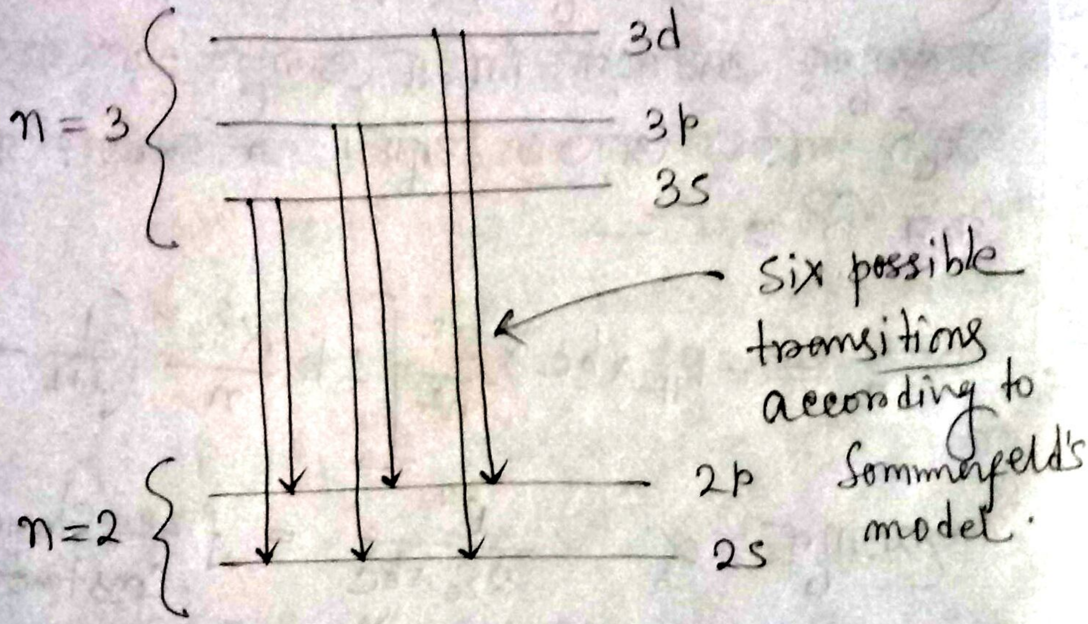
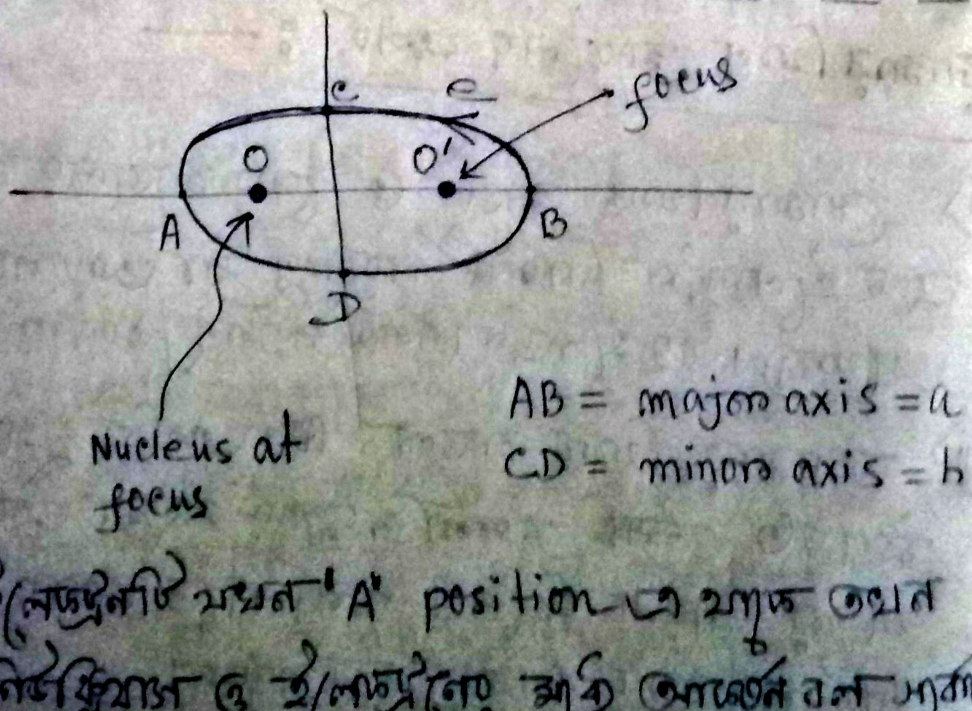
যেমন— বামার সিরিজের H_α line এর ক্ষেত্রে,
অর্থাৎ $n = 3 \longrightarrow n = 2$ transition এর ক্ষেত্রে
সোমারফিল্ড মডেল প্রয়োগ করে 6 টি fine lines পাওয়া সম্ভব, কিন্তু প্রকৃতপক্ষে doublet পাওয়া যায়।

$$n = 3 \; : \; l = 0, 1, 2$$

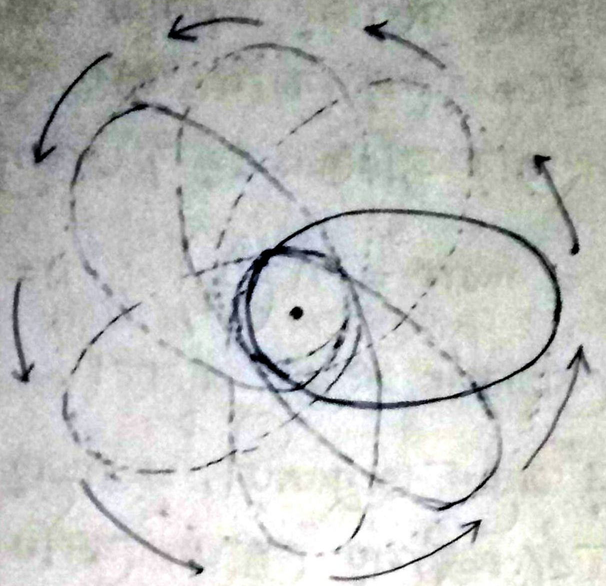
$$n = 2 \; : \; l = 0, 1$$





ইলেকট্রনটি যখন 'A' position এ থাকে তখন নিউক্লিয়াস ও ইলেকট্রনের মধ্যে আকর্ষণ বল সর্বাধিক হয়, অর্থাৎ 'A' position এ ইলেকট্রনের বেগ

আকৃষ্ট হয় এবং "B" position এ ইলেকট্রনের বেগ সর্বনিম্ন হয়।



Rosette motion

ইলেকট্রনের আপেক্ষিক ভরের পরিবর্তনের ফলে ইলেকট্রনীয় উপবৃত্তাকার কক্ষপথের অপসরণ ঘটে। উপবৃত্তাকার কক্ষপথটির "ফোকাস" কে কেন্দ্র করে বৃত্তাকার কক্ষপথ অপসারণ ঘটে।

iii) 3D - orbital এর কোন ধারণা পাওয়া যায়না।

iv) বর্ণালীর রেখা গুলির তীব্রতার কোন ধারণা পাওয়া যায়না।

v) জিম্যান বা স্টার্ক ইফেক্ট ব্যাখ্যা করতে পারেনা

vi) হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি মেনে চলেনা।

ভেক্টর মডেল

⇒ বোর মডেল অনুযায়ী, ইলেকট্রন নিউক্লিয়াস কে কেন্দ্র করে সেই সমস্ত বৃত্তাকার কক্ষপথে প্রদক্ষিণ করে যাদের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ (L), $\frac{h}{2\pi}$ এর পূর্ণ সংখ্যার গুণিতক হয়। অর্থাৎ,

$$L = mvr = n\left(\frac{h}{2\pi}\right) ; \quad n = 1, 2, 3, \ldots$$

n কে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা বলে।

⇒ অর্থাৎ, বোর মডেল অনুযায়ী, বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে কৌণিক ভরবেগের কোয়ান্টাইজেশন ধর্ম পালিত হয়।

⇒ আবার সোমারফিল্ড মডেল অনুযায়ী, প্রতিটি মুখ্য শক্তিস্তর বা কক্ষপথ, একাধিক উপশক্তিস্তর বা উপকক্ষপথ দ্বারা গঠিত যাদের প্রত্যেকের n এর মান এক কিন্তু l এর মান আলাদা। এক্ষেত্রেও একটি নির্দিষ্ট কক্ষপথের অন্তর্গত উপকক্ষপথ গুলিতে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ, কোয়ান্টাইজেশন ধর্ম মেনে চলে।

$$L = \sqrt{l(l+1)} \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right)$$

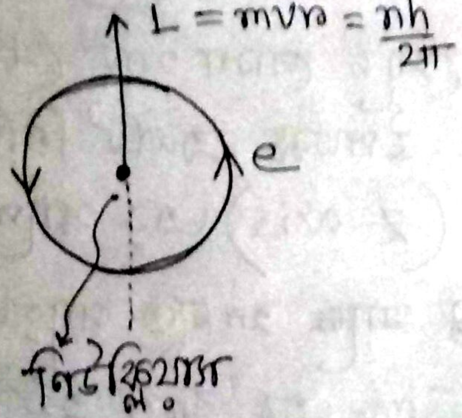
l = গৌণ কোয়ান্টাম সংখ্যা

L = ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ।

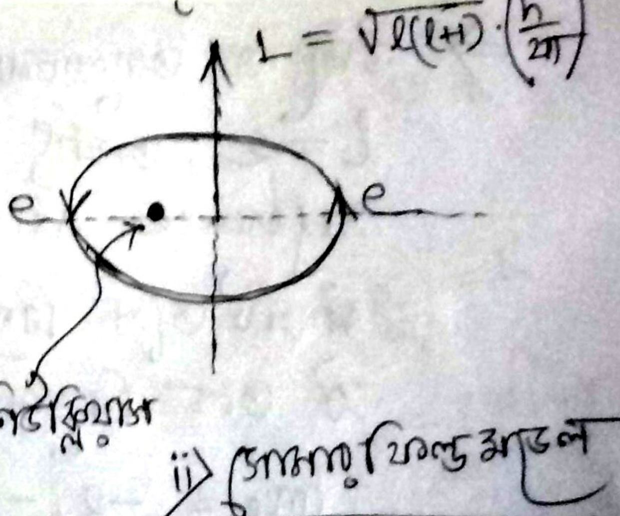
⇒ কিন্তু আমরা জানি, কৌণিক ভরবেগ (angular momentum) একটি ভেক্টর রাশি, মান এবং অভিমুখ দুই-ই আছে।

→ অর্থাৎ, বোর / সোমারফিল্ড মডেল অনুযায়ী কেবলমাত্র কৌণিক ভরবেগের মান (magnitude) কোয়ান্টাইজেশন বিধি মেনে চলে।

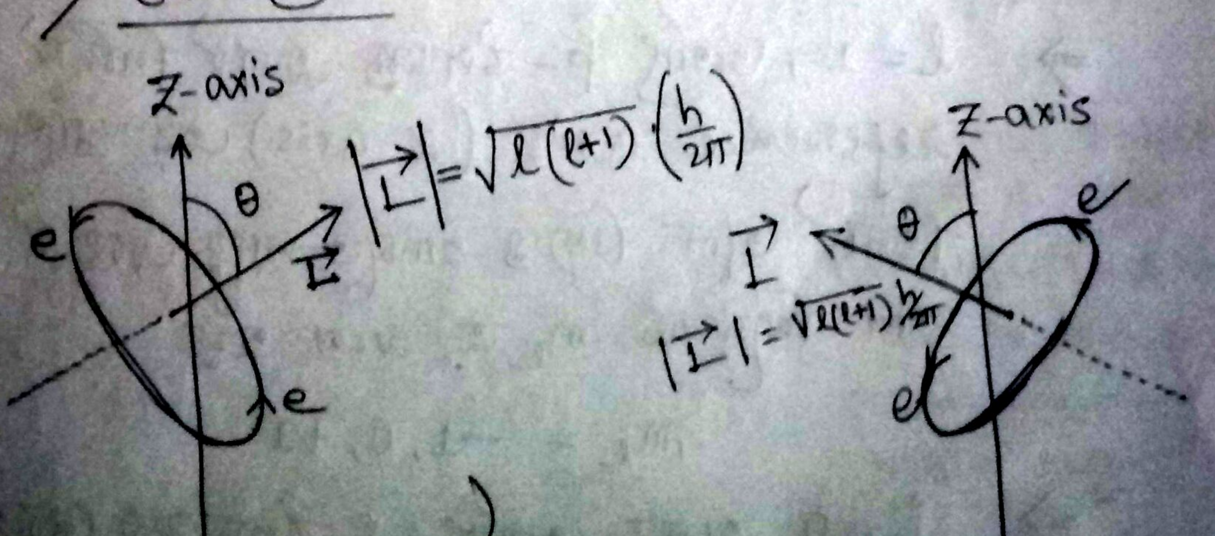
→ পরবর্তীতে "ভেক্টর মডেল" - এ বলা হল, কৌণিক ভরবেগের অভিমুখ - ও কোয়ান্টাইজেশন বিধি মেনে চলে। অর্থাৎ, একটি reference axis এর সাপেক্ষে উপবৃত্তাকার পথ গুলি একটি নির্দিষ্ট তলে (plane) অবস্থান করে যাতে করে ঐ তলে অবস্থানকারী উপবৃত্তাকার পথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগের ঐ অক্ষ (reference axis) বরাবর মান $0, \pm l \times \left(\frac{h}{2\pi}\right)$ এর সমান হয়।



i) বোর মডেল



ii) সোমারফিল্ড মডেল



iii) ভেক্টর মডেল

⇒ অর্থাৎ, উপশক্তিস্তর গুলি যে যে তলে অবস্থান করতে পারে সেই তল (plane) গুলিকে নির্দিষ্ট করে বোঝানোর জন্য আরও একটি কোয়ান্টাম সংখ্যার প্রয়োজন হয়। একে চৌম্বকীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা বলে। কারণ, reference axis, z বরাবর যদি চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় তখন এই অক্ষের সাপেক্ষে বিভিন্ন তলে অবস্থিত উপশক্তিস্তর গুলির শক্তির পার্থক্য হয়। চৌম্বকীয় কোয়ান্টাম সংখ্যা (magnetic quantum number) কে m_l দ্বারা প্রকাশ করা হয় এবং এর মান হয় 0, $\pm l$ এর মধ্যে যে কোন পূর্ণ সংখ্যা।

⇒ উপরোক্ত আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে, $l = 2$, অর্থাৎ d-উপশক্তিস্তর একটি নির্দিষ্ট reference axis (z-axis) এর সাপেক্ষে পাঁচটি তলে বিন্যস্ত থাকতে পারে এবং ঐ তল নির্দেশক m_l এর মান হয়

$$m_l = -2, -1, 0, +1, +2.$$

⇒ $l = 1$, অর্থাৎ p-উপশক্তিস্তর একটি নির্দিষ্ট reference axis (z-axis) এর সাপেক্ষে তিনটি তলে বিন্যস্ত থাকতে পারে এবং ঐ তল নির্দেশক m_l এর মান হয়

$$m_l = -1, 0, +1$$

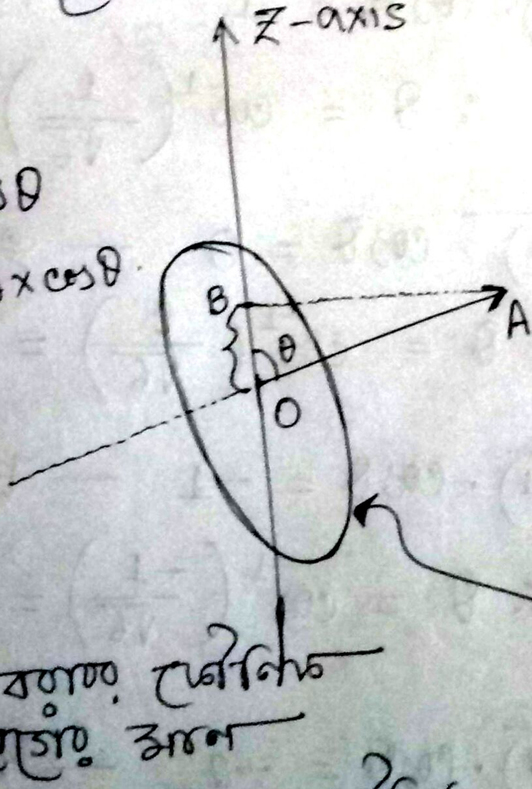
⇒ $l = 0$ হলে, অর্থাৎ s-উপশক্তিস্তরের ক্ষেত্রে,

reference axis সাপেক্ষে তল নির্দেশক m_l এর মান হয় $m_l = 0$. অর্থাৎ s-উপস্তর reference axis এর সাপেক্ষে কোনোরকমের কোণেই তলেই অবস্থান করতে পারে।

⇒ সুতরাং, সাধারণ ভাবে (in general) বলতে গেলে l উপস্তর একটি নির্দিষ্ট reference axis এর সাপেক্ষে (z-axis) ঠিক সেই সেই তল সমূহতে অবস্থান করতে পারে যাদের ক্ষেত্রে ঐ reference axis বরাবর কৌণিক ভরবেগের মান হয় $m_l \times \frac{h}{2\pi}$, যেখানে $m_l = -l, \dots, 0, \dots +l$. একে কৌণিক ভরবেগের অভিমুখের কোয়ান্টাইজেশন বলে। অর্থাৎ, কৌণিক ভরবেগের অভিমুখ $(2l+1)$ রকম হতে পারে।

$$\frac{OB}{OA} = \cos\theta$$

$$\therefore OB = OA \times \cos\theta$$



$$\sqrt{l(l+1)} \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right) = L$$

$\vec{OA} = \vec{L}$ = কৌণিক ভরবেগ = ভেক্টর রাশি

l উপস্তর, z-axis সাপেক্ষে θ কোণে অবস্থান করে, অর্থাৎ z-axis সাপেক্ষে θ কৌণিক তলে অবস্থান করে।

$|\vec{OA}|$ = OA বরাবর কৌণিক ভরবেগের মান

$|\vec{OB}|$ = z-axis বরাবর কৌণিক ভরবেগের মান

$$= \sqrt{l(l+1)} \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right) \cdot \cos\theta$$

∴ কৌণিক ভরবেগের অভিমুখের কোয়ান্টাইজেশন অনুযায়ী

$$\sqrt{l(l+1)} \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right) \cdot \cos\theta = m_l \times \left(\frac{h}{2\pi}\right)$$

$$\therefore \boxed{m_l = \sqrt{l(l+1)} \cdot \cos\theta}$$

⇒ $l = 2$ (অর্থাৎ d-উপস্তরের ক্ষেত্রে)

$m_l = +2, +1, 0, -1, -2$

i) $\sqrt{2(2+1)} \cdot \cos\theta = +2$ — প্রথম তল

$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(\frac{2}{\sqrt{6}}\right) = 35.26^\circ$

ii) $\sqrt{2(2+1)} \cdot \cos\theta = 1$ — দ্বিতীয় তল

$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) = 65.91^\circ$

iii) $\sqrt{2(2+1)} \cdot \cos\theta = 0$ — তৃতীয় তল

$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(\frac{0}{\sqrt{6}}\right) = 90^\circ$

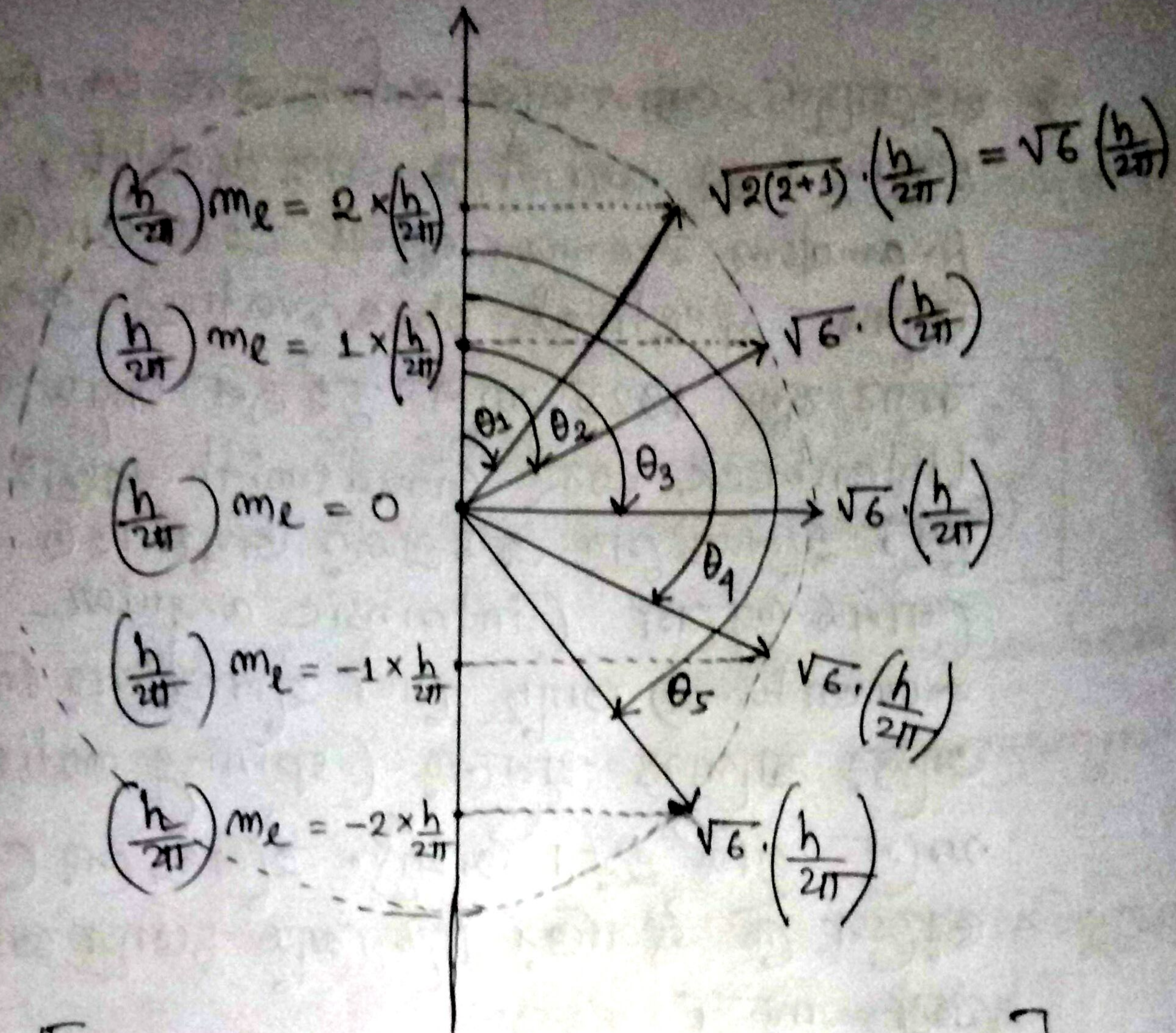
iv) $\sqrt{2(2+1)} \cdot \cos\theta = -1$ — চতুর্থ তল

$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(\frac{-1}{\sqrt{6}}\right) = 114.09^\circ$

v) $\sqrt{2(2+1)} \cdot \cos\theta = -2$ — পঞ্চম তল

$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(\frac{-2}{\sqrt{6}}\right) = 144.74^\circ$

→ $l = 2$ উপস্তরের ক্ষেত্রে, কৌণিক ভরবেগের অভিমুখ $(2l+1) = (2\times2+1) = 5$ রকম হয়।



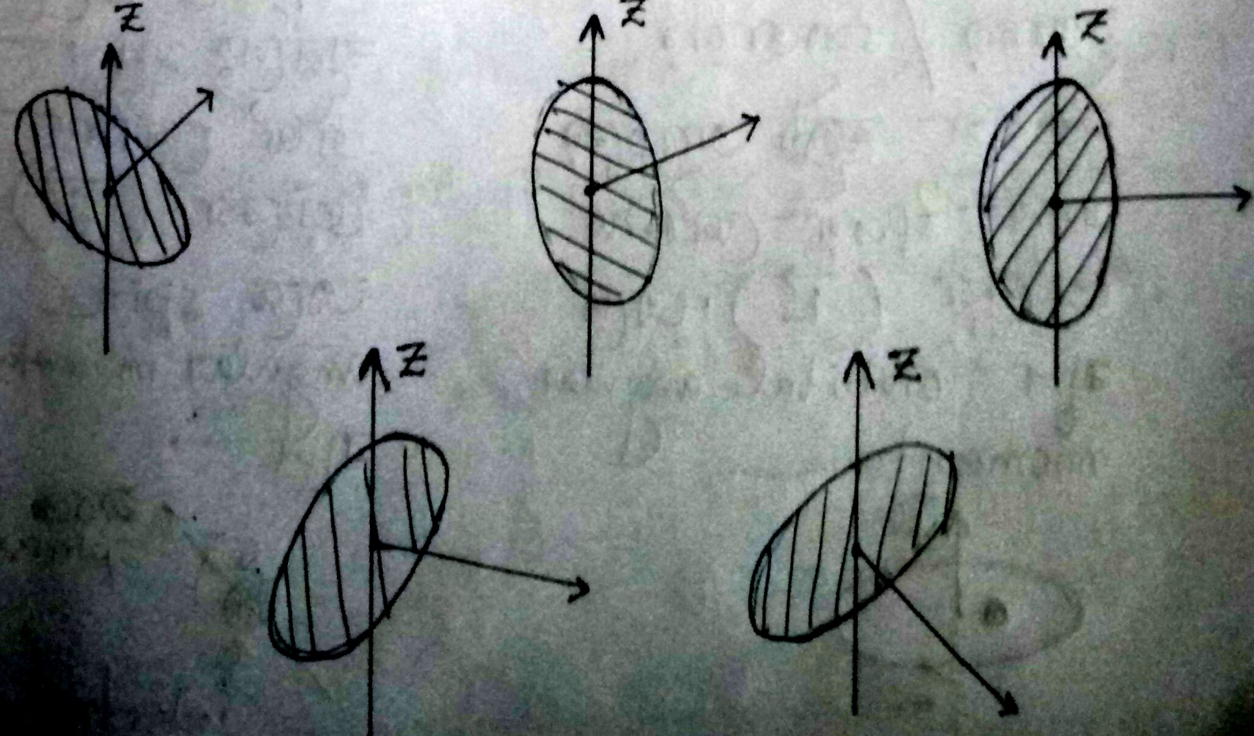
$\theta_1 = 35.26^\circ$ $\qquad$ $\theta_4 = 114.09^\circ$

$\theta_2 = 65.91^\circ$ $\qquad$ $\theta_5 = 144.74^\circ$

$\theta_3 = 90^\circ$

$\Downarrow$

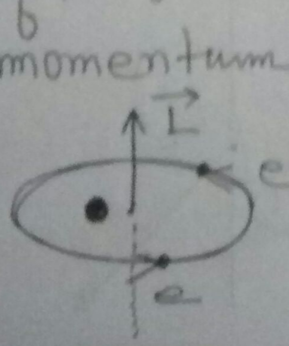
∴ পাঁচটি কৌণিক তল

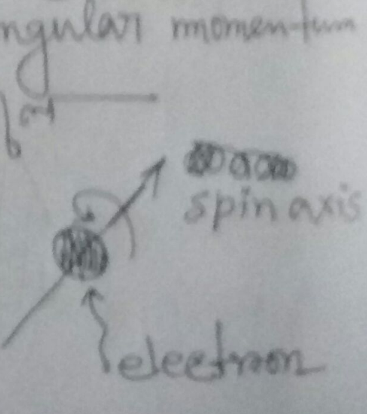


→ হাইড্রোজেন, অ্যালকালি মেটাল এবং Cu, Ag, Au ইত্যাদি মৌলের বর্ণালীতে প্রাপ্ত doublet, Anamalous Zeeman effect এবং আরও অনেক spectral observations ব্যাখ্যা করার জন্য 1925 সালে দুই জন পদার্থবিদ Uhlenbeck এবং Goudsmith প্রস্তাব করেন যে, ইলেকট্রনের একপ্রকার অন্তর্নিহিত কৌণিক ভরবেগ (intrinsic angular momentum) আছে যেটি ইলেকট্রনের নিজ অক্ষের সাপেক্ষে ঘূর্ণনের (spining motion) ফলে সৃষ্টি হয়। অর্থাৎ, ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগকে উৎসের দিক থেকে দুভাগে ভাগ করা যায়।

কৌণিক ভরবেগ (angular momentum)

- নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে বৃত্তাকার / উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনের ফলে উৎপন্ন কৌণিক ভরবেগ ($\vec{L}$)। একে বলে orbital angular momentum
- নিজ অক্ষ সাপেক্ষে ঘূর্ণনের ফলে সৃষ্ট কৌণিক ভরবেগ ($\vec{S}$)। একে spin angular momentum বলে





⇒ spin angular momentum এর মান orbital angular momentum এর অনুরূপ।

$$|\vec{S}| = \sqrt{s(s+1)}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$$

[S = বড় হাতের S , (capital S)
s = ছোট হাতে s , (small s)]

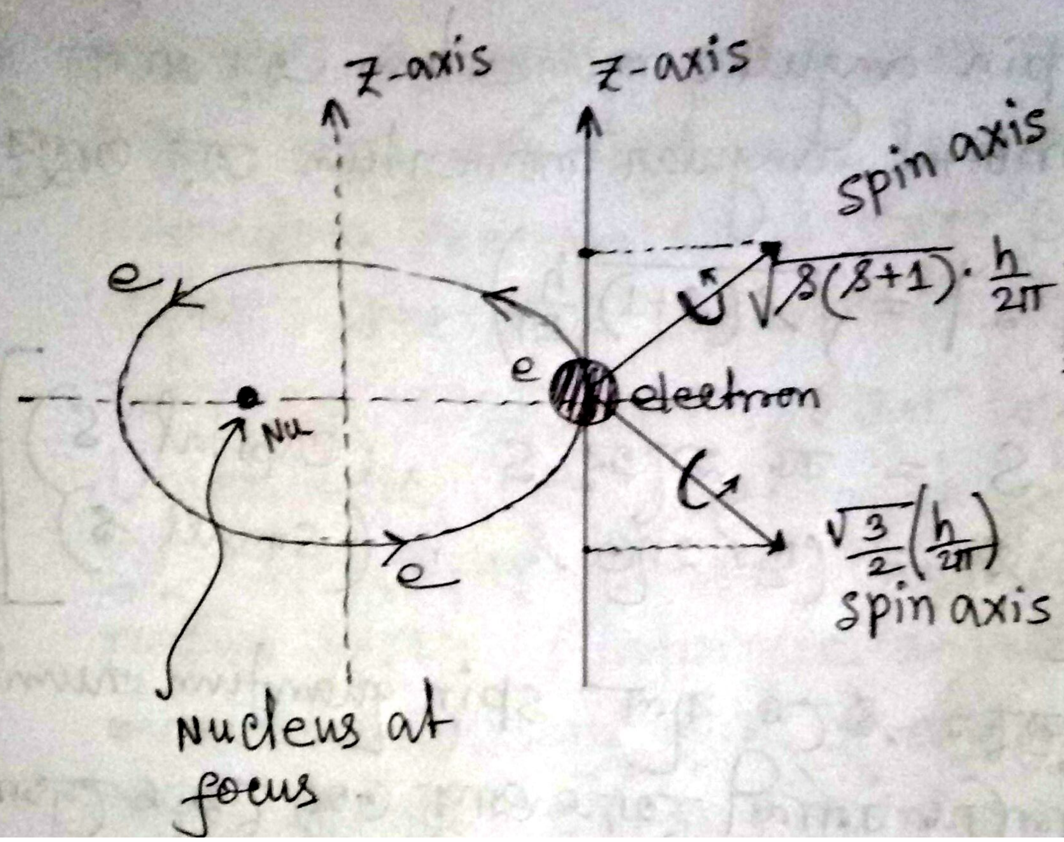
এক্ষেত্রে s কে বলে spin quantum number. পারমাণবিক বর্ণালী থেকে প্রাপ্ত তথ্য থেকে দেখা যায় s এর মান অর্থাৎ $\frac{1}{2}$।

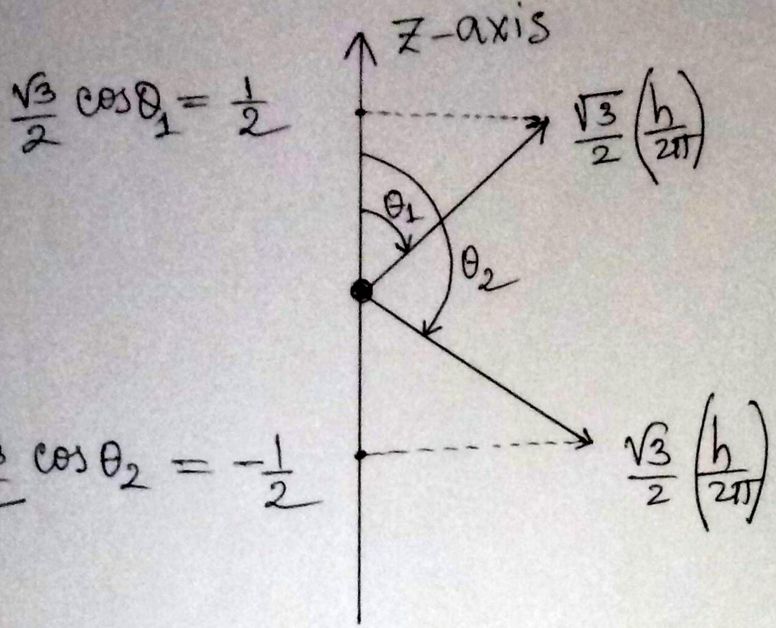
⇒ orbital angular momentum এর অভিমুখের কোয়ান্টাইজেশনের অনুরূপ spin angular momentum এর অভিমুখের ও কোয়ান্টাইজেশন হয়, অর্থাৎ spin angular momentum এমন অভিমুখে বিন্যস্ত থাকে যাতে করে একটি reference axis (z-axis) বরাবর এর মান হয় $m_s \times \frac{h}{2\pi}$. এখানে m_s কে magnetic spin quantum number বলে।

m_l এর মতো m_s এরও $(2s+1)$ রকম $= \left(2\times\frac{1}{2}+1\right) = 2$ রকম মান থাকে। m_s এর মান $\pm s \times \left(\frac{h}{2\pi}\right)$

$$\therefore m_s = +\frac{1}{2} \text{ এবং } -\frac{1}{2}.$$

$$\boxed{m_s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \cos\theta}$$


Z-axis
Z-axis
spin axis
e
e
e
Nu
electron
Nucleus at focus
$\sqrt{s(s+1)} \cdot \frac{h}{2\pi} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)} \cdot \frac{h}{2\pi}$
$= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$
$\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$
spin axis



$$\therefore \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta_1 = \frac{1}{2}$$

$$\therefore \cos\theta_1 = \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 54.55^\circ$$

আবার $\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta_2 = -\frac{1}{2}$

$$\therefore \cos\theta_2 = -\frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \theta_2 = \cos^{-1}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 125.45^\circ$$

⇒ অর্থাৎ একটি নির্দিষ্ট reference axis সাপেক্ষে ইলেকট্রনের spin axis অবশ্যই 54.55° এবং 125.45° কোণ করে অবস্থান করে।

⇒ এক্ষেত্রে s = spin quantum number $= \frac{1}{2}$

m_s = magnetic spin quantum number $= \pm\frac{1}{2}$