

Квантовая физика от атома до нейтрино

С.Э. Коренблит

ИГУ

12/12/2019

План

- Законы физики и размерности физических величин.
- Идеальный классический газ и квантование излучения.
- Фотоэффект. Фотоны
- Иерархия физических масштабов.
- Релятивистские и квантовые представления. Вероятность.
- Атом и ядро урана. Изотопы.
- Альфа- и бета- распады и деление тяжелых ядер.
- Квантовая электродинамика. Диаграммы Фейнмана.
- Резонансы. Вглубь нуклона. Кварки.
- Калибровочные взаимодействия элементарных частиц.
- Массы элементарных частиц и бозон Хиггса.
- Осцилляции нейтрино. Эффект Вавилова-Черенкова.

Основные отличия физики от математики:

1. Все физические величины имеют свою физическую размерность.

Основные размерности: длина $L[m]$, время $t[s]$, масса $m[g]$, элект. заряд $e[кул]$.

Размерности производных физических величин диктуются определяющими их физическими законами ($\Delta X \equiv X_2 - X_1$, есть приращение величины X):

площадь $S = L^2 [m^2]$, объем $V = L^3 = SL [m^3]$,

скорость частицы $v = \frac{\Delta L}{\Delta t} \left[\frac{m}{c} \right]$, ее ускорение $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \left[\frac{m}{c^2} \right]$,

импульс частицы $p = mv$, ее момент импульса $J = pL$,

сила на частицу $F = ma = \frac{\Delta p}{\Delta t}$, или ее вес $N = mg$,

кин. энергия частицы $\varepsilon_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$, или ее пот. энергия $U = -\frac{e^2}{L}$,

или работа по их изменению $\Delta \varepsilon_k = \Delta U = \Delta A = F \cdot \Delta L = e \Delta \Phi$,

или температура газа частиц $E_{in} = N \bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} N k_B T$, T [Кельвин],

давление в нем $\Pi = \frac{F}{S}$ или (объемн.) плотность его энергии $\frac{E_{in}}{V} = \bar{u}$.

Складывать и приравнивать можно величины одинаковой размерности. Величины разной размерности можно только умножать или делить.

Примеры: 1) Полная энергия одной частицы: $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + U$.

2) Ур. сост. ид. нерел. (в т. ч. кван.) газа: $\Pi V = \frac{2}{3} E_{in}$, $\rightarrow \Pi V = \frac{M}{\mu} RT$

-- для N класс. частиц класс. ид. газа массы M , или в виде: $\Pi V = N k_B T$,

т.к. число его молей: $\frac{M}{\mu} = \frac{N}{N_A}$, а постоянная Больцмана $k_B = \frac{R}{N_A}$,

где: $N_A = \frac{1g}{m_p} = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$, -- число Авогадро -- число частиц в одном

моле любого вещества, как число протонов с общей массой в 1 грамм.

Фотоэффект. А. Эйнштейн (1905) обнаружил, что при частотах ω , таких

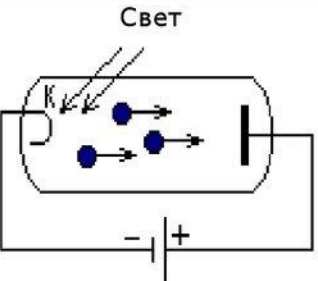
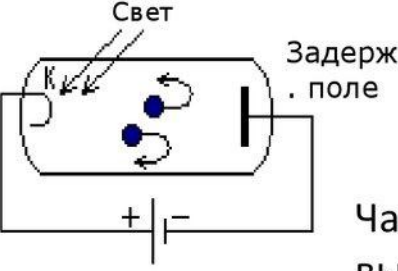
что $\frac{\hbar\omega}{k_B T} \gg 1$, излучение, как (ид. рел. квант.) газ $\Pi_\gamma V = \frac{1}{3} E_\gamma$ ведет себя

почти как класс. ид. газ $\Pi_\gamma V \approx N k_B T$ из $N = N(T)$ фотонов с энергией

$\varepsilon = \hbar\omega = pc$ и с импульсом $p = \hbar q$ у каждого кванта, с волновым

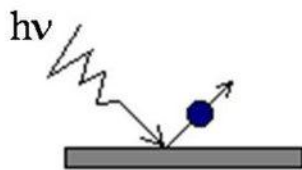
числом $q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ излучения частоты ω и длины волны λ , ($\bar{\varepsilon}_\gamma \approx 3k_B T$).

Т.е. свет, помимо известных **волновых свойств**, “одновременно” обладает **корпускулярными свойствами**, проявляющимися как при его испускании (Планк (1900)), так и в процессе его поглощения электронами атомов, молекул или металлов. Это позволило дать объяснение фотоэффекта

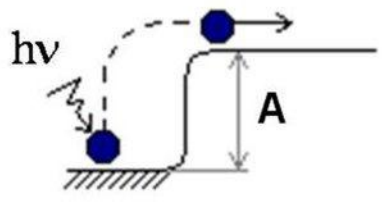



Фотоэффект объяснение Эйнштейна

Электроны поглощают свет квантами $h\nu$ (введенными Планком). Энергия кванта усваивается электроном **целиком**.

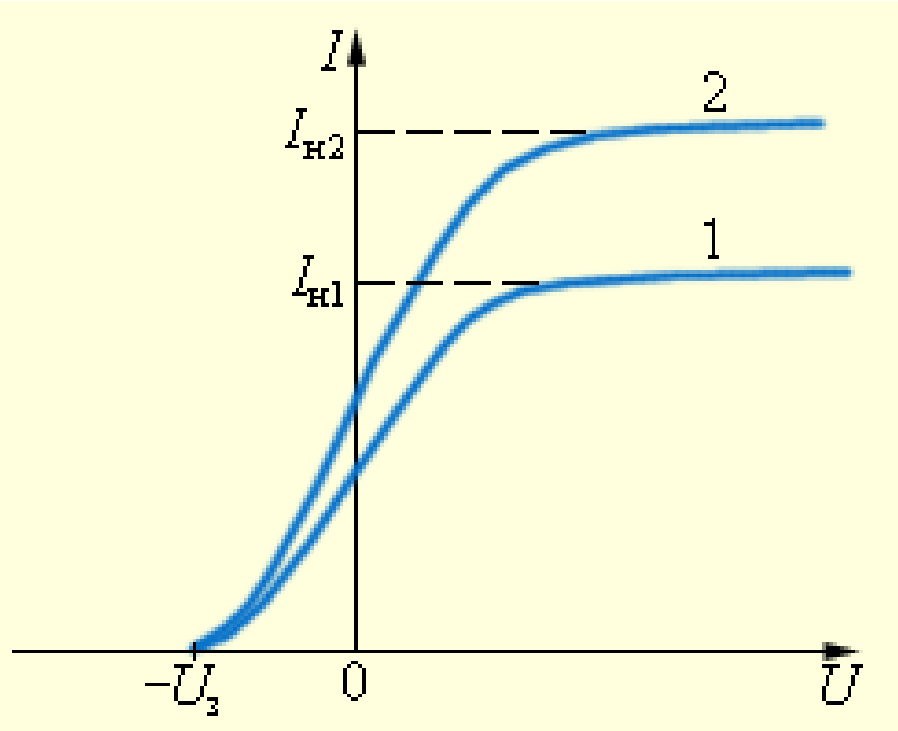
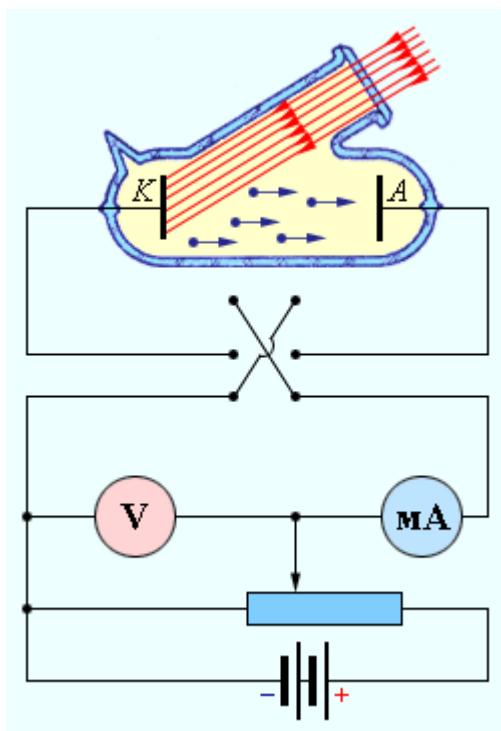


Часть энергии кванта расходуется на работу выхода электрона из металла, остальное – превращается в кинет. энергию электрона.

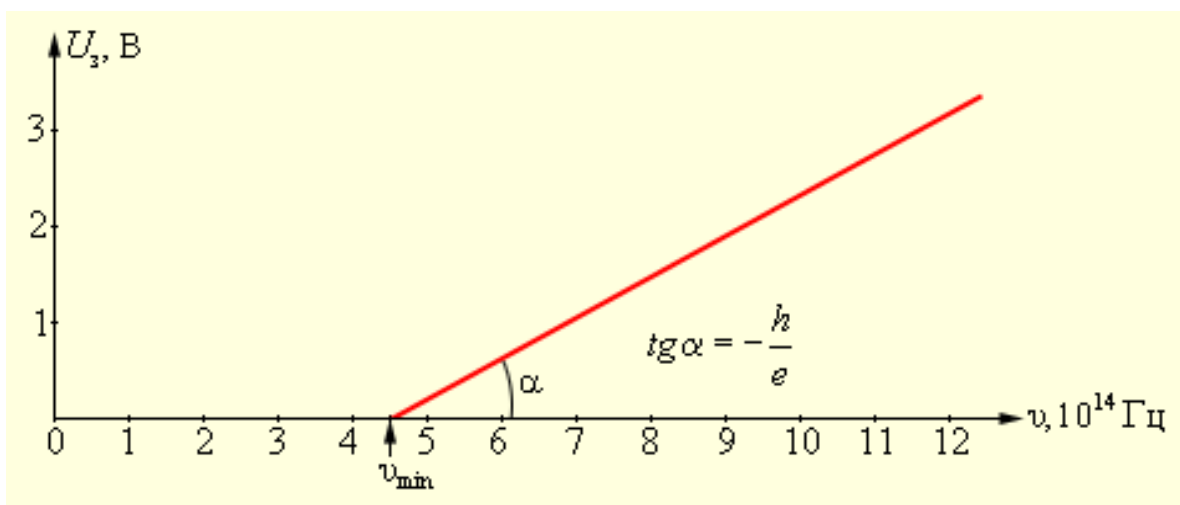


Уравнение Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{m_e v_e^2}{2}$$



Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока. I_{H1} и I_{H2} – токи насыщения, U_3 – запирающий потенциал- не зависит от интенсивности!



Зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты ν падающего света.

$$\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3 = h\nu - A, \quad \text{где: } \varepsilon = h\nu \equiv \hbar\omega, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Фототок I определяется числом фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, и прямо пропорционален интенсивности света: $1\phi \rightarrow 1e$, которая пропорциональна числу квантов в падающем световом потоке. Тогда как энергия отдельного электрона определяется только частотой света, как энергией отдельного кванта: $\varepsilon = h\nu \equiv \hbar\omega$, при $\omega = 2\pi\nu$.

2. Все физические явления имеют свои характерные масштабы:

длины, времени, энергии. Для существенно *разных* физических явлений эти масштабы могут *отличаться* на порядки:

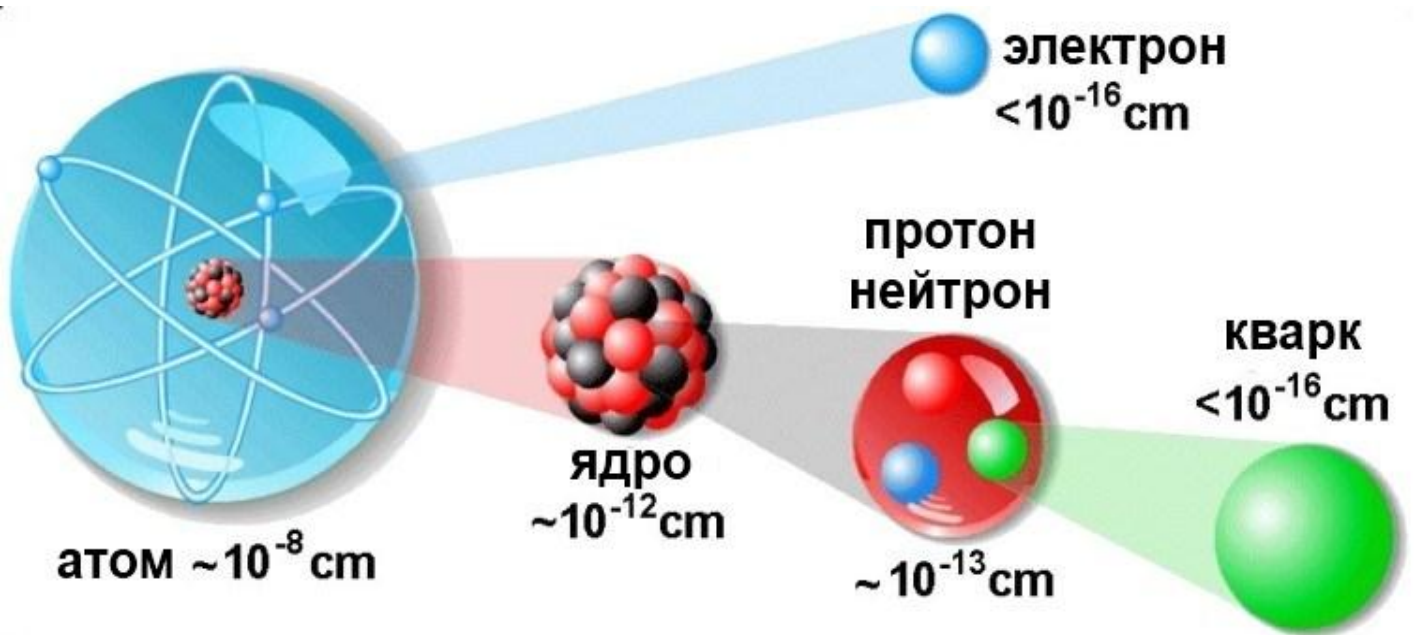
$$L_{ATOM} \gg L_{NUCLEI} \gg L_{PROTON} \gg L_{QUARK}.$$

Чем меньше пространственный масштаб явления, тем большая энергия

$$E_{ATOM} \ll E_{NUCLEI} \ll E_{PROTON} \ll E_{QUARK},$$

необходима, чтобы его достичь. Поэтому:

Физика – это наука об иерархии масштабов. Каждый следующий по величине масштаб может в первом приближении считаться бесконечно большим (или бесконечно малым) по сравнению с предыдущим.



(Атом в основном пуст, в отличие от ядра и нуклонов)

3. Различные масштабы задаются различными фундаментальными константами, связанными с природой соответствующих явлений:

В отличие от математических, фундаментальные физические константы:

$k_B, c, \hbar, e, G, m_e$ имеют каждая свою уникальную размерность и связаны каждая со своей природой и кругом соответствующих физических явлений. Их безразмерные комбинации типа α задают свою иерархию масштабов:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}, \text{ дает: } r_e = \frac{e^2}{mc^2} = \alpha \lambda_e \ll \lambda_e = \frac{\hbar}{mc} = \alpha b_e \ll b_e = \frac{\hbar^2}{me^2},$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} = \frac{e\lambda_e}{2} = \frac{\alpha d_e}{2} \ll d_e \equiv eb_e, \text{ в тоже время, боровский радиус}$$

$$b_e = \frac{\hbar^2}{me^2} \llllll R_{Ch} = 3 \left(\frac{\pi}{3} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{N}{4} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{G\hbar}{c^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ -- радиус нейтронной звезды.}$$

Революция 1: теория относительности

- Скорость света c — предел для всех частиц во всех СО.
- Законы физики одинаковы во всех инерциальных СО.

Важное следствие: **масса — это тоже форма энергии!**



в покое: $E_0 = mc^2$.

в движении: $E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2 c^2}$

Для безмассовых частиц: $m = 0 \rightarrow E = pc$.

Необходимо помнить, что

В современной физике частиц нет «массы покоя» и «релятивистской массы». Есть просто **масса m** как неизменная характеристика частицы.

Единицы измерения

Макроскопические единицы измерения неудобны для микромира:

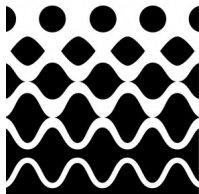
$$m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad E_H \approx 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

Удобная универсальная единица — **электронвольт (эВ)**, это энергия $E = eU_3$, приобретенная или потерянная 1-м электроном, преодолевшим “запирающее” напряжение U_3 в 1 Вольт.

$$1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,78 \cdot 10^{-36} \text{ кг} \cdot \text{с}^2.$$

-  атомная физика, оптика: $E \sim 1 \text{ эВ}$; $E_H \approx 1 \text{ Ry} = 13,6 \text{ эВ}$;
-  ядерная физика: МэВ (10^6 эВ);
-  элементарные частицы: **ГэВ** (10^9 эВ) и **ТэВ** (10^{12} эВ);
 - ▶ масса протона: $\approx 1 \text{ ГэВ}/c^2$,
 - ▶ масса бозона Хиггса: $125 \text{ ГэВ}/c^2$,
 - ▶ энергия протонов в LHC: **6,5 ТэВ**.

Революция 2: квантовый мир



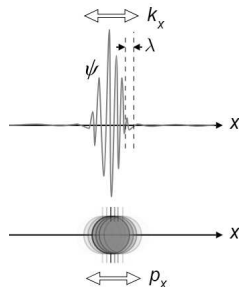
1920-е годы: рождение квантовой механики
Планк (1918) Бор (1922) де Бройль (1929)
Гейзенберг (1932) Шредингер (1933) Борн (1954)

Микромир населен «частицами-волнами» e^{ikx}
длины $\lambda = 2\pi/k = 2\pi\hbar/p$, где k — волновое число,
 $\hbar$ — постоянная Планка:

$\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · сек $\approx 0,197$ (эВ/с) · мкм,
или $\hbar \approx 6,58 \cdot 10^{-16}$ эВ · сек. $w(x) = |\psi(x)|^2$.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга
между координатой и импульсом:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



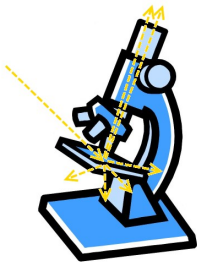
Новые существенно квантовые явления — спин и тождественность частиц — тоже играют ключевую роль в жизни микромира.

Как рассмотреть микромир

Чем мельче объект, тем больше импульс «частицы-осветителя»!

свет

$$r \approx 1 \text{ мкм}, p \approx 1 \text{ эВ}$$



атом

$$r \approx 0,1 \text{ нм}, p > 10 \text{ кэВ}$$



ядро

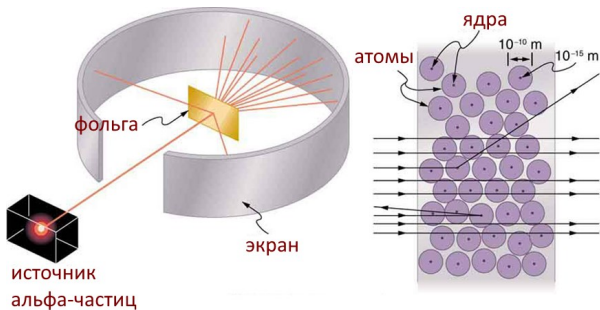
$$r \approx 1 \text{ фм}, p > 1 \text{ ГэВ}$$





Первые шаги

- 1896: спонтанная радиоактивность
🏆 Беккерель, Пьер и Мария Кюри (1903) 🏆 Резерфорд (1908)
- 1897: катодные лучи → электроны 🏆 Томсон (1906)
- 1911: атомное ядро (эксперимент Резерфорда)
- 1919: искусственная трансмутация элементов



Вглубь ядра

1921: Резерфорд предсказал нейтрон

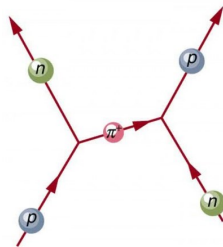
1932: Открытие нейтрона 🏵 Чедвик (1935)

1934: Юкава предложил теорию
внутриядерных сильных взаимодействий и
предсказал π -мезоны — частицы-переносчики
ядерных сил с массой 130 МэВ

🏵 Юкава (1949)

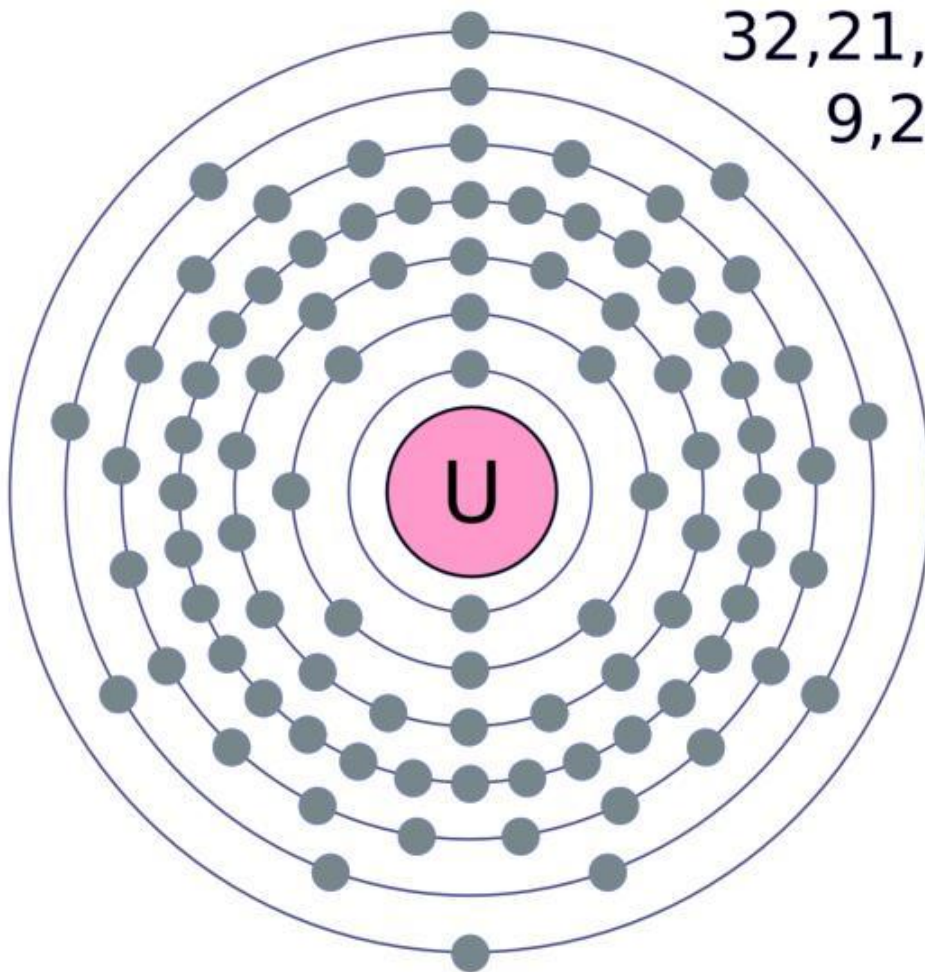
1936: открытие мюонов μ — «тяжелых электронов»

1947: открытие π -мезонов 🏵 Пауэлл (1950)



92: Uranium

2,8,18,
32,21,
9,2

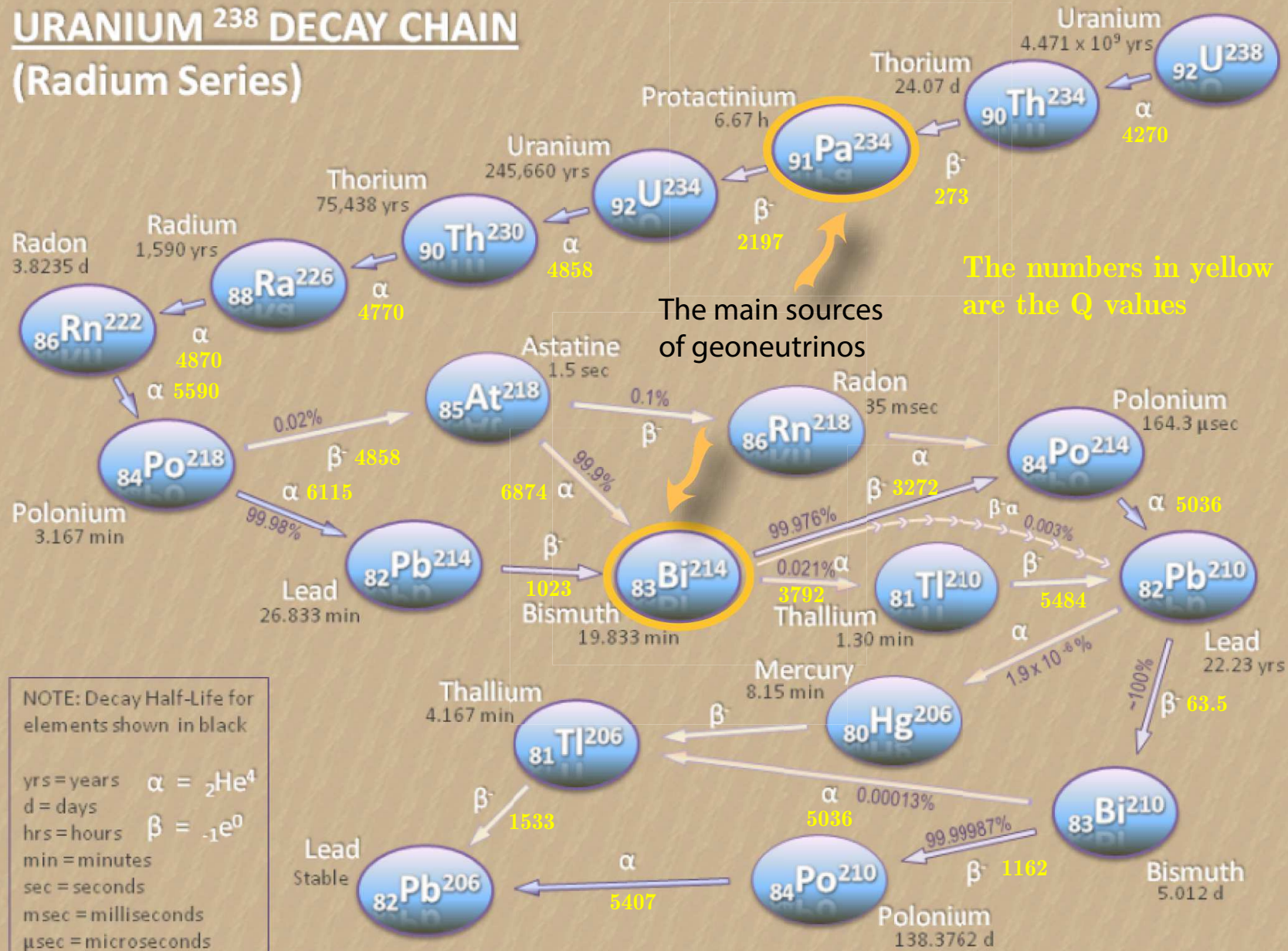


Заряд ядра $Z = 92$ = число протонов в ядре = число электронов в атоме.
Ядро: атомный вес $A = 238$ нуклонов = протонов (p) + нейтронов (n).
Изотопы отличаются числом нейтронов: $N = 238 - 92 = 146$.

Изотоп	Массовый процент	Атомный процент	Период полураспада
U-234	0.0054%	0.0055%	247 тыс. лет (альфа-распад)
U-235	0.7110%	0.7202%	710 млн. лет (альфа-распад)
U-238	99.2836%	99.2742%	4.51 млрд. лет (альфа-распад)

$${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \alpha ({}^4_2\text{He})$$

URANIUM 238 DECAY CHAIN (Radium Series)



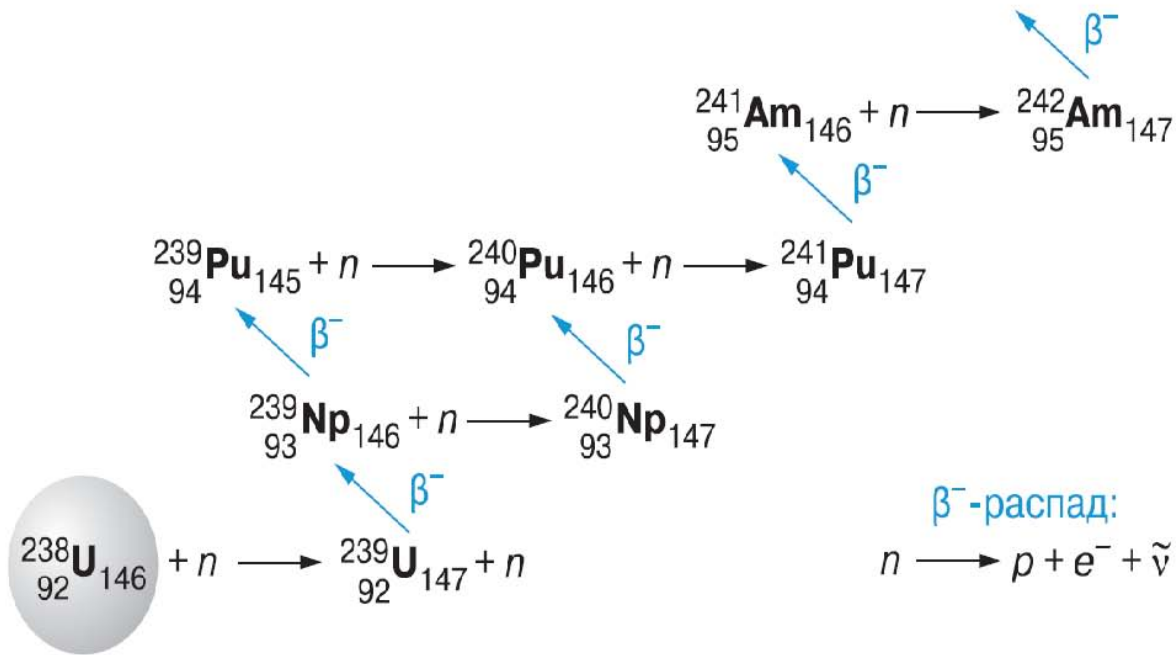


Рис. 56. Пример получения нептуния, плутония и америция из урана-238

Т.е. возможна и искусственная трансмутация элементов при поглощении ими нейтрона извне.

Так как нейтрон тяжелее протона на $m_n - m_p = 1,293 \text{ МэВ} \approx 1,3 \text{ МэВ}$,

то для протона аналогичная реакция позитронного β^+ распада

$p^* \rightarrow n + e^+ + \nu$ возможна только внутри ядра, снабжающего протон недостающей кинетической энергией, превышающей эту разность масс ЕЩЕ на массу электрона $m_e \approx 0,5 \text{ МэВ}$.

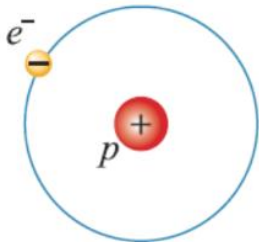
С этой реакцией конкурирует реакция электронного К- захвата

(с нижней К-оболочки атома) $e^- + p \rightarrow n + \nu$.

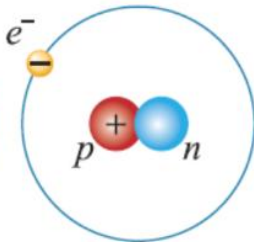
Т.е. за β распадом ядер прячется соответствующий распад нуклона!

Здесь же мы “впервые” сталкиваемся с еще одним типом частиц –

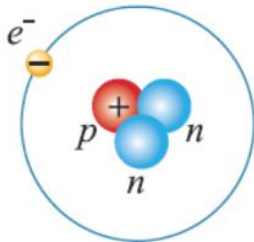
электронным нейтрино ν_e и электронным антинейтрино $\bar{\nu}_e$.



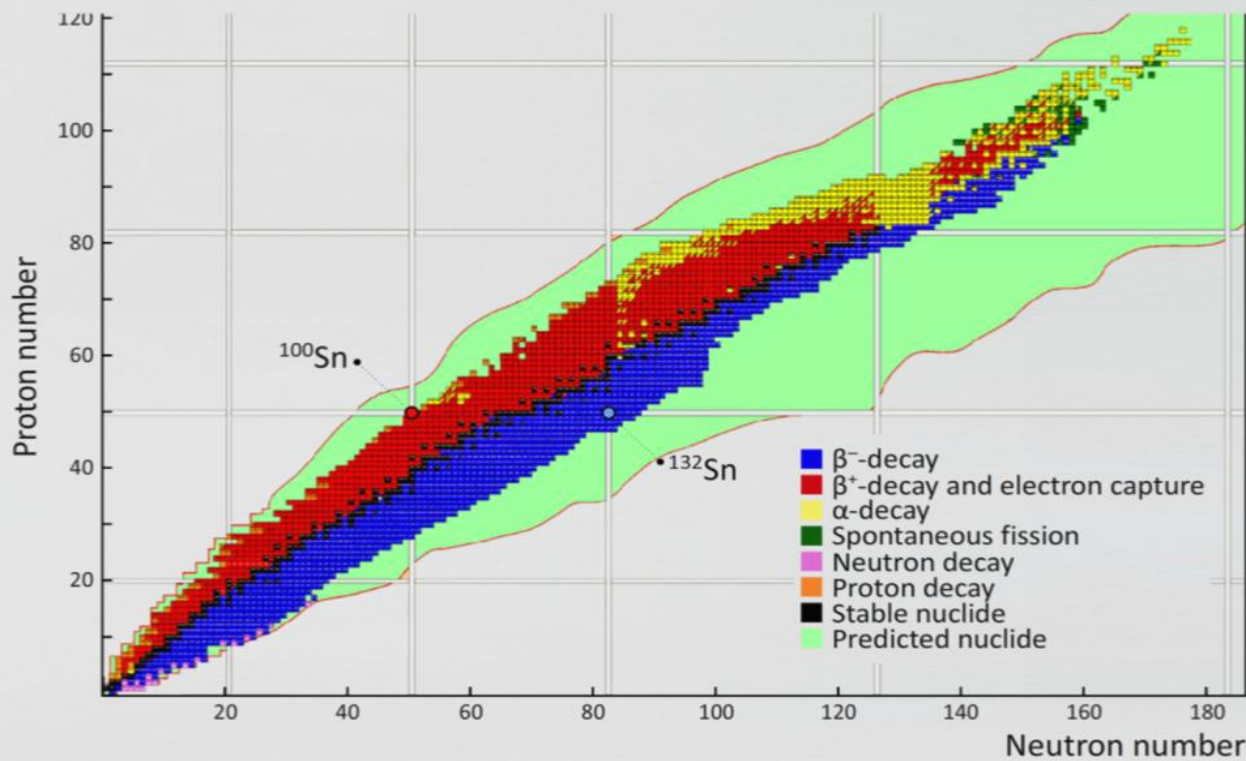
${}^1_1\text{H}$
Протий



${}^2_1\text{H}(\text{D})$
Дейтерий



${}^3_1\text{H}(\text{T})$
Тритий



Число протонов

8

7

6

5

4

3

2

1

				¹² O	¹³ O	¹⁴ O	¹⁵ O	¹⁶ O	¹⁷ O
			¹⁰ N	¹¹ N	¹² N	¹³ N	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ N
		⁸ C	⁹ C	¹⁰ C	¹¹ C	¹² C	¹³ C	¹⁴ C	¹⁵ C
		⁷ B	⁸ B	⁹ B	¹⁰ B	¹¹ B	¹² B	¹³ B	¹⁴ B
	⁵ Be	⁶ Be	⁷ Be	⁸ Be	⁹ Be	¹⁰ Be	¹¹ Be	¹² Be	¹³ Be
	⁴ Li	⁵ Li	⁶ Li	⁷ Li	⁸ Li	⁹ Li	¹⁰ Li	¹¹ Li	¹² Li
	?	³ He	⁴ He	⁵ He	⁶ He	⁷ He	⁸ He	⁹ He	¹⁰ He
	p	d	t	⁴ H	⁵ H	⁶ H			
	n	?							

1

2

3

4

5

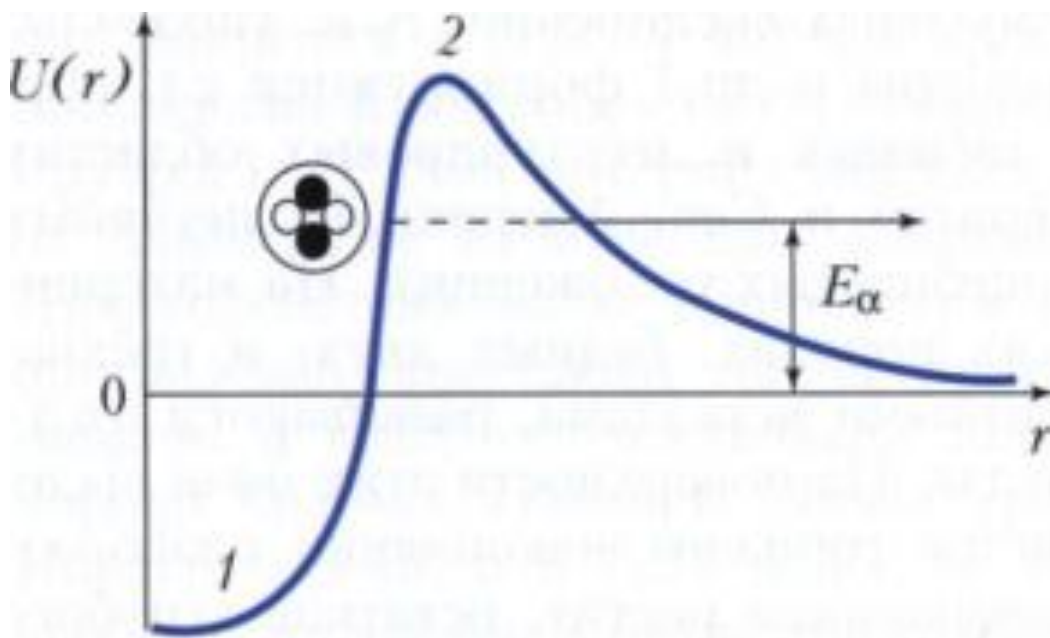
6

7

8

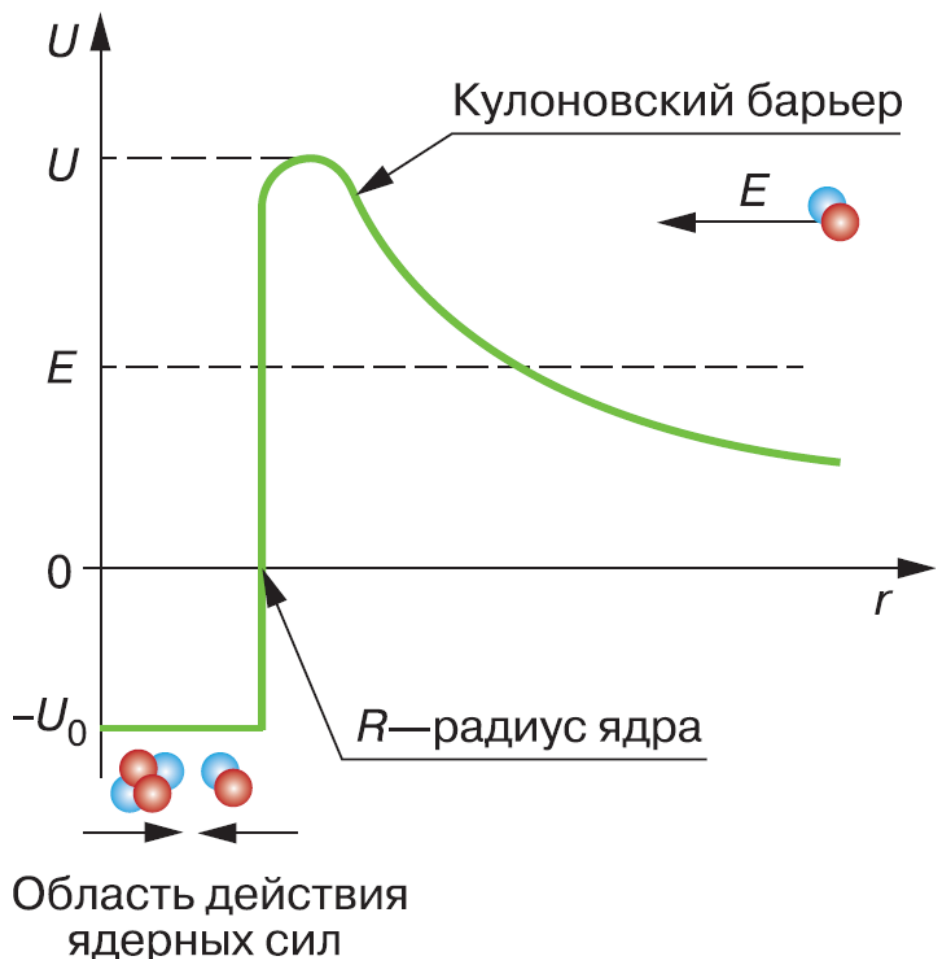
9

Число нейтронов

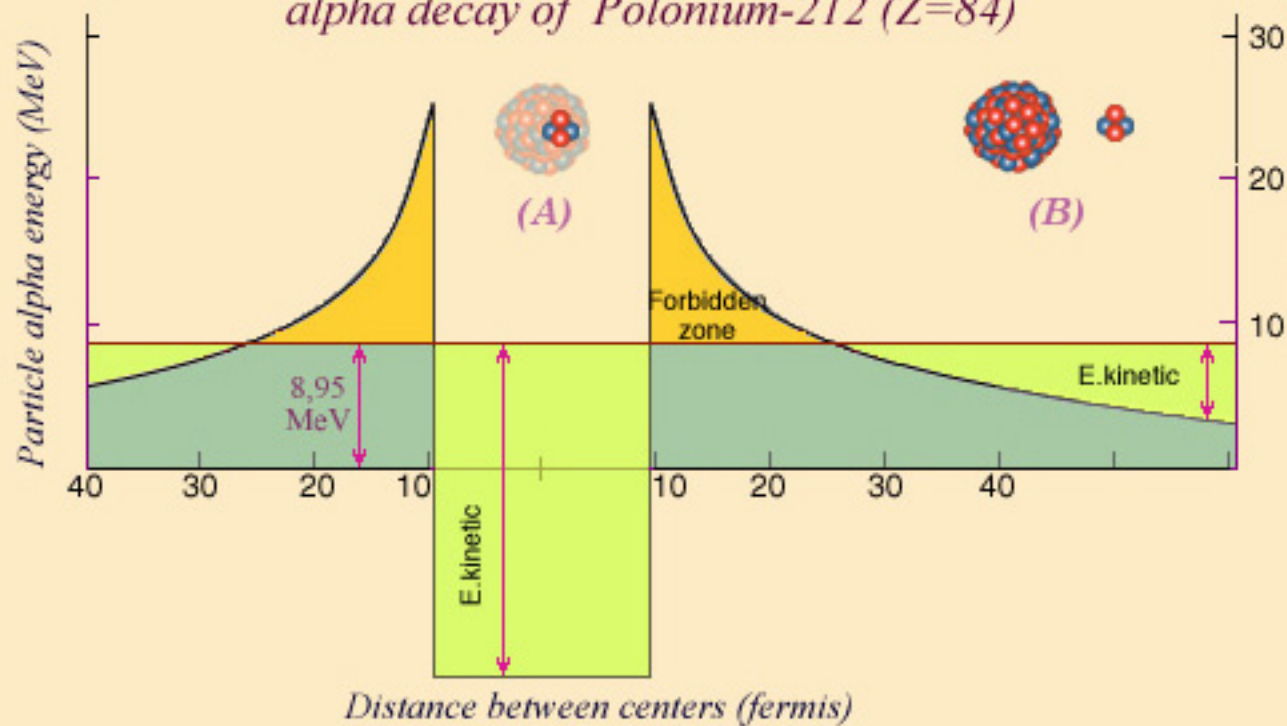


Кулоновский потенциал $U(r)$ ядра:
 1 – потенциальная яма; 2 – кулоновский барьер. E_α – энергия α -частицы.

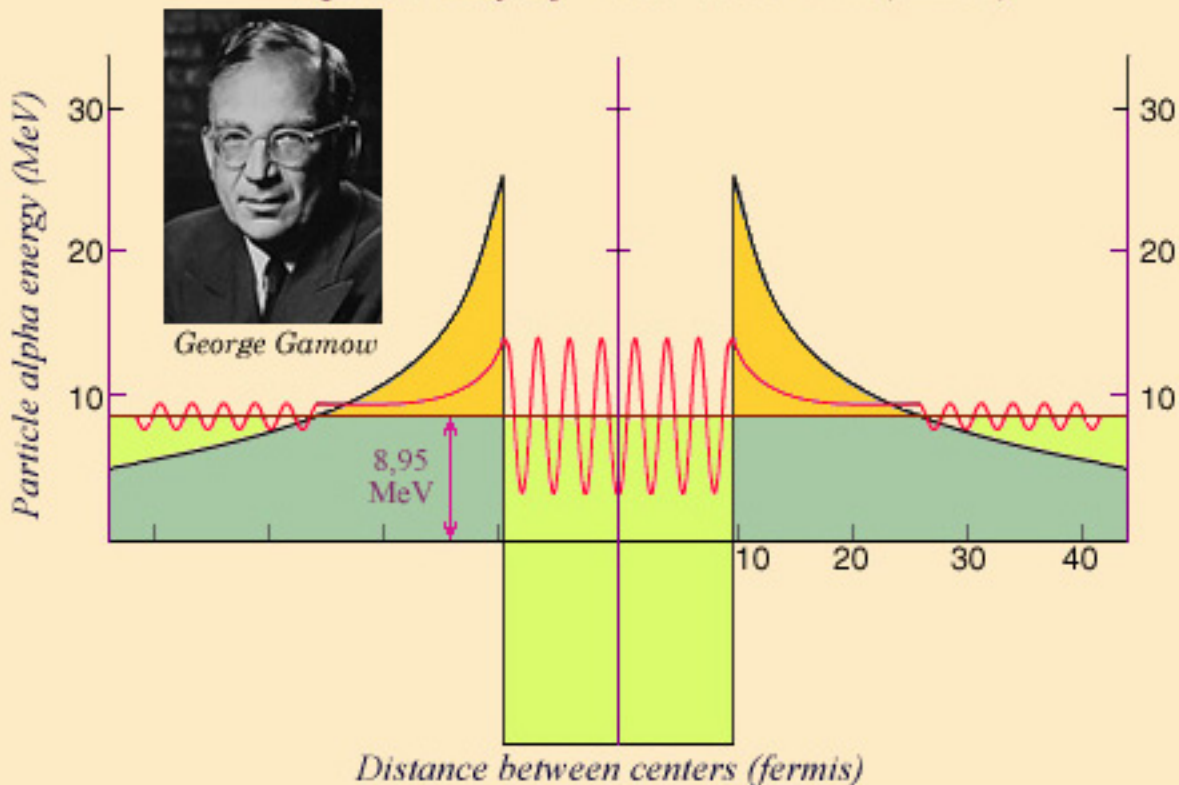
«Квантовый стакан» в 10^{-13} раз меньший обычного с такой «квантовой водой» на столе сразу опустеет → эта «квантовая вода» будет на полу.

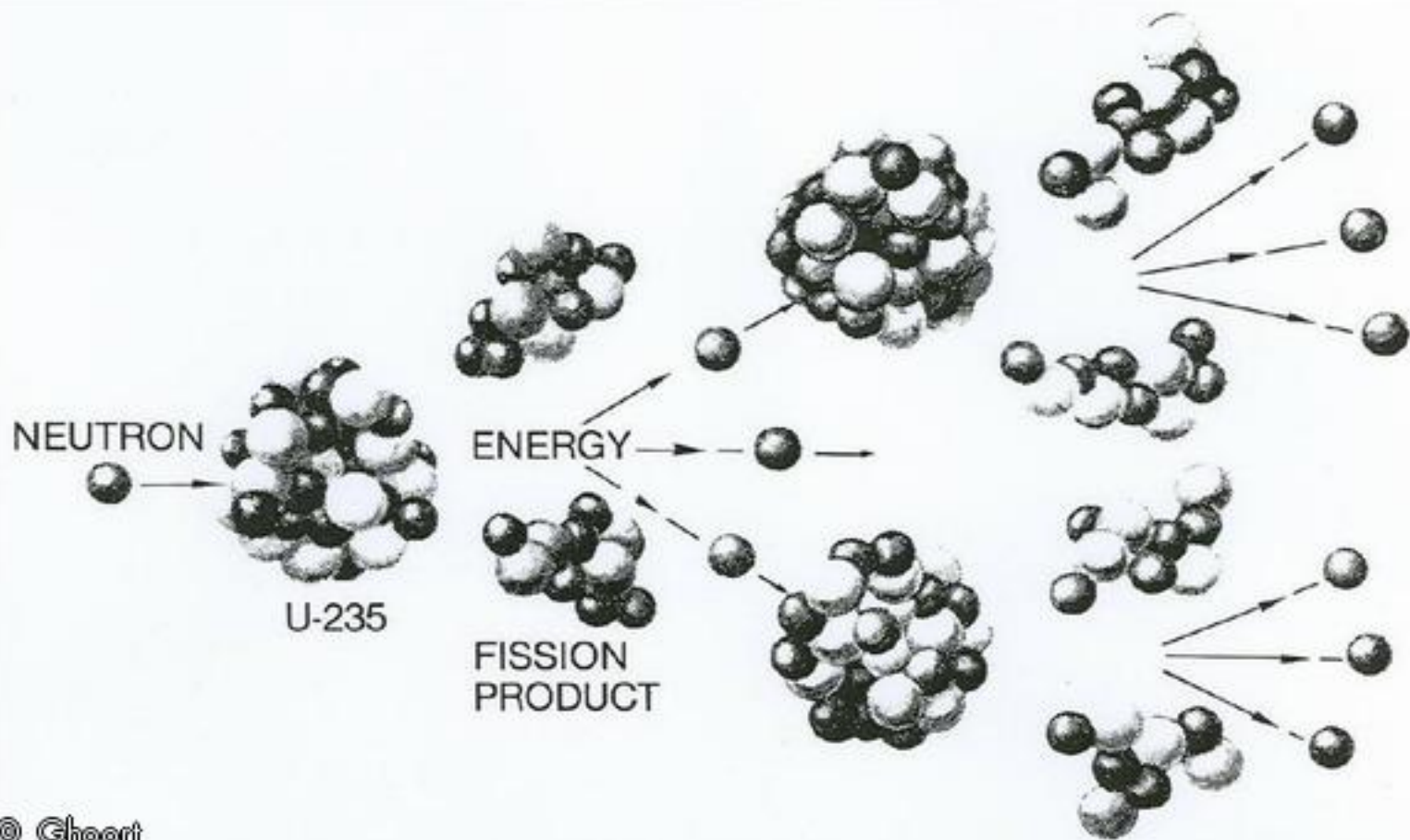


alpha decay of Polonium-212 ($Z=84$)



alpha decay of Polonium-212 ($Z=84$)

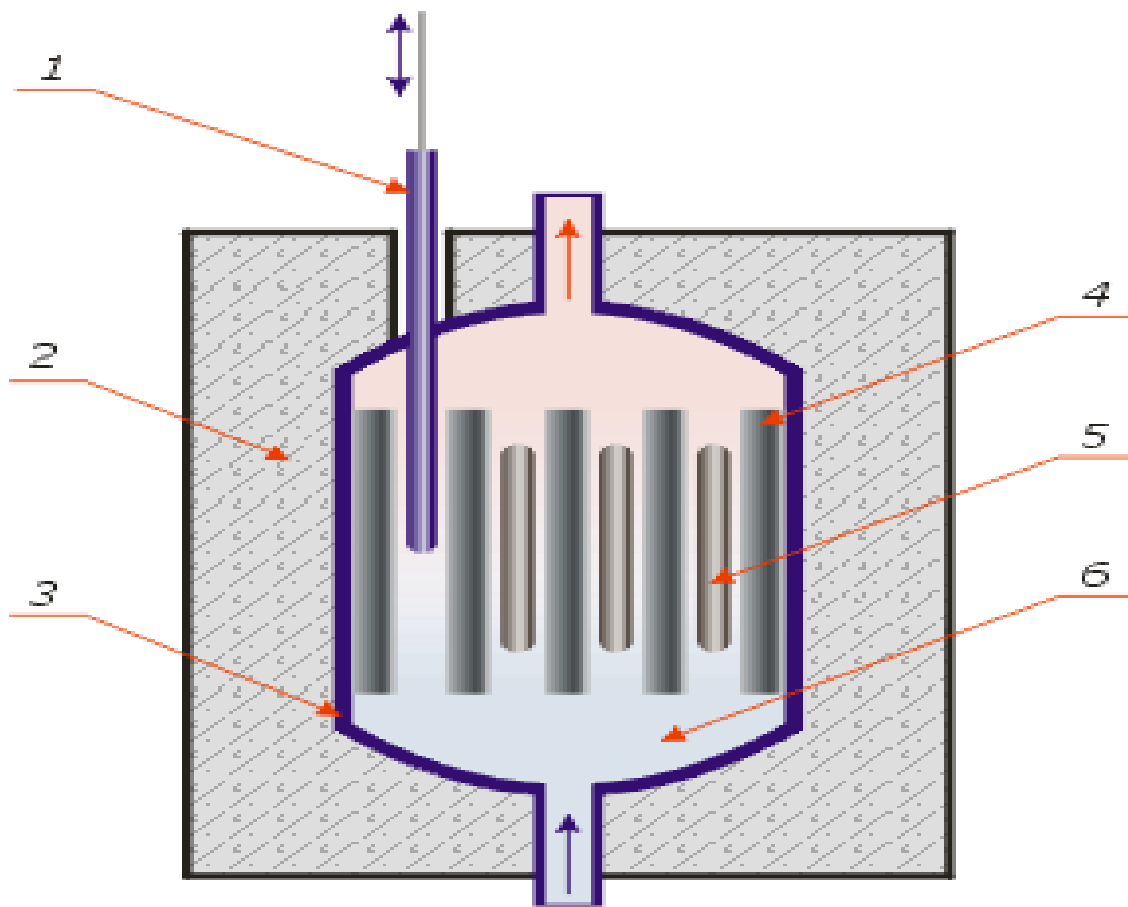




Совершенно иначе ведет себя при захвате медленных нейтронов U^{235} .
→ Цепная реакция – это реакция за счет **вынужденного** деления.
В одном акте реакции выделяется энергия осколков до 200 Мэв (при горении → 10—100 эв).

K -- коэффициент размножения нейтронов. $K < 1$ → нет реакции,
 $K \gg 1$ → **мгновенный тепловой НЕ ядерный взрыв**,
 $K \geq 1$ → стабильная работа.

Управление ядерным реактором упрощает тот факт, что часть нейтронов при делении вылетает из осколков с запаздыванием, которое может составить от 0,2 до 55 сек.



Реактор типа ВВЭР

1 — управляющий стержень; 2 — биологическая защита;
3 — тепловая защита; 4 — замедлитель;
5 — ядерное топливо; 6 — теплоноситель.

Ядерный реактор может работать с заданной мощностью в течение длительного времени только в том случае, если в начале работы имеет запас реактивности.

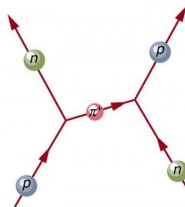
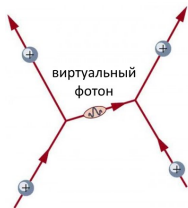
$$\rho = \frac{K-1}{K} > 0.$$

Квантовая теория поля

теория относительности + квантовая механика = **квантовая теория поля**

Фундаментальная сущность — **поле**. Частицы — его возмущение.

- Нет закона сохранения количества частиц!
Частицы могут рождаться и исчезать.
- **Виртуальная частица** — особое состояние поля, неспособное улететь далеко от источника.

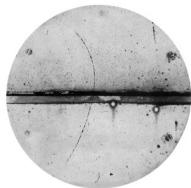


Антиматерия

1928–1930: Дирак построил квантовую электродинамику и предсказал существование **позитрона** e^+ — античастицы **электрона** e^-



Дирак (1933)

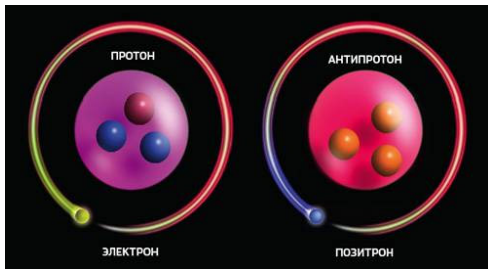


1932: открытие позитрона  Андерсон (1936)

Дмитрий Скобельцын видел следы в 1929 году, но не смог правильно интерпретировать!

1955: открытие антипротона  Сегре, Чемберлен (1959)

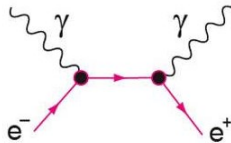
Антиматерия



Материя и антиматерия **аннигилируют** с выделением огромной энергии!

Существуют ли звезды и галактики из антивещества?

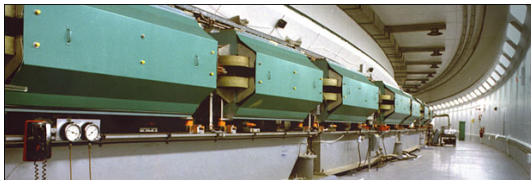
Куда подевалась антиматерия??



Эра больших ускорителей

40-50-е годы: **бум развития ускорительной техники**: Cosmotron (3,3 ГэВ), Bevatron (6,5 ГэВ), СФ (10 ГэВ), PS (28 ГэВ), AGS (33 ГэВ)

Новые центры: BNL (1947), **ЦЕРН (1954)**, LNF (1955), **ОИЯИ (1956)**, ИЯФ (1958), ИФВЭ (1963)

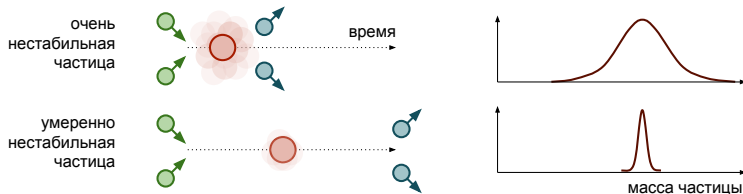


Резонансы

50-е годы: очень короткоживущие адроны, $\tau \sim 10^{-24}$ сек.

Но как вообще их можно заметить??

Соотношение неопределенностей энергия-время: $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$.

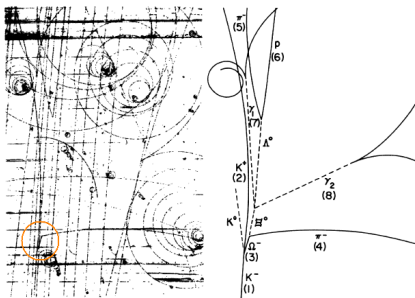


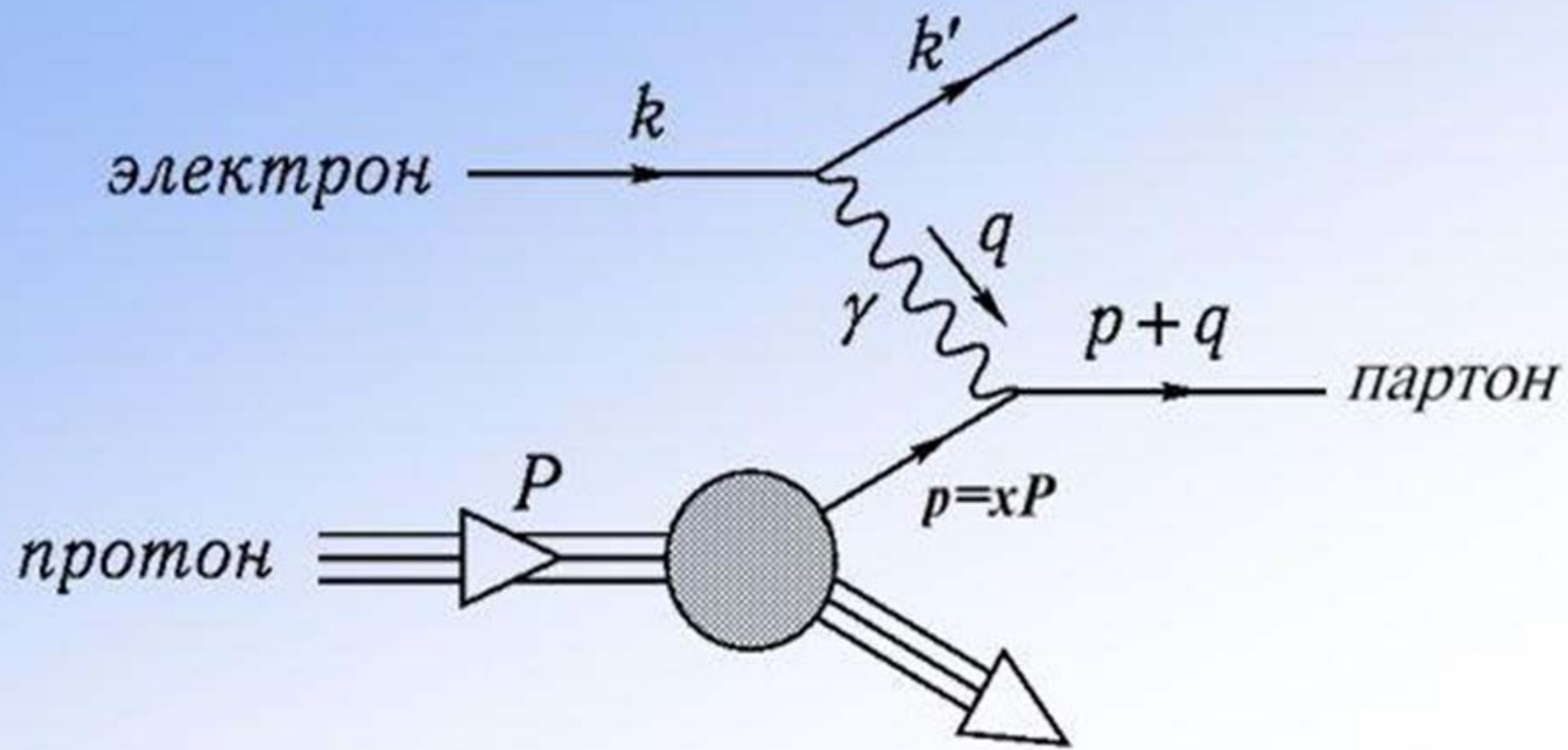
Чем нестабильнее частица, тем более «размазана» ее масса.

Великие ускорительные открытия

- 1947: «странные» частицы,
- 1955: антипротон, 1956: антинейтрон,
- 50е-60е: десятки новых адронов*;  Альварес (1968)

***адрон** = частица, чувствующая сильное взаимодействие.





Кварки

1960-е годы: адронов слишком много!

Прослеживаются закономерности и структура  Хофштадтер (1961)
адроны явно состоят из каких-то «кирпичиков»!

1964: Гелл-Манн, Цвейг — идея **кварков**

 Гелл-Манн (1969)

«верхний» кварк, **u** (заряд $+2/3$),

«нижний» кварк, **d** (заряд $-1/3$),

«странный» кварк, **s** (заряд $-1/3$).

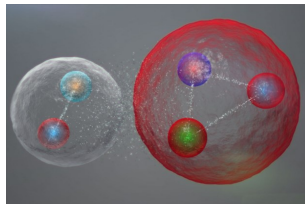
$p = [uud]$, $n = [udd]$, $\pi^+ = [u\bar{d}]$, $\Lambda = [uds] \dots$

1974: «очарованный» кварк **c** ($+2/3$)

 Рихтер, Тинг (1976)

1979: «прелестный» кварк **b** ($-1/3$),

1995: «топ» кварк **t** ($+2/3$).



mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
	u up	c charm	t top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	d down	s strange	b bottom

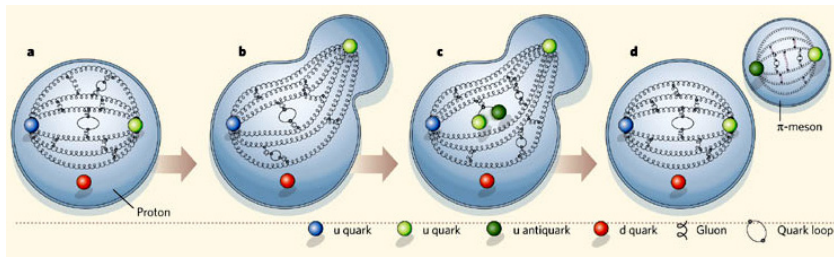
QUARKS

Пленение кварков

Кварки держатся вместе за счет **сильного взаимодействия**.

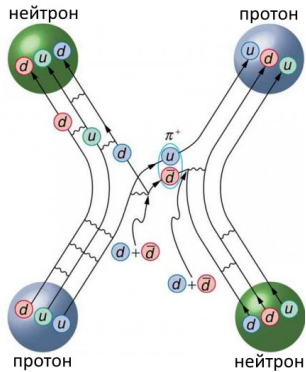
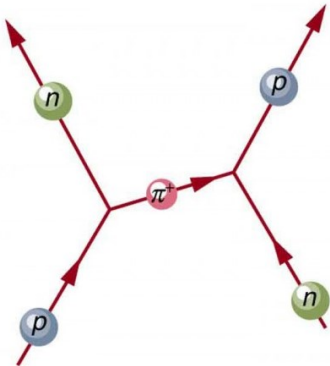
Его переносчики, **глюоны**, чувствуют особый «заряд» кварков — **цвет**.

Самоподдерживающаяся сила: **глюоны чувствуют друг друга!**



Конфайнмент: кварки навечно пленены внутри адронов!

Ядерные силы: новый взгляд



В природе существует 4 типа фундаментальных взаимодействий:

1



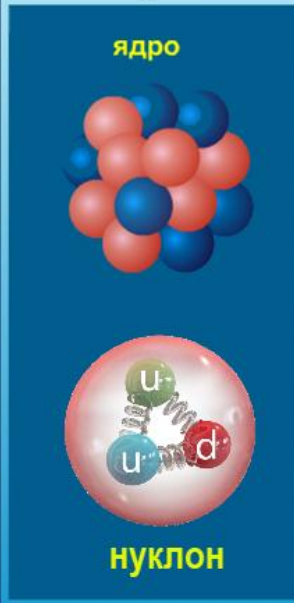
гравитационные

2



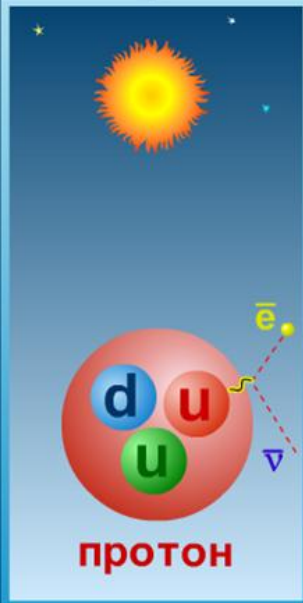
электромагнитные

3



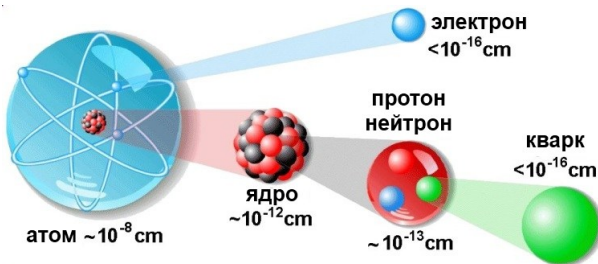
сильные

4



слабые

Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

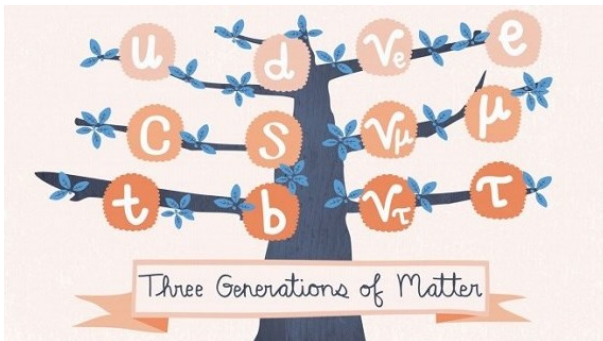
- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны;
- **Сильное:** частицы переносчики — глюоны;
- **Слабое:** частицы переносчики — тяжелые W и Z -бозоны;
- Гравитация: для микромира она слишком слаба, **вычеркиваем**.

Фундаментальные частицы

кварки	u u-кварк	c с-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
	ν_e электрон-нейтрино	ν_μ мюон-нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z z-бозон
лептоны	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
				бозоны

Но откуда берутся взаимодействия?

Три поколения фермионов



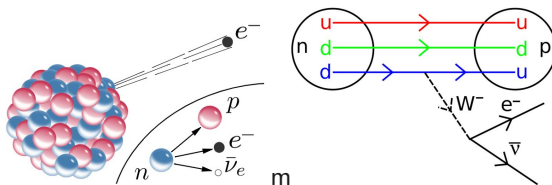
Частицы из 2 и 3-го поколения тяжелые и нестабильные.

Откуда взялись три поколения?? — до сих пор неизвестно!

Особенность слабого взаимодействия

Слабое взаимодействие — единственное, **способное менять тип частиц!**

Бета-распад нейтрона: $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e \Rightarrow d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$.



Нейтрино — уникальные, сверхлегкие, сверхпроникающие частицы, чувствуют только слабое взаимодействие.

👤 Ледерманн, Шварц, Стейнбергер (1988) 👤 Райнес (1995)

👤 Дэвис, Кошиба (2002) 👤 Каджита, Макдональд (2015)

Калибровочные взаимодействия

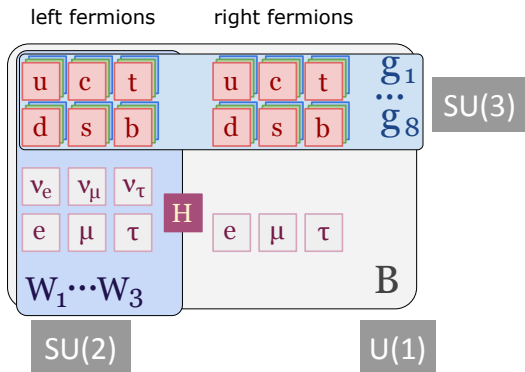
Калибровочный принцип

Три фундаментальных взаимодействия вытекают из единого принципа симметрии!

- В КМ электрон — не точка, он описывается **волновой функцией** $\psi(x)$.
- Эта функция **комплексная**: $\psi(x) = |\psi(x)|e^{i\phi(x)}$. Но ее фаза сама по себе — **не физическая**. Ничего не изменится от глобальной замены $\psi(x)$ на $\psi(x)e^{i\alpha}$ сразу во всем пространстве $\rightarrow$ это **глобальная симметрия**.
- **Локальная симметрия**: ничего не должно измениться от замены $\psi(x)$ на $\psi(x)e^{i\alpha(x)}$ — надо только чуть-чуть «подкрутить» (откалибровать) уравнения, добавив в них новое — калибровочное поле $A(x)$ по единому правилу замены кинетического импульса: $mv = p \rightarrow mv = p - \frac{e}{c}A(x)$.
- Это поле ведет себя точь-в-точь как ЭМ поле!

Так удалось описать все фундаментальные взаимодействия.

Фундаментальные взаимодействия в СМ



Впрочем, есть проблема: настолько симметричная теория **возможна только для безмассовых частиц**. Но в нашем мире это не так. Что делать??

Хиггсовский механизм

Хиггсовский механизм элегантно решает эту проблему!

- Новая субстанция — **хиггсовское поле**.
- Уравнения-то симметричны. Но хиггсовское поле само организуется так, чтоб частично их нарушить.
- **Спонтанное нарушение симметрии** аукается во всех частях теории, и частицы становятся массивными.



Браут, Энглер, Хиггс, Гуральник, Хэген, Киббл, 1964

Хиггсовский потенциал

Откуда берется такое странное состояние поля?

Хиггсовское поле чувствует само себя! Если $\phi(x)$ — «напряженность» хиггсовского поля, то плотность его потенциальной энергии

$$V[\phi(x)] = -m^2|\phi(x)|^2 + \lambda|\phi(x)|^4.$$

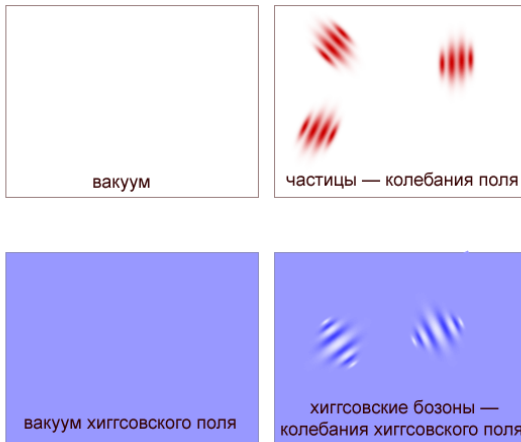
Самое энергетически выгодное состояние:

одинаковое ненулевое значение $\phi(x) = v \neq 0$ во всей вселенной.

Это и есть хиггсовский вакуум, в котором мы живем.

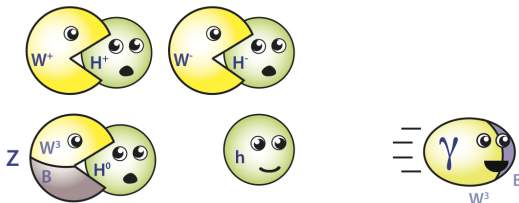


Хиггсовский механизм в картинках



Частица «цепляется» за хиггсовское поле и приобретает массу.

Хиггсовский механизм в картинках



Последствия спонтанного нарушения:

- Электрослабое взаимодействие **расщепляется** на слабое (тяжелые W и Z) и электромагнитное (безмассовый фотон).
- Остается частица-отголосок механизма — **бозон Хиггса**.
- Частицы материи приобретают разные массы.
- Наш мир становится таким, как мы его знаем!

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ/с}^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ/с}^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ/с}^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ/с}^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u	c	t	g	H
	верхний	очарованный	истинный	глюон	бозон Хиггса
	$\approx 4.8 \text{ МэВ/с}^2$	$\approx 95 \text{ МэВ/с}^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ/с}^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d	s	b	γ	
	нижний	странный	прелестный	фотон	
	0.511 MeV/с^2	105.7 МэВ/с^2	1.777 ГэВ/с^2	91.2 ГэВ/с^2	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e	μ	τ	Z	
	электрон	мюон	тау	Z бозон	
	$< 2.2 \text{ эВ/с}^2$	$< 0.17 \text{ МэВ/с}^2$	$< 15.5 \text{ МэВ/с}^2$	80.4 ГэВ/с^2	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	W бозон	

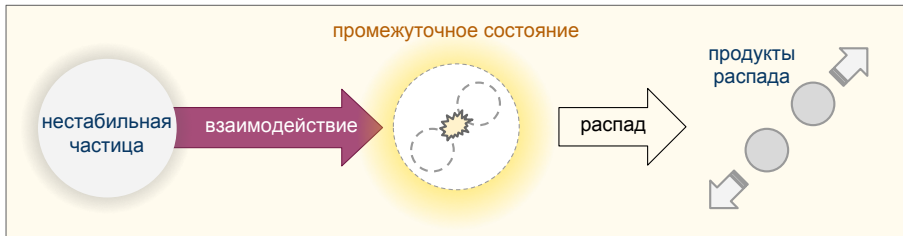
КВАРКИ

ЛЕПТОНЫ

КАЛИБРОВОЧНЫЕ
БОЗОНЫ

Как происходит распад адрона

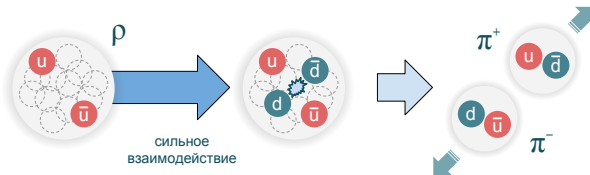
Внутри адрона постоянно «бурлят» виртуальные частицы.



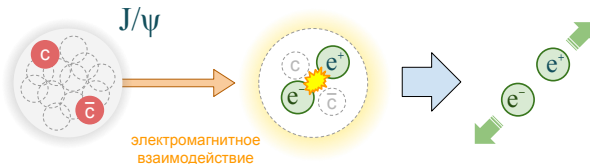
Чем интенсивнее взаимодействие, тем быстрее идет распад!

Быстрые распады

Сильные распады: $\tau \sim 10^{-24}$ с

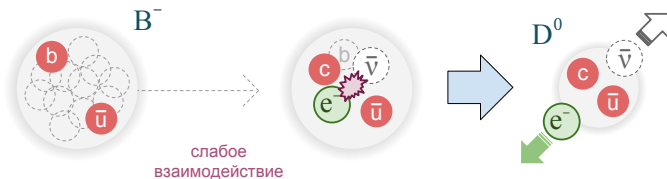


Электромагнитные распады: $\tau \sim 10^{-18} - 10^{-22}$ с

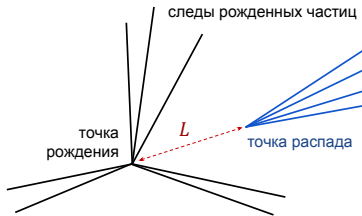


Слабые распады

Слабые распады: $\tau \sim 10^{-12}$ и больше (вплоть до 15 минут у нейтрона)



Адрон пролетает до распада
макроскопическую дистанцию!

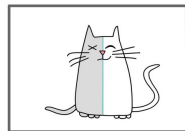


Варианты распада

У адрона есть много вариантов распада:

$$B^0 \rightarrow D^- e^+ \nu_e \text{ или } D^- \mu^+ \nu_e \text{ или } D^- \pi^+ \\ \text{или } J/\psi K^0 \text{ или } p \bar{p} \text{ или } \mu^+ \mu^- \text{ и т.д.}$$

Schrödinger's Cat



Он находится **одновременно во всех возможных состояниях**, откуда мы не поймаем продукты распада.

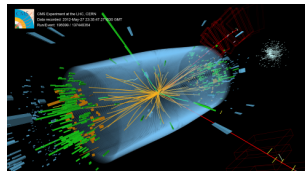
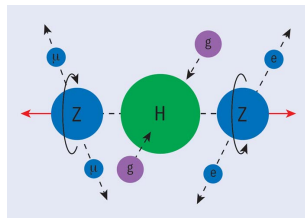
Невозможно заранее предсказать распад
в каждом конкретном случае!

Но мы можем теоретически вычислить **вероятность** того или иного канала — и ее мы можем сравнить с экспериментом.

Надо **повторить эксперимент миллиарды раз** и сосчитать, сколько раз случился нужный распад → отсюда и получится вероятность.

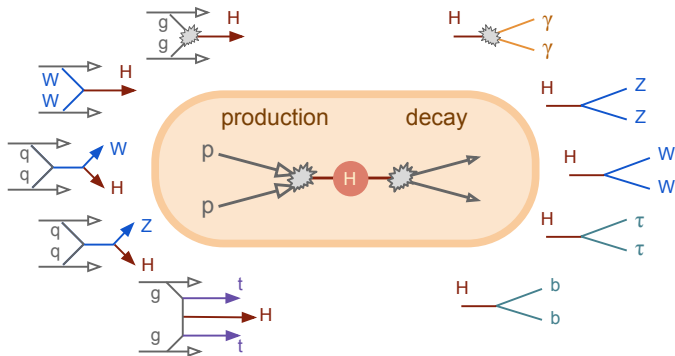
Открытие бозона Хиггса

- Хиггсовский бозон — **частица-отголосок хиггсовского механизма.**
- Очень нестабилен и сразу распадается на фотоны, электроны, мюоны, адроны...
- По следам распада детектор восстанавливает «картину происшествия».
- Накапливают статистику → строят распределения → сверяются с теоретическими предсказаниями.



Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась **хиггсовская эра**.

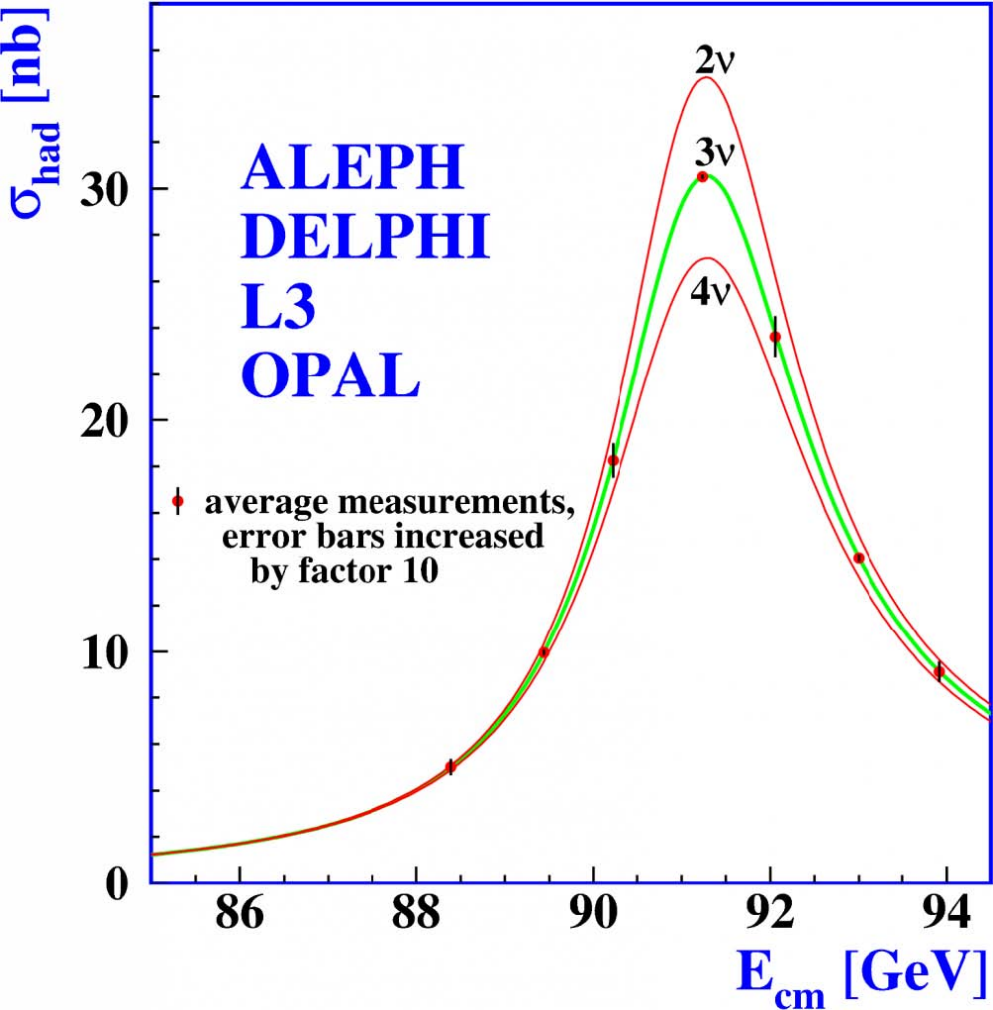


Стандартная модель

- Стандартная модель — завершена.
 Глэшоу, Салам, Вайнберг (1979)
- Ничего нельзя подправлять, все параметры зафиксированы.
- Можно делать предсказания и проверять их в эксперименте.
- СМ выдержала **тысячи проверок** за последние 50 лет!

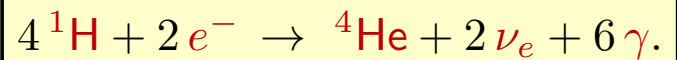
кварки	u u-кварк	c c-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
	ν_e электрон-нейтрино	ν_μ мюон-нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z z-бозон
лептоны	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
				бозоны





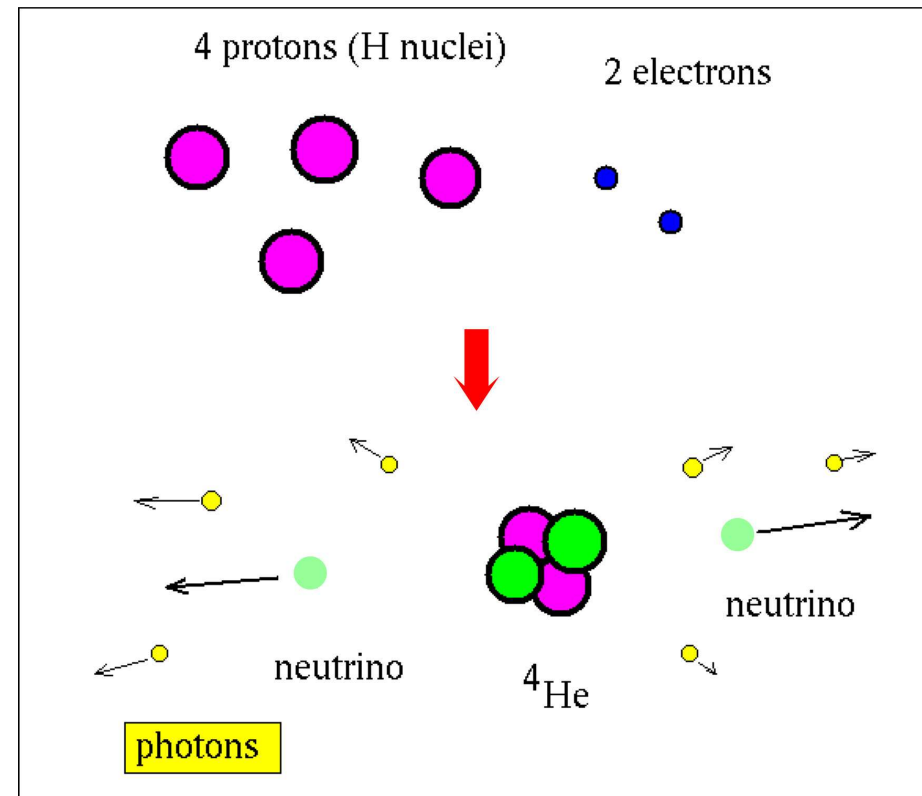
22 The pp fusion step by step

The evidence is strong that the overall fusion reaction in the Sun is “burning” hydrogen to make helium:



In this reaction, the final particles have less internal energy than the starting particles. Since energy is conserved, the extra energy is released as

- ★ energy of motion of the nuclei and electrons in the solar gas,
- ★ the production of lots of low energy photons and, finally,
- ★ the energy of the neutrinos, which easily shoot out of the Sun.



As a result the solar plasma gets hotter and has lots of photons.

8 Quantum-mechanical treatment

8.1 Angels & hippopotami

According to the current theoretical understanding, the neutrino fields/states of definite flavor are superpositions of the fields/states with definite, generally different masses [and vice versa]:

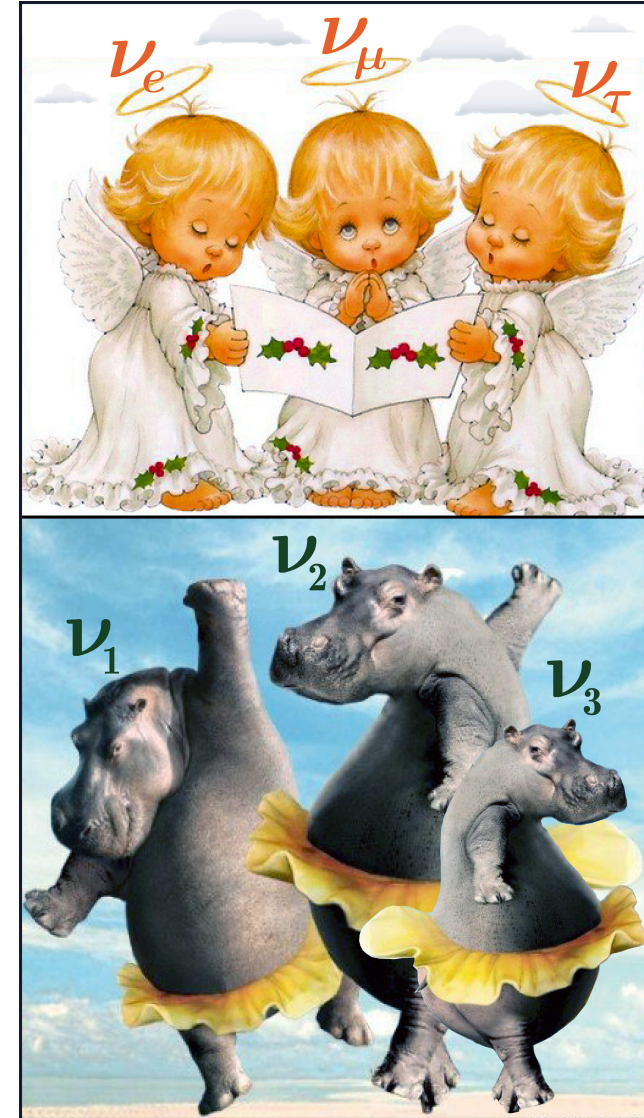
$$\nu_\alpha = \sum_i V_{\alpha i} \nu_i \quad \text{for neutrino fields,}$$

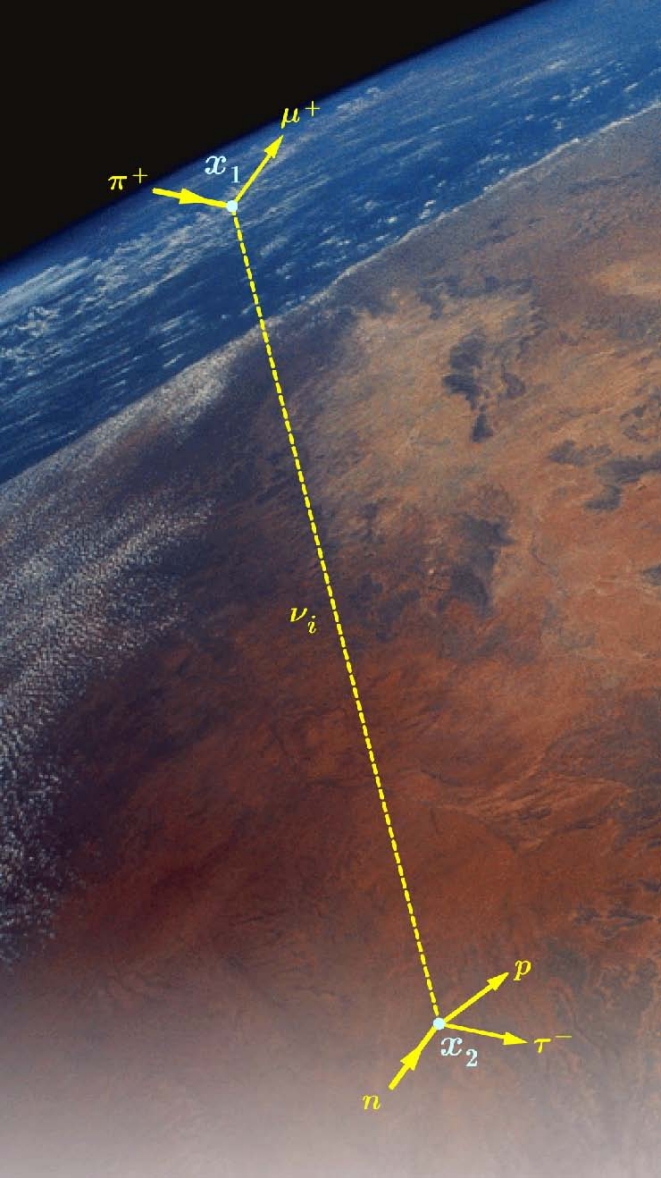
$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i V_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad \text{for neutrino states;}$$

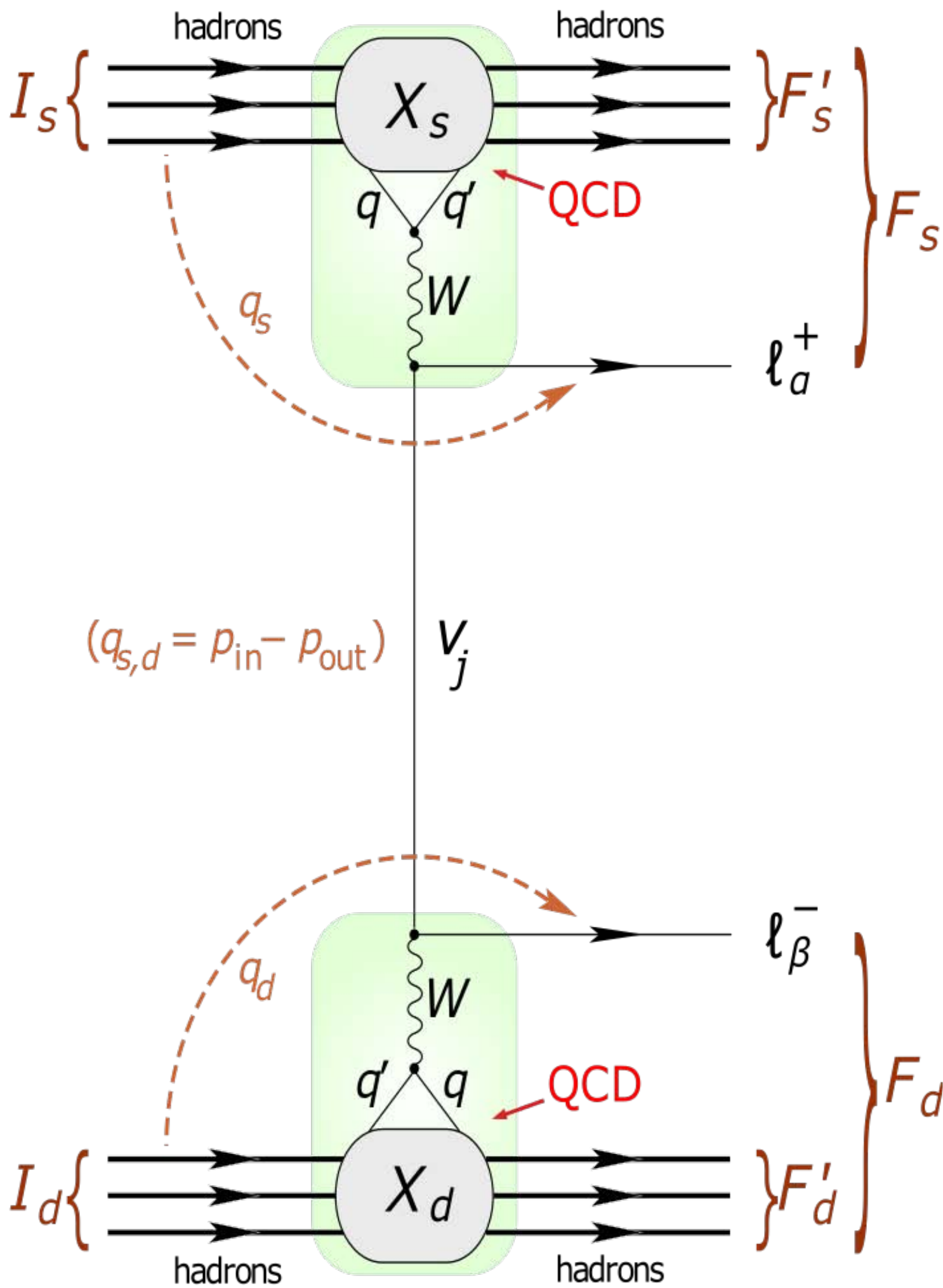
$$\alpha = e, \mu, \tau, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Here $V_{\alpha i}$ are the elements of the Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata neutrino vacuum mixing matrix $\mathbf{V}$.

This concept leads to the possibility of transitions between different flavor neutrinos, $\nu_\alpha \longleftrightarrow \nu_\beta$, phenomenon known as neutrino flavor oscillations.



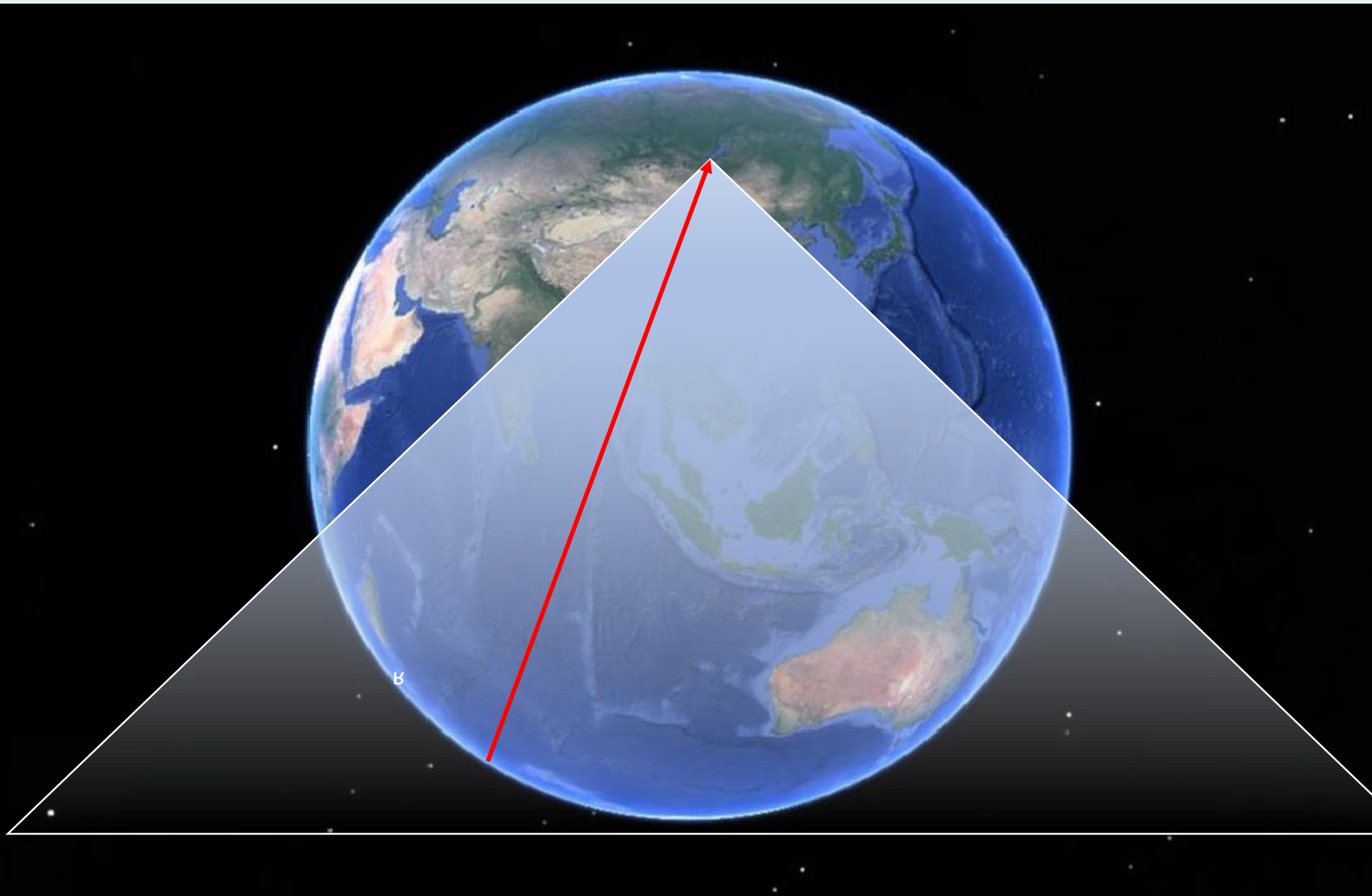


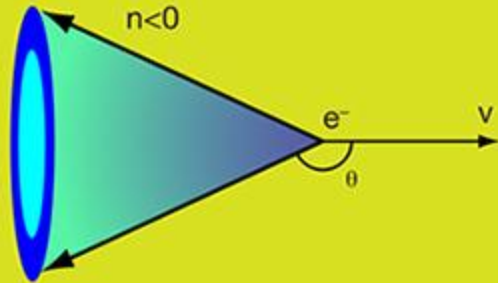
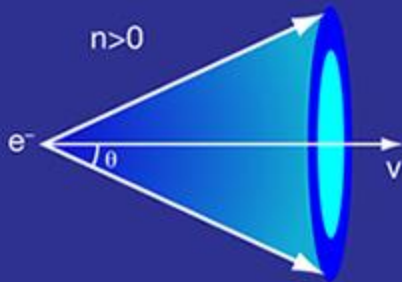


- ❖ 1931 – Предположение о существовании
- ❖ 1934 – Переименование
- ❖ 1959 – Открытие
- ❖ 1962 – Нейтрино бывают разных типов
- ❖ 1968 – Детектирование нейтрино от Солнца
- ❖ 1988 – Дефицит солнечных нейтрино
- ❖ 1989 – Существование трех типов нейтрино
- ❖ 2001 – Доказательство существования осцилляций нейтрино – нейтрино массивны



Космические нейтрино





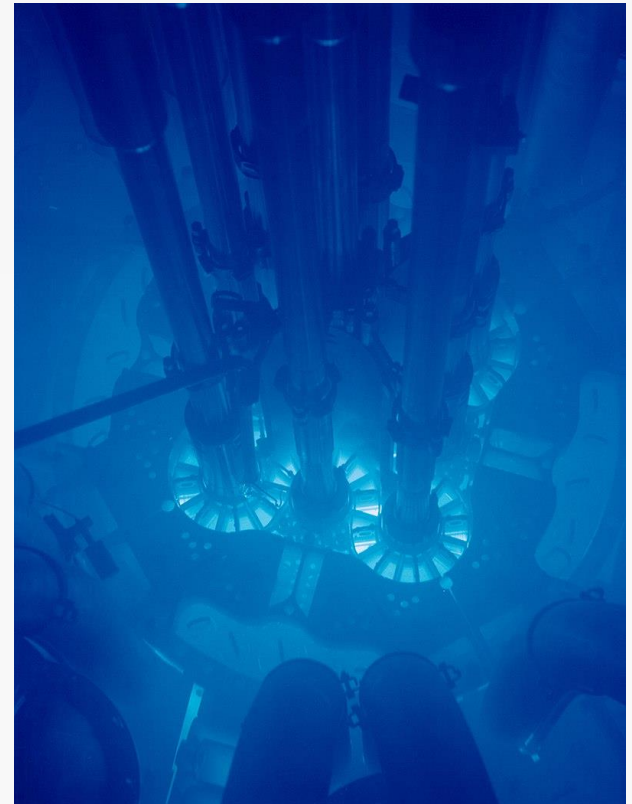
Идея регистрации – черенковское излучение

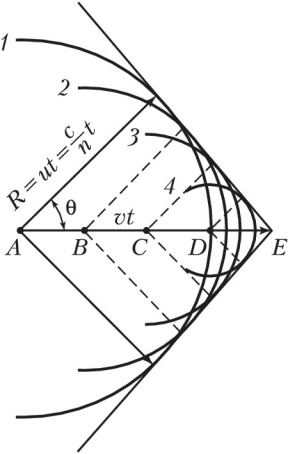
- Нейтрино передаёт энергию вторичным частицам – мюонам.
- Мюоны обладают достаточной энергией, чтобы лететь быстрее скорости света в среде

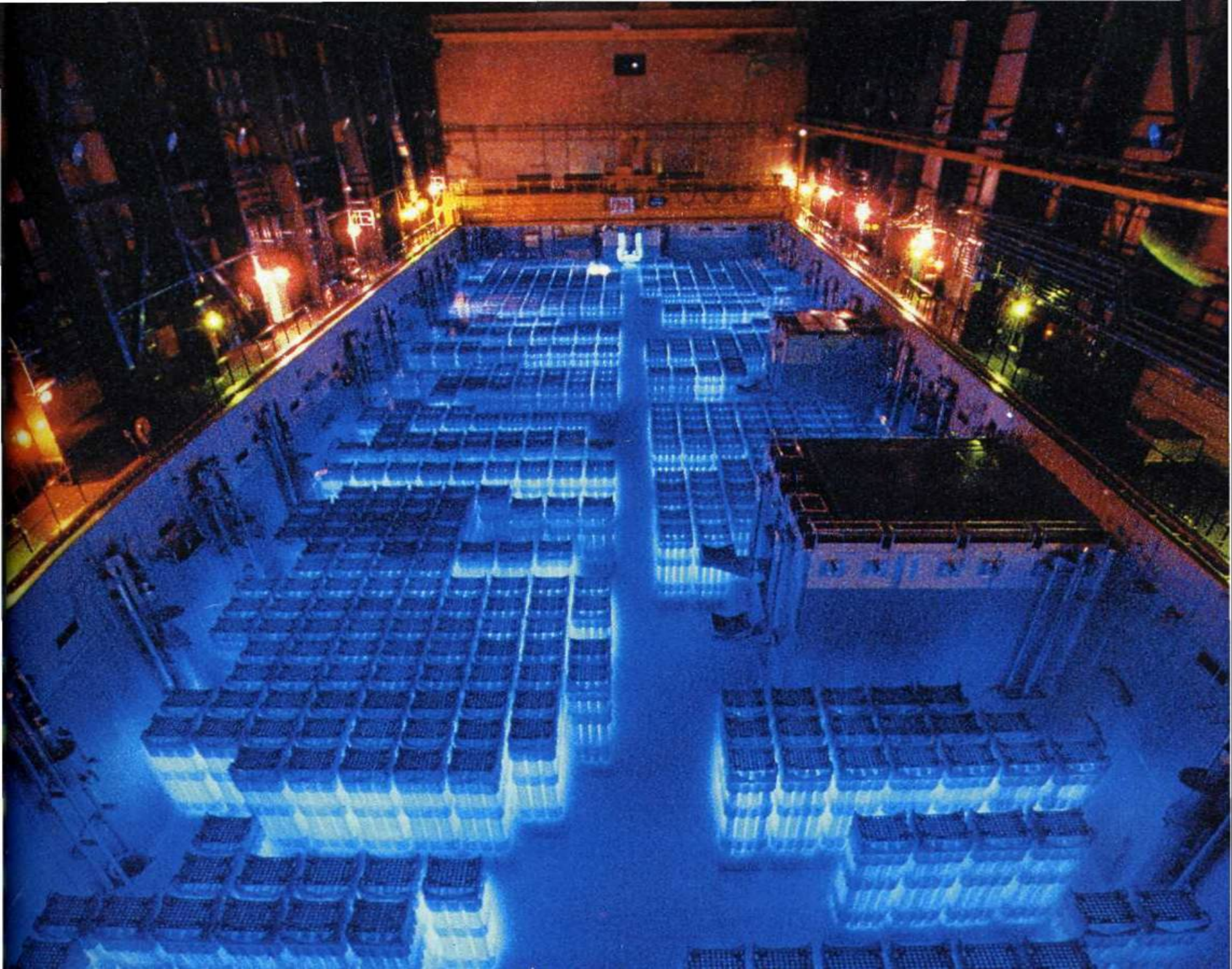
$$\cos \theta_c = \frac{c}{nv}$$



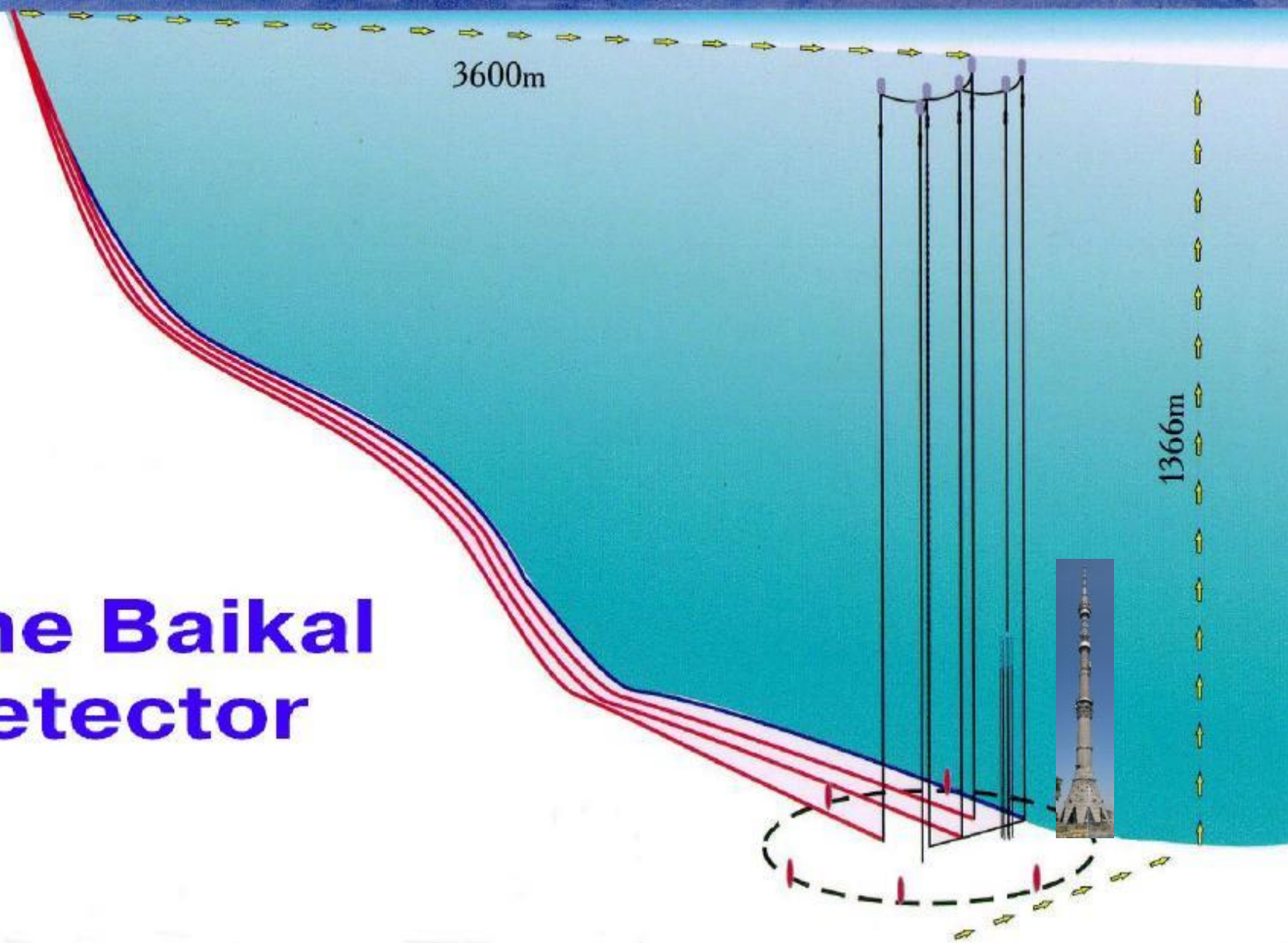
Нам нужен подходящий объём
чистой прозрачной жидкости

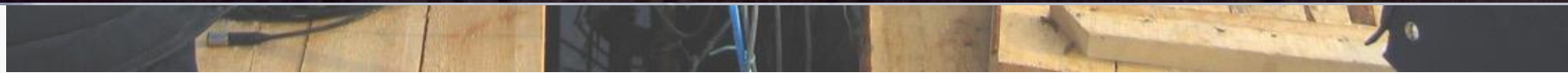


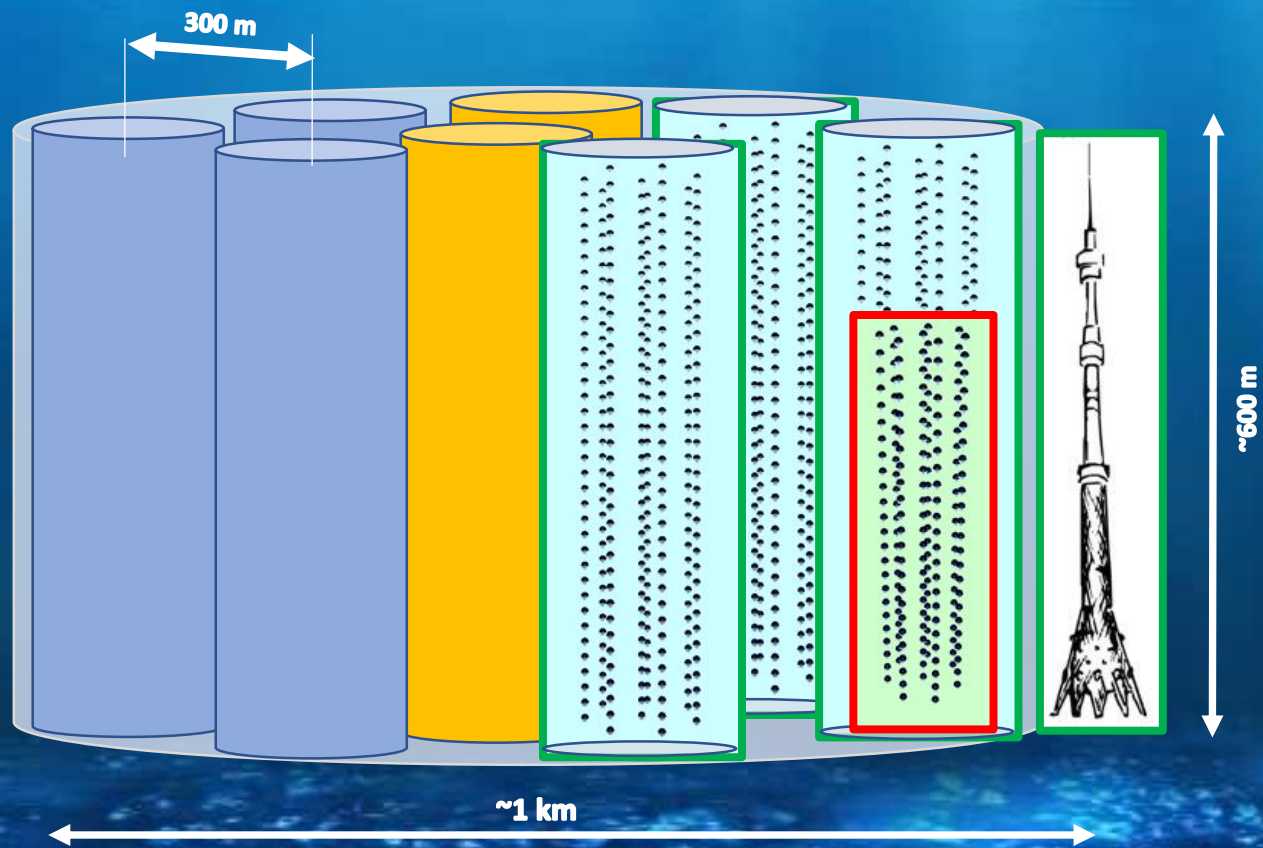


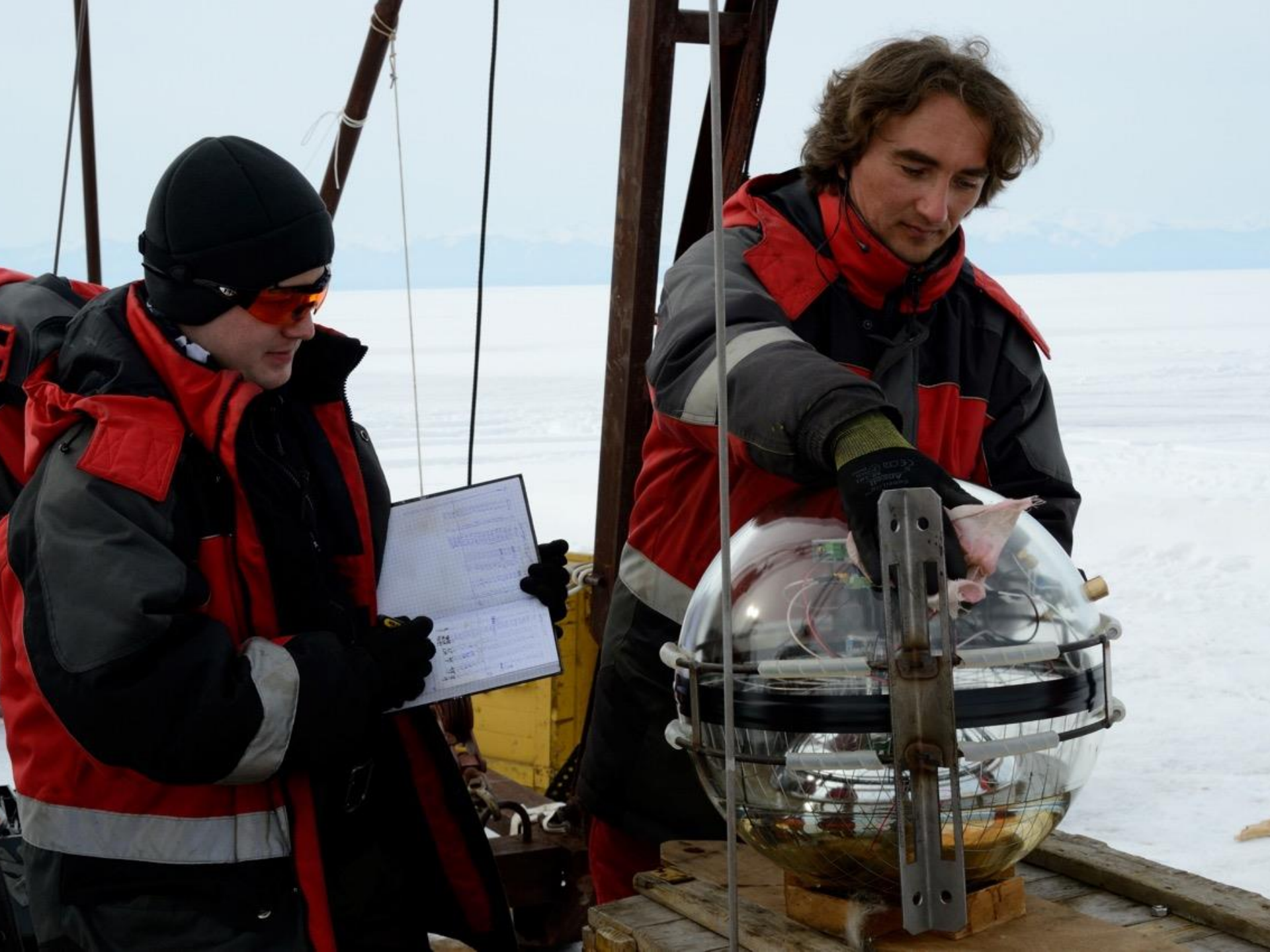


The Baikal Detector



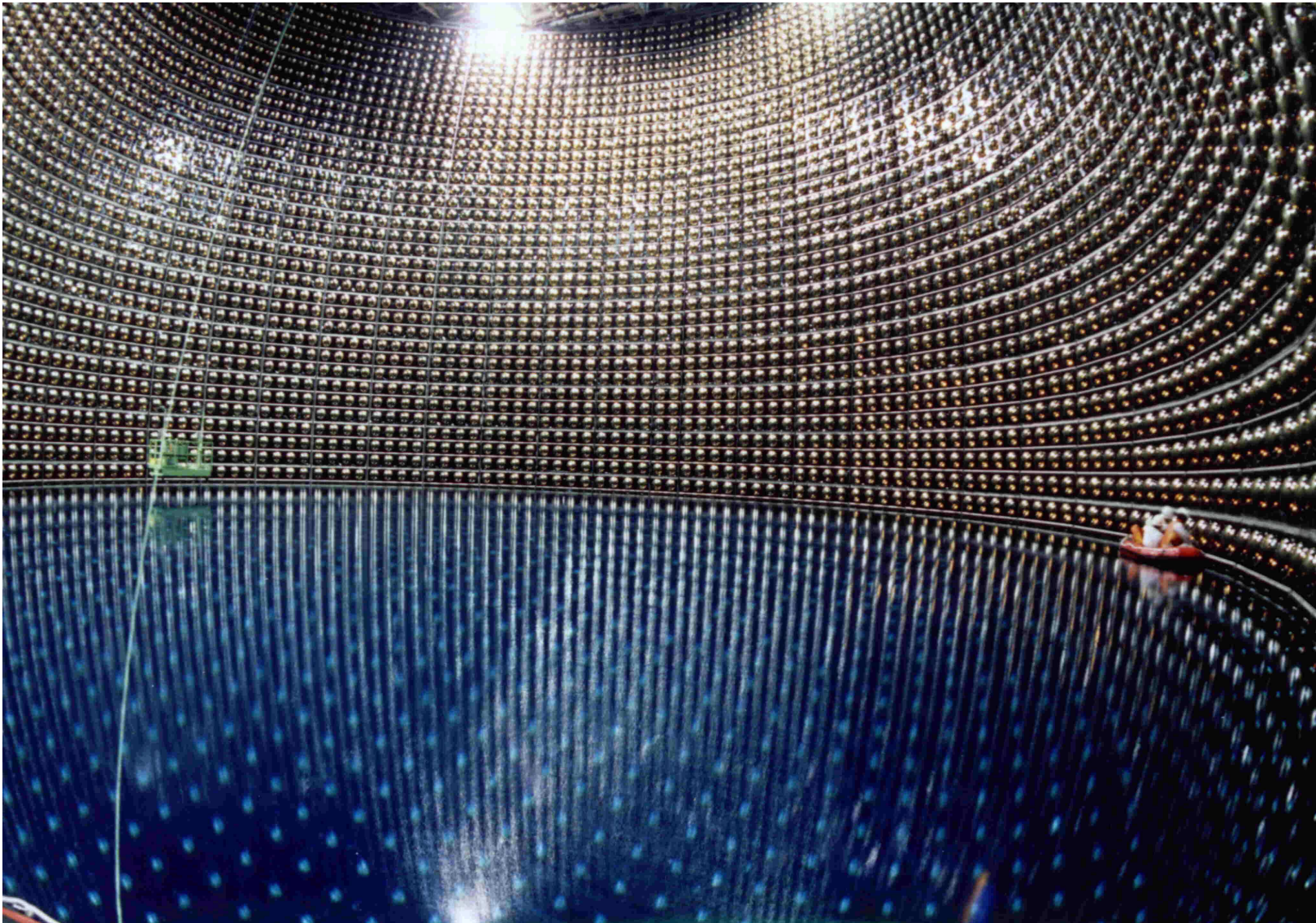






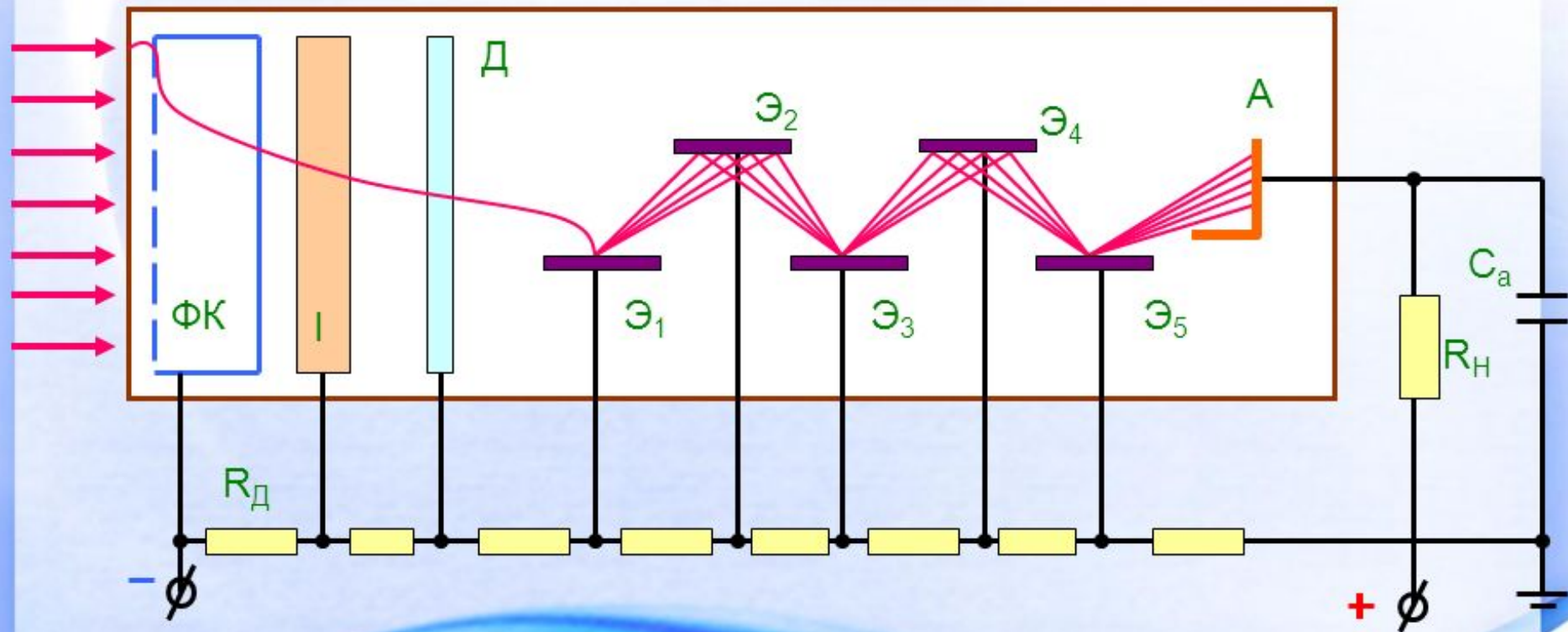


Super-Kamiokande.



Inside of the Super-Kamiokande detector during water filling.

2. Фотоумножители



Принципиальная схема ФЭУ с делителем напряжения:

ФК - фотокатод;

I - фокусирующий электрод;

Д - диафрагма;

Э₁ . . . Э₅ - диноды;

А - анод;

R_д - сопротивление делителя напряжения;

R_Н — нагрузочное сопротивление в цепи анода;

C_а — емкость анода.