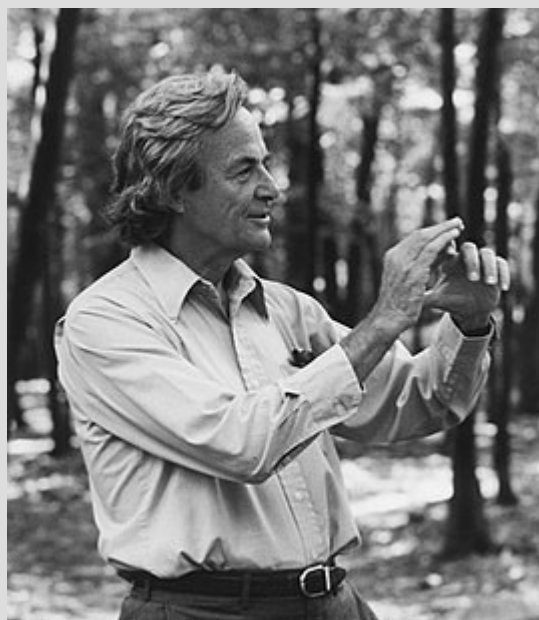




NATIONAL RESEARCH  
UNIVERSITY

# Майнор “Мир глазами физиков” 2018-2020



Ричард Фейнман  
(с сайта wikipedia.org)

Люди скажут: «Вы ищете основные законы физики?» Нет же, я просто смотрю, смогу ли узнать больше о нашем мире, и если выяснится, что существует простой основной закон, который объясняет всё, это было бы очень здорово — настоящее открытие.

“Радость познания”  
Фейнман Ричард  
[http://litresp.ru/chitat/ru/Ф/  
fejnman-richard/radostj-poznaniya](http://litresp.ru/chitat/ru/Ф/fejnman-richard/radostj-poznaniya)

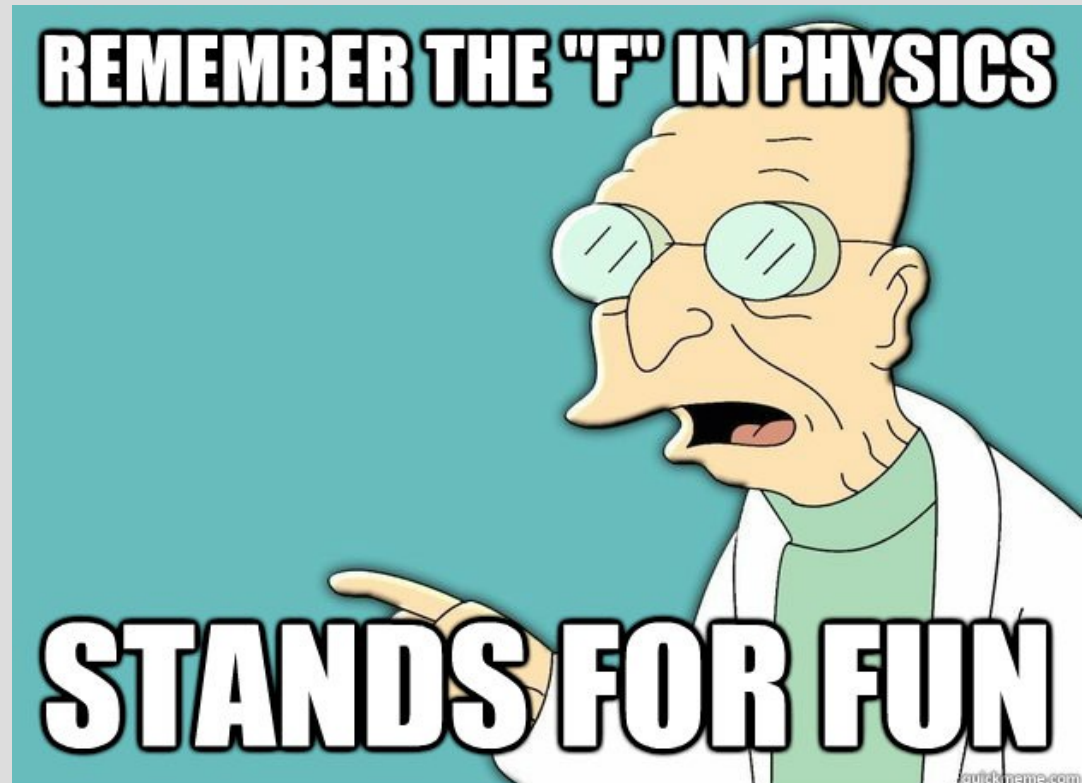


NATIONAL RESEARCH  
UNIVERSITY

Майнор

“Мир глазами физиков”

2017-2019



# Квантовая физика

## Оргвопросы:

лектор: Глазков Василий Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ИФП  
РАН, проф. НИУ ВШЭ, доц. МФТИ

## кураторы майнора:

В.Н.Глазков, [vglazkov@hse.ru](mailto:vglazkov@hse.ru), И.Ю.Королькова

## семинаристы:

Красникова Юлия Владимировна, асп. ВШЭ

Лемзяков Сергей Анатольевич, асп. МФТИ

Переход между группами – в рабочем порядке, но не позднее  
6.02

# Квантовая физика

Оргвопросы: Литература, учебники...

обязательной к прочтению литературы нет

он-лайн

*Введение в квантовую физику,*

<http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/quantum.pdf>,

*Атомная и ядерная физика,*

<http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/atomic.pdf>

*Майнор сезона 2017-2019*

<http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/hse-minor.html>

научно-популярная

Л.И.Пономарёв, “Под знаком кванта”

сдавшим теорминимум по квантовой механике –  
отлично (10) без экзамена

# Квантовая физика

Оргвопросы: Оценка, контроль

Домашние задания для самостоятельного решения – без оценки

Календарь:

23.01; 30.01; 6.02; 13.02; 20.02; 27.02; **6.03 (тест)**

13.03; 20.03; 3.04; 10.04; 17.04; 24.04; 15.05; **22.05 (экзамен)**

$$\mathbf{ИО = 0.36ТЕСТ + 0.24СЕМ + 0.4ЭКЗ}$$

накопительная часть

Конец оргвопросов.

Вопросы?

# Как строятся научные теории (немного истории и философии...)

Теория электричества  
*формализация огромного количества  
накопленных данных в компактной  
форме уравнений Максвелла*

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Квантовая физика

- *накопление данных, не описываемых имеющимися теориями;*
- *возникновение гипотез (гипотеза Планка, атом Бора);*
- *формализация гипотез в последовательную теорию;*
- *определение условий (ограничений), при которых классическая физика описывает природу*

# Как строятся научные теории (немного истории и философии...)

Теория электричества  
*формализация огромного количества  
накопленных данных в компактной  
форме уравнений Максвелла*

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -$$

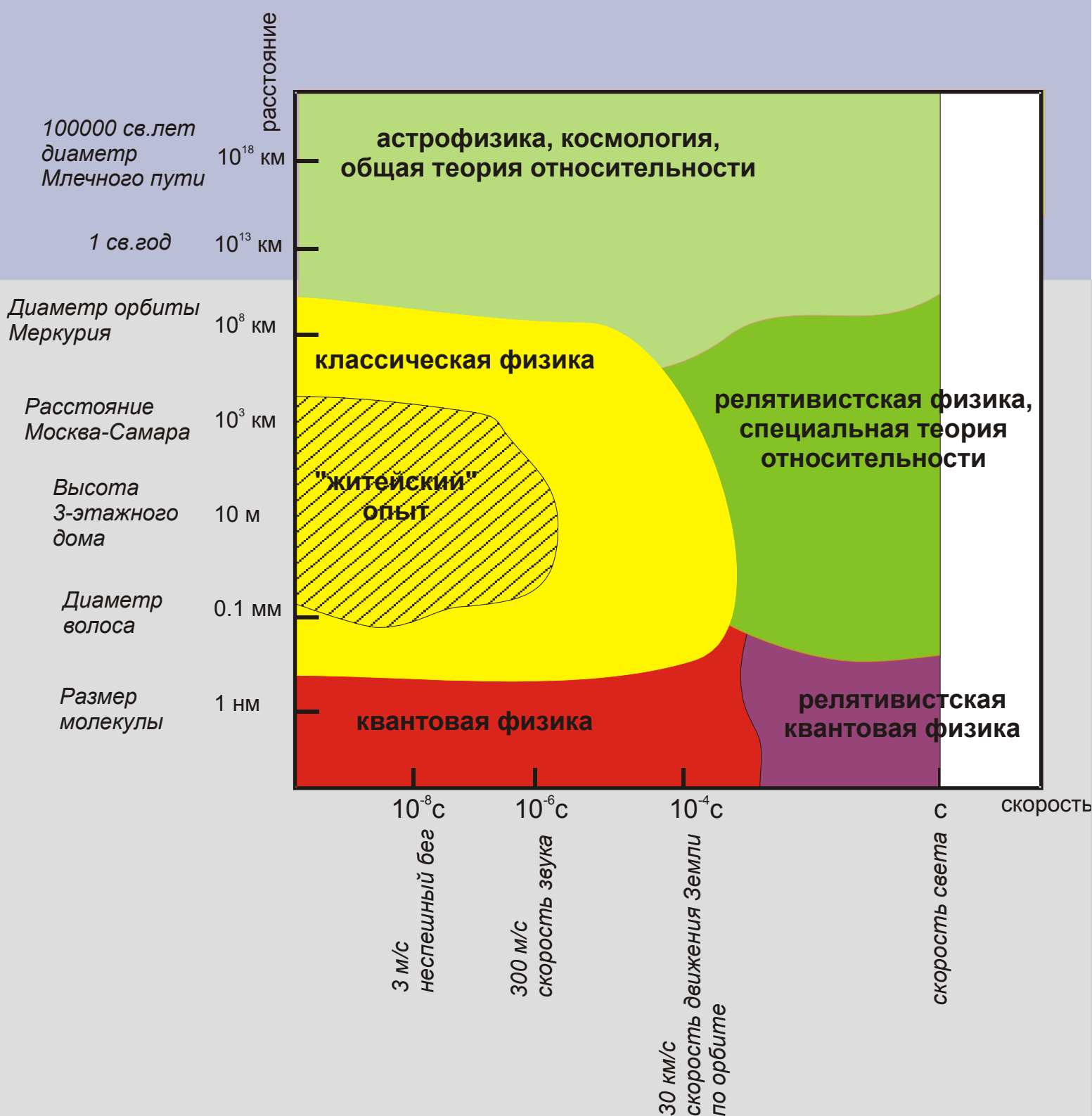
Квантовая физика

- *накопление данных, не описываемых имеющимися теориями;*
- *возникновение гипотез (гипотеза Планка, атом Бора);*
- *формализация гипотез в последовательную теорию;*
- *определение условий (ограничений), при которых классическая физика описывает природу*

Новая научная теория опирается на  
достоверные экспериментальные факты  
и не опровергает предыдущие теории, но  
ограничивает их область применения



# О "здоровом смысле"



# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)



**Nobelprize.org**

The Official Web Site of the Nobel Prize

# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)

1904 — Уильям Рамзай (химия). В том числе, за получение и идентификацию гелия.

1906 — Джозеф Джон Томсон. В признание выдающегося вклада его теоретических и экспериментальных исследований электропроводности газов. Одно из этих исследований привело к открытию электрона и, таким образом, открыло вопрос об установлении внутренней структуры атома.

1911 – Вильгельм Вин. За открытие законов, описывающих тепловое излучение.

# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)

1918 — Макс Карл Эрнст Людвиг Планк. За открытие кванта энергии ("in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta").

1919 — Иохан Штарк. В том числе, за открытие расщепления спектральных линий в электрическом поле (эффект Штарка).

1920 – Вальтер Герман Нернст (по химии). В признание его работ в области термохимии. В частности, за открытие теоремы Нернста или третьего начала термодинамики, описывающего поведение материи вблизи абсолютного нуля и объяснимого только в рамках квантовой теории.

# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)

1921 — Альберт Эйнштейн. За достижения в области теоретической физики и, в особенности, за открытие закона фотоэффекта.

1922 — Нильс Хенрик Давид Бор. За достижения в изучении структуры атомов и испускаемого ими излучения.

1923 — Роберт Эндрю Милликен. За определение элементарного заряда и работы в области фотоэффекта. При представлении лауреата председатель Нобелевского комитета сказал: *«Если бы опыты Милликена дали другой результат, закон фотоэффекта Эйнштейна оказался бы пустым, а теория Бора не получила бы такой опоры. После появления результатов Милликена оба они были удостоены Нобелевской премии.»*

# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)

1924 — Карл Манне Георг Зигбан. За открытия и исследования в области рентгеновской спектроскопии.

1925 — Джеймс Франк и Густав Людвиг Герц (в равных долях). За открытие законов, определяющих столкновения электронов и атомов.

1927 — Артур Холли Комптон (1/2 премии). За открытие эффекта Комптона.

1929 — Луи де Бройль (герцог Луи-Виктор Пьер Раймонд де Бройль). За открытие волновой природы электрона.

1932 — Вернер Карл Гейзенберг. За создание квантовой механики, применение которой привело, в числе прочего, к открытию аллотропных форм водорода.

1933 — Эрвин Шредингер и Поль Адриен Морис Дирак (в равных долях). За открытие новых продуктивных представлений атомной теории.

# Место квантовой физики в физике (ещё немного истории)

1962 — Лев Давидович Ландау, за разработку передовых теорий в области физики конденсированных сред и, в особенности, жидкого гелия.

1964 — Чарльз Хард Таунс (1/2 премии), Николай Геннадьевич Басов (1/4 премии) и Александр Михайлович Прохоров (1/4 премии). За фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей работающих на принципе мазера-лазера.

1978 — Пётр Леонидович Капица (1/2 премии), за изобретения и открытия в области физики низких температур, Арно Аллан Пенциас и Роберт Вудро Вилсон (по 1/4 премии), за открытие реликтового космического излучения.

2003 — Алексей А. Абрикосов, Виталий Лазаревич Гинзбург, Энтони Дж. Леггет (в равных долях). За пионерский вклад в теорию сверхтекучести и сверхпроводимости.



# Квантовые явления в "обычной" ЖИЗНИ

- лазеры (указки, лазерные проигрыватели, медицинские и промышленные применения)
- ЯМР-томография
- полупроводниковые приборы (туннельные диоды, CCD)



<http://www.beamq.com>



[offsite.com.cy](http://offsite.com.cy)



К истокам...

# Причины возникновения квантовой физики на рубеже XIX-XX веков

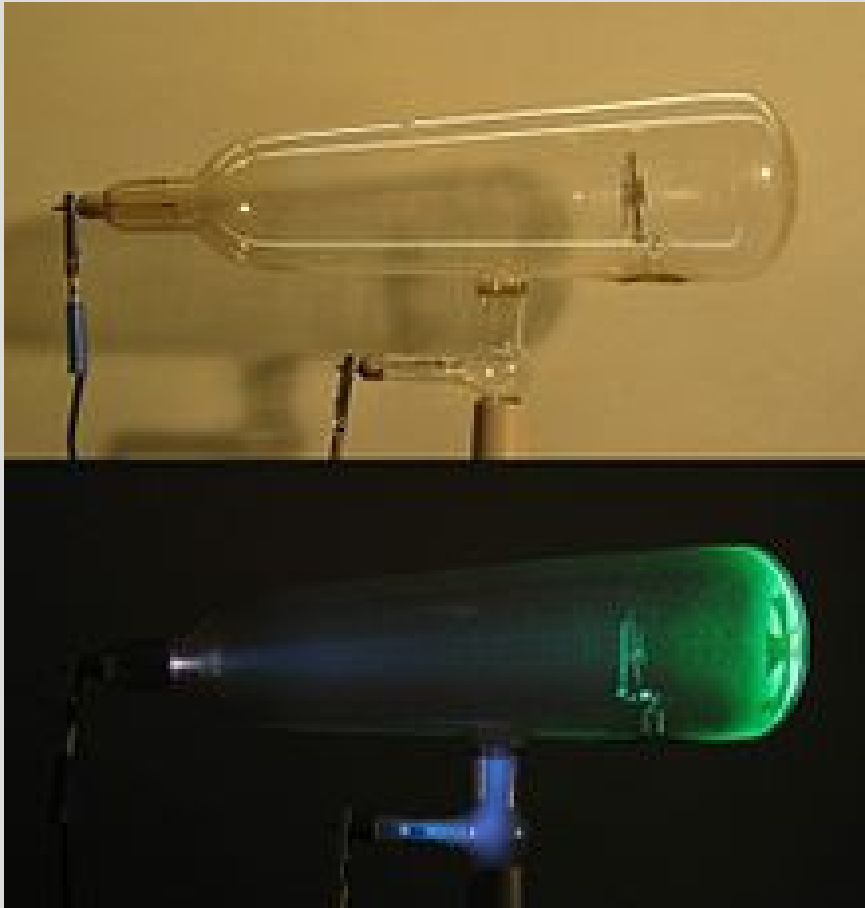
*«В этой области знаний все уже открыто, осталось только уточнить кое-какие детали»*  
проф. фон Жолли студенту Макс Планку,  
Мюнхенский университет, ~1875

1. Строение атома.
2. Линейчатые спектры испускания и поглощения.
3. Фотоэффект.
4. Излучение чёрного тела.
5. Теплоёмкость твёрдых тел и газов при низкой температуре.

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).

1897 Дж.Дж.Томсон опубликовал работу об обнаружении субатомной заряженной частицы – электрона.



- 1) Катодные “лучи” вызывают свечение экрана в откачаной трубке
- 2) Отклоняются электрическим и магнитным полем – несут заряд
- 3)  $(q/M)$  в 1700 раз больше, чем для атома водорода
- 4) испускаются многими веществами – присутствуют везде

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).

1897 Дж.Дж.Томсон опубликовал работу об обнаружении субатомной заряженной частицы – электрона. Но атом в целом нейтрален!

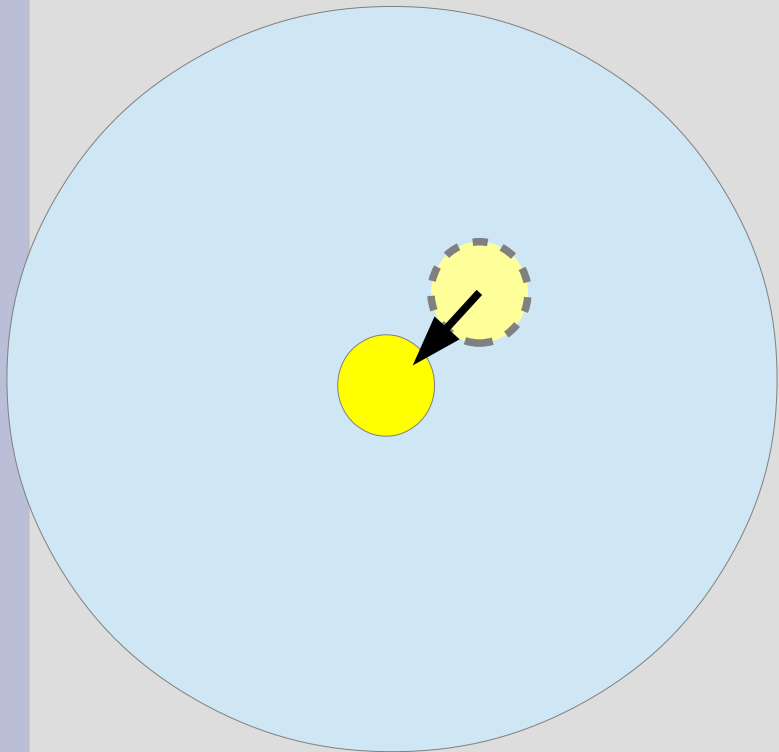


Электростатика не позволяет системе точечных зарядов находится в равновесии: модель “пуддинга с изюмом”.

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).

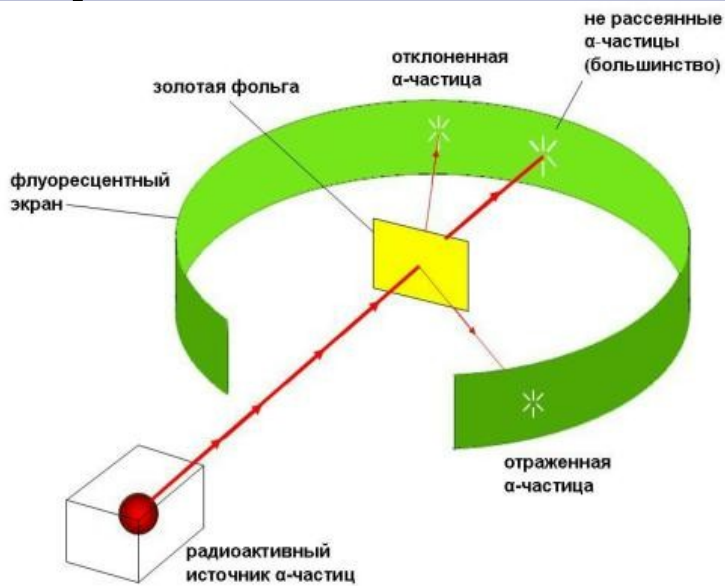
1897 Дж.Дж.Томсон опубликовал работу об обнаружении субатомной заряженной частицы – электрона. Но атом в целом нейтрален!



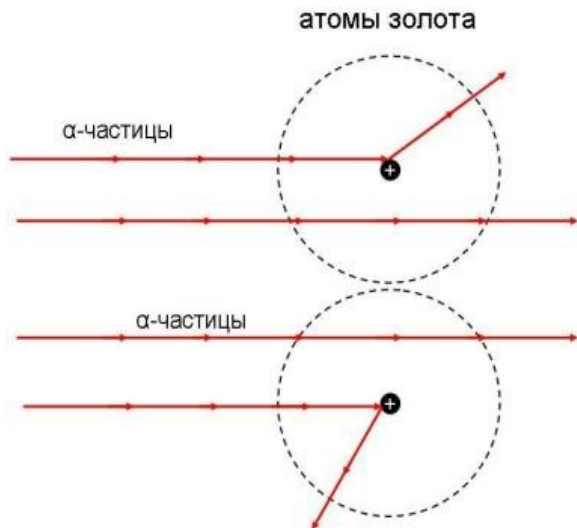
Электростатика не позволяет системе точечных зарядов находится в равновесии: модель “пуддинга с изюмом”.

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).

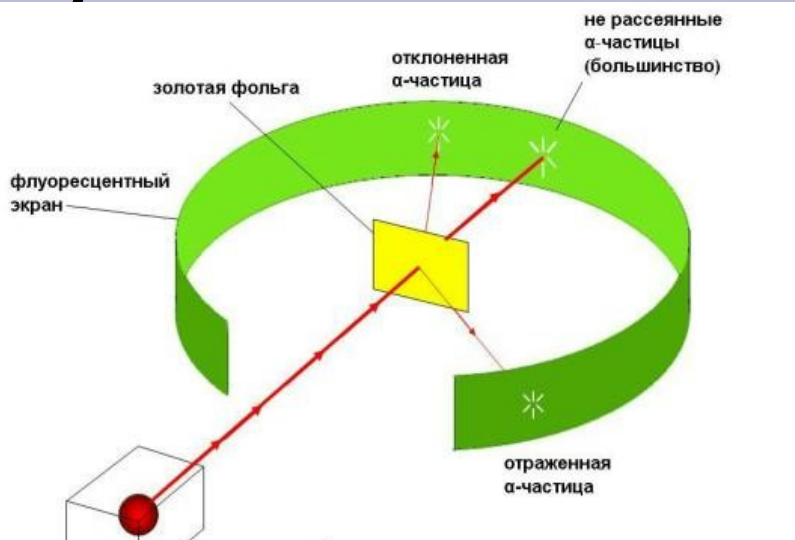


1911 Опыты Резерфорда показали, что положительный заряд локализован в массивном точечном ядре, а большая часть атома "пуста".

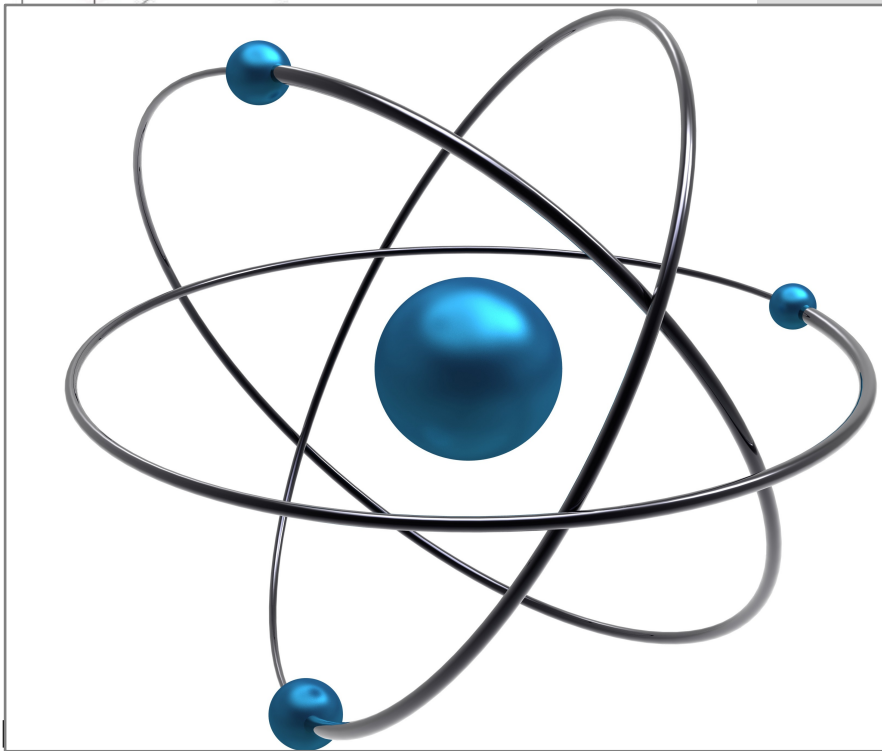


# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).

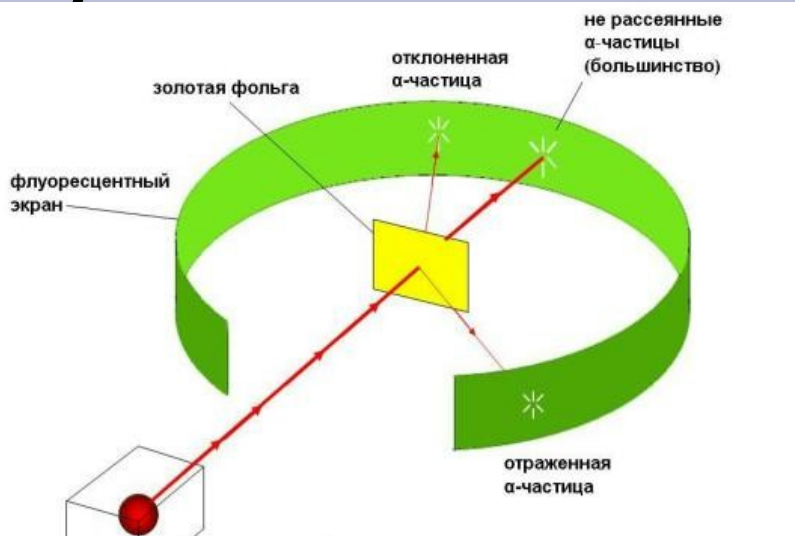


1911 опыты Резерфорда показали, что положительный заряд локализован в массивном точечном ядре, а большая часть атома "пуста".

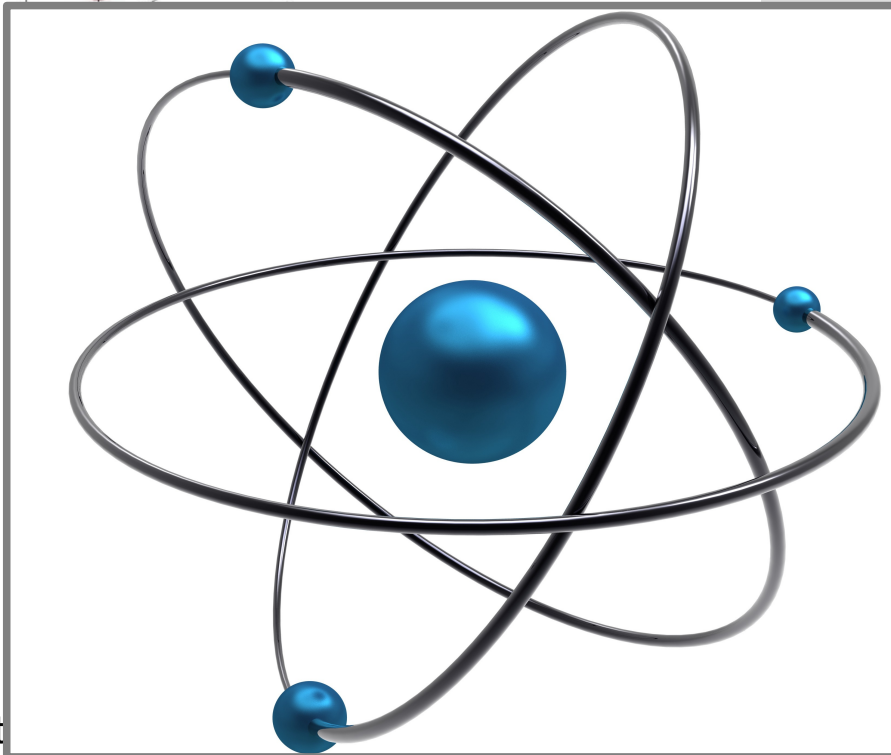


# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).



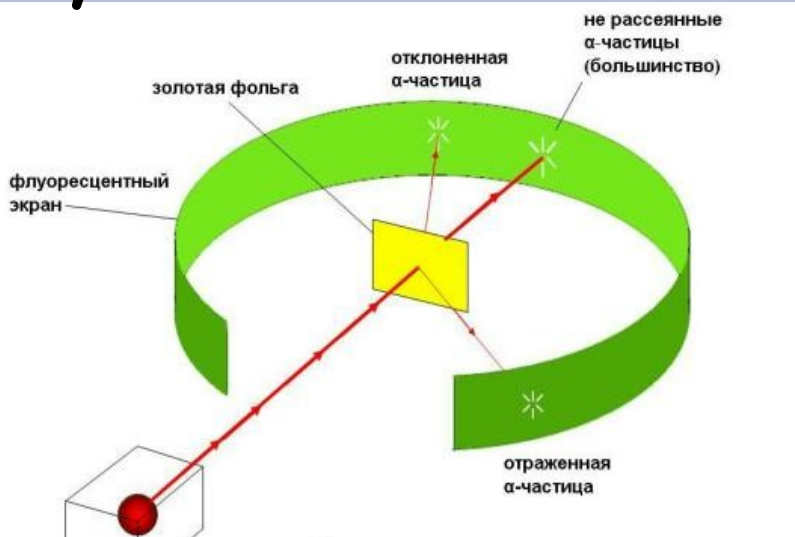
1911 опыты Резерфорда показали, что положительный заряд локализован в массивном точечном ядре, а большая часть атома “пуста”.



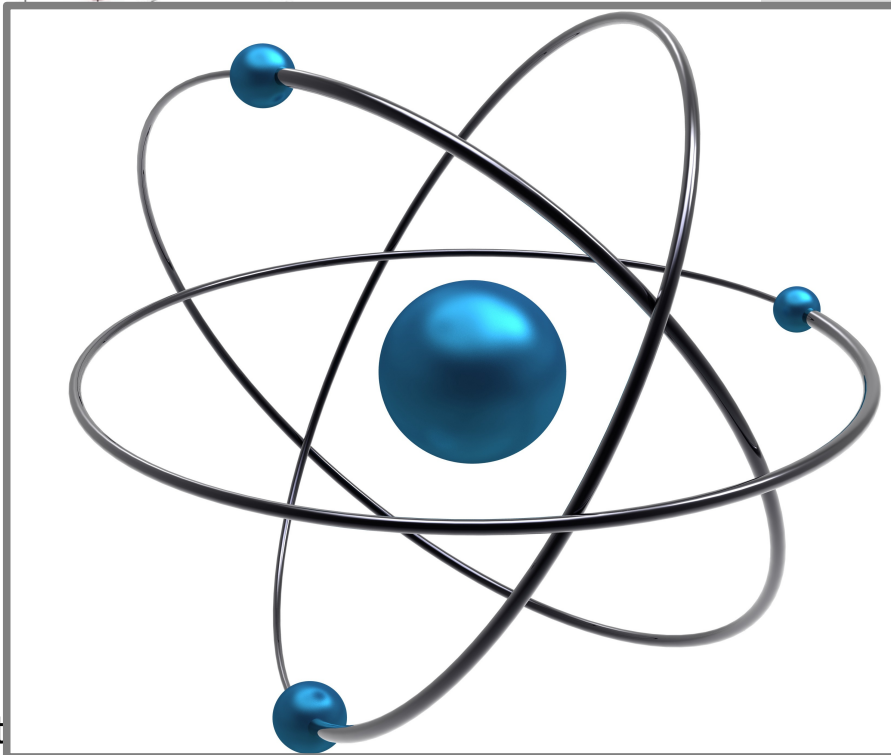
$$W \propto (\ddot{d})^2 = (e \ddot{r})^2$$
$$r \sim 10^{-10} \text{ м}, E \sim 10 \text{ эВ} \sim 10^{-18} \text{ Дж}$$
$$U = k \frac{e^2}{r} \rightarrow [k e^2 \ddot{r}^2] = \frac{\text{Дж} \times \text{м}^3}{\text{с}^4}$$

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).



1911 опыты Резерфорда показали, что положительный заряд локализован в массивном точечном ядре, а большая часть атома “пуста”.



$$W \propto (\ddot{d})^2 = (e \ddot{r})^2$$
$$r \sim 10^{-10} \text{ м}, E \sim 10 \text{ эВ} \sim 10^{-18} \text{ Дж}$$

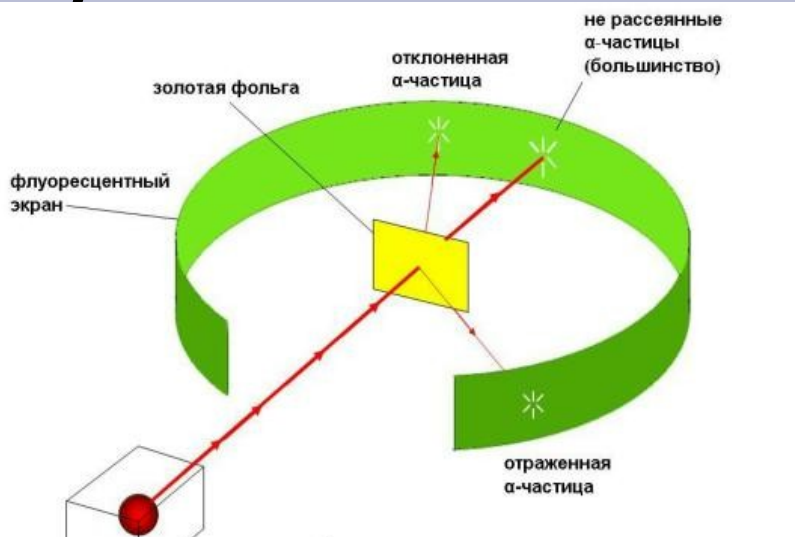
$$U = k \frac{e^2}{r} \rightarrow [k e^2 \ddot{r}^2] = \frac{\text{Дж} \times \text{м}^3}{\text{с}^4}$$

$$W \simeq \frac{k e^2 \omega^4 r^2}{c^3}$$



# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).



1911 опыты Резерфорда показали, что положительный заряд локализован в массивном точечном ядре, а

$$t \sim \frac{E}{W} \sim \frac{k e^2 / r}{W} = \frac{c^3}{\omega^4 r^3}$$

$$E \sim m V^2 = m \omega^2 r^2$$

$$t \sim \frac{m^2 r c^3}{E^2} = \frac{r}{c} \left( \frac{m c^2}{E} \right)^2 \sim 10^{-8} \text{ сек}$$

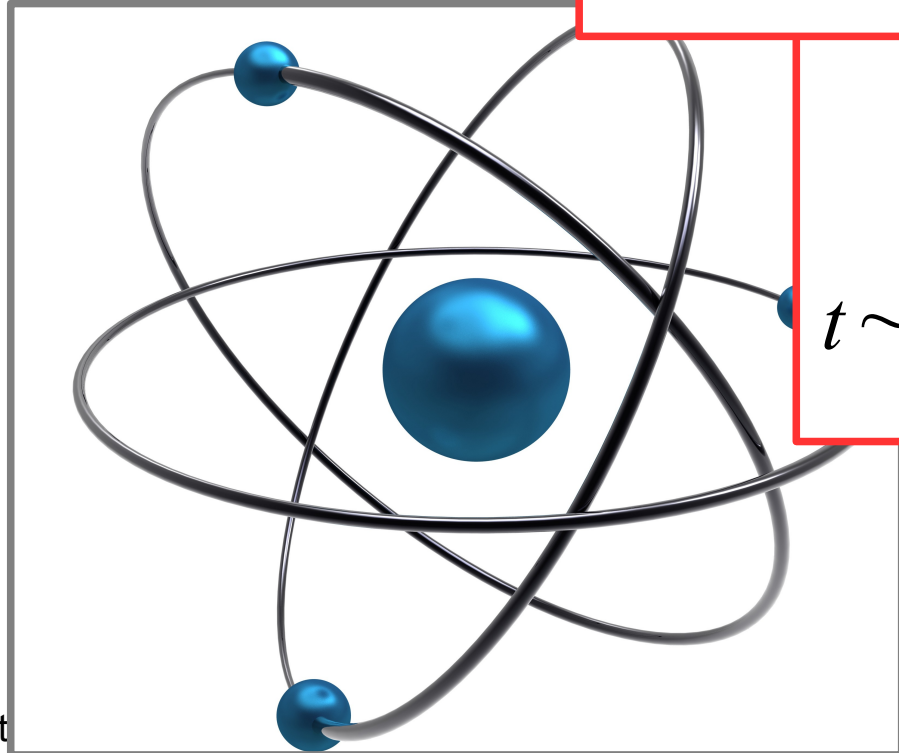
$$W \simeq \frac{k e^2 \omega^4 r^2}{c^3}$$

# Проблема 1.

## Существование материи (атомов).



Атом Резерфорда не может существовать согласно классической физике!



$$E \sim m V^2 = m \omega^2 r^2$$
$$t \sim \frac{m^2 r c^3}{E^2} = \frac{r}{c} \left( \frac{m c^2}{E} \right)^2 \sim 10^{-8} \text{ сек}$$

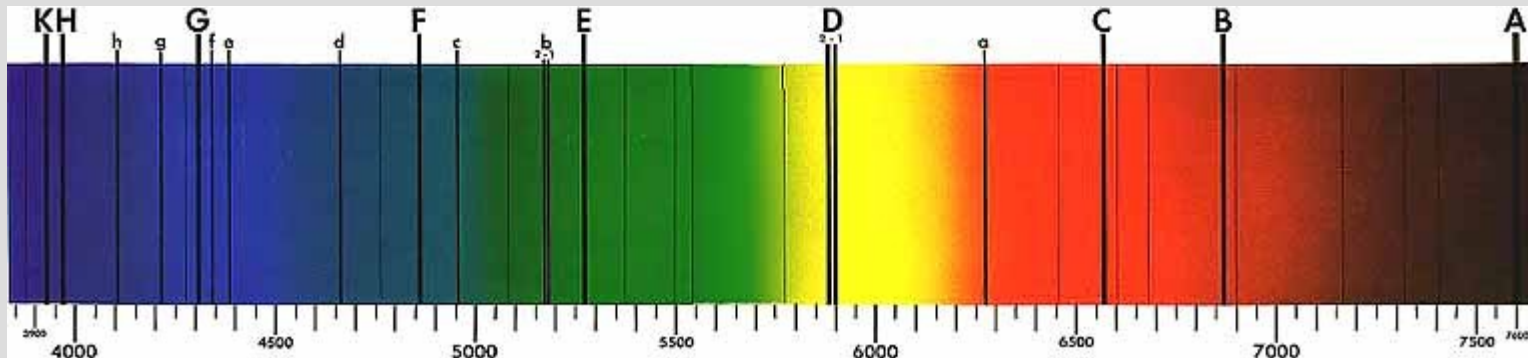
$$W \simeq \frac{k e^2 \omega^4 r^2}{c^3}$$

# Проблема 2.

## Линейчатые спектры поглощения и испускания.

1704 – Ньютон, разложение белого света

1814 – Фраунгофер, более 500 тёмных линий в спектре Солнца



(wikipedia.org)

1854-1859 – Кирхгоф и Бунзен, яркие линии в спектре пламени, окрашенного растворами солей, соответствующие тёмным линиям Фраунговера

Установление однозначного соответствия между линиями испускания/поглощения и химическими элементами привело к становлению спектроскопического анализа

# Проблема 2.

## Линейчатые спектры поглощения и испускания.

1868 Пьер Жансен и Норман Локьер, обнаружение в спектре Солнца линии нового элемента: гелия.

1885 Бальмер, идентификация серии Бальмера для водорода

1895 Рамзай, лабораторное получение и спектроскопическая идентификация гелия.

1906-1914 Лиман, ультрафиолетовая серия Лимана для водорода



линии Бальмера  
водорода  
(с сайта wikipedia.org)



спектр гелия  
(с сайта wikipedia.org)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

**Классическая теория не объясняет дискретных спектров**

# Проблема 3.

## Фотоэффект.

1839 – Беккерель, увеличение тока в электролите при облучении катода светом

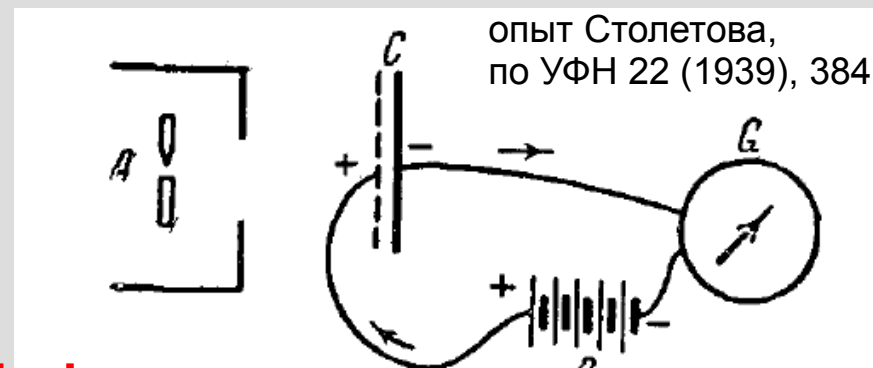
1873 – англ.инженер В.Смит, увеличение проводимости селена под действием сильного освещения

1887 – Герц, изменение скорости разряда при облучении разрядника ультрафиолетом

1888-1890 – Столетов, “классическая” постановка опыта по фотоэффекту. Обнаружения закона Столетова *“фототок прямо пропорционален интенсивности падающего на фотокатод света (облучение анода не вызывает появления фототока).”*

1902 – фон Ленард, установлена связь запирающего напряжения с длиной волны

1905-1916 – Милликен, точные опыты по фотоэффекту.

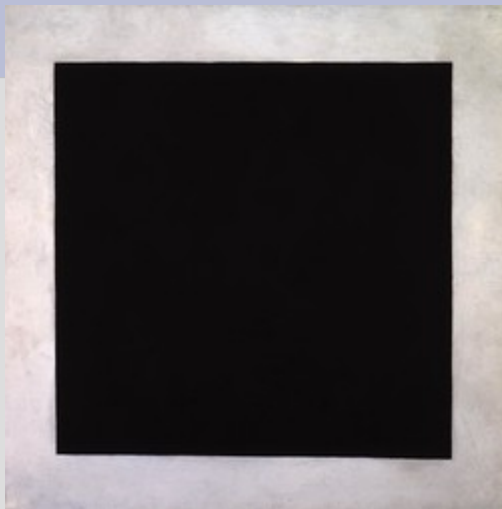


**Красная граница фотоэффекта, независимость макс. энергии от интенсивности не объясняются классической теорией.**



# Проблема 4.

## Излучение чёрного тела.



### “Чёрный квадрат”

Малевич, Лепорская,  
Рождественский, Суетин,  
ок.1923, в собрании  
Государственного Русского  
Музея (с сайта wikipedia.org)

$T \sim 1000\text{K}$



Раскаленные древесные угли  
© Крупнов Денис / Фотобанк Лори



lori.ru/28778

Раскалённый уголь.  
(фото с сайта lori.ru)



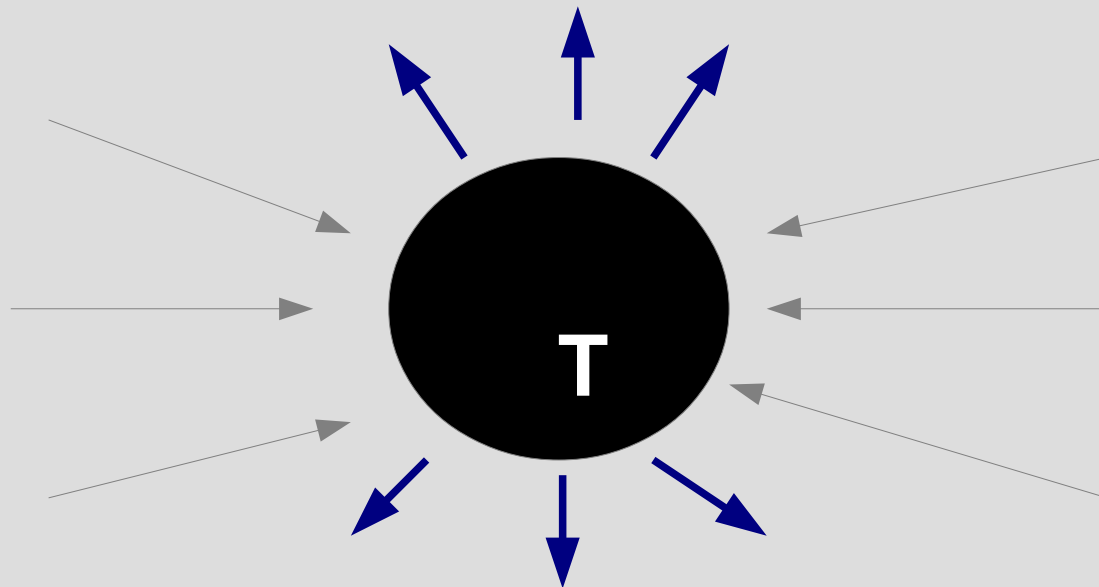
Раскалённая  
металлическая заготовка  
на наковальне  
(с сайта <http://freezersocks-wind.blogspot.com/2011/01/bladesmithing-week-1.html>)

# Проблема 4.

## Излучение чёрного тела.

Абсолютно чёрное тело: тело которое поглощает всякое падающее на него излучение.

Такое тело одновременно должно излучать энергию, иначе по закону сохранения энергии, оно должно всё время раскаляться.



*Каков спектр равновесного теплового излучения такого тела?*

# Проблема 4.


## Излучение чёрного тела.

1862 – Кирхгоф, постановка задачи

1879 – Стефан, эмпирически

1880 – Гретц, экспериментально

1884 – Больцман, опираясь на уравнения Максвелла


$$\frac{P}{S} = \sigma T^4$$

1893 – Вин, законы Вина

$$\frac{dP}{d\nu} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

$$\nu_{max} = AT$$

1900 – Рэлей

1905 – Джинкс, на основе классической электродинамики  
выведен закон Рэля-Джинкса

$$\frac{dP}{d\nu} = \frac{2\nu^2 kT}{c^2}$$

При больших частотах спектральная плотность излучения возрастает, полная мощность излучения оказывается бесконечной! Ультрафиолетовая катастрофа!

**Классическая теория не может решить задачу об излучении чёрного тела.**



# Проблема 5.

## Теорема о равнораспределении.

1819 – Дюлонг и Пти, закон Дюлонга и Пти: “теплоёмкость почти всех простых твёрдых тел при комнатной температуре близка к  $25 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$ ”

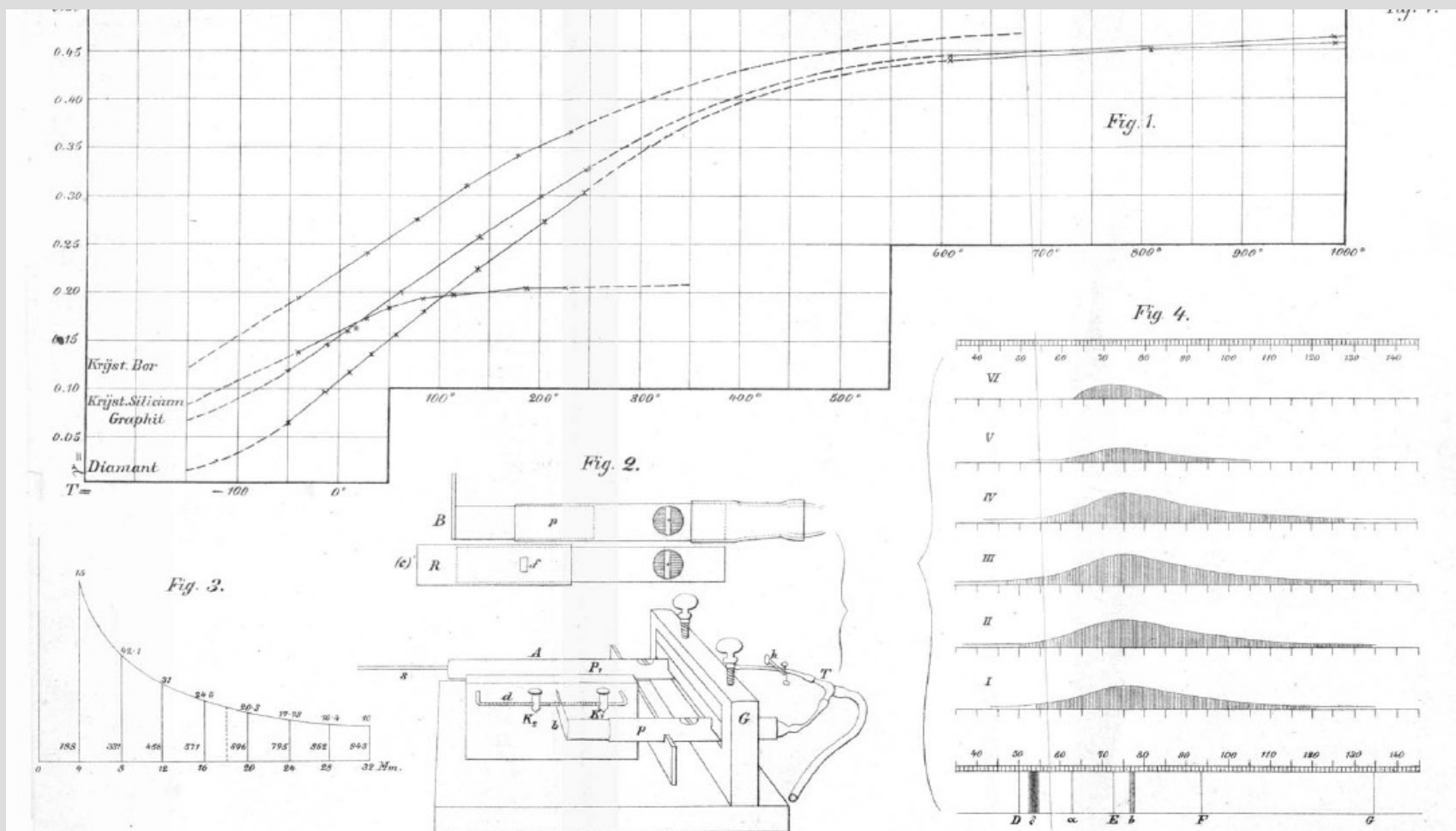
Вещество	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Молярная масса, кг/моль	Молярная теплоёмкость, Дж/(моль·К)
Железо	444	$55.8 \cdot 10^{-3}$	24.8
Свинец	130	$207.2 \cdot 10^{-3}$	26.9
Литий	3582	$6.94 \cdot 10^{-3}$	24.9
Вольфрам	134	$184 \cdot 10^{-3}$	24.7
Золото	129	$197 \cdot 10^{-3}$	25.4
Медь	385	$63.5 \cdot 10^{-3}$	24.4

1876 – Больцман, теорема о равнораспределении: 3 колебательные степени свободы дают вклад  $3R$ , теплоёмкости газов ( $C_V$ ):  $3R/2$ ,  $5R/2$ ,  $3R$  для одно-, двух- и трёхатомного газа.

# Проблема 5.

## Теорема о равномерном распределении.

1872 – Вебер, обнаружил зависимость теплоёмкости твёрдого тела от температуры



Alb. Schützgen Lith. Bussé, Berlin.

Ann. d. Phys. u. Chem. Bd. CLIV. St. 4.

рисунок из статьи D.F.Weber "Die specifischen Wärmen der Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium", Annalen der Physik 154, 553 (1875)

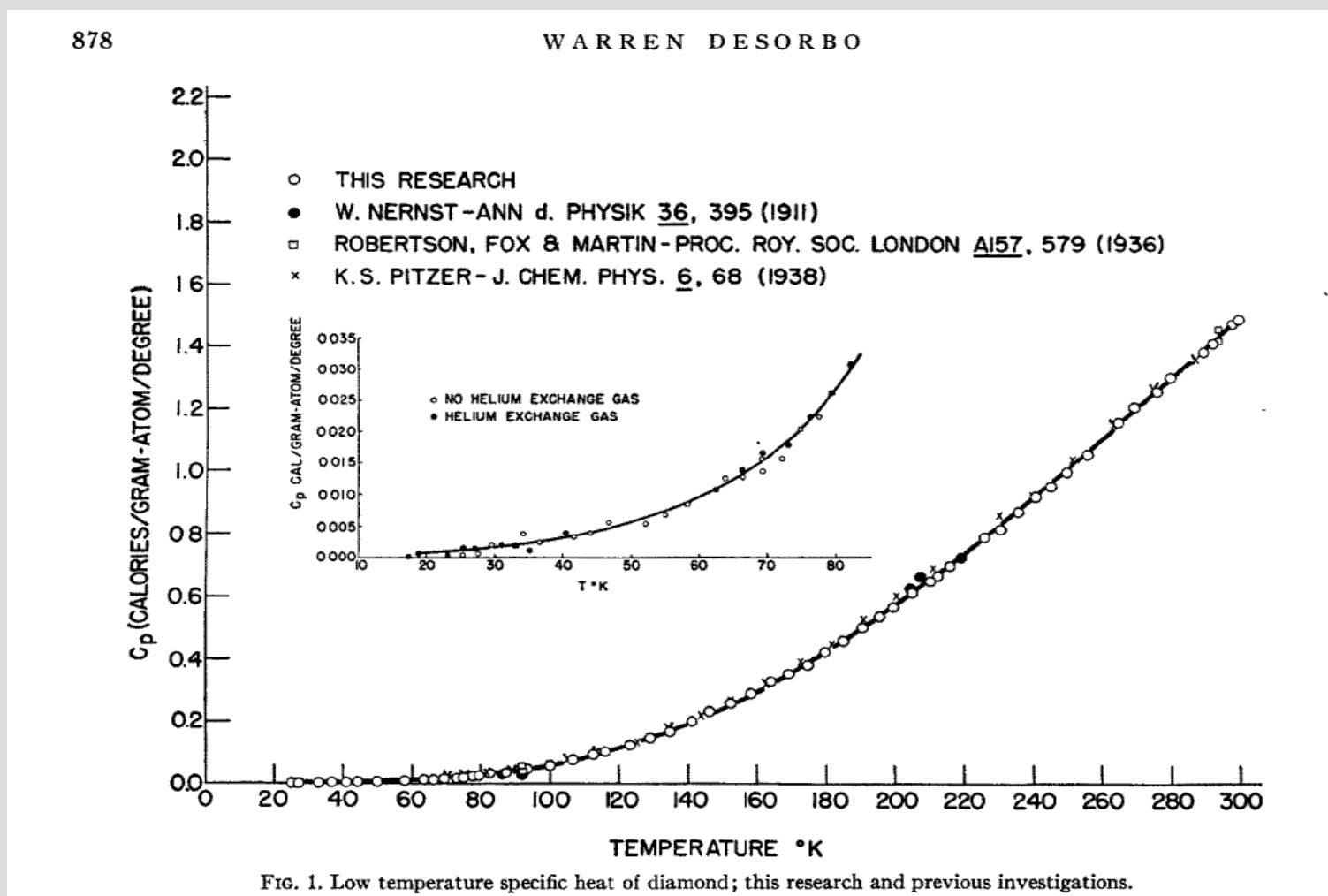
# Проблема 5.

## Теорема о равнораспределении.

Исследования теплоёмкости при низких температурах:

1905 – Дьюар

1911 - Нернст



по статье W.DeSorbo "Specific Heat of Diamond at Low Temperatures", J. Chem. Phys. 21, 876 (1953)

# Проблема 5.

## Теорема о равномерном распределении.

Теплоёмкости газов тоже отклоняются от предсказания теоремы о равномерном распределении при низких температурах

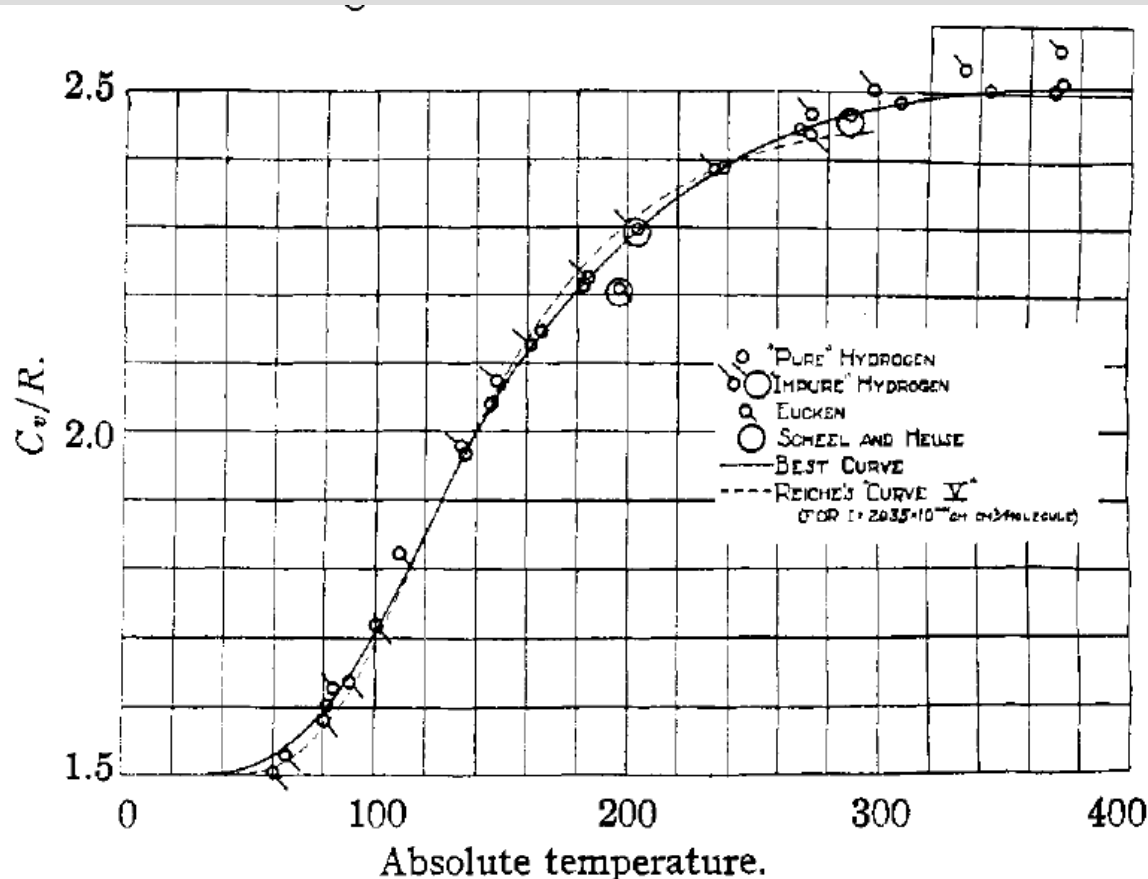


Fig. 3.—Specific heat of hydrogen.

# Проблема 5.

## Теорема о равномерном распределении.

... и при высоких температурах

CO (ожидается  $5/2R$ ),

G. G. Sherratt and Ezer Griffiths, "Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences", 147, 292 (1934)

Temperature ° C	$\beta \times 10^5$ second	Experi- mental	$C_v/R$		
			Planck Einstein	Gordon and Barnes	Kassel
1000	1.0	3.147	3.127	3.150	3.135
1200	1.2	3.257	3.204	3.231	3.215
1400	1.15	3.261	3.260	3.291	3.273
1600	1.1	3.305	3.302	3.338	3.320
1800	1.0	3.368	3.334	3.376	3.354

CO<sub>2</sub> (ожидается  $3R=5.9$  кал/(К\*моль)),

G. G. Sherratt and Ezer Griffiths "Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences". Vol. 156. 504 (1936)

Temperature ° C.	$C_v$ cal./gm. mol. at 1 atmosphere pressure		
	Present investigation	I.C.T.	Spectroscopic
0	6.62	6.63	6.67
200	8.65	7.60	8.49
400	10.06	8.48	9.80
600	10.81	9.15	10.64
800	11.30	9.72	11.21
1000	11.76	10.17	11.61

# Проблема 5.

## Теорема о равнораспределении.

... и при высоких температурах

CO (ожидается  $5/2R$ ),

G. G. Sherratt and Ezer Griffiths, "Proceedings of the Royal Society, Physical Sciences" 147, 292 (1934)

Temperature ° C	$\beta \times 10^5$ second	Experi- mental
1000	1.0	3.147
1200	1.2	3.257
1400	1.15	3.261
1600	1.1	3.305
1800	1.0	3.368



CO<sub>2</sub>  
G. G. S  
Physica

Классическая термодинамика не может объяснить, почему какие-то степени свободы “включаются” и “выключаются”.

600	10.81	9.15	10.64
800	11.30	9.72	11.21
1000	11.76	10.17	11.61

# Гипотеза Планка - первый шаг к решению этих проблем

1900, Макс Планк:

*излучение излучается и поглощается не произвольными количествами, а дискретными порциями, размер одной такой порции (кванта излучения) пропорционален частоте излучения*

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

$$h = 6.62606896(33) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054571628(53) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Эта гипотеза оказала такое влияние на развитие физики, что в 1918 году Планку была присуждена Нобелевская премия по физике «*in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta*»

# Фотоэффект

История:

**1887 год:** Г.Герц обнаружил влияние ультрафиолетового излучения на разряд индуктора

**1888-1891 год:** опыты Столетова (постановка классической схемы опыта по фотоэффекту, связь фототока с освещённостью катода)

**1902 год:** опыты фон Ленарда (зависимость запирающего напряжения от длины волны)

**1905 год:** теория фотоэффекта А.Эйнштейна

**1905-1916 годы:** опыты Милликена.

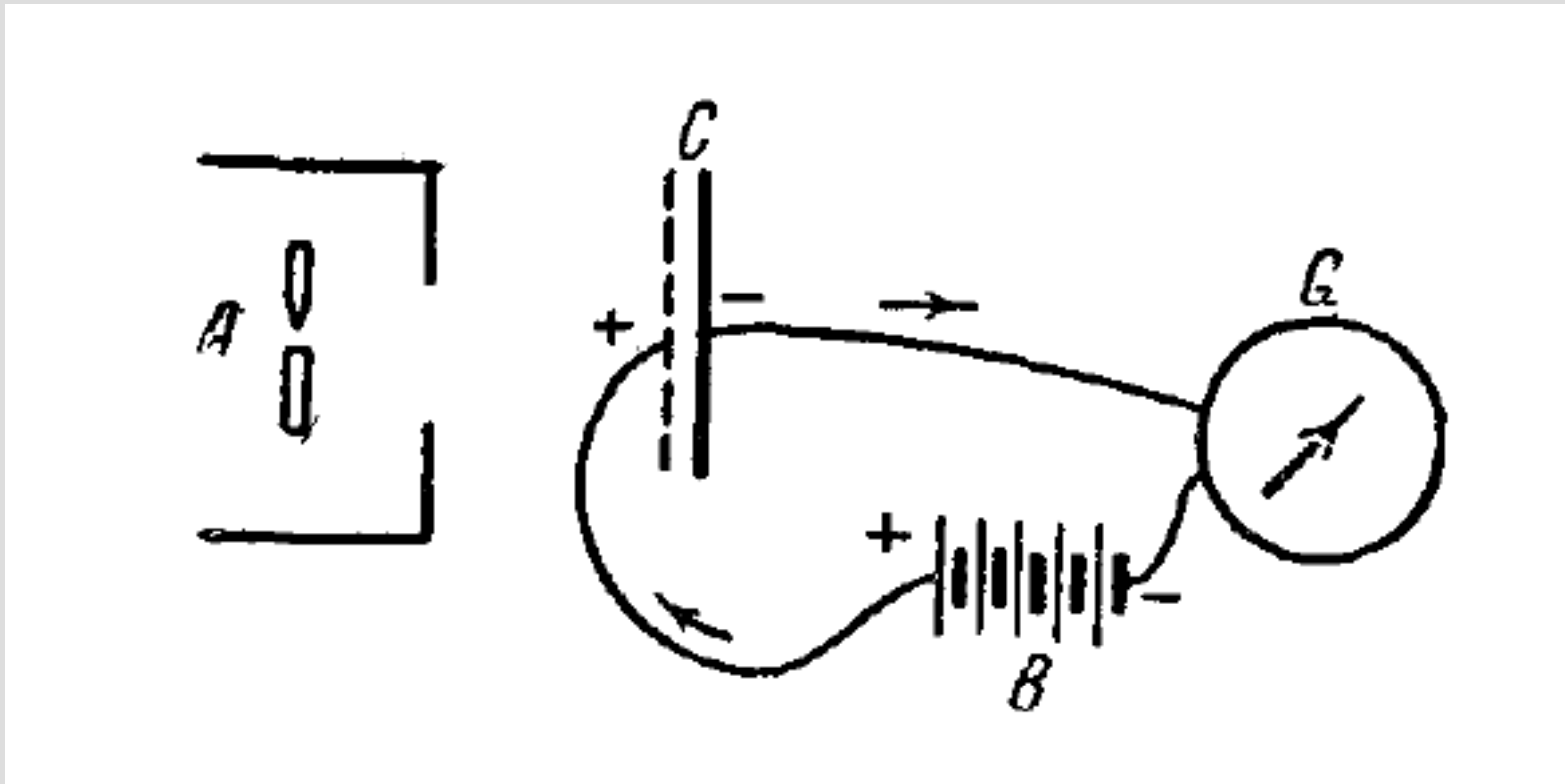




# Фотозффект. Опыты Столетова.

А.Г.Столетов (1839-1896),

окончил МГУ (1860), за границей (Гейдельберг, Геттинген, Берлин, Париж, Гейдельберг) (1862-1866), в том числе в лаборатории Кирхгофа (Гейдельберг), диссертация (1872), профессор МГУ (с 1873), основатель школы физиков МГУ.



1888-1891: постановка «классической» схемы опытов по фотозффекту (обзор в «Работы А.Г.Столетова по фотозффекту» УФН т.22 (1939) стр.384)

# Фотоэффект. Опыты Столетова.

1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд. Смотря по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться или нет заметным падением потенциала.

2. Это действие лучей есть строго униполярное: положительный заряд лучами не уносится.

3. По всей вероятности, кажущееся заряджение нейтральных тел лучами объясняется тою же причиной.

4. Разряжающим действием обладают — если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими — лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ( $\lambda 295 \cdot 10^{-6}$  мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие.

# Фотоэффект. Опыты Столетова.

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощались поверхностью тела. Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью, без значительных различий, обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (анилиновых красок). Вода, хорошо пропускающая активные лучи, лишена чувствительности.

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма кратковременном освещении, причем между моментом освещения и моментом соответствующего разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие, *ceteris paribus*, пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряжаемую поверхность.

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда; величина его зависит от этой плотности; с возрастанием плотности до некоторого предела оно растет быстрее, чем плотность, а потом медленнее и медленнее.

# Фотоэффект. Опыты Столетова.

10. Две пластинки разнородных по ряду Вольта металлов, помещенные в воздухе, представляют род гальванического элемента, как скоро электроотрицательная пластинка освещена активными лучами.

11. Каков бы ни был механизм актино-электрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток электричества, причем воздух (сам по себе или благодаря присутствию в нем посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопротивление этому току не подчиняется закону Ома, но в определенных условиях имеет определенную величину.

12. Актинно-электрическое действие усиливается с повышением температуры.







# Фотоэффект. Законы фотоэффекта.

Работа выхода для различных материалов катода  
(с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Work\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Work_function))

Элемент	A, эВ	Элемент	A, эВ	Элемент	A, эВ	Элемент	A, эВ
Ag	4.52-4.74	U	3.63-3.90	Cr	4.5	Fe	4.67-4.81
Li	2.93	Si	4.60-4.85	In	4.09	Pt	5.12-5.93
Na	2.36	Hg	4.475	Sm	2.7	Ni	5.04-5.35
Zn	3.63-4.9	Au	5.1-5.47	Cu	4.53-5.10	Eu	2.5

красная  
граница  
фотоэффекта

$$h\nu_{кр} = \frac{hc}{\lambda_{кр}} = A$$
$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A} = \frac{1240}{A[\text{эВ}]} \text{ нм}$$

При работе выхода в 4-5 эВ  
оказывается в ультрафиолетовой  
области.



# Фотоэффект. Внутренний и многоквантовый фотоэффект.

**Внешний фотоэффект** — фотоэлектроны покидают металл, выходят из фотокатода, возникает фототок.

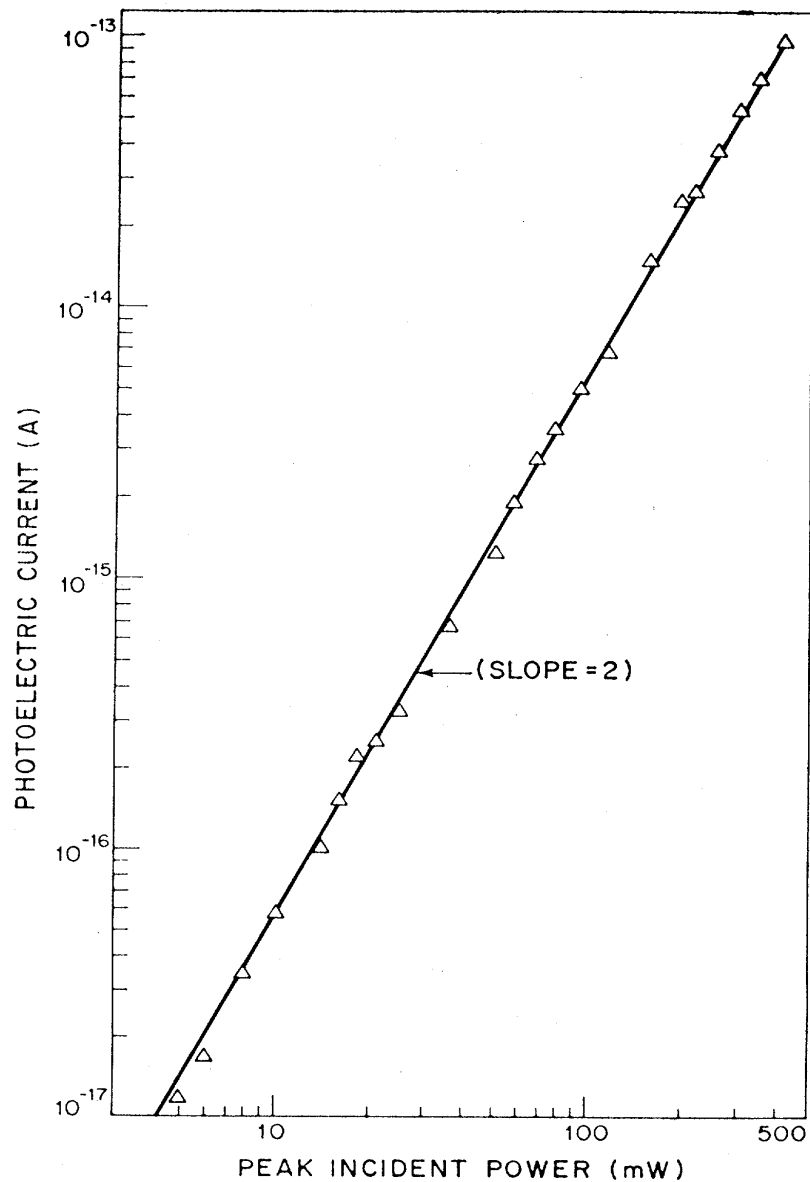
**Внутренний фотоэффект** — связанные электроны (в полупроводнике) освобождаются под действием излучения, но при этом остаются внутри полупроводника. Меняется проводимость. Описание подобно внешнему фотоэффекту. Возможно (как в разобранный задаче) возникновение разности потенциалов (солнечная батарея).

**Многоквантовый фотоэффект** — сразу несколько квантов света участвуют в высвобождении фотоэлектрона, возможен на частоте ниже красной кривизы одноквантового фотоэффекта.

$$N \cdot h \nu = \frac{mV^2}{2} + A$$

Фототок пропорционален N-ой степени интенсивности (не подчиняется закону Столетова), так как N квантов должны «оказаться в одно время в одном месте».

# Фотоэффект. Наблюдение многоквантового фотоэффекта.



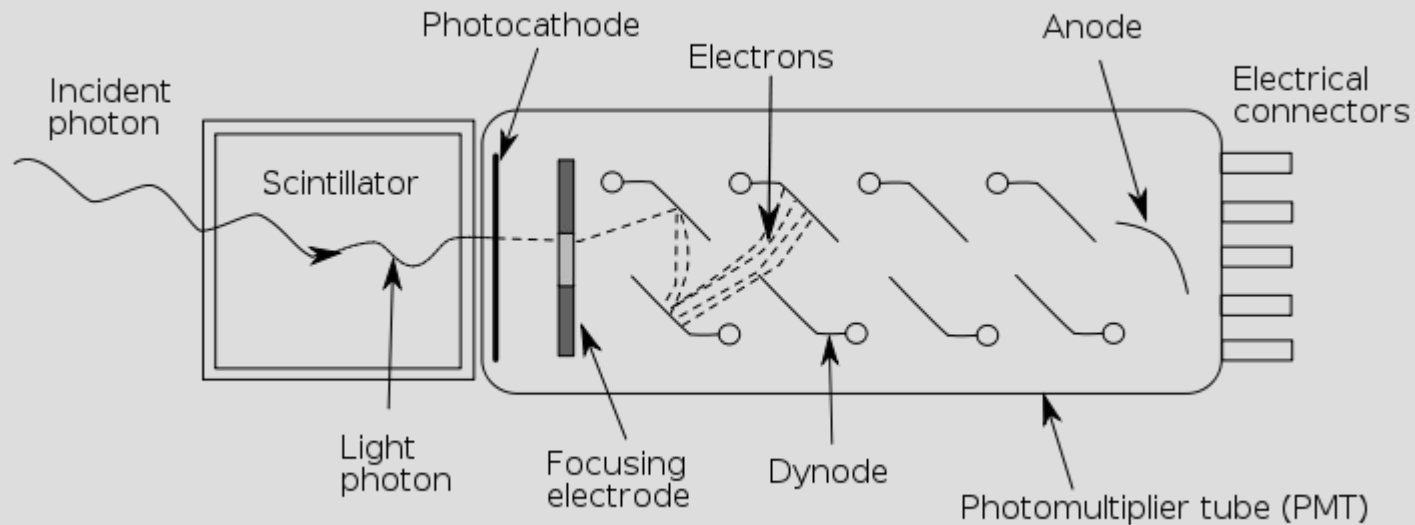
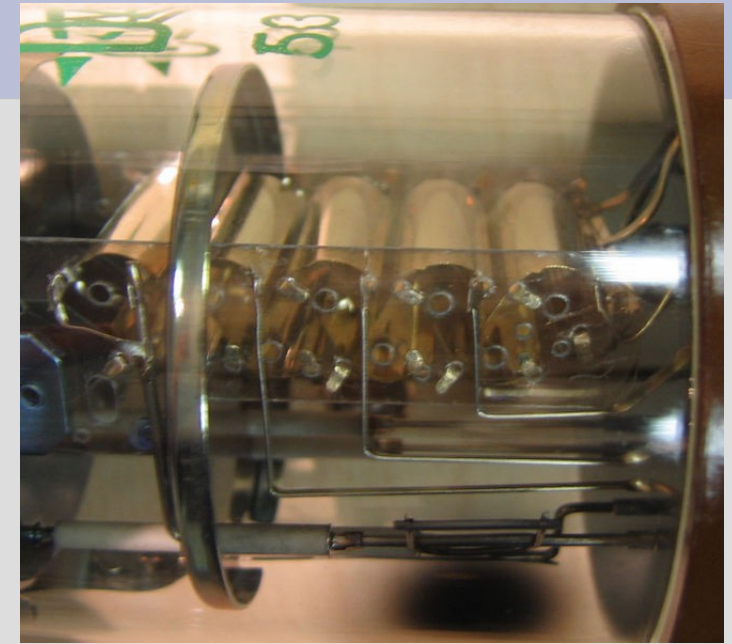
Материал фотокатода —  
натрий ( $A=2.26$ эВ)  
Энергия квантов —  $1.48$ эВ

Источник света — лазер,  
площадь засветки  $2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>,  
интенсивность  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

(M.C.Teich and G.J.Wolga «Two-Quantum Volume Photoelectric Effect in Sodium», Physical Review 171, 809 (1968)).

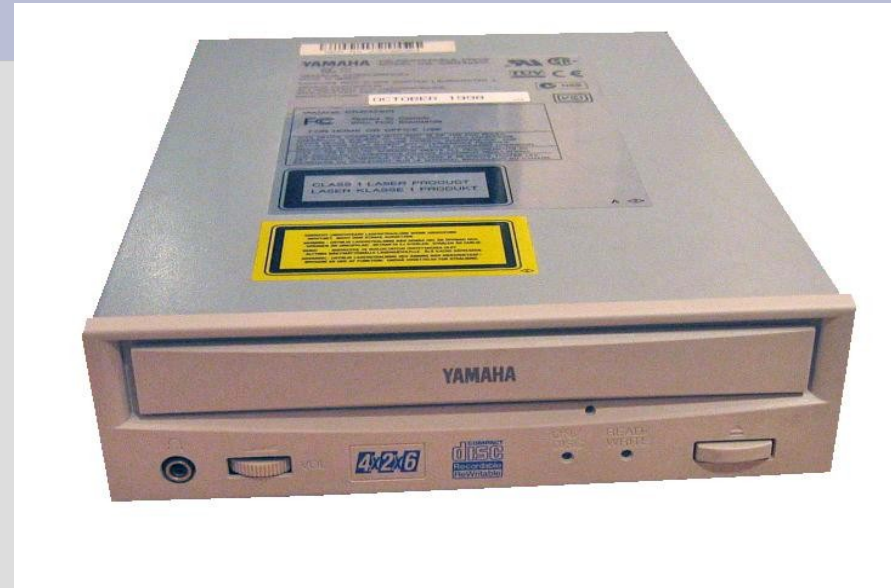
# Фотоэффект. Применения фотоэффекта.

Фото-  
электронный  
умножитель (ФЭУ)



# Фотоэффект. Применения фотоэффекта.

Полупроводниковые фоточувствительные элементы



А также: видеокамеры, оптические кабели и многое другое.



Виллард С. Бойл и Джордж Е. Смит были удостоены Нобелевской премии по физике 2009 года «за изобретение полупроводниковой матрицы для получения изображения»



# Фотоэффект. Применения фотоэффекта.

Солнечные батареи



Крупнейшая станция на данный момент Waldpolenz Solar Park построена в 2008 году в Германии в окрестностях Лейпцига (фотография с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Waldpolenz\\_Solar\\_Park](http://en.wikipedia.org/wiki/Waldpolenz_Solar_Park)).

# Задачи домашнего задания

Установлено, что хорошо приспособленный к полной темноте человеческий глаз способен заметить свет мощностью порядка сотни фотонов в течении 1 секунды. На каком максимальном расстоянии еще есть возможность заметить свет яркого зеленого светодиода (длина волны излучаемого света 520 нм, мощность 0,06 Вт, угол излучения  $180^\circ$ ). Диаметр зрачка в условиях темноты считать равным 6 мм.

По классической электромагнитной теории света поток световой энергии от источника непрерывно распространяется во все стороны. Через какой промежуток времени, согласно этой теории, отдельный атом танталового катода может накопить столько энергии чтобы стал возможным вылет фотоэлектрона, если катод находится на расстоянии  $L = 10$  м от 25-ваттной лампочки? Работа выхода для тантала составляет  $A = 4$  эВ. Считать, что фотоэлектрону передается вся энергия, накапливающаяся в атоме тантала, диаметр которого можно считать равным  $d = 0,3$  нм.