

1.9. Опыты по рассеянию альфа-частиц.

Резерфордовская модель атома

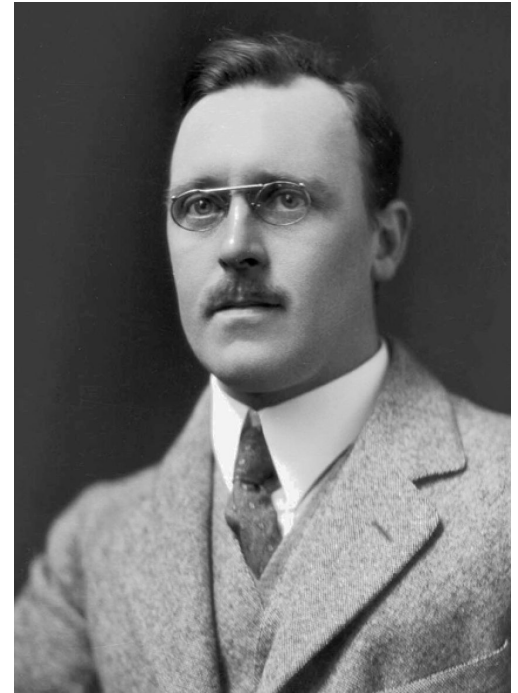
Опыт по рассеянию α -частиц пленками золота,
1908-1910 гг.

Гейгер и Марсден под руководством Резерфорда

Hans Wilhelm Geiger
(1882-1945)



Ernest Marsden
(1889-1970)



Пучок α -частиц с энергией 4.96 МэВ от радиевого источника «И» направлялся на тонкие (3 мкм) фольги золота «М». Прошедшие сквозь металл α -частицы вызывали вспышки на люминесцентном экране «Э». Число и положение вспышек определялись с помощью микроскопа «А».

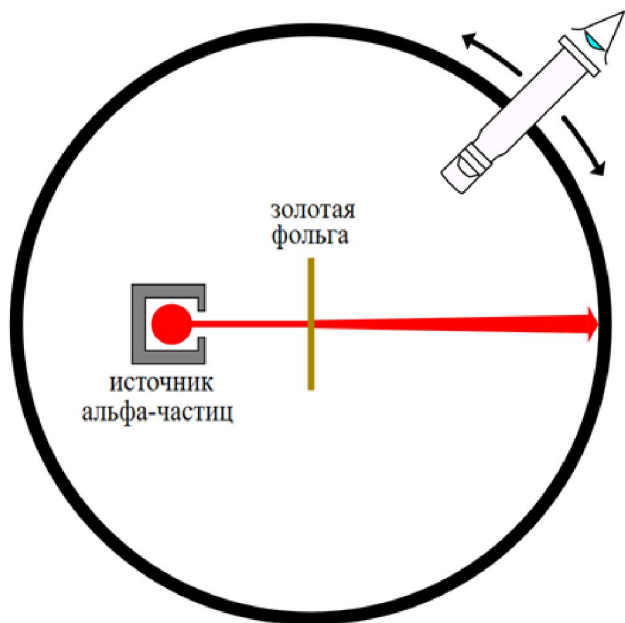
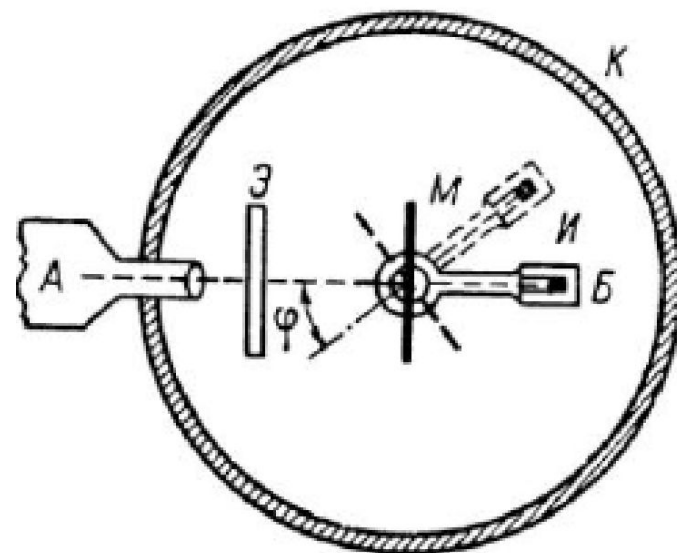
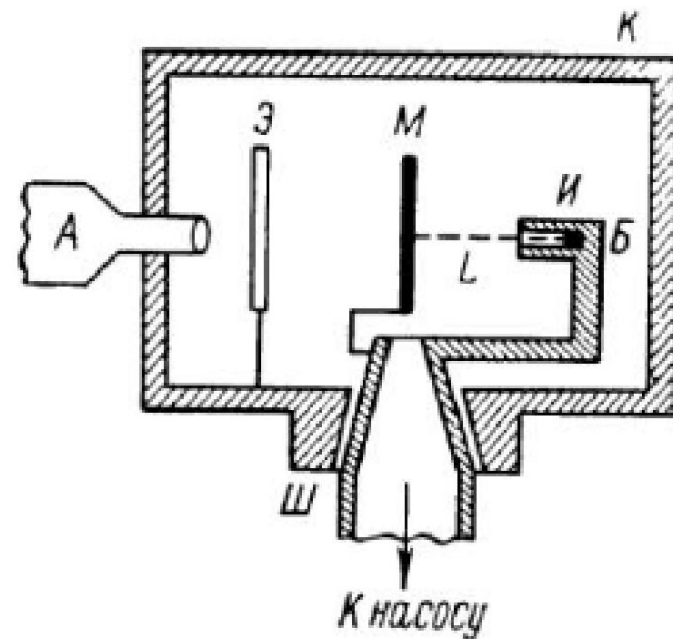


Схема опыта



Конструкция одного из вариантов прибора

В отсутствие преграды пятно на экране было узким. При установке одной или нескольких фольг оно уширялось. Но не очень сильно – на доли или единицы градусов.

Это подтверждало высокую проникаемость атомов для α -частиц – ведь толщина фольг соответствовала нескольким тысячам атомных слоев.

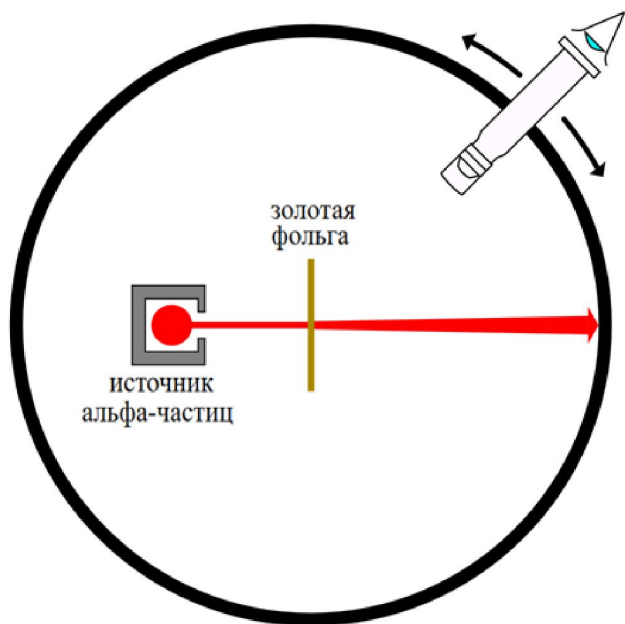
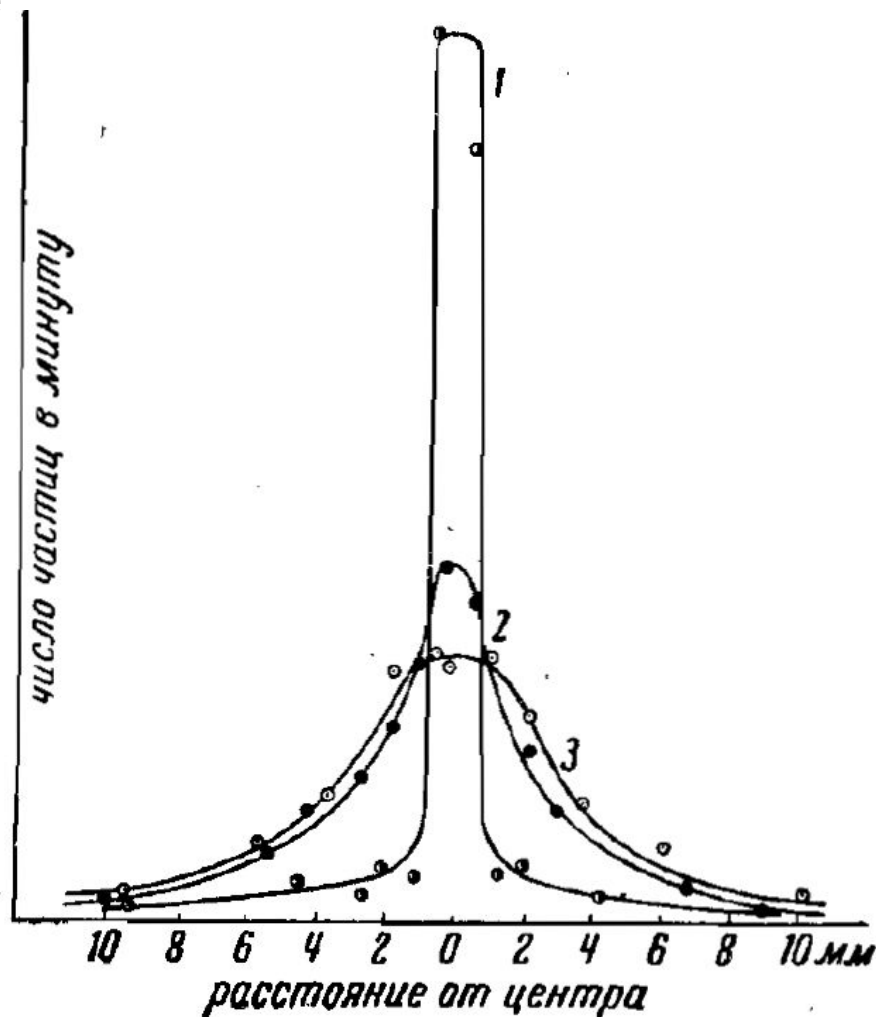


Схема опыта



Частота рассеяния α -частиц на малые углы.

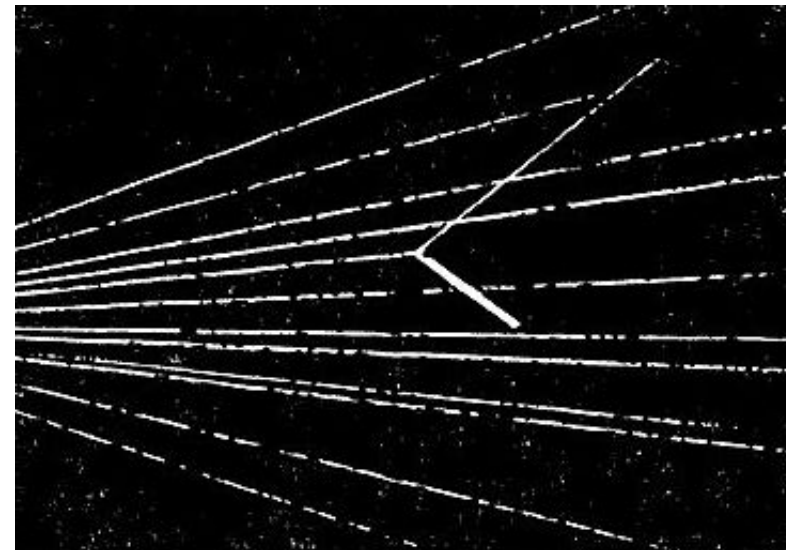
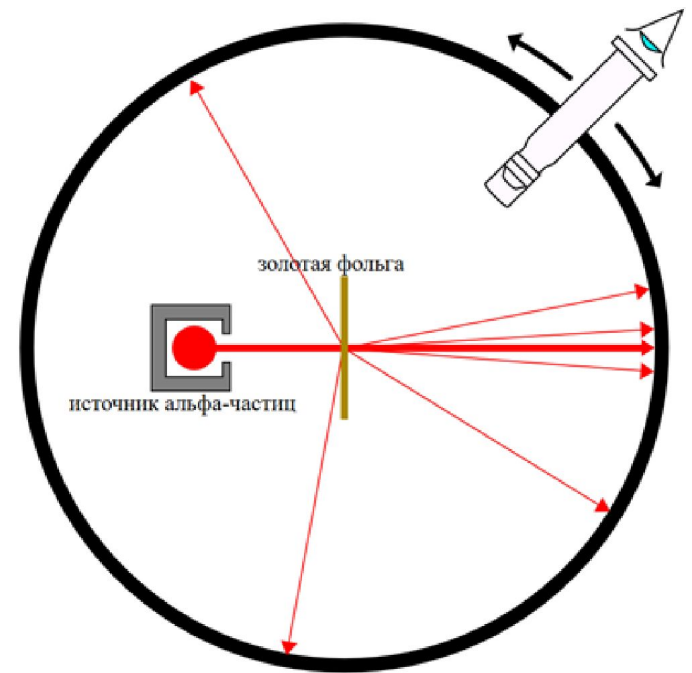
- 1 – рассеяние α -частиц в воздухе;
- 2 – рассеяние α -частиц тонким золотым листочком;
- 3 – рассеяние двумя золотыми листочками.

Однако оказалось, что некоторые, немногие частицы рассеивались и на большие углы: для 1 частицы из 8000 угол рассеяния превышал 90° .

Это не могло быть суммой многих отклонений на малые углы – статистическая оценка такой вероятности (на основе измеренной вероятности рассеяния на малые углы) была существенно меньше экспериментального значения. Расхождение превышало 5 порядков.

Позднее одномоментный характер рассеяния на большие углы был подтвержден прямым наблюдением треков α -частиц в газе.

*Треки альфа-частиц в камере Вильсона.
Одна из частиц испытала рассеяние на атоме кислорода. Более толстая ветвь «вилки» -- трек атома отдачи.*



Резерфорд:

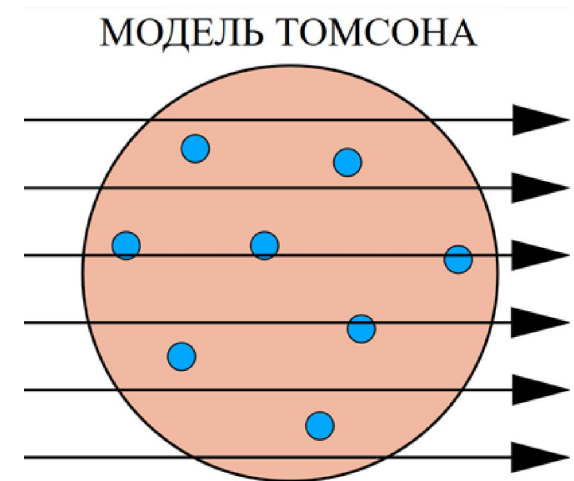
«Это было почти столь же невероятно, как если бы вы стреляли 15-дюймовым снарядом в листок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам...»

Это с точки зрения статической модели атома, предложенной Томсоном:

Электроны помещены внутри равномерно положительно заряженной сферы, размер которой соответствует размеру атома. (Модель пудинга)

Заряд сферы различен для атомов разных элементов и равен числу электронов.

Электроны могут свободно перемещаться внутри сферы (раз они способны ее покидать), удерживаются полем ее заряда.



Проницаемость вещества для электронов (Ленард) и для α -частиц вполне соответствовало модели Томсона.

А возможность рассеяния на большие углы – противоречила.

- Электрон такого атома не может существенно изменить направление движения α -частицы из-за значительно меньшей массы.
- Облако положительного заряда с размером атома также не могло – по итогу рассмотрения электростатической задачи.

Может ли действие кулоновского поля положительного облака атома в модели Томсона «остановить» α -частицу?

Это определяется потенциалом в его центре.

Напряженность электрического поля равномерно заряженной сферы максимальна на ее границе. Для сферы радиуса R с полным зарядом Ze :

$$E_R = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

С удалением от сферы она квадратично спадает по закону Кулона.

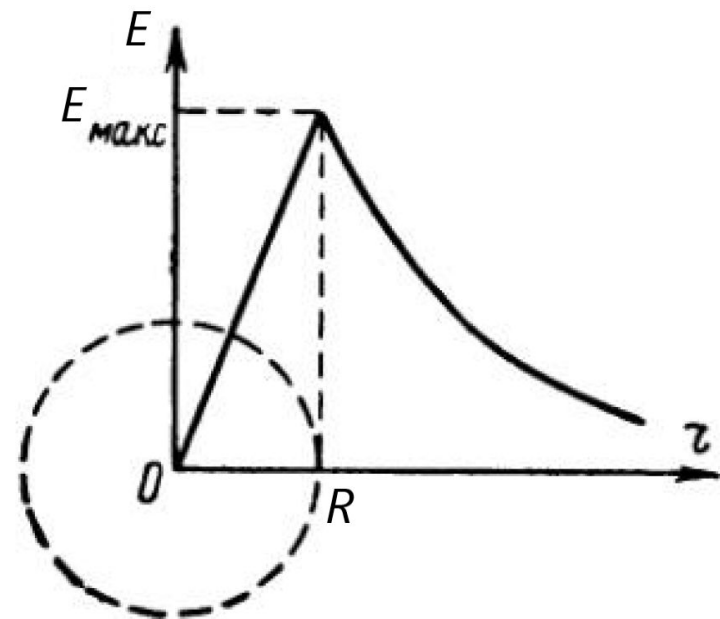
Потенциал границы нетрудно получить интегрированием:

$$U_R = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 R}$$

От границы к центру сферы поле линейно спадает. Интегрирование дает для потенциала центра:

$$U_0 = \frac{3}{2}U_R$$

Чем меньше R , тем сильнее поле и выше потенциал – точка «излома» на рисунке смещается влево вдоль ветви гиперболы.



- Для размера атома $R=1$ Ангстрем= 10^{-10} м и заряда $Z=100$ (на самом деле, для золота $Z=79$) получается $U_0=21.6$ кВ.
- Такой потенциал может остановить (и рассеять на 180°) α -частицу с кинетической энергией не более 43.2 кэВ.
- Энергия α -частиц в эксперименте была на 2 порядка больше.
- Следовательно, размер области концентрации положительного заряда и массы атома (R) должен быть на порядки меньше.
- У атома есть ядро!
- Размер ядра много меньше размера атома. Что же определяет размер атома?

Резерфорд провел расчет для модели, где положительный заряд атома Ze сконцентрирован в точечном ядре, взаимодействующем с α -частицей кулоновскими силами.

Получил формулу для зависимости числа рассеянных частиц от угла рассеяния ϑ :

$$dN = Nnh \left(\frac{Ze^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

N – число падающих частиц;

n – концентрация атомов;

h – толщина фольги;

M и v – масса и скорость α -частицы;

$d\Omega$ -- телесный угол.

Все величины здесь известны или могут быть измерены.

Рассеяние α -частиц золотыми листочками

$$dN = Nnh \left(\frac{Ze^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

Угол отклонения (в °)	$\frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$	Число сцинтилляций	$dN \sin^4 \frac{\vartheta}{2}$
150	1,15	33,1	28,8
135	1,38	43,0	31,2
120	1,79	51,9	29,0
105	2,53	69,5	27,5
75	7,25	211	29,1
60	16,0	477	29,8
45	46,6	1 435	30,8
30	223	7 800	35,0
15	3445	132 000	33,4

Экспериментальная проверка угловой зависимости:

- Число частиц, рассеянных на угол ϑ , действительно пропорционально $\sin^{-4}(\vartheta/2)$ во всем диапазоне углов.

- Зависимость от скорости частиц и толщины фольги также подтвердилась.
- Следовательно, взаимодействие α -частиц с ядрами в условиях эксперимента (тяжелые ядра, не очень быстрые частицы) является чисто кулоновским.
- Это позволяет оценить размер ядра «сверху».
- Более поздние эксперименты с легкими газами при больших углах рассеяния обнаружили отклонения от формулы Резерфорда □

□ оценка размера ядра $\sim 10^{-14}$ м

$$dN = Nnh \left(\frac{Ze^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Формула Резерфорда позволяет определить заряд ядра материала фольги Z .

- Такой опыт был успешно проведен Дж. Чедвиком в 1920 г.
- Сложность: необходимо было соотнести количества рассеянных и нерассеянных α -частиц, которые различаются на много порядков.
- Измерения были проведены для платины, серебра и меди.
- Установлено, что заряды их ядер совпадают с атомными номерами.

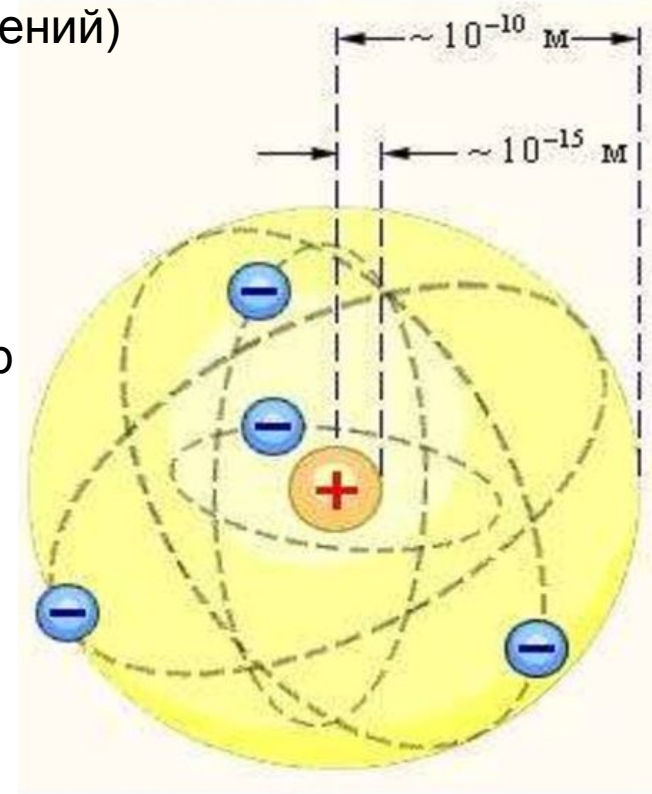


James Chadwick
(1891-1974)

Планетарная модель атома Резерфорда:

(попытка остаться в рамках классических представлений)

- В центре атома – ядро малого размера, в котором сосредоточен весь положительный заряд и почти вся масса.
- Электроны, положение которых определяет размер атома, не могут покоиться. Для атома водорода с одним электроном невозможно статическое равновесие. Для больших чисел электронов равновесие возможно, но неустойчиво.
- Следовательно, электроны движутся по круговым или эллиптическим орбитам.
- Но: движущийся с ускорением электрон должен излучать электромагнитную волну, терять энергию и упасть на ядро за время порядка 10^{-10} с.



Вывод: внутренняя структура атома как системы заряженных частиц не может быть описана в рамках классической физики.

(Он оказывается нестабильным – либо статически, либо электродинамически.)