হাইড্রোজেন পরমাণুর বিভিন্ন কক্ষপথের শক্তির মানের অন্তর:-

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{2\pi^2 m \cdot Z^2 e^4}{n^2 h^2}$$

$$= -R_H \times hc \times \frac{Z^2}{n^2}$$

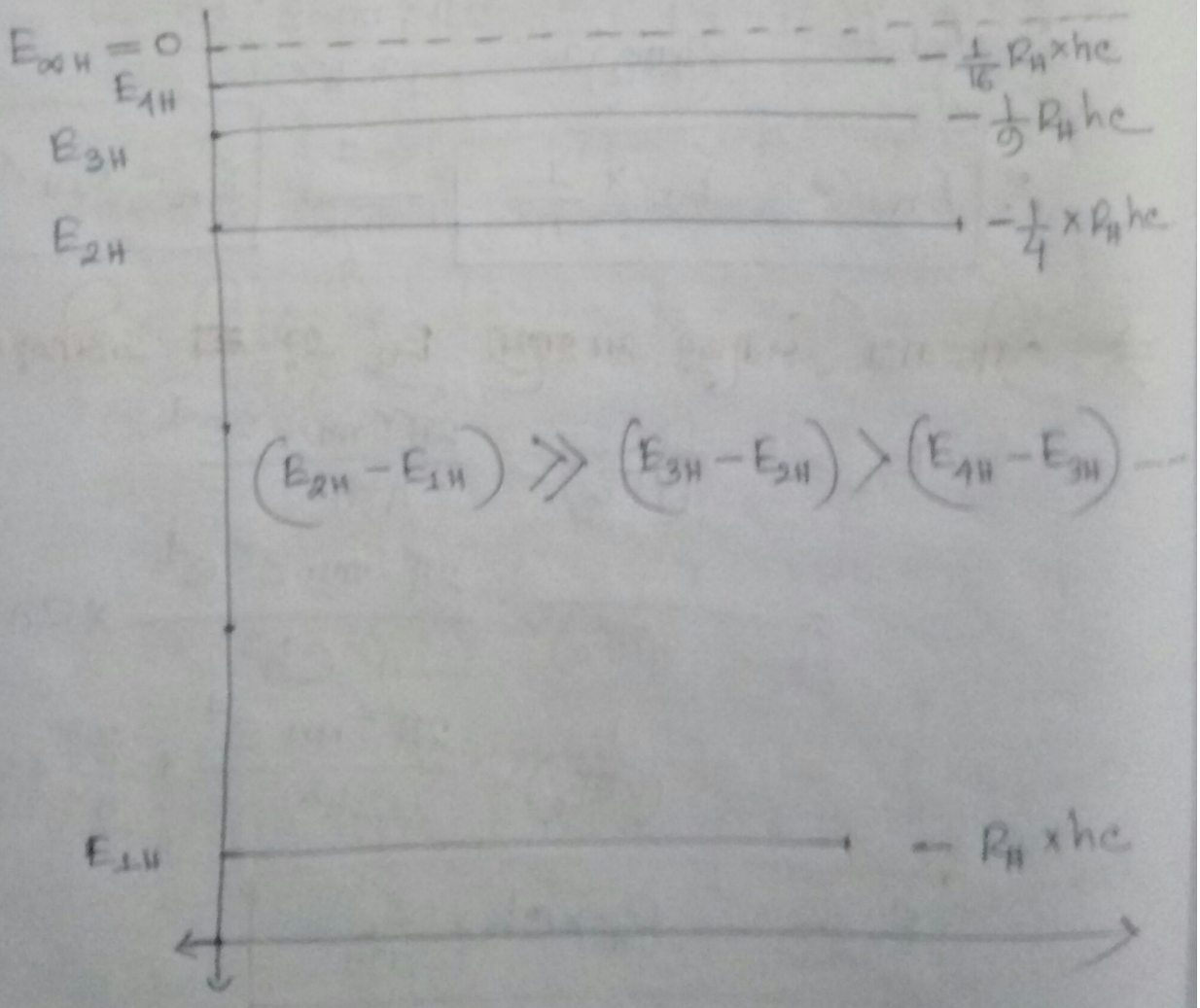
$$\therefore E_{1H} = -R_H \times hc \times \frac{1^2}{1^2} = -R_H \times hc$$

$$\therefore E_{2H} = -R_H \times hc \times \frac{1^2}{2^2} = -R_H hc \times \frac{1}{4} = \frac{E_{1H}}{4}$$

$$\therefore E_{3H} = -R_H \times hc \times \frac{1^2}{3^2} = -R_H hc \times \frac{1}{9} = \frac{E_{1H}}{9}$$

$$\therefore E_{4H} = -R_H \times \frac{1^2}{4^2} = -R_H hc \times \frac{1}{16} = \frac{E_{1H}}{16}$$

$$(E_{2H} - E_{1H}) \gg (E_{3H} - E_{2H}) > (E_{4H} - E_{3H}) \cdots$$



অর্থাৎ উপরের মান থেকে পরিষ্কার বোঝা যায় যে, $n=1$ / প্রথম কক্ষপথের শক্তি সর্বনিম্ন এবং n এর মান বৃদ্ধির সহিত কক্ষপথ গুলির শক্তি বৃদ্ধি পায়। $n=\infty$ হলে, কক্ষপথের শক্তি সর্বাধিক ($E_\infty=0$) মান পৌঁছায়। n এর মান বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে কাছাকাছি দুটি শক্তিস্তরের পার্থক্য ক্রমে কমতে থাকে, অর্থাৎ শক্তি নির্দেশকারী রেখা/line গুলির দূরত্ব কমতে থাকে। n এর মান খুব বেশি হলে দুটি line এর মধ্যে দূরত্ব এত কম হয় যে, তাদের আলাদা ভাবে সনাক্ত করা কঠিন হয়ে পড়ে। সেই অবস্থায় line গুলি একে অপরের সাথে মিলিত হয়ে একটি band তৈরি করে।

⇒ **হাইড্রোজেন পরমাণুর আয়নীকরণ শক্তি নির্ণয়:—**

হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রন টিকে প্রথম কক্ষপথ ($n=1$) থেকে অসীম দূরত্বে স্থানান্তরিত করে $H^{\oplus}$ আয়ন তৈরী করতে যে পরিমাণ শক্তির প্রয়োজন হয়, তাকে H-পরমাণুর আয়নীকরণ শক্তি বলে।

আমরা জানি, $$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2}\cdot\frac{2\pi^2 \cdot m \cdot z^2 \cdot e^4}{n^2 h^2}$$

$$\therefore E_1 = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2}\cdot\frac{2\pi^2 \cdot m \cdot z^2 \cdot e^4}{1^2 \cdot h^2}$$

$$\therefore E_\infty = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2}\cdot\frac{2\pi^2 \cdot m \cdot z^2 \cdot e^4}{\infty^2 \cdot h^2} = 0$$

$$\therefore \Delta E = IE = (E_\infty - E_1)$$
$$= 0 - \left(-\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2}\cdot\frac{2\pi^2 \cdot m \cdot z^2 e^4}{h^2}\right)$$

$$\therefore IE = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{2\pi^2 m \cdot Z^2 \cdot e^4}{h^2}$$

$$\boxed{IE = 13.6 \text{ eV}}$$

⇒ **বোর-মডেলের সাফল্য এবং ব্যর্থতা :-**

সাফল্য :-

i) বোর-মডেলের সাহায্যে পরমাণুর স্থায়িত্ব ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়।

রাদারফোর্ডের মডেলে বলা ছিল যে ঋণাত্মক চার্জযুক্ত ইলেকট্রন বৃত্তাকার কক্ষপথে ধনাত্মক চার্জযুক্ত নিউক্লিয়াস কে কেন্দ্র করে আবর্তিত হয়। কিন্তু তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে, এই রূপে আবর্তনশীল ইলেকট্রন থেকে অবিরত তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নির্গত হওয়ার ফলে ইলেকট্রনের শক্তি ক্রমাগত হ্রাস পাবে এবং শেষে সময়ে ইলেকট্রন নিউক্লিয়াসে গিয়ে পড়বে। অর্থাৎ, তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে পরমাণু সুস্থিত হতে পারেনা। কিন্তু বোর মডেলে বলা হল যে, ইলেকট্রন কোন নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তিত হওয়ার সময় কোন শক্তি শোষণ বা বর্জন করবেনা, অর্থাৎ ইলেকট্রনের শক্তি সর্বদা স্থির থাকবে। কাজেই এই মতবাদ অনুযায়ী পরমাণু সুস্থিত হবে।

ii) বোর মডেলের সাহায্যে H-পরমাণুর রেখা-বর্ণালীর ব্যাখ্যা পাওয়া সম্ভব হয়।

পূর্ববর্তী রাদারফোর্ডের মডেল অনুযায়ী আবর্তনশীল ইলেকট্রন থেকে ক্রমাগত

অবিচ্ছিন্নভাবে বিকিরণ নির্গত হওয়ার ফলে যে নিঃসরণ বর্ণালী পাওয়ার কথা তা নিরবচ্ছিন্ন প্রকৃতির হওয়া উচিত। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে H-পরমাণুর নিঃসরণ বর্ণালী বিচ্ছিন্ন প্রকৃতির (discontinious) হয়। বোর মডেলের সাহায্যে এর ব্যাখ্যা পাওয়া যায়। বোর মডেল অনুযায়ী, ইলেকট্রন যখন উচ্চতর শক্তিস্তর থেকে নিম্নতর শক্তিস্তরে অগ্রসর হয়ে লাফিয়ে নামে তখন নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণ নির্গত হয়। এইভাবে বিচ্ছিন্ন রেখা বর্ণালীর সৃষ্টি হয়।

iii) বোর মডেলের সাহায্যে মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা বা মুখ্য শক্তিস্তরের ধারণা পাওয়া যায় এবং এই কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তি, স্থিতিশক্তি, গতিশক্তি, গতিবেগ, কক্ষপথের ব্যাসার্ধ ইত্যাদির মান নির্ণয় করা সম্ভব হয়।

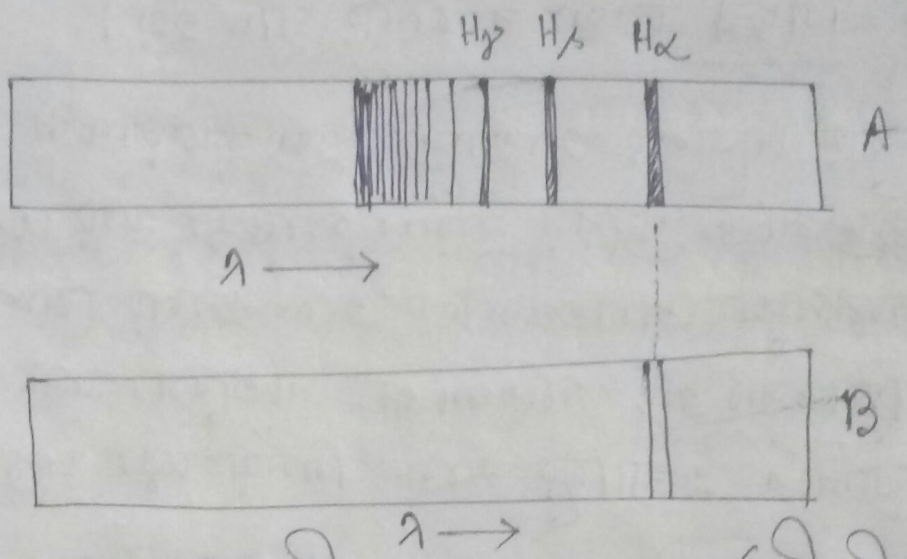
iv) এই মডেলের সাহায্যে H-পরমাণুর আয়নীকরণ শক্তির মান ও নির্ণয় করা যায়।

ত্রুটি :—

i) বোর মডেলের সাহায্যে কেবল মাত্র এক-ইলেকট্রন বিশিষ্ট পরমাণু বা আয়নের বর্ণালী ব্যাখ্যা করা যায়। যেমন H, He^{+}, Li^{2+}, Be^{3+} ইত্যাদি। কিন্তু বহু-ইলেকট্রন বিশিষ্ট পরমাণু বা আয়নের বর্ণালী ব্যাখ্যা করা যায় না।

ii) বোর মডেলের সাহায্যে দ্বিমাত্রিক কক্ষপথের (2D-orbit) ধারণা পাওয়া যায় কিন্তু ত্রিমাত্রিক কক্ষকের (3D-orbital) ধারণা পাওয়া যায় না।

iii) বোর মডেলের সাহায্যে, উচ্চ বিশ্লেষণী ক্ষমতা সম্পন্ন বর্ণালী-বীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে গৃহীত পারমাণবিক বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন (fine structure) ব্যাখ্যা করা যায়না। যেমন- H-পরমাণুর Balmer Series এর H_α line এর doublet, Na-পরমাণুর D-line এর doublet, Mg-পরমাণুর triplet, Hg-পরমাণুর triplet ইত্যাদি।



A : নিম্ন বিশ্লেষণী ক্ষমতা সম্পন্ন বর্ণালী বীক্ষণ যন্ত্র গৃহীত H-পরমাণুর রেখা বর্ণালীর চিত্র (বামার শ্রেণীর ক্ষেত্রে)

B : উচ্চ বিশ্লেষণী ক্ষমতা সম্পন্ন যন্ত্র গৃহীত বর্ণালী।

iv) তড়িৎ বা চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে এক বা বহু-ইলেকট্রন বিশিষ্ট পরমাণুর পারমাণবিক বর্ণালীর সূক্ষ্মতর বিভাজন বোর মডেল ব্যাখ্যা করতে পারেনা ___ । চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পারমাণবিক বর্ণালীর সূক্ষ্মতর বিভাজন কে

মডেল জিম্যান এফেক্ট এবং স্টার্ক এফেক্টের প্রভাবে পারমাণবিক বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন কে ব্যাখ্যা ব্যর্থ হয়েছে।

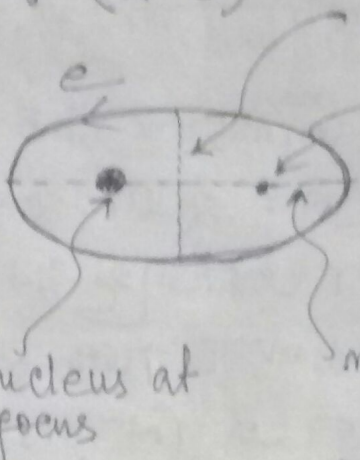
v) বোর মডেল থেকে বর্ণালীর রেখা গুলির তীব্রতা সম্পর্কে কোন ধারণা পাওয়া যায়না।

vi) হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী, ইলেকট্রনের মত কোন ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র কণার অবস্থান ও বেগ একইসাথে খুব সঠিকভাবে নির্ণয় করা সম্ভব নয়। কিন্তু বোর মডেল থেকে দেখা গেছে যে এগুলি সব সঠিকভাবে নির্ণয় করা যায়। অর্থাৎ বোর মডেল হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি কে সমর্থন করেনা।

: সোমারফিল্ড মডেল :

বোর মডেল H-পরমাণুর রেখা বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন ব্যাখ্যা করতে পারেনা। রেখা বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন কোন একটি নির্দিষ্ট মুখ্য শক্তিস্তরে একাধিক উপশক্তিস্তরের উপস্থিতি-র ধারণা দেয়। অর্থাৎ, কোন একটি মুখ্য শক্তিস্তর অনেকগুলি উপশক্তিস্তর নিয়ে গঠিত। এই উপশক্তিস্তরের উপস্থিতি ব্যাখ্যা করতে গিয়ে সোমারফিল্ড বৃত্তাকার কক্ষপথের পরিবর্তে উপবৃত্তাকার কক্ষপথের অবতারণা করেন। সোমারফিল্ডের মডেল অনুযায়ী (1) ইলেকট্রন, পরমাণুর নিউক্লিয়াস কে কেন্দ্র করে অবিরাম ভাবে উপবৃত্তাকার কক্ষপথে প্রদক্ষিণ করে। নিউক্লিয়াস উপবৃত্তের

একটি ফোকাসে অবস্থান করে। যখন উপবৃত্তের প্রধান অক্ষ (major axis) এবং গৌণ অক্ষ (minor axis)-এর দৈর্ঘ্য সমান হয়, তখন উপবৃত্তটি বৃত্তে পরিণত হয়, অর্থাৎ কক্ষপথটি বৃত্তাকার হয় (a = b)।



(2) উপবৃত্তের উৎকেন্দ্রতা, গৌণ অক্ষ ও প্রধান অক্ষের অনুপাতের উপর নির্ভর করে। সম্পর্কটি হল—

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1-\epsilon^2} \qquad \epsilon = \text{উৎকেন্দ্রতা।}$$

অর্থাৎ b/a অনুপাত যত কম হয়, উপবৃত্তের উৎকেন্দ্রতা তত বৃদ্ধি পায়।

(3) উপবৃত্তের উৎকেন্দ্রতার বিভিন্নতার ফলে একই কক্ষপথের ক্ষেত্রে অনেকগুলি উপবৃত্তাকার কক্ষপথ সৃষ্টি হতে পারে। উপবৃত্তাকার কক্ষপথের উৎকেন্দ্রতা নির্দেশ করার জন্য সোমারফিল্ড মুখ্য কোয়ান্টাম সংখ্যা, n ছাড়াও আরও একটি কোয়ান্টাম সংখ্যার অবতারণা করেন যা গৌণ কোয়ান্টাম সংখ্যা, l নামে পরিচিত। উপবৃত্তের প্রধান অক্ষ, গৌণ অক্ষ, উৎকেন্দ্রতা, ~~মুখ্য~~ ইত্যাদির সাথে মুখ্য ও গৌণ কোয়ান্টাম সংখ্যার সম্পর্কটি হল —

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1-\varepsilon^2} = \frac{(l+1)}{n}$$

যেখানে n এর একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য l এর মান 0 থেকে $(n-1)$ পর্যন্ত হতে পারে।

a) $n = 1$ হলে, $l = 0$; অর্থাৎ প্রথম মুখ্য শক্তিস্তর কেবল মাত্র একটি উপশক্তিস্তর দ্বারা গঠিত। এক্ষেত্রে উপশক্তিস্তর = মুখ্য শক্তিস্তর।

b) $n = 2$ হলে, $l = 0, 1$; অর্থাৎ দ্বিতীয় মুখ্য শক্তিস্তর দুটি উপশক্তিস্তর দ্বারা গঠিত।

c) $n = 3$ হলে, $l = 0, 1, 2$; অর্থাৎ, তৃতীয় মুখ্য শক্তিস্তর তিনটি উপশক্তিস্তর নিয়ে গঠিত।

d) $n = 4$ হলে, $l = 0, 1, 2, 3$; অর্থাৎ, চতুর্থ মুখ্য শক্তিস্তর চারটি উপশক্তিস্তর নিয়ে গঠিত।

— অর্থাৎ, কোন মুখ্য শক্তিস্তরে উপস্থিত উপশক্তিস্তরের সংখ্যা n এর মানের সহিত সমান। l এর বিভিন্ন মানের ফলে প্রাপ্ত বিভিন্ন উপশক্তিস্তর গুলি কে বিভিন্ন নামে চিহ্নিত করা হয়।

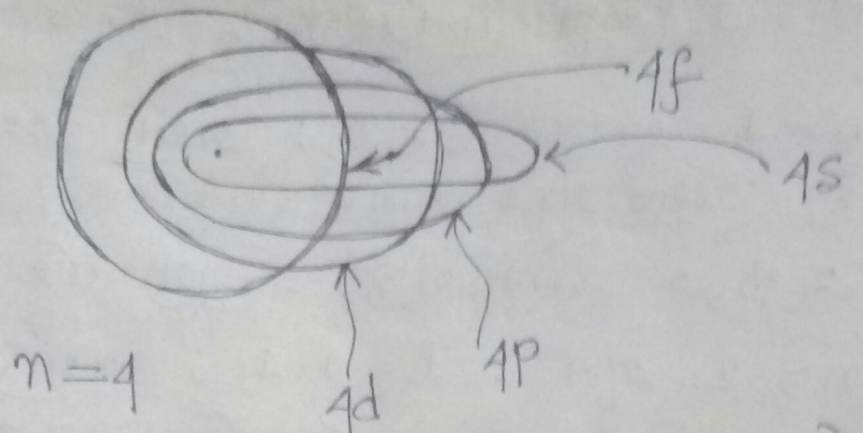
$l = 0 \Rightarrow$ s - উপশক্তিস্তর (s- sub shell)

$l = 1 \Rightarrow$ p - উপশক্তিস্তর (p- sub shell)

$l = 2 \Rightarrow$ d - উপশক্তিস্তর (d- sub shell)

$l = 3 \Rightarrow$ f - উপশক্তিস্তর (f - sub shell)

নীচে n = 4 মুখ্যশক্তিস্তরের ক্ষেত্রে চারটি উপশক্তিস্তর কে দেখানো হল -



(4) l এর মান বৃদ্ধির সহিত উপবৃত্তের উৎকেন্দ্রতা হ্রাস পায় এবং l এর সর্বোচ্চ মানের ক্ষেত্রে (অর্থাৎ যখন (n-1) এর সমান হয়) উৎকেন্দ্রতা $\varepsilon = 0$ হয়, অর্থাৎ উপবৃত্তটি বৃত্তে পরিণত হয়। উপরোক্ত চিত্র থেকে বোঝায় যে 4s, 4p, 4d, 4f উপকক্ষ গুলির উৎকেন্দ্রতার ক্রম 4s > 4p > 4d > 4f.

(5) একটি নির্দিষ্ট মুখ্য শক্তিস্তরের বিভিন্ন উপশক্তিস্তর গুলির মধ্যে শক্তির পার্থক্য ব্যাখ্যা করতে গিয়ে তিনি আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাবাদের সাহায্য নেন। তিনি বলেন - নিউক্লিয়াস কে একটি ফোকাস রেখে উপবৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনের আবর্তনের সময় ইলেকট্রনটি যখন নিউক্লিয়াসের সব চেয়ে নিকটবর্তী হয়, তখন গতিবেগ বৃদ্ধি পায় এবং ইলেকট্রনটি যখন নিউক্লিয়াস থেকে সবচেয়ে দূরবর্তী অবস্থায় থাকে, তখন

গতিবেগ প্রাপ্ত হয়। ফলে আইনস্টাইনের সূত্রানুযায়ী ($m = m_0\sqrt{1-v^2/c^2}$) ইলেকট্রনের আপেক্ষিক ভরের ও পরিবর্তন হয়। ইলেকট্রনের এইরূপ আপেক্ষিক ভরের পরিবর্তনের ফলে উপবৃত্তাকার কক্ষপথের প্রধান অক্ষ নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে একটানা ঘুরে যেতে থাকে। উপবৃত্তাকার কক্ষপথের এইরূপ সরণকে "অয়নচলন" (precession) বলে। এর ফলে বিভিন্ন উপবৃত্তাকার কক্ষপথের অয়নচলন বিভিন্ন প্রকারের হয় এবং তাদের মধ্যে শক্তির তারতম্য থাকে। শক্তির গাণিতিক রূপটি হল —

$$E_n = -R_H \times hc \times \frac{Z^2}{n^2}\left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{n}\left(\frac{1}{l+1} - \frac{3}{4n}\right)\right]$$

যেখানে $\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \times hc}$ = fine structure constant.

সোমারফিল্ড মডেলের ত্রুটি :—

i) সোমারফিল্ড মডেল ও বোর মডেলের মত একটি ইলেকট্রন বিশিষ্ট পরমাণু বা আয়নের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য।

ii) সোমারফিল্ড মডেল একটি মুখ্য কক্ষস্তরে উপস্থিত ~~উপ~~ উপকক্ষস্তরের সংখ্যা এবং তাদের শক্তির ধারণা দিলেও বর্ণালীতে প্রাপ্ত রেখার সঠিক সংখ্যা নির্ণয়ে অক্ষম।

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।

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

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