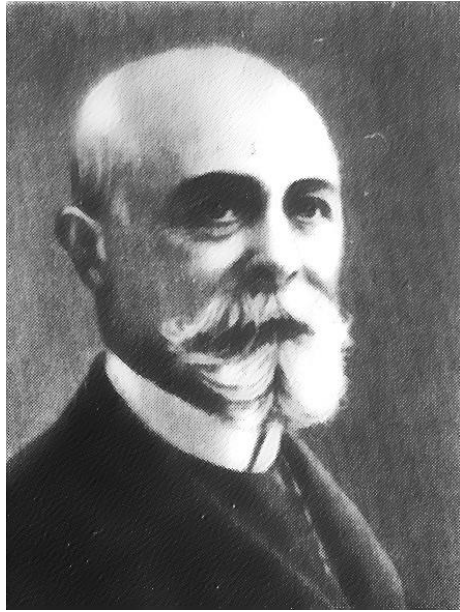


## **6. | Строение атома.**

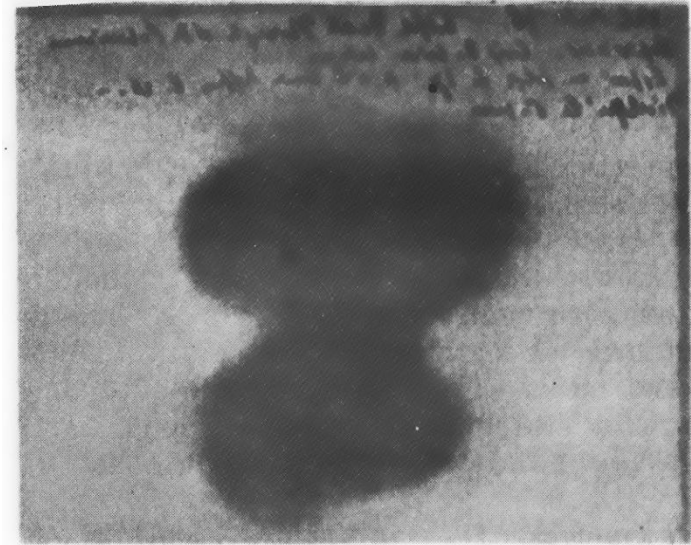
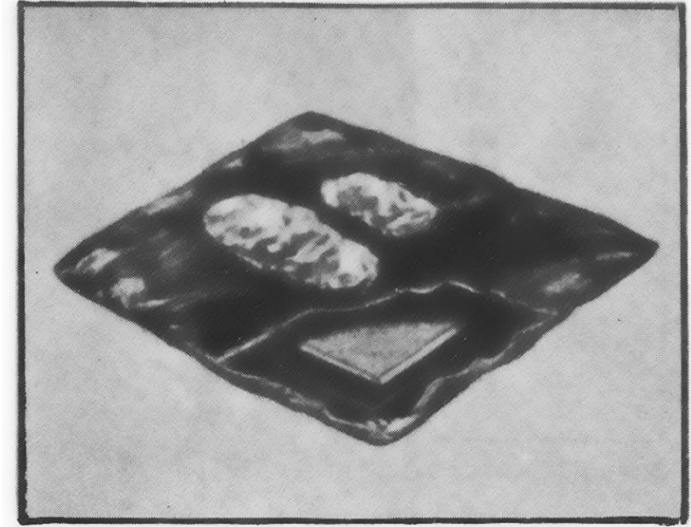
### **6.1. | Открытие радиоактивности.**

# Открытие радиоактивности



Антуан Анри Беккерель  
(1852 - 1908)

А.А.Беккерель был потомственным физиком. Его дед, Антуан Сезар Беккерель изучал термоэлектричество и флуоресценцию. Его отец, Александр Эдмон Беккерель - автор основополагающих трудов по фосфоресценции. Сам Антуан Анри также изучал флуоресценцию солей урана.



1 марта 1896 г.

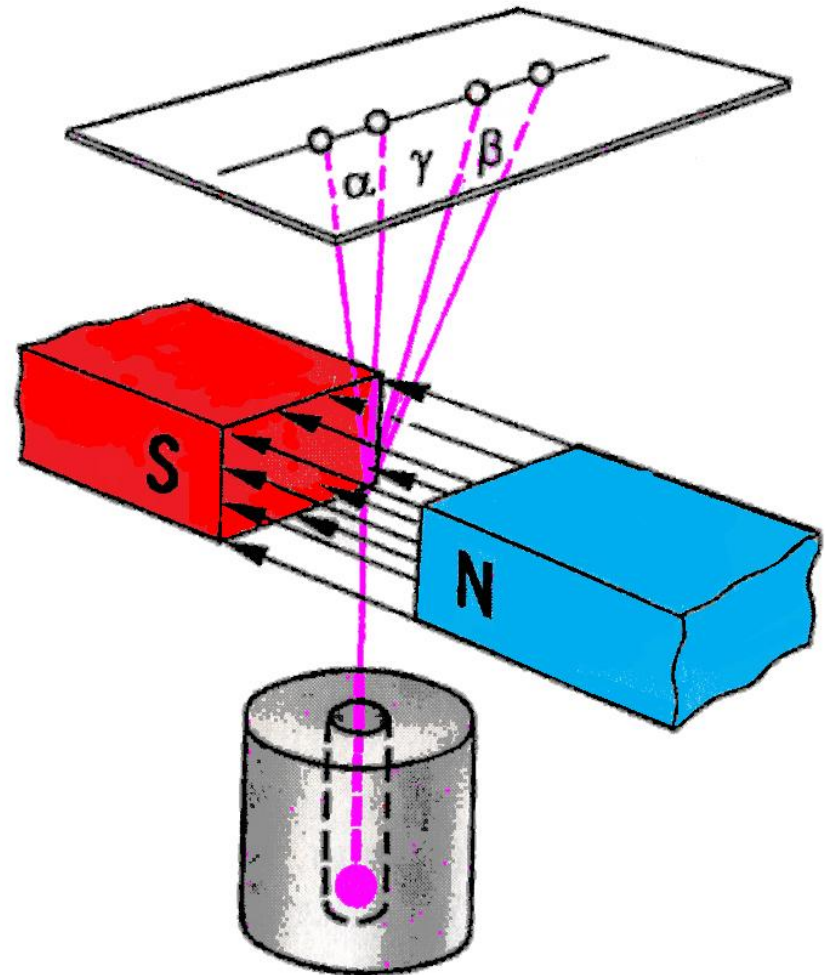
# Открытие радиоактивности



Мария  
Складовская-Кюри  
(1867 - 1934)



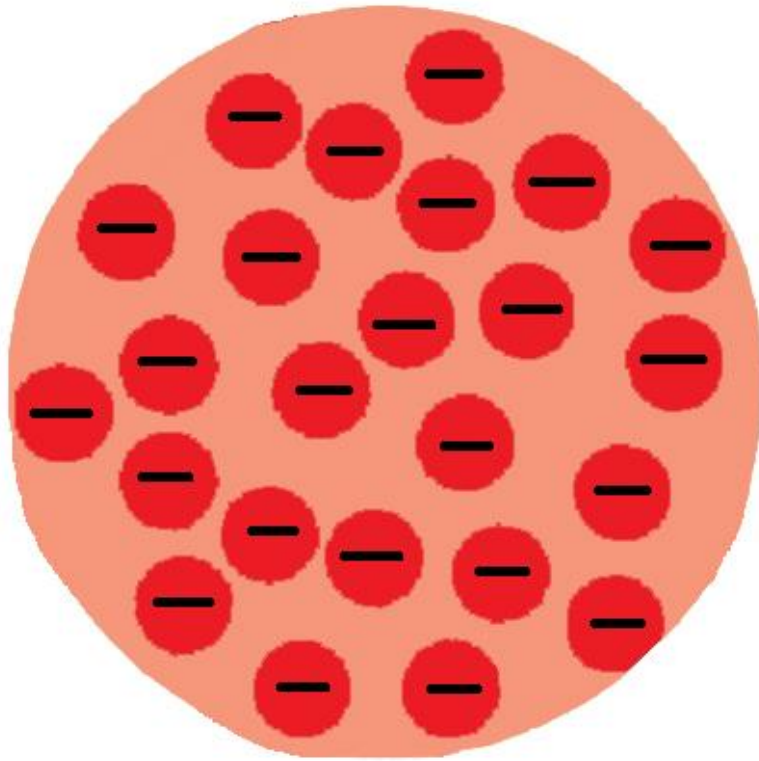
Пьер Кюри  
(1859 - 1906)



1898 г - исследования радиоактивности,  
открыт новый элемент - полоний

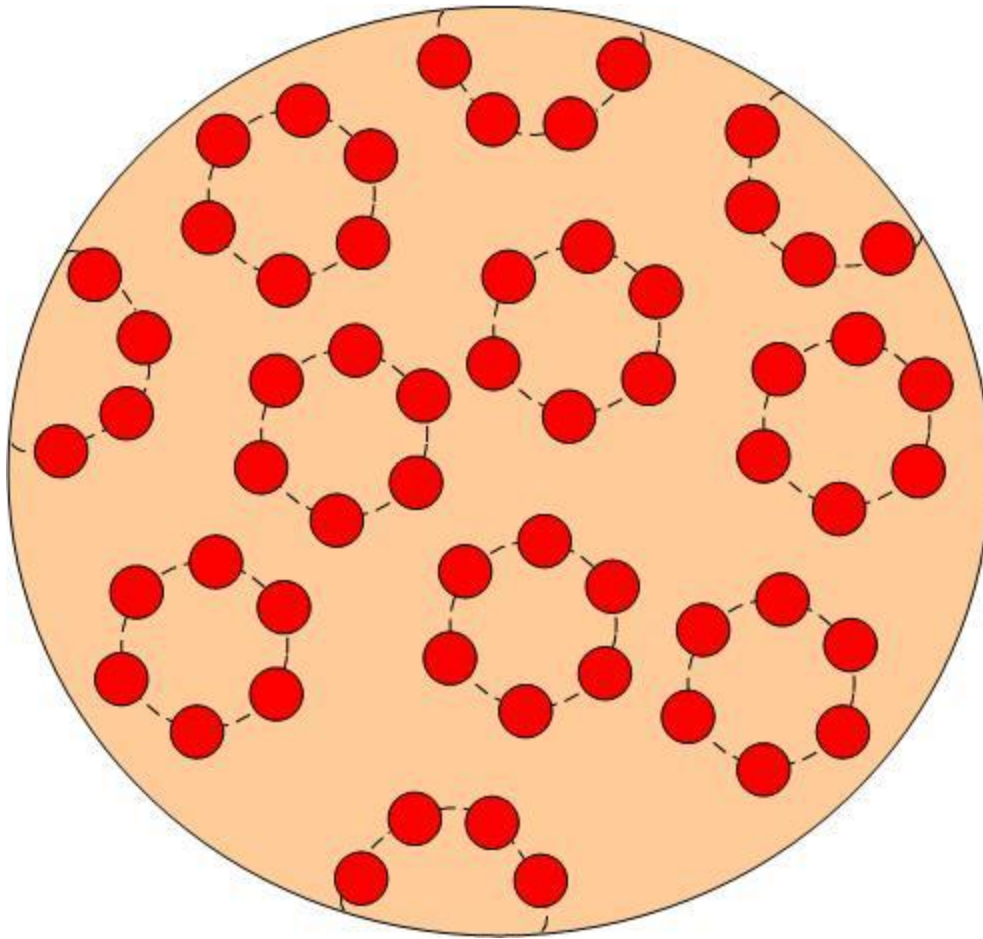
## 6.2. || Модели атома.

# Модель атома Томсона



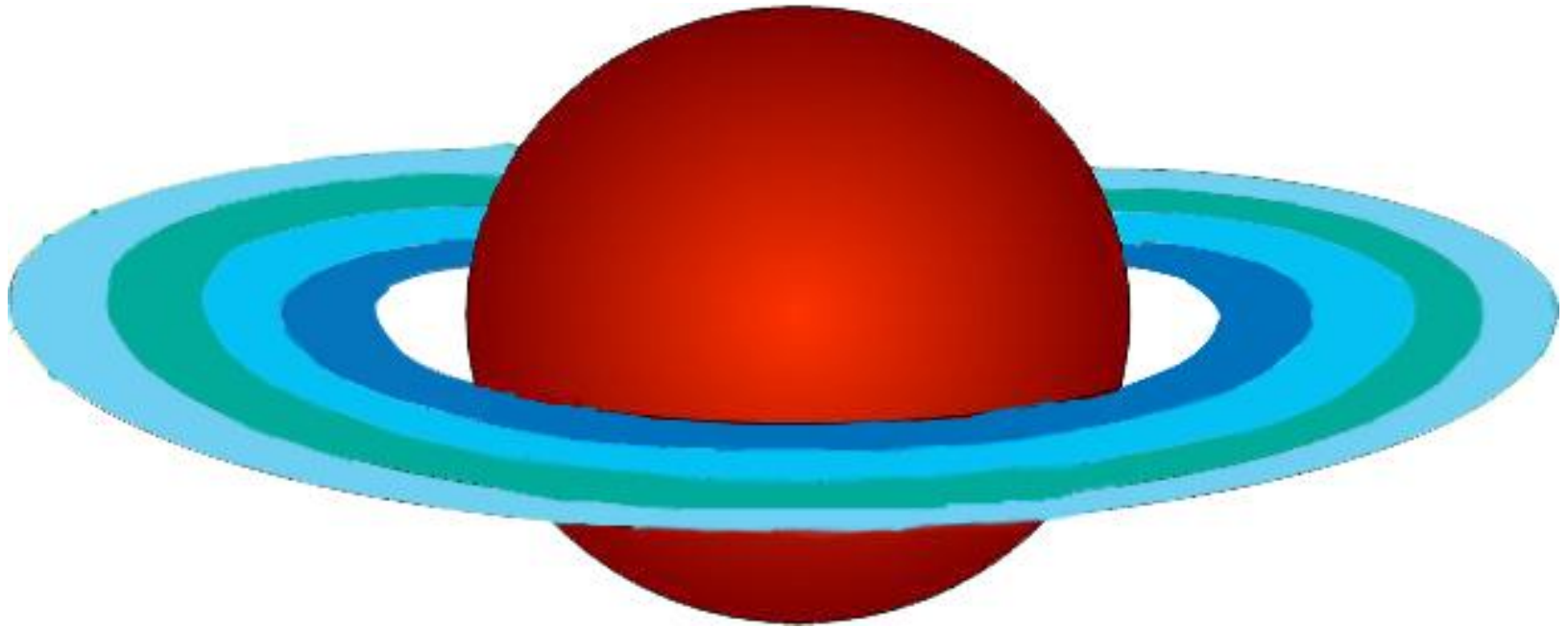
*Электроны, наподобие «изюма», вкраплены в положительно заряженный «пудинг». Диаметр атома составляет несколько ангстрем.*

# Усовершенствованная модель атома Томсона



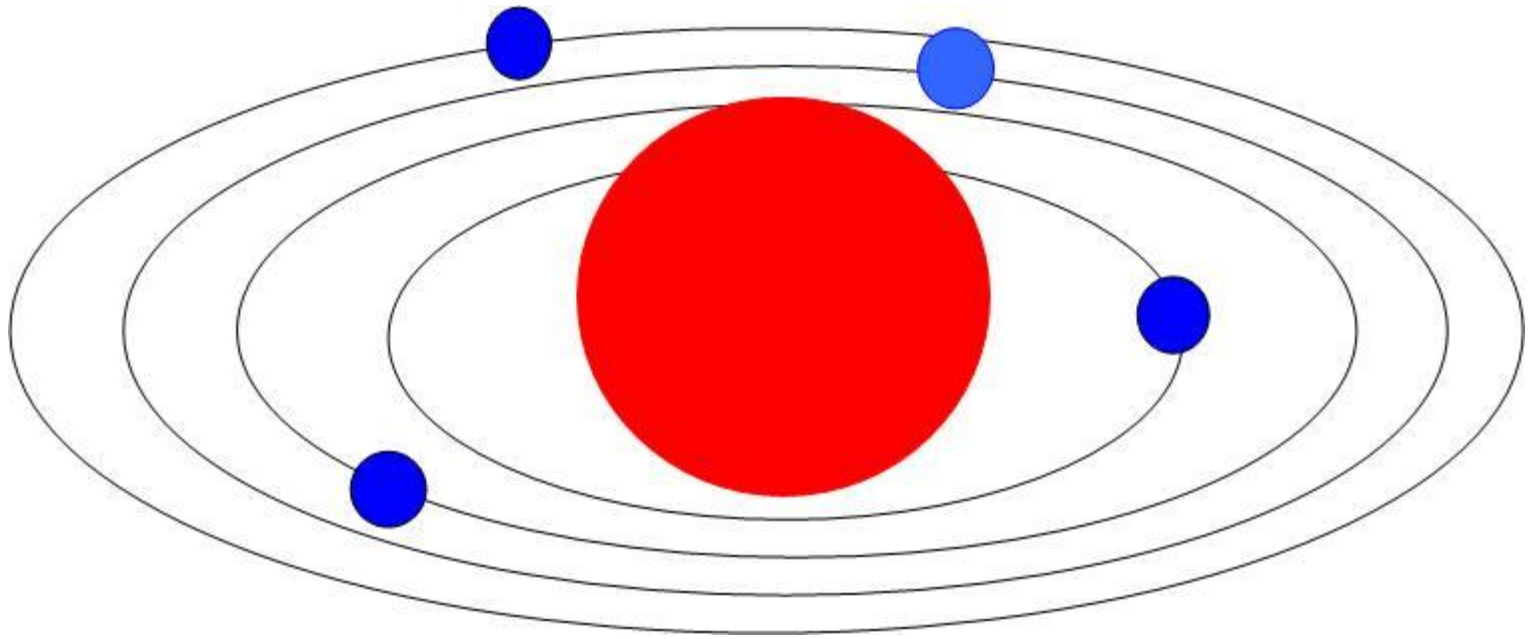
Атом - пудинг неустойчив.  
Заряженные частицы, чтобы  
сохранять устойчивую  
конфигурацию, должны  
двигаться.  
В этом и состоит идея  
усовершенствованной модели  
Томсона.

# Модель атома Нагаоке



Следующий шаг - «сатурноподобная» модель Нагаоке. Здесь электроны - кольца вокруг положительно заряженного тела. Но размеры центрального атомного тела почти те же, что и в модели Томсона.

# Планетарная модель атома



На самом деле старейшая модель атома - планетарная. Но никаких физических обоснований она не имела. Многие ученые (чаще - не физики) высказывались в пользу такой модели атома. Но в основе их предположений была, скорее, философская вера в единство мира, чем какие-либо доказательства.



*Быть может, эти электроны - миры,  
где пять материков,  
Свершенья, тайны, войны, троны  
и память сорока веков.  
Еще, быть может, каждый атом -  
вселенная, где сто планет.  
Там все, что здесь, в объеме сжатом,  
а также то, чего здесь нет.*

*Максимилиан Волошин.*

# 6.3. **Опыты Резерфорда по рассеянию $\alpha$ -частиц.**



Эрнест Резерфорд  
(1871 - 1937)

## Эрнест Резерфорд

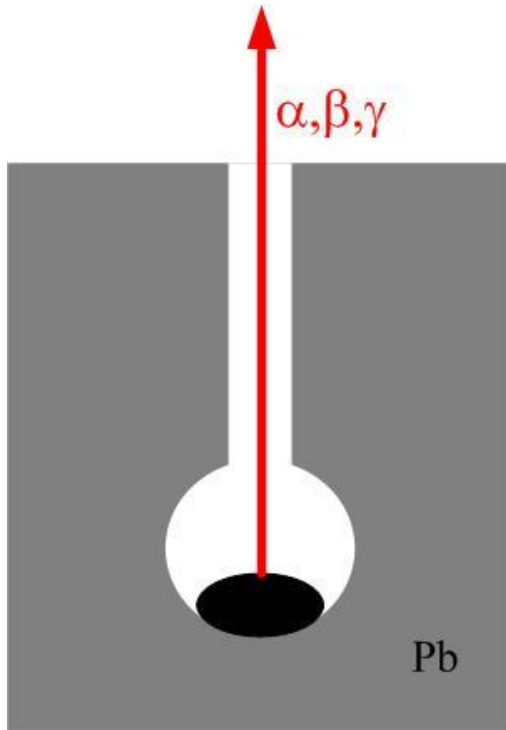
Родился в Новой Зеландии. Сын фермера-скотовода. С 1895 г. работал в Кавендишской лаборатории. Был первым «заморским докторантом».

Участвовал в работах по исследованию катодных и рентгеновских лучей под руководством Дж. Дж. Томсона. Разработал «магнитный детектор электромагнитных волн».

С 1898 г. занялся исследованием радиоактивности. Установил заряд и массу  $\alpha$ -частиц. Доказал (совместно с Ф. Содди), что в процессе радиоактивного распада появляется атом другого элемента. Установил закон радиоактивного распада.

В 1898 - 1907 г.г. работал в Монреале (Канада), в 1907 - 1919 г.г. - в Манчестерском университете (Великобритания). 1919 - 1937 г.г. - директор Кавендишской лаборатории.

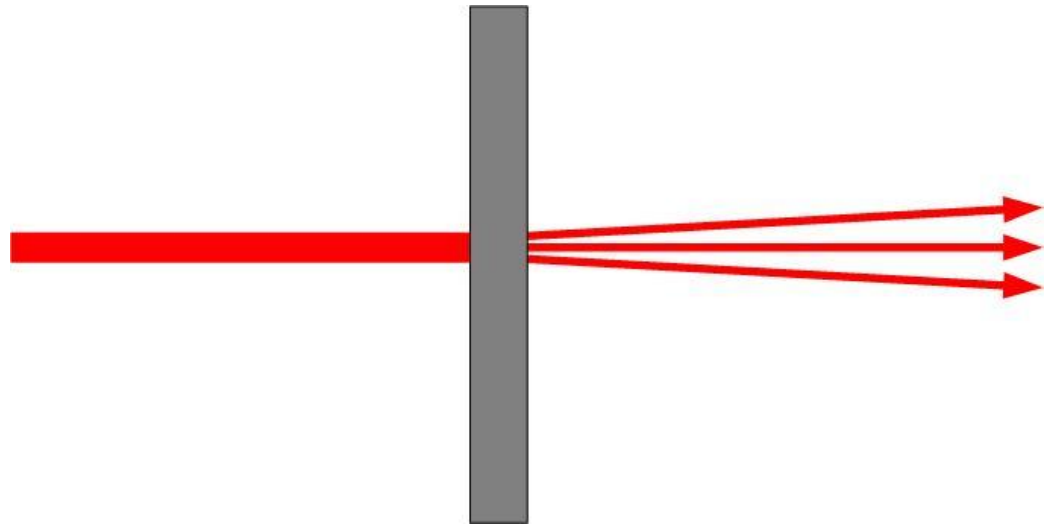
# Исследование $\alpha$ -частиц



Источник радиоактивного  
излучения

Из такого источника  
вылетают  $\alpha$ -частицы со  
скоростью 10 - 20 тысяч  
километров в секунду.

Рассеяние  $\alpha$ -частиц пластинкой слюды



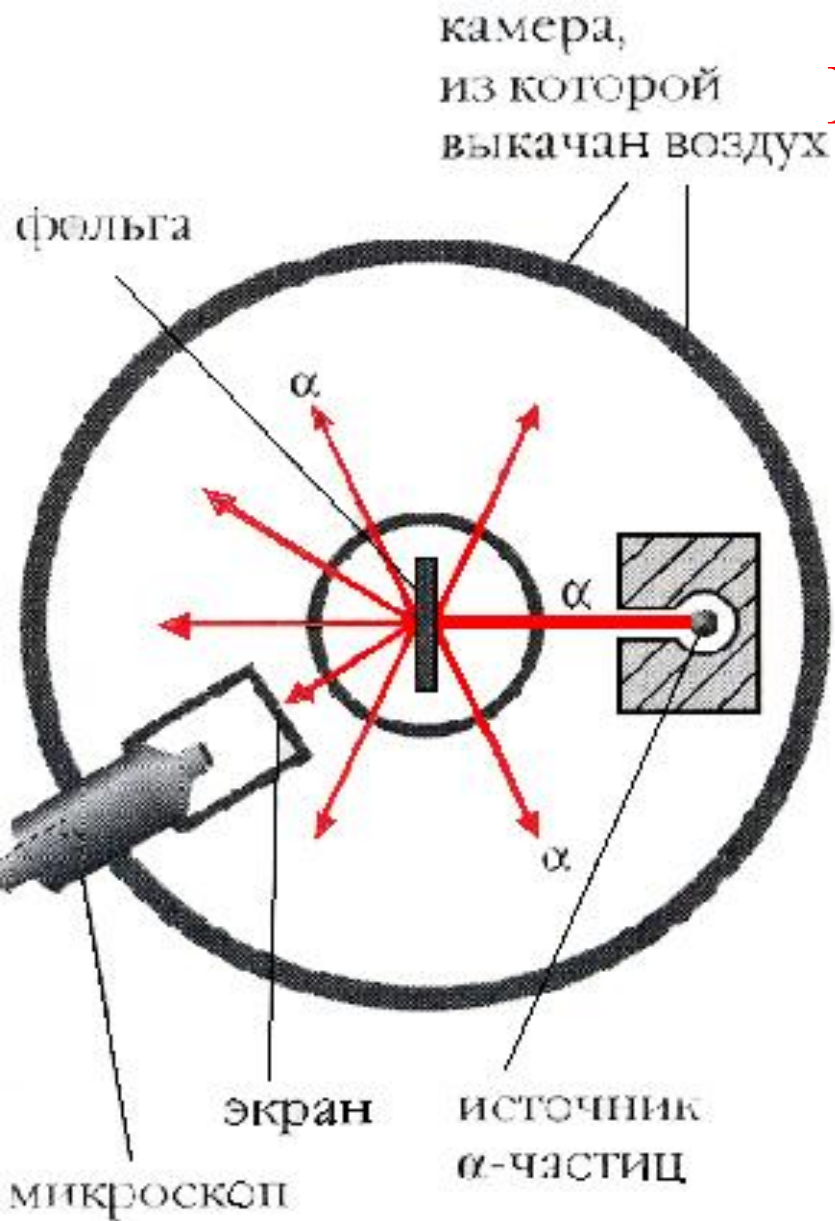
Резерфорд, 1906 г.

Отклонение  $\alpha$ -частиц от прямолинейной  
траектории составило около 2 градусов.

Это означало, что внутри атома должны быть  
мощные электрические поля (напряженность не  
менее 100 кВ на 1 см)

# Рассеяние $\alpha$ -частиц золотой фольгой

1909 г., Резерфорд, Марсден, Гейгер.



Установлено, что одна из примерно 8000  $\alpha$ -частиц рассеивается на угол, близкий к  $180^\circ$ .



Ганс Гейгер

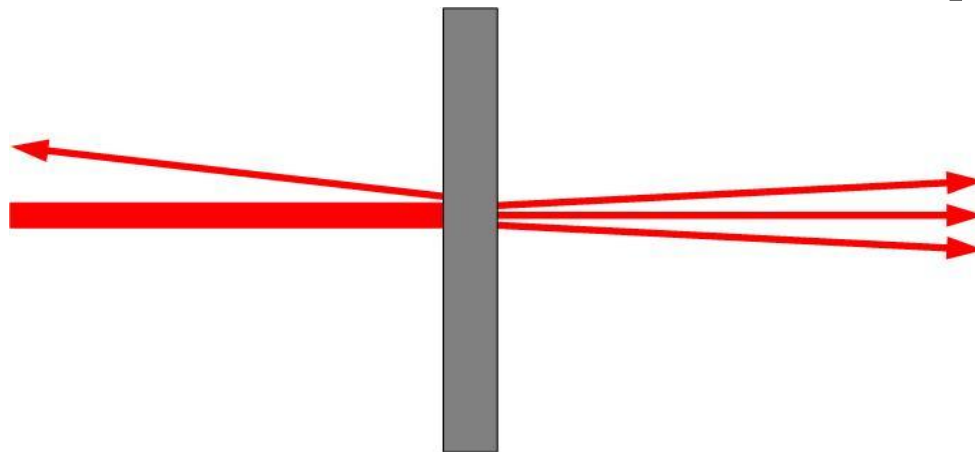
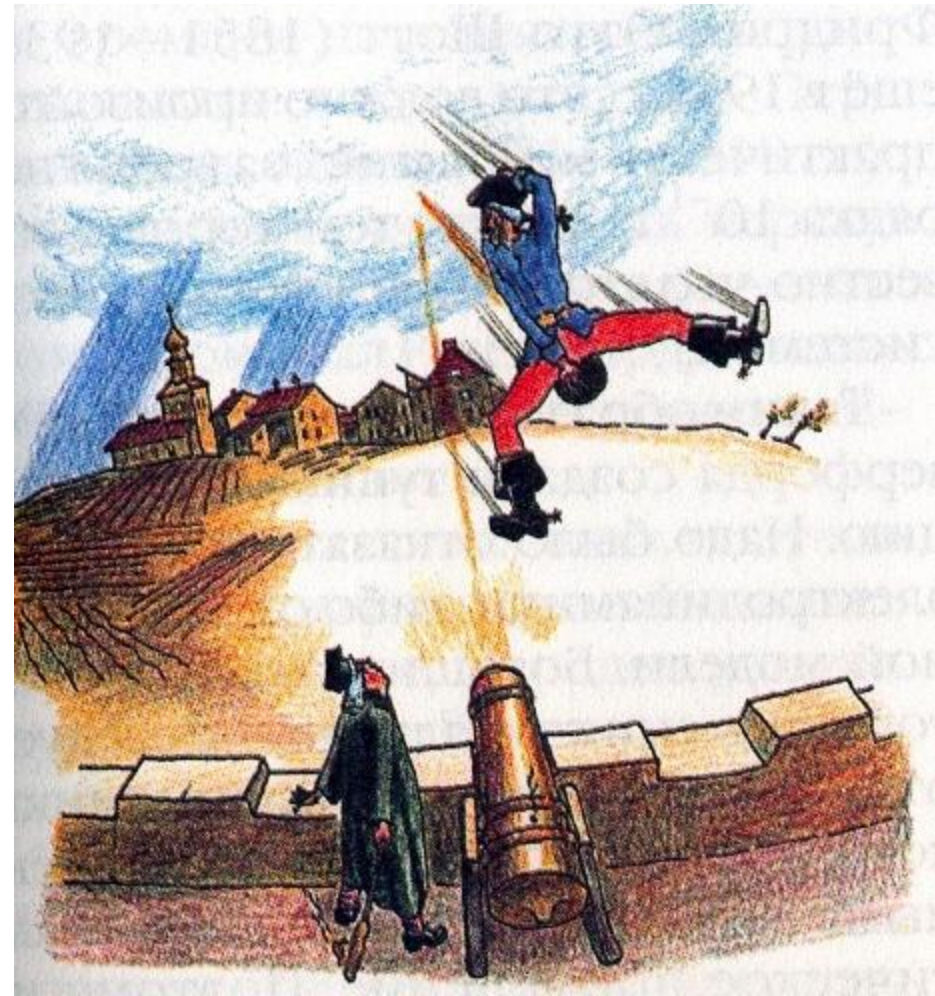


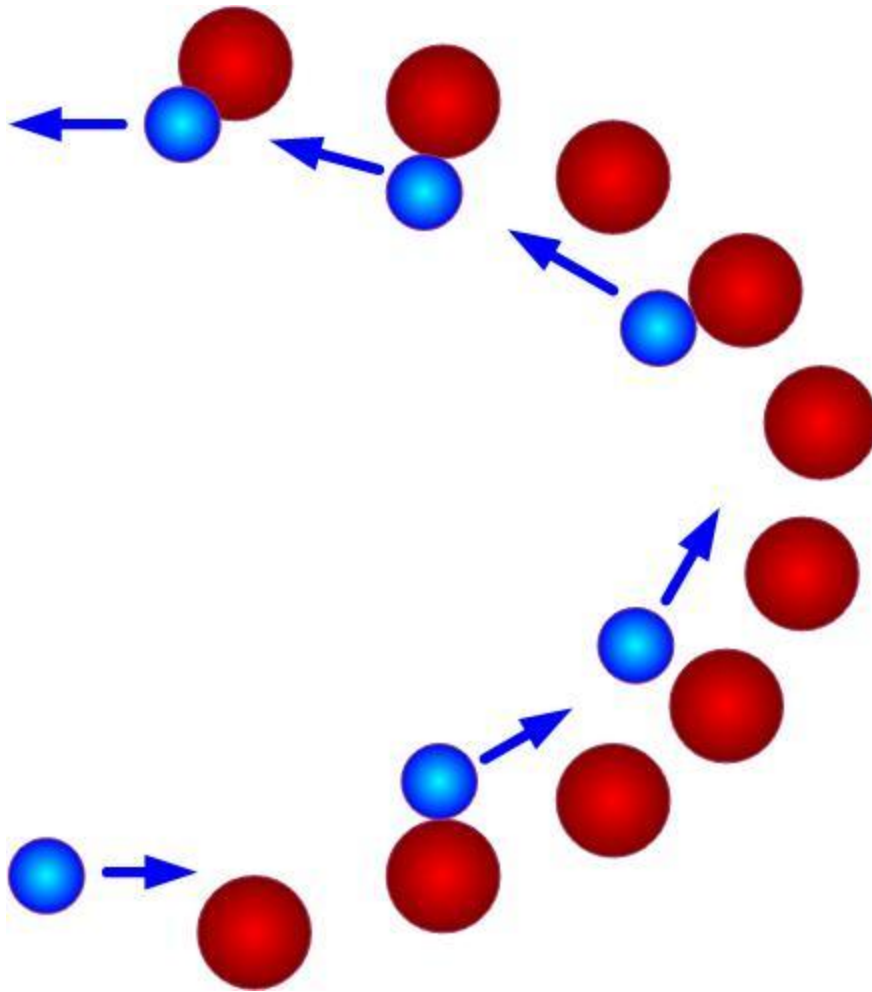
Схема опытов  
Резерфорда, Гейгера  
и Марсдена.

# Рассеяние $\alpha$ -частиц золотой фольгой

Резерфорд писал: “Это столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд вернулся бы к вам и нанес удар.”

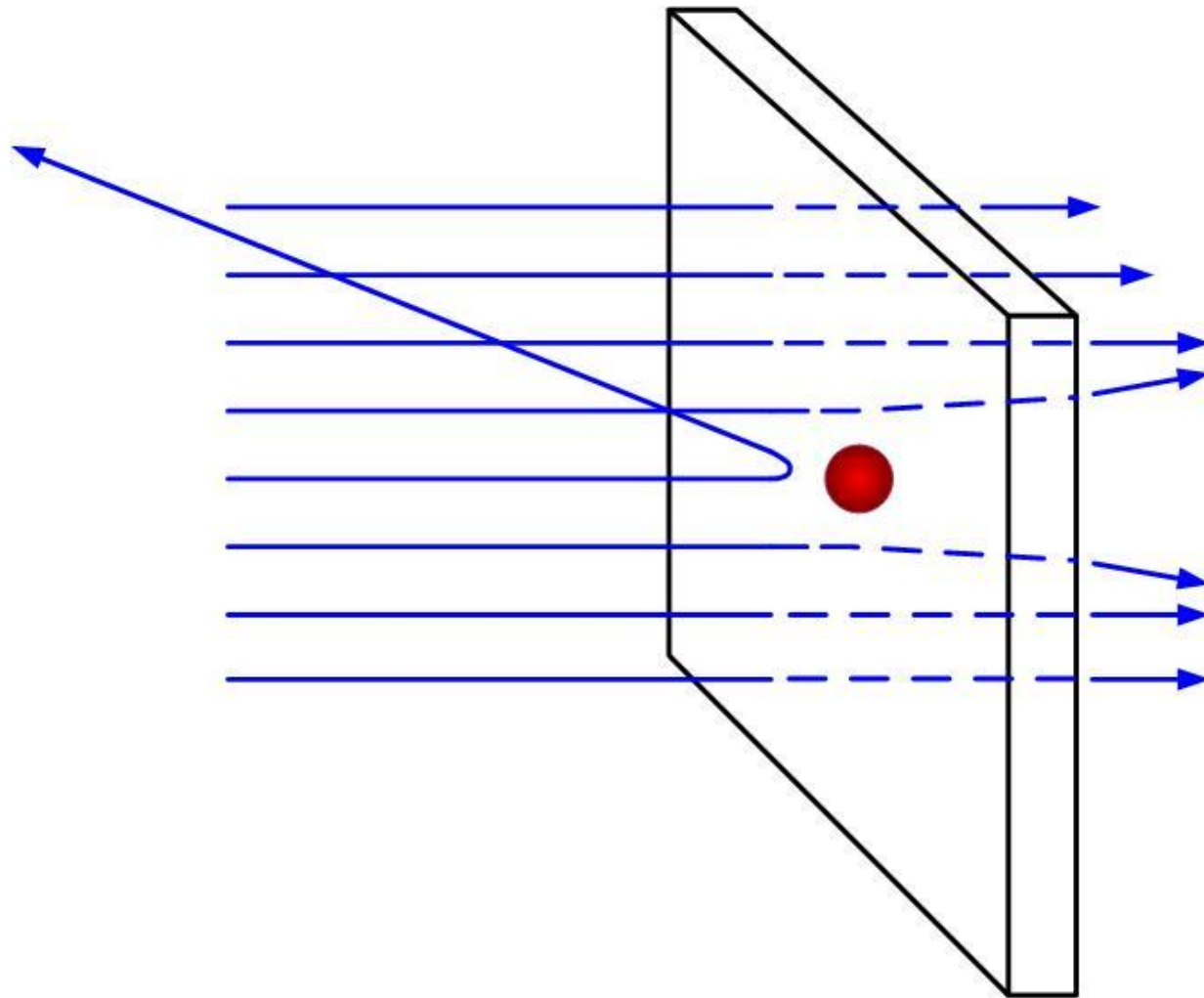


# Рассеяние $\alpha$ -частиц золотой фольгой



Вероятность такого «разворота»  $\alpha$ -частицы намного меньше  $1/8000$ . Она практически равна нулю.

# Рассеяние $\alpha$ -частиц золотой фольгой



Единственным правдоподобным объяснением рассеяния - частиц на большие углы было наличие массивного, хотя и очень малого положительно заряженного тела внутри атома.

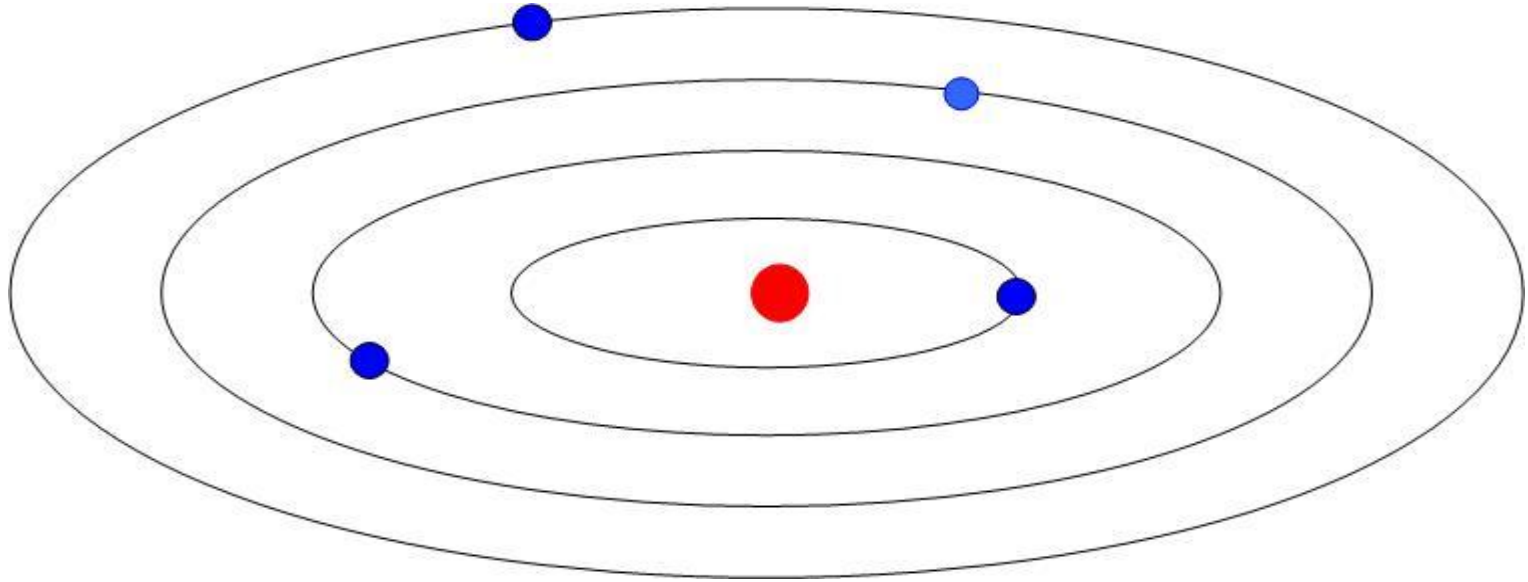
В конце 1910 года Резерфорд сказал Гейгеру: «Я знаю, как **ВЫГЛЯДИТ** атом».

В мае 1911 г. результаты были опубликованы.

В самом начале статьи в «Philosophical Magazine» написано: «Вопрос об устойчивости атома рассматривать пока преждевременно»



# И все-таки они вертятся?



Причины, по которым планетарный атом существовать не может:

- электроны движутся по замкнутым траекториям, следовательно, они движутся с ускорением;
- заряженные частицы, движущиеся с ускорением, должны излучать ЭМВ и поэтому терять энергию, а значит, и скорость;
- в результате электрон должен упасть на ядро.

**6.4. Правило  
квантования  
Бора -  
Зоммерфельда.**

# Что общего у атома и квантов?



Нильс Бор  
(1885 - 1962)

1. Для того, чтобы объяснить, как может существовать планетарный атом Резерфорда, Бор выдвинул смелое предположение о том, что свойство квантования, то есть дискретного изменения присуще не только квантам света - фотонам, но имеет более глубокий смысл.
2. Он обратил внимание на то, что постоянная Планка  $h$  имеет размерность (в системе СИ, которой тогда не было, Дж·с), совпадающую с размерностью физической величины, называемой действием.
3. Бор предположил, что все физические величины должны изменяться так, что в ходе любых процессов действие должно быть равно целому числу постоянных Планка  $h$ .

4. Основываясь на предположении о квантовании (скачкообразном изменении) действия, Бор предположил, что при движении электрона по орбите вокруг положительного заряженного ядра выполняется условие

$$2\pi RmV = nh,$$

то есть квантуется действие электрона.

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда

Согласно Планку излучение света происходит порциями – квантами, энергия которых равна

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Изменение энергии стоячей волны, возникающей в полости вокруг абсолютно чёрного тела также равно

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Стоячие волны можно рассматривать, как линейные гармонические осцилляторы. Согласно Планку, из всех возможных состояний линейного гармонического осциллятора осуществляются только такие, энергия которых

$$E = nh\nu = n\hbar\omega,$$

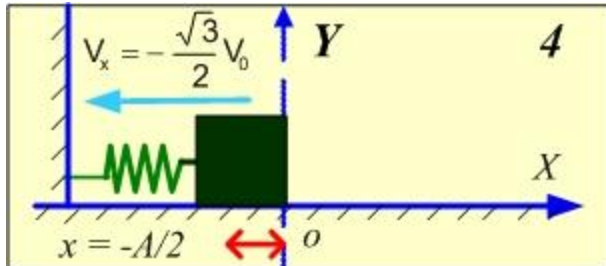
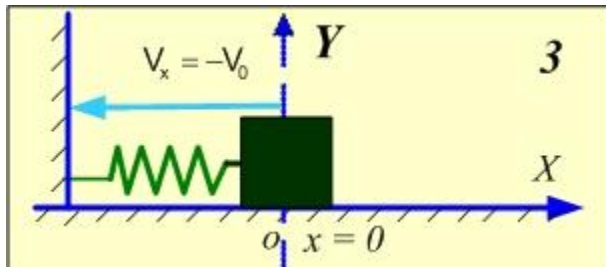
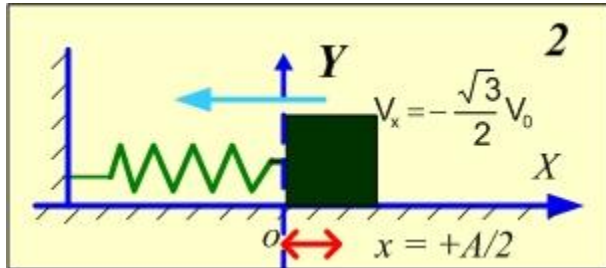
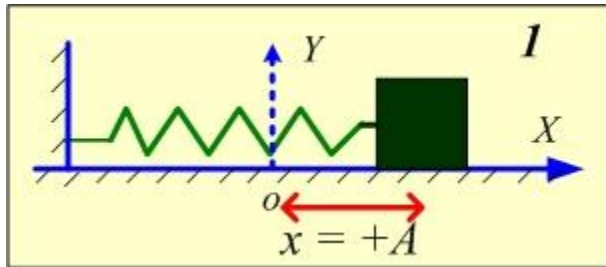
где  $n$  – целое число.

Перепишем последнее условие в виде  $\frac{E}{\nu} = nh.$

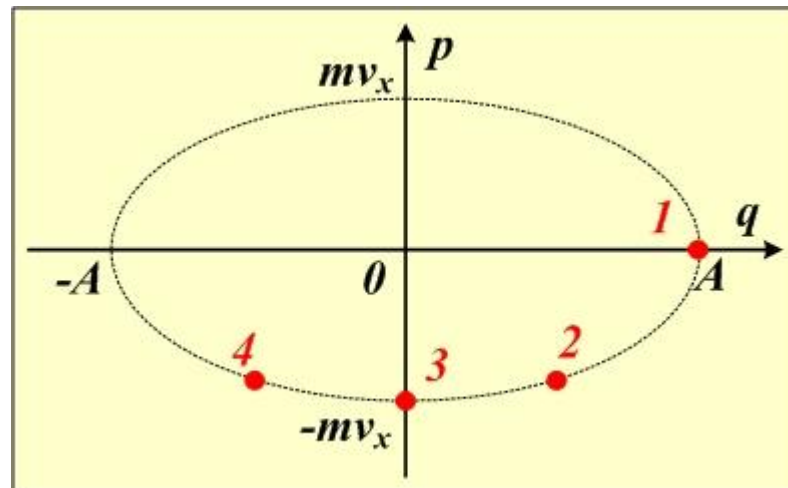
Это означает, что некоторая величина, имеющая размерность [энергия/частота] или [энергия·время] должна быть кратной постоянной Планка. Эта величина называется **действием**.

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда

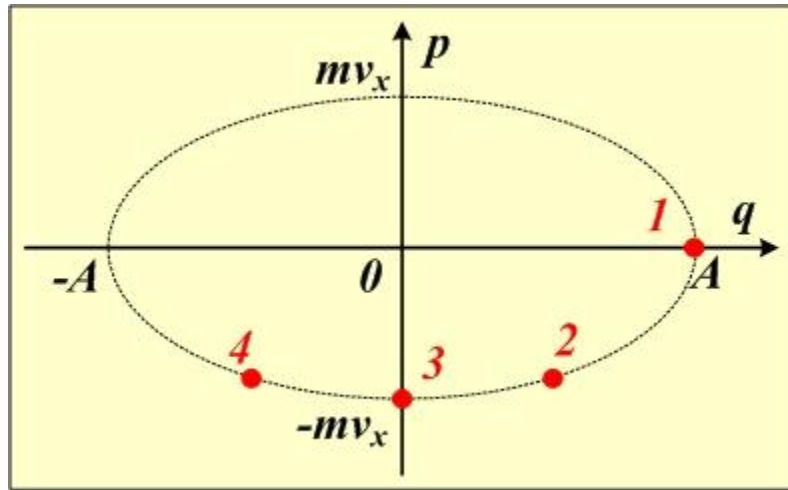
Чтобы указать общее правило, приводящее к правильному выбору состояний, рассмотрим линейный гармонический осциллятор. В классической механике его состояние характеризуется декартовой координатой  $x$  и импульсом  $mv$ .



Введём обозначения  $q = x$  и  $mv = p$ . Каждое состояние линейного осциллятора теперь можно изобразить точкой на фазовой плоскости (как это делалось при подсчёте числа стоячих волн). Каждой точке на фазовой плоскости соответствует своё значение координаты и импульса осциллятора.



# Правило квантования Бора - Зоммерфельда



При движении в системе точка на фазовой плоскости будет описывать некоторую траекторию.

Пусть полная энергия осциллятора

$$E = T + U,$$

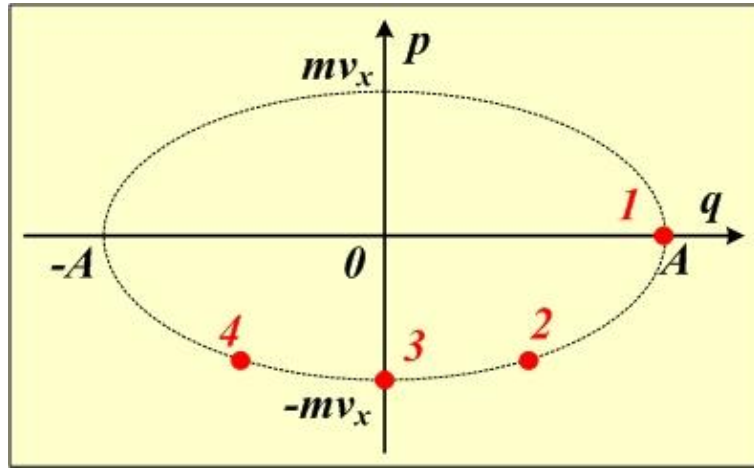
где  $T$  – кинетическая энергия,  $U$  – потенциальная.

$$E = T + U = \frac{p^2}{2m} + \frac{kq^2}{2}.$$

разделим на  $E$  и получим:

$$1 = \frac{p^2}{2mE} + \frac{kq^2}{2E}, \quad \frac{p^2}{2mE} + \frac{q^2}{2\frac{E}{k}} = 1.$$

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда



$$\frac{p^2}{2mE} + \frac{q^2}{2\frac{E}{k}} = 1.$$

В координатах (p, q) это уравнение эллипса с полуосями

$$a = \sqrt{2mE}, \quad b = \sqrt{\frac{2E}{k}}. \quad \frac{p^2}{a^2} + \frac{q^2}{b^2} = 1.$$

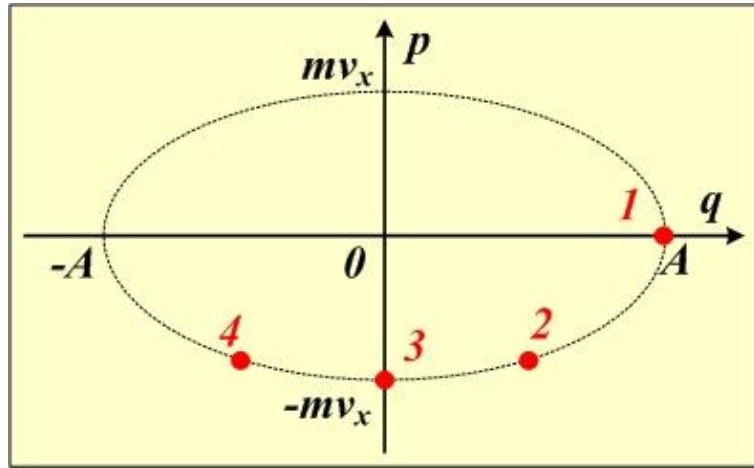
Фазовая траектория линейного осциллятора есть эллипс, оси которого определяются его полной энергией.

Площадь эллипса равна

$$\oint pdq = \pi ab.$$

По определению, величина  $S = \oint pdq$  и есть действие для осциллятора.

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда



$$\oint pdq = \pi ab.$$

$$a = \sqrt{2mE}, \quad b = \sqrt{\frac{2E}{k}}.$$

$$\oint pdq = \pi \sqrt{2mE} \sqrt{\frac{2E}{k}},$$

$$\oint pdq = E 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad \oint pdq = ET, \quad \oint pdq = \frac{E}{\nu}.$$

Здесь  $T$  – период колебаний осциллятора,  $\nu$  – частота колебаний осциллятора.

Исходя из предположения Планка о том, что энергия колебаний квантуется, то есть

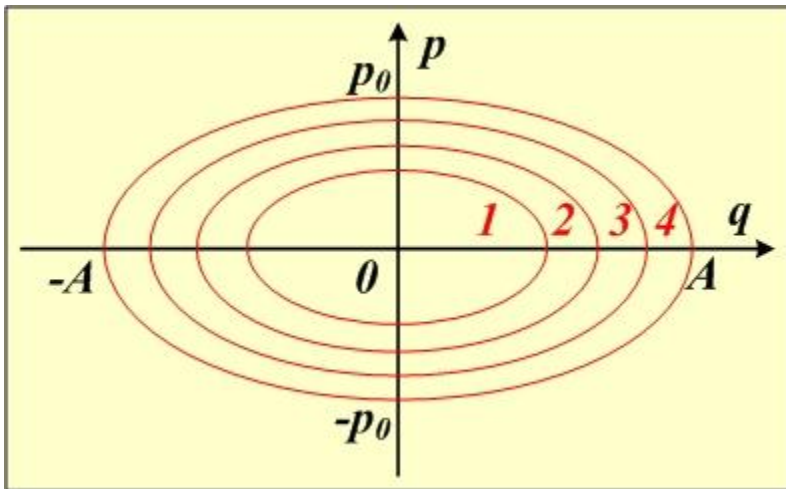
$$E = nh\nu = n\hbar\omega, \quad \frac{E}{\nu} = nh,$$

получаем, что

$$S = \oint pdq = \frac{E}{\nu} = nh.$$



# Правило квантования Бора - Зоммерфельда



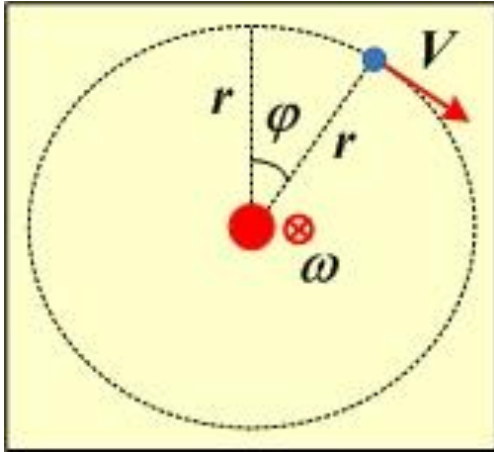
$$S = \oint p dq = nh.$$

В процессе колебаний линейного осциллятора точка на фазовой плоскости будет описывать эллиптическую траекторию. Возможны только такие траектории, для которых площадь эллипса (действие) равна  $nh$ .

Бор стал рассматривать это условие, как общее для всех видов движений с одной степенью свободы (к таким движениям относится и движение электрона в атоме). **Возможны только такие фазовые траектории, для которых действие равно  $nh$ .** Под координатами  $q$  и  $p$  следует понимать так называемые обобщённые координаты и обобщённые импульсы.

При рассмотрении движения электрона в атоме в качестве координаты удобно выбрать полярный угол  $\varphi$ . В этом случае обобщённым импульсом будет величина  $p_\varphi = mVr = mr^2\omega$ ,  $\omega$  – угловая скорость электрона при движении по орбите. (Легко убедиться, что размерность произведения  $p_\varphi \cdot q$  будет [Дж·с].)

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда



Применим теперь правило квантования, выведенное для линейного осциллятора к движению электрона в атоме водорода. Возможны только такие фазовые траектории, для которых действие равно  $nh$ .

$$S = \oint pdq = nh.$$

В процессе движения электрона по круговой орбите угловая скорость  $\omega$  постоянна.

$$\omega = \text{const.}, \text{ следовательно, } p_\varphi = m\omega^2 r = \text{const.}$$

Угол  $\varphi$  меняется в процессе движения от 0 до  $2\pi$  поэтому,

$$S = \oint p_\varphi dq = p_\varphi \int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi p_\varphi = 2\pi mVr = 2\pi \ell.$$

$\ell = mVr$  - орбитальный момент импульса электрона.

$$2\pi \ell = nh, \quad \ell = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar.$$

# Правило квантования Бора - Зоммерфельда

$$l = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar.$$

Отсюда следует «правило квантования» круговых орбит: *из всех возможных согласно классической механике орбит реализуются только те, у которых орбитальный момент импульса электрона*

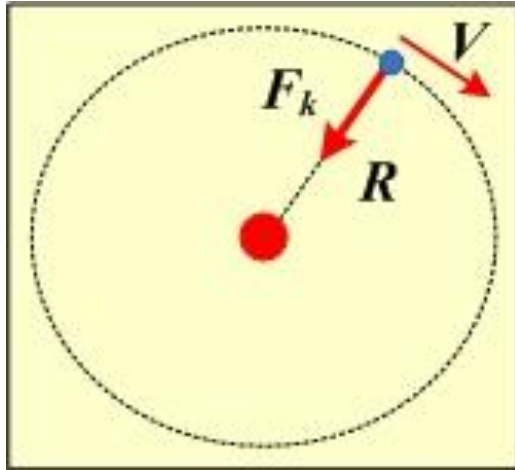
$$l = n\hbar.$$

Применение правила квантования Бора – Зоммерфельда состоит в следующем:

- 1.** Движение системы описывается при помощи классической механики.
- 2.** Определяются обобщённые координаты и импульс, вычисляется действие системы.
- 3.** Применяется условие, что действие должно быть кратно постоянной Планка.
- 4.** С использованием последнего условия отбираются возможные состояния системы.

## 6.5. Бордовская теория атома водорода.

# Боровская теория водородоподобного атома



Электрон движется вокруг ядра по круговой орбите. На него действует кулоновская сила притяжения со стороны ядра.

Необходимо найти полную энергию электрона, учитывая, то значение его момента импульса может изменяться дискретно, то есть

$$\ell = mVR = n\hbar.$$

Полная механическая энергия электрона есть сумма его кинетической и потенциальной энергии

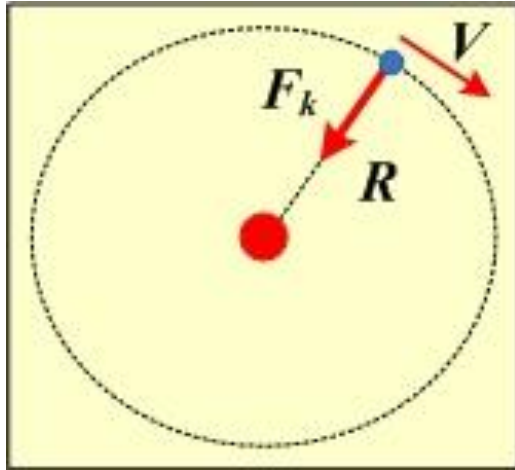
$$E = T + W.$$

$$T = \frac{mV^2}{2}.$$

Потенциальная энергия электрона в кулоновском поле ядра

$$W = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}.$$

# Боровская теория водородоподобного атома



$$E = T + W = \frac{mV^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}.$$

Запишем второй закон Ньютона. Центробежное ускорение электрона равно

$$a = \frac{V^2}{R},$$

где  $V$  - скорость электрона,  $R$  - радиус орбиты.

$$m \frac{V^2}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R^2},$$

здесь  $Z$  - заряд ядра.

$$mV^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}, \quad \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R} = \frac{1}{2} |W|.$$

$$E = T + W = \frac{1}{2} |W| - |W| = -\frac{1}{2} |W| = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}.$$

# Боровская теория водородоподобного атома

Учтем, что согласно предположению Бора из всех возможных согласно классической механике орбит реализуются только те, у которых орбитальный момент импульса электрона

$$mVR = n\hbar.$$

Отсюда

$$V = \frac{n\hbar}{mR}.$$

Как было показано ранее

$$mV^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}.$$

Подставим сюда выражение для скорости  $V$ :

$$m \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 R^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R}, \quad \text{откуда} \quad R = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{mZe^2} n^2.$$

Подставим выражение для радиуса орбиты  $R$  в формулу для энергии электрона:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{R} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{mZ^2 e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}.$$

# Боровская теория водородоподобного атома

Итак, энергия электрона в водородоподобном атоме может принимать ряд дискретных значений

$$E_n = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{mZ^2 e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}.$$

Здесь  $n$  – целое число.

При этом, согласно боровской теории, электрон в водородоподобном атоме может находиться на орбитах с радиусами

$$R_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{mZe^2} n^2.$$

Состояние атома с наименьшей энергией (что соответствует  $n = 1$ ) называется *основным состоянием*. Энергия основного состояния

$$E_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{mZ^2 e^4}{\hbar^2}.$$

Энергию произвольного состояния с любым номером  $n$  удобно выразить через энергию основного состояния:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}.$$



# Боровская теория водородоподобного атома

Радиус орбиты произвольного состояния с любым номером  $n$  удобно выразить через радиус первой бороской орбиты:

$$R_n = R_1 \cdot n^2.$$

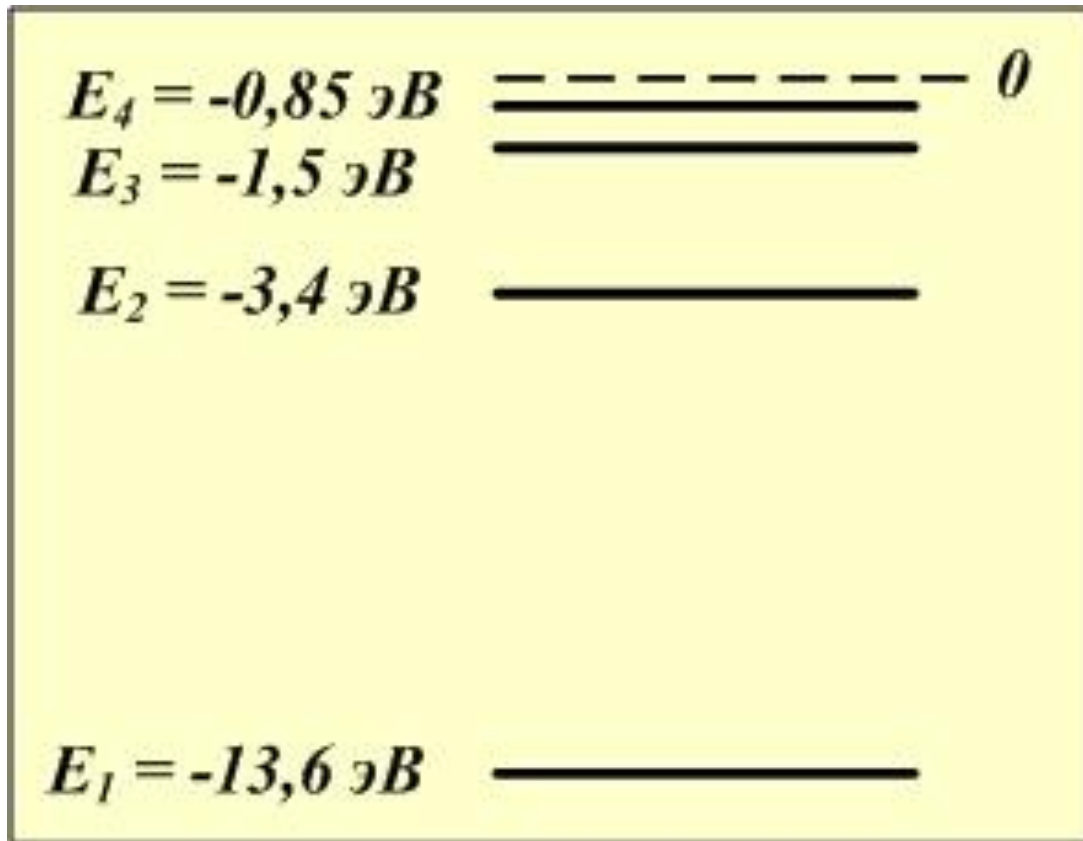
Для атома водорода ( $Z = 1$ )

$$E_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ}.$$

$$R_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{me^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$1 \text{ a.e.} = R_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

# Схема энергетических уровней атома водорода



$$E_n = \frac{E_1}{n^2}.$$

$$E_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{\hbar^2}.$$

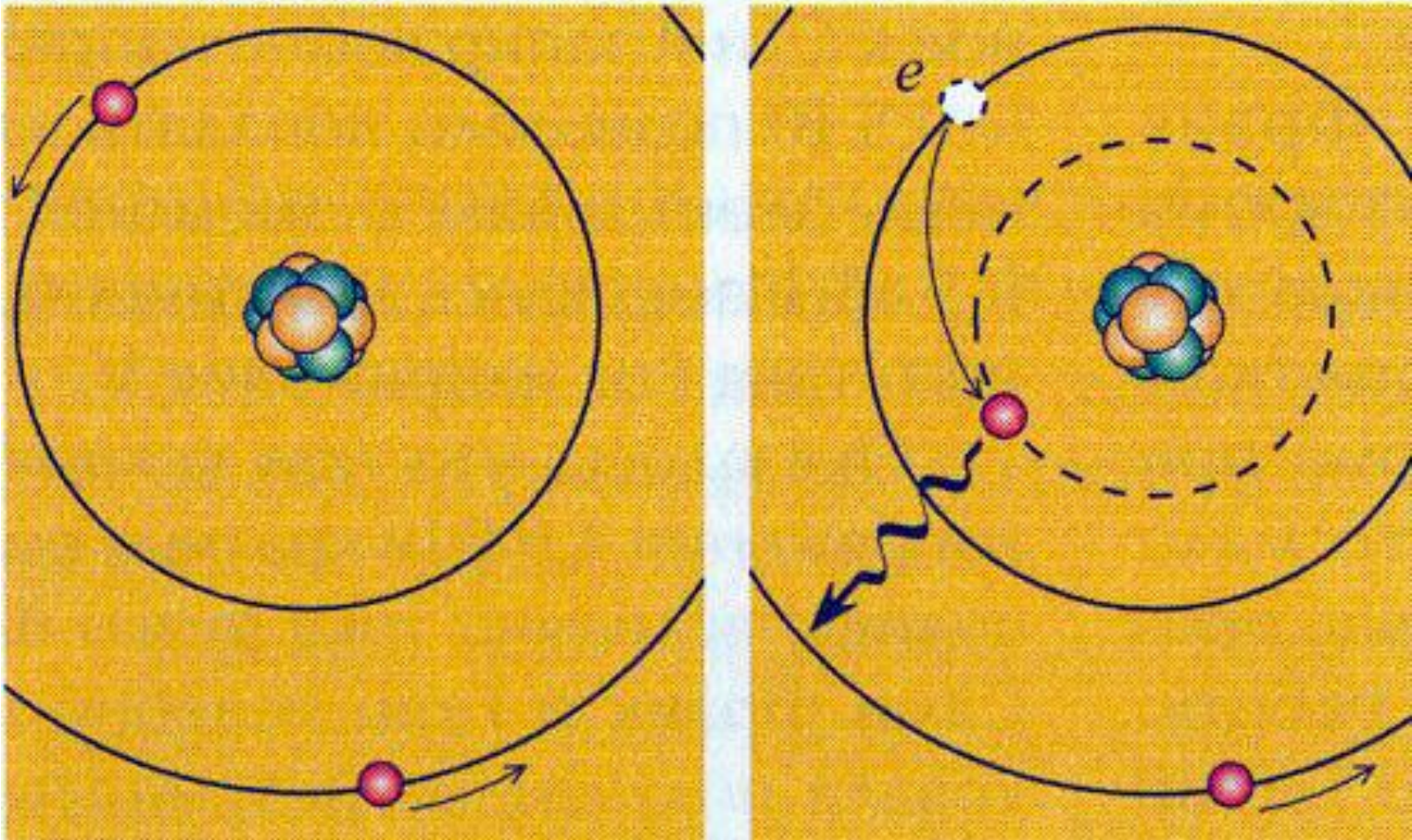
$$E_1 = -13,6 \text{ эВ}.$$

# Постулаты Бора



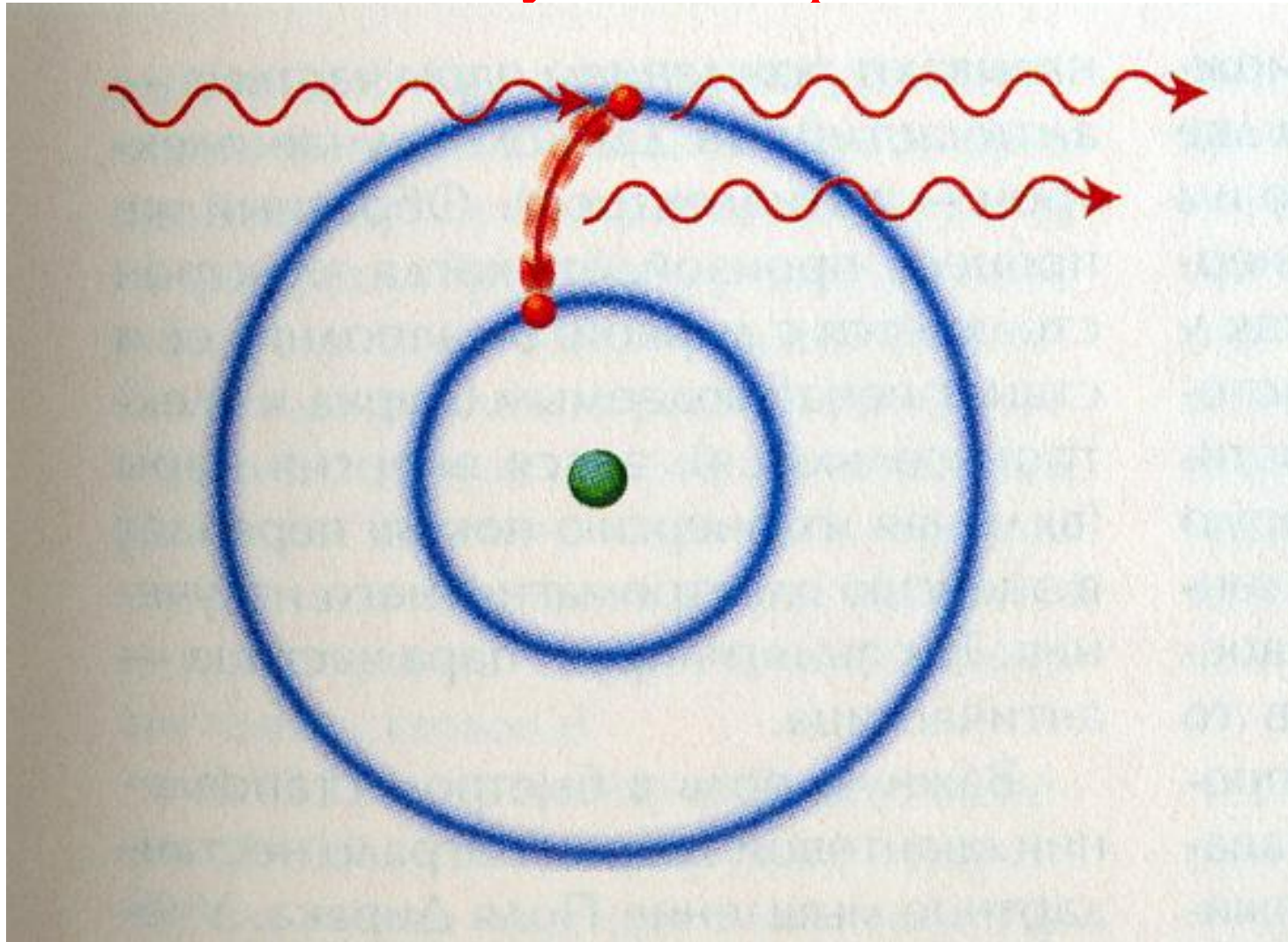
**1.** Атом может находиться только в дискретных устойчивых состояниях, характеризующихся определенными дискретными значениями энергии. В устойчивых состояниях атома электроны движутся вокруг ядра по определенным (“дозволенным”) орбитам, причем радиусы этих орбит соответствуют возможным значениям энергии атома.

# Постулаты Бора



**2. При движении по “допзволенным” орбитам электроны — вопреки классической электродинамике — не излучают электромагнитных волн. Излучение может происходить только при переходе электрона с одной “допзволенной” орбиты на другую.**

# Постулаты Бора



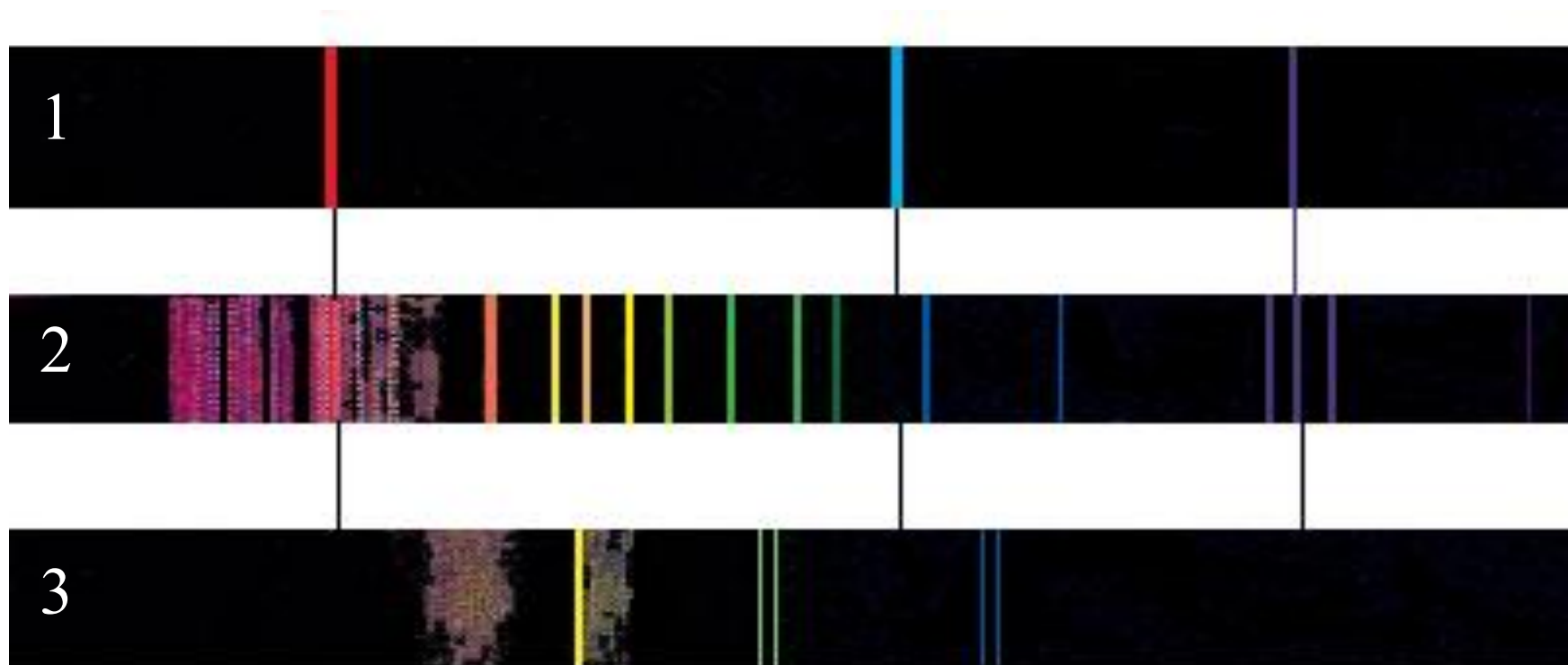
**3. Испускание и поглощение энергии атомом происходит “скачками”, каждый из которых представляет собой порцию (квант энергии), кратную  $h\nu$ .**

**При поглощении энергии атомом электрон переходит с внутренней орбиты на внешнюю, более далекую от ядра. При обратном переходе атом излучает порцию энергии.**



## **6.6. Экспериментальные подтверждения боровской теории атома водорода.**

# Оптические спектры испускания атомов

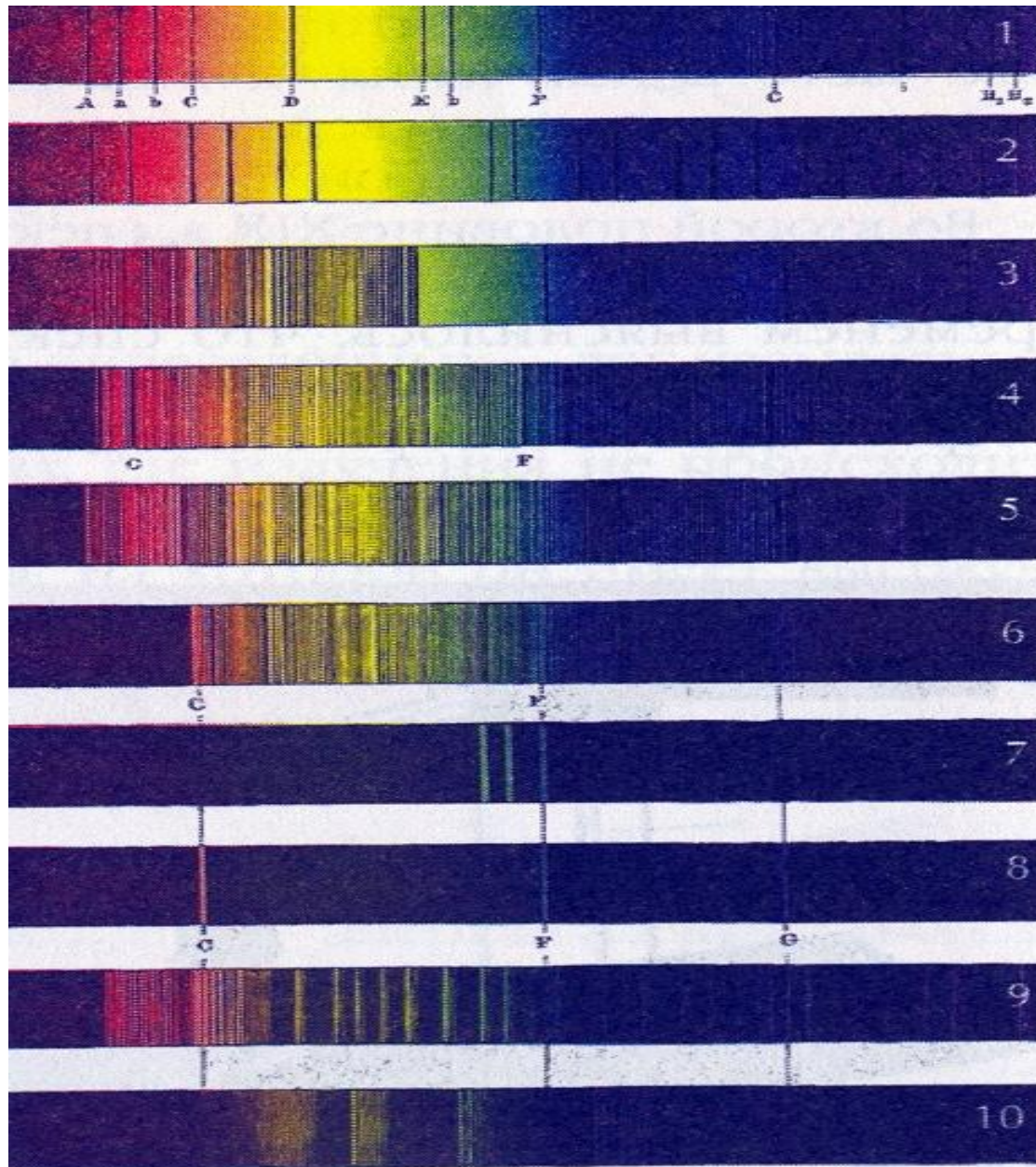


Линейчатые спектры испускания:

1 - водород; 2 - азот; 3 - светильный газ.



# Применение спектрального анализа



**Спектры постоянных звёзд и туманностей в сравнении со спектрами Солнца и некоторых металлоидов.**

- 1 — Солнце;
- 2 — жёлто-красная звезда;
- 3 — голубая звезда;
- 4 — Сириус;
- 5 —  $\alpha$  Геркулеса;
- 6 — Т Венца;
- 7 — Туманность Дракона;
- 8 — водород;
- 9 — азот;
- 10 — светильный газ.

# Как проверить?

Формула Бальмера - странная, но красивая  $\lambda = 36456 \frac{m^2}{m^2 - 4}$ .

Формула Ридберга - обобщение формулы Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(1+s)^2} - \frac{R}{(m+p)^2}$$

R - постоянная Ридберга, s и p - дробные поправки, меняющиеся от серии к серии.

Для водорода s = 1, p = 1.  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ .

$$R = 10967758,1 \text{ м}^{-1}.$$

Согласно теории Бора

$$E_{\text{фотона}} = \frac{hc}{\lambda} = E_1 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Атом водорода

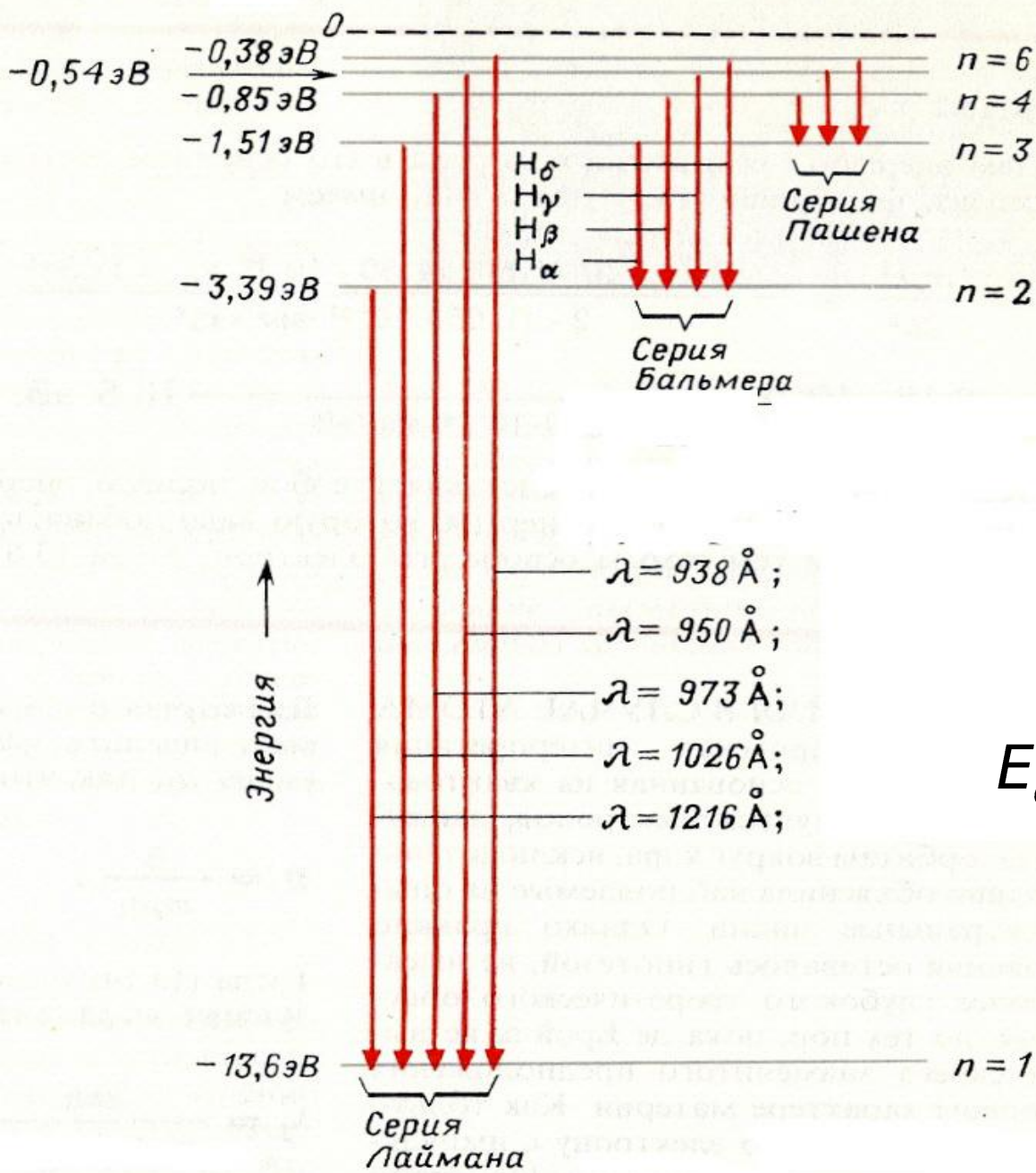


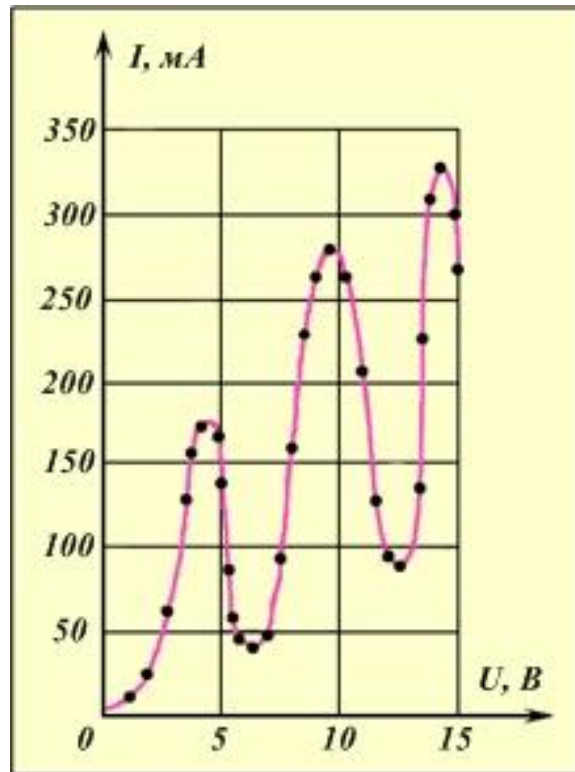
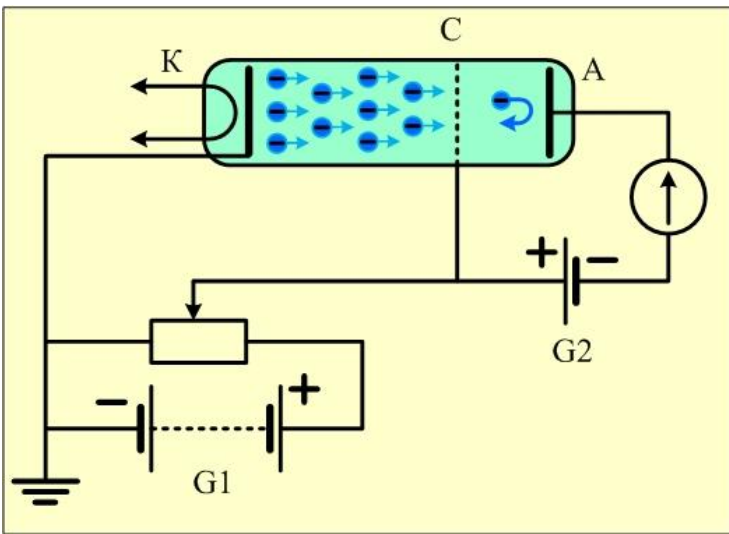
Схема энергетических уровней атома водорода

$$E_{\text{фотона}} = \frac{hc}{\lambda} = E_1 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

# Опыт Франка и Герца.

Дж. Франк и Г. Герц, 1913 г.

Стеклянная колба заполнена парами ртути. Электроны вылетают из нагретого катода **К** и ускоряются напряжением  $U$ , создаваемым батареей **G1**. Между сеткой **С** и анодом **А** – слабое тормозящее поле  $U_2 = 0,5$  В



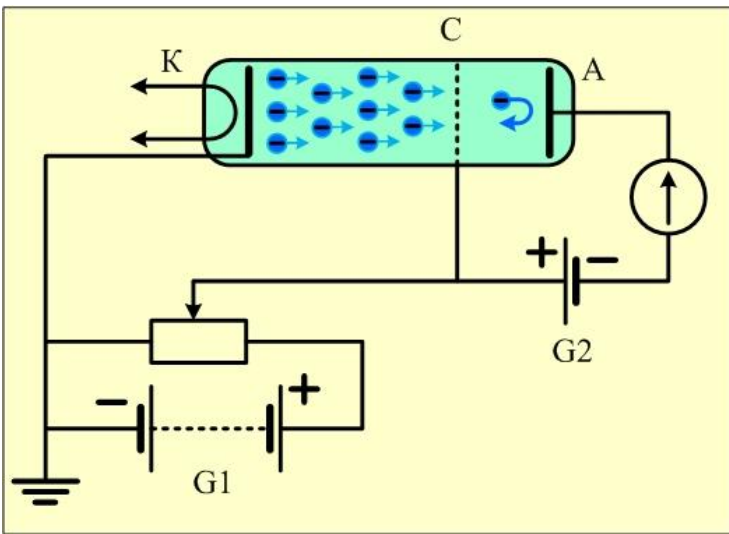
На рисунке показана вольт-амперная характеристика данного устройства.

Возрастание ускоряющего напряжения  $U$  от 0 до 4,9 В сопровождается ростом силы тока. С ростом напряжения всё большее число электронов преодолевают область пространственного заряда у катода.

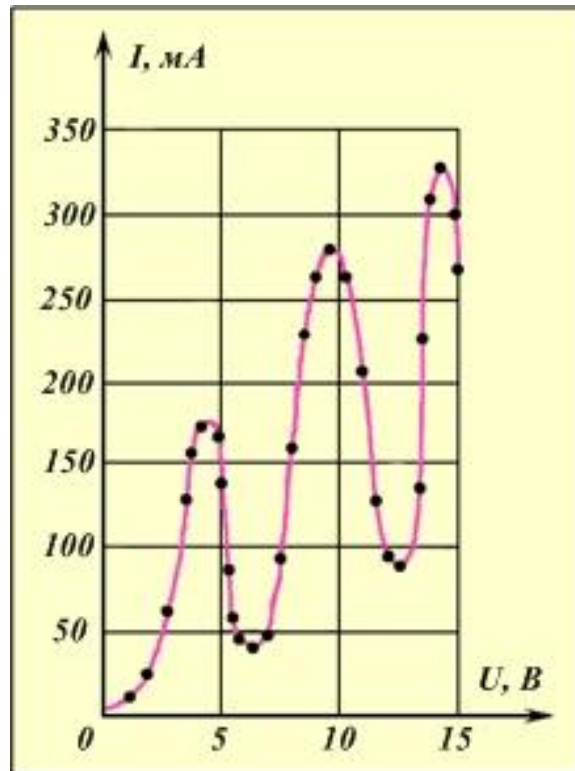
При достижении значения ускоряющего напряжения  $U = 4,9$  В сила тока резко падает.

Электроны с кинетической энергией  $E = 4,9$  эВ полностью теряют её в результате столкновений с атомами ртути.

# Опыт Франка и Герца.



В результате неупругих столкновений с электронами атомы ртути приобретают энергию  $E = 4,9$  эВ, энергия же электронов после столкновения пренебрежимо мала и они полностью задерживаются малым напряжением  $U_2$ .



Таким образом, расстояние между двумя энергетическими уровнями атома ртути  $\Delta E = 4,9$  эВ.

Этот вывод подтверждается тем, что атомы ртути начинают самопроизвольно испускать ультрафиолетовое излучение. Частота излучения совпадает с рассчитанной по формуле

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{4,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,625 \cdot 10^{-34}} = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$