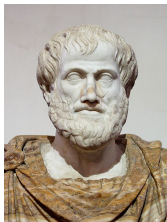


# Современная физика частиц и атомного ядра в задачах для школьников

Михаил Жабицкий  
Объединенный институт ядерных исследований

Школа для учителей физики CERN-ОИЯИ  
Женева, ноябрь 2018

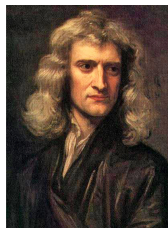
- Качественное понимание физического явления



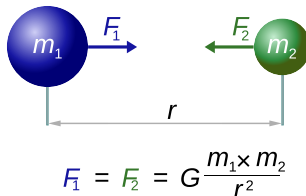
Аристотель (4 в. до н.э.):  
... тяжелые тела падают быстрее легких...

Качественные рассуждения сложно проверить...

- Качественное понимание физического явления:  
Аристотель (4 в. до н.э.): ... тяжелые тела падают быстрее легких...
- Количественное описание явления:



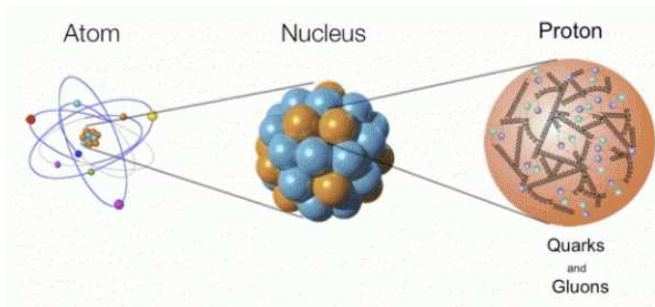
Исаак Ньютон (1642–1726/1727):



Количественные законы "подсказывают" пределы своей применимости...

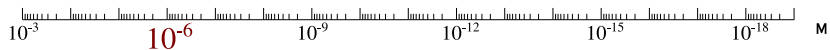
- Качественное понимание физического явления:  
Аристотель (4 в. до н.э.): ... тяжелые тела падают быстрее легких. ...
- Количественное описание явления:  
Ньютон (1642–1726/1727): закон всемирного тяготения
- Способность породить новое знание:





- Атом (ядро, электроны, фотоны)
- Атомное ядро (нуклоны = протоны и нейтроны)
- Кварки, глюоны и другие элементарные частицы

# Размер атома: характерная длина в физике микромира



Жидкие и твердые вещества — плотная упаковка молекул

## Вода ( $\text{H}_2\text{O}$ )

$\rho = 1 \text{ г/см}^3$  — плотность

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 1,008 + 15,999 = 18,015 \text{ г/моль}$  — молярная масса

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — постоянная Авогадро

Жидкие и твердые вещества — плотная упаковка молекул

## Вода ( $\text{H}_2\text{O}$ )

$\rho = 1 \text{ г/см}^3$  — плотность

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 1,008 + 15,999 = 18,015 \text{ г/моль}$  — молярная масса

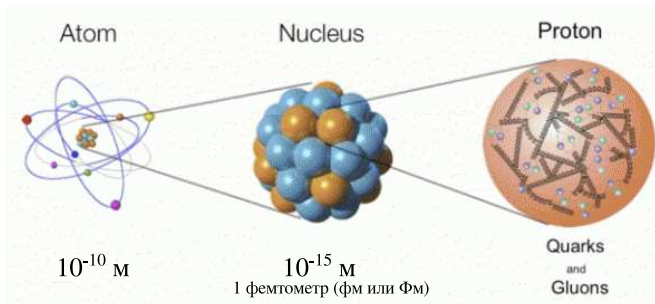
$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — постоянная Авогадро

$m_0 = \frac{M}{N_A}$  — масса одной молекулы

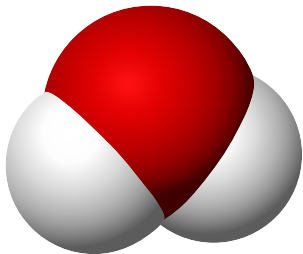
Характерный размер ( $V_0$  — объем, занимаемый молекулой):

$$x = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,3 \text{ нм}$$



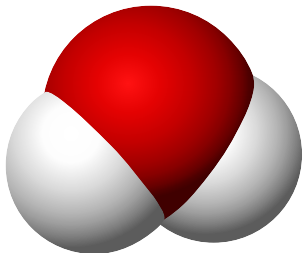


- Атом (ядро, электроны, фотоны)
- Атомное ядро (нуклоны = протоны и нейтроны)
- Кварки, глюоны и другие элементарные частицы



Что это?

Как можно объяснить форму?

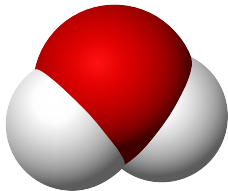


Что это?

**Схематичное** представление молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Как можно объяснить форму?

Оцените угол между  $\text{H}-\text{O}-\text{H}$  связями



Схематичное представление молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ )

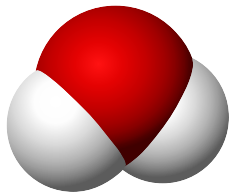
Оцените угол между Н–О–Н связями

Отдельный атом кислорода

8 электронов:  $1s^2 2s^2 2p^4$

$p$ -электроны стремятся максимально разойтись в пространстве

# Форма молекулы воды



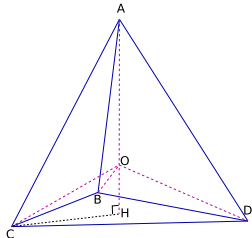
Схематичное представление молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Оцените угол между Н–О–Н связями

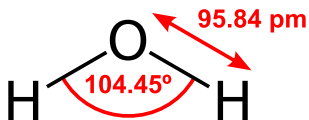
Отдельный атом кислорода

8 электронов:  $1s^2 2s^2 2p^4$

$p$ -электроны стремятся максимально разойтись в пространстве

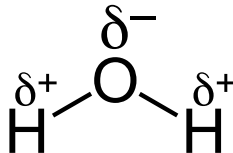
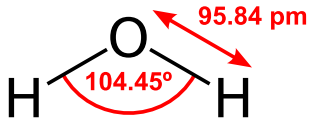


$$\arccos(-1/3) \approx 109.47^\circ$$



Какой бытовой прибор “использует” форму молекулы воды?

# Форма молекулы воды



Химики: молекула воды **полярная**

Физики: у молекулы воды есть **дипольный момент**

Накладываем высокочастотное ( $\sim 1 \text{ ГГц}$ ) электрическое поле

Вынужденное вращение полярных молекул под действием внешнего электрического поля приводит к разогреву диэлектрика

Изменение энергии, приобретаемое элементарным зарядом при пересечении разности потенциалов 1 В:



$$\Delta E = qU$$

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Формула Эйнштейна:  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ,

где  $c = 3 \cdot 10^8$  см/сек — скорость света в вакууме.

### Типичные массы

Электрон	$m_e$	$9.1 \cdot 10^{-31}$ кг	???
Протон	$m_p$	$1.673 \cdot 10^{-27}$ кг	???
Нейтрон	$m_n$	???	$940 \text{ МэВ}/c^2 = 0.940 \text{ ГэВ}/c^2$

Изменение энергии, приобретаемое элементарным зарядом при пересечении разности потенциалов 1 В:



$$\Delta E = qU$$

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

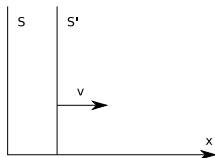
Формула Эйнштейна:  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ,

где  $c = 3 \cdot 10^8$  см/сек — скорость света в вакууме.

### Типичные массы

Электрон	$m_e$	$9.1 \cdot 10^{-31}$ кг	$0.5 \text{ МэВ}/c^2$
Протон	$m_p$	$1.673 \cdot 10^{-27}$ кг	$938 \text{ МэВ}/c^2 = 0.938 \text{ ГэВ}/c^2$
Нейтрон	$m_n$	$1.675 \cdot 10^{-27}$ кг	$940 \text{ МэВ}/c^2 = 0.940 \text{ ГэВ}/c^2$





Специальная теория относительности (СТО) описывает кинематику тел, движущихся с произвольными скоростями (меньшими  $c$ ) [Альберт Эйнштейн, 1905]

Постулаты СТО:

- 1 Законы физики инвариантны (протекают одинаковым образом) относительно выбора инерциальной системы отсчета
- 2 Скорость света  $c$  в инерциальной системе отсчета не зависит от скорости источника

Преобразования Лоренца [А. Пуанкаре, 1898]

Преобразования 4-векторов  $(t, x, y, z)$  или  $(E, p_x, p_y, p_z)$  при переходе между инерциальными системами отсчета  $S$  и  $S'$ :

$$t' = \gamma(t - \beta x)$$

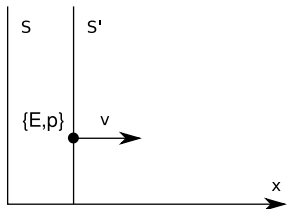
$$\beta = v/c$$

$$x' = \gamma(x - \beta t)$$

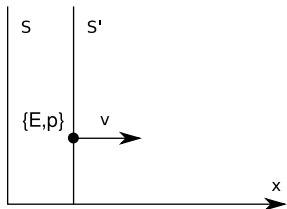
$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

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

Естественная система единиц:  $\hbar = c = 1$



Частица массой  $m$  имеет импульс  $p$  в системе наблюдателя. Найдите ее скорость.

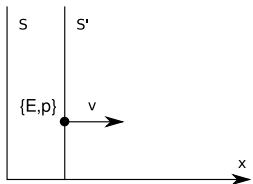


Частица массой  $m$  имеет импульс  $p$  в системе наблюдателя. Найдите ее скорость.

Перейдем в систему, связанную с частицей:

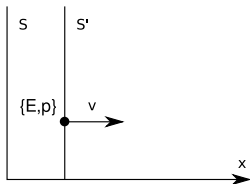
$$E^* = m = \gamma(E - \beta p), \quad E = \sqrt{p^2 + m^2}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Ответ:  $\beta = \frac{p}{E} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}}, \quad \gamma = \frac{E}{m}.$



Частица массой  $m$  имеет импульс  $p$  в системе наблюдателя. Скорость и энергия частицы:

$$\beta = \frac{p}{E} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}}, \quad \gamma = \frac{E}{m}$$



Частица массой  $m$  имеет импульс  $p$  в системе наблюдателя. Скорость и энергия частицы:

$$\beta = \frac{p}{E} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}}, \quad \gamma = \frac{E}{m}$$

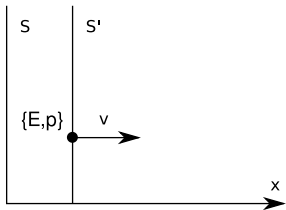
Специальная теория относительности (СТО) описывает кинематику тел, движущихся с произвольными скоростями (меньшими  $c$ ) [Альберт Эйнштейн, 1905]

$$v = \beta c = \frac{pc^2}{\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}} = \frac{pc^2}{mc^2 \sqrt{1 + \left(\frac{pc}{mc^2}\right)^2}} \approx \frac{p}{m}$$

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} = mc^2 \sqrt{1 + \left(\frac{pc}{mc^2}\right)^2} \approx mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

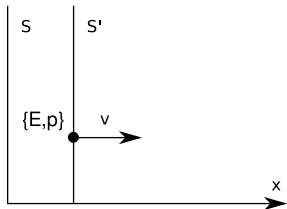
Разложение в ряд Тейлора:  $(1+x)^\alpha \xrightarrow{x \ll 1} 1 + \alpha x + \dots$

## Немного кинематики: время жизни частиц



Время жизни  $\pi^0$ -мезона  $\tau = 8.4 \cdot 10^{-17}$  сек.  
Его масса  $m = 135 \text{ МэВ}/c^2$ . Какое расстояние **в среднем** пролетят  $\pi^0$ -мезоны с импульсом  $p = 135 \text{ ГэВ}/c$ ?

## Немного кинематики: время жизни частиц

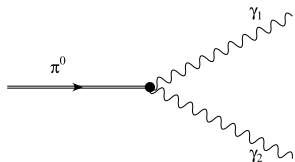


Время жизни  $\pi^0$ -мезона  $\tau = 8.4 \cdot 10^{-17}$  сек.  
Его масса  $m = 135 \text{ МэВ}/c^2$ . Какое расстояние **в среднем** пролетят  $\pi^0$ -мезоны с импульсом  $p = 135 \text{ ГэВ}/c$ ?

Время жизни частицы определяется в ее системе покоя:

$$t = \gamma(t^* - \beta x^*) \Rightarrow \Delta t = \gamma \tau \approx \frac{p}{m} \cdot \tau = 8.4 \cdot 10^{-14} \text{ сек.}$$

Ответ:  $\Delta x = c\Delta t = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 25 \text{ мкм.}$

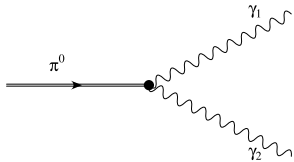


$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad [\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}]$$

$$m = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

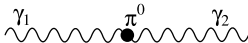


# Немного кинематики: распад частиц

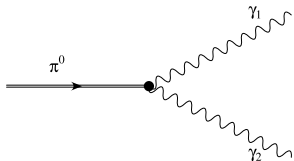


$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad [\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}]$$
$$m = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

В системе покоя  $\pi^0$ -мезона энергия фотонов  $E_1 = E_2 = \frac{m}{2} = 67 \text{ МэВ}$ :

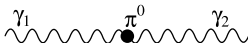


# Немного кинематики: распад частиц



$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad [\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}]$$
$$m = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

В системе покоя  $\pi^0$ -мезона энергия фотонов  $E_1 = E_2 = \frac{m}{2} = 67 \text{ МэВ}$ :

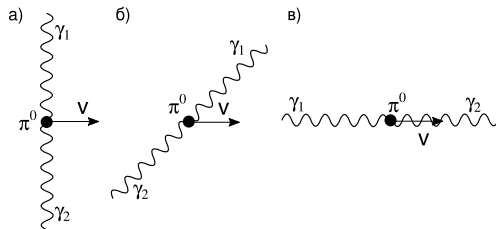


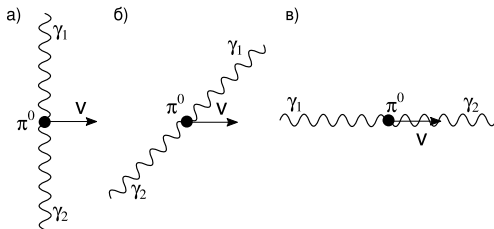
В результате распада  $\pi^0$ -мезона с импульсом  $p = 135 \text{ ГэВ}/c$  образовались два  $\gamma$ -кванта.

Какие максимальные и минимальные энергии могут быть у образовавшихся фотонов в лабораторной системе?

Какие максимальные и минимальные скорости?

# Немного кинематики: распад частиц

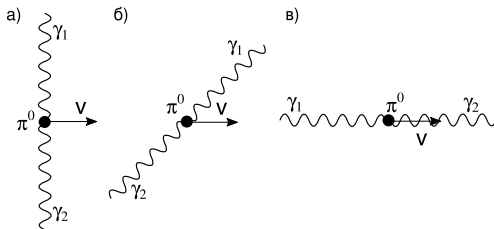




$$E_{\text{мин}} = \gamma E^* - \beta \gamma p^* = \frac{m}{2} \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{m}{2\gamma} \approx \frac{m^2}{2p} = \frac{(135 \text{ МэВ})^2}{2 \cdot 135 \text{ ГэВ}} = 67 \text{ кэВ}.$$

$$E_{\text{макс}} = \gamma E^* + \beta \gamma p^* = \frac{\gamma m}{2} (1 + \beta) \approx \gamma m = E = 135 \text{ ГэВ}.$$

# Немного кинематики: распад частиц



$$E_{\text{мин}} = \gamma E^* - \beta \gamma p^* = \frac{m}{2} \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{m}{2\gamma} \approx \frac{m^2}{2p} = \frac{(135 \text{ МэВ})^2}{2 \cdot 135 \text{ ГэВ}} = 67 \text{ кэВ}.$$

$$E_{\text{макс}} = \gamma E^* + \beta \gamma p^* = \frac{\gamma m}{2} (1 + \beta) \approx \gamma m = E = 135 \text{ ГэВ}.$$

Самый быстрый **массивный** объект, разогнанный людьми?

Большой адронный коллайдер (LHC — Large Hadron Collider)

Разгоняет протоны или ионы до релятивистских скоростей

В 2016г.:  $E(\text{протонов}) = 6.5 \text{ ТэВ} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$

При столкновениях  $E_{\text{ц.м.}} = 2E = 13 \text{ ТэВ}$



# Самый быстрый **массивный** объект, разогнанный людьми?

## Большой адронный коллайдер (LHC)

Скорость протона ( $m = 938$  МэВ) с энергией 6.5 ТэВ?



$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

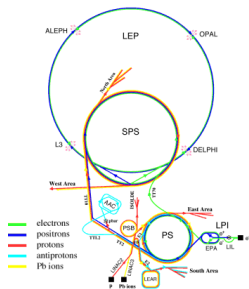
$$6.5 \text{ ТэВ} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ} = 1. \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E}\right)^2} = 0.9999999896!$$

$$1 - \beta \approx 10^{-8}$$

# Самый быстрый **массивный** объект, разогнанный людьми?

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E}\right)^2}$$



Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP)

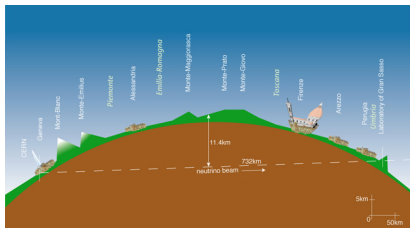
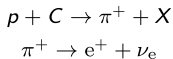
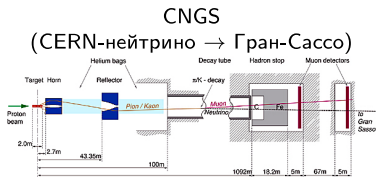


	частица	масса	энергия	$\beta$	$1 - \beta$
LHC	$p$	938 МэВ	6.5 ТэВ	0.9999999 <b>896</b>	$10^{-8}$
LEP	$e$	0.511 МэВ	154.5 ГэВ	0.9999999 <b>99995</b>	$5 \cdot 10^{-12}$



# Самый быстрый массивный объект, разогнанный людьми?

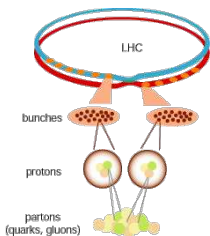
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E}\right)^2}$$



	частица	масса	энергия	$\beta$	$1 - \beta$
LHC	$p$	938 МэВ	6.5 ТэВ	0.99999999896	$10^{-8}$
LEP	$e$	0.511 МэВ	154.5 ГэВ	0.999999999995	$5 \cdot 10^{-12}$
CNGS	$\nu_e$	< 2 эВ?	до 100 ГэВ	0.9999999999999999999998	$2 \cdot 10^{-22}$

# Большой адронный коллайдер (LHC)

Энергия протонов, одновременно находящихся в LHC?



Энергия одного протона:

$$6.5 \text{ ТэВ} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

Сгусток (bunch) содержит  $10^{11}$  протонов:

$$E_{\text{bunch}} = 10^5 \text{ Дж}$$

[автомобиль  $m = 1 \text{ т}$  со скоростью  $15 \text{ м/с}$  ( $54 \text{ км/ч}$ )]

В кольце LHC 2808 сгустков:

$$E_{\text{beam}} = 3 \cdot 10^8 \text{ Дж} = 300 \text{ МДж}$$

[достаточно, чтобы расплавить  $500 \text{ кг}$  меди]

[диаметр сгустка в точке взаимодействия  $16 \text{ мкм!}$ ]

Найти скорость, при которой электропоезд "Сапсан" (10 вагонов,  $670 \text{ т}$ ) обладает кинетической энергией  $300 \text{ МДж}$ .

Какую массу имеет протон, разогнанный до  $E = 6.5 \text{ ТэВ}/c$ ?

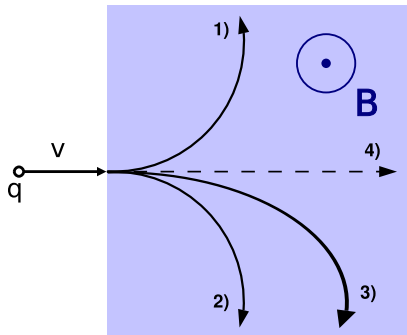
За какое время протон совершает один полный оборот в LHC?

Пучок протонов в LHC удерживается более 10 ч. Какое расстояние пролетят протоны за это время? Сравните с характерными расстояниями в Солнечной системе.

Какому отрезку времени в собственной системе отсчета пучка протонов соответствуют 10 ч в лабораторной системе?

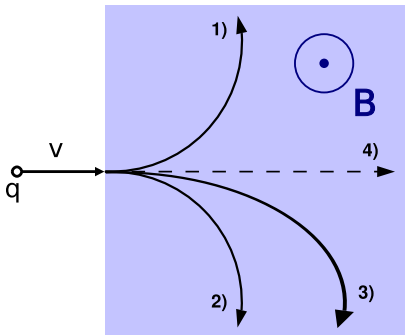
$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \tau \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{m}{E} \Delta t \approx \frac{\Delta t}{7000}$$

## Ускоритель своими руками: сила Лоренца



Треки (следы) каких частиц космического излучения были зарегистрированы?

## Ускоритель своими руками: сила Лоренца



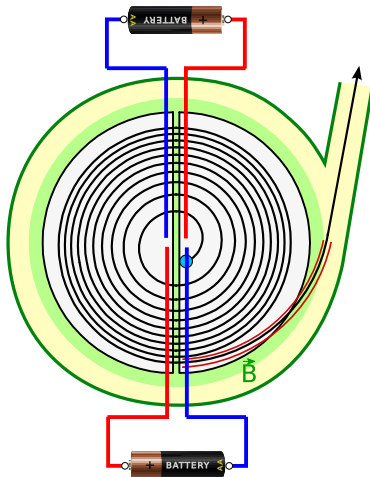
Треки (следы) каких частиц космического излучения были зарегистрированы?

Сила Лоренца [1892]

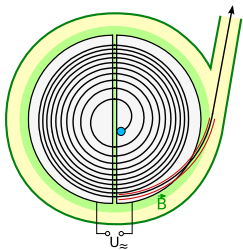
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

# Ускоритель своими руками



Циклотрон [Лоуренс, 1932]



Сила Лоренца [1892]  $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

$$E_{\text{макс}} = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{q^2 R^2 B^2}{2m}$$

$$R = 4.67 \text{ м}, \quad B = 2 \text{ Т} \Rightarrow E \approx 4 \text{ ГэВ}$$

На практике  $E < 0.5 \text{ ГэВ}$

Улицы в CERN, названные в честь наших соотечественников

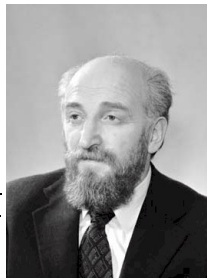




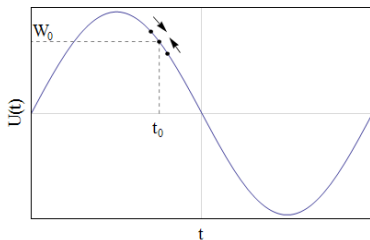
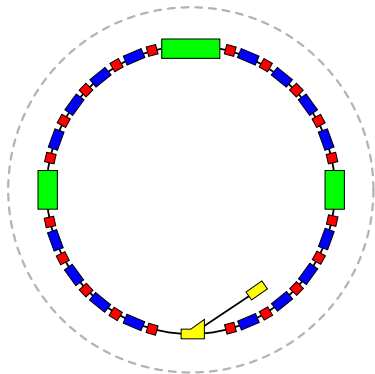
## Улицы в CERN, названные в честь наших соотечественников



Владимир Иосифович Векслер — принципы работы синхротронов [1944], в том числе LHC



Андрей Михайлович (Герш) Будкер — коллайдеры [1963]; электронное охлаждение [1968]

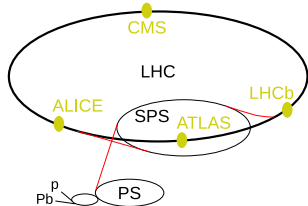


[В. Векслер, 1944]: Принцип автофазировки — продольная устойчивость ускоряемого пучка. Принцип работы синхротронов, в том числе LHC.



Длина дипольного магнита LHC?

Релятивистский синхротрон [Векслер, 1944 — ускорительный *Annus mirabilis*]



Релятивистская сила Лоренца

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]), \quad p = \gamma m v$$
$$R = \frac{\gamma m v}{qB} = \frac{pc}{qB} \Rightarrow E \approx qcBR$$

Для LHC:

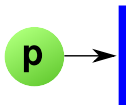
$$L = 26.659 \text{ км}$$

$$B = 7.7 \text{ Т} \Rightarrow E \approx 6.5 \text{ ТэВ}$$

$$\sum L_{\text{dipole}} = 17.7 \text{ км}$$

$N_{\text{dipole}} = 1232$  пар дипольных магнитов

$$\sum L_{\text{dipole}} / 1232 \approx 14.3 \text{ м}$$



Какие частицы могут быть рождены в протон-нуклонных столкновениях в экспериментах на фиксированных мишенях?

4-импульса налетающего протона  $\{E = \sqrt{m^2 + p^2}; p\}$  и протона в мишени  $\{m; 0\}$

В системе центра масс  $p_1^* + p_2^* = 0$ :

$$0 = \gamma(p - \beta E) - \beta\gamma m \Rightarrow \beta = \frac{p}{m + E} \Rightarrow \gamma = \sqrt{\frac{m + E}{2m}}$$

$$(E_{fixed}^*)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 = 2m(m + E)$$



$$E_{coll}^* = E_1 + E_2 = 2E !!!$$

Первый коллайдер, работавший на физику, — ВЭП-1 (Встречные Электронные Пучки-1, Новосибирск). Создан под руководством Г. Будкера в 1963 г.

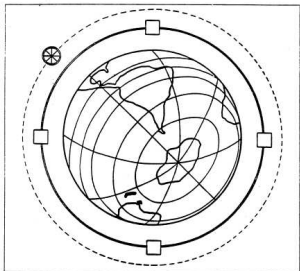
Сравните с фиксированной мишенью:

$$E_{fixed}^* = \sqrt{2m(m + E)}$$

Задача: В Большом адронном коллайдере (LHC) сталкиваются протоны с энергией  $E = 7 \text{ ТэВ} = 7 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ . До какой энергии  $E_{fix}$  нужно разогнать протон в экспериментах с фиксированной мишенью, чтобы достигнуть той же энергии, что и в столкновении встречных протонов на LHC?

$$E_{fix} \approx \frac{2E^2}{m} = 10^{17} \text{ эВ}$$

# “Предельный” ускоритель Ферми



From a 1954 Slide by Enrico Fermi, University of Chicago Special Collections.

Э. Ферми в 1954 г. рассмотрел возможность создания “Предельного” ускорителя вдоль экватора Земли.

Полагая  $B = 8 \text{ Т}$ , оцените максимальную энергию протонов, разогнанных в “Предельном” ускорителе.

$$E = qcBR = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ эВ} = 15000 \text{ ТэВ}$$

Сравните в энергией Планка  $E_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 5 \cdot 10^{27} \text{ эВ}$

Зачем нужны **высокие** энергии?

## Зачем нужны высокие энергии?

Волны де Бройля:  $\lambda p = h$

$h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  Дж · сек =  $4.1 \cdot 10^{-15}$  эВ · сек — постоянная Планка

$\lambda$ , м	$pc$
$10^{-6}$	1.2 эВ
$10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^4$ эВ = 12 кэВ
$10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^9$ эВ = 1.2 ГэВ
$1.8 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{12}$ эВ = 7 ТэВ

Характерная длина в физике частиц и ядерной физике: 1 фм =  $10^{-15}$  м.  
Физики предпочитают запись 1 фм =  $10^{-15}$  м. Почему?



## Зачем нужны **высокие** энергии: создание (генерация) частиц

Найти пороговый импульс налетающих протонов, необходимый для генерации  $\pi^0$  мезонов на фиксированной водородной мишени.

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$

$$E_{\text{fixed}}^* = \sqrt{2m_p(m_p + E)} = \sqrt{2m_p(m_p + \sqrt{m_p^2 + p^2})} > \sum m_i = 2m_p + m_{\pi^0}$$
$$m_p = 938 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_{\pi^0} = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

$$p > \left(1 + \frac{m_{\pi^0}}{2m}\right) \sqrt{m_{\pi^0}(m_{\pi^0} + 4m)} = 777 \text{ МэВ}/c.$$

## Зачем нужны **высокие** энергии: создание (генерация) частиц

Генерация антиматерии: Найти пороговый импульс налетающих протонов, необходимый для генерации антипротонов на фиксированной водородной мишени.



Что "спрятано" под обозначением  $X$ ?

## Зачем нужны **высокие** энергии: создание (генерация) частиц

Генерация антиматерии: Найти пороговый импульс налетающих протонов, необходимый для генерации антипротонов на фиксированной водородной мишени.



Что "спрятано" под обозначением  $X$ ?

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} \tag{1}$$

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} + p \tag{2}$$

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} + p + p \tag{3}$$

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} + p + p + p \tag{4}$$

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} + p + p + p + p \tag{5}$$

$$p + p \xrightarrow{?} \bar{p} + p + p + p + p + \bar{p} \tag{6}$$

## Зачем нужны **высокие** энергии: создание (генерация) частиц

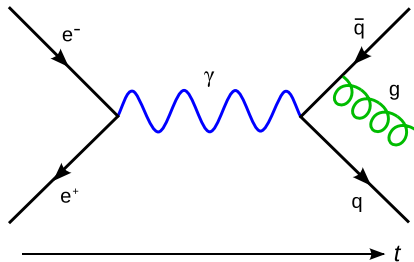
Генерация антиматерии: Найти пороговый импульс налетающих протонов, необходимый для генерации антипротонов на фиксированной водородной мишени.

Сведем задачу к решенной проблеме рождения  $\pi^0$  мезона:

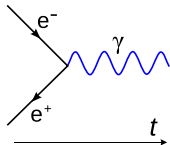
$$p + p \rightarrow \pi^0 + p + p \quad \text{Импульс } p > 777 \text{ МэВ/с}$$

$$p + p \rightarrow (\bar{p} + p) + p + p$$

$$p > \left(1 + \frac{m_{2p}}{2m}\right) \sqrt{m_{2p}(m_{2p} + 4m)} = m \cdot 4\sqrt{3} = 6.5 \text{ ГэВ/с.}$$



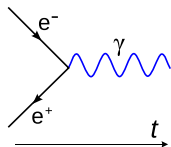
# Аннигиляция электрон-позитронных пар



Могут ли электрон и позитрон аннигилировать в одиночный фотон?

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma?$$

# Аннигиляция электрон-позитронных пар



Могут ли электрон и позитрон аннигилировать в одиночный фотон?

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma?$$

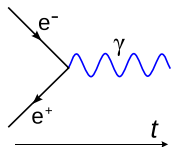
Перейдем в систему ц.м.  $e^+e^-$  пары:

$$p_1^* = \gamma(p_1 - \beta_{cm}E_1)$$

$$p_2^* = \gamma(p_2 - \beta_{cm}E_2)$$

$$p_1^* + p_2^* = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta_{cm} = \frac{p_1 + p_2}{E_1 + E_2} \quad \Rightarrow \quad p^* = p_1^* = -p_2^*$$

# Аннигиляция электрон-позитронных пар



Могут ли электрон и позитрон аннигилировать в одиночный фотон?

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma?$$

Перейдем в систему ц.м.  $e^+e^-$  пары:

$$p_1^* = \gamma(p_1 - \beta_{cm}E_1)$$

$$p_2^* = \gamma(p_2 - \beta_{cm}E_2)$$

$$p_1^* + p_2^* = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta_{cm} = \frac{p_1 + p_2}{E_1 + E_2} \quad \Rightarrow \quad p^* = p_1^* = -p_2^*$$

$m^2 = E^2 - p^2$  квадрат 4-вектора  $\{E, \mathbf{p}\}$  — Лоренц-инвариант

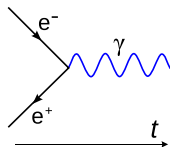
$m^2 = 0$  для фотона

$$m^2 = \left(2\sqrt{p^{*2} + m^2}\right)^2 - (p_1^* + p_2^*)^2 = 4m^2 + 4p^{*2} > 0 \quad \text{для } e^+e^- \text{ пары}$$

$e^+ + e^- \rightarrow \gamma$  — нарушает закон сохранения энергии-импульса



# Аннигиляция электрон-позитронных пар



Могут ли электрон и позитрон аннигилировать в одиночный фотон?

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma?$$

Перейдем в систему ц.м.  $e^+e^-$  пары:

$$p_1^* = \gamma(p_1 - \beta_{cm}E_1)$$

$$p_2^* = \gamma(p_2 - \beta_{cm}E_2)$$

$$p_1^* + p_2^* = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta_{cm} = \frac{p_1 + p_2}{E_1 + E_2} \quad \Rightarrow \quad p^* = p_1^* = -p_2^*$$

$m^2 = E^2 - p^2$  квадрат 4-вектора  $\{E, \mathbf{p}\}$  — Лоренц-инвариант

$m^2 = 0$  для фотона

$$m^2 = \left(2\sqrt{p^{*2} + m^2}\right)^2 - (\mathbf{p}_1^* + \mathbf{p}_2^*)^2 = 4m^2 + 4p^{*2} > 0 \quad \text{для } e^+e^- \text{ пары}$$

$e^+ + e^- \rightarrow \gamma$  — нарушает закон сохранения энергии-импульса

$$e^+ + e^- \rightarrow N\gamma, \quad N \geq 2$$

# Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева

1																		2																		3																		4																		5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1 1,008 H Hydrogen Водород																		2 4,003 He Helium Гелий																		3 6,94 Li Lithium Литий																		4 9,0122 Be Beryllium Бериллий																		5 22,99 B Boron Бор																		6 12,011 C Carbon Углерод																		7 14,007 N Nitrogen Азот																		8 15,999 O Oxygen Кислород																		9 18,998 F Fluorine Фтор																		10 39,101 Ne Neon Неон																		11 22,990 Na Sodium Натрий																		12 24,305 Mg Magnesium Магний																		13 26,981 Al Aluminum Алюминий																		14 28,086 Si Silicon Кремний																		15 30,974 P Phosphorus Фосфор																		16 32,06 S Sulfur Сера																		17 35,45 Cl Chlorine Хлор																		18 39,95 Ar Argon Аргон																		19 39,098 K Potassium Калий																		20 40,078 Ca Calcium Кальций																		21 44,956 Sc Scandium Скандий																		22 88,906 Y Yttrium Иттрий																		23 88,906 Zr Zirconium Цирконий																		24 91,224 Nb Niobium Ниббий																		25 92,906 Mo Molybdenum Молибден																		26 95,94 Tc Technetium Технеций																		27 98,906 Ru Ruthenium Рутений																		28 101,07 Rh Rhodium Родий																		29 106,42 Pd Palladium Палладий																		30 107,87 Ag Silver Серебро																		31 112,41 Cd Cadmium Кадмий																		32 114,82 In Indium Индий																		33 118,71 Sn Tin Олово																		34 127,60 Sb Antimony Сурьма																		35 127,60 Te Tellurium Теллур																		36 127,60 I Iodine Йод																		37 131,29 Xe Xenon Ксенон																		38 85,468 Rb Rubidium Рубидий																		39 85,468 Sr Strontium Стронций																		40 87,62 Yb Ytterbium Иттербий																		41 88,906 La Lanthanum Лантан																		42 138,91 Ce Cerium Церий																		43 140,12 Pr Praseodymium Прометий																		44 140,91 Nd Neodymium Неодим																		45 144,24 Pm Promethium Прометий																		46 150,36 Sm Samarium Самарий																		47 151,96 Eu Europium Европий																		48 157,25 Gd Gadolinium Гадолиний																		49 158,93 Tb Terbium Тербий																		50 158,93 Dy Dysprosium Дипросий																		51 162,50 Ho Holmium Гольмий																		52 164,93 Er Erbium Эрбий																		53 167,26 Tm Thulium Тимий																		54 168,93 Yb Ytterbium Иттербий																		55 173,05 Lu Lutetium Лютеций																		56 175,05 Hf Hafnium Гафний																		57 178,49 Ta Tantalum Тантал																		58 180,95 W Tungsten Вольфрам																		59 183,85 Re Rhenium Рений																		60 186,21 Os Osmium Осмий																		61 187,75 Ir Iridium Иридий																		62 188,91 Pt Platinum Платина																		63 195,08 Au Gold Золото																		64 197,04 Hg Mercury Ртуть																		65 200,59 Tl Thallium Таллий																		66 204,38 Pb Lead Свинец																		67 208,98 Bi Bismuth Висмут																		68 209 Po Polonium Полоний																		69 209 At Astatine Астат																		70 209 Rn Radon Радон																		71 223,02 Fr Francium Франций																		72 223,02 Ra Radium Радий																		73 227,03 Ac Actinium Актиний																		74 227,03 Rf Rutherfordium Рутерфордий																		75 261,10 Db Dubnium Дубний																		76 261,10 Sg Seaborgium Сейборгий																		77 261,10 Bh Bohrium Борий																		78 261,10 Hs Hassium Хассий																		79 261,10 Mt Meitnerium Мейтнерий																		80 261,10 Ds Darmstadtium Дармштадтий																		81 261,10 Rg Roentgenium Рентгений																		82 261,10 Cn Copernicium Коперниций																		83 261,10 Nh Nihonium Нигоเนียม																		84 261,10 Fl Flerovium Флеровий																		85 261,10 Mc Moscovium Московий																		86 261,10 Lv Livermorium Ливерморий																		87 261,10 Ts Tennessine Теннессиум																		88 261,10 Og Oganesson Оганессон																	



## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

РАЗДВИГАЕМ ГРАНИЦЫ ИЗВЕСТНОГО  
EXPANDING THE FRONTIERS OF KNOWLEDGE



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

www.jinr.ru

### ЛАНТАНОИДЫ / LANTHANIDES

58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
140,12	Cerium	140,91	Praseodymium	140,91	Neodymium	144,24	Promethium	150,36	Samarium	151,96	Europium	157,25	Gadolinium	158,93	Terbium	158,93	Dysprosium	162,50	Holmium	164,93	Erbium	167,26	Thulium	168,93	Ytterbium	173,05	Lutetium
(La)	(Ce)	(Pr)	(Nd)	(Pm)	(Sm)	(Eu)	(Gd)	(Tb)	(Dy)	(Ho)	(Er)	(Tm)	(Yb)	(Lu)													

### АКТИНОИДЫ / ACTINIDES

89	Th	90	Pa	91	U	92	Np	93	Pu	94	Am	95	Cm	96	Bk	97	Cf	98	Es	99	Fm	100	Md	101	No	102	Lr
232,04	Thorium	231,04	Protactinium	238,03	Uranium	237,05	Neptunium	244,06	Plutonium	247,07	Americium	251,08	Curium	252,08	Berkelium	257,10	Californium	259,10	Einsteinium	262,11	Fermium	267,12	Mendelevium	268,12	Nobelium	269,12	Lr
(Th)	(Pa)	(U)	(Np)	(Pu)	(Am)	(Cm)	(Bk)	(Cf)	(Es)	(Fm)	(Md)	(No)	(Lr)														

Атомный номер  
Атомная масса  
Название  
Name

Символ  
Symbol

Год открытия  
Year of discovery

Электронная конфигурация  
Electronic configuration

105  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>1</sup>7s<sup>2</sup>

Dubnium  
Дубний

106  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>2</sup>7s<sup>2</sup>

107  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>3</sup>7s<sup>2</sup>

108  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>4</sup>7s<sup>2</sup>

109  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>5</sup>7s<sup>2</sup>

110  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>6</sup>7s<sup>2</sup>

111  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>7</sup>7s<sup>2</sup>

112  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>8</sup>7s<sup>2</sup>

113  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>9</sup>7s<sup>2</sup>

114  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>

115  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>1</sup>

116  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>2</sup>

117  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>3</sup>

118  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>4</sup>

119  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>5</sup>

120  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>

121  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>1</sup>

122  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>

123  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>1</sup>

124  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>2</sup>

125  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>3</sup>

126  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>4</sup>

127  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>5</sup>

128  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>

129  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>1</sup>

130  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>2</sup>

131  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>3</sup>

132  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>4</sup>

133  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>5</sup>

134  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>6</sup>

135  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>7</sup>

136  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>8</sup>

137  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>9</sup>

138  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>

139  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>1</sup>

140  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>

141  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>1</sup>

142  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>2</sup>

143  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>3</sup>

144  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>4</sup>

145  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>5</sup>

146  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>

147  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>1</sup>

148  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>

149  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>1</sup>

150  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>2</sup>

151  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>3</sup>

152  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>4</sup>

153  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>5</sup>

154  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>

155  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>1</sup>

156  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>

157  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>1</sup>

158  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>2</sup>

159  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>3</sup>

160  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>4</sup>

161  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>5</sup>

162  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>

163  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>1</sup>

164  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>

165  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>1</sup>

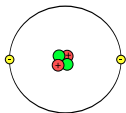
166  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>2</sup>

167  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>3</sup>

168  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>4</sup>

169  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>5</sup>

170  
[Rn] 5f<sup>14</sup>6d<sup>10</sup>7s<sup>2</sup>7p<sup>6</sup>8s<sup>2</sup>8p<sup>6</sup>8d<sup>10</sup>9s<sup>2</sup>9p<sup>6</sup>10s<sup>2</sup>10p<sup>6</sup>11s<sup>2</sup>11p<sup>6</sup>12s<sup>2</sup>12p<sup>6</sup>



Атомы состоят из ядра и "электронного" облака

Атомные ядра содержат нуклоны (протоны и нейтроны)



Протон состоит из 3 валентных кварков

$$m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$

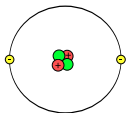


Нейтрон — тоже из 3 кварков

$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2$$

НО!  $\tau = 881.5 \text{ сек.}$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Атомы состоят из ядра и "электронного" облака

Атомные ядра содержат нуклоны (протоны и нейтроны)



Протон состоит из 3 валентных кварков

$$m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$



Нейтрон — тоже из 3 кварков

$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2$$

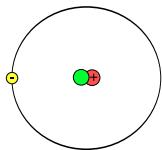
НО!  $\tau = 881.5 \text{ сек.}$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Оцените время жизни атомного ядра, содержащего 82 протона и 126 нейтронов.

Оцените время жизни атомного ядра, содержащего 82 протона и 126 нейтронов.

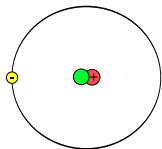
${}^{208}_{82}\text{Pb}$  — стабильное! ядро



Почему нейтроны в свинце ( ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ), гелии ( ${}^4_2\text{He}$ ) или дейтроне ( ${}^2_1\text{D}$ ) не распадаются?

# Дейтрон

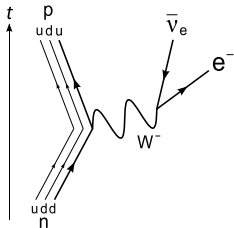
Дейтрон ( ${}^2_1\text{H}$  или  ${}^2_1\text{D}$ ) — **стабильное** ядро, состоящее из протона и нейтрона.



Почему нейтрон в дейтроне не распадается?

$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$

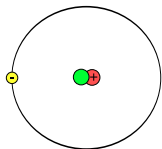
$$\Delta m = m_n - m_p = 1.29333205(48) \text{ МэВ}/c^2 \sim 10^{-3} m_p$$



# Дейтрон

Дейтрон ( ${}^2_1\text{H}$  или  ${}^2_1\text{D}$ ) — **стабильное** ядро, состоящее из протона и нейтрона.

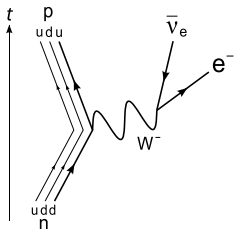
Почему нейтрон в дейтроне не распадается?



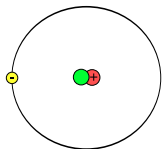
$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Delta m = m_n - m_p = 1.29333205(48) \text{ МэВ}/c^2 \sim 10^{-3} m_p$$

$${}^2_1\text{D} = \{p + n\} \xrightarrow{?} \{p + p\} + e^- + \bar{\nu}_e$$



Дейтрон ( ${}^2_1\text{H}$  или  ${}^2_1\text{D}$ ) — **стабильное** ядро, состоящее из протона и нейтрона.  
Почему нейтрон в дейтроне не распадается?



$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Delta m = m_n - m_p = 1.29333205(48) \text{ МэВ}/c^2 \sim 10^{-3} m_p$$

$${}^2_1\text{D} = \{p + n\} \xrightarrow{?} \{p + p\} + e^- + \bar{\nu}_e$$

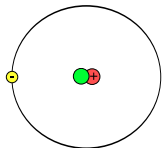
Оценка Кулоновского взаимодействия:  $U_E = \frac{ke^2}{\Delta r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\Delta r}$ ,

$$\Delta r \approx 1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м} \quad \Rightarrow \quad U_E = 2.30 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1.44 \text{ МэВ!}$$

**Не хватает энергии**, чтобы образовать конечное состояние!



Дейтрон ( ${}^2_1\text{H}$  или  ${}^2_1\text{D}$ ) — **стабильное** ядро, состоящее из протона и нейтрона.



Почему нейтрон в дейтроне не распадается?

$$m_n = 939.565379 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_p = 938.272046 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Delta m = m_n - m_p = 1.29333205(48) \text{ МэВ}/c^2 \sim 10^{-3} m_p$$

$${}^2_1\text{D} = \{p + n\} \rightarrow \{p + p\} + e^- + \bar{\nu}_e$$

Оценка Кулоновского взаимодействия:  $U_E = \frac{ke^2}{\Delta r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\Delta r}$ ,

$$\Delta r \approx 1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м} \quad \Rightarrow \quad U_E = 2.30 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1.44 \text{ МэВ!}$$

**Не хватает энергии**, чтобы образовать конечное состояние!

Аккуратный расчет с учетом спина ( ${}^2_1\text{D} = \{p\uparrow n\uparrow\}$ ) и сильного взаимодействия:

$${}^2_1\text{D} \rightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e - 0.42 \text{ МэВ}$$

Как выглядела бы Вселенная, если бы нейтрон был на 1% тяжелее?

$$\Delta m = m_n - m_p > 10 \text{ МэВ}/c^2$$

Дейтрон:

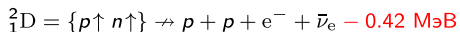
$${}^2_1\text{D} = \{p\uparrow n\uparrow\} \leftrightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e - 0.42 \text{ МэВ}$$

Образование (синтез) дейтронов происходит через дипротон ( ${}^2_2\text{He}$ ) — связанное состояние 2 протонов:

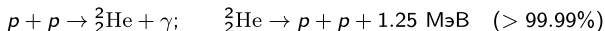
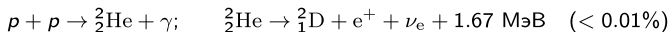
$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e + 1.67 \text{ МэВ} \quad (< 0.01\%)$$

$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow p + p + 1.25 \text{ МэВ} \quad (> 99.99\%)$$

Дейтрон:



Образование (синтез) дейтронов происходит через дипротон ( ${}^2_2\text{He}$ ) — связанное состояние 2 протонов:



Экзотика и маловероятные события?

# Дейтрон и нуклеосинтез

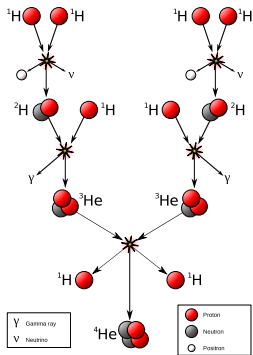
Дейтрон:

$${}^2_1\text{D} = \{p\uparrow n\uparrow\} \leftrightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e - 0.42 \text{ МэВ}$$

Образование (синтез) дейтронов происходит через дипротон ( ${}^2_2\text{He}$ ) — связанное состояние 2 протонов:

$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e + 1.67 \text{ МэВ} \quad (< 0.01\%)$$

$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow p + p + 1.25 \text{ МэВ} \quad (> 99.99\%)$$



Протон-протонный цикл

Доминирующая цепочка термоядерных реакций в звездах типа Солнца: **98%** выделяемой энергии

Медленное! горение

Дейтрон:

$${}^2_1\text{D} = \{p\uparrow n\uparrow\} \leftrightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e - 0.42 \text{ МэВ}$$

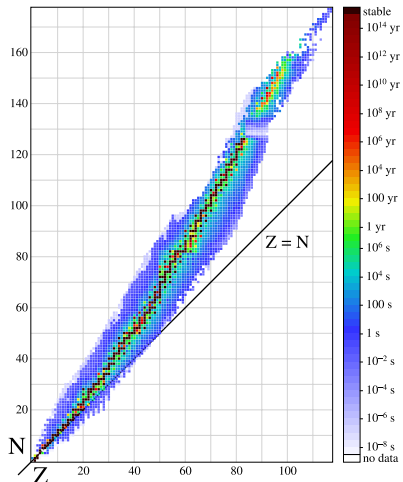
Образование (синтез) дейтронов происходит через дипротон ( ${}^2_2\text{He}$ ) — связанное состояние 2 протонов:

$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e + 1.67 \text{ МэВ} \quad (< 0.01\%)$$


$$p + p \rightarrow {}^2_2\text{He} + \gamma; \quad {}^2_2\text{He} \rightarrow p + p + 1.25 \text{ МэВ} \quad (> 99.99\%)$$

Динейтрон — короткоживущее связанное состояние 2 нейтронов  $\{n\uparrow n\downarrow\}$  (открыто в 2012 г.)

Нейтронные звезды: могут ли состоять только из нейтронов?



Почему для тяжелых ядер  $N > Z$ ?

масса →	0.511 МэВ/c <sup>2</sup>		← год открытия
заряд →	-1		
спин →	1/2		

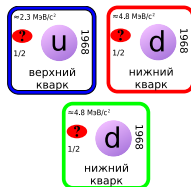
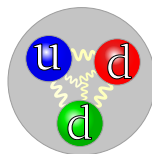
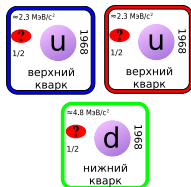
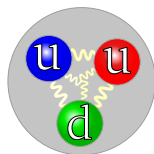
1896

электрон

# Частицы Стандартной модели

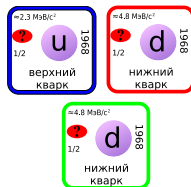
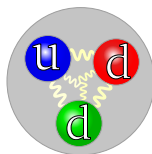
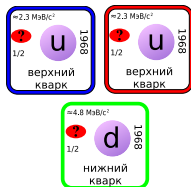
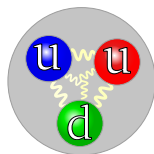
масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 125 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
<b>КВАРКИ</b>	<b>u</b> верхний кварк 1968	<b>c</b> очарованный кварк 1974	<b>t</b> топ кварк 1995	<b>g</b> глюон 1979	<b>H</b> бозон Хиггса 2012
	<b>d</b> нижний кварк 1968	<b>s</b> странный кварк 1968	<b>b</b> прелестный кварк 1977	<b><math>\gamma</math></b> фотон 1900	
	<b>e</b> электрон 1896	<b><math>\mu</math></b> мюон 1936	<b><math>\tau</math></b> тау 1975	<b>Z</b> Z бозон 1983	<b>КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ</b>
<b><math>\nu_e</math></b> электронное нейтрино 1956	<b><math>\nu_\mu</math></b> мюонное нейтрино 1962	<b><math>\nu_\tau</math></b> тау нейтрино 2000	<b>W</b> W бозон 1983		
<b>ЛЕПТОНЫ</b>	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	80,4 ГэВ/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	$\pm 1$	
	1/2	1/2	1/2	1	





Заряд протона:  $+1 = u + u + d$

Заряд нейтрона:  $0 = u + d + d$



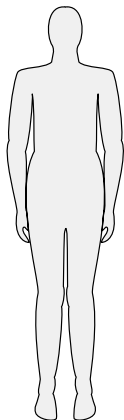
Заряд протона:  $+1 = u + u + d$

Заряд нейтрона:  $0 = u + d + d$

Заряд верхнего кварка:  $u = +2/3$

Заряд нижнего кварка:  $d = -1/3$

# Элементарный состав человека



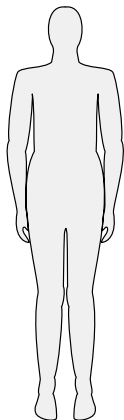
$m = 70 \text{ кг}$

элемент	символ	количество
Водород	H	$4.22 \cdot 10^{27}$
Кислород	O	$1.61 \cdot 10^{27}$
Углерод	C	$0.80 \cdot 10^{27}$
другие		$0.40 \cdot 10^{27}$

элемент	состав
H	$p + e^- = 2u + d + e^-$
O	$8p + 8n + 8e^- = 24u + 24d + 8e^-$
C	$6p + 6n + 6e^- = 18u + 18d + 6e^-$

частица	количество	масса
$e^-$	$2.2 \cdot 10^{28}$	20 г
$u$	$6.1 \cdot 10^{28}$	252 г
$d$	$5.7 \cdot 10^{28}$	490 г
$\Sigma$		<b>762 г</b>

# Элементарный состав человека



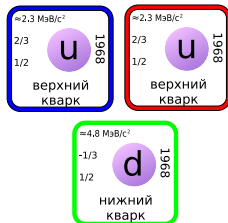
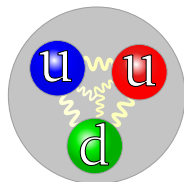
$$m = 70 \text{ кг}$$

элемент	символ	количество
Водород	H	$4.22 \cdot 10^{27}$
Кислород	O	$1.61 \cdot 10^{27}$
Углерод	C	$0.80 \cdot 10^{27}$
другие		$0.40 \cdot 10^{27}$

элемент	состав
H	$p + e^- = 2u + d + e^-$
O	$8p + 8n + 8e^- = 24u + 24d + 8e^-$
C	$6p + 6n + 6e^- = 18u + 18d + 6e^-$

частица	количество	масса
$e^-$	$2.2 \cdot 10^{28}$	20 г
$u$	$6.1 \cdot 10^{28}$	252 г
$d$	$5.7 \cdot 10^{28}$	490 г
$\Sigma$		<b>762 г</b>

Возраст нашего тела?



$938.2720813(58) \text{ МэВ}/c^2$  — масса протона

$9.4 \text{ МэВ}/c^2$  — масса структурных (валентных) кварков в протоне

Точность теоретических оценок массы протона  $\approx 10\%$  [КХД на решетках]

$$\Delta m = m_n - m_p = 1.29333205(48) \text{ МэВ}/c^2 \approx 10^{-3} m_p !!!$$

Задачи бывают двух видов — простые и сложные.

[Математический фольклор]

Задачи бывают двух видов — простые и сложные.

Все уже решённые задачи — простые.

[Математический фольклор]

www.fizik-matematik.ru



Клуб будущих ученых  
при Музее ОИЯИ

Музей истории науки  
и техники ОИЯИ



Математический кружок  
(Дубна)



Международная  
компьютерная  
школа



Университет Дубна



**БЛОХИНКА**  
универсальная  
библиотека ОИЯИ  
им. Д.И. Блохинцева

Дом культуры "Мир"



Межшкольный  
физико-математический  
факультатив

Учебно-научный центр  
Объединенного института  
ядерных исследований



30 марта — 1 апреля  
Дубна

Следующие

“Дни физики в Дубне”

13–14 апреля 2019 г.