদ্র ছিদ্র বা বাধার প্রাপ্ত অতিক্রম করার সময় আলোকের এরূপ বেকে যাওয়া বা ছড়িয়ে পড়াকে ব্যবর্তন (diffraction) বলে। S ছিদ্রের মধ্যদিয়ে বিস্তৃত তরঙ্গ মুখ S<sub>1</sub> ও S<sub>2</sub> ছিদ্রের ওপর আপতিত হয় এবং এই দুটি ছিদ্র থেকে একইভাবে ব্যবর্তিত দুটি ভিন্ন তরঙ্গমুখ উৎপন্ন হয়ে C পর্দার দিকে বিস্তৃত হয়। এরফলে দুটি তরঙ্গমুখের পরস্পরের ওপর উপরিপাতন (Superposition) ঘটে। এই উপরিপাতনকে ব্যতিচার (interference) বলে। তরঙ্গের সমীকরণ দ্বারা দেখানো যায় যে দুটি তরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে পর্দার ওপর ব্যতিচার কোথাও গঠনকার (constructive) আবার কোথাও বিনাশকর (destructive) হয়।



গঠনকর ব্যতিচারের ফলে সর্বোচ্চ আলোক ও বিনাশকর ব্যতিচারের ফলে সর্বনিম্ন আলোক (অনালোক বা অন্ধকার)-এর অঞ্চল বা ঝালর তৈরী হয়।



চিত্র 8.3.1 আলোকের ব্যবর্তন ও ব্যতিচার

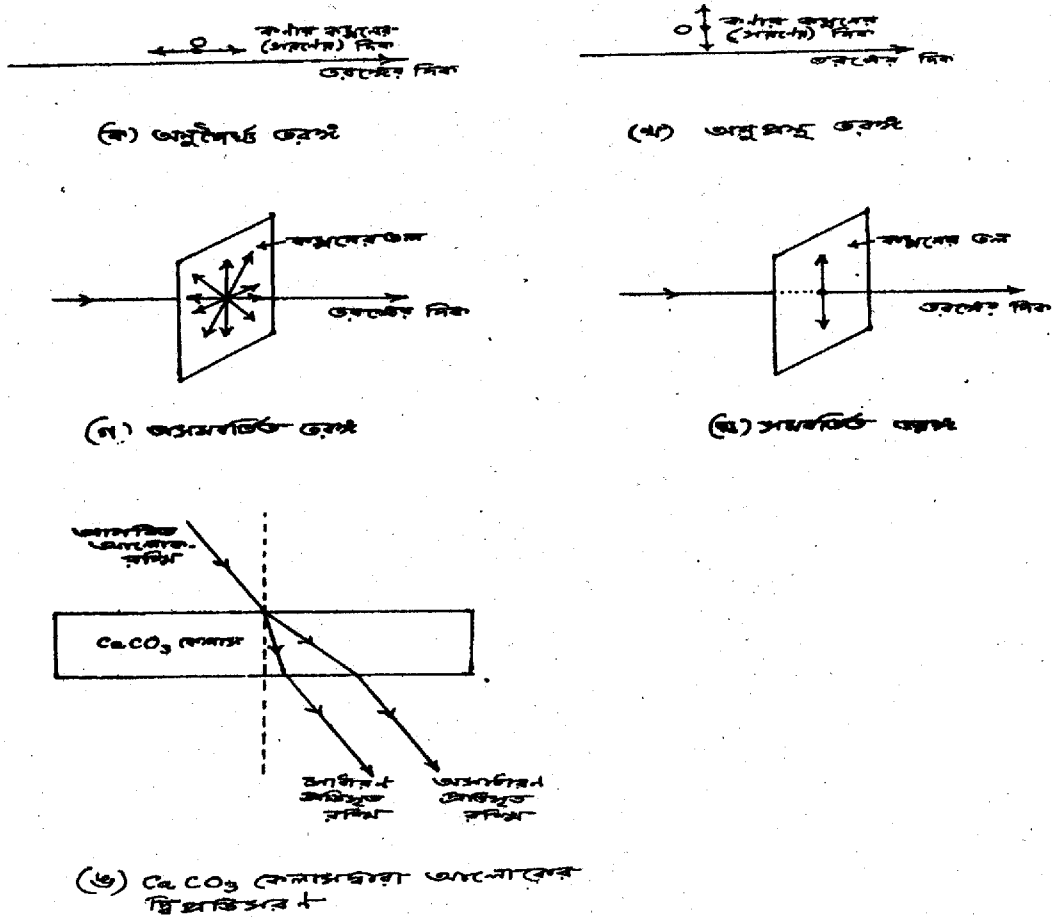
ইয়ং দুটি ঝালরের ব্যবধান থেকে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য (wave length) পরিমাপ করতে সমর্থ হন। এভাবেই আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রথম পরিমাপ করা সম্ভব হয়। দেখা যায় যে এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য বর্ণের ওপর নির্ভরশীল। ইয়ং এর পরিমাপ অনুযায়ী বর্ণালির লাল বর্ণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য সবচেয়ে বেশী (প্রায়  $\frac{1}{36,000}$  inch) এবং বেগুনি বর্ণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য সবচেয়ে কম (প্রায়  $\frac{1}{60,000}$  inch)। এই পরিমাপ বর্তমান পরিমাপের সঙ্গে বেশ সঙ্গতিপূর্ণ।

হাইগেনসের তরঙ্গ তত্ত্বের পূর্বেই ফ্রেন্সেস্কো মারিয়া গ্রিমাল্ডি (Francesco Maria Grimaldi, 1618—1663) নামে একজন বিজ্ঞানী আলোকের ব্যবর্তন আবিষ্কার করেন। কিন্তু আশ্চর্যের বিষয় হাইগেনস এবং নিউটন উভয়েই এই আবিষ্কারটিকে সম্পূর্ণ উপেক্ষা করেন। পরে ফ্রেনেল (Augustin Jean Fresnel, 1788—1827) 8.3.4। চিত্রের অনুরূপ একটি পরীক্ষায় দেখেন যে  $S$  ছিদ্রের মধ্যদিয়ে যাওয়ার সময় আলোকরশ্মি সরলরেখিক পথে না গিয়ে ব্যবর্তনের ফলে চারদিকে ছড়িয়ে পড়ে। ফলে  $B$  পর্দাটি সরিয়ে দিলে  $C$  পর্দার কেন্দ্রে সর্বোচ্চ এবং কেন্দ্র থেকে যত দূরে যাওয়া যায় তত কম তীব্রতার আলোক পাওয়া যায়। ফ্রেনেল হাইগেনের তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী এই তীব্রতার মান গণনা করে দেখেন যে তা পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ। সুতরাং ব্যবর্তন যে তরঙ্গ তত্ত্বেরই ফল তা প্রমাণিত হয়।

শব্দ তরঙ্গের ক্ষেত্রেও ব্যবর্তন ও ব্যতিচার লক্ষ করা যায়। ব্যবর্তন ও ব্যতিচার তরঙ্গ তত্ত্ব ভিন্ন আর কোনওভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না। সুতরাং আলোক যে অবশ্যই একটি তরঙ্গ, সে বিষয়ে কোনও সংশয় থাকে না।

### 8.3.5 আলোকের সমবর্তন (Polarization of Light)

ফ্রেনেল এবং এরাগো (Dominique—Francois Arago, 1786—1853) 1817 খ্রীষ্টাব্দ নাগাদ আলোকের এমন একটি ধর্ম আবিষ্কার করেন যা কেবল অনুপ্রস্থ (trans verse) তরঙ্গের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। এই বিজ্ঞানীগণ লক্ষ করেন যে সাধারণ আলোকের একটি সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ একটি কেলসাইট ( $\text{CaCO}_3$ ) কেলাসের (crystal) ওপর আপতিত হলে রশ্মিগুচ্ছটি দু'ভাগে বিভক্ত হয়ে কেলাস থেকে নির্গত হয়। একভাগের রশ্মিগুলিকে বলা হয় সাধারণ রশ্মি (ordinary rays), কারণ এই রশ্মিগুলির প্রতিসরণ স্নেলের সূত্র অনুযায়ী হয়। কিন্তু অন্যভাগের রশ্মিগুলি স্নেলের সূত্র অনুসরণ করে না, পরিবর্তে অন্য সূত্র অনুসরণ করে। এজন্য এই রশ্মিগুলিকে বলা হয় অসাধারণ (extraordinary) রশ্মি। কেলসাইট কেলাসদ্বারা প্রতিসরিত রশ্মির এরূপ বিভক্তিকরণকে বলা হয় দ্বিপ্রতিসরণ (Double Réfractions) (চিত্র 8.3.2)।



চিত্র 8.3.2 আলোকের সমবর্তন

দ্বিপ্রতিসরিত রশ্মিগুলি সুসঙ্গত (coherent), কিন্তু এসঙ্গেও এদের ব্যতিচার হয় না। ইয়ং এথেকে সিদ্ধান্ত করেন যে আলোক তরঙ্গের কম্পন অনুপ্রস্থ, অর্থাৎ কম্পনশীল কণাগুলির সরণ (একটি ভেক্টর) সর্বদা তরঙ্গের গতির অভিমুখের সঙ্গে সমকোণে (90°) থাকে। ইয়ং অনুপ্রস্থ তরঙ্গকে সমবর্তিত (polarized) ও অসমবর্তিত (unpolarized) এই দুই শ্রেণীতে ভাগ করেন। যখন অনুপ্রস্থ কম্পনশীল কণাগুলির সরণ পরস্পরের সঙ্গে বিভিন্ন দিকে বা বিভিন্ন তলে থাকে, তখন ঐ তরঙ্গকে অসমবর্তিত বলা হয়। সাধারণ আলোক একরূপ অসমবর্তিত অনুপ্রস্থ তরঙ্গ। কিন্তু যখন অনুপ্রস্থ কম্পনশীল কণাগুলির সরণ একটি নির্দিষ্ট দিকে বা একই সমতলে থাকে, তখন ঐ অনুপ্রস্থ তরঙ্গকে সমবর্তিত বা সমতল সমবর্তিত (plane polarized) তরঙ্গ বলে। পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করা যায় যে দ্বিপ্রতিসরণে কেলসাইট কেলসারের ওপর আপতিত রশ্মিগুচ্ছ অসমবর্তিত, কিন্তু প্রতিসরণের পর সাধারণ রশ্মিগুচ্ছ এবং অসাধারণ রশ্মিগুচ্ছ উভয়ই সমতল সমবর্তিত রশ্মিগুচ্ছ পরিণত হয় এবং এই দুই রশ্মিগুচ্ছের সমবর্তনের সমতল দুটি পরস্পরের সঙ্গে সমকোণে (90°) থাকে। ইয়ং এর ব্যাখ্যা অনুযায়ী এজন্যই এই দুই রশ্মিগুচ্ছের মধ্যে ব্যতিচার হয় না। অনুপ্রস্থ তরঙ্গের সমবর্তিত হওয়ার ধর্মকেই ইয়ং সমবর্তন (polarization) অ্যাখ্যা দেন (চিত্র 8.3.2)।

আলোকের সমবর্তন নানা পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করা যায়। পক্ষান্তরে দেখা যায় যে শব্দ-তরঙ্গের সমবর্তন ধর্ম নেই। শব্দ তরঙ্গে কম্পনশীল কণাগুলির সরণ সর্বদা শব্দের গতির অভিমুখের সঙ্গে সমান্তরাল থাকে। এইরূপ কম্পনকে অণুদৈর্ঘ্য (longitudinal) কম্পন এবং তরঙ্গকে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ বলে। অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের সমবর্তন হয় না। এজন্যই শব্দের সমবর্তন পাওয়া যায় না।

### 8.3.6 ফ্রেনেলের ইথার তত্ত্ব (Fresnel's Ether Theory)

আলোকের তরঙ্গধর্মগুলি এভাবে প্রতিষ্ঠিত হওয়ার পর স্বভাবতই নিউটনের করপাসকুল তত্ত্বের অবসান ঘটে এবং ফ্রেনেল হাইগেনসের ইথারতত্ত্বকে পরিমার্জিতরূপে পুনঃ প্রতিষ্ঠা করেন। ফ্রেনেলের ইথার তত্ত্ব বলা হয় যে বস্তু ও মহাশূন্য ইথারদ্বারা পরিপূর্ণ এবং এবং এই ইথারের কণাগুলি যখন সরল দোলনে কম্পিত হতে থাকে, তখন এদের সরণের অভিলম্ব দিকে আলোক তরঙ্গের বিস্তার ঘটে।

কিন্তু ফ্রেনেলের এই তত্ত্বের পরই এই তত্ত্বের বিরুদ্ধে আপত্তি উঠতে থাকে। কারণ সে সময়ে আলোকের বেগ মোটামুটি নির্ভুলভাবে জানা গেছে। তা হল  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ । কাজেই ইথার মাধ্যমে তরঙ্গের বেগের ক্ষেত্রে পূর্বে আলোচিত নিউটনের সূত্র

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

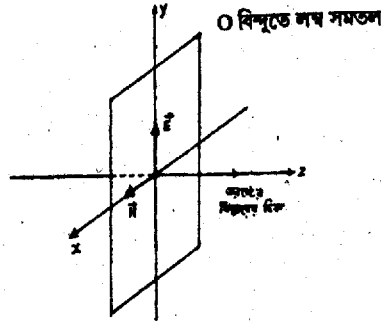
ব্যবহার করলে দেখা যায়  $v$ -এর মান  $c$ -র মানের সমান হতে গেলে ইথারের স্থিতিস্থাপন গুণক ( $E$ ) স্টীলের স্থিতিস্থাপকগুণকের চেয়েও বহুগুণ বেশী এবং ঘনত্ব ( $\rho$ ), সবচেয়ে হালকা হাইড্রোজেন গ্যাসের চেয়েও বহুগুণ কম হওয়া প্রয়োজন, যা বাস্তব সম্ভব মনে হয় না। অপর দিকে ইথারের তরঙ্গ অনুপ্রস্থ হতে গেলে মাধ্যমটি অত্যন্ত দৃঢ়, স্থিতিস্থাপক ও কঠিন হওয়া প্রয়োজন। কাজেই, ইথারের একইসঙ্গে এইরূপ পরস্পর-বিরোধী ধর্ম কিভাবে থাকতে পারে, তা ভাবা যায় না।

উনিশ শতকের মধ্যভাগে ম্যাক্সওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব ফেনেলের বস্তুতাত্ত্বিক ইথার তত্ত্বের ত্রুটিগুলি দূর করতে সক্ষম হয়।

### 8.3.7 ম্যাক্সওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ তত্ত্ব (Maxwell's Electromagnetic Wave Theory)

1864 খ্রীষ্টাব্দে ম্যাক্সওয়েল (James Clerk Maxwell, 1831—1879) প্রমাণ করেন যে একটি অপরিবাহী মাধ্যমে তড়িৎক্ষেত্রের পরিবর্তন তলে একটি তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন হয় এবং তা পরিবাহীর মধ্যদিয়ে যে তড়িৎ প্রবাহ যায়, তার মতো একইভাবে প্রবাহের চারদিকে একটি চৌম্বক আবেশক্ষেত্র উৎপন্ন করে। ম্যাক্সওয়েল তাঁর আবিষ্কৃত এই প্রবাহের নাম দেন 'অংশ প্রবাহ' (displacement current)। অতঃপর ম্যাক্সওয়েল তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট গাউসের দুটি সূত্র (Gauss's laws for electricity and magnetism), তাঁর অংশ প্রবাহ যোগে অ্যাম্পিয়ারের বর্ধিত সূত্র (Ampere's law as extended by Maxwell) ও ফ্যারাডের আবেশের সূত্র (Faradays's laws of induction) একত্রিত করে চারটি সমীকরণ গঠন করেন যেগুলি কোনও মাধ্যমে তড়িৎ ও চুম্বকীয় ক্ষেত্রের যৌথ ক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। ম্যাক্সওয়েলের এই চারটি সমীকরণকে তাঁর তড়িচ্চুম্বকীয় ক্ষেত্রের সমীকরণ (Maxwell's equations of electromagnetic field) বলা হয়, যেগুলি পরবর্তীকালে নিউটনের গতিবিদ্যার সমীকরণগুলির মতোই মৌলিক ও মূল্যবানরূপে বিবেচিত হয়।

1865 খ্রীষ্টাব্দে ম্যাক্সওয়েল তাঁর সমীকরণগুলির সাহায্যে প্রমাণ করেন যে শূন্যমাধ্যমে তড়িচ্চুম্বকীয় ক্ষেত্রে কোনও কম্পন ঘটলে একটি তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন হয়, যার প্রতিবিন্দুতে তড়িৎ ও চুম্বকীয় ভেক্টর দুটি (এই ভেক্টর দুটি আসলে হল তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য  $E$  এবং চুম্বকীয় ক্ষেত্রপ্রাবল্য  $H$ ) তরঙ্গের-বিস্তারের অভিমুখের সঙ্গে সমকোণে অঙ্কিত সমতলের ওপর পরস্পরের লম্ব (চিত্র 8.3.3) এবং



চিত্র 8.3.3 তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের বিস্তার

$$\text{এই তরঙ্গের বেগ হল } c = \frac{1}{\sqrt{k_0 \mu_0}} \quad \dots \dots (8.3.2)$$

যেখানে  $k_0$  এবং  $\mu_0$  হল যথাক্রমে শূন্য মাধ্যমের আপেক্ষিক প্রবেশ্যতা (Specific inductive capacity) ও ভেদ্যতা (permeability) ম্যাক্সওয়েল (8.3.2) সমীকরণে  $k_0$  ও  $\mu_0$ -র পরীক্ষা লব্ধ মান বসিয়ে দেখতে পান যে

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec.}$$

আপনি নিশ্চয় লক্ষ্য করবেন যে এই মান আলোকের বেগের সমান। এ থেকে ম্যাক্সওয়েল সিদ্ধান্ত করেন যে আলোক বস্তুতপক্ষে একপ্রকার তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ। ম্যাক্সওয়েল আরও লক্ষ্য করেন যে  $E$  ও  $H$  ভেক্টর দুটি সর্বদাই পরস্পরের লম্ব এবং এই দুটি ভেক্টর সর্বদা যুগ্মভাবে থাকে। সুতরাং এই দুটি ভেক্টরের যেকোনও একটির দ্বারাই তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গকে প্রকাশ করা যায়। ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বে  $E$  বা  $H$  ভেক্টরের কম্পনের ফলেই তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন হয়। কিন্তু এই ভেক্টর সর্বদা তরঙ্গের গতিমুখের সঙ্গে সমকোণে থাকে। সুতরাং তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ একটি অনুপ্রস্থ তরঙ্গ। তাছাড়া দেখা যায় যে তরঙ্গের  $E$  (বা  $H$ ) ভেক্টরগুলির দিক এক অর্থাৎ এই ভেক্টরগুলি একই সমতলে কম্পিত হয়। সুতরাং তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গগুলি হল সমতল সমবর্তিত।

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণদ্বারা আলোকের সরলরৈখিক গতি, প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যবর্তন, ব্যতিচার ও সমবর্তন ধর্মগুলির সন্তোষজনক ব্যাখ্যা পাওয়া যায়। তাছাড়া এই তত্ত্বে শূন্যকে বস্তুতাত্ত্বিক ইথার মাধ্যমের পরিবর্তে কম্পনশীল  $E$  ও  $H$  ভেক্টরের তড়িচ্চুম্বকীয় মাধ্যমরূপে ভাবা যায়। সুতরাং ফ্রেনেলের ইথার মাধ্যমের প্রকল্পের অসুবিধাগুলি ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বদ্বারা দূর হয়। ফলে ম্যাক্সওয়েলের আলোকের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব সকলের নিকট সহজেই গ্রহণযোগ্য হয়।

ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বের প্রায় 20 বৎসরপর আনুমানিক 1888 খ্রীষ্টাব্দে হার্টজ (Heinrich Hertz) পরীক্ষাগারে দুটি উচ্চ বিভব পার্থক্যযুক্ত তড়িৎ-দ্বারের মধ্যে স্ফুলিঙ্গ (spark) উৎপাদন করে প্রমাণ করেন যে ঐ সঙ্গে দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য-সম্পন্ন তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গও উৎপন্ন হয়। এই তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গগুলির পরবর্তীকালে নাম হয় রেডিও-ওয়েভস (Radio waves) এবং এগুলিকে আমরা বেতার তরঙ্গ বলে থাকি। এই বেতার তরঙ্গের সাহায্যেই পরবর্তীকালে মার্কনি (Guglielmo Marconi, 1874—1937) এবং জগদীশচন্দ্র (Acharya Jagadish Chandra Bose, 1858—1937) বেতার সংকেত প্রেরণ কৌশল (Wireless telegraphy) উদ্ভাবন করেন। 1909 খ্রীষ্টাব্দে এজন্য মার্কনিকে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

পরবর্তীকালে প্রমাণিত হয় যে এক্স-রশ্মি, গামা-রশ্মি, অতিবেগুনীরশ্মি এবং অবলোহিত রশ্মিগুলিও তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ, তবে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি বিভিন্ন। নীচের (8.3.1) সারণীতে আপনি বিভিন্ন তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য ও কম্পাঙ্কের মোটামুটি সীমা লক্ষ্য করতে পারেন, তবে এই সীমা সুনির্দিষ্ট নয়। প্রসঙ্গত একটি বিষয় মনে রাখা প্রয়োজন যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য ( $\lambda$ ) ও কম্পাঙ্কের ( $\nu$ ) গুণফলই হল তরঙ্গের বেগ ( $c$ )। সুতরাং আপনি যদি তরঙ্গের তরঙ্গ দৈর্ঘ্য ও বেগ জানেন, তবে এর কম্পাঙ্ক নীচের সূত্রদ্বারা সহজেই গণনা করতে পারেন।

$$\text{অর্থাৎ } \nu = \frac{c}{\lambda} \quad \dots \dots (8.3.3)$$

### সারণী 8.3.1

বিভিন্ন তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ তালিকা (বর্ণালি)

নাম	তরঙ্গদৈর্ঘ্য (মিটার)	কম্পাঙ্ক (হার্টজ)
বেতার তরঙ্গ	$10^6 - 0.1$	$3 \times 10^2 - 3 \times 10^9$
মাইক্রোওয়েভ	$0.1 - 10^{-3}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$

নাম	তরঙ্গদৈর্ঘ্য (মিটার)	কম্পাঙ্ক (হার্টজ)
অবলোহিতরশ্মি	$10^{-3} - 8 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{11} - 3.75 \times 10^{14}$
(দৃশ্য) আলোক	$8 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$
অতিবেগুনরশ্মি	$4 \times 10^{-7} - 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
এক্স-রশ্মি	$10^{-8} - 10^{-11}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$
গামা-রশ্মি	$10^{-11} - 10^{-13}$	$3 \times 10^{19} - 3 \times 10^{21}$

তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিভিন্ন একক,  $1\text{Å}^\circ$  (আর্মস্ট্রং) =  $10^{-10}$  m,  $1 \times U$  (এক্সএকক) =  $10^{-13}$  m  
কম্পাঙ্কের বিভিন্ন একক,  $1\text{H}$  (হার্টজ) = 1 cps (সাইকেল পার সেকেন্ড),  $1\text{KH}$  (কিলোহার্টজ) =  $10^3$  H,  
 $1\text{MH}$  (মেগা হার্টজ) =  $10^6$  H

### 8.3.8 তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের কয়েকটি সিদ্ধান্ত (conclusions of the electromagnetic theory)

তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে তিনটি গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত করা যায়। পরীক্ষার মাধ্যমে এই সিদ্ধান্তগুলির যথার্থতা পরীক্ষা করে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের সীমা নির্দিষ্ট করা যায়।

(a) বিভিন্ন ধরনের বিকীর্ণ তরঙ্গের সময় সাধন (unification of different types of radiations) :

(8.3.1) সারণীতে বেতার তরঙ্গ থেকে গামা-রশ্মি পর্যন্ত যে বিভিন্ন ধরনের বিকীর্ণ রশ্মির উল্লেখ আছে, এগুলির সবই এক অভিন্ন প্রকৃতির তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গরূপে প্রমাণিত হয়। তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব আবিষ্কারের ফলেই এই সমন্বয়সাধন সম্ভবপর হয়েছে। সুতরাং এটি তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের এক বিরাট সাফল্য, যা আর কোনওভাবে সম্ভব ছিল না।

(b) ত্বরিত আধান অবশ্য শক্তি বিকীর্ণ করে (An accelerated charge must radiate energy) :

তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের এটিও একটি বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত। পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে একটি ইলেকট্রন তড়িৎক্ষেত্র বা চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা ত্বরিত বা মন্দন লাভ করলে, ইলেকট্রন শক্তি বিকীর্ণ করে এবং বিকীর্ণ শক্তির মান সাধারণভাবে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের দ্বারা গণনাকৃত মানের সমান হয়। এ থেকে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের সত্যতা প্রমাণিত হয়। কিন্তু দেখা যায় যে কিছু বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্রে এই সিদ্ধান্তের ব্যতিক্রম হয়। এরূপ দুটি বিশেষ ক্ষেত্র হল :

(i) এক্স-রশ্মির উৎপত্তি ও (ii) পরমাণুর স্থির কক্ষপথে ইলেকট্রনের আবর্তন।

(i) এক্স-রশ্মির উৎপত্তি : একটি ক্যাথোড রশ্মির নলে ইলেকট্রনের ত্বরিত ঘটালে, তা উচ্চ বেগে অ্যানোড পৃষ্ঠে গিয়ে আঘাত করে এবং বেগশূন্য হয়। ইলেকট্রনের এই মন্দনের ফলে শক্তি এক্স-রশ্মিরূপে বিকীর্ণ হয়।

তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের দ্বারা এই শক্তির পরিমাণ গণনা করলে দেখা যায় যে তা পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সম্পূর্ণ মেলে না।

(ii) পরমাণুর কেন্দ্রে একটি ধনাত্মক আধানযুক্ত ভারি নিউক্লিয়াস (কেন্দ্রক) থাকে এবং একে ঘিরে পরমাণুর অভ্যন্তরে উপস্থিত ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন স্থির কক্ষপথে আবর্তন করে। নিউক্লিয়াসের ধনাত্মক আধান ও ইলেকট্রনের ঋণাত্মক আধারে মধ্যে যে আকর্ষণ বল ক্রিয়া করে, তার জন্যই ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন কক্ষপথে আবর্তন করে। কিন্তু এই আবর্তনের ফলে প্রত্যেক ইলেকট্রনের ওপরই একটি অভিকেন্দ্রিক ত্বরণ ক্রিয়া করে। এই অভিকেন্দ্রিক ত্বরণের ফলে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনটির শক্তি বিকীর্ণ হবে এবং এর কক্ষপথের ব্যাসার্ধ ক্রমশ কমতে থাকবে। এভাবে ইলেকট্রনের শক্তি কমতে কমতে এক সময় তা শূন্য হবে এবং ইলেকট্রনটি নিউক্লিয়াসের ওপর পড়বে। সুতরাং ইলেকট্রনগুলির শেষপর্যন্ত কোনও কক্ষপথই থাকবে না, যা পরমাণুর গঠন তত্ত্বের সম্পূর্ণ বিরোধী। সুতরাং পরমাণুর গঠনে ইলেকট্রনের স্থির (Stable) কক্ষের শর্ত আরোপ করতে হলে, তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের ত্বরণশীল আধানদ্বারা শক্তি বিকিরণের সিদ্ধান্ত অস্বীকার করতে হয়, এবং এটিই বোহরের হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্বের ভিত্তি।

(c) ক্রিয়ার নিরবচ্ছিন্নতা (continuity of action)

তড়িচ্চুম্বকীয় ক্ষেত্রের তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টর ( $E$ ) ও চৌম্বকক্ষেত্র ভেক্টর ( $H$ ) সময়ের সঙ্গে নিরবচ্ছিন্নভাবে পরিবর্তিত হয়। ফলে এই তত্ত্ব অনুযায়ী তড়িচ্চুম্বকীয় শক্তি সর্বদা নিরবচ্ছিন্নভাবে প্রবাহিত হবে। কিন্তু প্লাঙ্ক ও আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্বের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের এই সিদ্ধান্তকে অস্বীকার করা হয়েছে।

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে কোনও কোনও ক্ষেত্রে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে সঠিক সিদ্ধান্ত পাওয়া যায় না। কিন্তু তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের এই দুর্বলতাগুলি সত্ত্বেও এর সাফল্যগুলির গুরুত্ব কখনও অস্বীকার করা যায় না। বিশেষত তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গতত্ত্ব ছাড়া আলোকের ব্যবর্তন, ব্যতিচার ও সমবর্তনের সম্পূর্ণ সন্তোষজনক ব্যাখ্যা আর কোনভাবে পাওয়া যায় না।

## অনুশীলনী—2

- অনুশীলনী 8.3.1 ফারমাটের নীতিটি বলুন। এই নীতির দ্বারা কি প্রমাণ করা যায় ?
- অনুশীলনী 8.3.2 নিউটনের করপাসকল তত্ত্ব কি? এই তত্ত্ব কেন গ্রহণযোগ্য নয় ?
- অনুশীলনী 8.3.3 হাইগেনের তত্ত্ব কি? ইয়ং এর পরীক্ষাদ্বারা হাইগেনের তত্ত্ব কিভাবে সমর্থিত হয় ?
- অনুশীলনী 8.3.4 তড়িচ্চুম্বকীয় বর্ণালিতে বিভিন্ন রশ্মিগুলির নাম ও এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সীমা নির্দেশ করুন।
- অনুশীলনী 8.3.5 তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বদ্বারা সমবর্তন কিভাবে ব্যাখ্যা করা যায় ?

## 8.4 তরঙ্গের কোয়ান্টাম তত্ত্ব (Quantum Theory of Wave)

পূর্ব অনুচ্ছেদে আপনি জেনেছেন যে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বদ্বারা ক্যাথোড নলে উৎপন্ন এক্স-রশ্মির শক্তি, পরমাণুর অভ্যন্তরে ইলেকট্রনের স্থির কক্ষপথ ও তরঙ্গের বিচ্ছিন্নতা ব্যাখ্যা করা যায় না। কৃষ্ণবস্তুর দ্বারা তাপের বিকিরণ পরীক্ষায়ও তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের অনুরূপ ত্রুটি ধরা পড়ে এবং প্রায় প্রথম তাঁর কোয়ান্টাম তত্ত্বদ্বারা এই ত্রুটি দূর করেন। আইনস্টাইন, বোহর, কম্পটন প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ পরে এই তত্ত্বকে অন্যান্য ক্ষেত্রে প্রয়োগ করেন। এখানে আমরা এই কোয়ান্টাম তত্ত্বের উদ্ভব ও বিভিন্ন ক্ষেত্রে প্রয়োগ সংক্ষেপে আলোচনা করব।

### 8.4.1. কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ ও প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্ব (Blackbody Radiation and Planck's Quantum Theory)

সকল বস্তু সমানভাবে তাপ বিকিরণ বা শোষণ করে না। বিকীর্ণ (বা শোষিত) তাপের তরঙ্গদৈর্ঘ্যও বিভিন্ন। যে বস্তু সকল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তাপ সম্পূর্ণ শোষণ করে তাকে কৃষ্ণবস্তু (Blackbody) বলে। কিরশফের সূত্র (Kirchoff's law, 1859) অনুযায়ী একটি প্রকৃত কৃষ্ণবস্তু শীতল অবস্থায় যেমন সকল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তাপ সম্পূর্ণ শোষণ করে, উত্তপ্ত অবস্থায় তেমনি সকল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তাপ সম্পূর্ণ বিকীর্ণ করে এবং তাপের এই বিকিরণের পরিমাণ কেবল বস্তুর উষ্ণতার ওপর নির্ভর করে।

1884 খ্রীষ্টাব্দে স্টিফান ও বোলটজম্যান (Stefan and Boltzmann) তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব ও তাপগতিবিদ্যা (thermodynamics) প্রয়োগ করে প্রমাণ করেন যে কৃষ্ণবস্তু থেকে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে বিকিরণ হয়, তার মোট ঘনত্ব ( $\nu$ ), (অর্থাৎ একক আয়তনে বিকিরণ শক্তির মোট পরিমাণ), পরম উষ্ণতা ( $T$ )-র চতুর্থ ঘাতের সমানুপাতিক। অর্থাৎ

$$\nu = \sigma T^4 \quad \dots \dots (8.4.1)$$

এই সূত্রকে স্টিফান বোলটজম্যানের সূত্র এবং  $\sigma$  (সিগমা)-কে স্টিফান বোলটজম্যানের ধ্রুবক বলা হয়। পরীক্ষার দ্বারা স্টিফান-বোলটজম্যানের সূত্র নির্ভুল প্রমাণিত হয়। কিন্তু এই সূত্রদ্বারা কোনও উষ্ণতায় বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ঘনত্ব কিভাবে বন্টিত থাকে, তা জানা না। এজন্য ভিয়েন (Wilhelm Wien, 1864—1928) তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ তত্ত্ব, তাপগতিবিদ্যা ও ম্যাক্সওয়েলের আণবিক বেগ বন্টন সূত্র (Maxwell's law of molecular velocity distribution) প্রয়োগ করে একটি সূত্র প্রমাণ করেন, যা ভিয়েনের সূত্র (Wien's formula) নামে পরিচিত। সূত্রটি এরূপ

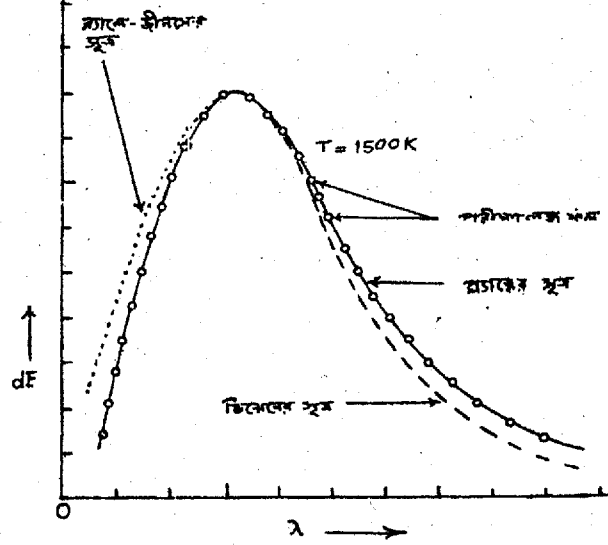
$$dE = k\lambda^{-5} e^{-a/\lambda T} d\lambda \quad \dots \dots (8.4.2)$$

ভিয়েনের এই সূত্রে  $E$  হল কৃষ্ণবস্তুর একক তল থেকে প্রতি সেকেন্ডে মোট যে পরিমাণ তাপ বিকীর্ণ হয়, এবং  $dE$  হল কেবল  $\lambda$  ও  $\lambda + d\lambda$ -র মধ্যবর্তী তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলির জন্য  $E$ -র অংশ। এই সূত্রে  $k$  ও  $a$  হল দুটি ধ্রুবক।

ভিয়েনের সূত্রটি পরীক্ষার জন্য পাশেন, লুমার, প্রিংসহাইম, রুবেনস, কার্লবাউম প্রভৃতি (Paschen, Lummer, Pringsheim, Rubens, Karlbaum) বসু বিজ্ঞানী উদ্যোগ গ্রহণ করেন এবং তাঁদের প্রচেষ্টায়  $\lambda$  ও  $dE$ -র মধ্যে বিভিন্ন উষ্ণতায় বহু বক্রের লেখচিত্র পাওয়া যায়। এই বক্রগুলিকে কৃষ্ণবস্তুর বিকীর্ণ তাপের বন্টন বর্ণালি (Distribution spectrum of blackbody radiation) বলে। (8.4.1) চিত্রে প্রায় 1500  $k$  উষ্ণতায় যে বক্র পাওয়া যায়, তার লেখচিত্রের নমুনা দেখানো হল। চিত্রে ছোটছোট বৃত্তের দ্বারা পরীক্ষা লব্ধ ফল এবং ড্যাশ চিহ্নযুক্ত



রেখাছারা (8.4.2) সমীকরণটির অঙ্কন দেখানো হল। দেখা যাচ্ছে যে কম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে পরীক্ষা লব্ধ ফলের সঙ্গে ভিয়েনের সূত্র সম্পূর্ণ মিলে যায়, তবে অধিক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে ভিয়েনের সূত্র পরীক্ষালব্ধ বক্র থেকে ক্রমশই পৃথক হয়ে যায়। অন্যান্য উষ্ণতার বক্রের ক্ষেত্রেও এরূপ একই পার্থক্য দেখা যায়। ভিয়েনের সূত্রের আরেকটি ত্রুটি হল যে  $T \rightarrow \infty$  ধরলে  $E$ -র একটি নির্দিষ্ট মান পাওয়া যায়। কিন্তু স্টিফান-বোলট্জম্যান সূত্র অনুযায়ী এই মান  $\infty$  (অসীম) হওয়ার কথা।



চিত্র 8.4.1 কৃষ্ণবস্তুর দ্বারা বিকীর্ণ তাপের বর্ণালি

ভিয়েনের সূত্রের ত্রুটিগুলি সত্ত্বেও এই সূত্রটিকে তাপের বিকিরণ আলোচনার একটি উল্লেখযোগ্য অবদান হিসাবে গণ্য করা হয়, এবং এজন্য 1911 খ্রীষ্টাব্দে ভিয়েনকে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

ভিয়েনের সূত্রের এই ত্রুটিগুলি দূর করার জন্য 1900 খ্রীষ্টাব্দে র্যাল-জীনস (Rayleigh and Jeans) ম্যাক্সওয়েলের বেগ বন্টন সূত্রের পরিবর্তে পরিসংখ্যান তত্ত্ব প্রয়োগ করে ভিয়েনের সূত্রের নিম্নলিখিত পরিমার্জিত রূপ পান।  $dE = B\lambda^{-4} T e^{-a/\lambda T} d\lambda$  ... (8.4.3)

এই সূত্রে  $a$  ও  $B$  হল দুটি ধ্রুবক এবং এই সূত্রকে র্যাল-জীনস সূত্র (Rayleigh-Jeans formula) বলে। (8.4.1) লেখচিত্রে র্যাল-জীনসের সূত্র অঙ্কন করা হলে দেখা যায় যে অধিক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে সূত্রটি পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে মিলে যায়। কিন্তু কম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে সূত্রটি থেকে  $dE$ -র মান পরীক্ষালব্ধ মানের চেয়ে বেশী হয়। তাছাড়া  $dE$ -কে  $\lambda$ -র 0 থেকে  $\infty$  পর্যন্ত সমাকলন করলে প্রাপ্ত  $E$ -র মান  $\infty$  হয়, কিন্তু এটি বাস্তবিকপক্ষে অসম্ভব। সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে র্যাল-জীনস সূত্রও তাপ বিকিরণ বর্ণালির সম্পূর্ণ নির্দেশক নয়।

1900 খ্রীষ্টাব্দে ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক (Max Planck, 1858—1947) লক্ষ করলেন যে কৃষ্ণবস্তুর দ্বারা তাপের শোষণ ও বিকিরণের ক্ষেত্রে যদি দুটি নতুন অঙ্গিকার গ্রহণ করা হয়, তবে তাপ বিকিরণ বর্ণালির সঠিক সমীকরণ উদ্ভাবন করা যায়। প্ল্যাঙ্কের এই দুটি অঙ্গিকার হল—

(1) কৃষ্ণবস্তুর তলে অবস্থিত কণাগুলি অহরহ সরল দোলনে কম্পিত হয় এবং এদ্বারা তাপের শোষণ বা বিকিরণ ঘটে। তাপের শোষণে কম্পকগুলির (কণাগুলির) কম্পাঙ্ক বৃদ্ধি পায় এবং তাপ বিকিরণে কম্পাঙ্ক হ্রাস পায়।

(2) কম্পকের শক্তিগুলি বিচ্ছিন্ন এবং কম্পাঙ্ক ও একটি পূর্ণ সংখ্যার গুণফলের সমানুপাতিক। অর্থাৎ কম্পকের শক্তি  $E$ , কম্পাঙ্ক  $\nu$  এবং পূর্ণসংখ্যাটি  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots \infty$  পর্যন্ত) ধরলে

$$E \propto n\nu$$

$$\text{বা, } E = nh\nu$$

এখানে  $h$  হল একটি ধ্রুবক যাকে প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক (Planck's constant) বলে। (8.4.4) সমীকরণে  $E$ -কে একটি কোয়ান্টাম (quantum) বলা হয়, যার সর্বনিম্ন মান হল  $E = h\nu$  ( $n = 1$ )।

প্ল্যাঙ্ক তাঁর এই কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে প্রমাণ করেন যে  $dE$ -র প্রকৃত রাশিমালা হল

$$dE = \frac{8\pi hc \lambda^{-5} d\lambda}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \dots \dots (8.4.5)$$

এখানে  $k$  হল বোলট্জম্যান ধ্রুবক (Boltzmann's Constant)। (8.4.5) সমীকরণটিকে প্ল্যাঙ্কের সূত্র বলা হয়, যারদ্বারা (8.4.1) লেখচিত্রটির বক্র অঙ্কন করা হলে পরীক্ষালব্ধ নির্দেশাঙ্ক বৃত্তগুলির সংযোগকারী রেখাটি পাওয়া যায়। অর্থাৎ প্ল্যাঙ্কের সূত্রদ্বারা পরীক্ষালব্ধ ফলকে সম্পূর্ণরূপে ব্যাখ্যা করা যায়। (8.4.5) সমীকরণে  $T \rightarrow \infty$  ধরলে  $E \rightarrow \infty$  হয়। অর্থাৎ প্ল্যাঙ্কের সূত্র থেকে স্টিফান-বোলট্জম্যানের সূত্র পাওয়া যায়।

আবার এই সূত্রে  $\lambda$ -র মান কম ধরলে

$$e^{hc/k\lambda T} \gg 1$$

সুতরাং (8.4.5) সমীকরণটি লেখা যায়

$$dE = 8\pi hc \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T} d\lambda \dots \dots (8.4.6)$$

অর্থাৎ এক্ষেত্রে আমরা ভিয়েনের সমীকরণটি পাই।

$$\text{অনুরূপে } \lambda\text{-র মান বেশী ধরলে, } \frac{hc}{k\lambda T} \ll 1$$

আমরা ধরতে পারি

$$e^{hc/k\lambda T} - 1 = \frac{hc}{k\lambda T} e^{hc/k\lambda T}$$

সুতরাং (8.4.5) সমীকরণ থেকে আমরা পাই,

$$dE = 8\pi kT \lambda^{-4} e^{-hc/k\lambda T} d\lambda \dots \dots (8.4.7)$$

কাজেই, এটি র্যাল-জীন্স সমীকরণের সঙ্গে মিলে যায়।

ওপরের আলোচনা থেকে দেখা যাচ্ছে যে প্ল্যাঙ্কের সমীকরণটিকে আমরা সাধারণ সমীকরণ হিসাবে ধরতে পারি এবং স্টিফান-বোলট্জম্যান, ভিয়েন ও র্যাল-জীন্স-এর সূত্রগুলি হল বিশেষ বিশেষ শর্ত সাপেক্ষে এই সাধারণ সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত বিভিন্ন সীমায়িত রূপ।

প্ল্যাঙ্কের তত্ত্বের এই সাফল্য সত্ত্বেও প্রথম দিকে বিজ্ঞানী মহলে এটি বিশেষ গ্রাহ্য হয়নি। কারণ এই তত্ত্বে কোয়ান্টামগুলিকে বিচ্ছিন্ন ভাবা হয়েছে, যা তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের সম্পূর্ণ বিরোধী এবং বিজ্ঞানীদের কল্পনার সম্পূর্ণ বাইরে ছিল। কিন্তু পরবর্তীকালে যখন আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া এবং উষ্ণতার সঙ্গে আপেক্ষিক তাপের পরিবর্তন তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বদ্বারা ব্যাখ্যা করতে গিয়ে পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে অসঙ্গতিপূর্ণ ফল পাওয়া গেল, তখন আইনস্টাইন (Albert Einstein, 1879—1955) প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম তত্ত্বকে সামান্য পরিবর্তিত করে 1905 খ্রীষ্টাব্দে আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার ক্ষেত্রে এবং 1907 খ্রীষ্টাব্দে আপেক্ষিক তাপের ক্ষেত্রে প্রয়োগ করে অভূতপূর্ব সাফল্যলাভ করেন। এর ফলে কোয়ান্টাম তত্ত্ব প্রতিষ্ঠালাভ করে এবং তার স্বীকৃতিস্বরূপ 1918 খ্রীষ্টাব্দে প্ল্যাঙ্ককে এবং 1921 খ্রীষ্টাব্দে আইনস্টাইনকে নোবেল পুরস্কার দেওয়া। এরপর কোয়ান্টাম তত্ত্বকে বোহর হাইড্রোজেন বর্ণালির বিশ্লেষণে এবং কম্পটন তাঁর আবিষ্কৃত কম্পটন ক্রিয়া ব্যাখ্যার জন্য ব্যবহার করে বিশেষ সাফল্য লাভ করেন।

আপনারা এই বিষয়গুলি পূর্বে বিশদভাবে অধ্যয়ন করেছেন।

আমরা এখানে আলোকের দ্বিচারিতা ব্যাখ্যার জন্য আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া, হাইড্রোজেন বর্ণালি ও কম্পটন ক্রিয়ার কোয়ান্টাম তত্ত্ব সংক্ষেপে আলোচনা করব।

## 8.5 আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া ও আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব (Photoelectric Effect and Einstein's Photon Theory)

সোডিয়াম, পটাসিয়াম, ক্যালসিয়াম বা অন্য কোনও ধাতুর তলে দৃশ্যমান আলোক, অতিবেগুনিকরশ্মি, বা এক্স-রশ্মি আপতিত হলে ঐ তল থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়। এই ঘটনাকে আলোক তড়িৎ ক্রিয়া বলে। 1887 খ্রীষ্টাব্দে হার্টজ (Heinrich Hertz) এই ঘটনা আবিষ্কার করেন। তবে 1897 খ্রীষ্টাব্দে ইলেকট্রন আবিষ্কারের পর জে জে থমসন এই ঘটনার সঠিক ব্যাখ্যা দিতে সমর্থ হন।

মিলিকান অত্যন্ত সূক্ষ্ম পরীক্ষার দ্বারা আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার এমন তিনটি বৈশিষ্ট্য আবিষ্কার করেন, যেগুলি দেখা যায় যে তরঙ্গ তত্ত্বদ্বারা কোনভাবেই ব্যাখ্যা করা যায় না। আমরা পূর্বেই উল্লেখ করেছি যে মিলিকান ইলেকট্রনের আধানও অত্যন্ত নির্ভুলভাবে পরিমাপ করতে সমর্থ হয়েছিলেন এবং তাঁর এই দুটি অসামান্য কৃতিত্বের জন্য 1923 খ্রীষ্টাব্দে তাঁকে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

### 8.5.1 আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য (Characteristics of photoelectric effect)

আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার উপরোক্ত তিনটি বিশেষ বৈশিষ্ট্য হল—

(1) এই ক্রিয়ায় নিষ্কিণ্ড ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ বেগ (বা সর্বোচ্চ গতিশক্তি) আলোকের তীব্রতা (Intensity)-র ওপর নির্ভর করে না। কিন্তু আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী আলোকের তীব্রতা যত বৃদ্ধি পাবে, ইলেকট্রনের বেগ (বা গতিশক্তি)-ও ততই বৃদ্ধি পাবে।

(2) যদি কোনও ধাতুর তলে আপতিত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য একটি নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের চেয়ে বেশী হয় (বা বিপরীতক্রমে যদি কম্পাঙ্ক একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের চেয়ে কম হয়), তবে ঐ ধাতুর তল থেকে কোনও ইলেকট্রন

নিঃসরণ হয় না, এক্ষেত্রে আলোকের তীব্রতা যাই হোক না কেন। কিন্তু আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী আপতিত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য (বা কম্পাঙ্ক) যা-ই হোক না কেন, যদি তীব্রতা যথেষ্ট বেশী হয়, বা কম তীব্রতার আলোক অনেকক্ষণ ধরে আপতিত হয়, তবে ইলেকট্রন নিঃসরণ হওয়া উচিত।

(3) আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ায় আলোকের আপতন ও ইলেকট্রন নিঃসরণের মধ্যে কালক্ষেপ (lag) প্রায় নেই (বস্তুত এই কালক্ষেপ মাত্র  $10^{-8}$  sec) যার ফলে ইলেকট্রন নিঃসরণ প্রক্রিয়াকে তাৎক্ষণিক বলা যায়। কিন্তু আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী যদি আপতিত আলোকের তীব্রতা অত্যন্ত কম হয়, তবে ইলেকট্রন নিঃসরণে যথেষ্ট সময় ব্যয় হওয়ার কথা।

### 8.5.2 আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব ও আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার সমীকরণ (Einstein's photon theory and equation of photoelectric effect)

আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যগুলি আলোচনা থেকে দেখা যাচ্ছে যে তরঙ্গ তত্ত্ব এক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। এই অবস্থায় আইনস্টাইন 1905 খ্রীষ্টাব্দে প্ল্যাঙ্কের কম্পকের বিচ্ছিন্ন শক্তির তত্ত্ব অনুসরণে আলোকের বিচ্ছিন্ন শক্তির তত্ত্ব উত্থাপন করেন। অর্থাৎ এই তত্ত্বে ধরা হল যে কম্পকের বিচ্ছিন্ন শক্তির মতো আলোকের তরঙ্গগুলিও ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র বিচ্ছিন্ন শক্তির মোড়করূপে (small discontinuous energy packets) শূন্য বা কোনও মাধ্যমের ভিতরদিয়ে আলোকের বেগে বিস্তৃত হয়। আইনস্টাইন এই শক্তির মোড়ক বা কোয়ান্টামের নাম দেন 'ফোটন' (Photon) এবং ধরে নেন যে একটি ফোটনের শক্তির মান হল—

$$E = h\nu \quad \dots \dots (8.5.1)$$

যেখানে  $\nu$  হল ফোটনের কম্পাঙ্ক এবং  $h$  প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক। এখানে লক্ষণীয় যে একটি ফোটনের শক্তি সর্বদাই  $h\nu$  অর্থাৎ কম্পকের নিম্নতম শক্তির ( $n = 1$ ) সমান।

আইনস্টাইনের তত্ত্ব অনুযায়ী একটি ফোটন যখন কোনও ধাতুর তলে কোনও ইলেকট্রনের ওপর আপতিত হয়, ইলেকট্রনটি তখন ঐ ফোটনকে শোষণ করে নেয় এবং ইলেকট্রনের শক্তি বৃদ্ধি পায়। যদি এই শক্তি ধাতুর তলে ইলেকট্রনটির কার্য-অপেক্ষক (work-function)  $\phi$  অর্থাৎ বন্ধন শক্তির চেয়ে বেশী হয়, তবে ইলেকট্রনটি ধাতুর তল থেকে নিঃসৃত হবে এবং এর অবশিষ্ট শক্তি গভীর শক্তিতে পরিণত হবে। কাজেই আইনস্টাইনের আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার সমীকরণটি হল—

$$h\nu - \phi = \frac{1}{2} mV^2$$

বা,  $h\nu = \phi + \frac{1}{2} mV^2 \quad \dots \dots (8.5.2)$

এখানে  $h\nu (= E)$  হল আপতিত ফোটনের শক্তি,  $\phi$  হল কার্য-অপেক্ষক এবং  $\frac{1}{2} mV^2$  হল ইলেকট্রনের গভীর শক্তি ( $m =$  ইলেকট্রনের ভর ও  $V =$  ইলেকট্রনের বেগ)

দেখা গেছে যে আইনস্টাইনের এই সমীকরণদ্বারা আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার সবগুলি বৈশিষ্ট্যই সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। তাছাড়া এই সমীকরণ থেকে মিলিকান  $h$ -এর যে মান নির্ণয় করেন, তা প্ল্যাঙ্ক দ্বারা নির্ণীত মানের সমান। সুতরাং আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব যে সঠিক, সে বিষয়ে কোনও সন্দেহ থাকে না।

### 8.5.3 আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্ব ও প্ল্যাঙ্কের কম্পক তত্ত্বের তুলনা

আইনস্টাইনের তত্ত্বের সঙ্গে প্ল্যাঙ্কের তত্ত্বের তুলনা করলে দেখা যায় যে প্ল্যাঙ্ক কেবল কম্পকের শক্তিগুলিকেই বিচ্ছিন্ন হিসাবে চিন্তা করেছেন, কিন্তু কম্পকগুলি যে শক্তি শোষণ বা বিকিরণ করে, তাকে বিচ্ছিন্ন হিসাবে চিন্তা করেননি। অপরপক্ষে আইনস্টাইন ধরে নিলেন যে শক্তির বিস্তার কালেও তা বিচ্ছিন্ন ক্ষুদ্রক্ষুদ্র একক বা কণার মতোই বিস্তারলাভ করে, তরঙ্গের মতো নিরবচ্ছিন্নভাবে নয়। দ্বিতীয়ত, প্ল্যাঙ্কের কম্পকগুলি হল কোনও বস্তুকণা (যেমন, অণু বা পরমাণু), যেগুলি সরল দোলনে  $n\nu$  কম্পাঙ্কে কম্পিত হয় এবং এগুলির শক্তি  $E = nh\nu$ , যেখানে  $n = 1, 2, 3, \dots$  ইত্যাদি যেকোন একটি পূর্ণ সংখ্যা (এই পূর্ণ সংখ্যাটিকে কোয়ান্টাম সংখ্যা বলা হয়)। অপরদিকে আইনস্টাইনের ফোটন হল শক্তির একটি মোড়ক বা আধার যা কণার মতোই আচরণ করে। অর্থাৎ একটি ফোটন কখনও তরঙ্গের মতো ছড়িয়ে পড়ে না বা এর কোনও ক্ষুদ্রতর ভগ্নাংশও হয় না। কোনও বস্তুকণা যখন কোনও ফোটন শোষণ করে, তখন ফোটনের সবটাই একসঙ্গে এবং তাৎক্ষণিকভাবে শোষিত হয়, অর্থাৎ ফোটনের কোনও ভগ্নাংশ শোষিত হয় না বা শোষণ ক্রিয়া বহুক্ষণ ধরে চলে না। এছাড়া একটি ফোটনের শক্তি সর্বদাই  $h\nu$ , কখনও এর 1 ছাড়া অন্যকোনও পূর্ণ সংখ্যার (যেমন,  $n = 2, 3, 4, \dots$  প্রভৃতির) গুণিতক নয়।

### 8.5.4 আইনস্টাইনের ফোটনতত্ত্ব ও নিউটনের করপাসকাল তত্ত্বের তুলনা ও ফোটনের দ্বিচারিতা

আইনস্টাইনের ফোটনের সঙ্গে নিউটনের করপাসকাল-এর একটা সাদৃশ্য লক্ষ করা গেলেও এগুলি সম্পূর্ণ আলাদা। অর্থাৎ উভয়ের মধ্যেই কণা ধর্ম বর্তমান। কিন্তু নিউটনের করপাসকালগুলি বস্তুরই অতি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র কণারূপে ধরা হয়েছে, অথচ এগুলির ভর বা শক্তি সম্বন্ধে কোনও উল্লেখ করা হয়নি। অপরপক্ষে আইনস্টাইনের ফোটনগুলি হল এক একটি নির্দিষ্ট শক্তির আধার এবং এই শক্তির পরিমাণ হল  $E = h\nu$  যা পরিমাপযোগ্য। নিউটনের করপাসকালের সঙ্গে তরঙ্গের ধারণার কোনও সম্পর্ক নেই। কিন্তু একটি ফোটনের কণাধর্মের সঙ্গে তরঙ্গধর্মও অঙ্গঙ্গীভাবে জড়িত, কারণ ফোটনের কম্পাঙ্ক এর তরঙ্গ ধর্মেরই পরিচায়ক। সুতরাং একটি ফোটন হল একই সঙ্গে কণা ও তরঙ্গ এই দ্বৈত ধর্মের নির্দশন। তবে ফোটনের এই দ্বৈত ধর্ম কখনওই একসঙ্গে প্রকাশ পায় না। যেমন ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে ফোটনের কেবল তরঙ্গ ধর্ম প্রকাশ পায়, এবং কণা ধর্ম সম্পূর্ণ উহ্য থাকে। অপরপক্ষে আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার ক্ষেত্রে ফোটনের কেবল কণাধর্মই ক্রিয়াশীল হয়, কিন্তু তরঙ্গধর্ম উহ্য থাকে। ফোটনের এরূপ দুটি বিপরীত আচরণকে এর দ্বিচারিতা (Duality) বলে।

## 8.6 বোহরের হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্ব (Bohr's Theory of Hydrogen Atom)

তাপ বা তড়িৎদ্বারা কোনও গ্যাসীয় পদার্থকে অতি উচ্চ উষ্ণতায় উত্তপ্ত করা হলে ঐ পদার্থ থেকে আলোক বিকীর্ণ হয়। একটি রেখা ছিদ্রের মধ্যদিয়ে বিকীর্ণ আলোককে পাঠিয়ে একটি প্রিজম বা গ্যাটিং-এর সাহায্যে একটি বিশুদ্ধ বর্ণালি গঠন করা হলে, তাতে বিভিন্ন বর্ণের বহু সংখ্যক সমান্তরাল রেখার সমাবেশ দেখা যায়। প্রত্যেক রেখাই আলোকের এক একটি তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্দেশ করে এবং রেখার অবস্থান পরিমাপ করে এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়।

গ্যাসীয় পদার্থের পরমাণুগুলিই উত্তেজিত হয়ে আলোক বিকিরণ করে। এইজন্য আলোকের এই রেখা বর্ণালিকে পারমাণবিক রেখা বর্ণালি (atomic line spectrum) বলে। নিঃসৃত আলোক থেকে এই বর্ণালি হয় বলে একে নিঃসরণ রেখা বর্ণালি (emission line spectrum) বলা হয়। বিপরীতপক্ষে যদি সাদা আলোক (যেমন সূর্যের আলোক) কোনও শীতল গ্যাসের ভিতর দিয়ে পাঠানো হয়, তবে ঐ আলোকের কোনও কোনও তরঙ্গদৈর্ঘ্য গ্যাসের পরমাণুগুলি শোষণ করে নেয়। ফলে এই আলোকের নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালিতে শোষিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের স্থানে একটি কালো রেখার উৎপত্তি হয়। এই কালো রেখাগুলিকে শোষণ রেখা বর্ণালি (absorption line spectrum) বলে। কোনও পরমাণু উত্তেজিত অবস্থায় যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি নিঃসরণ করে শীতল অবস্থায় সাদা আলোক থেকে কেবল সেই সেই তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলিই শোষণ করে। এজন্য কোনও পরমাণুর নিঃসরণ বর্ণালি থেকে যে যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি পাওয়া যায়, শোষণ বর্ণালি থেকেও ঠিক সেই সেই তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলিই পাওয়া যায়। অর্থাৎ শোষণ বর্ণালি ও নিঃসরণ বর্ণালি হল পরস্পরের ঠিক বিপরীত।

মৌলগুলির মধ্যে হাইড্রোজেনই সবচেয়ে হালকা এবং এর পরমাণুর গঠনও সবচেয়ে সরল। এজন্য এর বর্ণালিতে রেখার সংখ্যাও সবচেয়ে কম এবং এই বর্ণালি বিশ্লেষণ করাও সবচেয়ে সহজ। 1885 খ্রীষ্টাব্দে বামার (Balmer) সূর্য ও নক্ষত্রগুলির বর্ণালি বিশ্লেষণ করে এগুলির মধ্যে হাইড্রোজেনের 14 শোষণ রেখা আবিষ্কার করেন এবং লক্ষ করেন যে এগুলিকে একটি সূত্রদ্বারা আবদ্ধ করা যায়। বামারের সূত্রটি এরূপ—

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a n_2^2} \quad \dots \dots (8.6.1)$$

এখানে  $\lambda$  হল শোষিত রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য,  $a =$  একটি ধ্রুবক,  $n_1 = 2$  এবং  $n_2 = 3, 4, 5, \dots$  প্রভৃতি কোনও পূর্ণ সংখ্যা।

বামারের সূত্রদ্বারা হাইড্রোজেনের যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি পাওয়া যায়, সেগুলিকে বামারের শ্রেণী (Balmer series) বলে। দেখা যায় যে এই শ্রেণীটি দৃশ্যমান বর্ণালির অন্তর্গত।

বামারের এই আবিষ্কারের পর লাইমেন (Lyman) পাশেন (Paschen), ব্র্যাকেট (Brackett) ও ফুন্ড (Pfund) তাঁদের নিজের নিজের পরীক্ষাগারে হাইড্রোজেন গ্যাসের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে এক্স-রশ্মি ও অবলোহিত রশ্মির রেখা বর্ণালি গঠন করেন এবং আরও চারটি হাইড্রোজেনের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের শ্রেণী আবিষ্কার করেন।

রিটজ (Ritz) এবং রাইডবার্গ (Rydberg) লক্ষ করেন যে বামার সহ এই চারটি শ্রেণী নীচের সূত্রগুলিদ্বারা প্রকাশ করা যায়।

(1) লাইমেনের শ্রেণী :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = 2, 3, 4, 5, \quad \dots \dots (8.6.2)$$

(2) বামারের শ্রেণী :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = 3, 4, 5, \quad \dots \dots (8.6.3)$$

(3) পাশেনের শ্রেণী :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = 4, 5, 6, \dots \dots (8.6.4)$$

(4) ব্র্যাকেটের শ্রেণী :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = 5, 6, 7, \dots \dots (8.6.5)$$

(5) ফুন্ডের শ্রেণী :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = 6, 7, 8, \dots \dots (8.6.6)$$

রাইডবার্গ এই পাঁচটি সূত্রকে একত্রিত করে একটিমাত্র সূত্র গঠন করেন, যা হল

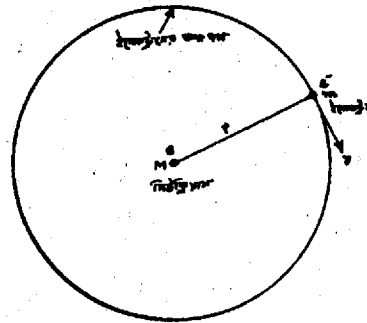
$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ যেখানে } n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, n_1 + 3 \dots \dots (8.6.7)$$

এই সমীকরণে  $\frac{1}{\lambda}$  কে বলা হয় তরঙ্গ-সংখ্যা অর্থাৎ একক দৈর্ঘ্যের মধ্যে কতগুলি তরঙ্গ আছে, তার সংখ্যা এবং  $R$  হল একটি ধ্রুবক, যাকে বলা হয় রাইডবার্গ ধ্রুবক। বামার শ্রেণীর সাহায্যে বার্জ (Birge) এই ধ্রুবকের মান গণনা করে পান

$$R = 109678.6 \text{ cm}^{-1} \dots \dots (8.6.8)$$

লক্ষ্য করুন, আমরা পূর্বে  $\nu$  (নিউ)-দ্বারা কম্পাঙ্ক নির্দেশ করেছি, যা (8.6.7) সমীকরণে ব্যবহৃত  $\frac{1}{\lambda}$  থেকে সম্পূর্ণ আলাদা। তাছাড়া (8.6.7) সমীকরণ থেকে আমরা  $n_1 = 1, 2, 3, 4$  এবং  $5$  বসিয়ে যথাক্রমে লাইমেন, বামার, পাশেন, ব্র্যাকেট ও ফুন্ডের শ্রেণী পাই।

রাইডবার্গের (8.6.7) সমীকরণটি বর্ণালীর তথ্যে এক গুরুতর সমস্যারূপে দেখা দেয়। কারণ কোনও তরঙ্গ তত্ত্ব দ্বারাই এই সমীকরণটি নির্ণয় করা যায় না। অবশেষে বোহর (Niels Bohr, 1885—1963) 1913 খ্রীষ্টাব্দে তাঁর হাইড্রোজেন পরমাণুর তথ্যে প্র্যান্টলের কোয়ান্টাম তত্ত্ব ব্যবহার করে রাইডবার্গের সূত্রটি প্রমাণ করতে সমর্থ হন এবং এজন্য তাঁকে 1922 খ্রীষ্টাব্দে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।



চিত্র 8.6.1 হাইড্রোজেন পরমাণু

বোহরের তত্ত্বের প্রথম অঙ্গিকার হল যে হাইড্রোজেনের পরমাণু একটি মাত্র ঋণাত্মক আধানযুক্ত ইলেকট্রন এবং একই মানের ধনাত্মক আধানযুক্ত একটি নিউক্লিয়াস (Nucleus) বা কেন্দ্রকদ্বারা গঠিত। নিউক্লিয়াসের তুলনায় ইলেকট্রনের ভর নগণ্য হওয়ায় ইলেকট্রনটি নিউক্লিয়াসের চতুর্দিকে কুলম্ব আকর্ষণ বলের দ্বারা বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত হয় (চিত্র 8.6.1)।

বোহরের দ্বিতীয় অঙ্গিকার হল যে সাম্যাবস্থায় ইলেকট্রনটি কেবল এমন কোনও একটি নির্দিষ্ট কক্ষপথে ঘোরে, যার জন্য এর কৌণিক ভরবেগের মান  $= nh/2\pi$  এবং এই আবর্তনের ফলে ইলেকট্রনটির কোনও শক্তির বিকিরণ হয় না (লক্ষ্য করুন যে বোহরের এই অঙ্গিকার তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের সম্পূর্ণ বিরোধী, কারণ তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী ত্বরণশীল ইলেকট্রনটির শক্তির বিকিরণ হবে)। এই অঙ্গিকারে  $n$  হল একটি পূর্ণ সংখ্যা ( $= 1, 2, 3, \dots$  ইত্যাদি), যাকে বোহরের কোয়ান্টাম সংখ্যা বলে এবং  $h$  হল প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক।  $n = 1, 2, 3, \dots$  ইত্যাদি বসালে যে কক্ষপথগুলি পাওয়া যায়, সেগুলিকে স্বীকৃত (allowed) কক্ষপথ বলে, কারণ ইলেকট্রন কেবল এই কক্ষপথগুলিতেই আবর্তিত হতে পারে, অন্য কোনও কক্ষপথে নয়।

বোহরের তৃতীয় অঙ্গিকার হল যে বিভিন্ন স্বীকৃত কক্ষপথে আবর্তনের জন্য ইলেকট্রনের বিভিন্ন শক্তির প্রয়োজন হয়। ফলে ইলেকট্রনটি একটি স্বীকৃত কক্ষপথ থেকে অন্য একটি স্বীকৃত কক্ষপথে স্থানান্তরিত হলে শক্তির প্রভেদ একটি কোয়ান্টাম (বা ফোটন)-রূপে ইলেকট্রনদ্বারা বিকীর্ণ বা শোষিত হবে। অর্থাৎ ইলেকট্রনটি  $E_1$  শক্তির কক্ষপথ থেকে  $E_2$  শক্তির কক্ষপথে স্থানান্তরিত হলে শক্তির যে বিকিরণ বা শোষণ হবে তা হল

$$E_2 - E_1 = h\nu, \quad \dots \dots (8.6.9)$$

যেখানে  $\nu$  হল বিকীর্ণ বা শোষিত ফোটনের কম্পাঙ্ক। (লক্ষ্য করুন  $E_2 - E_1$  ধনাত্মক হলে বিকিরণ ও ঋণাত্মক হলে শোষণ বোঝায়।)

বোহরের এই তিনটি অঙ্গিকারদ্বারা হাইড্রোজেন পরমাণু থেকে বিকীর্ণ (বা শোষিত) তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে সূত্র পাওয়া যায়, তা হল

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2me^4}{ch^3} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \dots \dots (8.6.10)$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে (8.6.10) সমীকরণটি রাইডবার্গের সমীকরণের সঙ্গে অভিন্ন হবে, যদি

$$R = \frac{2\pi^2me^4}{ch^3} \text{ হয়।} \quad \dots \dots (8.6.11)$$

কিন্তু আমরা জানি যে

ইলেকট্রনের ভর  $m = 9.035 \times 10^{-28} \text{ gm}$

ইলেকট্রনের আধান  $e = 4.77 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$

প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক  $h = 6.547 \times 10^{-27} \text{ erg.sec}$

এবং আলোকের বেগ  $c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$



সুতরাং এই মানগুলি থেকে আমরা পাই

$$R = 109668.8 \text{ cm}^{-1} \dots \dots (8.6.12)$$

এটি খুবই আশ্চর্যের ব্যাপার যে বোহরের তত্ত্বের একপ বিভিন্ন ধ্রুবকের মান বসিয়ে  $R$ -এর যে মান গণনা করা হল, তা (8.6.8) সমীকরণে প্রদত্ত বার্জের পরীক্ষালব্ধ মানের সঙ্গে এত নির্ভুলভাবে মেলে যে এ থেকে বোহরের কোয়ান্টাম তত্ত্বের নির্ভুলতা সন্দেহাতীতভাবে প্রমাণিত হয়।

## 8.7 কম্পটন ক্রিয়া (Compton Effect)

আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্বদ্বারা আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। কম্পটন ক্রিয়া থেকে ফোটন তত্ত্বের আরও সমর্থন পাওয়া যায়।

### 8.7.1 কম্পটনের আবিষ্কার (Compton's Discovery)

1923 খ্রীষ্টাব্দে কম্পটন (Arthur H. Compton, 1892—1962) আবিষ্কার করেন যে একটি নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক্স-রশ্মি একটি কার্বন পরমাণুর ওপর আপতিত হলে পরমাণুর ইলেকট্রনদ্বারা এক্স-রশ্মির বিক্ষেপণ (scattering) ঘটে, এর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বৃদ্ধি হয় (বা কম্পাঙ্কের হ্রাস হয়)। এই ঘটনাকে কম্পটন ক্রিয়া (compton effect) বলে।

কম্পটন প্রমাণ করেন যে তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গতত্ত্ব অনুযায়ী বিক্ষিপ্ত এক্স-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন হয় না, যা পরীক্ষালব্ধ ফলের বিরুদ্ধ। অপরপক্ষে এক্স-রশ্মিকে কোয়ান্টাম বা ফোটনরূপে কণা হিসাবে ধরে নিলে ইলেকট্রনের সঙ্গে সংঘর্ষে এর শক্তির ক্ষয় হবে এবং ফলে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বৃদ্ধি হবে। কণার বিক্ষেপণ তত্ত্বদ্বারা এই শক্তির ক্ষয় গণনা করা যায় এবং তা কম্পটনের পরীক্ষালব্ধ ফলের সঙ্গে সম্পূর্ণ মিলে যায়। সুতরাং এক্স-রশ্মি যে এই ক্রিয়ায় সম্পূর্ণ ফোটন বা কণার মতো আচরণ করে, তা সম্পূর্ণ প্রমাণিত হয় এবং এর দ্বারা আইনস্টাইনের ফোটন তত্ত্বও সমভাবে প্রমাণিত হয়। কম্পটনের এই অসাধারণ আবিষ্কার ও তত্ত্বের জন্য তাঁকে 1927 খ্রীষ্টাব্দে নোবেল পুরস্কার দেওয়া হয়।

### 8.7.2 ফোটনের ভর ও ভরবেগ (Mass and Mamentum of a Photon)

কম্পটন আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতা তত্ত্ব প্রয়োগ করে ফোটনের ভর ও ভরবেগ নির্ণয় করেন এবং তা কম্পটনের বিক্ষেপণ পরীক্ষায় সঠিক বলে প্রমাণিত হয়। সুতরাং কম্পটনের পরীক্ষায় ফোটনের কণাতত্ত্ব ও পরোক্ষভাবে আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতা তত্ত্ব প্রমাণিত হয়।

আইনস্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতা তত্ত্ব থেকে শক্তি ও ভরের তুল্যমূল্য সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$E = mc^2 \dots \dots (8.7.1)$$

এখন একটি ফোটনের শক্তি হল  $E = h\nu$  সুতরাং এটিকে একটি কণা ধরলে

$$E = hv = mc^2$$

$$\text{বা, } m = \frac{hv}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad \left[ \text{যেহেতু } v = \frac{c}{\lambda} \right] \quad \dots \dots (8.7.2)$$

এখানে  $m$  হল ফোটনের ভর,  $v$  এবং  $\lambda$  যথাক্রমে ফোটনের কম্পাঙ্ক ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং  $c$  হল আলোকের (এক্স-রশ্মির) বেগ।

এখানে একটি বিষয় লক্ষণীয় যে সাধারণ বস্তুকণার ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতার বিশেষ তত্ত্ব অনুযায়ী

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad \dots \dots (8.7.3)$$

কিন্তু এই সমীকরণটি ফোটনের ক্ষেত্রে খাটে না। কারণ শূন্য মাধ্যমে ফোটনের বেগ সর্বদাই  $c$  এবং এর কোনও স্থৈতিক শক্তি বা ভর নেই। সুতরাং (8.7.3) সমীকরণে  $m_0 = 0$ ,  $V = c$  বসালে আমরা পাই

$$m = \frac{0}{0} \quad \dots \dots (8.7.4)$$

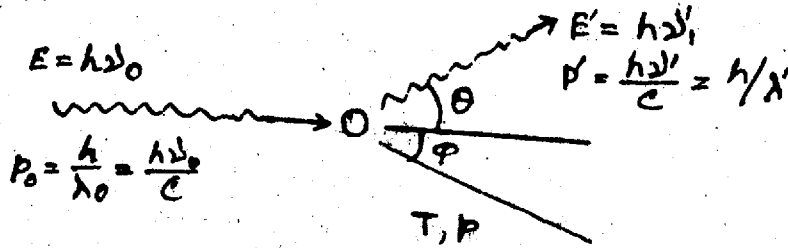
যা একটি অনির্ণেয় রাশি।

যেহেতু ফোটনের বেগ সর্বদা  $c$ , অতএব (8.7.2) সমীকরণ অনুযায়ী এর ভরবেগ

$$p = mc = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \dots \dots (8.7.5)$$

### 8.7.3. কম্পটন ত্রিয়ার তত্ত্ব

এই তত্ত্ব প্রমাণে অর্থাৎ এক্স-রশ্মি বিক্ষেপণে বিক্ষিপ্ত তরঙ্গে আপতিত তরঙ্গের সহিত একটি উচ্চতর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য যুক্ত বিকিরণের উপস্থিতি ব্যাখ্যা করতে গিয়ে এক্স-রশ্মি ফোটনকে কণা ধরেন যা পদার্থের পরমাণু বা ইলেকট্রনের স্থৈতিক ভরের সহিত সংঘর্ষে লিপ্ত। চিত্রে এই সংঘর্ষটি দেখানো হোল (চিত্র 8.7.1)



চিত্র 8.7.1. কম্পটন বিক্ষেপণ

এই সংঘর্ষে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে পাই,

$$p_0 = p' \cos \theta + p \cos \phi$$

$$0 = p' \sin \theta - p \sin \phi$$

... .. (8.7.6)

এবং শক্তির সংরক্ষণ সূত্র হতে পাই,

$$E_0 - E' = T$$

$$\text{or, } p_0 - p' = \frac{T}{c} \quad \dots \dots (8.7.7)$$

প্রথম দুটি সমীকরণ হতে  $\theta$  অপনয়ন করলে,

$$p^2 = p_0^2 + p'^2 - 2p_0p' \cos\theta \quad \dots \dots (8.7.8)$$

$$8.7.7 \text{ এর বর্গ করে } p_0^2 + p'^2 - 2p_0p' = T^2/c^2 \quad \dots \dots (8.7.9)$$

8.7.9 সমীকরণ হতে 8.7.8 বিয়োগ করলে,

$$p^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2p_0p' (1 - \cos\theta) \quad \dots \dots (8.7.10)$$

সংঘর্ষে পরেও কণাটি আপেক্ষিকতা তত্ত্ব মেনে চললে

$$p^2 = \frac{1}{c^2} (T^2 + 2m_0c^2T) \quad \{m_0 = \text{কণার স্থৈতিক ভর}\}$$

$$\text{বা, } p^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2m_0T = 2m_0c (p_0 - p')$$

সুতরাং 8.7.10 সমীকরণ হতে

$$2m_0c(p_0 - p') = 2p_0p' (1 - \cos\theta)$$

$$\text{বা, } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p_0} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

$$\text{বা, } \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad \dots \dots (8.7.11)$$

এই সমীকরণ অনুসারে তাত্ত্বিক ফল পরীক্ষালব্ধ ফলের সহিত মিলে যাওয়ায় কম্পটন ক্রিয়ার তত্ত্ব ফোটনের কণা ধর্মের ধারণাকে আরও সূঢ় করে।

### অনুশীলনী—3

অনুশীলনী 8.7.1 কৃষ্ণবস্তুর বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তাপবিকিরণ কোন্ কোন্ সূত্রদ্বারা ব্যাখ্যা করা হয়? এদের মধ্যে কোন্ সূত্রটি সম্পূর্ণ সঠিক?

অনুশীলনী 8.7.2 আলোক-তড়িৎ ক্রিয়ার বৈশিষ্ট্যমূলক ধর্মগুলি কি? এই ধর্মগুলি কোন্ সূত্রদ্বারা সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়?

অনুশীলনী 8.7.3 একটি ফোটনের ভর ও ভরবেগের সূত্র কি?

## 8.8 তরঙ্গের দ্বিচারিতা (Duality of Waves)

আমরা এ যাবৎ আলোক ও অন্যান্য তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের যে ধর্মগুলি আলোচনা করেছি, তা থেকে দেখা যাচ্ছে যে এই ধর্মগুলিকে দুটি শ্রেণীতে ভাগ করা যায়। প্রথম শ্রেণীর ধর্মগুলি হল—তরঙ্গের বিস্তার, প্রতিফলন, প্রতিসরণ, ব্যবর্তন, ব্যতিচার ও সমবর্তন। আর দ্বিতীয় শ্রেণীর ধর্মগুলি হল—কৃষ্ণবস্তুর দ্বারা তাপের বিকিরণ ও শোষণ, হাইড্রোজেন বা অন্যকোনও গ্যাসীয় মৌলদ্বারা আলোক, এক্স-রশ্মি বা অন্যান্য তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের বিকিরণ ও শোষণ, আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া, আপেক্ষিক তাপের পরিবর্তন, ও কম্পটন ক্রিয়া।

আপনি নিশ্চয়ই লক্ষ্য করেছেন যে প্রথম শ্রেণীর ধর্মগুলির মধ্যে আলোকের সরলরৈখিক গমন ও প্রতিফলন কণাতত্ত্ব ও তরঙ্গতত্ত্ব এই উভয় প্রকার তত্ত্বদ্বারাই ব্যাখ্যা করা যায়। সুতরাং এদুটি ধর্মদ্বারা আলোকের প্রকৃত স্বরূপ বোঝা যায় না। কিন্তু প্রতিসরণ, ব্যবর্তন, ব্যতিচার ও সমবর্তন তরঙ্গ তত্ত্ব বা বিশেষত তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গতত্ত্ব ছাড়া আর কোনভাবে সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না। সুতরাং এগুলিকেই তরঙ্গের বৈশিষ্ট্যপূর্ণ ধর্ম (Characteristic properties) বলা যায়।

দ্বিতীয় শ্রেণীর ধর্মগুলিকে আমরা বলতে পারি কোয়ান্টাম বা ফোটনের বৈশিষ্ট্যপূর্ণ ধর্ম এবং এগুলির ক্ষেত্রে তরঙ্গ ধর্ম একেবারে প্রযোজ্য হয় না।

তরঙ্গের এই দুই শ্রেণীর ধর্মের আলোচনা থেকে আমরা বলতে পারি যে তরঙ্গের তরঙ্গরূপ এবং কণারূপ এই দুই প্রকার রূপ বা আচরণ আছে। (সরলরৈখিক গতি ও প্রতিফলন বাদে) যে সকল ক্ষেত্রে তরঙ্গের তরঙ্গরূপ আচরণ দেখা যায়, সে সকল ক্ষেত্রে এর কণারূপ আচরণ দেখা যায় না, এবং যে সকল ক্ষেত্রে এর কণারূপ আচরণ দেখা যায়, সেসকল ক্ষেত্রে এর তরঙ্গরূপ আচরণ দেখা যায় না। অর্থাৎ তরঙ্গের এই উভয় প্রকার আচরণ এর বৈশিষ্ট্যপূর্ণ ধর্মগুলির ক্ষেত্রে কখনই একসঙ্গে হয় না। তরঙ্গের এইরূপ আচরণকে এর দ্বিচারিতা বা দ্বৈত আচরণ (Duality) বলে। তরঙ্গের এই দ্বিচারিতার ফলে একটামাত্র তত্ত্বের দ্বারা এর সকল ধর্ম প্রকাশ করা যায় না।

পরবর্তী অধ্যায়গুলিতে আপনি দেখতে পাবেন যে ডি ব্রগলির তরঙ্গ তত্ত্বের ওপর ভিত্তি করে তরঙ্গ তত্ত্ব ও কোয়ান্টাম তত্ত্বের সমন্বয়ে কিভাবে কোয়ান্টাম বলবিদ্যা গঠিত হয়েছে।

## 8.9 পদার্থের তরঙ্গ ধর্ম (Wave Nature of Matter)

আপনি পূর্বের অনুচ্ছেদগুলিতে তরঙ্গের কণাধর্ম সম্বন্ধে পাঠ করেছেন। লুইস ডি ব্রগলির (Louis Victor de Broglie, 1892—1987) ধারণা হল যে তরঙ্গের যদি কণা ধর্ম থাকতে পারে, তবে বস্তুকণারও তরঙ্গ ধর্ম থাকা স্বাভাবিক। এই ধারণার ভিত্তিতে 1924 খ্রীষ্টাব্দে তিনি তাঁর 'পি এইচ-ডি' (Ph. D.) থিসিসে একটি প্রকল্প উপস্থাপন করেন। এই প্রকল্পকে ডি ব্রগলির প্রকল্প বলা হয়।

### 8.9.1 ডি ব্রগলির প্রকল্প (de Broglie's Hypothesis)

ডি ব্রগলি লক্ষ্য করেন যে প্রকৃতি পদার্থ ও শক্তি কেবল এই দুটি উপাদানদ্বারা গঠিত। এর মধ্যে পদার্থকে আমরা সাধারণত কণার সমষ্টিরূপে এবং শক্তিকে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের সমষ্টিরূপে দেখতে

পাই। কিন্তু এই তরঙ্গগুলিই আবার কোনও কোনও ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম বা ফোটনরূপে কণার মতো আচরণ করে। একটি ফোটনের শক্তি  $E = hv$  ধরলে, কণা হিসাবে এর ভর হয়  $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$  এবং ভরবেগ হয়  $p = mc = \frac{h}{\lambda}$ ।

কিন্তু ডি ব্রগলি এও লক্ষ করেন যে প্রকৃতির মধ্যে বিভিন্নরকমের প্রতিসাম্য (Symmetry) রয়েছে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় আলোকের ক্ষেত্রে যেমন ফারমাটের ন্যূনতম সময়ের নীতি প্রযোজ্য, তেমনি কণার বলবিদ্যাতেও মাউপার্ট-এর (Maupert) ন্যূনতম ক্রিয়ার নীতি (principle of least action) প্রযোজ্য। তাছাড়া আইনস্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতা তত্ত্ব অনুযায়ী কণার ভর ও শক্তি পরস্পরের তুল্যমূল্য। সুতরাং তরঙ্গের যেমন কর্ণধর্ম আছে, তেমনি কণারও তরঙ্গ ধর্ম থাকা স্বাভাবিক।

তৃতীয়ত এও লক্ষ্য করার বিষয় যে বোহরের তত্ত্বে যে  $n$  কোয়ান্টাম সংখ্যাটি ধরা হয়েছে, তার কোনও তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা নেই। কিন্তু একমাত্র দুটি তরঙ্গের উপরিপাতন দ্বারা যখন স্থানু তরঙ্গ বা, ব্যতিচার ঘটে, কেবল তখনই তাত্ত্বিক শর্ত পূরণের জন্য এরূপ পূর্ণ সংখ্যা গ্রহণ করতে হয়। সুতরাং ডি ব্রগলির যুক্তি হল যে হাইড্রোজেন পরমাণুর অভ্যন্তরে ইলেকট্রনের আবর্তনকে যদি একটি স্থানু তরঙ্গ হিসাবে বিবেচনা করা যায়, তবে  $n$  কোয়ান্টাম সংখ্যাটির একটি তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা পাওয়া যাবে। তাছাড়া ইলেকট্রনকে যদি একটি তরঙ্গ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা যায়, তবে ইলেকট্রনের ত্বরণজনিত বিকিরণের সমস্যাও আর থাকে না।

সুতরাং ডি ব্রগলির প্রকল্প হল যে প্রত্যেক গতিশীল বস্তুকণাকেই একটি তরঙ্গরূপে কল্পনা করা যায় এবং এই তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হল

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV} \quad \dots \dots (8.9.1)$$

যেখানে  $p$  হল  $V$  বেগে গতিশীল  $m$  ভরযুক্ত কণার ভরবেগ।

একটু লক্ষ করলেই দেখা যাবে যে ডি ব্রগলির এই সমীকরণটি ফোটনের ভরবেগের সমীকরণের অনুরূপ। তবে শূন্যমাধ্যমে ফোটনের বেগ সর্বদাই  $c$ , কিন্তু বস্তুকণার বেগ  $V$  সর্বদাই  $< c$ ।

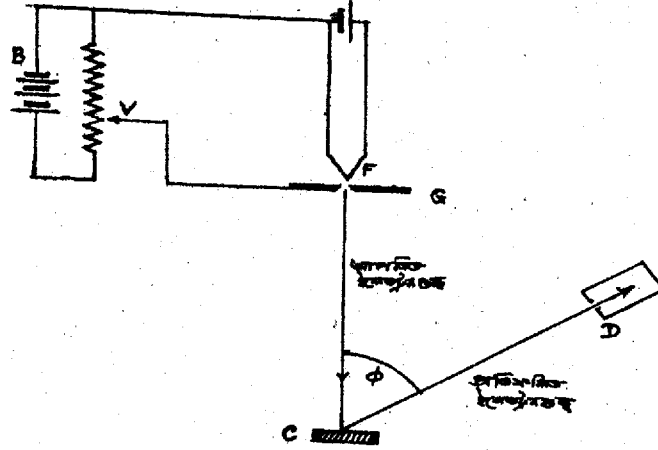
### 8.9.2 ডি ব্রগলির প্রকল্পের সত্যতা পরীক্ষা (Verification of de Broglie's Hypothesis)

সি. জে. ডেভিসন ও এল. এইচ. জারমার (C.J. Davisson, 1881—1958, and L.H. Germer) 1926 খ্রীষ্টাব্দে (8.9.1) চিত্রের অনুরূপ একটি পরীক্ষা ব্যবস্থার দ্বারা ডি ব্রগলির প্রকল্পের সত্যতা নির্ণয় করেন।

চিত্রের  $F$  ফিলামেন্টকে তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা উত্তপ্ত করে ইলেকট্রন নিঃসরণ করা হয় এবং গ্রিড  $G$ -র ওপর উচ্চ বিভব পার্থক্য  $V$  প্রয়োগ করে একটি উচ্চ শক্তির ইলেকট্রন প্রবাহ উৎপন্ন করা হয়। এই প্রবাহ  $T$  অবস্থানে রাখা একটি নিকেল কেলাসের ওপর লম্বভাবে আপতিত হয় এবং কেলাসের বিভিন্ন তল থেকে  $\phi$  কোণে প্রতিফলিত হয়ে  $D$  গ্রাহকযন্ত্রে প্রবেশ করে। গ্রাহক যন্ত্রে প্রতিফলিত প্রবাহের মান নির্ণীত হয়। ডেভিসন ও জারমার লক্ষ্য করেন যে বিভব পার্থক্য  $V$  পরিবর্তন করে আপতিত ইলেকট্রন প্রবাহের শক্তি পরিবর্তিত করা হলে, প্রতিফলিত ইলেকট্রনগুলোর প্রবাহমানও পরিবর্তিত হয়। পরীক্ষা থেকে দেখা গেল যে যখন  $\phi = 50^\circ$  এবং  $V = 54$  ভোল্ট, তখন প্রতিফলিত প্রবাহের মান সর্বোচ্চ হয়।

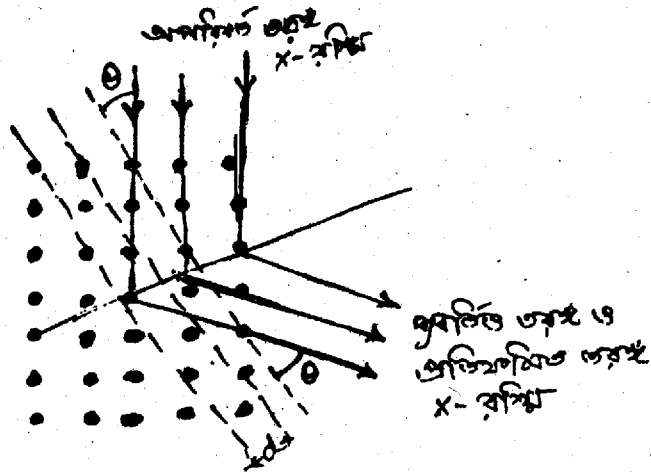
এক্স-রশ্মি একটি কেলাসের ওপর আপতিত হলে কেলাসের অভ্যন্তরে, পরমাণুগুলির সমান্তরাল বিভিন্ন তল থেকে ব্যবর্তিত হয়ে প্রতিফলিত হয় এবং প্রতিফলিত রশ্মিগুলির প্রাবল্য নিজেদের মধ্যে ব্যতিচারের ফলে আপতন কোণ অনুযায়ী পর্যায়ক্রমে সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন হয়। সর্বোচ্চ প্রতিফলনের ক্ষেত্রে ব্র্যাগের সূত্র (Bragg's law) হল

$$m\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots \dots (8.9.2)$$



চিত্র 8.9.1 ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষা

যেখানে  $m = 1, 2, 3 \dots$  ইত্যাদি কোনও একটি পূর্ণ সংখ্যা যা যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয় প্রভৃতি পর্যায়ক্রমিক সর্বোচ্চ প্রতিফলন নির্দেশ করে,  $d$  হল কেলাসের অভ্যন্তরে বিভিন্ন প্রতিফলক তলের অন্তর্বর্তী দূরত্ব এবং  $\theta$  হল প্রতিফলক তল ও প্রতিফলিত রশ্মির মধ্যস্থ কোণ (চিত্র 8.9.2)।  $d$  জানা থাকলে ব্র্যাগের সূত্রদ্বারা এক্স-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য সহজেই নির্ণয় করা যায়।



চিত্র 8.9.2 প্রতিফলন

ডেভিসন ও জারমার ইলেকট্রন প্রতিফলনের ক্ষেত্রে ব্যাগের সূত্র প্রয়োগ করে দেখলেন যে যদি  $m = 1$  ধরা হয়, তবে ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হল  $\lambda = 1.65 \text{ \AA} (1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm})$ । কারণ এক্স-রশ্মির পরীক্ষা থেকে জানা যায় যে  $d = 0.91 \text{ \AA}$  এবং এক্ষেত্রে  $\theta = 90^\circ - \frac{1}{2} \times 50^\circ = 65^\circ$ ।

আবার ডি ব্রগলির সূত্রে  $54$  ভোল্ট ইলেকট্রনের যে ভরবেগ হয়, তার মান বসিয়ে পাওয়া যায়

$$\lambda = 1.64 \text{ \AA}।$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে ডি ব্রগলির প্রকল্প ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষায় চমৎকারভাবে সমর্থিত হয়।

ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষার পর আরও বহু বিজ্ঞানী বিভিন্ন পরীক্ষার দ্বারা ইলেকট্রন, নিউট্রন, প্রোটন প্রভৃতি মৌলিক কণাগুলির ব্যবর্তন ও ব্যতিচার আরও সন্দেহহীনভাবে প্রতিষ্ঠা করেন এবং ডি ব্রগলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যও অত্যন্ত নির্ভুলভাবে পরিমাপ করেন। এভাবে ডি ব্রগলির কণার তরঙ্গ তত্ত্ব পদার্থবিজ্ঞানে প্রতিষ্ঠালাভ করে এবং তারদ্বারা তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গতত্ত্ব ও কোয়ান্টাম তত্ত্বকে সংশ্লেষণ করে কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান (Quantum Mechanics) উদ্ভাবনের ভিত্তি স্থাপন করে। ডি ব্রগলির এরূপ একটি সুদূর প্রসারী দিক উন্মোচনকারী প্রকল্পের জন্য তাঁকে 1929 খ্রীষ্টাব্দে এবং এই প্রকল্পকে প্রথম পরীক্ষার দ্বারা প্রতিষ্ঠিত করার জন্য ডেভিসনকে 1937 খ্রীষ্টাব্দে নোবেল পুরস্কারদ্বারা ভূষিত করা হয়।

### 8.9.3 কণার দ্বিচারিতা (Duality of Particles)

ডি ব্রগলির প্রকল্পদ্বারা পদার্থের দ্বিচারিতা প্রতিষ্ঠিত হয়। সুতরাং যেকোনও পরিমাণ পদার্থকেই আমরা একটি তরঙ্গরূপে কল্পনা করতে পারি। কিন্তু যেহেতু প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক  $h$ -এর মান অত্যন্ত ক্ষুদ্র, সেজন্য বৃহৎ আকারের বস্তুর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বস্তুর আকারের তুলনায় এতই ক্ষুদ্র হয় যে ঐরূপ বস্তুর গতি এর তরঙ্গের দ্বারা কোনভাবে প্রভাবিত হয় না এবং সাধারণ গতিবিজ্ঞানের সূত্রগুলিই এক্ষেত্রে প্রযোজ্য হয়। অপরপক্ষে ইলেকট্রন, প্রোটন, নিউট্রন প্রভৃতি কণাগুলির ব্যাসার্ধ ডি ব্রগলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কম বা সমতুল্য। ফলে এই কণাগুলির কণাধর্ম ও তরঙ্গধর্ম সমভাবে লক্ষ্য করা যায়। তবে ফোটনের মতোই যেক্ষেত্রে এই কণাগুলির কণাধর্ম প্রকাশ পায়, সেক্ষেত্রে এদের তরঙ্গধর্ম থাকে না এবং যেক্ষেত্রে তরঙ্গধর্ম ত্রিণাশীল হয়, সেক্ষেত্রে কণাধর্ম আরোপ করা যায় না। উদাহরণস্বরূপ, জে জে থমসন ক্যাথোড রশ্মির ধর্মগুলি পরীক্ষা করে দেখেন যে এই রশ্মি তড়িৎক্ষেত্র বা চৌম্বক ক্ষেত্রদ্বারা কণার গতিবিজ্ঞান অনুযায়ী বেঁকে যায় এবং কণার মতোই এদের নির্দিষ্ট ভর আছে। এই ধর্মগুলি পরীক্ষা করেই জে জে থমসন এই সিদ্ধান্ত করেন যে ক্যাথোড রশ্মি কোনও তরঙ্গ নয়, ইলেকট্রনরূপে কণার প্রবাহ। আবার ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষায় প্রমাণিত যে এই একই ইলেকট্রন যখন কোনও কেলাসদ্বারা প্রতিফলিত হয়, তখন তা সম্পূর্ণ তরঙ্গরূপে ক্রিয়া করে এবং তার একটি নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যও আছে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের কণাধর্ম সম্পূর্ণ অনুপস্থিত থাকে। সুতরাং ডি ব্রগলি ও তৎপরবর্তী পরীক্ষাগুলির দ্বারা কণা ও তরঙ্গের প্রতিসাম্যতা (Symmetry) প্রতিষ্ঠিত হয়।

আর একটি কথা এখানে উল্লেখ করা প্রয়োজন যে কণা ও তরঙ্গের দ্বিচারিতা কেবল পারমাণবিক ব্যাসার্ধ বা তারচেয়ে কম দৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। কিন্তু দৈর্ঘ্য বেশী হলে কণার ক্ষেত্রে কেবল কণাধর্ম এবং তরঙ্গের ক্ষেত্রে কেবল তরঙ্গধর্মই প্রকাশ পায়। অবশ্য প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক  $h$ -এর মানের ক্ষুদ্রতাই এর জন্য দায়ী।

---

## 8.10 সারাংশ (Summary)

---

আপনি এই এককে তরঙ্গ ও কণার দ্বিচারিতা অধ্যয়ন করেছেন। অধায়ের প্রথমে পরমাণু (atom) ও অণুর (molecule) আবিষ্কার সম্বন্ধে উল্লেখ করা হয়েছে এবং ব্রাউনীয় গতি, গ্যাসের গতীয় তত্ত্ব এবং আয়নীয় গতির উদাহরণদ্বারা দেখানো হয়েছে যে অনু ও পরমাণুগুলি নিউটনের বলবিদ্যার সূত্র অনুসরণ করে। এরপর জে জে থমসন আবিষ্কৃত ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেও দেখা যায় যে নিউটনের সনাতন বলবিদ্যা ও তড়িৎ-গতিবিদ্যা প্রযুক্ত হয়। কণার বেগ আলোকের বেগের সমকক্ষ হলে, সনাতন গতিবিদ্যার স্থলে আইনস্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতা তত্ত্ব ব্যবহার করতে হয়। কিন্তু সনাতন বলবিদ্যার মতো এই তত্ত্বের দ্বারাও কণার সময় ও অবস্থানের নির্দেশকগুলি নির্দিষ্টরূপে নির্ণয় করা যায়। এর কারণ বিশেষ আপেক্ষিকতাকে সনাতন বলবিদ্যারই একটি সাধারণীকৃতরূপ বলা যায় (যখন কণার বেগ আলোকের বেগের চেয়ে অত্যন্ত হওয়ার কোনও বাধ্যবাধকতা থাকে না)।

এরপর আপনি আলোকের প্রাচীন কণাবাদ ও তরঙ্গবাদ পাঠ করেছেন এবং লক্ষ্য করেছেন যে ম্যাক্সওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব আলোকের বেগ থেকে সমবর্তন পর্যন্ত প্রত্যেকটি ধর্ম সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করতে সমর্থ। এছাড়া কেবল এ তত্ত্ব থেকেই আলোকের তরঙ্গগুলি কেন অনুপ্রস্থ তার কারণ জানা যায়। তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের আর একটি বিশেষ সাফল্য হল যে কয়েক কিলোমিটার দীর্ঘ বেতার তরঙ্গ থেকে শুরু করে অভাবনীয়রূপে ক্ষুদ্র ( $10^{-19}m$ ) গামা-রশ্মি পর্যন্ত এই বিশাল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিস্তৃতির অন্তর্গত বিভিন্ন তরঙ্গগুলির নানা বৈচিত্র্যমূলক ক্রিয়া ও ধর্মগুলির প্রায় সবই এই একটিমাত্র তত্ত্বদ্বারা সঠিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। এমনকি পরস্পর বিরোধী ধর্ম সমন্বিত বস্তুতাত্ত্বিক ইথারের কল্পনাও এ তত্ত্ব প্রয়োজন হয় না।

তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের একমাত্র ব্যর্থতা হল যে যখন এই তরঙ্গগুলি পারমাণবিক দৈর্ঘ্যমাত্রার কোনও বস্তুকণার সঙ্গে ক্রিয়া করে, তখন এই তত্ত্ব প্রযুক্ত হয় না, এবং এর পরিবর্তে কোয়ান্টাম বা ফোটন তত্ত্ব ব্যবহার করতে হয়। তাপ ও আলোকের বিকিরণ, আলোক-তড়িৎ ক্রিয়া, কম্পটন ক্রিয়া প্রভৃতি এর উদাহরণ। অর্থাৎ পরিমাণবিক দৈর্ঘ্যমাত্রায় তরঙ্গের দ্বিচারিতা প্রকাশ পায়। অতঃপর ডি ব্রগলি প্রস্তাব করেন যে পারমাণবিক স্তরের কণাগুলিরও তরঙ্গধর্ম আছে এবং তারফলে এই কণাগুলিরও দ্বিচারিতা আছে, যা পরবর্তীকালে ডেভিসন-জার্মার ও অন্যান্যদের পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়।

---

## 8.11 সর্বশেষ প্রশ্নাবলি

---

1. পরমাণু ও অণু কিভাবে আবিষ্কৃত হয়? অণু ও পরমাণু যে নিউটনের বলবিদ্যা অনুসরণ করে তার কয়েকটি প্রমাণ বর্ণনা করুন।
2. ক্যাথোড রশ্মিগুলি ইলেকট্রন কণার প্রবাহ, কিন্তু এক্স-রশ্মি তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ—এরূপ সিদ্ধান্তের কারণ কি?
3. তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের মূল ধর্মগুলি কি? কণার ধর্মের সঙ্গে তরঙ্গ ধর্মের পার্থক্য কোথায়?



4. তরঙ্গ যে কণার মতো আচরণ করে তার প্রমাণ কি?
5. তরঙ্গের দ্বিচারিতা বলতে কি বোঝায় ব্যাখ্যা করুন।
6. ডি ব্রগলির প্রকল্পটি বিবৃত করুন। এই প্রকল্পের ভিত্তি কি?
7. ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষাটি বর্ণনা করুন এবং এই পরীক্ষার দ্বারা ডি ব্রগলির প্রকল্প কিরূপে প্রমাণিত হয়, তা ব্যাখ্যা করুন।
8. কণার দ্বিচারিতা করতে কি বোঝায় ব্যাখ্যা করুন?
9. 100 ইলেকট্রন ভোল্ট গতিশক্তির ইলেকট্রনের ডি ব্রগলি তরঙ্গ দৈর্ঘ্য কত?

## 8.12 অনুশীলনী ও সর্বশেষ প্রশ্নাবলীর উত্তর

(ক) অনুশীলনীর উত্তর :

### অনুশীলনী-(1)

অনুশীলনী 8.2.1 : (8.2.2) অনুচ্ছেদ দেখুন। প্রশ্নের দ্বিতীয় অংশের জন্য (8.2.1.) অনুচ্ছেদ দেখুন।

অনুশীলনী 8.2.2 : (8.2.3) অনুচ্ছেদ দেখুন। দ্বিতীয় অংশের জন্য (8.2.2) অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য।

অনুশীলনী 8.2.3 : (8.2.5) অনুচ্ছেদ দেখুন।

অনুশীলনী 8.2.4 : (8.2.8) অনুচ্ছেদ দেখুন।

### অনুশীলনী-(2)

অনুশীলনী 8.3.1 : (8.3.1) অনুচ্ছেদ দেখুন।

অনুশীলনী 8.3.2 : (8.3.3) অনুচ্ছেদ দেখুন।

অনুশীলনী 8.3.3 : (8.3.2) এবং (8.3.4) অনুচ্ছেদ দুটি দেখুন।

অনুশীলনী 8.3.4 : (8.3.1) সারণী দ্রষ্টব্য।

অনুশীলনী 8.3.5 : (8.3.5) অনুচ্ছেদ দেখুন।

### অনুশীলনী-(3)

অনুশীলনী 8.7.1 : কৃষ্ণবস্তুর বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তাপ বিকিরণ ব্যাখ্যা করার জন্য (1) ভিয়েনের সূত্র, (2) র্যাল-জীনসের সূত্র এবং (3) প্ল্যাঙ্কের সূত্র ব্যবহার করা হয়। এই তিনটি সূত্রের মধ্যে প্ল্যাঙ্কের সূত্রটিই সম্পূর্ণ সঠিক।

অনুশীলনী 8.7.2 : প্রথম অংশের জন্য (8.5.1) অনুচ্ছেদ এবং দ্বিতীয় অংশের জন্য (8.5.2) অনুচ্ছেদে আইনস্টাইনের সূত্র দ্রষ্টব্য।

অনুশীলনী 8.7.3 : ফোটনের ভরের সূত্র,  $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$

এ ভরবেগের সূত্র,  $p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

(খ) সর্বশেষ প্রশ্নাবলির উত্তর :

প্র. 1 : অনুচ্ছেদ (8.2.2), (8.2.3), (8.2.5), (8.2.6) ও (8.2.6) দ্রষ্টব্য।

প্র. 2 : অনুচ্ছেদ (8.2.8) ও (8.2.9) দ্রষ্টব্য।

প্র. 3 : তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের মূল ধর্মগুলি হল : প্রতিসরণ, ব্যবর্তন, ব্যতিচার ও সমবর্তন। কণার নির্দিষ্ট (স্থৈতিক) ভর আছে এবং তা কেনও মাধ্যমের মধ্যদিয়ে চলার সময় ছড়িয়ে পড়ে না। কণার বেগ 0 থেকে প্রায়  $c$  (শূন্যমাধ্যমে আলোকের বেগ) পর্যন্ত হতে পারে (তবে কখনই  $c$ -র সমান বা এর চেয়ে বেশী হয় না)। এর গতি (কম বেগের ক্ষেত্রে) নিউটনের বলবিদ্যাদ্বারা আপেক্ষিকীয় গতির ক্ষেত্রে আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতা সূত্রদ্বারা নির্ধারিত হয়। অপর পক্ষে তরঙ্গ উৎস থেকে সর্বদা ছড়িয়ে পড়ে। এর বেগ শূন্যমাধ্যমে সর্বোচ্চ ( $c$ ), কিন্তু অন্যকোনও মাধ্যমে  $\frac{c}{\mu}$  প্রবক ( $\mu$  মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক)। তরঙ্গ তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বদ্বারা পরিচালিত হয়।

প্র. 4 : আলোক-তড়িৎ ক্রিয়াও কম্পটন ক্রিয়া।

প্র. 5 : অনুচ্ছেদ (8.8) দ্রষ্টব্য।

প্র. 6 : অনুচ্ছেদ (8.9.1) দ্রষ্টব্য।

প্র. 7 : অনুচ্ছেদ (8.9.2) দ্রষ্টব্য।

প্র. 8 : অনুচ্ছেদ (8.9.3) দ্রষ্টব্য।

প্র. 9 : আপনারা জানেন

$$E = \frac{p^2}{2m} \text{ এবং } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{12} \text{ erg.}$$

$$\text{বা, } p = \sqrt{2mE} = \sqrt{2 \times 9 \times 10^{-28} \times 100 \times 1.6 \times 10^{-12}} \text{ গ্রাম সেমি / সে.}$$

$$\text{অতএব } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.62 \times 10^{-27}}{p} = 1.226 \text{ \AA}$$

---

## একক 9 □ অনিশ্চয়তার নীতি (Uncertainty Principle)

---

### গঠন :

- 9.1 প্রস্তাবনা ও উদ্দেশ্য
- 9.2 সনাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বের ব্যর্থতা
- 9.3 কোয়ান্টাম বলবিদ্যার উদ্ভাবন
- 9.4 অনিশ্চয়তার নীতি
- 9.5 কণা বা ফোটনের তরঙ্গ-সুপদ্বারা অনিশ্চয়তা নীতির প্রমাণ
- 9.6 পরীক্ষার দ্বারা অনিশ্চয়তা নীতির প্রমাণ
- 9.7 বোহরের পরিপূরকতার নীতি
- 9.8 সারাংশ
- 9.9 সর্বশেষ প্রস্তাবনা
- 9.10 সর্বশেষ প্রস্তাবনার উত্তর

---

### 9.1 প্রস্তাবনা ও উদ্দেশ্য

---

#### 9.1.1 প্রস্তাবনা

এই এককে আমরা কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের ভিত্তিস্বরূপ অনিশ্চয়তার নীতি আলোচনা করব।

#### 9.1.2 উদ্দেশ্য

এই এককটি পাঠ করার পর আপনি যে কাজগুলি করতে পারবেন, তা হল—

- অনিশ্চয়তার নীতির ভিত্তি কি, তা বলতে পারবেন।
- এই নীতিটি বিবৃত ও ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- আনুশাসনিক যুগ্ম রাশি বলতে কি বোঝায়, তা বলতে পারবেন।
- কণার (বা ফোটনের) তরঙ্গ-সুপের সমীকরণদ্বারা অনিশ্চয়তার নীতি নির্ণয় করতে পারবেন।
- কণার ভরবেগ, অবস্থান ও শক্তি নির্ণয়ের পরীক্ষার উদাহরণদ্বারা এই নীতি ব্যাখ্যা করতে পারবেন।
- বোহরের পরিপূরকতার নীতিদ্বারা অনিশ্চয়তা নীতির অর্থ ব্যাখ্যা করতে পারবেন।

---

## 9.2 সনাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বের ব্যর্থতা (Failure of Classical Quantum Theory)

---

পূর্ববর্তী এককে আপনি হাইড্রোজেন বর্ণালির বিশ্লেষণে তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের ব্যর্থতা এবং বোহ্রের উদ্ভাবিত হাইড্রোজেন পরমাণুর কোয়ান্টাম তত্ত্বের অভাবনীয় সাফল্য সম্পর্কে জেনেছেন। সনাতন কোয়ান্টাম তত্ত্বের এই সাফল্য সত্ত্বেও পরবর্তীকালে এই তত্ত্বের নানা ত্রুটি দেখা যায়। যেমন, বোহ্রের তত্ত্ব থেকে হাইড্রোজেন বর্ণালির তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যগুলি সঠিকভাবে পাওয়া গেলেও ঐ দৈর্ঘ্যগুলির তীব্রতা জানার জন্য আবার নতুন অঙ্গিকারের প্রয়োজন হয়। এছাড়া আপনি পূর্বেই লক্ষ্য করেছেন যে হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটির ঋণাত্মক আধান নিউক্লিয়াসের ধনাত্মক আধানদ্বারা আকৃষ্ট হতে পারে, অথচ আবর্তন জনিত ত্বরণ থাকা সত্ত্বেও তড়িচ্চুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী শক্তি বিকিরণ করে না—এরূপ দুটি পরস্পর বিরুদ্ধ ধর্মের কারণ কি, বোহ্রের তত্ত্ব থেকে তার ব্যাখ্যা পাওয়া যায় না। এমন কি বোহ্রের তত্ত্বে যে  $n$  কোয়ান্টাম সংখ্যাটি ধরা হয়েছে, তাও যদৃচ্ছ (arbitrary), কেননা তার কোনও তাৎক্ষিক ব্যাখ্যা নেই। বোহ্রের কোয়ান্টাম তত্ত্বটি দেখা যায় যে কেবল হাইড্রোজেন এবং একক ইলেকট্রনযুক্ত অন্যান্য পরমাণুর ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। কিন্তু কোনও পরমাণুতে ইলেকট্রনের সংখ্যা যখনই একাধিক হয়, তখনই দেখা যায় যে বোহ্রের তত্ত্ব আর সেক্ষেত্রে সরাসরি প্রয়োগ করা যায় না এবং সমস্যা সমাধানের জন্য তখন আরও নতুন নতুন অঙ্গিকার গ্রহণ করার প্রয়োজন হয়ে পড়ে। তাছাড়া এই কোয়ান্টাম তত্ত্ব কেবল ইলেকট্রনের পর্যাবৃত্ত গতির ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। কিন্তু ইলেকট্রনের গতি যদি অপর্യാবৃত্ত হয় (যেমন, ইলেকট্রন বিক্ষেপণ), তবে এই তত্ত্ব প্রয়োগ করা যায় না। পরবর্তীকালে ইলেকট্রনের স্পিন ও আরও নানা ধর্ম বা ক্রিয়া আবিষ্কৃত হওয়ায়, সমগ্র বিষয়টি অত্যন্ত জটিল আকার ধারণ করে।

---

## 9.3 কোয়ান্টাম বলবিদ্যার উদ্ভাবন (Creation of Quantum Mechanics)

---

বোহ্রের পূর্ব আলোচিত কোয়ান্টাম তত্ত্বকে সনাতন বলা হয়। তার কারণ এই তত্ত্বের নানা ত্রুটির জন্য এর পরিবর্তে পরে কোয়ান্টাম বলবিদ্যা নামে নতুন একটি কোয়ান্টাম তত্ত্ব গঠিত হয়। নতুন কোয়ান্টাম তত্ত্বের ভিত্তি হল ডি ব্রগলির প্রকল্প। এই প্রকল্পের ওপর ভিত্তি করে 1925 খ্রীষ্টাব্দে ভারনার হাইজেনবার্গ (Werner Heisenberg, 1901—1976) মেট্রিক্স বলবিদ্যা (Matrix Mechanics) এবং 1926 খ্রীষ্টাব্দে আরভিন শ্রোডিংগার (Erwin Schrödinger, 1887—1961) তরঙ্গ বলবিদ্যা (Wave Mechanics) নামে কোয়ান্টাম বলবিদ্যারই দুটি তুল্যমূল্য ভিন্ন বিভাগ উদ্ভাবন করেন। অতঃপর ডিরাক (Paul Andrien Maurice Dirac, 1902—1984) 1928 খ্রীষ্টাব্দে আপেক্ষিকীয় বেগযুক্ত ইলেকট্রন, পজিট্রন ও অনুরূপ কণাগুলির ক্ষেত্রে প্রযোজ্য আপেক্ষিকীয় কোয়ান্টাম বলবিদ্যা (Relativistic Quantum Mechanics) গঠন করেন। এই সব উদ্ভাবনের ফলে কণাসংক্রান্ত তাৎক্ষিক পদার্থবিদ্যায় এক নবযুগের সূচনা হয়। এই অসাধারণ কৃতিত্বের জন্য হাইজেনবার্গ 1932 খ্রীষ্টাব্দে এবং শ্রোডিংগার ও ডিরাক যুগ্মভাবে 1933 খ্রীষ্টাব্দে নোবেল পুরস্কার লাভ করেন।

## 9.4 অনিশ্চয়তার নীতি (Uncertainty Principle) :

হাইজেনবার্গ তাঁর উদ্ভাবিত কোয়ান্টাম বলবিদ্যার দ্বারা 1927 খ্রীষ্টাব্দে অনিশ্চয়তার নীতি নামে একটি মৌলিক নীতি প্রতিষ্ঠা করেন। দেখা যায় যে এই নীতিটি হল কণা ও তরঙ্গের দ্বিচারিতার ফল এবং সমগ্র কোয়ান্টাম বলবিদ্যাই এই নীতির ওপর প্রতিষ্ঠিত। বস্তুত এই নীতিটি হল প্রকৃতির একটি মৌলিক ধর্ম এবং সনাতন বলবিদ্যা ও কোয়ান্টাম বলবিদ্যার পার্থক্যের কারণ।

হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তার নীতিটি এভাবে বিবৃত করা যায় : যে দুটি ভৌত চলরাশির দ্বারা একটি পারমাণবিক তন্ত্রের আচরণ ব্যাখ্যা করা যায় (যেমন, কোনও কণার কার্টেজীয় স্থানাঙ্ক  $x$  এবং ভরবেগের  $x$ -উপাংশ  $p_x$ , বা স্থানাঙ্ক  $y$  এবং ভরবেগের  $y$ -উপাংশ  $p_y$ , বা স্থানাঙ্ক  $z$  এবং ভরবেগের  $z$ -উপাংশ  $p_z$ , বা  $t$  সময়ে নিরূপিত শক্তি  $E$ ), তাদের উভয়কেই একই সঙ্গে সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা সম্ভব নয়, অর্থাৎ এক্ষেপ ক্ষেত্রে তাদের উভয়ের পরিমাপের মধ্যে কিছুটা অনিশ্চয়তা থাকে, এবং এই দুটি অনিশ্চয়তার গুণফল অন্তত  $h/2\pi$  হয়, যেখানে  $h$  হল প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক।

কাজেই যদি  $x$  ও  $p_x$  একই সঙ্গে পরিমাপ করলে এদের পরিমাপের অনিশ্চয়তা যথাক্রমে  $\Delta x$  ও  $\Delta p_x$  হয়, তবে হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তার নীতি অনুযায়ী

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.4.1)$$

অনুরূপভাবে আমরা লিখতে পারি

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.4.2)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.4.3)$$

$$\text{এবং } \Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.4.4)$$

অনিশ্চয়তার নীতিতে যে দুটি ভৌত চলরাশির কথা উল্লেখ করা হয়েছে, এগুলি হল প্রকৃতপক্ষে হ্যামিলটনীয় সমীকরণের সাধারণীকৃত নির্দেশাঙ্ক (generalized coordinates)  $q_i$  এবং সাধারণীকৃত ভরবেগ উপাংশ (generalized moments)  $p_i$ । যদি কোনও পারমাণবিক তন্ত্রের হ্যামিলটনীয় অপেক্ষক (Hamiltonian function)  $H$  হয়, তবে সনাতন বলবিজ্ঞানের সাধারণ নীতি অনুযায়ী

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i, \quad \frac{\partial H}{\partial q_i} = -\dot{p}_i \quad \dots \dots (9.4.5)$$

এই দুটি সমীকরণকে হ্যামিলটনের অনুশাসিত গভীয় সমীকরণ (Hamilton's canonical equations of motions) বলে এবং  $q_i$  ও  $p_i$ -কে হ্যামিলটনীয় অর্থে আনুশাসিতরূপে যুগ্ম চলরাশি (Cononically Conjugate Variables) বলে। লক্ষ করুন,  $q_i$  ও  $p_i$  সাধারণীকৃত নির্দেশাঙ্ক ও ভরবেগ-উপাংশ হওয়ায়, কার্টেজীয় নির্দেশতন্ত্র অনুযায়ী  $q_i = x$  ধরলে  $p_i = p_x$  হবে। অনুরূপে  $q_i = y$  ধরলে  $p_i = p_y$  এবং  $q_i = z$  ধরলে

$p_i = p_j$  হবে। এছাড়া আমরা এও দেখাতে পারি যে কোনও পারমাণবিক তন্ত্রের  $t$  সময়ে মোটশক্তি  $E$  হলে  $q_i$  স্থানে  $t$  এবং  $p_i$  স্থানে  $E$  ধরা যায়।

অনিশ্চয়তার নীতিতে আর একটি বিষয় উল্লেখযোগ্য যে পরিমাপের এই অনিশ্চয়তা সংশ্লিষ্ট দুটি রাশিই যখন একযোগে পরিমাপ করা হয়, কেবল তখনই হয়ে থাকে, কেবল একটি রাশির পরিমাপের ক্ষেত্রে হয় না। যেমন, একটি ইলেকট্রন যখন গতিশীল থাকে, তখন যদি আমরা এর অবস্থান ও ভরবেগ এই দুটি রাশি একই সঙ্গে পরিমাপের কোনও চেষ্টা না করে কেবল ভরবেগ পরিমাপ করি, তবে তা সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবেই করা সম্ভব। অর্থাৎ, এই পরিমাপের মধ্যে কোনও অনিশ্চয়তা থাকবে না। কিন্তু এক্ষেত্রে ইলেকট্রনটির অবস্থান সম্বন্ধে আমাদের কোনও ধারণাই থাকবে না। অনুরূপভাবে, যদি আমরা কেবল ইলেকট্রনটির অবস্থান পরিমাপ করি, তবে ঐ পরিমাপ সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে করা সম্ভব, যদি এর ভরবেগের মান আমাদের কাছে সম্পূর্ণ অজ্ঞাত থাকে।

## 9.5 কণা বা ফোটনের তরঙ্গ-স্বপ দ্বারা অনিশ্চয়তা নীতির প্রমাণ (To prove the Uncertainty Principle by Wave Packets of a Particle or Photon)

আইনস্টাইনের তত্ত্ব অনুযায়ী একটি ফোটনকে বা ডি ব্রাগলির প্রকল্প অনুযায়ী একটি বস্তুকণাকে আমরা একটি একগুচ্ছ তরঙ্গের স্থানীয় (localized) জুপ (Packet) হিসাবে ধরতে পারি যা  $V$  বেগে (ফোটনের ক্ষেত্রে  $V = c$ )  $x$ -অক্ষ অভিমুখে অগ্রসর হয়। আপনি পূর্ব অধ্যায়ে লক্ষ্য করেছেন যে কণা বা ফোটন উভয়ের ক্ষেত্রেই এর ভরবেগ

$$p = \frac{h}{\lambda} = hk \quad \dots \dots (9.5.1)$$

এখানে  $k \left( = \frac{1}{\lambda} \right)$ -কে বলা হল তরঙ্গ-সংখ্যা অর্থাৎ একক দূরত্বে মোট তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের সংখ্যা।

এখন  $\lambda$  তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট একটিমাত্র তরঙ্গ  $x$ -অভিমুখে  $V$  বেগে অগ্রসর হলে এর সমীকরণ হল

$$y = A \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - Vt) \quad \dots \dots (9.5. 2(a))$$

$$\text{বা, } y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - Vt) \quad \dots \dots (9.5. 2(b))$$

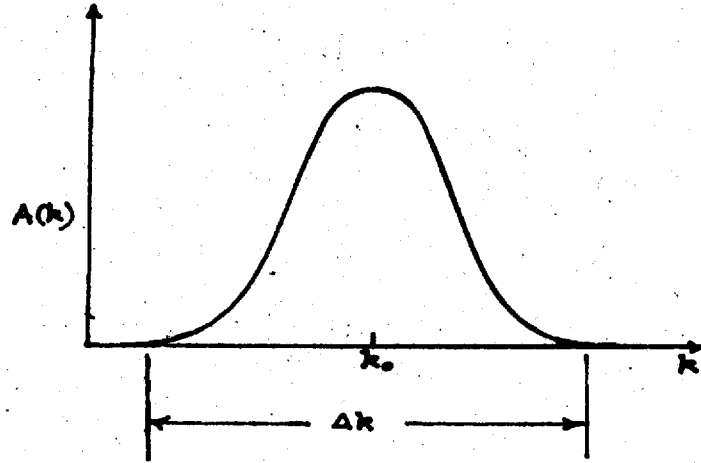
অর্থাৎ এই তরঙ্গের জন্য আমরা উপরের দুটি সমীকরণের যেকোনও একটি গ্রহণ করতে পারি। এ থেকে আমরা একটি তরঙ্গের সাধারণ সমীকরণ পাই

$$\begin{aligned} y &= A \left[ \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - Vt) + i \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - Vt) \right] \\ &= A e^{\frac{2\pi i}{\lambda} (x - Vt)} \\ &= A e^{2\pi i (kx - Vt)}, \quad i = \sqrt{-1} \quad \dots \dots (9.5.3) \end{aligned}$$

এখানে  $\frac{1}{\lambda} = k = \text{তরঙ্গ-সংখ্যা}$  এবং  $\frac{V}{\lambda} = v \text{ (নিউ) = কম্পাঙ্ক}$ ।  $A$ -কে তরঙ্গের বিস্তার (amplitude) বলে। কোনও স্থানে তরঙ্গের তীব্রতা এর বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক।

(9.5.3) সমীকরণটি একটি মাত্র তরঙ্গের সাধারণ সমীকরণ। এরদ্বারা একটি ফোটন বা কণাকে বোঝায় না। কারণ এই তরঙ্গের বিস্তার (amplitude)  $x$ -অক্ষের সর্বত্র সমান। কিন্তু যদি কোনও তরঙ্গদ্বারা একটি ফোটন বা কণাকে নির্দেশ করতে হয়, তবে ফোটন বা কণাটি কোনও সময়ে যে স্থানে আছে, কেবল সেস্থানেই তরঙ্গটির বিস্তার সর্বোচ্চ এবং অন্যান্য সকলস্থানে এর এই বিস্তার সর্বনিম্ন বা শূন্য হওয়া প্রয়োজন। এরূপ তরঙ্গকে আমরা স্থানীয় তরঙ্গভূপ (localized wave Packet) বলতে পারি। কিন্তু এরূপ স্থানীয় তরঙ্গ-ভূপ আমরা কেবল বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্য বিশিষ্ট বহু তরঙ্গের উপরিপাতদ্বারাই পেতে পারি। এখন এই বহু সংখ্যক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের গড়কে আমরা  $\lambda_0$  ( $= \frac{1}{k_0}$ ) দ্বারা প্রকাশ করতে পারি। তাছাড়া আমরা যদি আরও ধরে নিই যে এই গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্যই তরঙ্গের বিস্তার ( $A(k)$ ) সর্বোচ্চ হয় এবং এই গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উভয় পাশেই বিস্তার অতি দ্রুত কমে যায় (চিত্র 9.5.1), তবে, স্বভাবতই আমরা লিখতে পারি যে ফোটন বা কণার প্রকৃত তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য

$$\lambda = \lambda_0 \text{ এবং } k = k_0 \quad \dots \dots (9.5.4)$$



চিত্র 9.5.1

বহুসংখ্যক তরঙ্গের উপরিপাত (Superposition) আমরা ফুরিয়ার শ্রেণী (Fourier Series)-দ্বারা প্রকাশ করতে পারি। যদি তরঙ্গের অপেক্ষক  $\psi(x, t)$  ধরা হয়, তবে এই শ্রেণীর সমাকলন প্রসারণ প্রভাবে লেখা যায়—

$$\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k)e^{2\pi i(kx - vt)} dk \quad \dots \dots (9.5.5)$$

এখন ধরা যাক  $t$  সময়ে কণাটি  $x_0$  অবস্থানে আছে।

$$\therefore x_0 = Vt \text{ এবং যেহেতু } v = \frac{V}{\lambda} = Vk$$

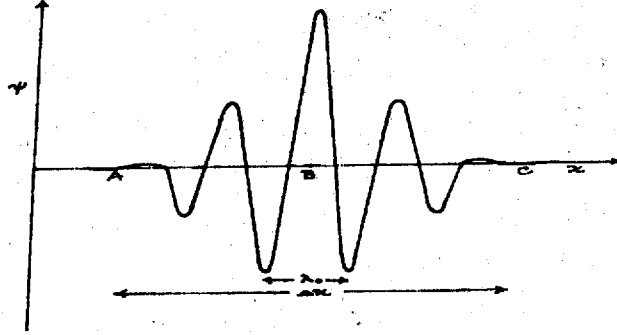
$$\therefore vt = Vk \frac{x_0}{V} = kx_0 \quad \dots \dots (9.5.6)$$

সূত্রাং (9.5.5) সমীকরণ থেকে আমরা পাই,

$$\psi(x, x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k)e^{2\pi ik(x-x_0)} dk \quad \dots \dots (9.5.7)$$

আমরা (9.5.7) সমীকরণদ্বারা  $t$  সময়ে  $x$ -অক্ষের বিভিন্ন অবস্থানে  $\psi$ -এর মান নির্ণয় করতে পারি। (9.5.2) চিত্রে  $x$ -অক্ষের বিভিন্নস্থানে  $\psi$  মান কিভাবে পরিবর্তিত হয়, তা দেখানো হল। (9.5.7) সমীকরণ থেকে আমরা দেখতে পাই যে যখন  $x = x_0$ , তখন

$$\psi_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k)dk \quad [\text{কারণ এস্থলে } e^0 = 1] \quad \dots \dots (9.5.8)$$



চিত্র 9.5.2

সূত্রাং এখানে তরঙ্গগুলির প্রত্যেকটির দশাই 0 এবং তার ফলে  $A(k)$  বিস্তারগুলি একসঙ্গে যুক্ত হয়ে সর্বোচ্চ লব্ধি বিস্তার  $\psi_0$  উৎপন্ন করে। আবার  $x - x_0$  যখন বড়, তখন  $\exp\{2\pi ik(x - x_0)\}$  রাশিটি  $k$ -র দ্রুত স্পন্দনশীল অপেক্ষকে পরিণত হয় এবং তার ফলে এর সমাকলনটি পরস্পর কাটাকাটি করে শূন্যের কাছে এগিয়ে যায়। কাজেই  $\psi$  অপেক্ষকটির মান কেবল  $x = x_0$ -র সমিহিত স্থানেই বেশী এবং অন্যত্র 0। সূত্রাং (9.5.2) চিত্র অনুযায়ী আমরা বলতে পারি যে ফোটন বা কণাটি A থেকে C বিন্দুর মধ্যে কোথাও আছে, অর্থাৎ এর অবস্থানের অনিশ্চয়তা  $\Delta x$ । অনুরূপে (9.5.1) চিত্র অনুযায়ী আমরা বলতে পারি যে ফোটন বা কণাটির তরঙ্গ-সংখ্যার অনিশ্চয়তা  $\Delta k$ ।

এখন তরঙ্গ গুচ্ছটির দৈর্ঘ্য  $\Delta x$  হবে, যদি বিভিন্ন দৈর্ঘ্যের তরঙ্গগুলি উপরিপাতের দ্বারা A ও C বিন্দুতে বিনাশ হয় এবং B বিন্দুতে নির্মিত হয়। কিন্তু এরূপ উপরিপাত তখনই সম্ভব, কেবল যখন A ও C-র মধ্যে কোনও একটি তরঙ্গের মোট তরঙ্গ-সংখ্যা অন্য একটি তরঙ্গের মোট তরঙ্গ-সংখ্যার চেয়ে অন্তত এক বেশী হবে।

এখন যেহেতু ধরা হয়েছে যে একক দূরত্বে তরঙ্গ-সংখ্যার অনিশ্চয়তা  $\Delta k$ , অতএব  $\Delta x$  দূরত্বে তরঙ্গ-সংখ্যার মোট অনিশ্চয়তা  $\Delta k \cdot \Delta x$ । সূত্রাং তরঙ্গগুলির উপরিপাতের শর্ত অনুযায়ী

$$\Delta k \cdot \Delta x \geq 1 \quad \dots \dots (9.5.9)$$

কিন্তু (9.5.1) সমীকরণ অনুযায়ী  $x$ -অক্ষ অভিমুখে ভরবেগ-উপাংশ



$$p_x = hk \quad \dots \dots (9.5.10)$$

$$\text{অতএব } \Delta p_x = h \Delta k \quad \dots \dots (9.5.11)$$

সুতরাং (9.5.9) ও (9.5.11) সমীকরণ দুটি থেকে আমরা পাই

$$\Delta P_x \Delta x \geq h \quad \dots \dots (9.5.12)$$

সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে একটি ফোটন বা কণাকে একটি তরঙ্গের স্ফূপ হিসাবে ধরলে, তা থেকে হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি পাওয়া যায়।

লক্ষ করুন, (9.5.12) সমীকরণটির সর্বনিম্ন মান  $h$ , কিন্তু হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তার নীতিতে এই মান  $\frac{h}{2\pi}$ । এই পার্থক্যের কারণ (9.5.9) শর্তটি নির্ণয়ে কিছুটা সরলীকরণ। কঠোর গাণিতিক পদ্ধতি অনুসরণ করলে দেখানো যায় যে

$$\Delta k \Delta x \geq \frac{1}{2\pi} \quad \dots \dots (9.5.13)$$

অর্থাৎ সেক্ষেত্রে আমরা হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তার নীতিটি অবিকল পাই। অনুরূপে  $y$ -অক্ষ এবং  $z$ -অক্ষ বিবেচনা করলে আমরা পাই

$$\Delta P_y \Delta y \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.5.14)$$

$$\text{এবং } \Delta P_z \Delta z \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.5.15)$$

আবার লক্ষ্য করুন, কণার (বা ফোটনের) অবস্থান ও ভরবেগের অনিশ্চয়তার শর্ত নির্ণয় করার জন্য (9.5.5) সমীকরণে একটি নির্দিষ্ট সময়ে  $x$ -এর পরিবর্তনের জন্য  $\psi$  অপেক্ষকটির পরিবর্তন বিবেচনা করা হয়েছে। এখন যদি আমরা  $x$ -কে নির্দিষ্ট রেখে  $t$  সময়ের সঙ্গে  $\psi$  কিভাবে পরিবর্তিত হয়, তা বিবেচনা করি, তবে ওপরে বর্ণিত সরলীকৃত পদ্ধতি অবলম্বন করে আমরা দেখাতে পারি যে,

$$\Delta t \Delta v \geq 1 \quad \dots \dots (9.5.16)$$

অনুরূপে কঠোর গাণিতিক পদ্ধতি অবলম্বন করলে আমরা পাই,

$$\Delta t \Delta v \geq \frac{1}{2\pi} \quad \dots \dots (9.5.17)$$

এখন যদি আমরা তরঙ্গ-স্ফূপটিকে একটি ফোটনরূপে কল্পনা করি, তবে এর শক্তি

$$E = hv \quad \dots \dots (9.5.18)$$

$$\text{বা, } \Delta E = h \Delta v \quad \dots \dots (9.5.19)$$

সুতরাং (9.5.16) ও (9.5.19) সম্বন্ধ দুটির দ্বারা আমরা পাই

$$\Delta t \Delta E \geq h \quad \dots \dots (9.5.20)$$

এবং অনুরূপে (9.5.17) ও (9.5.19) শর্ত দুটি থেকে পাই

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2\pi} \quad \dots \dots (9.5.21)$$

### অনুশীলনী—1

অনুশীলনী 1. 200 ইলেকট্রন ভোল্ট শক্তির একটি ইলেকট্রন  $10^{-4}$  cm ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার ছিদ্র দিয়ে চালিত হলে তার নির্গম কোণে অনিশ্চয়তা কত?

সমাধান :  $\frac{p^2}{2m} = E = 200 \text{ eV} = 3.2 \times 10^{-10}$  আর্গ

$$p = (2 \times 9 \times 10^{-28} \times 3.2 \times 10^{-10})^{1/2} \text{ গ্রাম সেমি / সেঃ}$$

এখন  $\Delta p_x = \frac{\hbar}{\Delta x} = \frac{10^{-27}}{2 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^{-24}$

$$\theta = \frac{\Delta p_x}{p} = \frac{5 \times 10^{-24}}{(2 \times 9 \times 3.2 \times 10^{-28})^{1/2}}$$

$$\approx 6 \times 10^{-6} \text{ rad.}$$

অনুশীলনী 2. 0.1 গ্রাম একটি সীসার বল  $10^3$  সেমি/সেঃ বেগে 1 সেমি বৃত্তাকার ছিদ্রের মধ্যে চালিত হলে নির্গম কোণের অনিশ্চয়তা কত?

সমাধান :  $p = 0.1 \times 10^3$  গ্রাম সেমি / সেঃ

এবং  $\Delta p = \frac{\hbar}{\Delta x} = \frac{10^{-27}}{2 \times \theta} = 5 \times 10^{-28}$

$$\therefore \theta = \frac{5 \times 10^{-28}}{1 \times 10^3} \approx 5 \times 10^{-30} \text{ রেডিয়ান।}$$

[বিঃ দ্রঃ → সমাধান দুটি অনিশ্চয়তায় মান লক্ষ করুন।]

অনুশীলনী 3. : অনিশ্চয়তার নীতির সাহায্যে দেখান যে ইলেকট্রন নিউক্লিয়াসের মধ্যে থাকতে পারে না। নিউক্লীয় ব্যাস  $10^{-13}$  সেমি।

সমাধান : এখানে ইলেকট্রন নিউক্লিয়াসে থাকলে  $\Delta x = 10^{-13}$  সেমি

$$\Delta p_x = \frac{\hbar}{\Delta x} = \frac{10^{-27}}{10^{-13}} = 10^{-14} \text{ গ্রাম সেমি / সেঃ}$$

$$E = \frac{(\Delta p_x)^2}{2m} \approx 200 \text{ মিলিয়ন ইলেকট্রন ভোল্ট। এই শক্তির কোন ইলেকট্রন বাস্তবে পাওয়া যায় না।}$$