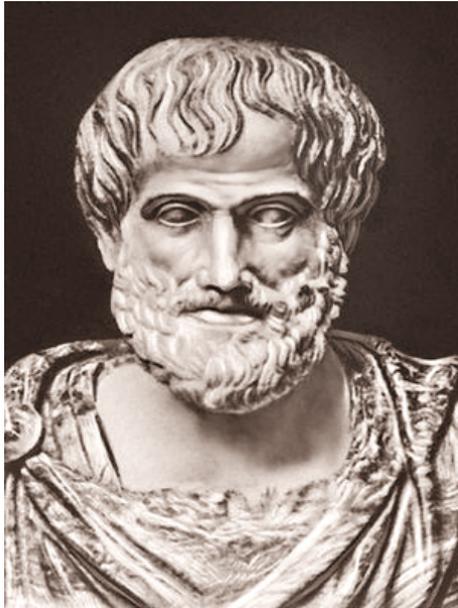


**Мир атомных ядер**

# Элементарные частицы

# Элементарные частицы вещества. Из чего всё сделано?



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



**Демокрит**  
460 – 360 до н.э.

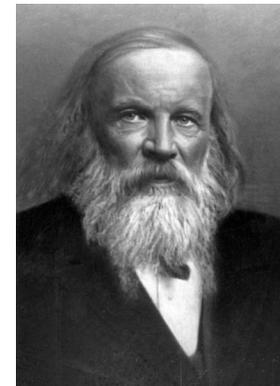


**Атом – неделимая  
частица материи**



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	113	114	115	116	117	118		

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.



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

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

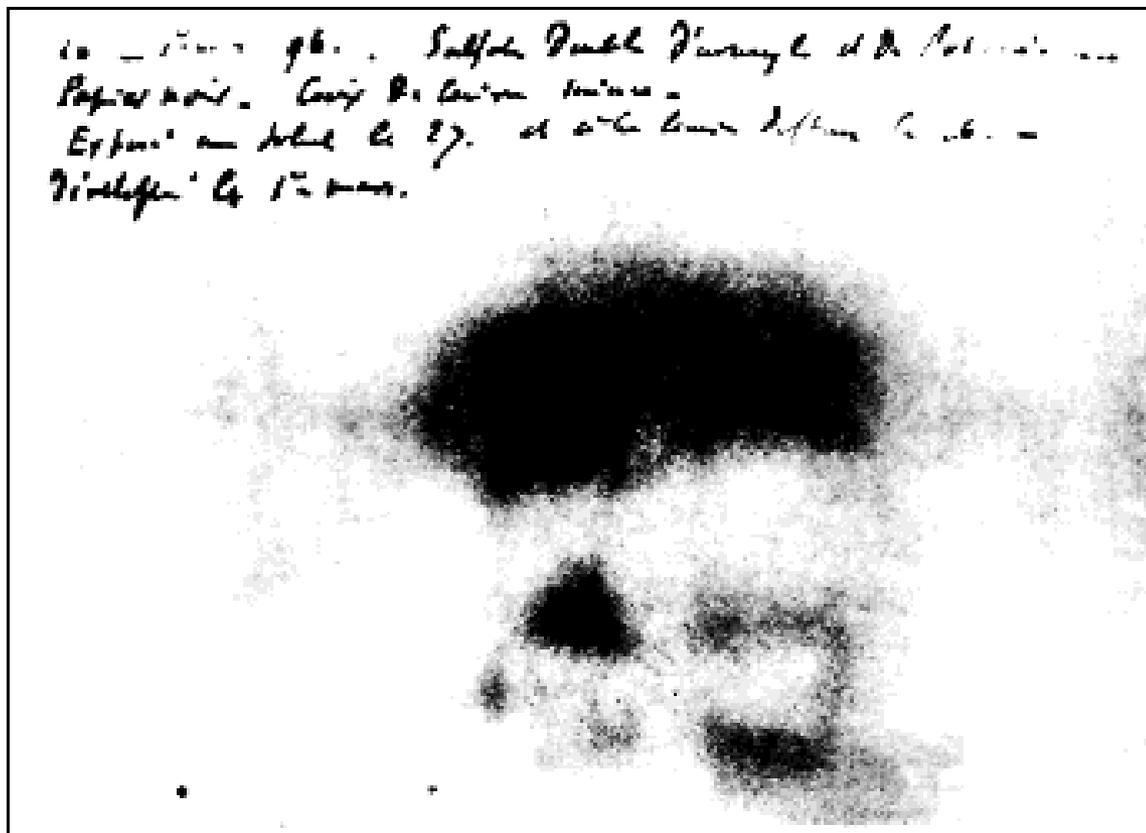
**Нобелевская премия по физике**

**1901 г. - В. Рентген.**

За открытие лучей, названных его именем

# Радиоактивность

1896 – А. Беккерель. Открытие радиоактивности



**Нобелевская премия по физике**

**1903 г. – А. Беккерель.**

За открытие радиоактивности

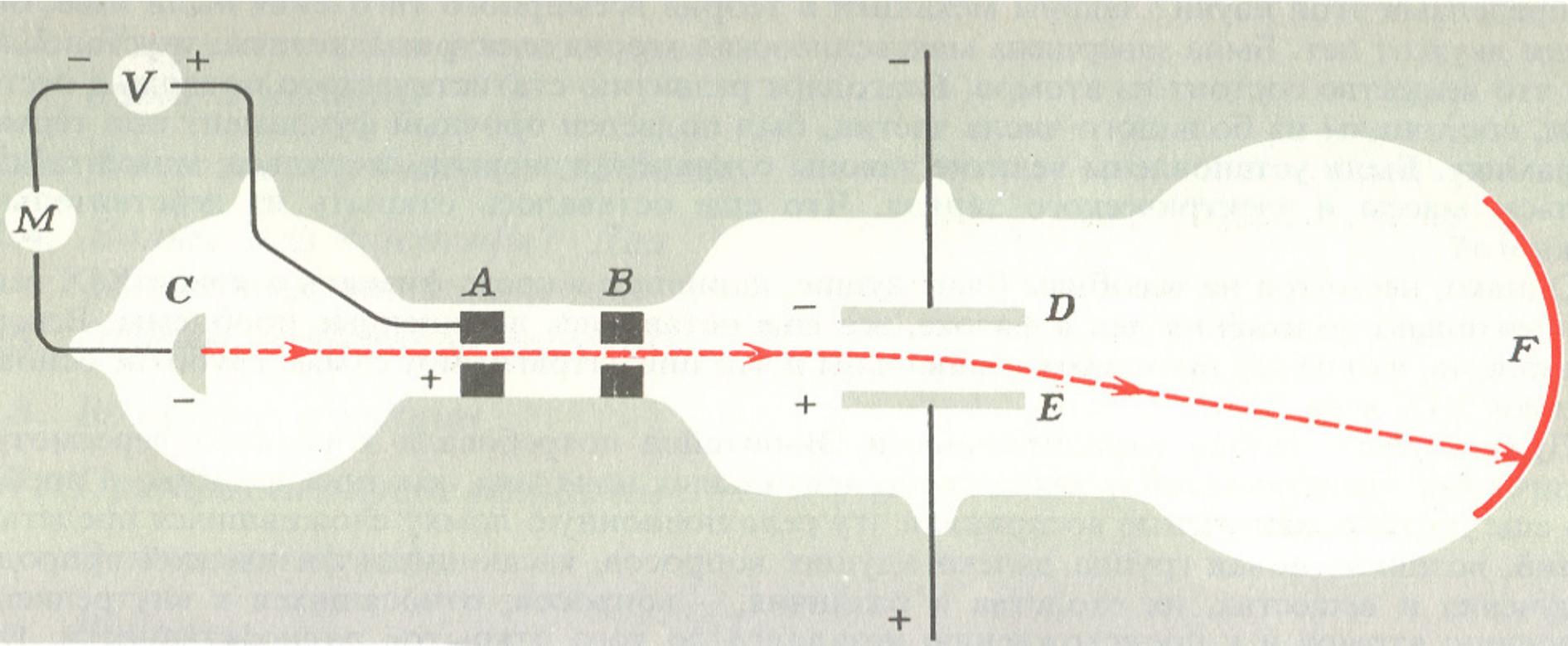
**1903 г. – П. Кюри, М. Кюри-Склодовская.**

За исследования радиоактивности

# Электрон

1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома



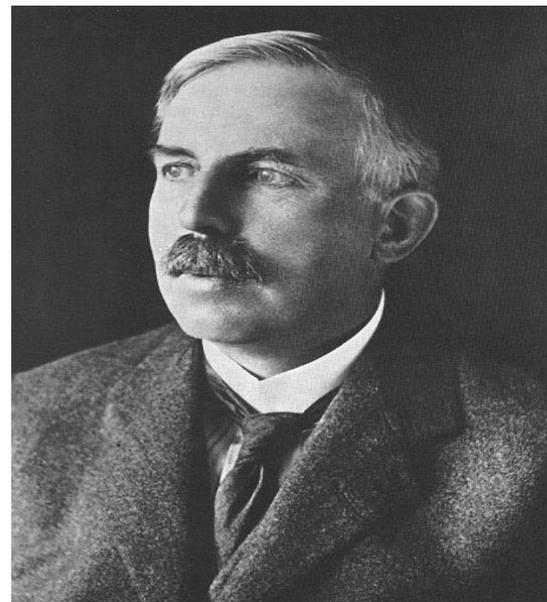
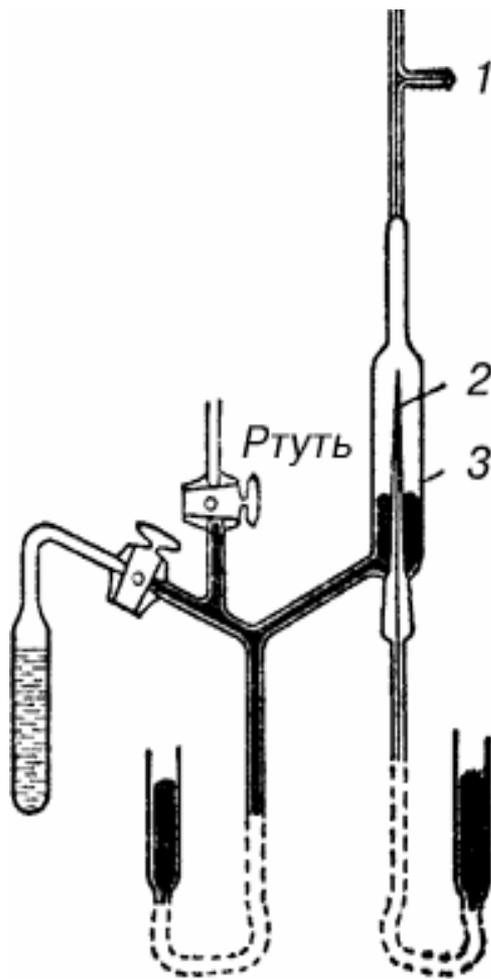
**Нобелевская премия по физике**

1906 г. – Дж. Дж. Томсон.

За большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов

**1899 г.**

Э. Резерфорд открыл, что уран излучает положительно заряженные  $\alpha$ -частицы и отрицательно заряженные  $\beta$ -частицы.



Эрнест Резерфорд  
1871 - 1937

**Нобелевская премия по химии**

**1908 г. - Э. Резерфорд**

За исследования по превращению элементов и за химические исследования радиоактивных веществ.

# 1911 г. Э. Резерфорд. Атомное ядро

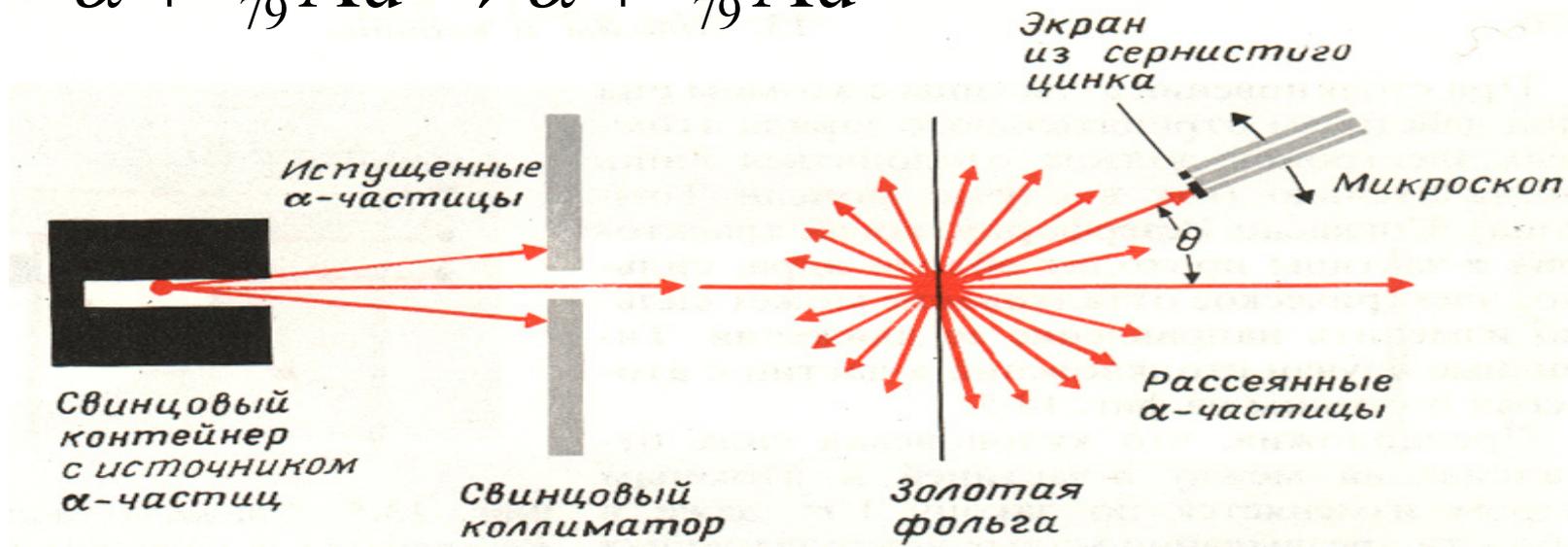
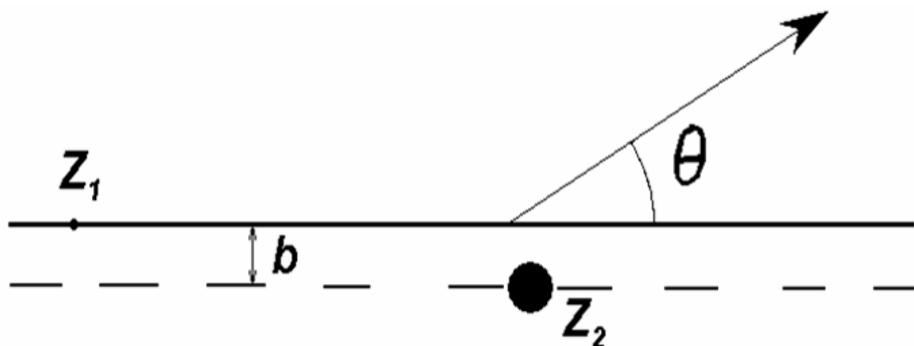


Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц



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

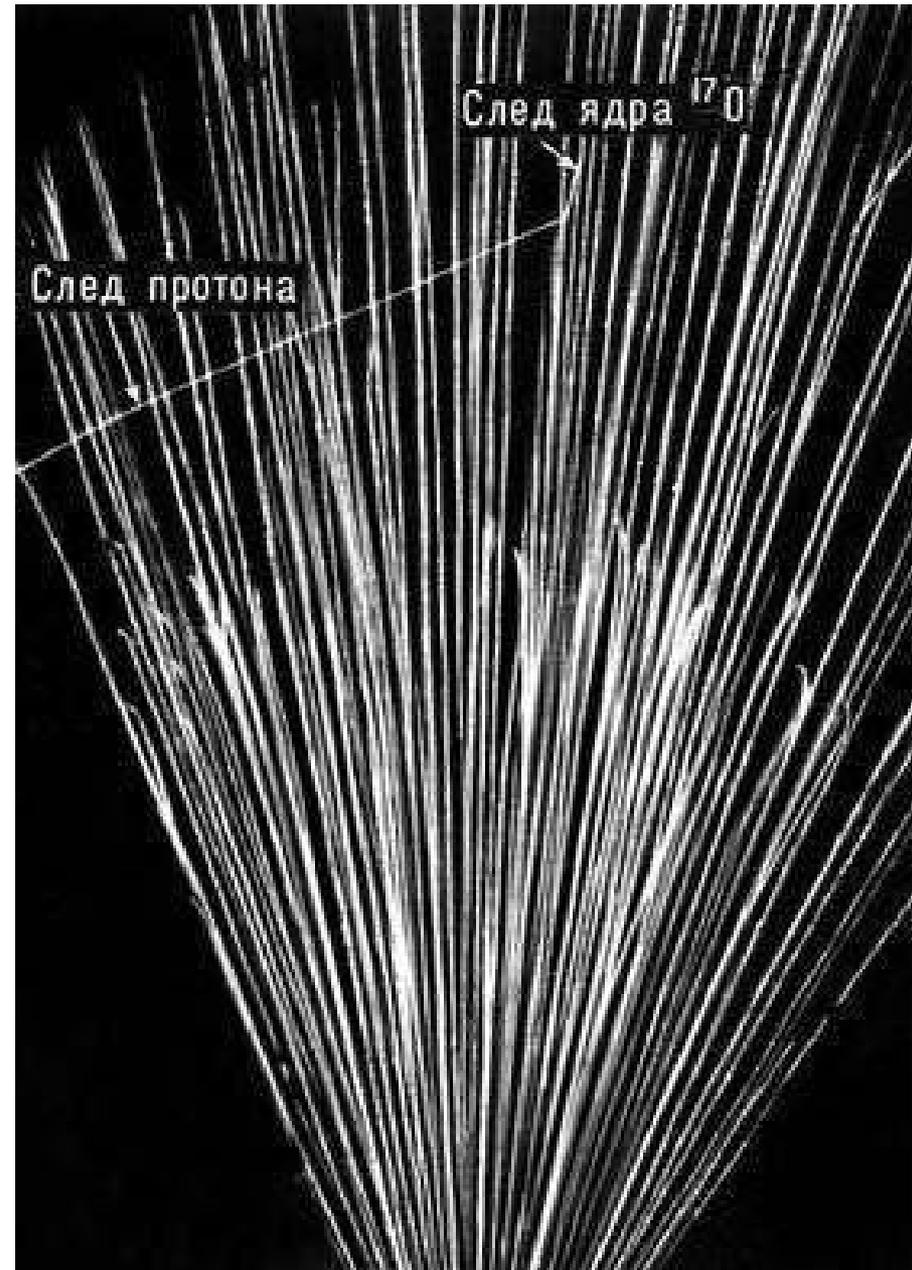
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

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

1919 г.

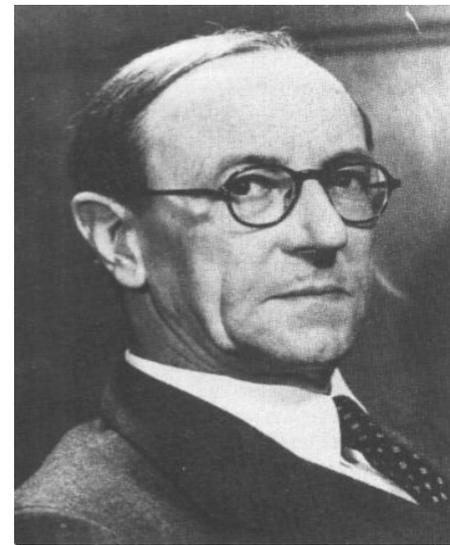
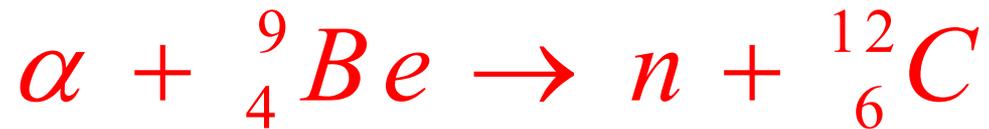
## Открытие протона

Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$  и доказал наличие в атомном ядре протонов.

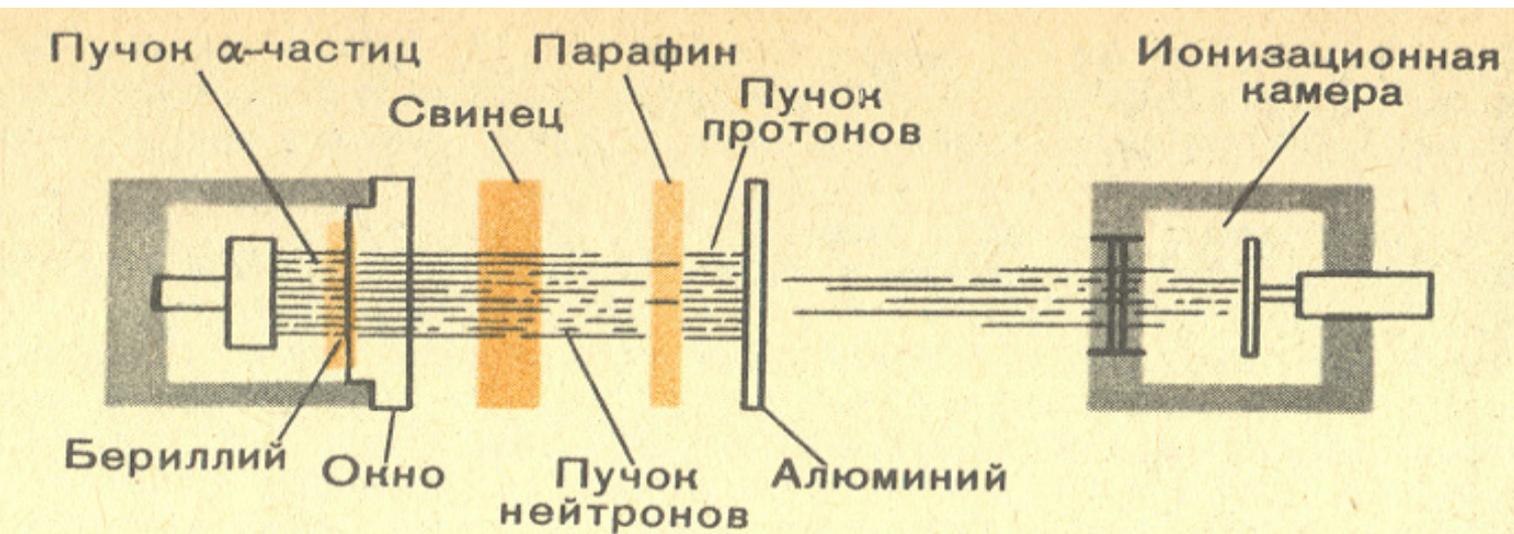


# Открытие нейтрона

1932 г.



Дж. Чедвик  
1891 - 1974



Нобелевская премия по физике

1935 г. – Дж. Чедвик

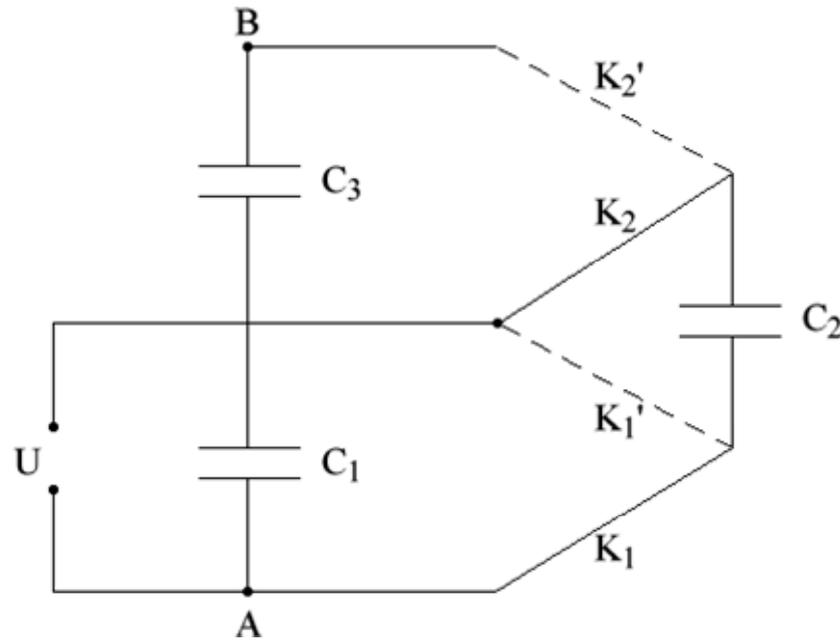
За открытие нейтрона

# Как устроен Мир. 30-е годы XX века



В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

# Каскадный генератор



Первый ускоритель прямого действия — **каскадный генератор** на энергию 700 кэВ — был создан в 1931 г. в Англии Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном. Принцип работы каскадного генератора поясняет рисунок.

При нижнем положении ключей  $K_1$  и  $K_2$ , показанном сплошной линией, конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  заряжаются до напряжения источника. При переключении ключей  $K_1$  и  $K_2$  в верхнее положение  $K_1'$  и  $K_2'$  происходит заряд конденсатора  $C_3$ , что повышает разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$ . При нескольких последовательных переключениях ключей  $K_1$  и  $K_2$  напряжение между точками  $A$  и  $B$  удваивается. Увеличивая число конденсаторных ячеек можно утроить, учетверить и т.д. напряжение. Увеличение разности потенциалов каскадного генератора ограничено пробойным напряжением изоляторов.

# Каскадный генератор



**John Douglas Cockcroft**  
(1897-1967)



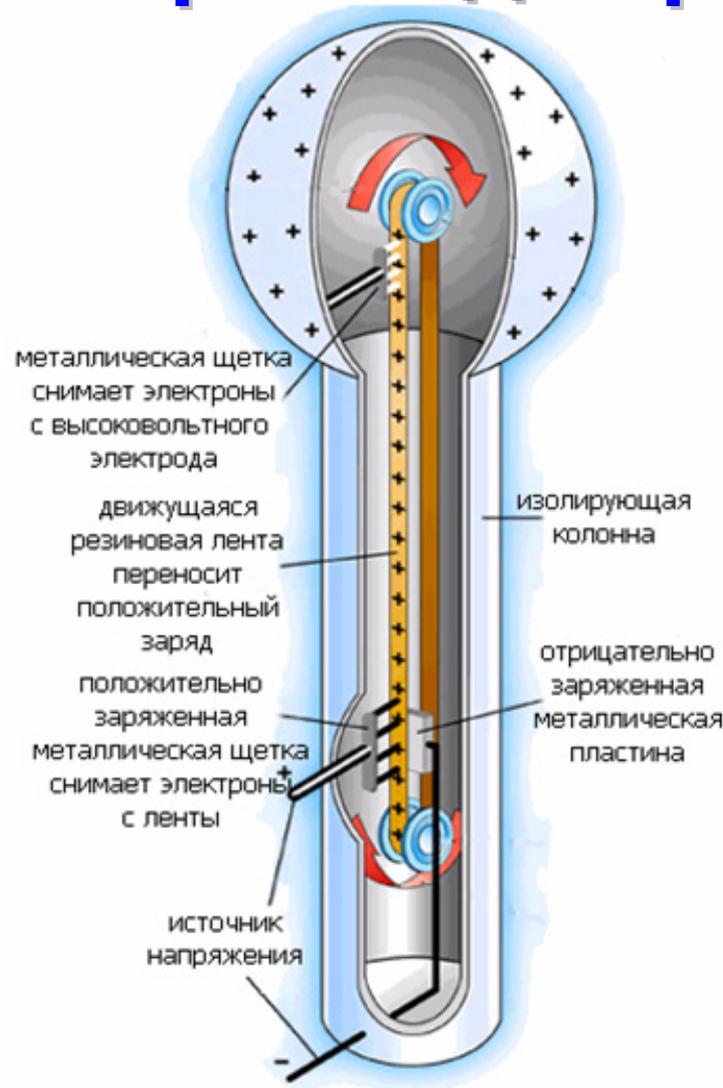
**Ernest Thomas Sinton Walton**  
(1903-1995)

**Нобелевская премия по физике**

**1951 г.** – Дж. Кокрофт и Э. Уолтон

**За пионерскую работу по трансмутации атомных ядер с помощью искусственно ускоренных атомных частиц.**

# Генератор Ван де Граафа

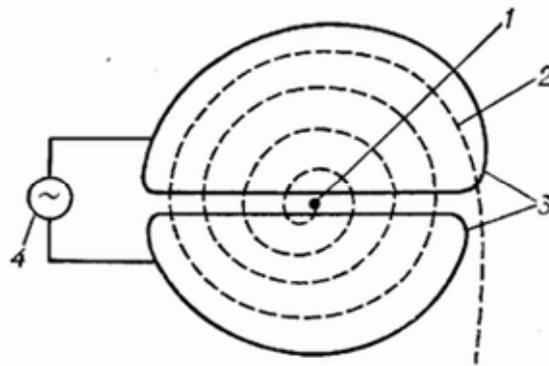


Широко используемым ускорителем прямого действия является **электростатический генератор (генератор Ван де Граафа)**, в котором частицы или ионы ядер ускоряются непосредственно за счет одно- или двукратного (в тандемах) прохождения постоянной разности потенциалов  $V$ , достигающей 20 миллионов вольт.

# Циклотрон

В 1930 году Э. Лоуренс (США) построил первый циклический ускоритель – циклотрон на энергию протонов 1 МэВ (его диаметр был 25 см). Помимо протонов он позволял получать дейтроны с энергией до 6 МэВ. Схема устройства циклотрона показана на рисунке. Тяжелые заряженные частицы (протоны, ионы) ускоряются в циклотроне переменным ускоряющим полем фиксированной частоты, приложенным к ускоряющим электродам (их два и они называются дуантами). Частицы с зарядом  $Ze$  и массой  $m$  движутся в постоянном однородном магнитном поле напряженности  $B$ , направленном перпендикулярно плоскости движения частиц, по раскручивающейся спирали. Радиус  $R$  траектории частицы, имеющей скорость  $v$ , определяется формулой

$$R = \frac{mvc}{ZeB}$$



- 1 – источник тяжелых заряженных частиц;
- 2 – орбита ускоряемой частицы;
- 3 – ускоряющие электроды (дуанты);
- 4 – генератор ускоряющего поля. Однородное магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка.

# Циклотрон



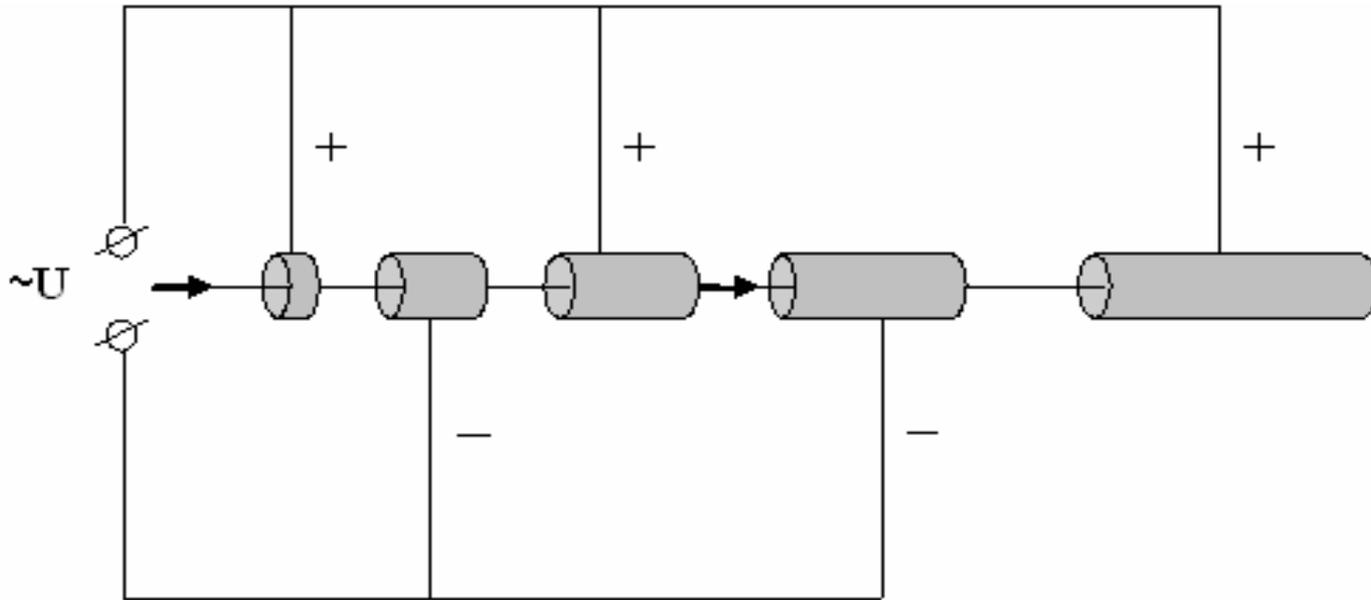
**Ernest Orlando Lawrence  
(1901-1958)**

**Нобелевская премия по физике**

**1939 г. – Э. Лоуренс**

**За изобретение и создание циклотрона и за результаты, полученные на нем в особенности связанные с искусственными радиоактивными элементами.**

# Линейные ускорители



$$l = \frac{1}{2} v T$$

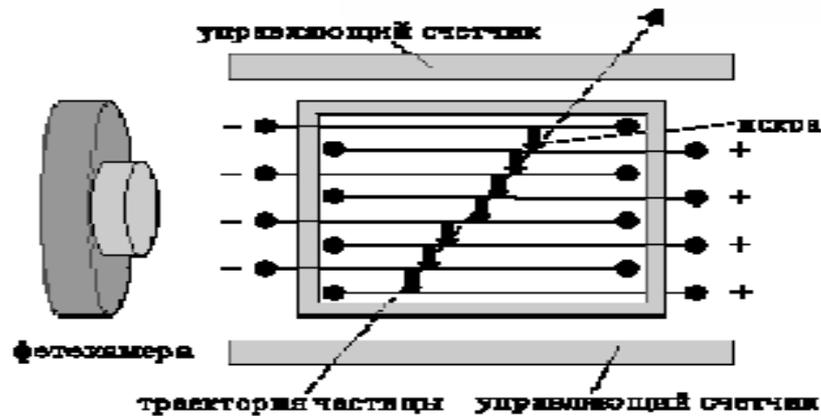
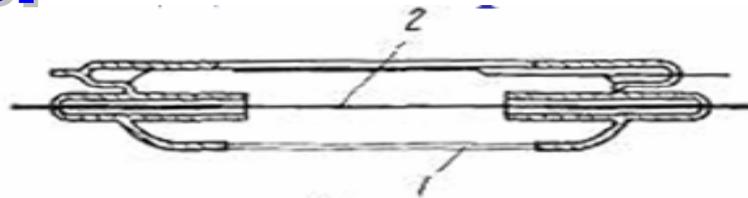
$l$  – длина трубки

$v$  – скорость частицы

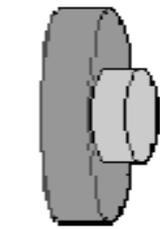
$T$  – период ВЧ-поля  $U$

# Детекторы

## Счетчик Гейгера

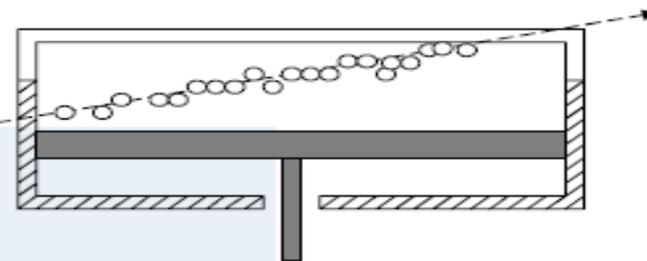


Управляемая искровая камера



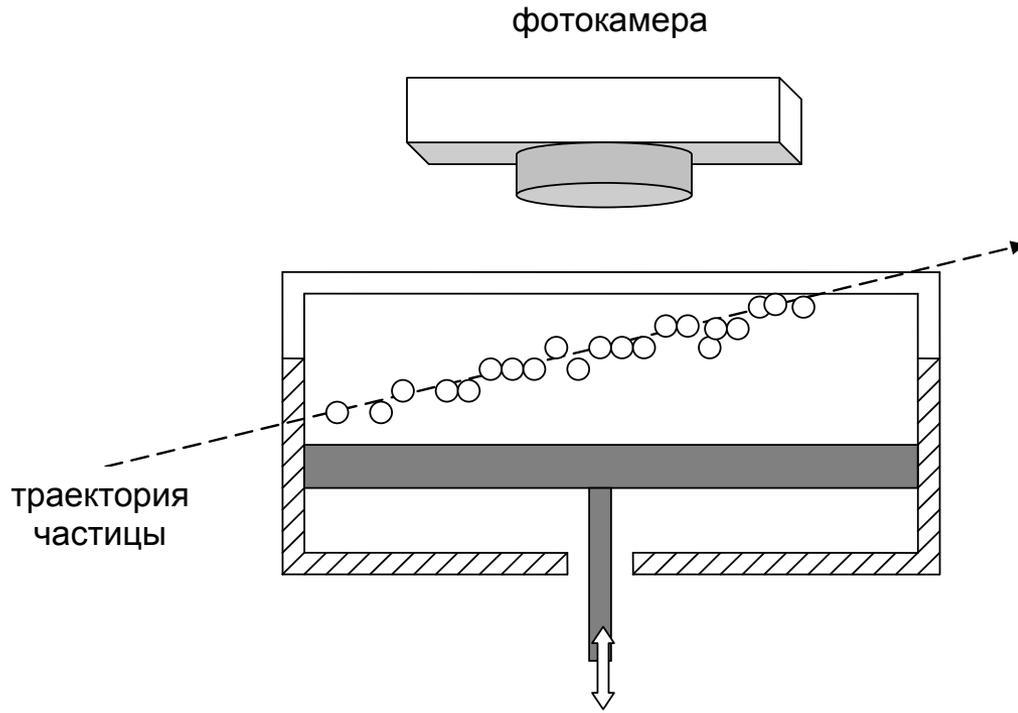
фотокамера

## Камера Вильсона



Фотоумножитель и сцинтиллятор

# Камера Вильсона



В камере Вильсона треки заряженных частиц становятся видимыми благодаря конденсации перенасыщенного пара на ионах газа, образованных заряженной частицей. Перенасыщение достигается быстрым уменьшением давления за счёт расширения рабочего объёма. На ионах конденсируются капли жидкости, которые вырастают до размеров достаточных для наблюдения ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$  см) и фотографирования при хорошем освещении. Пространственное разрешение камеры Вильсона обычно  $\approx 0.3$  мм. Рабочей средой чаще всего является смесь паров воды и спирта под давлением 0.1–2 атмосферы (водяной пар конденсируется главным образом на отрицательных ионах, пары спирта – на положительных).

# Ч. Вильсон



Charles Thomson Rees Wilson  
(1869-1959)

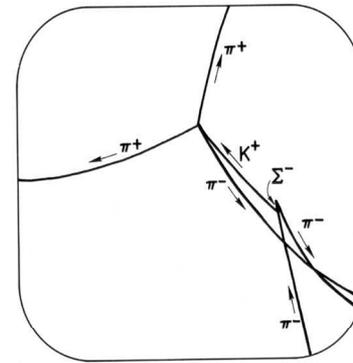
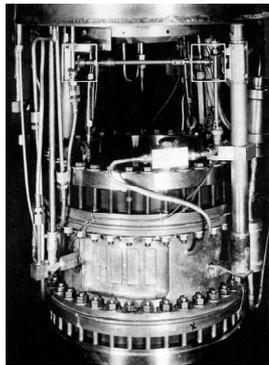
**Нобелевская премия по физике**

**1927 г. – Ч. Вильсон**

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

# Пузырьковая камера

В пузырьковой камере используется свойство чистой перегретой жидкости вскипать (образовывать пузырьки пара) вдоль траектории заряженной частицы. Перегретая жидкость – это жидкость, нагретая до температуры большей температуры кипения для данных условий. Вскипание жидкости происходит при появлении центров парообразования, например, ионов. Таким образом, если в камере Вильсона заряженная частица инициирует на своём пути превращение пара в жидкость, то в пузырьковой камере заряженная частица вызывает превращение жидкости в пар.



Перегретое состояние достигается быстрым (5–20 мс) уменьшением внешнего давления. На несколько миллисекунд камера становится чувствительной и способна зарегистрировать заряженную частицу. После фотографирования треков давление поднимается до прежней величины, пузырьки «схлопываются» и камера вновь готова к работе.

# Д. Глезер



Donald Arthur Glaser  
р. 1926

**Нобелевская премия по физике**

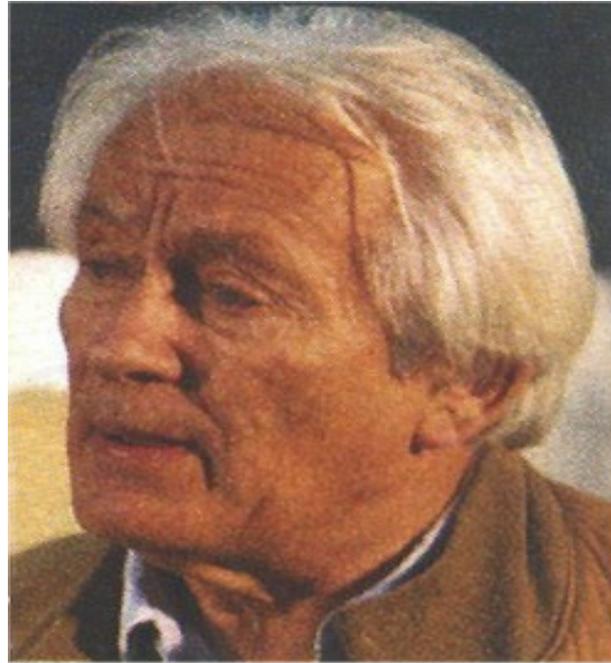
**1960 г. – Д. Глезер**

**За изобретение пузырьковой камеры**

# Искровая камера

**Искровая камера** является управляемым трековым детектором, который запускается внешними счётчиками. Искровая камера представляет собой систему последовательных искровых счётчиков. Она состоит из серии параллельных металлических пластин, пространство между которыми заполнено инертным газом. Расстояние между пластинами  $\approx 1$  см. Внешние управляющие счётчики фиксируют факт прохождения заряженной частицы через искровую камеру и инициируют подачу на её пластины короткого (10–100 нс) высоковольтного импульса чередующейся полярности так, что между двумя соседними пластинами появляется разность потенциалов  $\approx 10$  кВ. В местах прохождения частицы между пластинами возникают искровые разряды, направленные вдоль поля (перпендикулярно пластинам). Совокупность этих последовательных разрядов формирует трек частицы. Трек может быть зафиксирован либо оптическими методами (например, сфотографирован), либо электронными. В этом последнем случае пластины заменяются металлическими нитями, образующими координатную сетку. Импульсы тока, возникающие в нитях при появлении искр, регистрируются электромагнитными методами, например, с помощью ферритовых колец, нанизанных на каждую нить, и анализируются ЭВМ. Пространственное разрешение обычной искровой камеры  $\approx 0.3$  мм. Частота срабатывания 10-100 Гц. Искровые камеры могут иметь длину несколько метров.

# Г. Чарпак



Georges Charpak  
р. 1924

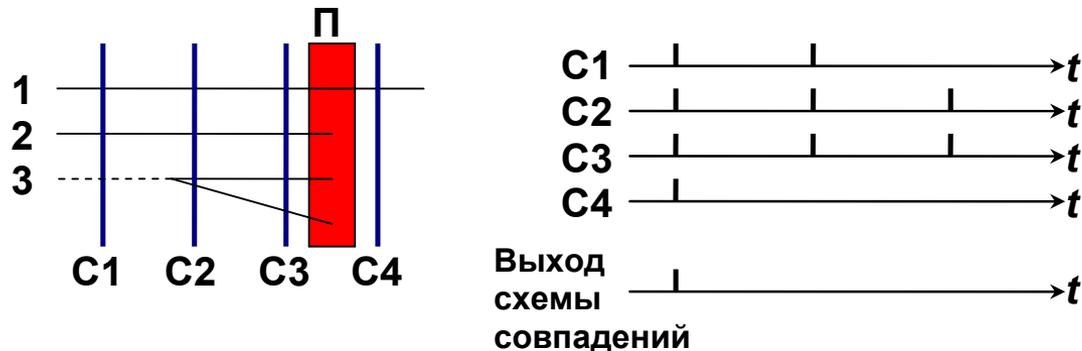
**Нобелевская премия по физике**

**1992 г. – Г. Чарпак**

**За открытие и создание детекторов частиц, в частности, многопроводочной пропорциональной камеры**

# Схемы совпадений

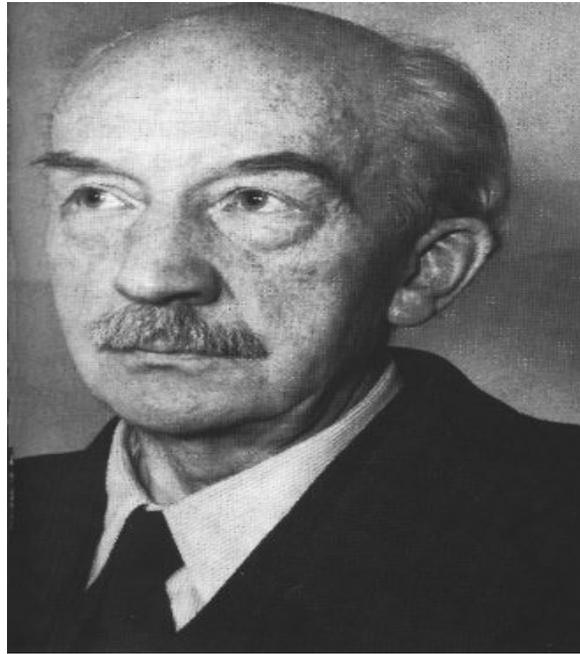
Практически все современные детекторы содержат электронные устройства для усиления, обработки и счета импульсов. В простейшем случае это может быть просто счет импульсов в течение определенного интервала времени или определение энергии отдельных частиц. Однако в большинстве случаев, особенно при детектировании частиц высоких энергий, используется несколько счетчиков. В этих случаях счетчики обычно включаются в схемы совпадений или антисовпадений, которые позволяют идентифицировать частицы, определять их энергии. Покажем это на нескольких простых примерах.



Рассмотрим установку, состоящую из 4 счетчиков импульсов С1, С2, С3, С4 и поглотителя П, расположенного между С3 и С4. Как с помощью этой установки можно определить тип и энергию частиц?

Случай 1. Высокоэнергетичный протон имеет достаточную энергию, чтобы его пробег превышал размеры установки. В этом случае будут зарегистрированы импульсы одновременно во всех четырех счетчиках. Если все четыре счетчика включены в схему совпадений, то на её выходе появится импульс, который регистрирует это событие.

# В. Боте



Walther Bothe  
(1891-1957)

**Нобелевская премия по физике**

**1954 г. – В. Боте**

**За метод совпадений и сделанные с его помощью открытия**

# Зачем нужны ускорители?

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



# Адроны — элементарные частицы?

$n$  (939.6  $MэВ$ )

$p$  (938.3  $MэВ$ )

$\Lambda$  (1116  $MэВ$ )

$\Sigma^+$  (1189  $MэВ$ )

$\Sigma^-$  (1197  $MэВ$ )

$\Sigma^0$  (1193  $MэВ$ )

$\Xi^0$  (1315  $MэВ$ )

$\Xi^-$  (1321  $MэВ$ )

$\pi^+$  (139  $MэВ$ )

$\pi^-$  (139  $MэВ$ )

$\pi^0$  (134  $MэВ$ )

$K^+$  (494  $MэВ$ )

$K^-$  (494  $MэВ$ )

# 1947 Странные частицы

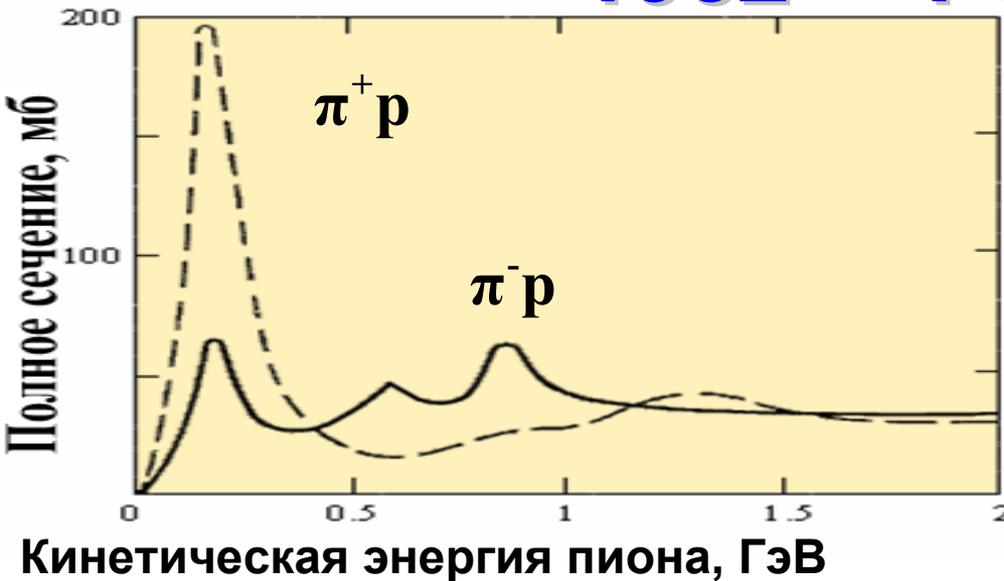


**Нобелевская премия по физике**

**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
$\Xi^-$ (dds)	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**

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

# 1963 Кварки

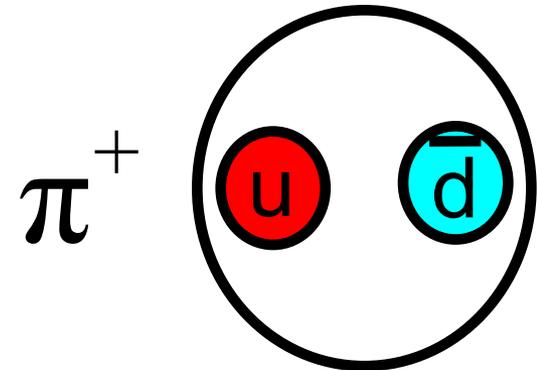
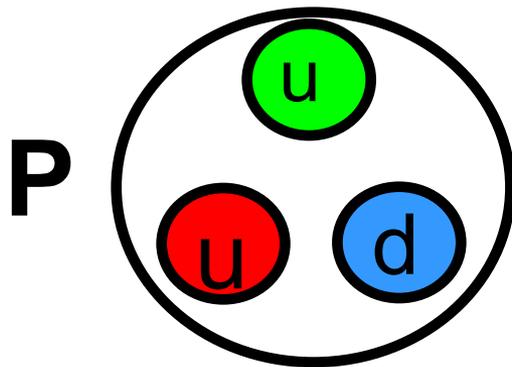


Murray Gell-Mann



George Zweig

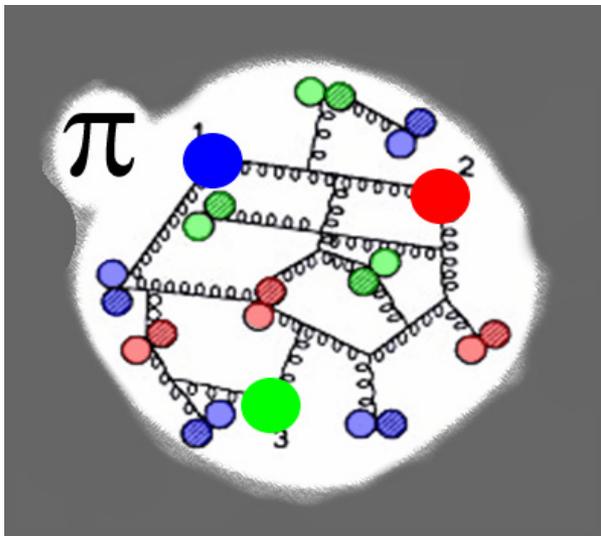
М. Гелл-Манн и Г. Цвейг предложили кварковую модель адронов. Барионы “конструировались” из трёх кварков, мезоны – из кварка и антикварка.



Нобелевская премия по физике

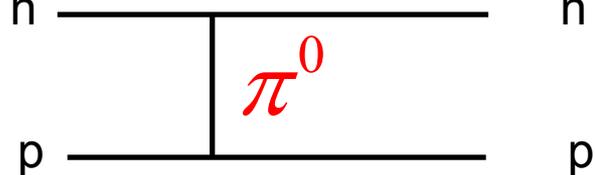
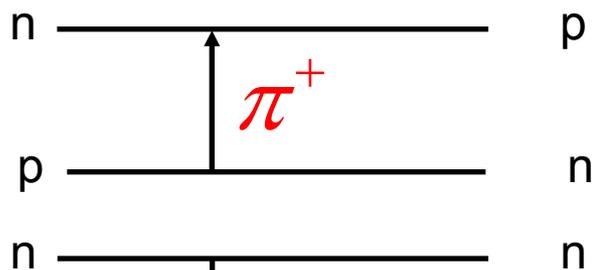
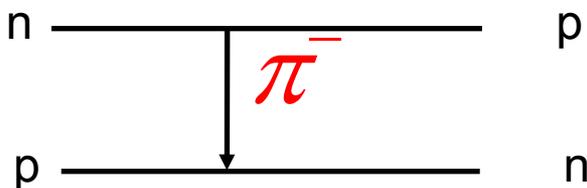
1969 г. – М. Гелл-Манн. За вклад и открытия в классификации элементарных частиц и их взаимодействий

# Структура протона



В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов  $< 10^{-17}$  см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин  $1/2$ , а заряды в единицах  $e$  либо  $+2/3$ , либо  $-1/3$ .
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.



Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

# Как устроен Мир. 2015 г.

## ФЕРМИОНЫ

Спин  $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>	1 поколение	Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>	Электрический заряд
$\nu_e$	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$		$u$	up	0,003	2/3
$e$	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

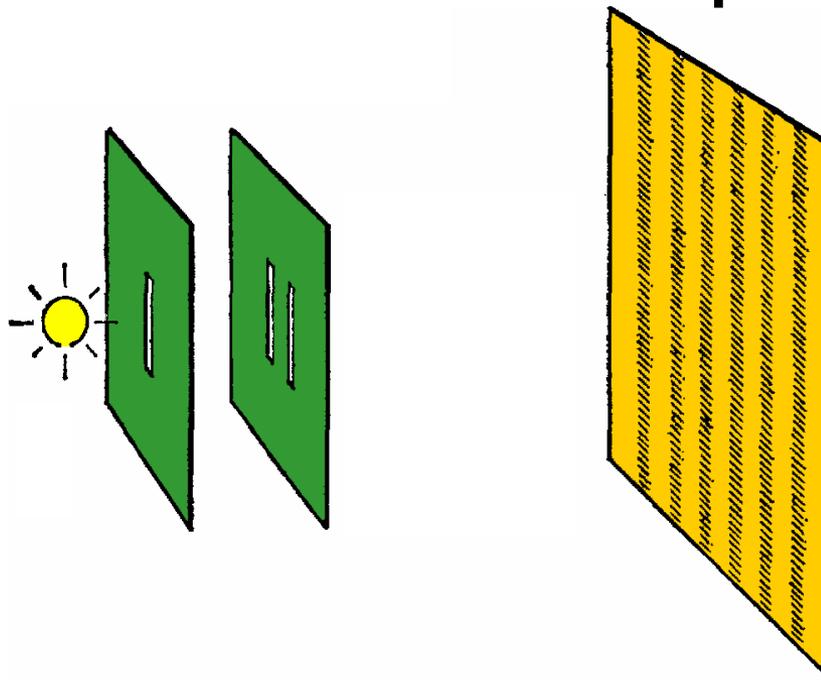
$e^-$  — электрон,  $e^+$  — позитрон

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

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

# Свет. Волна? Частица?

1801 г. Т. Юнг. Волновая теория света



В опыте Юнга свет от источника падал на непрозрачный экран с двумя близко расположенными щелями. Оказалось, что изображение на экране состоит из нескольких интерференционных полос, что наглядно демонстрируют волновую природу света. Интерференционная картина явно зависит от двух щелей порождающих две волны, которые накладываются друг на друга. Если закрыть одну из щелей интерференционная картина исчезнет.

В то же время, если заменить экран детектором, способным к регистрации отдельных частиц (например, фотопластинкой), то обнаружится, что свет, вызывающий почернение фотоземли в определённом месте, состоит из отдельных частиц – фотонов.

**В этом проявилась волновая и корпускулярная природа света.**

# Волновые свойства частиц

1924 г. Луи де Бройль. «Когда закончилась первая мировая война, я много размышлял о квантовой теории и о корпускулярно-волновом дуализме. Именно тогда меня осенила блестящая идея. Корпускулярно-волновой дуализм Эйнштейна носит всеобщий характер и распространяется на все объекты».

**Соотношения де Бройля**

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

В случае фотонов аналогичные соотношения следуют из условия квантовая энергии и релятивистской связи между энергией и импульсом для частиц с нулевой массой покоя.

$$E = cp = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



Л. Де Бройль  
1892 – 1987

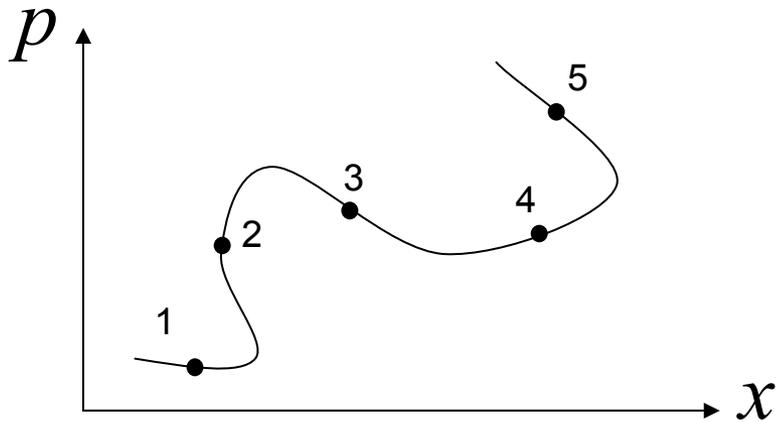
# Классическая физика

$x, p, t$

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

$$\frac{dU}{dx} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$H = U + E$$



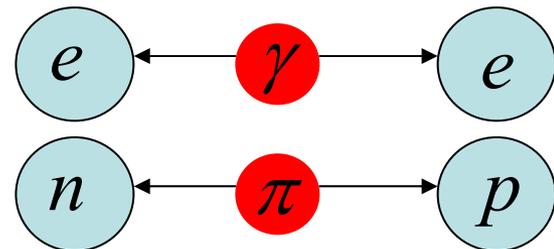
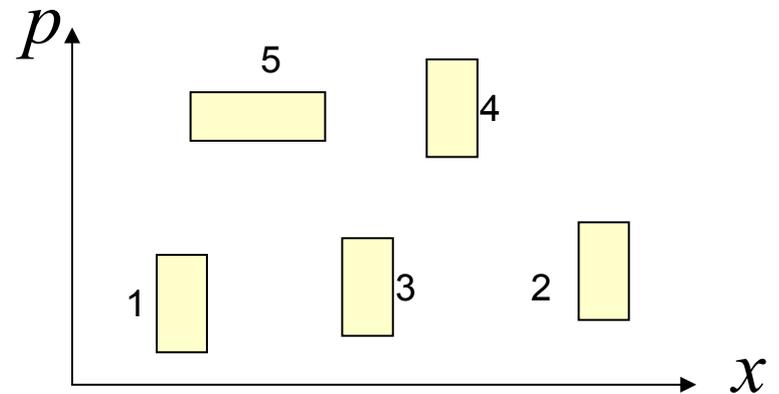
# Квантовая физика

$\psi(x, t)$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (\hat{U} + \hat{E})\psi$$

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \hbar$$

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

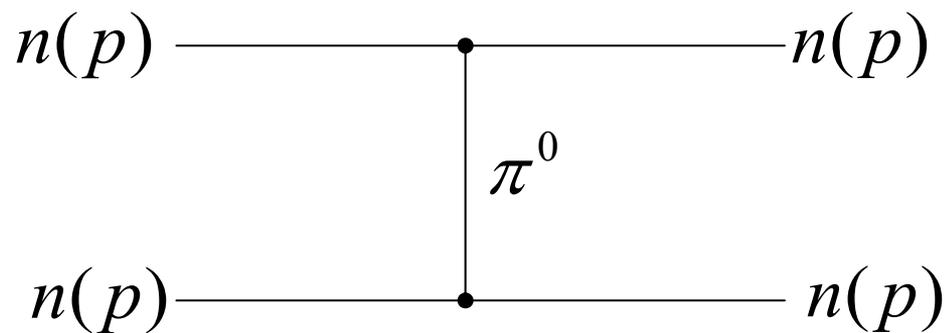
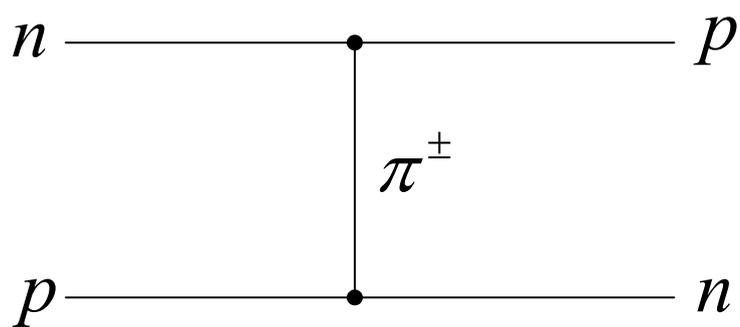
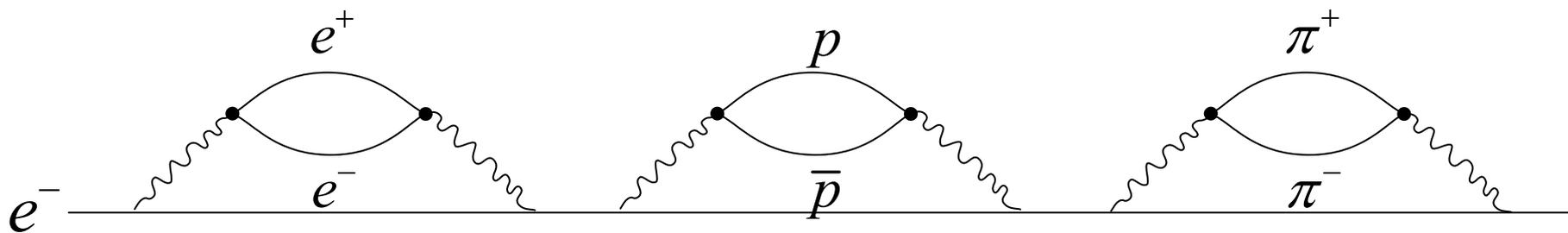


# Соотношение неопределённостей.

## Виртуальная частица

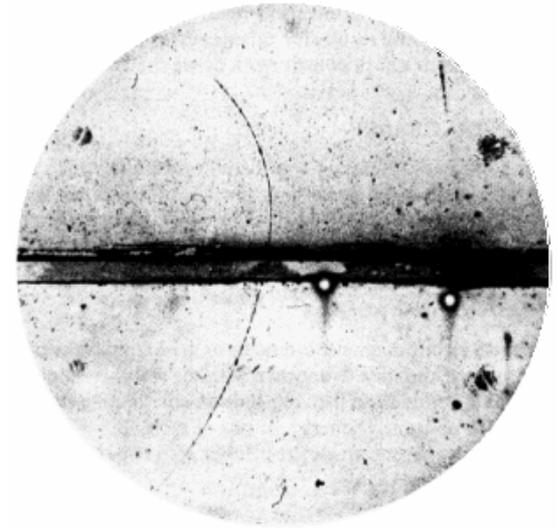
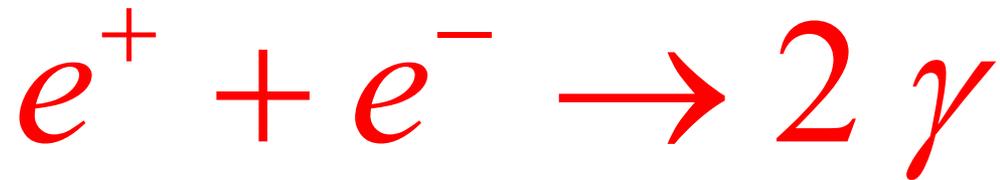
$$\Delta E \cdot \Delta T \approx \hbar$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$



# 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.

## 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

# Антипротон 1955



$$L(C_1 - C_2) = 12\text{ м}$$

$$\tau(\pi^-) = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

$$\tau(\bar{p}) = 51 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

$$C1 \quad \beta \geq 0.99$$

$$C2 \quad 0.75 \leq \beta \leq 0.79$$

Схема эксперимента  
по регистрации антипротонов

**Нобелевская премия по физике**  
1959 г. – Э. Сегре, О. Чемберлен.  
За открытие антипротона

# Антинейтрон 1956

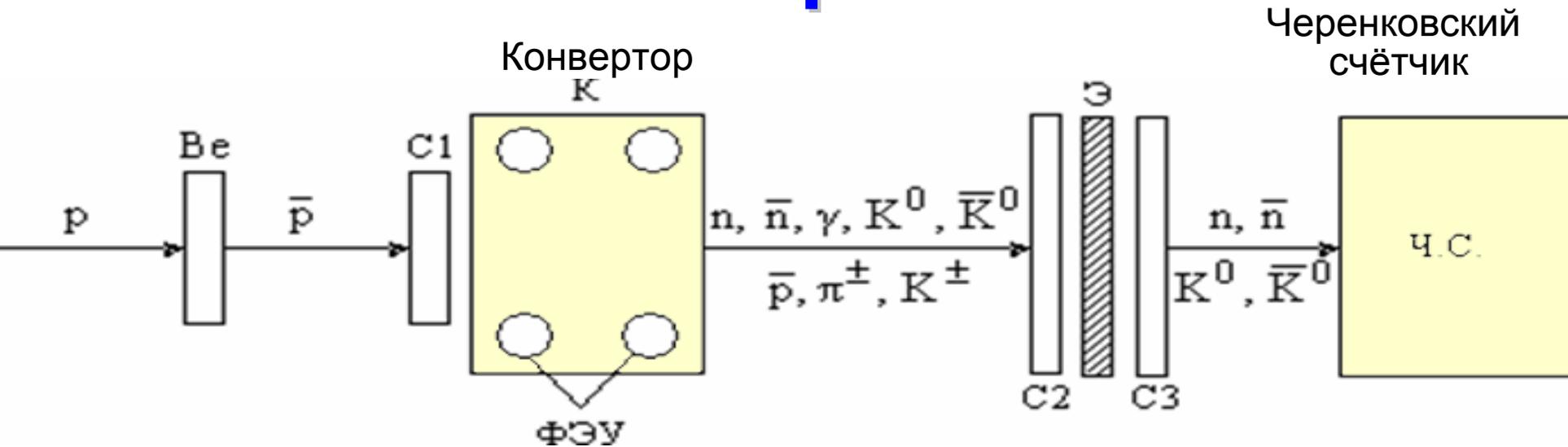
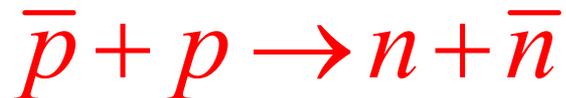


Схема эксперимента по регистрации антинейтронов



В результате  $n - \bar{n}$ -аннигиляции образуются  
сильновзаимодействующие частицы —  $\pi^-$ , К-мезоны.



# Связь характеристик частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		$M$	
Спин		$J$	
Чётность	<i>фермион</i>	$+(-)1$	$-(+ )1$
	<i>бозон</i>	$+(-)1$	$+(-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$-(+ )Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$-(+ )\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонное число		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		$I$	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$-(+ )I_3$
Странность		$-(+ )s$	$+(-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$-(+ )c$
Bottom		$-(+ )b$	$+(-)b$
Топ		$+(-)t$	$-(+ )t$
Время жизни		$\tau$	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

# 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.

# Как устроен Мир. 2015 г.

## Характеристики Вселенной

<b>БАРИОНЫ</b>	<b>0.02-0.05</b>
<b>в том числе, ЗВЁЗДЫ:</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

