

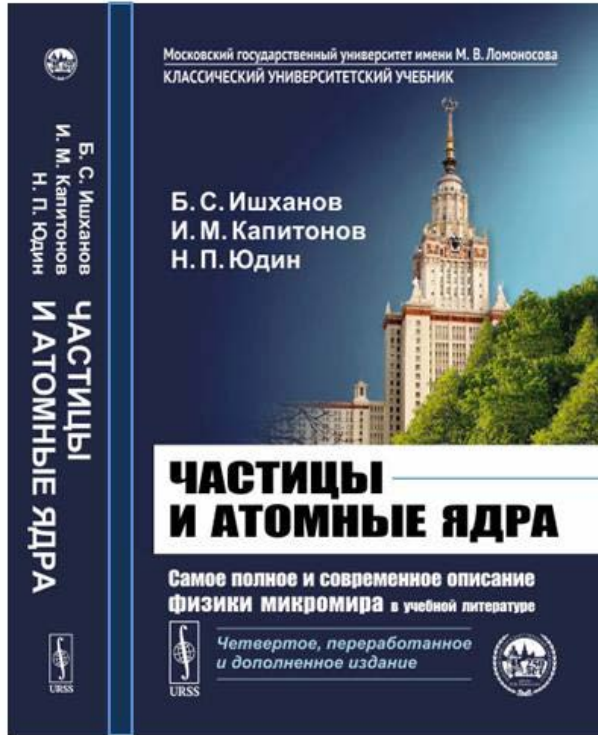
# **Физика атомного ядра и частиц**

**Лектор  
проф. Б. С. Ишханов**

# План лекций

1. Элементарные частицы материи
2. Квантовые свойства частиц
3. Квантовые свойства системы частиц
4. Уравнение Шредингера
5. Лептоны
6. Кварки. Адроны
7. Адроны. Взаимодействие частиц
8. Слабые взаимодействия частиц
9. Атомные ядра
10. Радиоактивность
11. Ядерные реакции
12. Деление ядер
13. Нуклеосинтез
14. Симметрии природы

# Литература



**Б. С. Ишханов,  
И. М. Капитонов,  
Н. П. Юдин**

**«Частицы и атомные ядра», 2018 г.**

**«Ядерная физика в интернете»  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/>**



Учебные материалы курса

## "Физика атомного ядра и частиц"

- ▶ Физика ядра и частиц. XX век
- ▶ Частицы и атомные ядра
- ▶ Шаргалка для отличника (Частицы и ядра)
- ▶ Программа курса "Физика ядра и частиц"
- ▶ Лекции профессора Б.С. Ишханова (2019)
- ▶ Лекции профессора И.М. Капитанова (2019)
- ▶ Семинары
- ▶ Частицы и атомные ядра (основные вопросы по курсу)
- ▶ Обязательные вопросы для допуска к экзамену
- ▶ Гончарова. Семинары по физике ядра и частиц
- ▶ Семинары по физике частиц и атомного ядра
- ▶ Задачи и решения
- ▶ Описания задач общего ядерного практикума физического факультета МГУ
- ▶ Темы курсовых работ для студентов второго курса

## Материалы спецкурсов

- ▶ История атомного ядра
- ▶ Микромир и Вселенная
- ▶ Модели атомных ядер
- ▶ 12 лекций по физике атомного ядра
- ▶ Ядерные реакции
- ▶ Ядерные реакции (задачи)
- ▶ Квантовая теория столкновений
- ▶ Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных
- ▶ Взаимодействие фотонов и электронов с атомными ядрами
- ▶ Симметрии фотоядерных реакций
- ▶ Фотоядерные реакции и астрофизика
- ▶ Гигантский дипольный резонанс атомных ядер
- ▶ Ядерная резонансная флуоресценция
- ▶ Электромагнитные взаимодействия ядер
- ▶ Рассеяние электронов на ядрах и нуклонах
- ▶ Медицинская физика
- ▶ Нейтринная астрофизика
- ▶ Экзотические ядра
- ▶ Деление ядер
- ▶ Радиоактивность
- ▶ Нуклеосинтез во Вселенной
- ▶ Введение в физику микромира - физика частиц и ядер
- ▶ Физика элементарных частиц
- ▶ Антиматерия
- ▶ Протон
- ▶ Изоспин

Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ осуществляется при поддержке **НИИЯФ МГУ**.

- ▶ [Поиск по сайту](#)
- ▶ [Что нового на сайте](#)
- ▶ [Материалы научного семинара по ядерной физике НИИЯФ МГУ](#)
- ▶ [Нобелевские лауреаты по физике](#)
- ▶ [Фотографии и биографии физиков](#)
- ▶ [Хроника открытий в физике ядра и частиц](#)

## Материалы курсов МФК

- ▶ [Микромир и Вселенная 2019](#)

## Базы данных

- ▶ Ядерные данные (CDFE)
  - ▶ Карта атомных ядер
  - ▶ Характеристики нуклида
  - ▶ База ядерно-спектроскопических данных
  - ▶ База данных по ядерным реакциям
- ▶ Ядерные данные (BNL)
- ▶ Частицы (PDG)
- ▶ База данных CLAS, JLAB)
- ▶ Атомные ядра и банки ядерных данных
- ▶ Базы ядерных данных в научных исследованиях
- ▶ Физика ядра и банки ядерных данных

## Справочные материалы

- ▶ Частицы и атомные ядра. Основные понятия
- ▶ Атомные ядра. Основные характеристики
- ▶ Физика атомного ядра и частиц в Физической энциклопедии
- ▶ Таблицы частиц
- ▶ Константы и единицы измерений
- ▶ Греческий алфавит
- ▶ Таблица Менделеева
- ▶ Названия химических элементов

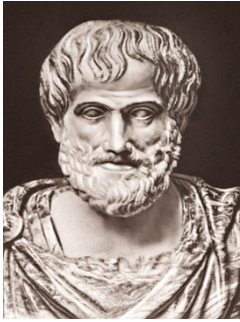
## Радиационная экология

- ▶ Радиация
- ▶ Введение в экологию
- ▶ Радиоактивные изотопы
- ▶ Человек и радиация
- ▶ Радиация. Опасности радиации и дозиметрия

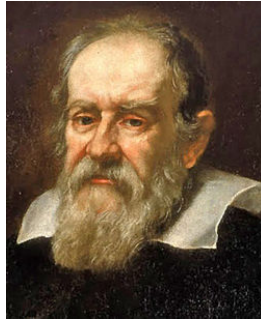
# Элементарные частицы материи



# Классическая механика. Движение



Аристотель  
384–322 до н.э.



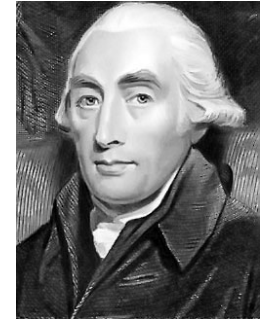
Галилео Галилей  
1564 – 1642



Иоганн Кеплер  
1571 – 1630



Исаак Ньютон  
1642 – 1727



Генри Кавендиш  
1731 – 1810

## Законы Ньютона

1. Закон инерции

$$F = 0, \quad a = 0, \quad \vec{v} = const$$

2. Ускоренное движение

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

3. Если тело 1 действует на тело 2 с какой-либо силой, то тело 2 действует на тело 1 с равной противоположно направленной силой

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

## Закон всемирного тяготения

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}$$

# Электромагнетизм



Шарль Кулон  
1736 – 1806



Андре Мари  
Ампер  
1775 – 1836



Георг Ом  
1789 – 1854



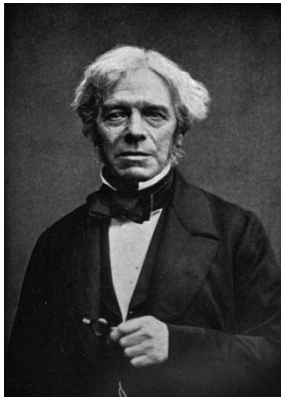
Алессандро  
Вольта  
1745 – 1827



Ханс Кристиан  
Эрстед  
1777 – 1851



Гендрик Лоренц  
1853 – 1928



Майкл Фарадей  
1791 – 1867



Генрих Герц  
1857 – 1894



Джеймс Максвелл  
1831 – 1879

## Уравнения Максвелла

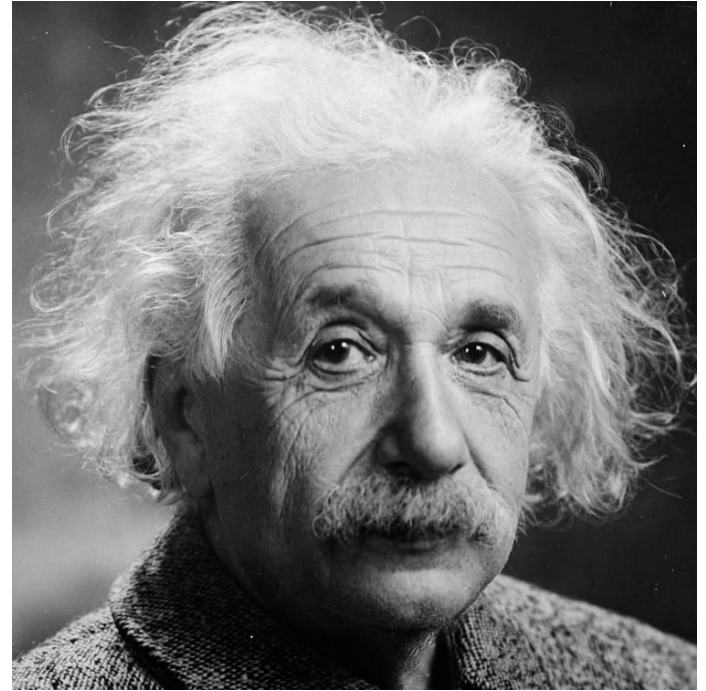
$$\operatorname{div} E = 4\pi\rho$$

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

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

$$\operatorname{rot} B = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

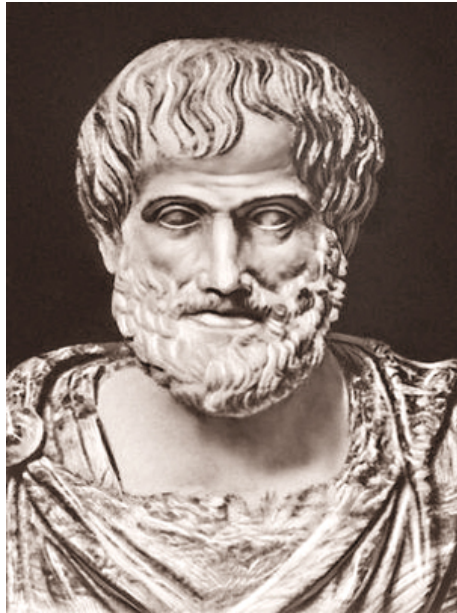




«Вполне возможно, что за пределами восприятия наших чувств скрываются миры, о которых мы и не подозреваем...»

*Альберт Эйнштейн*

# Элементарные частицы вещества. Из чего всё сделано?



**Аристотель**  
384 – 322 гг. до н.э.



**Демокрит**  
460 – 360 до н.э.

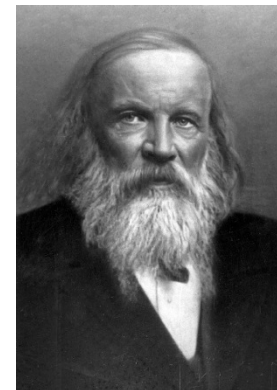


**Атом – неделимая  
частица материи**



Антуан Лавуазье  
1743 – 1794

# Химические элементы



Д. И. Менделеев  
1834 – 1907

<sup>1</sup> H							<sup>2</sup> He		
<sup>3</sup> Li	<sup>4</sup> Be	<sup>5</sup> B	<sup>6</sup> C	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne		
<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg	<sup>13</sup> Al	<sup>14</sup> Si	<sup>15</sup> P	<sup>16</sup> S	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar		
<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni
<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn	<sup>31</sup> Ga	<sup>32</sup> Ge	<sup>33</sup> As	<sup>34</sup> Se	<sup>35</sup> Br	<sup>36</sup> Kr		
<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr	<sup>39</sup> Y	<sup>40</sup> Zr	<sup>41</sup> Nb	<sup>42</sup> Mo	<sup>43</sup> Tc	<sup>44</sup> Ru	<sup>45</sup> Rh	<sup>46</sup> Pd
<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I	<sup>54</sup> Xe		
<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba	La-Lu	<sup>72</sup> Hf	<sup>73</sup> Ta	<sup>74</sup> W	<sup>75</sup> Re	<sup>76</sup> Os	<sup>77</sup> Ir	<sup>78</sup> Pt
<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg	<sup>81</sup> Tl	<sup>82</sup> Pb	<sup>83</sup> Bi	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Rn		
<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	Ac-Lr	<sup>104</sup> Rf	<sup>105</sup> Db	<sup>106</sup> Sg	<sup>107</sup> Bh	<sup>108</sup> Hs	<sup>109</sup> Mt	<sup>110</sup> Ds
<sup>111</sup> Rg	<sup>112</sup> Cn	<sup>113</sup> Nh	<sup>114</sup> Fl	<sup>115</sup> Mc	<sup>116</sup> Lv	<sup>117</sup> Ts	<sup>118</sup> Og		

Лантаноиды

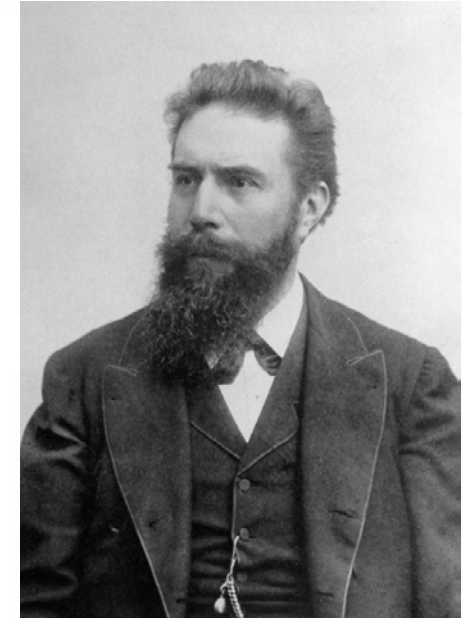
<sup>57</sup> La	<sup>58</sup> Ce	<sup>59</sup> Pr	<sup>60</sup> Nd	<sup>61</sup> Pm	<sup>62</sup> Sm	<sup>63</sup> Eu	<sup>64</sup> Gd	<sup>65</sup> Tb	<sup>66</sup> Dy	<sup>67</sup> Ho	<sup>68</sup> Er	<sup>69</sup> Tm	<sup>70</sup> Yb	<sup>71</sup> Lu
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Актиноиды

<sup>89</sup> Ac	<sup>90</sup> Th	<sup>91</sup> Pa	<sup>92</sup> U	<sup>93</sup> Np	<sup>94</sup> Pu	<sup>95</sup> Am	<sup>96</sup> Cm	<sup>97</sup> Bk	<sup>98</sup> Cf	<sup>99</sup> Es	<sup>100</sup> Fm	<sup>101</sup> Md	<sup>102</sup> No	<sup>103</sup> Lr
------------------	------------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

# 1895 г. Рентгеновские лучи

1895 г. В. Рентген открыл X-лучи, впоследствии названные его именем. Рентген обнаружил, что когда катодные лучи падают на стекло трубки или на мишень, внутри трубки возникает излучение, которое проникает через непрозрачные для обычного света материалы, воздействует на флюоресцирующие материалы и фотопластины.



В. Рентген  
1845 – 1923



Длина волны рентгеновского излучения  $3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$  м.

Длина волны видимого излучения  $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$  м.

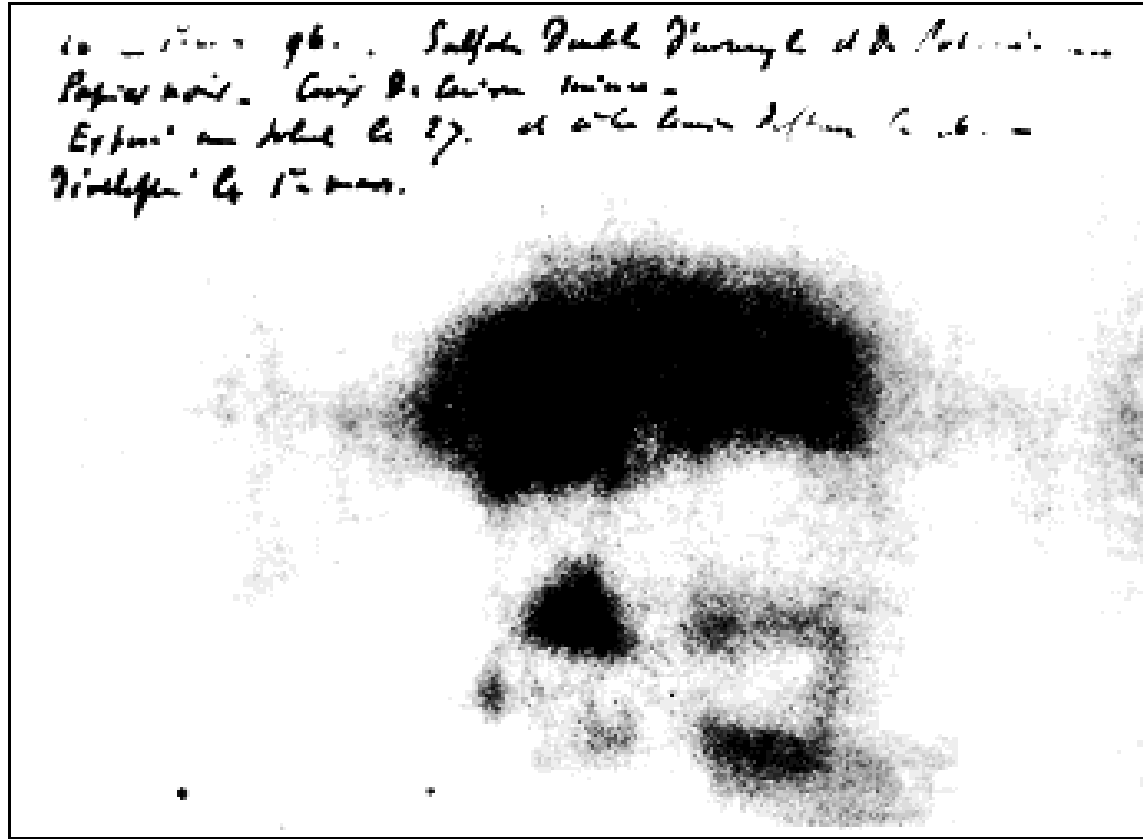
**Нобелевская премия по физике**

**1901 г. - В. Рентген.**

За открытие лучей, названных его именем

# Радиоактивность

1896 – А. Беккерель. Открытие радиоактивности



А. Беккерель  
1852 – 1908



П. Кюри  
1859 – 1906



М. Склодовская-Кюри  
1867 – 1934

**Нобелевская премия по физике**

**1903 г. – А. Беккерель.**

За открытие радиоактивности

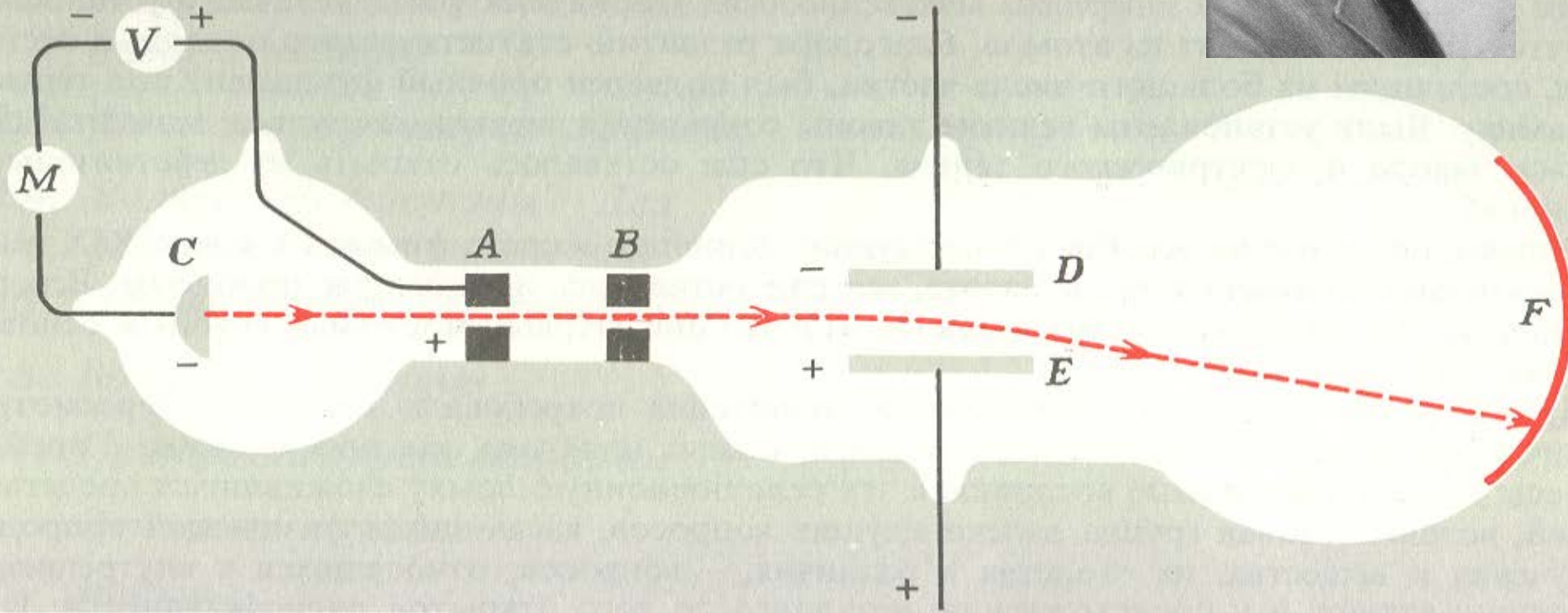
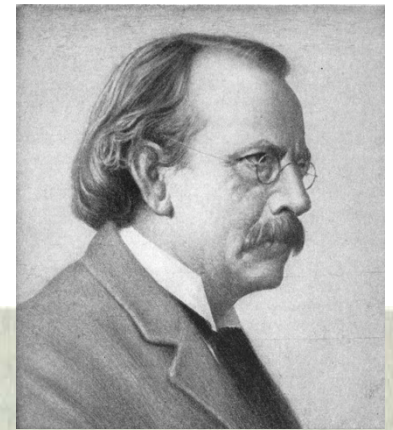
**1903 г. – П. Кюри, М. Кюри-Склодовская.**

За исследования радиоактивности

# Электрон

1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома



**Нобелевская премия по физике**

1906 г. – Дж. Дж. Томсон.

За большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов

# Электрон

Дж. Томсон измерил удельный заряд  $e/m$  катодных лучей для различных материалов катодов и получил одинаковое значение. Частицы, обнаруженные Томсоном, обладают единичным электрическим зарядом  $e$  и массой примерно в 2000 раз меньше массы самого лёгкого из известных атомов – атома водорода. Частицы входят в состав всех атомов. Частицы катодного излучения были названы Х. Лоренцом электронами.

1909 г. Р. Милликен измерил величину электрического заряда электрона в экспериментах с масляными каплями, подвешенными в электрическом поле.

$$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

# 1911 г. Опыты по рассеянию $\alpha$ -частиц

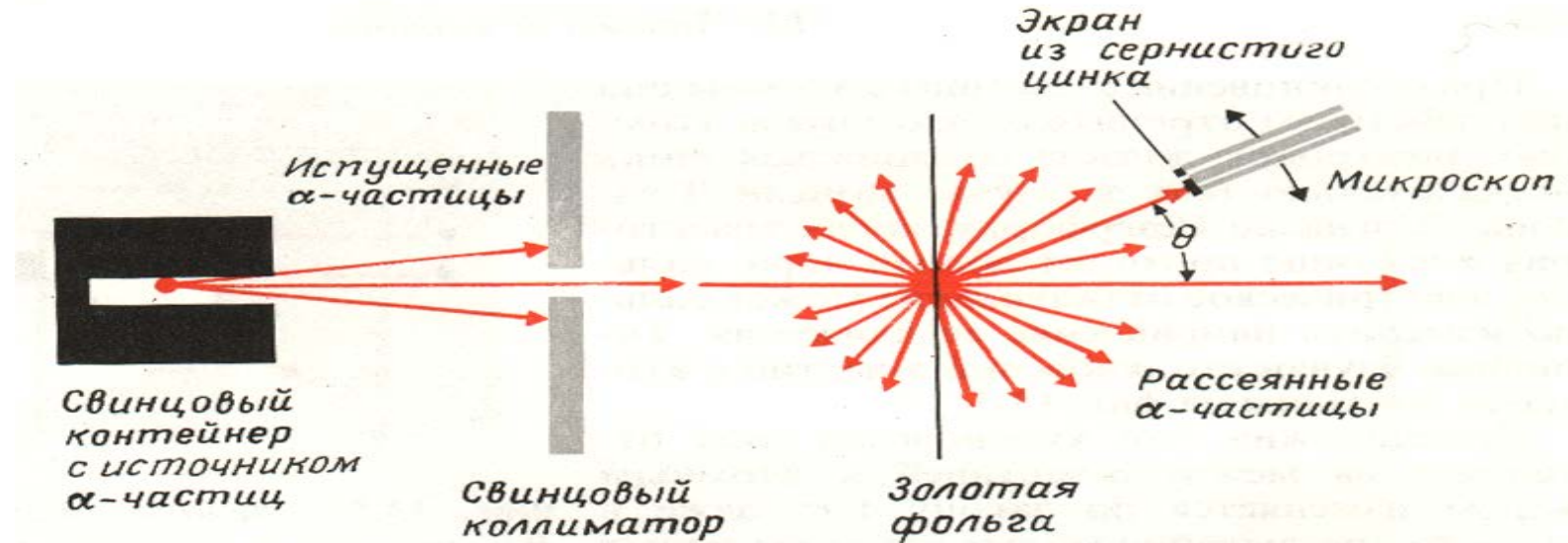
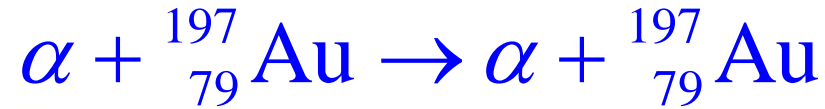
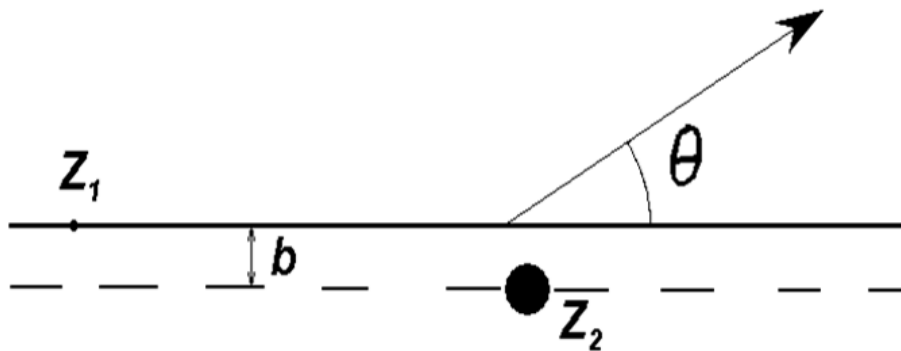


Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц



$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bE}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Из опытов по рассеянию  $\alpha$ -частиц следовало, что масса атома практически полностью сосредоточена в небольшой центральной части атома – атомном ядре.



# Сечение реакции $\sigma$ и число событий $N$



$$\frac{dN(\theta, \varphi)}{d\Omega} = j \cdot s \cdot n \cdot l \cdot \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega}$$

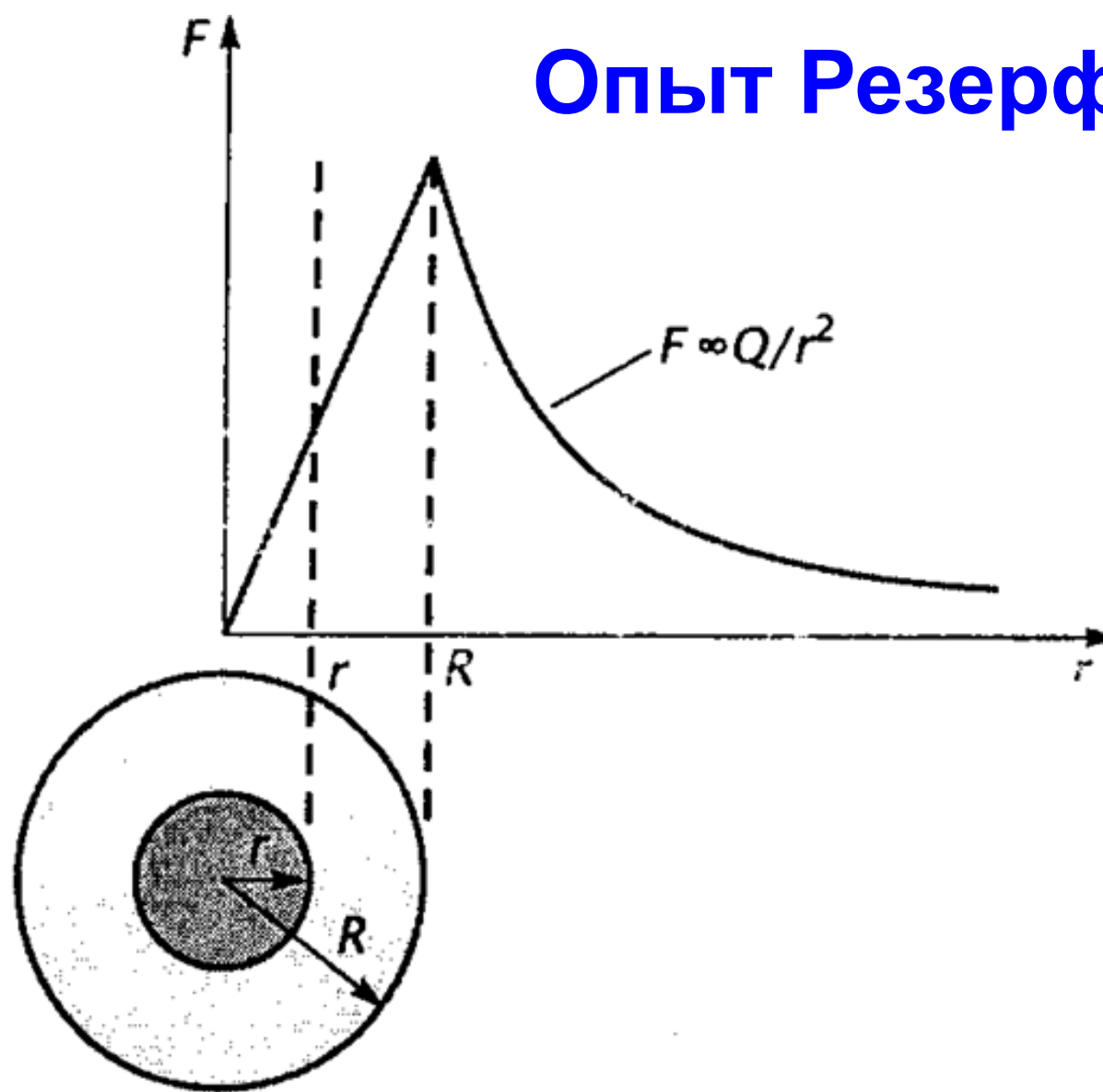
$$N = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \sigma$$

- $N$  – число событий в секунду.
- $j$  – поток частиц  $a$  через  $1 \text{ см}^2$  поверхности мишени.
- $n$  – число частиц  $b$  в  $1 \text{ см}^3$  мишени.
- $s$  – площадь мишени в  $\text{см}^2$
- $l$  – толщина мишени
- $\sigma$  – сечение реакции

$$\left| \frac{N}{\text{сек}} \right| = \left| \frac{j}{\text{сек} \times \text{см}^2} \right| \left| \frac{n}{\text{см}^3} \right| \left| \text{см} \right| \left| \text{см}^2 \right| \left| \text{см}^2 \right|$$

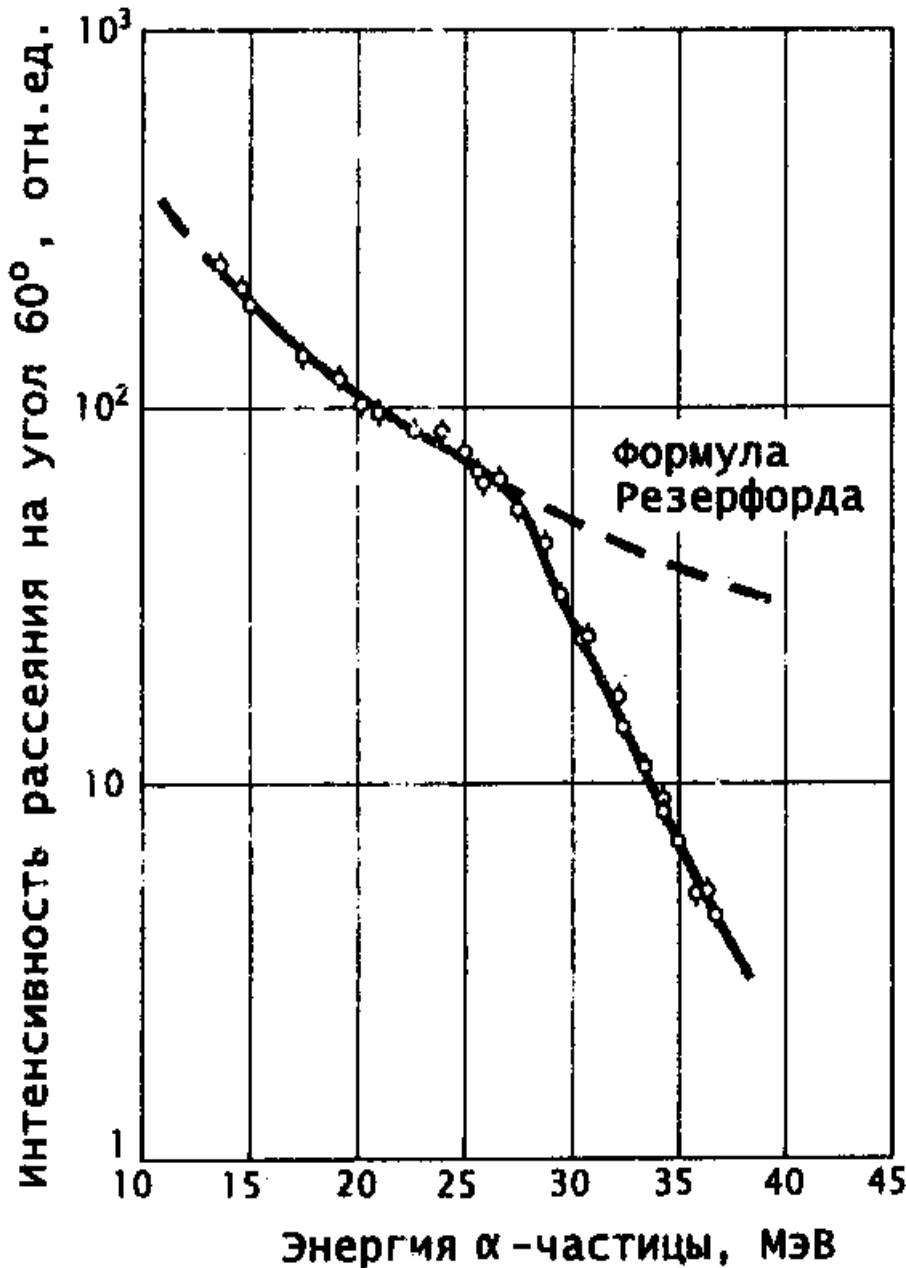
$N$                        $j$                        $n$                        $l$      $s$      $\sigma$

# Опыт Резерфорда



Зависимость силы, действующей на точечный заряд, от расстояния  $r$  до центра однородно заряженной сферы радиусом  $R$ .

# Размер атомного ядра



Бомбардирующие свинцовую мишень  $\alpha$ -частицы рассеиваются в соответствии с формулой Резерфорда, если их энергия не превышает 27 МэВ. При больших энергиях  $\alpha$ -частица настолько приближается к ядру Pb, что между нуклонами  $\alpha$ -частицы и ядра Pb возникает взаимодействие посредством ядерных сил, и интенсивность рассеяния падает по сравнению с предсказываемой формулой Резерфорда.

$$R(\text{ядра}) \approx 1,3 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

$$R(\text{Pb}) \approx 7 \text{ фм}$$

# Система Гаусса

Длина	$1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$
Масса	$1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$
Время	$1 \text{ с}$
Энергия	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$
$E = mc^2$	$1 \text{ эВ} = 10^{-3} \text{ кэВ} = 10^{-6} \text{ МэВ} = 10^{-9} \text{ ГэВ} = 10^{-12} \text{ ТэВ}$

Длина	$1 \text{ фм (ферми)} = 10^{-13} \text{ см}$
	$1 \text{ \AA (ангстрем)} = 10^{-8} \text{ см}$

Скорость света	$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$
Заряд электрона	$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГС} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Постоянная Планка	$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6,58 \cdot 10^{-22} \text{ МэВ} \cdot \text{с}$
-------------------	---

$$\hbar c = 197 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}; \quad \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

## Пример

$\alpha$ -частица ( $Z_1 = 2$ ) с кинетической энергией 5 МэВ испытывает лобовое столкновение с ядром золота ( $Z_2=79$ ).

Рассчитать расстояние максимального сближения  $\alpha$ -частицы с ядром золота.

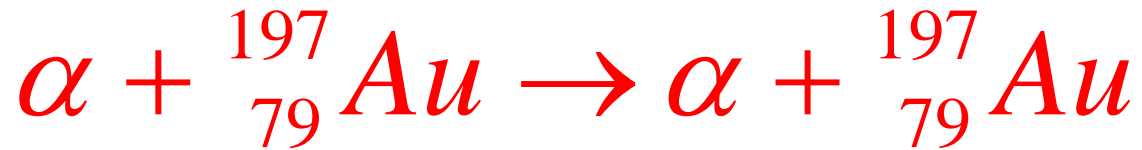
$$E = \frac{Z_1 e Z_2 e}{R}$$

$$R = \frac{(Z_1 Z_2 e^2)}{E} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{E} \hbar c =$$

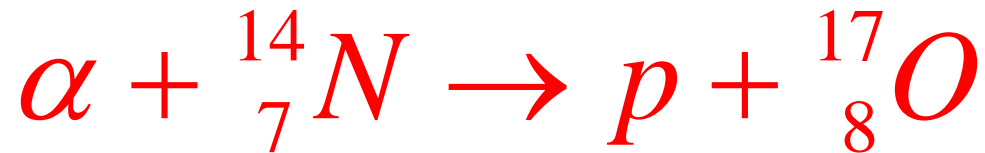
$$= \frac{2 \cdot 79}{5 \text{ МэВ}} \cdot \frac{1}{137} \cdot 200 \text{ МэВ} \cdot \text{фм} = 50 \text{ фм}$$

# Протон

1911 – Открыто атомное ядро



1919 – Открыт протон

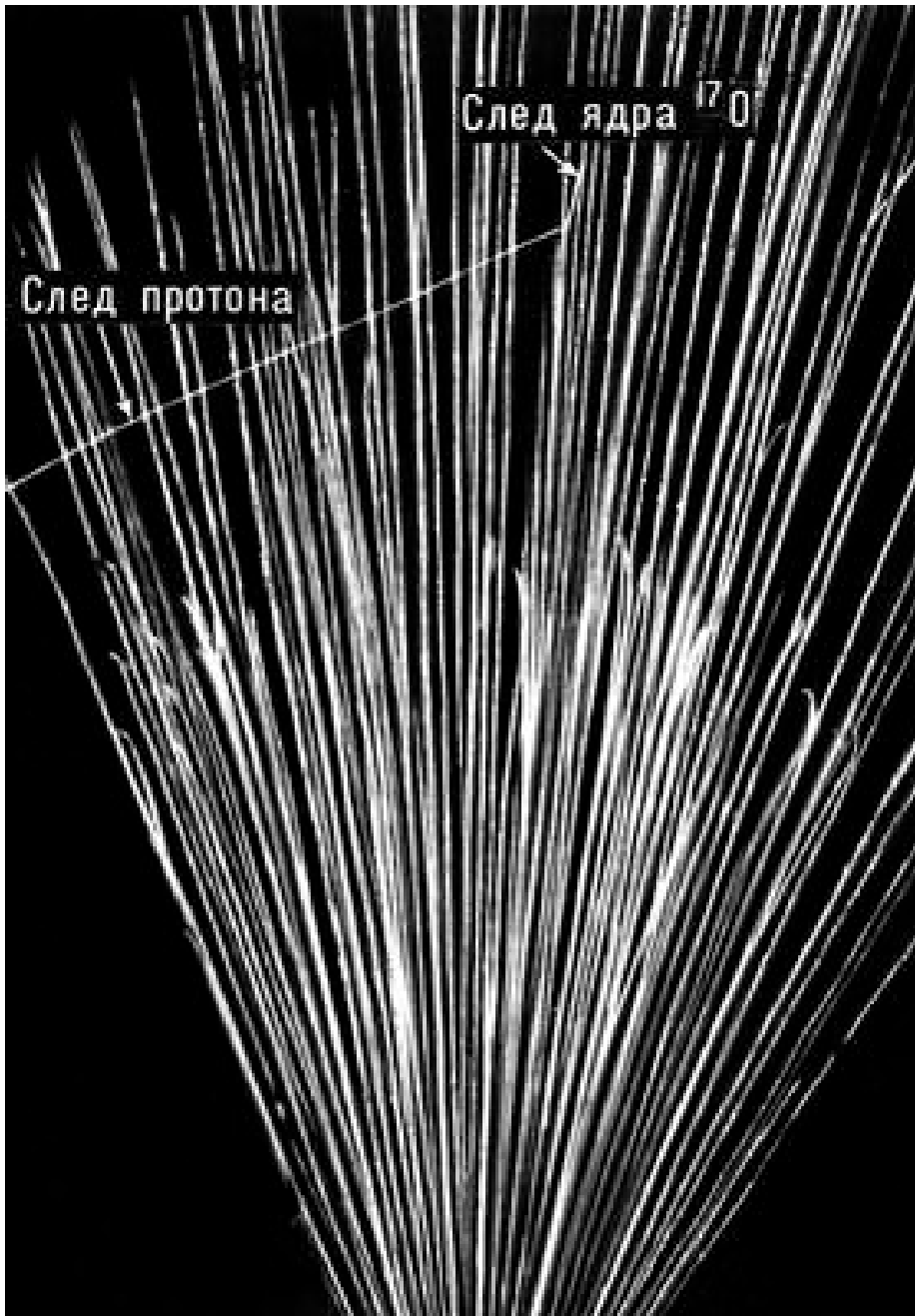


Протон – ядро атома водорода

Энергия покоя протона  $Mc^2 = 938,3 \text{ МэВ}$

Электрический заряд протона  $Q = +1e$

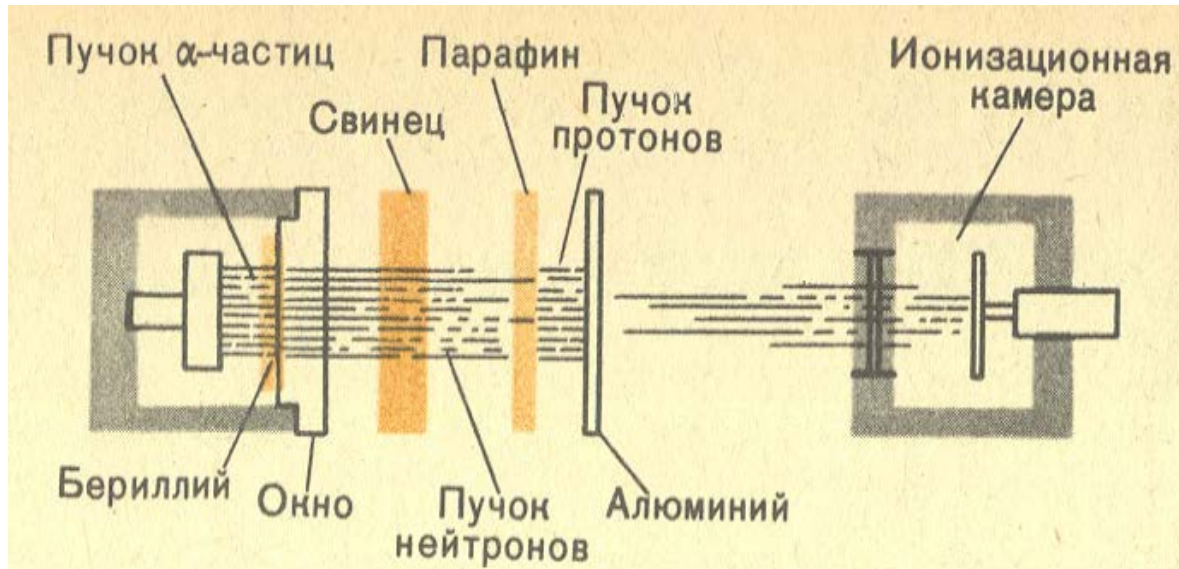
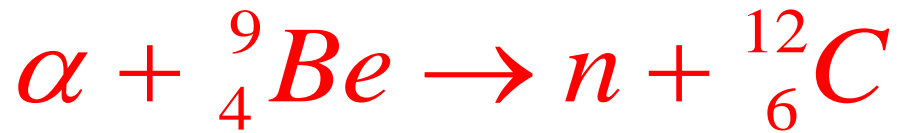
## Протоны входят в состав атомного ядра



Ядерная реакция  $^{14}\text{N} (\alpha, p) ^{17}\text{O}$ ,  
зарегистрированная  
в камере Вильсона.

# Нейтрон

1932 – Открыт нейтрон. Дж. Чадвик



Дж. Чадвик  
1891 – 1974

Энергия покоя нейтрона  $Mc^2 = 939,6$  МэВ

Электрический заряд нейтрона  $Q = 0$

**Нобелевская премия по физике**

**1935 г. – Дж. Чадвик.**

**За открытие нейтрона**



# Атомное ядро



Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

$Z$  – заряд ядра, число протонов в ядре

$N$  – число нейтронов в ядре

$A = N + Z$  – массовое число



$$Z = 82$$

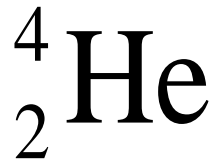
$$N = 126$$

$$A = 208$$

Ядра с одним и тем же значением  $Z$ , но с разными значениями  $A$  называются **изотопами**. Различные изотопы данного элемента обозначают, приписывая к символу химического элемента верхний индекс — массовое число  $A$ .

# $\alpha$ -частица

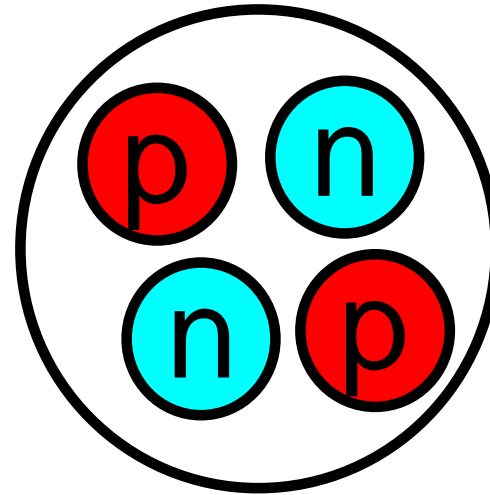
$\alpha$  -частица – ядро атома гелия



$$Z = 2$$

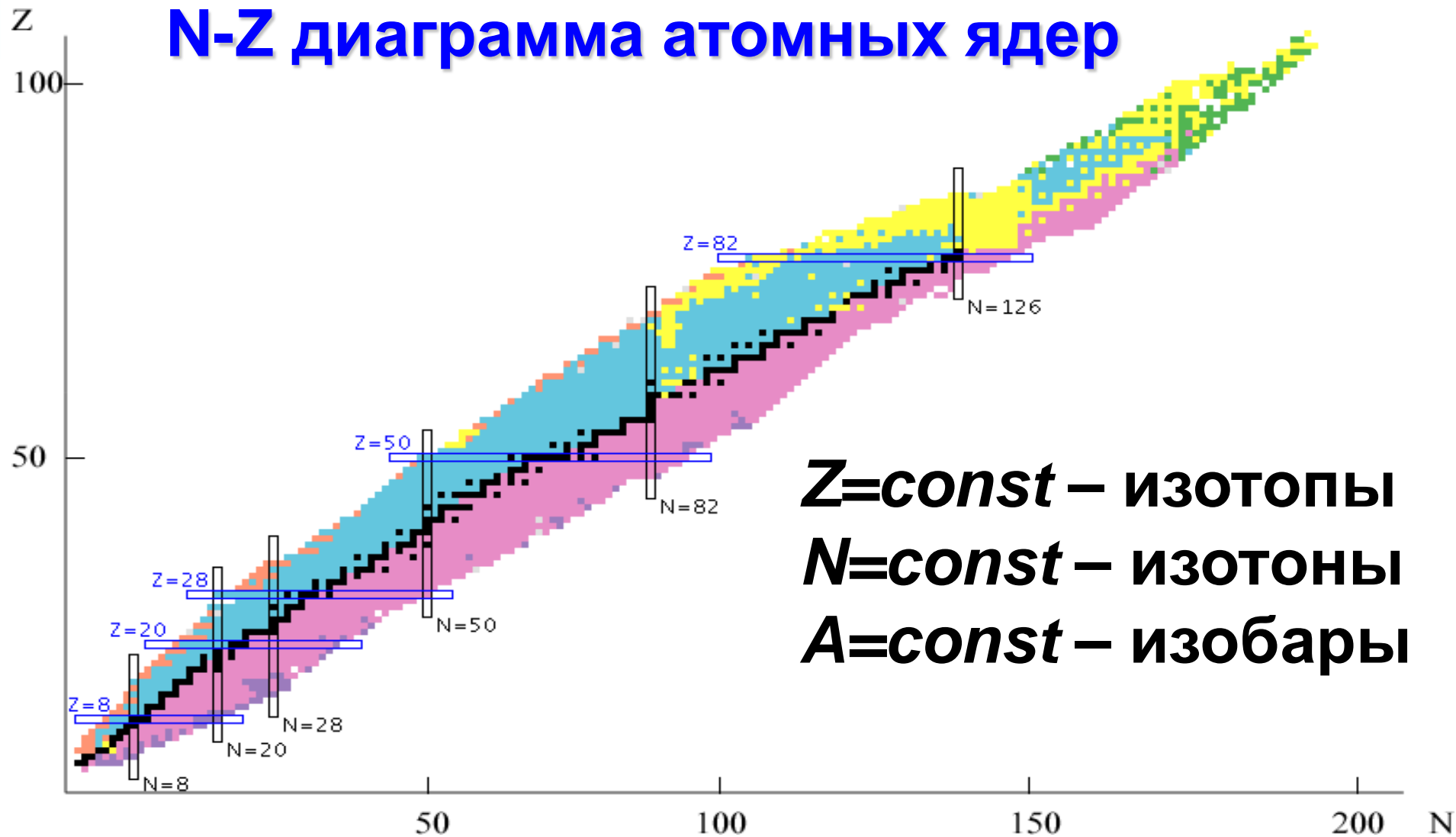
$$N = 2$$

$$A = 4$$



Какие силы связывают протоны и нейтроны в атомные ядра?

# N-Z диаграмма атомных ядер

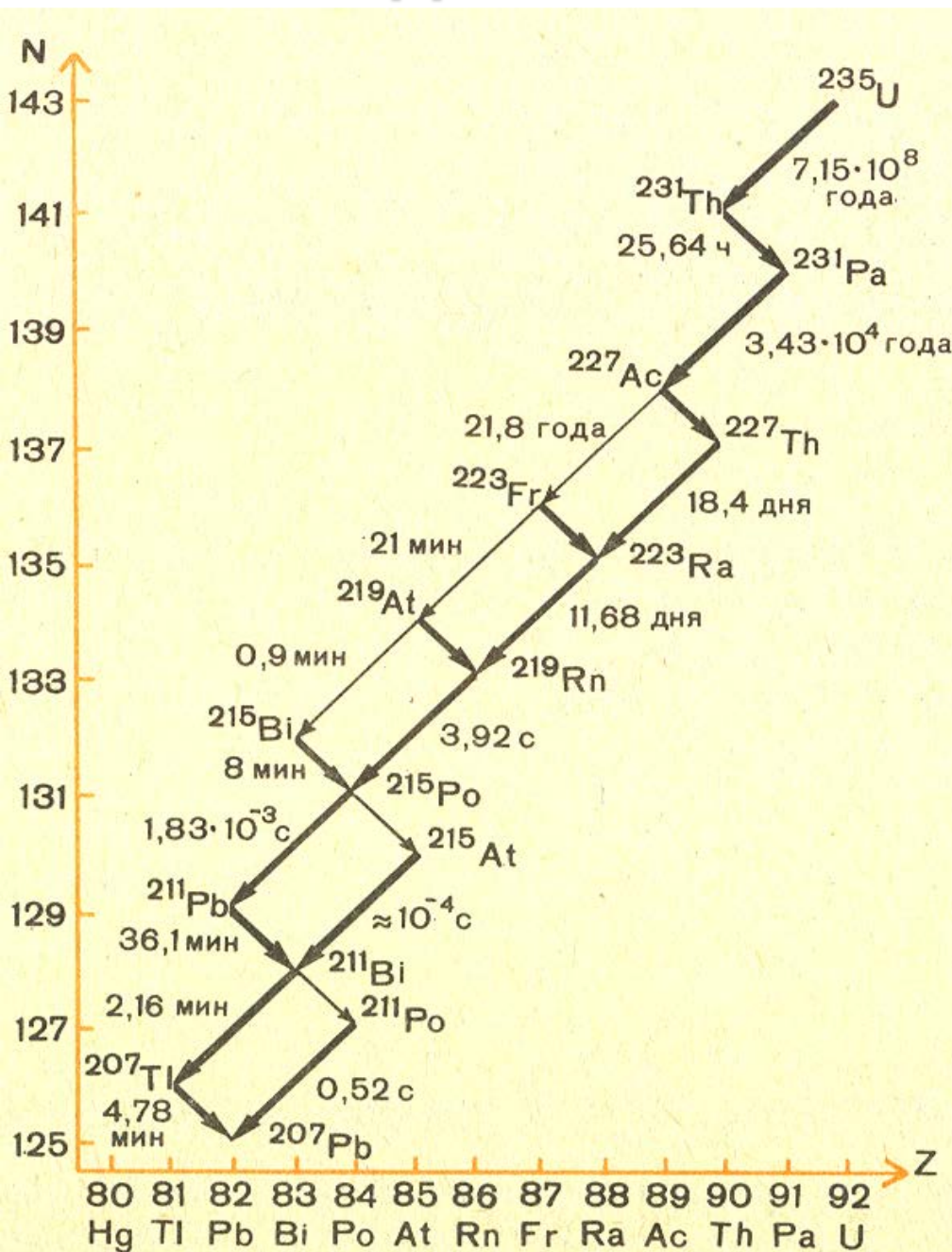


**$Z=const$**  – изотопы  
 **$N=const$**  – изотоны  
 **$A=const$**  – изобары

Стабильные ядра группируются вблизи долины стабильности

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0,015A^{2/3}}$$

# Радиоактивное семейство $^{235}\text{U}$



Изотоп	Период полураспада, лет	Содержание в естественной смеси, %
$^{233}\text{U}$	$1,6 \cdot 10^5$	—
$^{235}\text{U}$	$7 \cdot 10^8$	0,72
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$	99,27

# Распады

$$dN = -\lambda N dt$$

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$N(0)$  — число ядер в начальный момент,

$N(t)$  — число ядер в момент времени  $t$ ,

$\lambda$  — вероятность распада ядра (частицы) в единицу времени.

$T_{1/2}$  — время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается в два раза.

$\tau$  — среднее время жизни частицы.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \qquad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

# Пример

Рассчитать время жизни мюона с кинетической энергией  $T > mc^2$  ( $m$  - масса мюона) в лабораторной системе координат ( $\tau_\mu \approx 2 \cdot 10^{-6}$  с)

---

Используя релятивистские соотношения для полной энергии  $E$ , кинетической энергии  $T$  и импульса  $P$

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

$$E = mc^2 + T$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

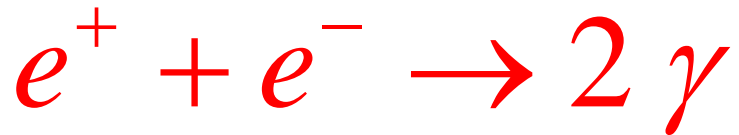
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Получим

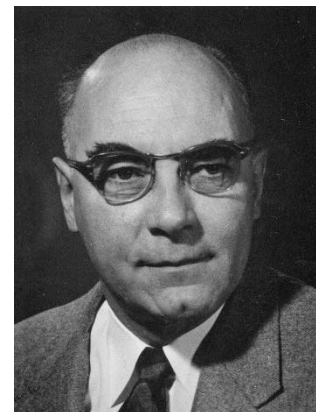
$$\tau_{lab} = \frac{\tau_\mu}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \approx \tau_\mu \cdot \frac{T + mc^2}{mc^2}$$

# 1932 г. К. Андерсон. Позитрон $e^+$

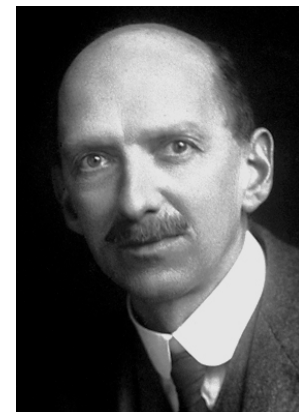
$$M = 0,511 \text{ МэВ}$$



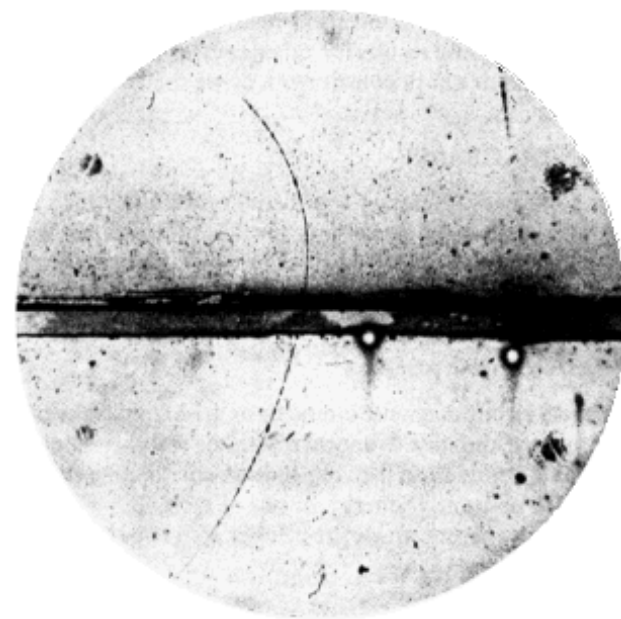
Наблюдение позитрона в камере Вильсона в магнитном поле. Тонкая изогнутая прерывистая линия, идущая снизу вверх – трек позитрона. Темная полоса, пересекающая трек - слой вещества, в котором позитрон теряет часть энергии, и по выходе из которого двигается с меньшей скоростью. Поэтому трек искривлён сильнее.



К. Андерсон  
1905 – 1991



Ч. Вильсон  
1869 – 1959



## Нобелевская премия по физике

1936 г. – К. Андерсон.

За открытие позитрона

1927 г. – Ч. Вильсон.

За открытие метода, делающего видимыми траектории заряженных частиц с помощью конденсации пара

# Античастицы

В 1928 г. П. Дираком на основе анализа релятивистского уравнения было предсказано существование позитрона

## Открытия античастиц

1932 – Позитрон

1955 – Антипротон

1956 – Антинейтрон

1966 – Антидейтерий

1970 – Антигелий

1998 – Антиводород

Каждая частица имеет своего двойника – античастицу. Античастица обладает рядом характеристик, имеющих те же численные значения что и частица, и некоторые характеристики с противоположным знаком. Так частица и античастица имеют одинаковые массы и спины и противоположные значения зарядов.



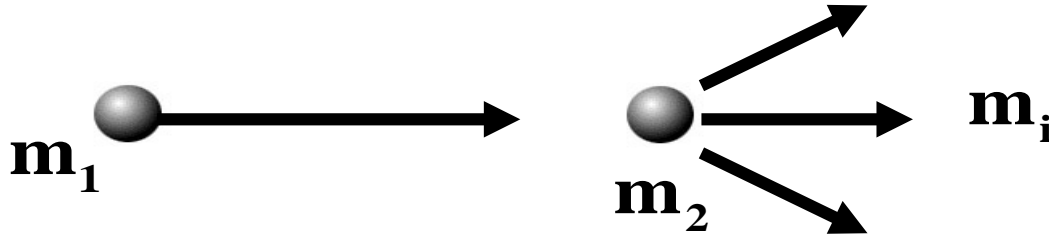
# Зачем нужны ускорители?

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}, \quad E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$



# Порог реакции

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$



Энергия реакции  $Q$

$$Q = (m_i - m_1 - m_2) c^2$$

$$E_{\text{порог}} = \frac{(m_i - m_1 - m_2) (m_i + m_1 + m_2)}{2m_2} c^2$$

Нерелятивистский случай

$$E_{\text{порог}} = |Q| \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right)$$

# Порог реакции

Частица массы  $m_1$  налетает на покоящуюся частицу массы  $m_2$ . В результате реакции в конечном состоянии образуется  $n$  частиц с массами  $m'_1, \dots, m'_n$ .

**Законы сохранения импульса и энергии**

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 + \dots + \vec{p}'_n, \quad E_1 + m_2 c^2 = E'_1 + E'_2 + \dots + E'_n.$$

Энергия  $E$  и импульс частицы  $p$  связаны соотношением

$$E^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2.$$

Величина  $(\sum E_i)^2 - (c \sum p_i)^2 = inv$  является релятивистским инвариантом, т.е. одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

На пороге реакции все частицы в конечном состоянии покоятся друг относительно друга. Релятивистский инвариант в начальном состоянии в лабораторной системе координат и в конечном состоянии в системе центра инерции.

$$(E_1 + m_2 c^2)^2 - c^2 p_1^2 = (m'_1 + m'_2 + m'_n)^2 c^4 = \left(\sum m'_i\right)^2 c^4.$$

Выразим импульс  $p_1$  налетающей частицы через её кинетическую энергию  $T_1$

$$c^2 p_1^2 = E_1^2 - m_1^2 c^4, \quad T_1 = E_1 - m_1 c^2,$$

**пороговая кинетическая энергия налетающей частицы**

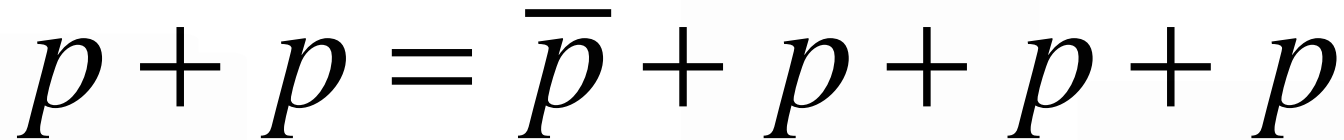
$$E_{\text{порог}} = \frac{\left(\sum m_i + m_1 + m_2\right) \left(\sum m'_i - m_1 + m_2\right)}{2m_2} c^2.$$

Энергия реакции  $Q$  равна изменению суммарной массы частиц

$$Q = \left(\sum m_i - m_1 - m_2\right) c^2.$$

# Пример

Рассчитайте порог реакции



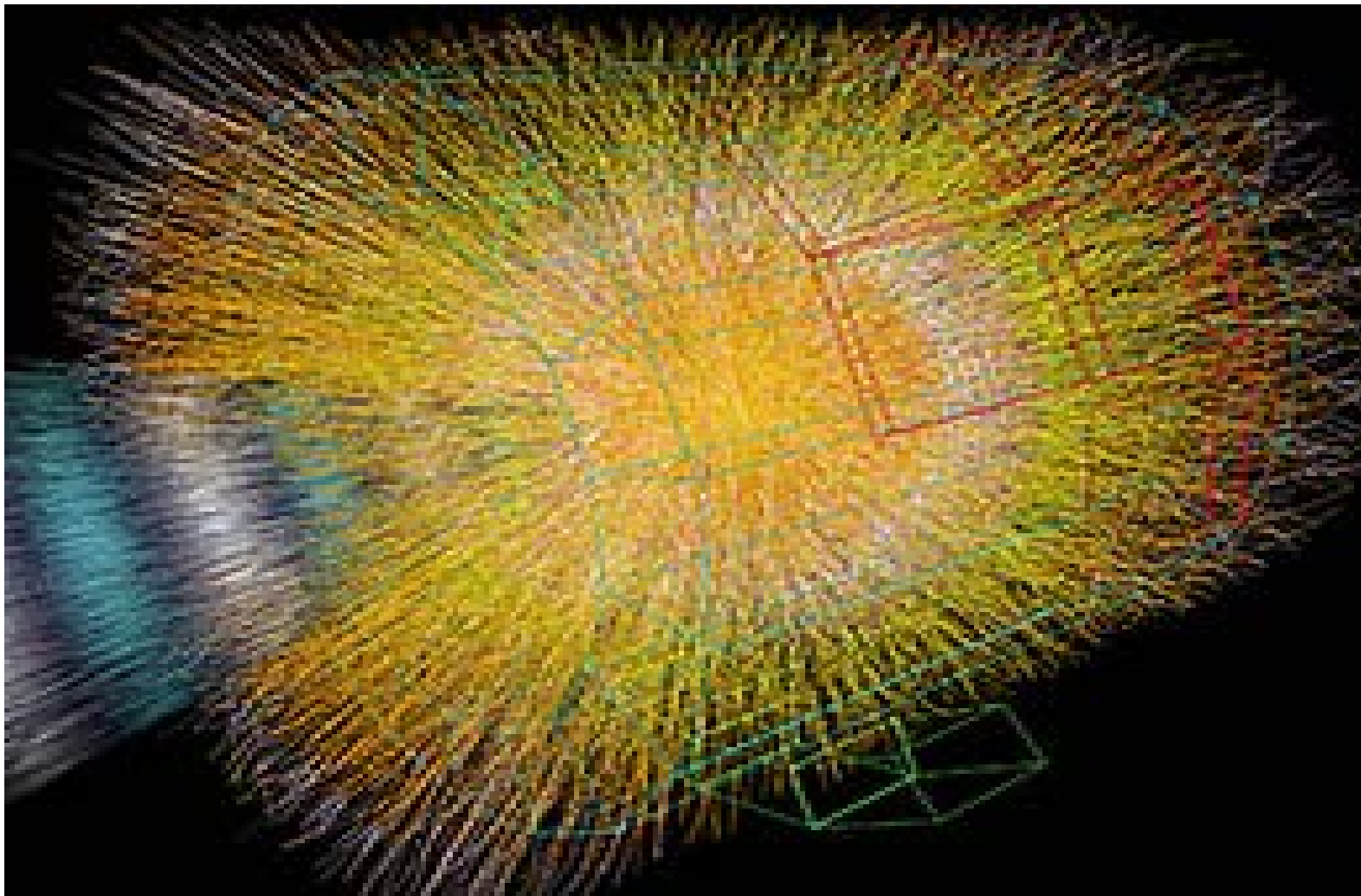
При столкновении двух протонов  $p$  образуется антипротон  $\bar{p}$  и три протона. Масса антипротона равна массе протона.

$$E_{\text{порог}} = \frac{(m_i - m_1 - m_2)(m_i + m_1 + m_2)}{2m_2} c^2$$

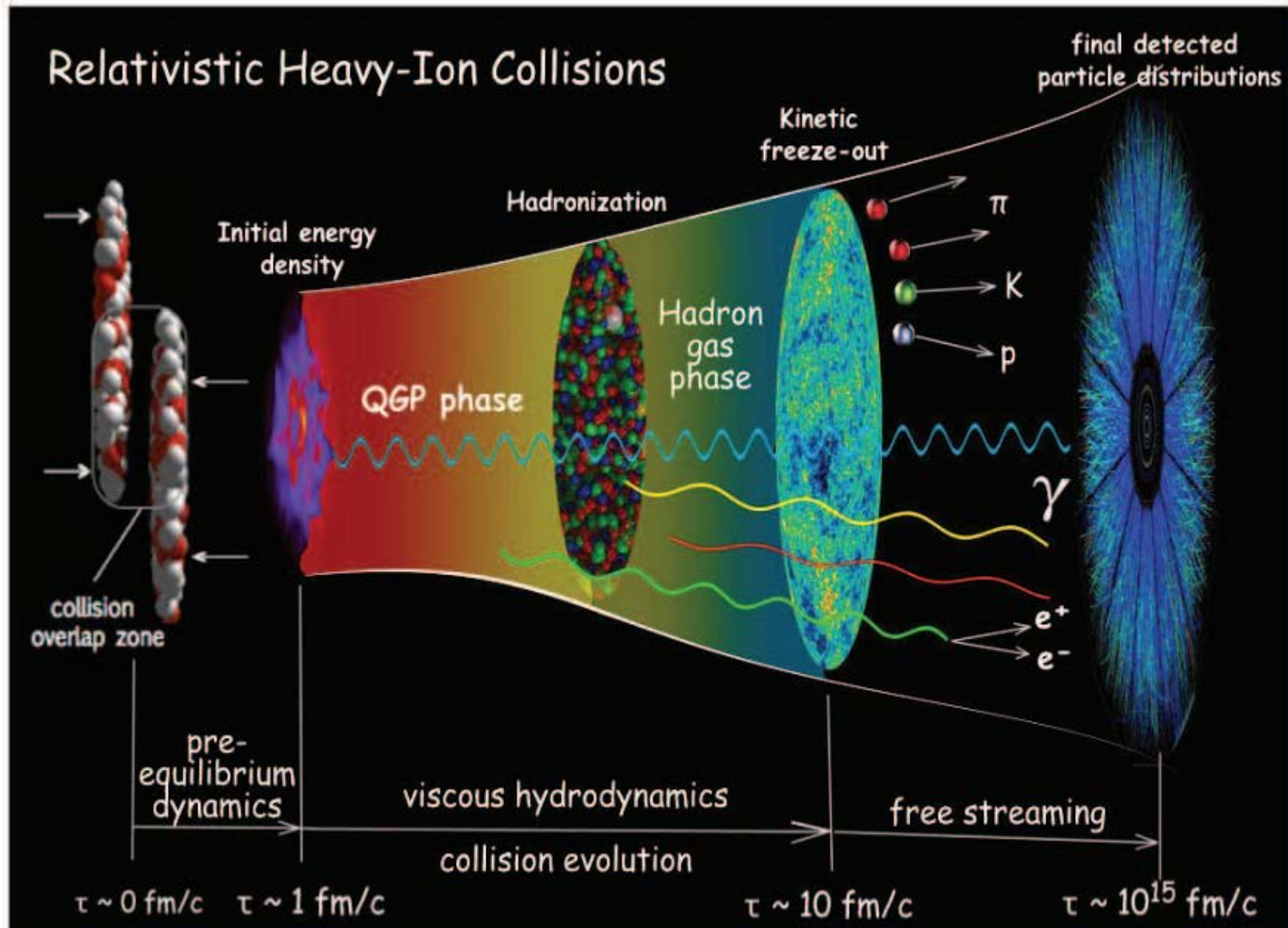
$$E_{\text{порог}} = \frac{2m_p \times 6m_p}{2m_p} = 6m_p = 5.6 \text{ ГэВ}$$

# Рождение частиц

$$E = mc^2$$



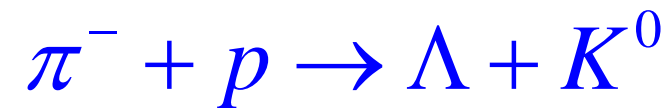
# Кварк-глюонная плазма



# 1947 Странные частицы



Д. Глезер  
1926 – 2013



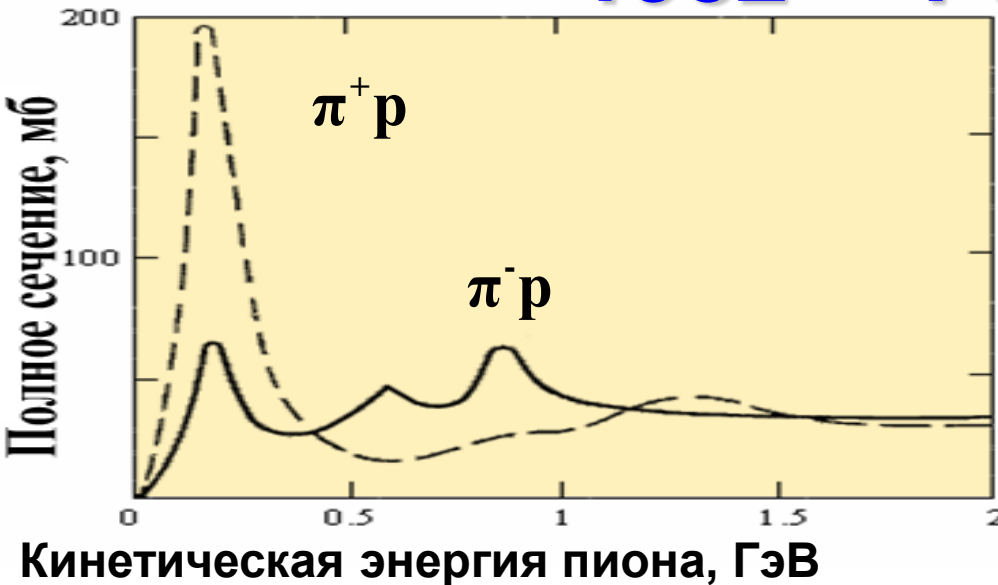
**Нобелевская премия по физике**

**1960 г. – Д. Глезер.**

За изобретение пузырьковой камеры

# 1952

# Резонансы

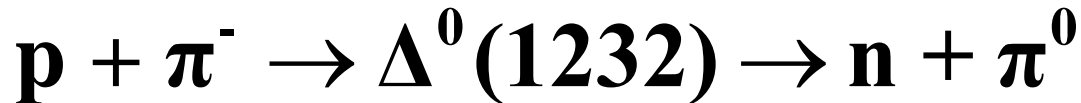


$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

100 МэВ



$10^{-23}$  с



	масса	ширина распада
$\Delta^{++}$ (uuu)	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^+$ (uud)	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^0$ (udd)	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^-$ (ddd)	1232 МэВ	120 МэВ
$\Sigma^+$ (uus)	1382 МэВ	85 МэВ
$\Xi^-$ (dss)	1535 МэВ	9.9 МэВ



# Как устроен Мир. 60-е годы XX века

**Лептоны**

$e^-$

$\mu^-$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

**Адроны**

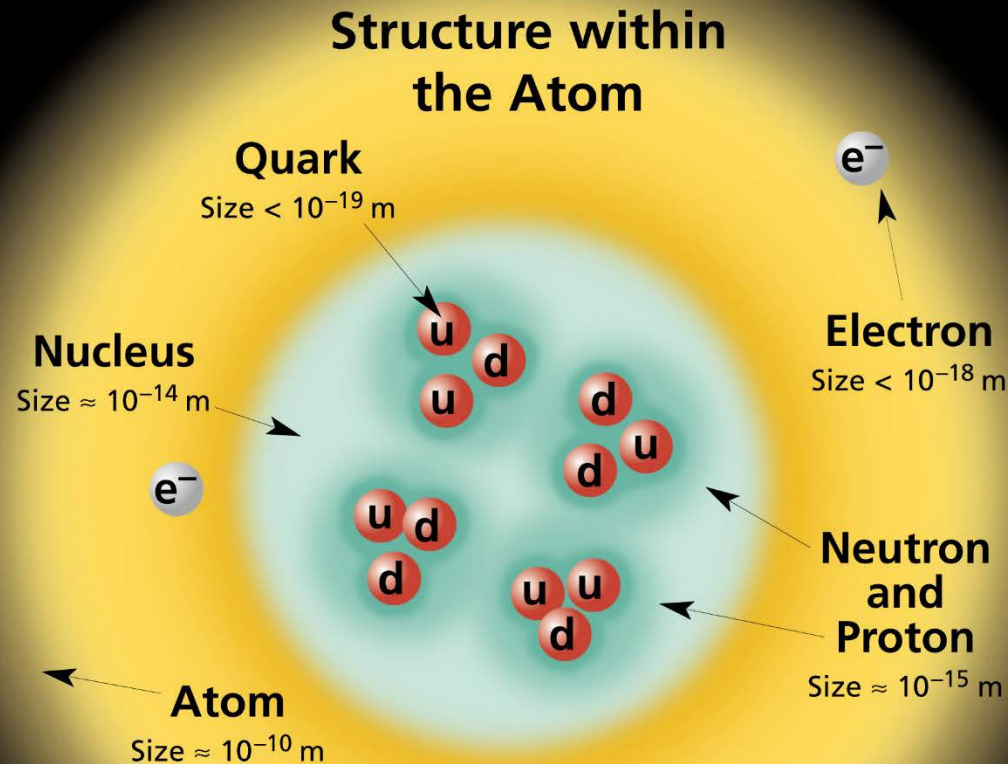
**Барионы**

$$J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

**Мезоны**

$$J = 0, 1, 2, \dots$$

# АТОМЫ. ЯДРА. Кварки



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

# Как устроен Мир

## ФЕРМИОНЫ

Спин  $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>		Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>	Электрический заряд
$\nu_e$	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$		1 поколение	$u$	up	0,003
$e$	электрон	0,0005111	$d$		down	0,006	-1/3
$\nu_\mu$	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	$c$	charm	1,3	2/3
$\mu$	мюон	0,106		$s$	strange	0,1	-1/3
$\nu_\tau$	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	$t$	top	175	2/3
$\tau$	тау	1,7771		$b$	bottom	4,3	-1/3

### Стабильные частицы

$e^-$  — электрон,  $e^+$  — позитрон

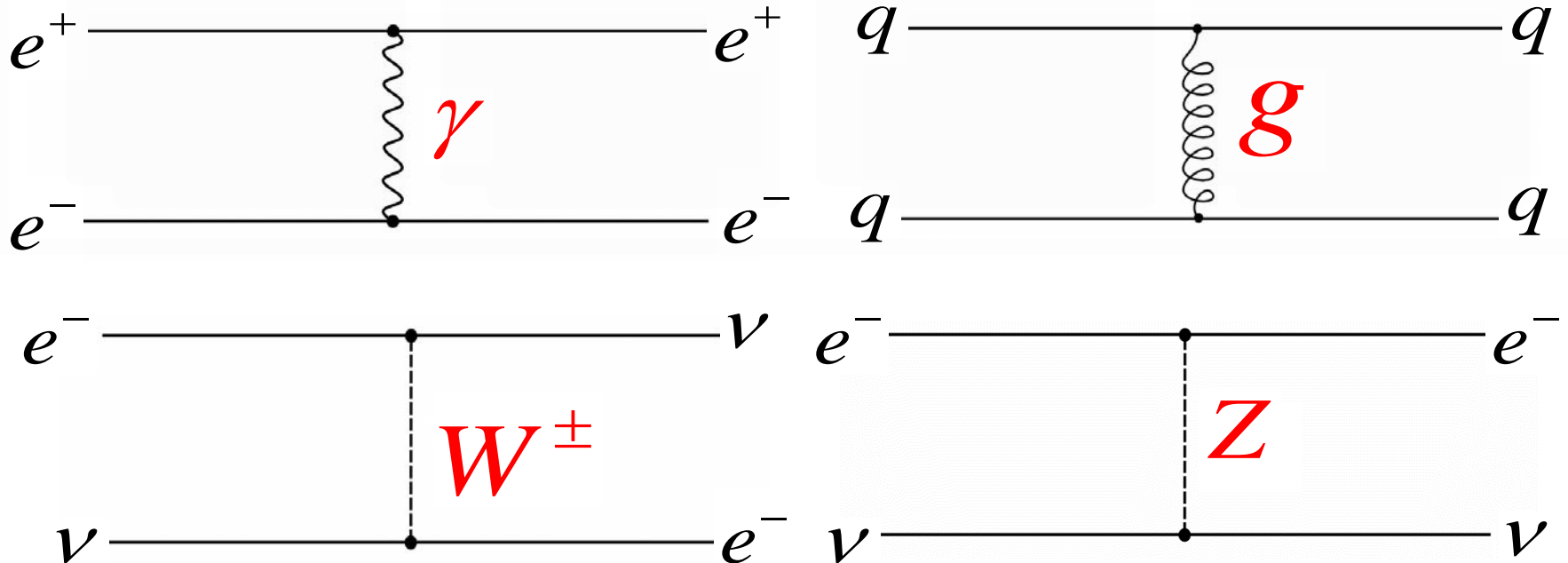
$p$  — протон,  $\bar{p}$  — антипротон

?  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

# Взаимодействия

Спин  $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	$\infty$	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+, W^-, Z$ , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$ , $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$ .	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$



# Как устроен Мир.

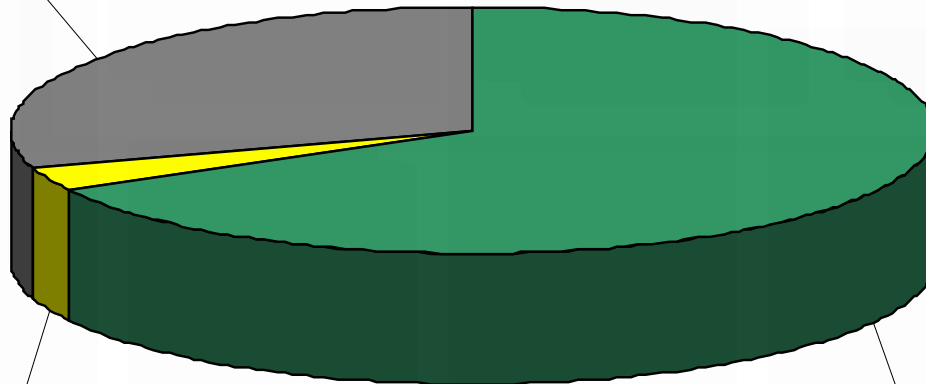
## Характеристики Вселенной

<b>БАРИОНЫ</b> в том числе, ЗВЁЗДЫ:	<b>0.02-0.05</b> <b>0.002-0.003</b>
<b>ФОТОНЫ</b>	<b><math>4.9 \cdot 10^{-5}</math></b>
<b>НЕЙТРИНО</b>	<b><math>3.3 \cdot 10^{-5}</math></b>
<b>ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ</b>	<b>0.2-0.4</b>
<b>ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)</b>	<b>0.6-0.8</b>
<b>ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ</b>	<b><math>1.02 \pm 0.02</math></b>

Темная  
материя

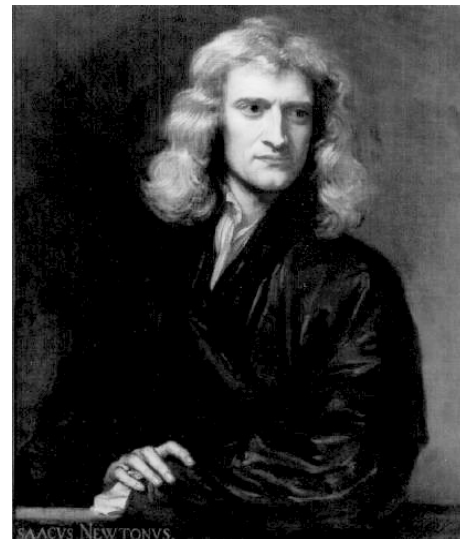
Барионы

Вакуум



# НЬЮТОН

(1642-1727)



Мельчайшие частицы материи слепляются в результате сильнейшего притяжения, образуя частицы большего размера, но уже менее склонные к притяжению; многие из этих частиц могут опять слепляться, образуя ещё большие частицы с ещё меньшим притяжением друг к другу и так далее в разных последовательностях, пока эта прогрессия не закончится на самых больших частицах, от которых зависят уже и химические реакции и цвет естественных тел, и, которые образуют, наконец, тела ощутимых размеров. Если так, то в природе должны существовать посредники, помогающие частицам вещества близко слепляться друг с другом за счет сильного притяжения. Обнаружение этих посредников и есть задача экспериментальной философии.