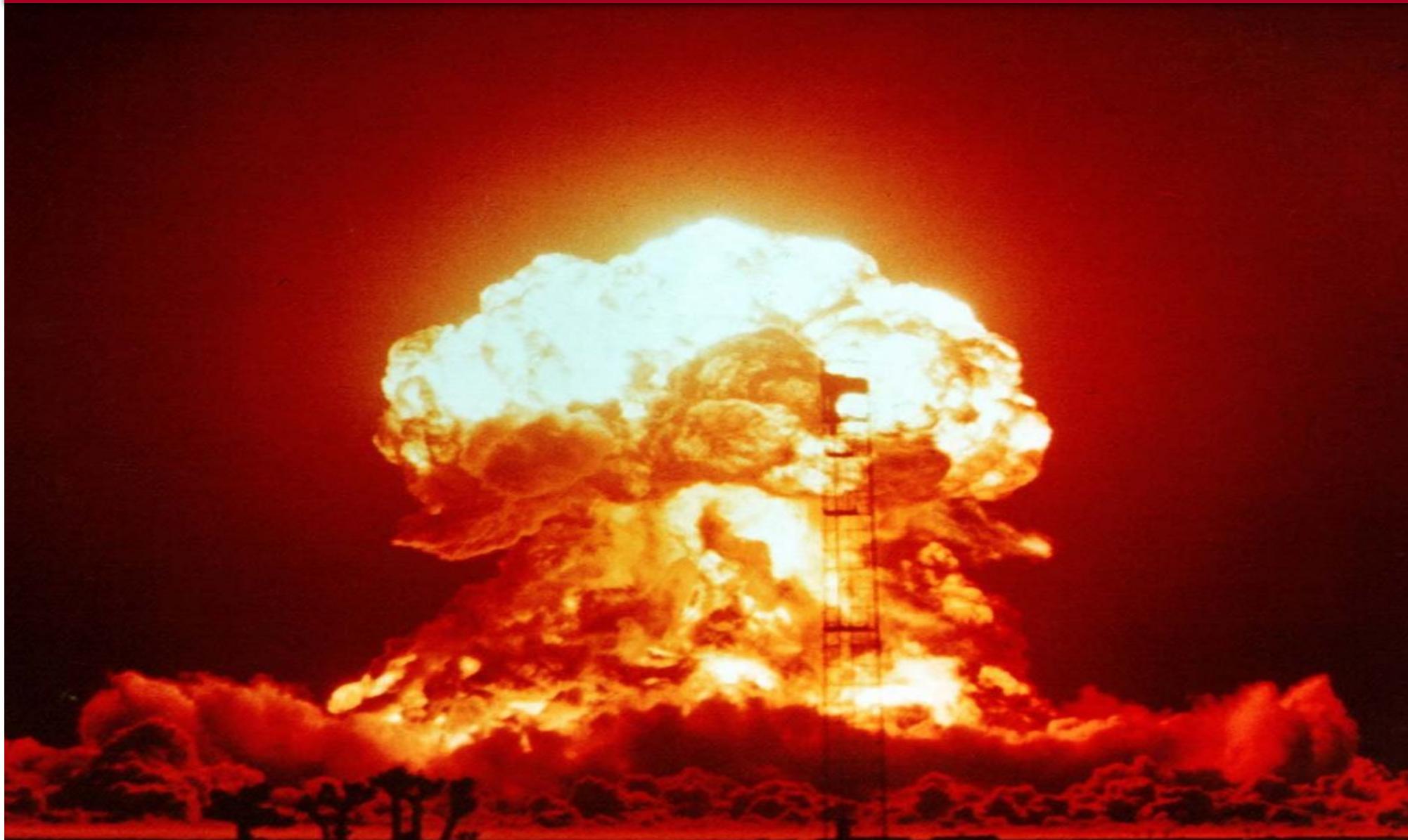




# АТОМНАЯ ФИЗИКА



## **Учебники:**

Савельев И. В.. Курс общей физики, т.3;

Шпольский Э. В. Атомная физика, т.1.;

Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 5. Часть 1.

Добрецов Л.Н. Атомная физика.

# ВВЕДЕНИЕ

1. С точки зрения программы обучения в вузе атомная физика является частью курса **общей физики**.
2. Атомная физика – **ПОСЛЕДНИЙ ИЗ КУРСОВ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ** - покоится на фундаментальных математических и физических знаниях, полученных при изучении математики и так называемой классической физики.



**Математика:** вект. анализ; диф. уравнения в т. ч. в частных производных; поверхностные и объемные интегралы; телесный угол.  
Четкие определения всех математических и физических величин, с которыми Вы столкнетесь в Курсе.

**Предназначение** Курса состоит в изложении экспериментального материала и теоретической его интерпретации, послужившего основой для создания **квантовой механики**. В этом смысле атомная физика является **переходным курсом**, в котором вы впервые столкнетесь с понятиями, которыми далее широко пользуется современная квантовая физика. Постольку поскольку фундаментом предмета является классическая физика, надо прекрасно себе представлять, что попытка что-либо уразуметь в излагаемом материале без знания **классической механики и электродинамики** представляется совершенно безнадежной.

Мы будем придерживаться исторической последовательности.

Важнейшей особенностью данного предмета является **масштаб рассматриваемых явлений**.

В предыдущих разделах курса общей физики рассматривались процессы, которые, в основном, можно отнести **к макроскопическим**, то есть к таким, которые описываются в рамках классической теоретической механики, классической электродинамики и теории относительности. В данном разделе физики **мы сталкиваемся с явлениями атомного и субатомного масштаба**.

Строение вещества на  
микроскопическом уровне  
будет иметь определяющее  
значение.

Лишь *небольшое* число частиц  
или  
*отсутствует* взаимодействие между ними.

# АТОМЫ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ

## ЧАСТИЦЫ

*Греческие философы*



Идея об атомах

**Бесконечна ли делимость  
вещества?**

Слово «атом», что по гречески означает «*неделимый*», означает **предел**, когда дальнейшее деление невозможно.

# ПРЕДАТОМНАЯ ИСТОРИЯ

В XIX веке атомная гипотеза привела к замечательным успехам в понимании ряда явлений.

Закон «**постоянных и кратных отношений**», открыт Проутом в 1799 г. и, независимо от него Дальтоном в 1808 г.



**При химических реакциях вещества могут соединяться (реагировать) друг с другом лишь в одних и тех же простых весовых отношениях**, так что некоторое количество одного реактива может прореагировать лишь только с определенным количеством другого. При этом весовое отношение прореагировавших веществ не зависит от внешних условий – например от того, в какой пропорции они были смешаны первоначально.



**Джон Дальтон**

John Dalton

**Дальтон** — традиционная передача английской фамилии *Dalton* [['dɔːltən](#)], которая по современным правилам передаётся по-русски как [Долтон](#).

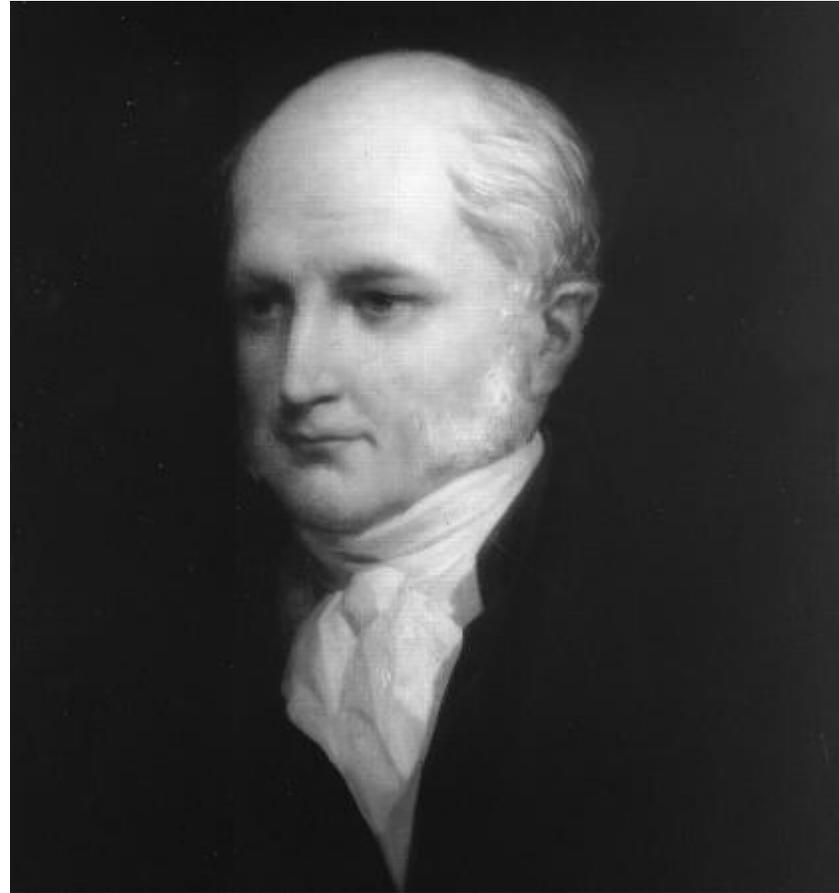
Английский провинциальный учитель-самоучка, химик, метеоролог и естествоиспытатель. (6 сентября 1766 — 27 июля 1844).

В 1794 провёл исследования и описал дефект [зрения](#), которым страдал сам, — [цветовая слепота](#), позже названный в его честь [дальтонизмом](#);

Открыл [закон парциальных давлений \(закон Дальтона\)](#) (1801), закон равномерного расширения газов при нагревании (1802), [закон растворимости газов в жидкостях \(закон Генри-Дальтона\)](#). Установил [закон кратных](#)

[отношений](#) (1803), обнаружил явление [полимеризации](#) (на примере [этилена](#) и [бутилена](#)), ввёл понятие «[атомный вес](#)», первым рассчитал [атомные веса \(массы\)](#) ряда элементов и составил первую таблицу их относительных [атомных весов](#), заложив тем самым основу [атомной теории строения вещества](#).

Пра́ут, Уи́льям ([англ. William Prout](#); [15 января 1785](#), [Хортон](#), [Великобритания](#) — [9 апреля 1850](#), [Лондон](#))



Автор [гипотез Праута](#) о том, что все [атомы химических элементов](#) могут получаться путем конденсации атомов [водорода](#) и что все веса атомов должны быть кратны весу атома [водорода](#).

## ПРИМЕ

Р

**Любая одна весовая часть водорода всегда взаимодействует только с восемью весовыми частями кислорода.**

1 г водорода всегда соединяется только с 8 г кислорода, сколько бы кислорода мы ни взяли, и дает 9 г воды.

Даже если мы возьмем **один миллиграмм водорода** и 8 г. кислорода, то водород провзаимодействует только с 8 мг кислорода, остальные 7.992 г кислорода в реакцию не вступят.

Если мы далее будем уменьшать массу взаимодействующих реактивов и **дойдем до предела деления вещества** (если он существует), то в этой неделимой далее частице должны соединяться одна весовая часть водорода с восемью весовыми частями кислорода.

*В случае газов* такие закономерности выполняются не только **для весов** реагирующих веществ, но также и **для их объемов**. Из этих экспериментальных фактов Авогадро в 1811г. Сделал следующий вывод:

**”Любой газ состоит из огромного числа частичек – атомов или молекул. При одних и тех же температуре и давлении равные объемы газов содержат равные числа молекул”.**

**Амедео Авогадро, граф  
Куаренья и Черрето**



*Amedeo Avogadro*

Picture of Amedeo Avogadro  
(1776–1856), the Italian scientist

## Август Карл Крёниг (1822 – 1879), нем.

физик

Согласно Крёнигу,

1. Газ состоит из совокупности молекул, которые он уподоблял **идеально упругим шарикам**, находящимся в абсолютно беспорядочном непрерывном движении.
2. **Объем молекул** пренебрежимо мал в сравнении с полным объемом газа и что **взаимодействия** молекул нет.

На основании этой гипотезы и учитывая закон Авогадро, Крёнигу удалось объяснить закон Бойля-Мариотта и, по сути дела, получить объединенный газовый закон.

В положениях модели Крёнига мы узнаем **основные положения современного представления об идеальном газе**. Модель Крёнига справедлива только для достаточно разреженных газов.

Идеи Крёнига были развиты немецкий физик-теоретик Клаузиусом.

В 1873 г. Ван-дер-Вальс [голландский физик] показал, что достаточно исправить теорию идеального газа лишь в двух пунктах, чтобы прийти к выводам, применимым к реальным газам.

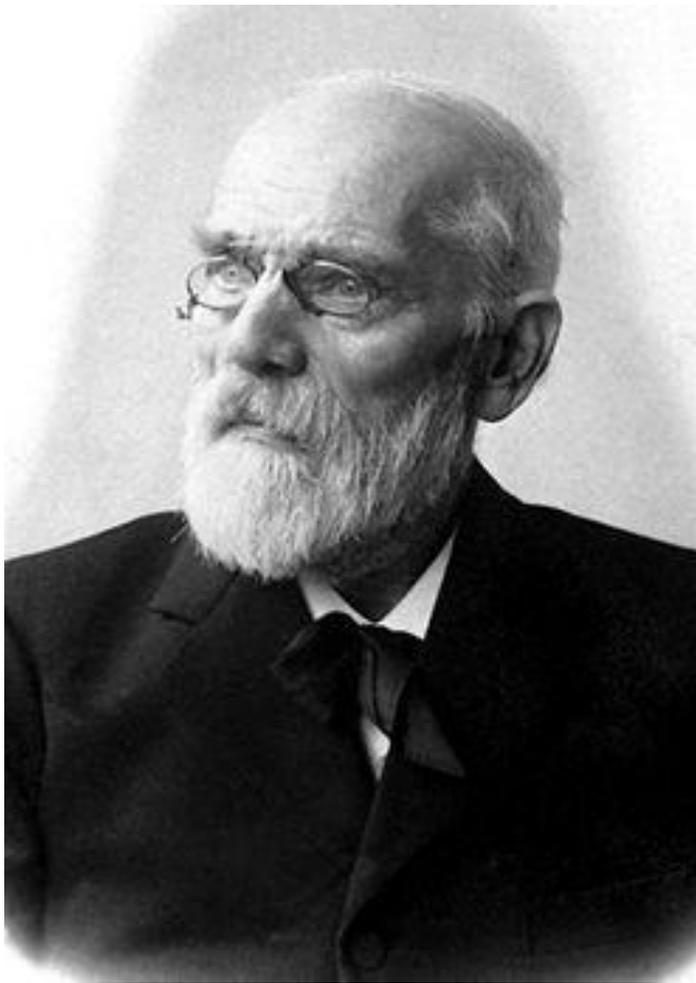
1. Нужно учесть, что *объем молекул не равен нулю*, так что при неограниченном возрастании давления, объем газа стремится к конечному значению, а не к нулю.
2. Нужно учесть *взаимное притяжение молекул*, что приводит к некоторому уменьшению давления на стенки сосуда, т.к. в момент соударения со стенкой молекула притормаживается силами притяжения со стороны остальных молекул, или к увеличению давления, действующего на газ.

Учитывая эти поправки, Ван-дер-Вальс ввел *уравнение состояния газа*, носящие его имя, **применимое даже к не очень плотной жидкости**

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

$V_m$  - молекулярный объем, а и b – константы Ван-дер-Вальса.

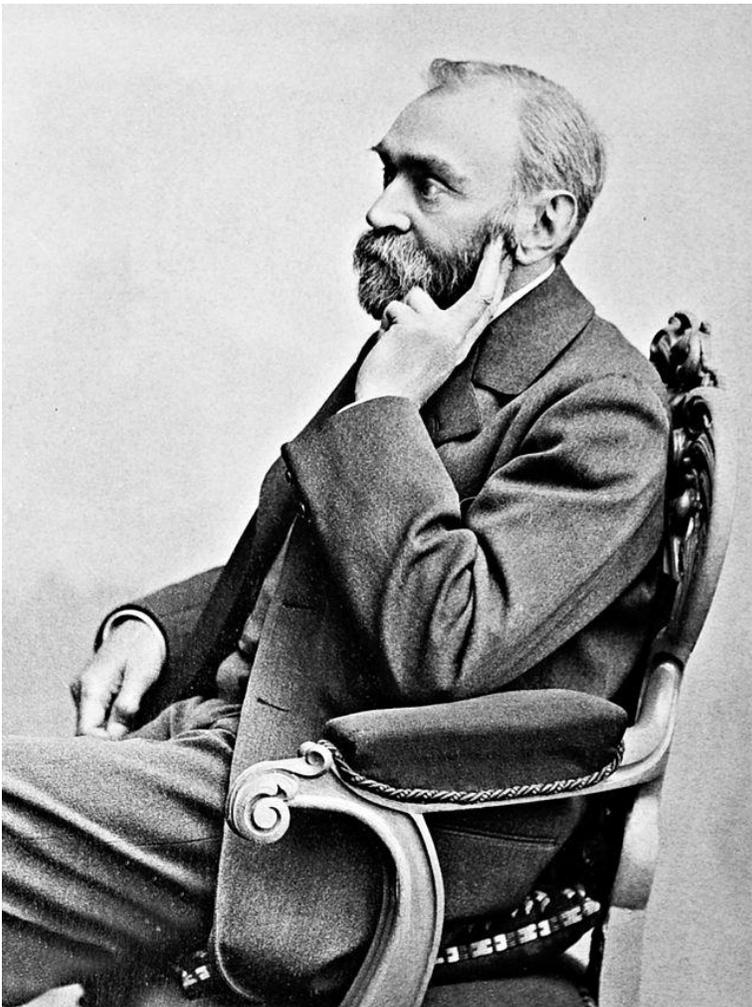
Это уравнение показывает, что агрегатные состояния газа и жидкости базируются на одном физическом принципе.



**Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс**

([23.10.1837](#), — [8.03.1923](#),) — [голландский физик](#), лауреат [Нобелевской премии по физике](#) в [1910](#) г.

Вы уже сталкивались с уравнением Ван-дер-Ваальса при изучении молекулярной физики и оно, безусловно, казалось Вам лишь незначительным уточнением уравнения Менделеева-Клапейрона. Однако Нобелевский комитет был несколько иного мнения и 05.11.1910 принял решение о присуждении премии Ван-дер-Ваальсу. Его решение гласит: “Присудить Нобелевскую премию года по физике Яну Дидерику Ван-дер-Ваальсу за вывод уравнений агрегатных состояний газов и жидкостей”.



**Альфред Бёрнхард Нобель**  
[21 октября 1833](#) - [10 декабря 1896](#)

Завещал своё огромное состояние на учреждение [Нобелевской премии](#). В его честь назван синтезированный химический элемент [нобелий](#). В честь Нобеля назван Нобелевский физико-химический институт в Стокгольме и [университет в Днепропетровске](#).

В [1868 году](#) Нобель получил патент на [динамит](#) — смесь нитроглицерина со способными впитывать его веществами. Рекламируя своё открытие, он проводил публичные демонстрации нового взрывчатого вещества и читал лекции о том, как оно работает.

В [1888 году](#) по ошибке репортёров в газете опубликовали сообщение о смерти Нобеля. Это оказало на Альфреда серьёзное влияние. Когда о нём стали писать «миллионер на крови», «торговец взрывчатой смертью», «динамитный король», он решил сделать так, чтобы не остаться в памяти человечества «злодеем мирового масштаба».

В 1889 году он присутствовал на [Всемирном конгрессе мира](#). 10 декабря 1896 года Альфред Нобель умер на своей вилле в [Сан-Ремо, Италия](#), от [кровоизлияния в мозг](#). Ему было 63 года <sup>[7]</sup>. Похоронен на кладбище [Норра бегравнингсплатсен](#) в [Стокгольме](#).

Основываясь на представлениях о газе как совокупности молекул, находящихся в состоянии непрерывного движения, в течение XIX, и начала XX века удалось объяснить большинство свойств разряженных газов, наиболее близких к модели идеального газа.

Удалось объяснить такие явления как **вязкость и диффузия**. При рассмотрении модели реального газа, например, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса, были **определены размеры молекул**. Линейные размеры молекул оказались **порядка  $10^{-8}$  см**. Эта величина получила собственное название  $10^{-8}$  см = 1Å. В честь шведского спектроскописта А.И.Ångström (Онгстрём).



В [1862](#) обнаружил наличие [водорода](#) на [Солнце](#).

Основным трудом учёного является «Исследование солнечного спектра» ([1868](#)) — атлас, представивший измерения 1000 спектральных линий с разрешением в одну десятимиллионную часть [миллиметра](#) (величину, которая впоследствии получила название «[ангстрем](#)»).

Впервые исследовал спектр [северного сияния](#). Также изучал [теплопроводность](#) и [магнетизм](#).

**Андерс Йонас  
Ангстрем**

Anders Jonas Ångström

[13.08.1814-21.06.1874](#)

**Атомы и молекулы** - мельчайшие представители данного конкретного химического элемента или соединения.

**Элементарные заряды электричества**, как положительные так и отрицательные.

Открытие *дискретной структуры электричества* было сделано как вывод из законов Фарадея об электролизе.

Из законов Фарадея следует, что если пропускать одно и то же количество электричества через различные электролиты, то количества вещества, выделяемые в растворах одновалентных ионов, будут пропорциональны *атомным весам*. В случае многовалентных ионов перенесенная масса *обратно пропорциональна валентности вещества*.

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{Z} q$$

M – масса моля выделяющегося вещества,

Z – валентность вещества,

F – постоянная Фарадея (число Фарадея) = 96491 Кл.

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{Z} q$$

Пропорциональность  
массы и заряда



**Массу и заряд в электролите  
переносят одни и те же  
частицы!**

Для одновалентного вещества  $Z = 1$  и пусть  $m = M \gg$  на электродах выделился один моль вещества,  $q$  – соответствующее количество электричества



$$\frac{q}{F} = \frac{m}{M} = 1 \quad q = F$$

Отсюда видно, что один моль одновалентного вещества переносит заряд, численно равный числу Фарадея. Разделив число Фарадея на количество единиц массы в одном моле – на число Авогадро, мы найдем величину элементарного заряда

$$\frac{F}{N_A}$$

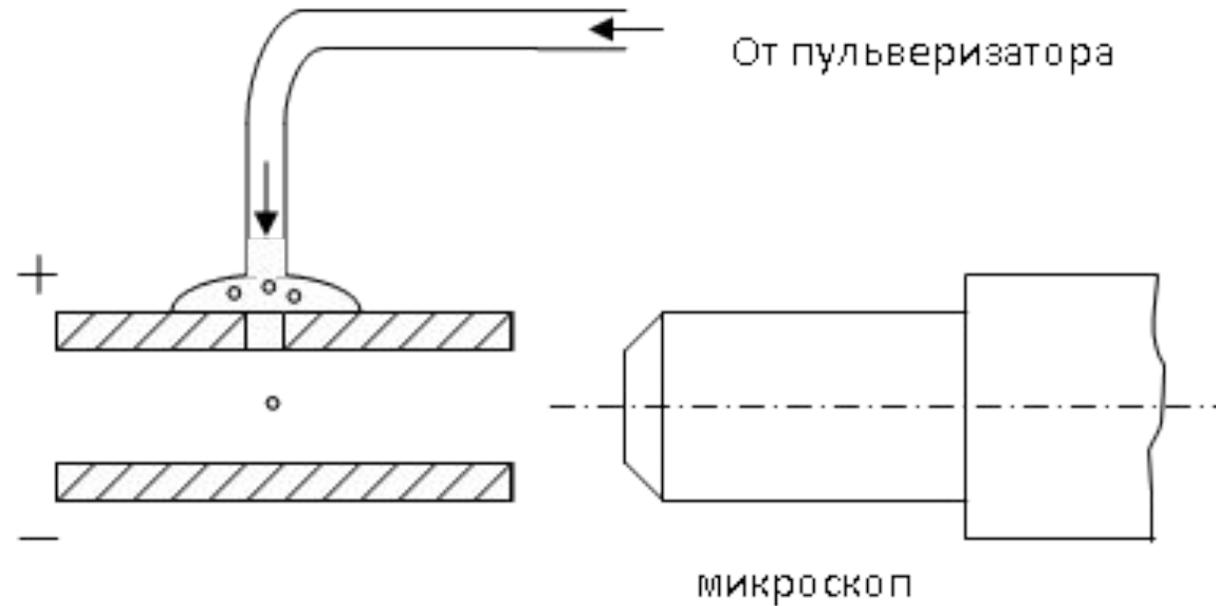
Носитель этого заряда – **атом электричества** – получил название **электрона**. Заряду электрона приписали **отрицательный знак**.

Атом электрически нейтрален,  присоединение к атому еще одного электрона вызовет заряд его отрицательным электричеством, а удаление – заряд электричеством положительного знака.

Таким образом, не наблюдая еще самого электрона, можно было ожидать наблюдения последствия его присоединения, или наоборот – отрыва от атомов – другими словами – образование ионов, или ионизацию.

При этом, естественно, одна величина электрического заряда должна была получиться как из **электролитических** опытов, так и из **физических** опытов по наблюдению за движением малых, но макроскопических заряженных тел вне жидкой среды.

# Опыт Милликена



Размер капель масла был порядка одного микрометра ( $10^{-4}$ см). Пространство между пластинами конденсатора, расположенными **горизонтально**, ярко освещалось, а при помощи микроскопа можно было наблюдать скорость движение капелек  $\nu$ . Рассмотрев движение капли при различных полях можно определить величину элементарного заряда.

Если капля движется с постоянной скоростью, то векторная сумма сил равна нулю.

На каплю массы  $m$  действуют следующие силы:

сила тяжести  $mg$ ;

сила Архимеда  $\rho_v Vg$  ;

сила Стокса (сопротивление среды)  $F_c = 6\pi\eta rV$  ;

Сила Кулона  $e'E$ .  
**Обозначения.**

$g$  – ускорение свободного падения;  $r$  – радиус капли;  $\rho_v$  – плотность воздуха;  $\eta$  – вязкость воздуха;  $V$  – скорость капли;  $V_0$  – скорость капли в отсутствие электрического поля;  $V_E$  – скорость капли в электрическом поле;  $\rho_m$  – плотность масла.

$$\vec{F}_C + \vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{F}_k = 0;$$

# ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ В ОТСУТСТВИЕ

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

$$F_k = 0$$

$$\vec{F}_c + \vec{F}_A + m\vec{g} = 0;$$

В отсутствие электрического поля капля может двигаться только  
вниз

$$6\pi\eta r V_0 = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_M - \rho_B)g \quad (9)$$

## ДВИЖЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ,

НАПРАВЛЕННОМ ВВЕРХ

$$e'E + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m g - 6\pi\eta r V_E = 0; \quad (10)$$

Величины  $\rho_m, \rho_v, g, \eta$  обычно хорошо известны.

**Скорости** измеряются экспериментально по времени прохождения между двумя рисками в поле зрения микроскопа.

**Напряженность** электрического поля вычисляется по известной разности потенциалов и расстоянию между пластинами конденсатора.



**Единственной неизвестной величиной оказывается !!!**

Из (9) выражаем  $r^2$

$$r^2 = \frac{9\eta V_0}{2g(\rho - \rho_e)};$$

$$r = \left[ \frac{9\eta V_0}{2g(\rho - \rho_e)} \right]^{1/2}$$

Из (10) находим  $e'$

$$e' = \frac{1}{E} \left\{ 2\pi r \left[ \frac{2}{3} r^2 g(\rho - \rho_e) + 3\eta V_E \right] \right\}$$

Подставляем радиус капли

$$e' = \frac{2\pi}{E} \left[ \frac{9\eta V_0}{2g(\rho - \rho_e)} \right]^{1/2} \left[ \frac{2g(\rho - \rho_e)}{3} \cdot \frac{9\eta V_0}{2g(\rho - \rho_e)} + 3\eta V_E \right]$$

Измерив скорость свободного падения капли  $V_0$  и скорость ее подъема в электрическом поле  $V_E$  можно было найти заряд капли .

Для данной капли  $V_0 = \text{const.}$ , а  $V_E$  изменялось в зависимости от заряда .

Произведя измерение  $V_E$  при некотором значении  $e'$ , Милликен вызывал **ионизацию** воздуха, облучая пространство между пластинами рентгеновскими лучами. Отдельные ионы, сталкиваясь с капелькой, изменяли ее заряд, в результате чего скорость капли  $V_E$  также изменялась. После измерения скорости снова облучали пространство между электродами и снова измеряли скорость подъема и т.д.

### Результат

**ОПЫТОВ**

$$\Delta e' = ke, \quad e' = ne, \quad k, n - \text{целые числа.}$$

Изменение заряда капли и сам заряд капли оказались кратными одной и той же величине «e», которую называли элементарным зарядом.

Значение элементарного заряда, установленное с учетом измерений Милликена и данных, полученных другими методами, равно

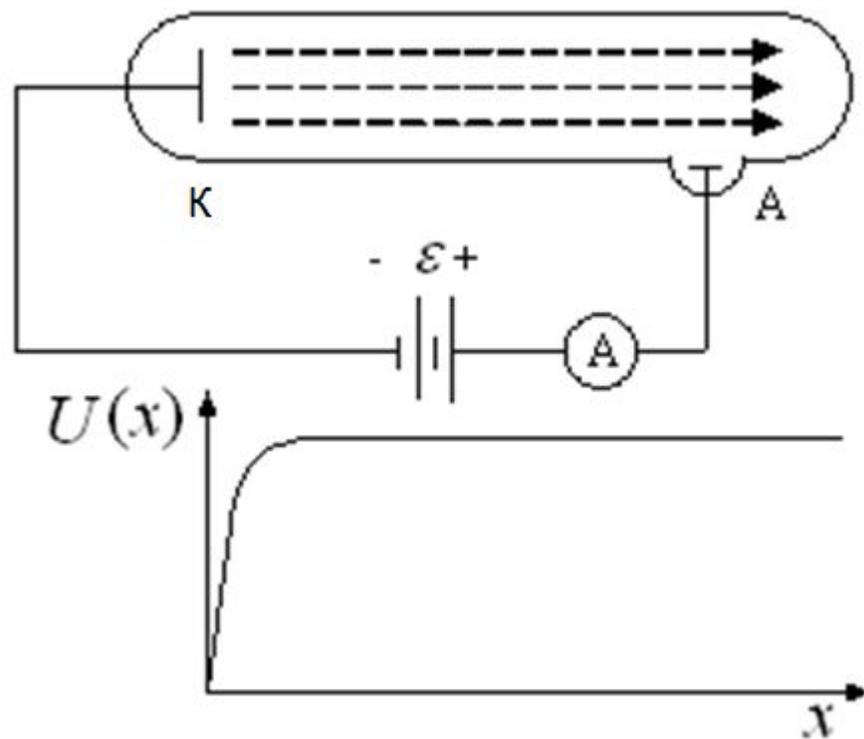
$$e = 1.602 * 10^{-19} \text{ Кл} = 4.803 * 10^{-10} \text{ ед. CGSE}$$

Решение Нобелевского комитета от 13.11.24 : "Присудить Нобелевскую премию по физике Роберту Эндрусу Милликену за работы по измерению элементарных электрических зарядов и фотоэлектрическому эффекту".

Опыты Милликена, несмотря на то, что они позволили определить величину элементарного электрического заряда, **не давали возможности его наблюдения в свободном виде** и не позволяли изучать собственно носители заряда без их соединения с носителями основной массы вещества, то есть ионами.

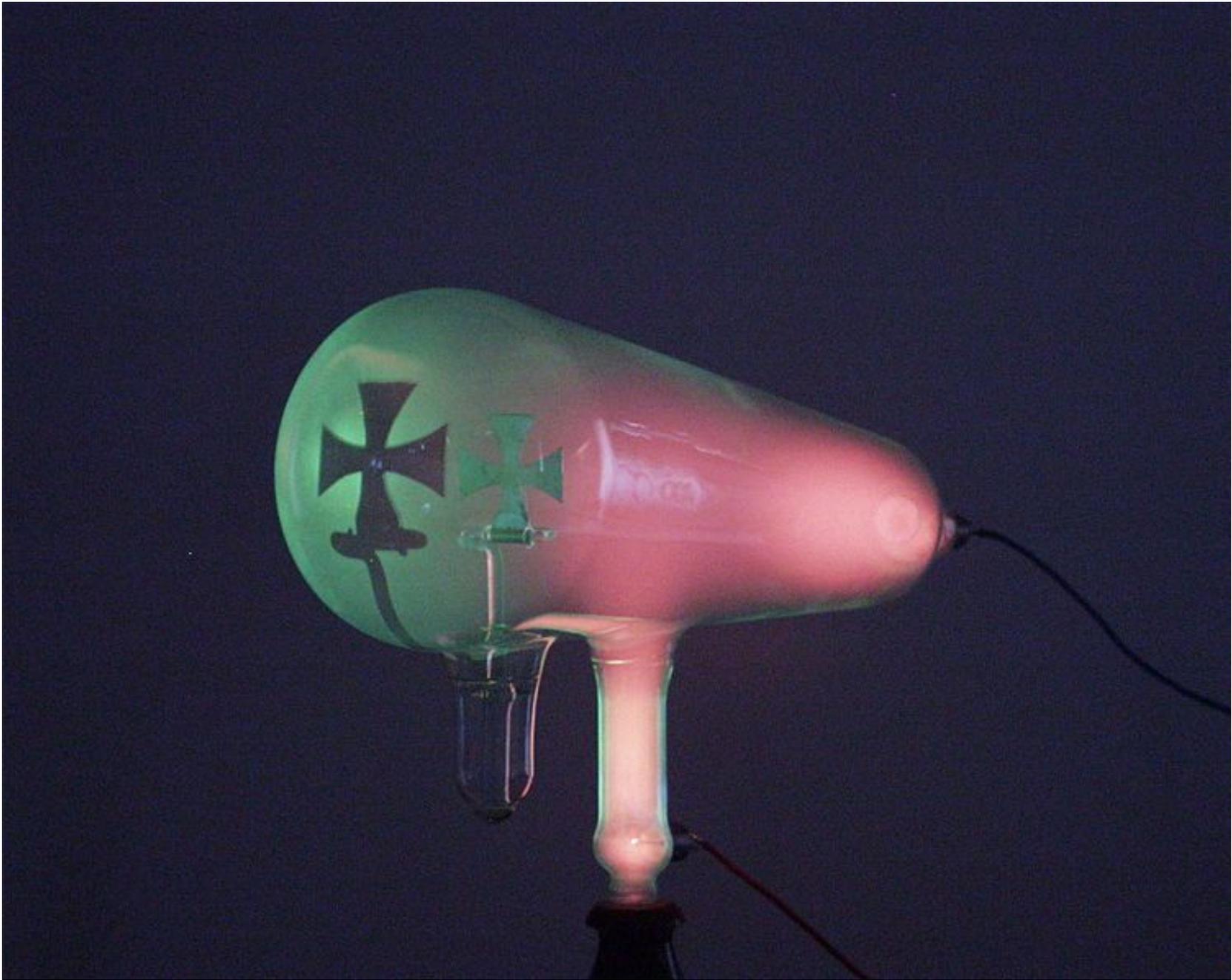
# Исследования разряда в газах при низких давлениях

Опыты Милликена, позволили определить величину элементарного электрического заряда, не давали возможности его наблюдения в свободном виде и не позволяли изучать собственно носители заряда без их соединения с носителями основной массы вещества, то есть ионами.



При давлении порядка **0.1 мм.рт.ст.** свечение почти полностью исчезает. Наблюдающееся свечение носит **объемный характер**, и, например, если посередине трубки установить экран, хотя-бы из того же самого стекла, из которого изготовлена трубка, то это стекло **не будет отбрасывать протяженной тени** ни в сторону одного, ни в сторону другого электрода. Это говорит о том, что **процессы, приводящие к свечению газа происходят на малых расстояниях.**

При давлениях порядка  **$10^{-3}$  мм.рт.ст.** в трубке появляются лучи, исходящие из катода – так называемые катодные лучи. При определенных условиях их можно наблюдать непосредственно. Они тянутся от катода к аноду через всю трубку. Если на их пути поместить какое-либо тело, то оно будет отбрасывать **тень** на флуоресцирующем участке стекла, куда они попадают. Взаимное расположение катода, тела и его тени показывает, что лучи, создающие теневое изображение, распространяются прямолинейно.



Частицы летят прямолинейно. Ведь, казалось бы, что вблизи анода электрическое поле будет отклонять их вниз, однако этого не происходит. В чем же дело? Объяснение может быть одно – вблизи анода электрическое поле пренебрежимо мало! Это было бы противоестественно, если бы в трубке был идеальный вакуум, однако в ней находятся остатки воздуха.

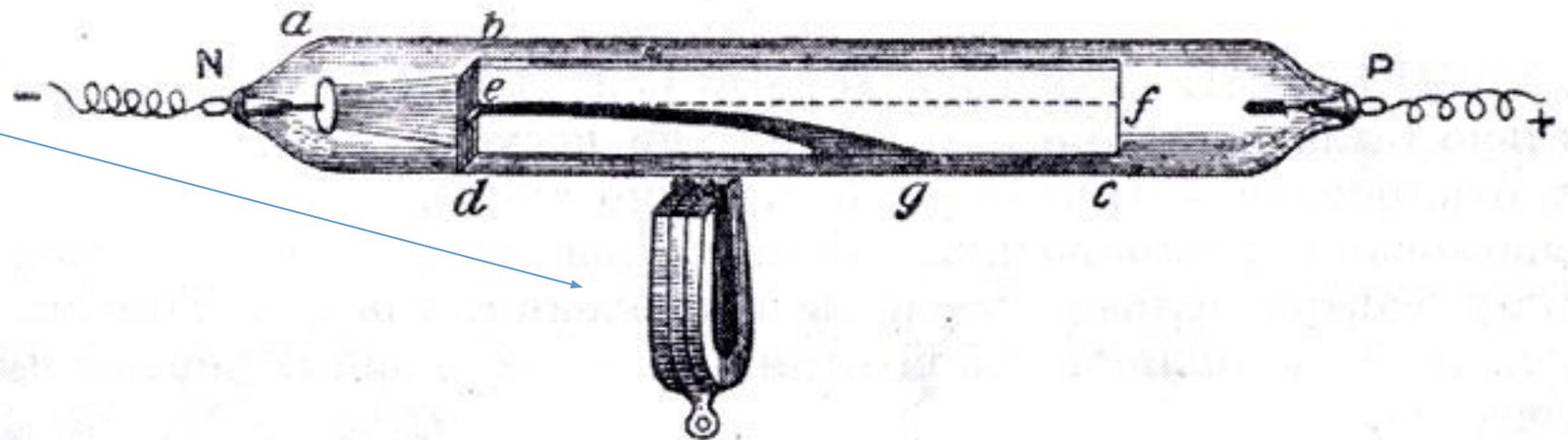
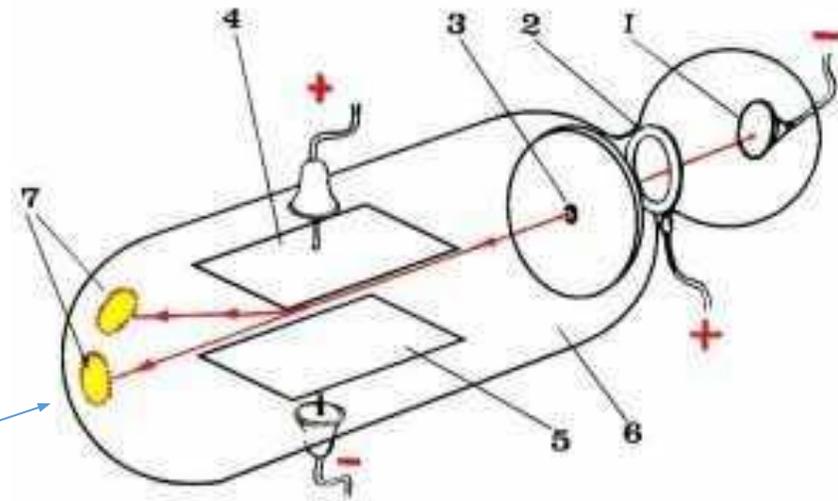
Число молекул в  $1\text{см}^3$  идеального газа при Н.У.А. 
$$\frac{N}{V_m} = \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{22.4 \cdot 10^3} = 2.68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

Эта величина называется числом Лошмидта. При давлении  $10^{-3}$  мм. рт. ст. плотность газа примерно на три порядка меньше  $n \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . **Тридцать тысяч миллиардов молекул в одном кубическом сантиметре** – это далеко не пустота.

Из-за особенностей разряда в газах практически все падение потенциала происходит вблизи катода (график зависимости потенциала от координаты приведен рядом с чертежом установки) и уже на расстоянии нескольких сантиметров от катода частицы (электроны) движутся практически по инерции, так как действующая на них сила близка к нулю.

Наблюдаемое излучение всегда сопровождается переносом электрического заряда (во внешней цепи идет ток).

Более того, можно вызвать отклонение лучей от прямолинейной траектории при помощи внешнего электрического или магнитного поля. Причем из характера этого отклонения следует, что **лучи состоят из отрицательных частиц.**



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ЗАРЯДА

## ЭЛЕКТРОНА

Природа весьма экономна >> все

отрицательно заряженные частицы имеют

**Масса должна быть чрезвычайно мала, так как**

При равномерном падении сила Стокса должна равняться разности веса капли и выталкивающей силы:

$$(m_k - m_e)g = 6\pi\eta rV,$$

( $m_k$  – масса капли,  $m_e$  – масса воздуха в том же объеме).

$$v \propto \frac{1}{r} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi r^2$$

Если носители заряда имеют массу и размеры, то приобретение заряда нескольких электронов (или даже ионов) в конденсаторе Милликена в отсутствие электрического поля должно было бы сказаться на скорости их осаждения, однако этого эффекта в действительности не наблюдалось, следовательно радиус капли не изменяется, **и в ионе (атоме), а тем более в электроны наблюдается очень высокая концентрация заряда, очень высокое отношение заряда электрона к его массе.**

А может быть у электрона масса покоя вообще равна

**НЕТ!!**



Наличие инертной массы электрона сказывается в тех случаях, когда электрону сообщается ускорение под действием электрического или магнитного поля.

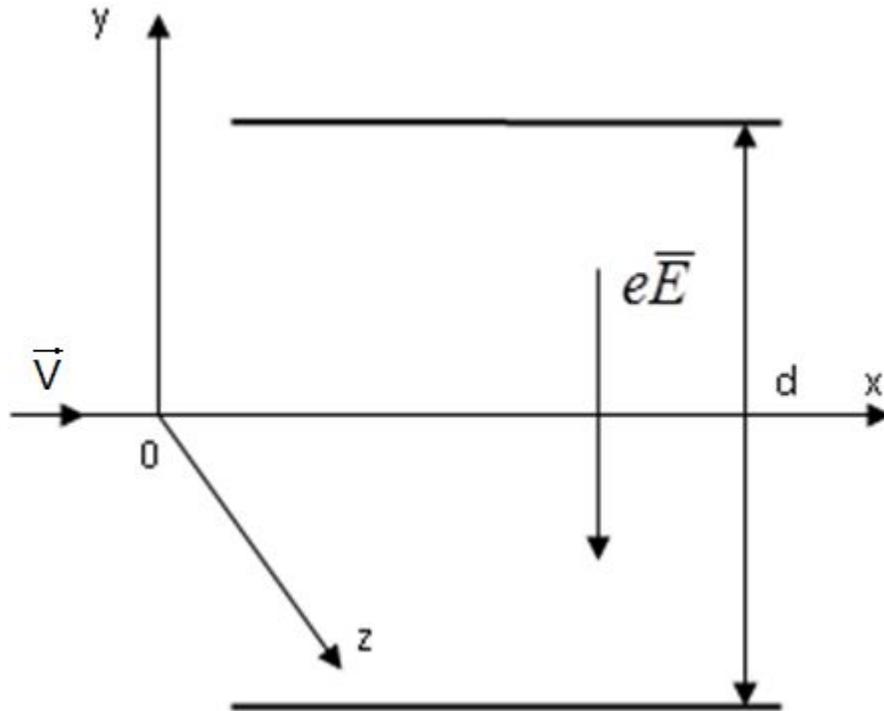
Сила, действующая со стороны электромагнитного поля на частицу, несущую заряд  $e$  (сила Лоренца), выражается формулой:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{V} \times \vec{B}]$$

Решение Нобелевского комитета от 11.11.1902: «Присудить Нобелевскую премию года по физике Хендрику Антону Лоренцу и Питеру Зееману за исследование влияния магнетизма на процессы излучения»

# Движение заряженной частицы в поперечном однородном электрическом

**Поперечным** называется поле, у которого направление силовых линий перпендикулярно направлению начальной скорости заряженной частицы. Выберем систему координат так как показано на рисунке. Частица движется вдоль оси  $Ox$ , электрическое поле направлено сверху вниз



Действием гравитационных и других неэлектромагнитных сил пренебрегаем. Из уравнения для силы Лоренца имеем:

$$m\vec{a} = e\vec{E}; \quad \vec{a} = \frac{e}{m}\vec{E} = \text{const.}$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + V_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2};$$

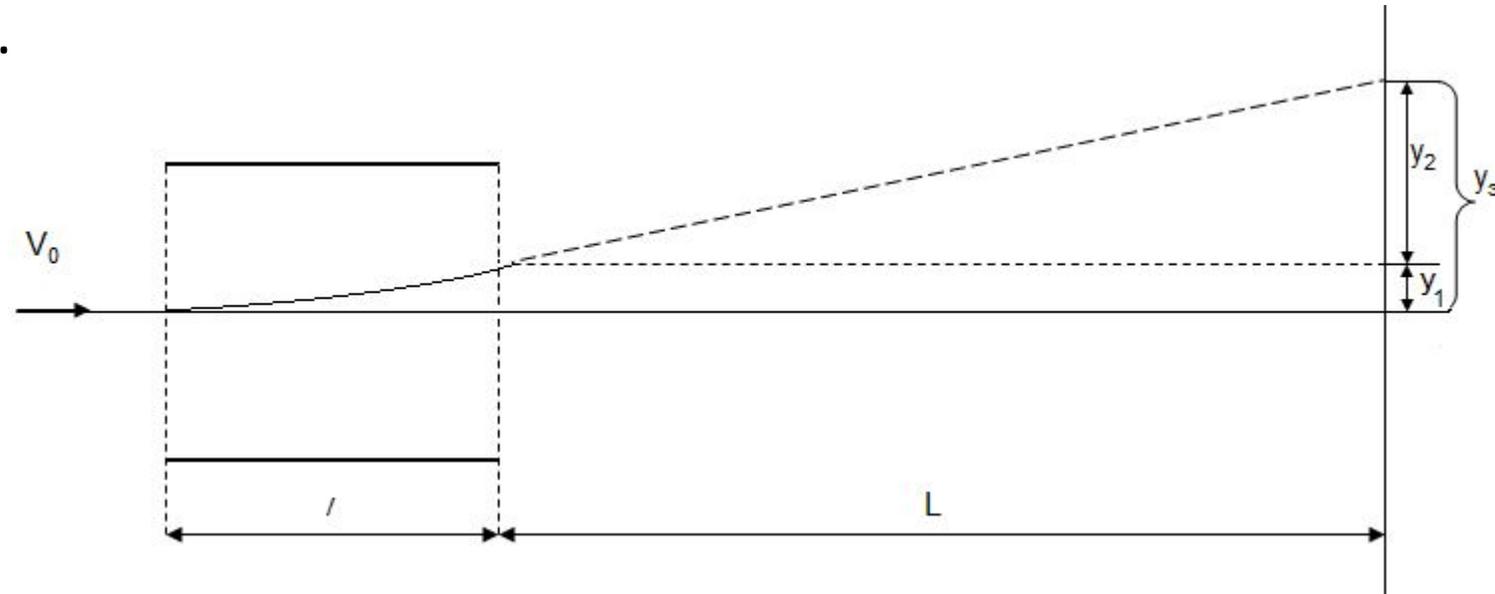
$$r_0 = 0.$$

$$x = V_0 t;$$

$$y = \frac{at^2}{2}; \quad a = \frac{e}{m}E; \quad a = \frac{eU}{md}; \quad y = \frac{eU}{2md} \cdot \frac{x^2}{V_0^2}.$$

Внутри конденсатора заряженные частицы  
будут двигаться по **параболе**.

В реальных экспериментальных установках частицы только часть своего пути проходят внутри конденсатора, потом же они движутся вне электрического поля – по инерции.



Полное отклонение на экране  $y_3$  складывается из отклонения  $y_1$  внутри конденсатора и отклонения  $y_2$ , полученного на пути  $L$  от границы конденсатора до экрана:

$$y_3 = y_1 + y_2;$$

$$y = \frac{eU}{2md} \cdot \frac{x^2}{V_0^2} \Big|_{x=l} \Rightarrow y_1 = \frac{eE}{2mV_0^2} \cdot l^2;$$

$$y_2 = V_y(l) \cdot t_L;$$

$$t_L = \frac{L}{V_0};$$

$V_y(l)$  – поперечная компонента скорости, приобретаемая в поперечном электрическом поле конденсатора за время его прохождения с продольной компонентой скорости  $V_x = V_0$

$$V_y(l) = a_y \cdot \frac{l}{V_0}; \quad a_y = \frac{eE}{m};$$

$$V_y(l) = \frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{V_0}$$

$$y_{\text{э}} = y_1 + y_2 = \frac{eEl^2}{2mV_0^2} + \frac{eElL}{mV_0^2} = \frac{1}{2} \frac{eEl}{mV_0^2} (l + 2L)$$

Величины  $E, l, L$  и  $y_{\text{э}}$  являются экспериментально измеряемыми и через них можно определить

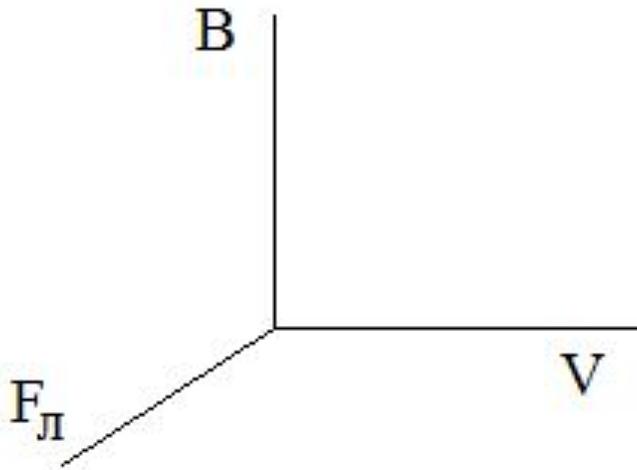
$$\frac{m}{e} \cdot V_0^2 = \frac{El(l+2L)}{2 y_{\text{э}}}$$

# ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОПЕРЕЧНОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Действие магнитной составляющей силы Лоренца определяется формулой

$$\vec{F}_L = e[\vec{V} \times \vec{B}].$$

Так как  $\vec{V} \perp \vec{B}$ ,  $\vec{F}_L$  перпендикулярно плоскости, содержащей векторы  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ , то есть лежит в горизонтальной плоскости.



Т. к.  $\vec{F}_L \perp \vec{V}$  и постоянна по величине, то происходит равномерное движение по окружности радиуса  $R$  определяемого из условия

$$eVB = \frac{mV^2}{R}; \quad R = \frac{mV}{eB}.$$

## МАЛОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ

Пучок заряженных частиц;  
Начальная скорость  $V$ , направленной вдоль оси  $Ox$ ;  
Однородное магнитное поле с величиной индукции  $B$ ;  
Протяженность поля по оси  $Ox$ , равна  $l$ ;  
Направление индукции перпендикулярно плоскости рисунка;

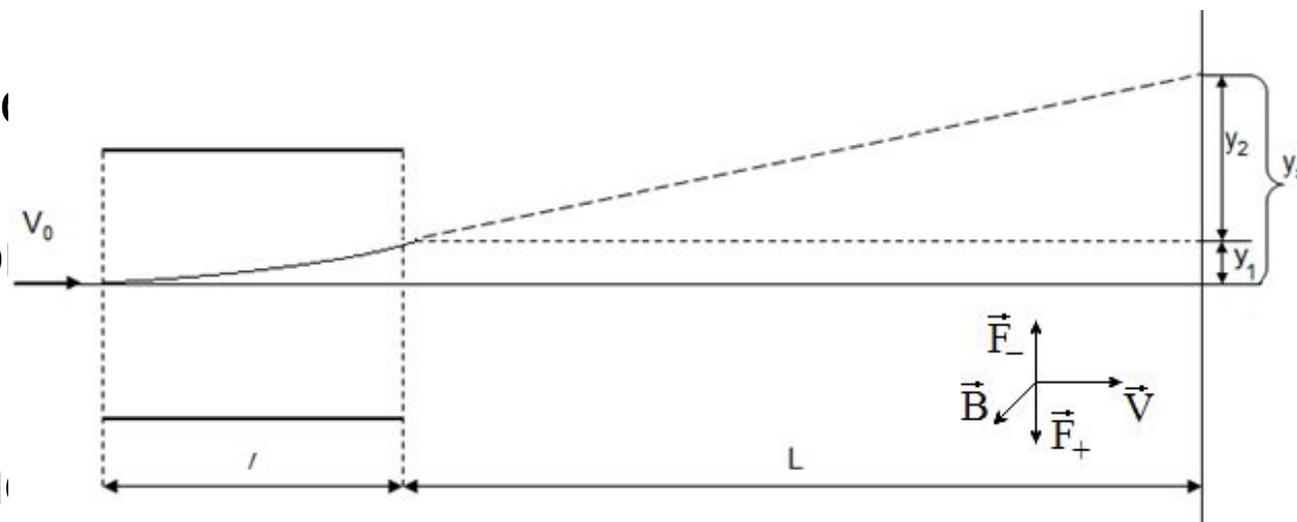


Рисунок для отклонения в электрическом поле. Все обозначения сохраняют свой смысл.

Согласно правилу правого буравчика, **для магнитного поля, направленного за чертёж**, сила Лоренца будет отклонять положительно заряженную частицу вверх по оси  $Oy$ . Или для магнитного поля, направленного **на нас** отклонение отрицательно заряженной частицы также будет направлено вверх по оси  $Oy$ . Будем полагать, что величина магнитного поля невелика, так что силу, действующую на частицу можно (несмотря на незначительное отклонение в

Тогда эта сила обеспечит ускорение вдоль оси  $y$ , равное

$$a_m = \frac{eV_0 B}{m}$$

Заменяя  $a_y$  в (30) на  $a_m$ , получим величину отклонения в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости рисунка

$$y_{\text{э}} = y_1 + y_2 = \frac{eEl^2}{2mV_0^2} + \frac{eElL}{mV_0^2} = \frac{1}{2} \frac{eEl}{mV_0^2} (l + 2L)$$
$$y_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{eV_0 B}{m} \cdot \frac{l}{V_0^2} (l + 2L) = \frac{eBl}{2mV_0} (l + 2L).$$

В отличие от электрического поля, в котором по отклонению можно получить

величину  $\frac{mV_0^2}{e}$ , в магнитном поле по результатам измерений можно найти  $\frac{mV_0}{e}$ .

Измерив ту и другую величину можно определить отношение заряда к массе – удельный заряд, например, если

$$\frac{mV_0^2}{e} = b; \quad \frac{mV_0}{e} = a;$$

$$\frac{a^2}{b} = \frac{\left(\frac{m}{e}\right)^2 V_0^2}{\frac{m}{e} \cdot V_0^2} = \frac{m}{e}.$$

Если определять  $\frac{e}{m}$  через параметры «а» и «b», потребуется знать скорость электронов. Учитывая, что скорости электронов при разности потенциалов порядка 1 В составляют сотни км/с, определение в 19 веке таким методом удельного заряда с достаточной точностью было крайне проблематично.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНОВ. Метод Томсона



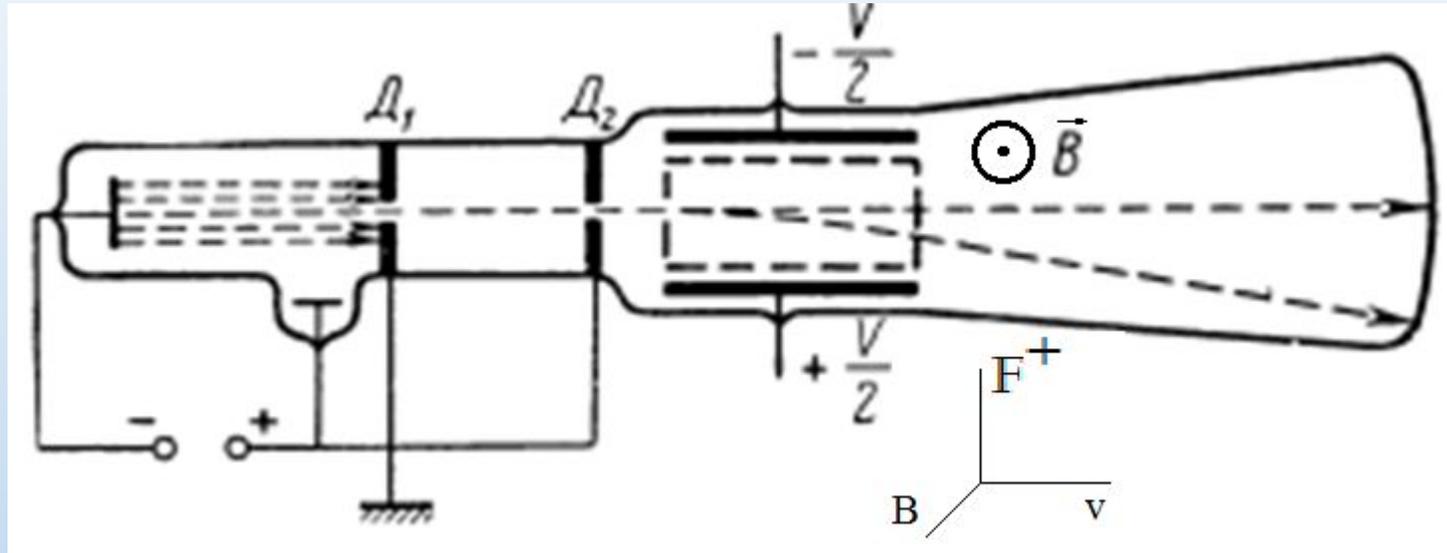
Джозеф Джон Томсон [18 декабря 1856 - 30 августа 1940.](#)

Научный руководитель: [Джон Уильям Стретт](#) (Лорд Рэлей)

Ученики: [Чарлз Баркла](#), [Чарлз Вильсон](#), [Эрнест Резерфорд](#), [Фрэнсис Астон](#), [Роберт Оппенгеймер](#), [Оуэн Ричардсон](#), [Уильям Брэгг](#), [Макс Борн](#), [Поль Ланжевен](#).

**Кавендишская лаборатория** — физический факультет Кембриджского университета. Первый руководитель – Джеймс Клерк Максвелл, 2 – Лорд Рэлей, 3 – Дж. Дж. Томсон, 4 - [Эрнест Резерфорд](#)...  
Джозеф Джон **Томсон** руководил **Кавендишской лабораторией** с 1884 по 1919 годы

# СХЕМА ОПЫТА Дж. Дж. Томсона



Узкий пучок катодных лучей, коллимированный диафрагмами  $D_1$  и  $D_2$ , проходит через **скрещенные** электрическое и магнитное поля. Электрическое поле направлено вертикально. Магнитное поле направлено «на нас». Показано отклонение отрицательного заряда в электрическом поле. Отклонение в магнитном поле его компенсирует.

Отклонения, вызываемые электрическим и магнитными полем, будут происходить в одной плоскости, причем суммарное (от действия двух полей) отклонение будет равно нулю, если на протяжении одинакового времени на заряды будут действовать одинаковые силы, направленные в противоположные стороны.

$$\vec{F}_{л} = \vec{F}_{лЭ} + \vec{F}_{лМ} = 0$$

$$eE = eV_0 B \Rightarrow V_0 = \frac{E}{B} \quad \frac{e}{m} y_{\text{э}}, U, B$$

Зная  $V_0$ , по отклонению в одном электрическом поле можно определить удельный заряд  $e/m$ .

$$y_{\text{э}} = \frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{2V_0^2} (l + 2L)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{y_{\text{э}}}{E \cdot \frac{l}{2V_0^2} (l + 2L)} = \frac{2y_{\text{э}} \cdot \frac{E^2}{B^2}}{El(l + 2L)} = \frac{2y_{\text{э}} E}{B^2 l (l + 2L)}$$

Результаты измерений Томсона показали, что для частиц, летящих в катодных лучах

$$\frac{e}{m_e} = 5 \cdot 10^{17} \frac{\text{ед. CGSE}}{2}.$$

Учтя,  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл  $= 4.803 \cdot 10^{-10}$  ед. CGSE,

$m_e \approx 10^{-27}$  г. Современное значение  $m_e = 0.91 \cdot 10^{-27}$  г.

Масса атома водорода  $1.6 \cdot 10^{-24}$  г., что на три порядка больше. Этот результат и показал, что движущиеся частицы не есть ионы каких-либо элементов, но представляют собой **свободные “атомы” отрицательного электричества.**

Частица катодных лучей была названа электроном, что берет свое начало от греческого названия янтаря; название “электрон” было предложено ирландским физиком Джорджем Стонеем еще в 1891г. Сам Джозеф Джон Томсон решением Нобелевского комитета от 12.11.06 был удостоен Нобелевской премии по физике.

Решение Нобелевского комитета гласит: “Присудить Нобелевскую премию года по физике Джозефу Джону Томсону за вклад, который он внес своими теоретическими и экспериментальными исследованиями прохождения электричества через газы”.

## ВЕЛИЧИНА И ПРИРОДА МАССЫ ЭЛЕКТРОНА. КЛАССИЧЕСКИЙ РАДИУС

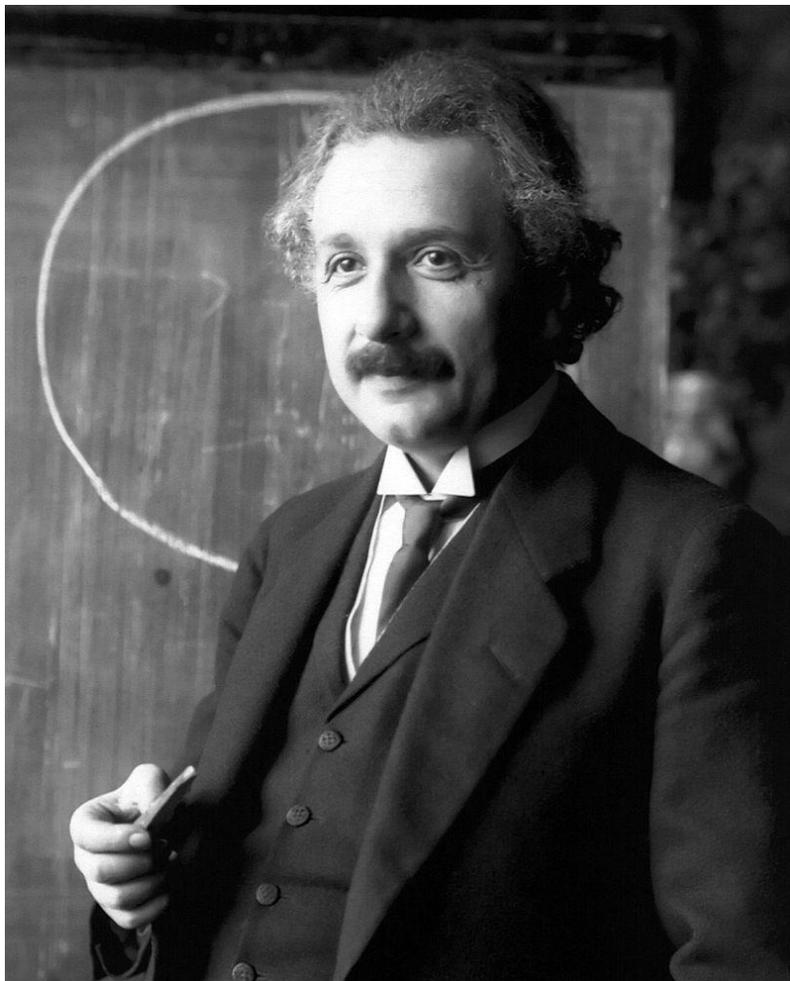
Почему наблюдаемые характеристики имеют именно данные величины?

На настоящий момент не существует логически непротиворечивой теории электрона.

Квантовая электродинамика.

Представляется весьма разумным познакомиться с попытками **описать свойства электрона в рамках классической физики**, что математически значительно проще, физически нагляднее и, в то же время, позволяет познакомиться с теми трудностями, которые возникают и в более строгих теориях.

# СООТНОШЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ



Альберт Эйнштейн.

[14 марта 1879](#) — [18 апреля 1955](#)

**Разработал несколько значительных физических теорий:**

[Специальная теория относительности \(1905\).](#)

В её рамках — закон взаимосвязи [массы](#) и [энергии](#).

[Общая теория относительности \(1907—1916\)](#)

[Квантовая теория фотоэффекта.](#)

[Квантовая теория теплоёмкости.](#)

Квантовая [статистика Бозе — Эйнштейна.](#)

Статистическая теория [броуновского движения](#),  
заложившая основы теории флуктуаций.

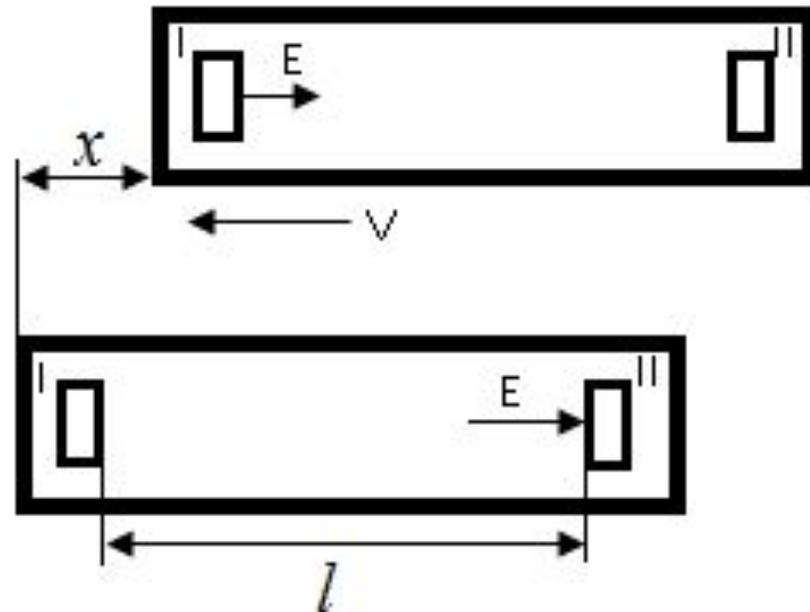
[Теория индуцированного излучения.](#)

Теория [рассеяния света](#) на термодинамических  
флуктуациях в среде.

**Решение Нобелевского комитета от 09.11.22:** Присудить  
Нобелевскую премию по физике 1921 г. За его заслуги в  
области математической физики и особо за открытие  
закона фотоэлектрического эффекта.

Прежде, чем говорить о массе электрона, приведем одно любопытное доказательство знаменитого соотношения Эйнштейна  $E = mc^2$ .

Представим себе закрытый ящик, на противоположных стенках которого укреплены два **совершенно одинаковых прибора**, устроенных так, что они могут испускать кратковременный световой сигнал в определенном направлении, или же полностью поглощать проходящий световой сигнал. Пусть теперь прибор I в некоторый момент времени испускает сигнал в направлении прибора II. Во время процесса излучения прибор I, а вместе с ним и весь ящик испытывает **отдачу**. Отдача обусловлена **световым давлением**, котор



П.Н.Лебедев Основал ФИАН  
 купец и  
 меценат  
 Леденцов.

Под влиянием отдачи все время пока свет идет от I к II, ящик будет перемещаться в противоположном направлении. Он придет в состояние покоя только когда свет достигнет прибора II, его давление полностью затормозит движение ящика.

Поменяем местами оба прибора.

Процесс можно продолжать до бесконечности и перемещать ящик на любое расстояние без видимых изменений как внутри, так и вне его, что **противоречит Первому закону Ньютона.**

Противоречие исчезает, если принять во внимание тезис Эйнштейна об **эквивалентности массы и энергии.**

Испуская световой сигнал на первом этапе предлагаемого мысленного эксперимента, прибор I отдает некоторое количество энергии  $E$ , вследствие чего его энергия и, соответственно, **масса становятся меньше.** Соответственно, энергия и масса прибора II, после поглощения светового сигнала становятся больше.

Теперь оказывается несправедлив тезис о равенстве масс приборов. Вследствие чего **поменять местами приборы можно только сдвинув весь ящик в обратном направлении** и, разумеется, в точности на то же

## ВЫВОД СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ

Импульс, передаваемый ЭМП с энергией  $E$ , поглощающей поверхности равен:

$$p = \frac{E}{c} \quad *$$

Это соотношение мы выведем позже.

Импульс отдачи, полученный установкой при излучении определится соотношением \*. Если полная масса ящика  $M$ , то для процесса испускания из закона сохранения импульса можно записать:

$$MV + P = 0 \Rightarrow V = \frac{E}{Mc}.$$

Время движения ящика равно времени распространения излучения от прибора 1 до прибора 2 равно

$$t = \frac{l}{c}.$$

За это время ящик переместится влево на расстояние (в лаб. системе отсчета)

$$x = Vt = \frac{E}{Mc} \cdot \frac{l}{c} = \frac{El}{Mc^2}.$$

Чтобы не вступать в противоречие с первым законом Ньютона, мы должны предположить, что перенос энергии от прибора I к прибору II сопровождается одновременным переносом массы в том же направлении.

При этом так как на нашу установку не действуют внешние силы, положение центра масс не должно измениться. Координаты центра масс определяются из соотношения

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$

$$\Delta \vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \Delta \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$

В нашем случае

$$\Delta \vec{r}_c = 0 \quad \longrightarrow \quad \sum_i m_i \Delta \vec{r}_i = 0$$

А так как масс всего лишь две

$$m_1 \Delta \vec{r}_1 + m_2 \Delta \vec{r}_2 = 0 \quad **$$

Обозначим массу всей установки (до излучения) за  $M$ , а массу, приписываемую электромагнитному излучению – за  $m$ . Масса установки во время распространения излучения от одного прибора к другому равна  $M - m$ .

В рассматриваемой сумме имеется всего два слагаемых. Индекс 1 припишем установке, 2 – излучению.

$$m_1 = M - m; \quad m_2 = m \quad \Delta r_1 = \Delta x = \frac{El}{Mc^2}; \quad \Delta r_2 = l - \Delta x .$$

Учтем  $m \ll M$  и  $\Delta x \ll l$ , тогда  $m_1 \approx M$ ; и  $\Delta r_2 \approx l$  и условие \*\* на предыдущем слайде для модулей векторов запишется как

$$m_1 \Delta r_1 + m_2 \Delta r_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad M \frac{El}{Mc^2} = ml$$

$$E = mc^2$$

Несколько слов об обозначениях. В физике элементарных частиц под массой частицы принято понимать *массу покоя* и обозначать ее через  $m$  (опуская нуль в индексе).

Однако, поскольку **наряду с массой покоя нам придется пользоваться и релятивистской массой**, тогда когда конкретизация частицы не имеет значения, мы будем применять для этих величин, соответственно, обозначения  $m_0$  и  $m$ .

Там же, где речь идет об электронах, протонах, нейтронах и других элементарных частицах, под  $m_e$ ,  $m_p$ ,  $m_n$  ... мы будем понимать их массы покоя.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МАССА

## ЭЛЕКТРОНА

Предположим, что электрон имеет некоторый конечный размер. Из курса электричества известно, что если в некотором пространстве имеется электрическое поле  $\vec{E}(\vec{r})$ , то величина энергии, запасенной в этом электрическом поле будет равна:

$$W = \int W(\vec{r}) dV,$$

где  $W(\vec{r})$  - плотность энергии

$$W(\vec{r}) = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} E^2(\vec{r}) \quad \text{или} \quad W(E) = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$$

Будем считать электрон шаром радиуса R с постоянной плотностью заряда

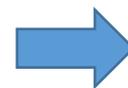
Не имея никаких данных о внутренней структуре электрона трудно спорить с такой моделью. Найдем зависимость электрического поля от расстояния до центра электрона. Согласно теореме Гаусса

$$\int_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

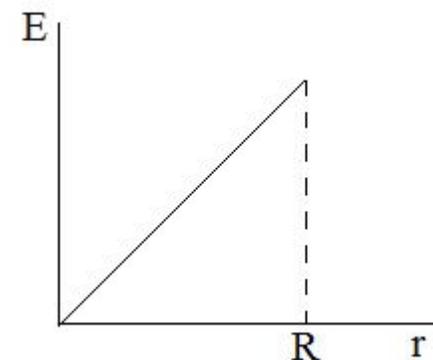
1)  $r < R$  , поле внутри электрона

$$4\pi r^2 E(r) = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{e}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$E_1 = \frac{e}{4\pi \varepsilon_0 R^3} r$$



$$E_1^2 = \frac{e^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 R^6} r^2$$



2)  $r > R$  , поле вне электрона

$$4\pi r^2 E(r) = \frac{e}{\varepsilon_0}$$

$$E_2(r) = \frac{e}{4\pi \varepsilon_0 r^2}$$

$$E_2^2(r) = \frac{e^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 r^4}$$

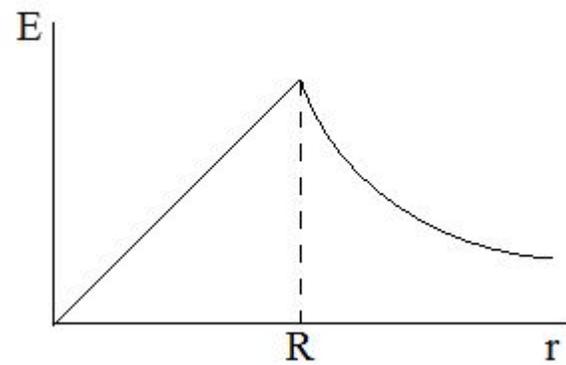
$$E_1(r) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 R^3} r;$$

$$E_2(r) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2};$$

$$E_1(R) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 R^2};$$

$$E_2(R) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 R^2};$$

$$E_2(R) = E_1(R);$$



Полная энергия электрического поля  
электрона

$$W = W_1 + W_2$$

$$W_1 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_0^R E_1^2 dV; \quad W_2 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_R^\infty E_2^2 dV;$$

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \frac{e^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 R^6} \cdot \int_0^R r^2 4\pi r^2 dr = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 R^6} \int_0^R r^4 dr = \\ &= \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 R^6} \cdot \frac{r^5}{5} \Big|_0^R = \frac{e^2}{40\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{R}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \frac{e^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 R^6} \cdot \int_R^\infty \frac{4\pi r^2 dr}{r^4} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0} \cdot \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} = \\
 &= \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0} \left(-\frac{1}{r}\right) \Big|_R^\infty = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 R};
 \end{aligned}$$

$$W = W_1 + W_2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 R} \left(\frac{1}{5} + 1\right) = \frac{6e^2}{40\pi\varepsilon_0 R} = \frac{3}{20\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{R};$$

$$W = \frac{3}{20\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{R};$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\mathcal{M}};$$

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} .$$

Коэффициент стоящий перед  $\frac{e^2}{R}$  зависит лишь от выбора конкретной модели распределения заряда внутри электрона и, соответственно, внутреннего поля электрона. Он не является определяющим и в дальнейшем нас интересовать не будет. Существенно лишь то, что энергия пропорциональна  $\frac{e^2}{R}$ .



Электрон в силу своей электрической природы должен обладать некоторой собственной энергией и, соответственно, массой, связанной с этой энергией.

**Эту массу называют электромагнитной массой:**

$$m_e = \frac{W}{c^2} \Rightarrow m_e = \frac{e^2}{\epsilon_0 R c^2} \quad ( )$$

$$m_e \propto \frac{e^2}{R c^2} \quad ( )$$

190215

# ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАССЫ

## ЭЛЕКТРОНА

Вообще говоря, никто не сказал, что вся масса электрона носит только электромагнитную природу, возможна еще некоторая добавочная, или **“внутренняя” масса  $m_i$** . Тогда полная масса электрона равна сумме:  $m = m_e + m_i$

В каком соотношении находятся эти две массы? Может быть вся масса электрона имеет электромагнитное происхождение? Оценим из этого предположения и предполагаемой нами структуры электрона его радиус.

$$mc^2 = \frac{e^2}{R} \quad R = \frac{e^2}{mc^2} = \frac{\left(4.8 \cdot 10^{-10}\right)^2}{9.1 \cdot 10^{-28} \cdot \left(3 \cdot 10^{10}\right)^2} = 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Существует большое количество экспериментальных фактов, показывающих, что размеры электрона чрезвычайно малы, и весьма утешительно, что из нашей модели получается столь **малое значение  $r$** .

В предполагаемой модели помимо электростатического поля электрона должны присутствовать некие **силы неэлектрического происхождения, которые удерживали бы электрон от развала**, они должны давать свой **отрицательный вклад в энергию и отрицательную массу**.

На пути построения модели, учитывающей, как те так и другие силы встретились столь **многочисленные трудности**, что привлекательная идея электромагнитной массы электрона была мало-помалу оставлена. После создания квантовой теории, физики вообще стали скептически относиться к конкретным моделям элементарных частиц. Они предпочитают рассматривать электрон и другие элементарные частицы как точечные массы, не интересуясь внутренней структурой.

При этом, однако, собственная электромагнитная энергия  $\frac{e^2}{R} \rightarrow \infty$ .

Конечное значение наблюдаемой величины  $m = m_e + m_i$  можно получить, если предположить

Трудно понять, какой в этом смысл. Описанная нами вкратце ситуация с массой электрона, надеюсь, позволила вам представить те трудности, с которыми сталкивается современная квантовая теория.