

# Современная физика частиц и атомного ядра в задачах для школьников

Михаил Жабицкий

Объединенный институт ядерных исследований

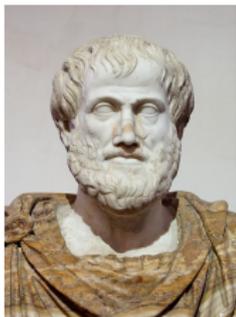
Женева, ноябрь 2017

## Содержание

- Уровни понимания физики
- Специальная теория относительности
- Кинематика
- Ускорители
- Квантовая электродинамика
- Ядерная физика и Квантовая хромодинамика
- Гравитационные волны

## Уровни понимания физики

- Качественное понимание физического явления



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

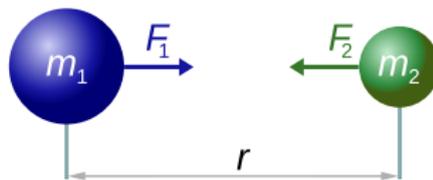
Качественные рассуждения сложно проверить...

## Уровни понимания физики

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



Исаак Ньютон (1642–1726/1727):



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

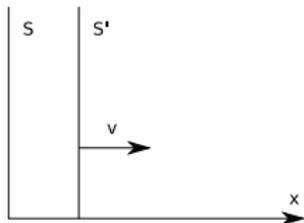
Количественные законы "подсказывают" пределы своей применимости. . .

## Уровни понимания физики

- 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:



## Специальная теория относительности



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:  $\hbar = c = 1$

## Электронвольты. . .

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



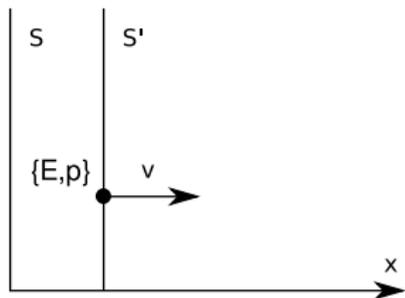
$$\Delta E = qU$$

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

### Типичные массы

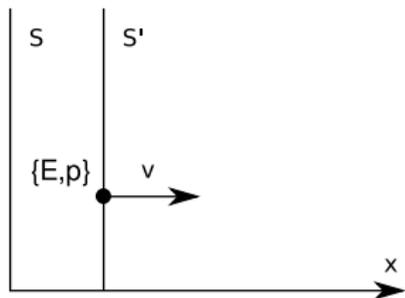
Электрон	$m_e$	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	$0.5 \text{ МэВ}/c^2$
Протон	$m_p$	$1.673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$938 \text{ МэВ}/c^2 = 0.938 \text{ ГэВ}/c^2$
Нейтрон	$m_n$	$1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$940 \text{ МэВ}/c^2 = 0.940 \text{ ГэВ}/c^2$

## Немного кинематики: скорость частиц



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

## Немного кинематики: скорость частиц



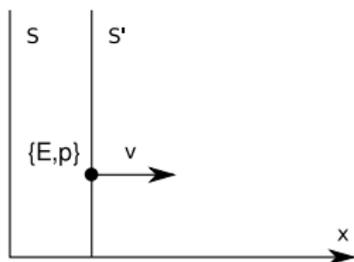
Частица массой  $m$  имеет импульс  $p$  в системе наблюдателя. Найдите ее скорость.

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

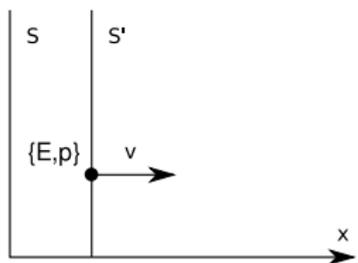
## Немного кинематики: нерелятивистский предел



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

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

## Немного кинематики: нерелятивистский предел



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

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

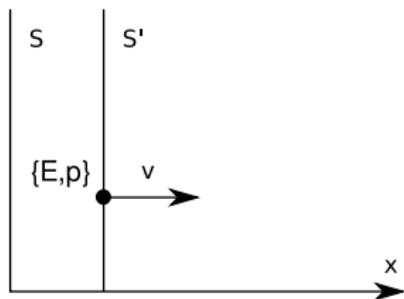
Специальная теория относительности (СТО) описывает кинематику тел, движущихся с произвольными скоростями (меньшими  $c$ ) [Альберт Эйнштейн, 1905]

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

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

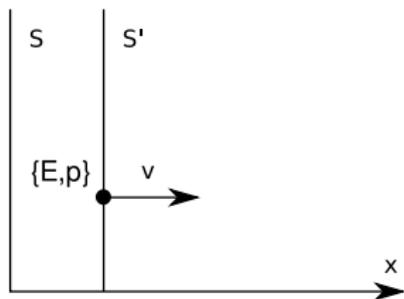
Разложение в ряд Тейлора:  $(1 + x)^\alpha \xrightarrow{x \ll 1} 1 + \alpha x + \dots$

## 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



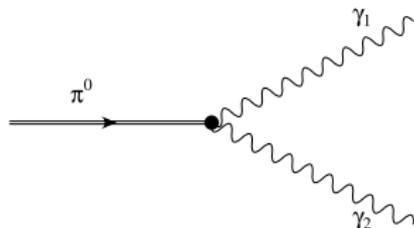
Время жизни  $\pi^0$ -мезона  $\tau = 8.4 \cdot 10^{-17}$  сек.  
 Его масса  $m = 135 \text{ МэВ}/c^2$ . Какое расстояние **в среднем** пролетят  $\pi^0$ -мезоны с импульсом  $p = 135 \text{ ГэВ}/c$ ?

Время жизни частицы определяется в ее системе покоя:

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

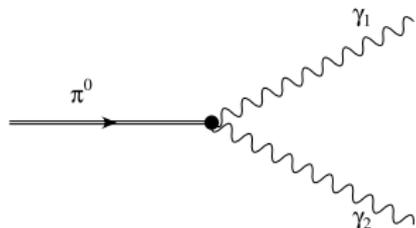
Ответ:  $\Delta x = c \Delta t = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 25 \text{ мкм.}$

## Немного кинематики: распад частиц



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

## Немного кинематики: распад частиц



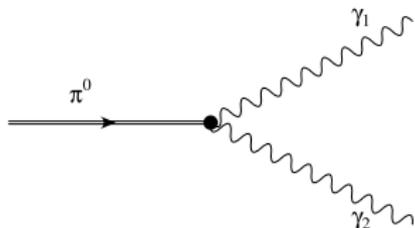
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad [\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}]$$

$$m = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

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  $E_1 = E_2 = \frac{m}{2} = 67 \text{ МэВ}$ :

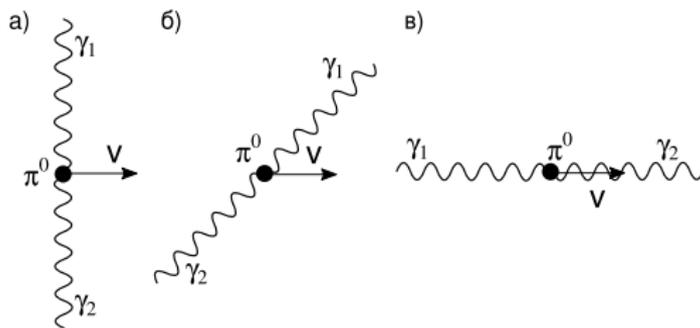


В результате распада  $\pi^0$ -мезона с импульсом  $p = 135 \text{ ГэВ}/c$  образовались два  $\gamma$ -кванта.

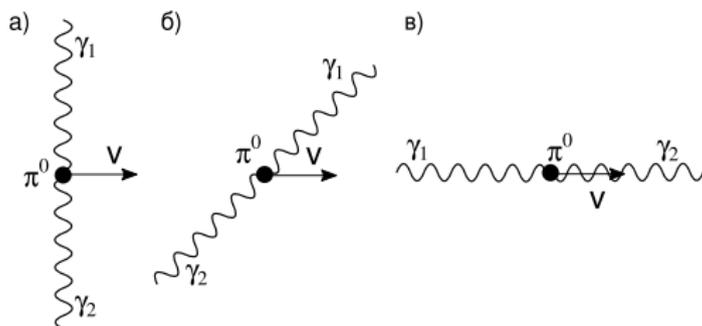
Какие максимальные и минимальные энергии могут быть у образовавшихся фотонов в лабораторной системе?

Какие максимальные и минимальные скорости?

## Немного кинематики: распад частиц



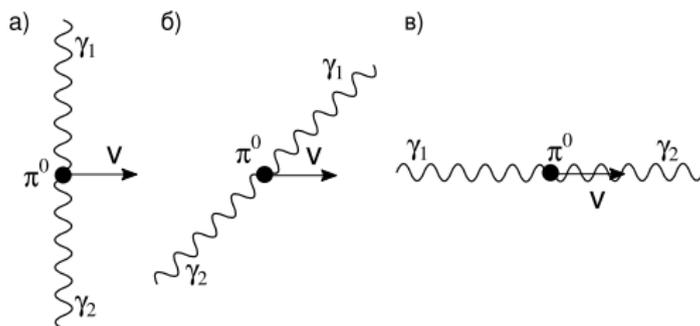
## Немного кинематики: распад частиц



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

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

## 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?

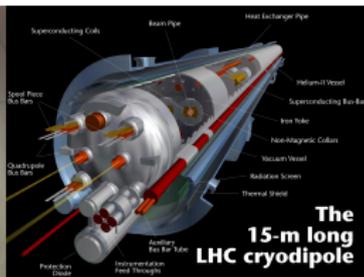
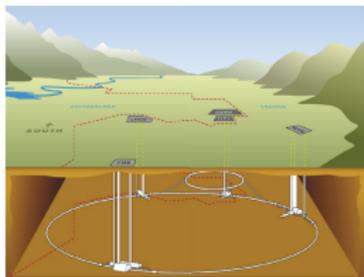
## Ускорители заряженных частиц

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 (ЛHC)

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



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

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

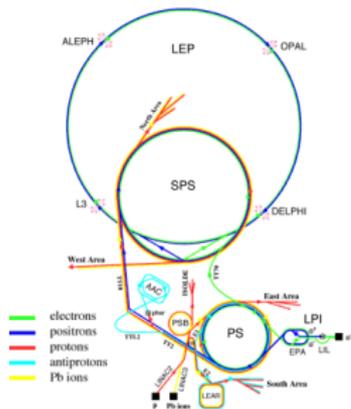
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E}\right)^2} = 0.9999999896!$$

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

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

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

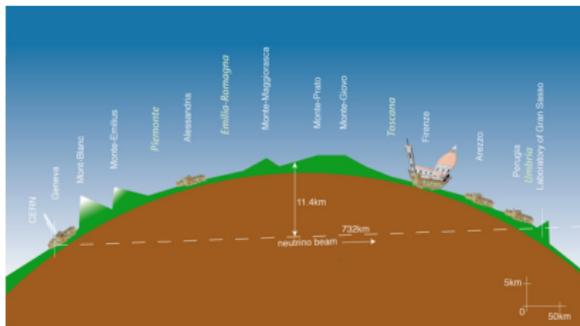
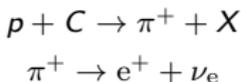
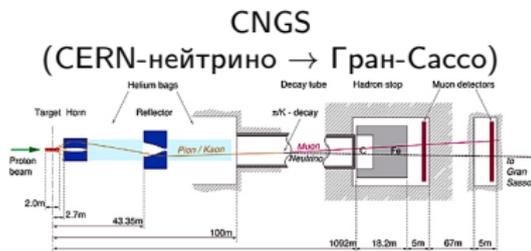
Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP)



	частица	масса	энергия	$\beta$	$1 - \beta$
LHC	$p$	938 МэВ	6.5 ТэВ	0.99999999 <b>896</b>	$10^{-8}$
LEP	$e$	0.511 МэВ	154.5 ГэВ	0.99999999 <b>99995</b>	$5 \cdot 10^{-12}$

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

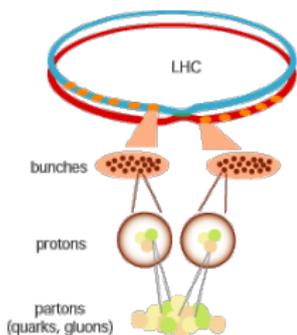
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E}\right)^2}$$



	частица	масса	энергия	$\beta$	$1 - \beta$
LHC	$p$	938 МэВ	6.5 ТэВ	0.9999999 <b>896</b>	$10^{-8}$
LEP	$e$	0.511 МэВ	154.5 ГэВ	0.9999999 <b>99995</b>	$5 \cdot 10^{-12}$
CNGS	$\nu_e$	< 2 эВ?	до 100 ГэВ	0.9999999 <b>9999999999999999998</b>	$2 \cdot 10^{-22}$

# 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  $300 \text{ МДж}$ .

## СТО: вопросы

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

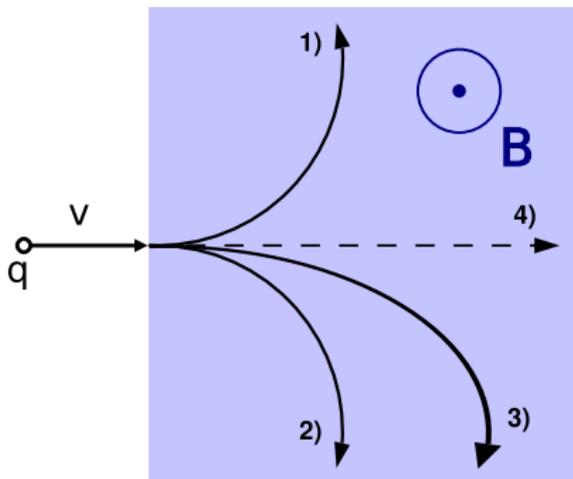
За какое время протон совершает один полный оборот в LHC?

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?

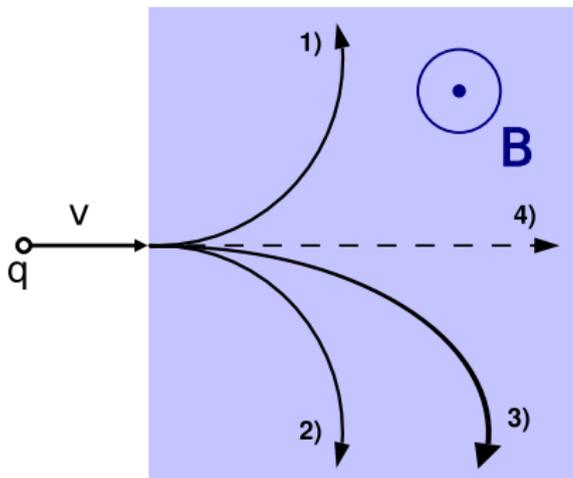
$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \tau = \frac{\tau E}{m} \approx \frac{\tau}{7000}$$

## Ускоритель своими руками: сила Лоренца



Треки (следы) каких частиц космического излучения были зарегистрированы?

## Ускоритель своими руками: сила Лоренца



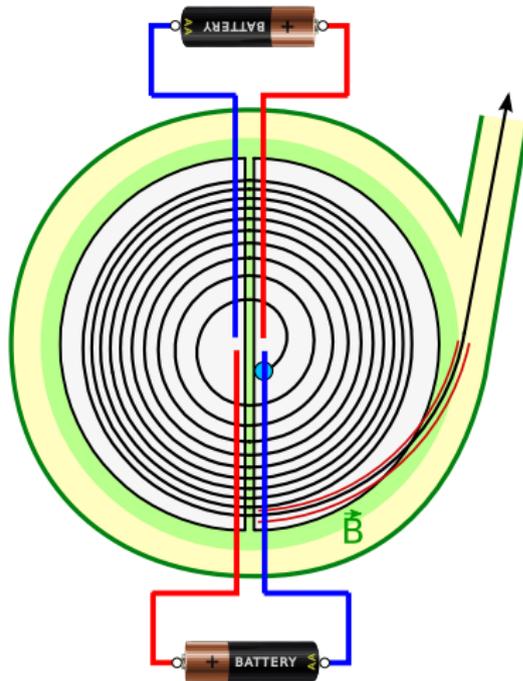
Треки (следы) каких частиц космического излучения были зарегистрированы?

Сила Лоренца [1892]

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

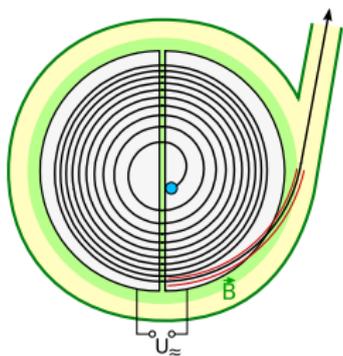
$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

## Ускоритель своими руками



# Ускорители

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  $E < 0.5 \text{ ГэВ}$

## Современные ускорители

Улицы в CERN, названные в честь наших соотечественников



## Современные ускорители

Улицы в CERN, названные в честь наших соотечественников

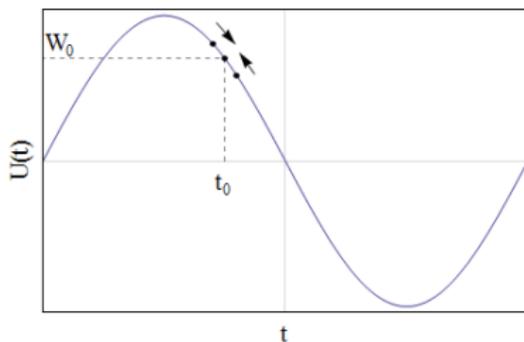
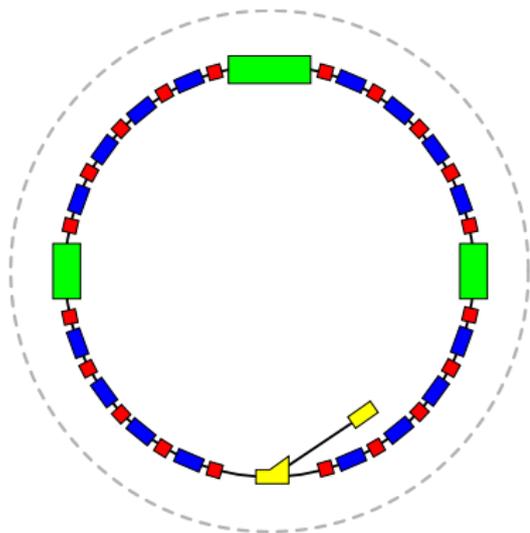


Владимир Иосифович Векслер —  
принципы работы синхротро-  
нов [1944], в том числе LHC



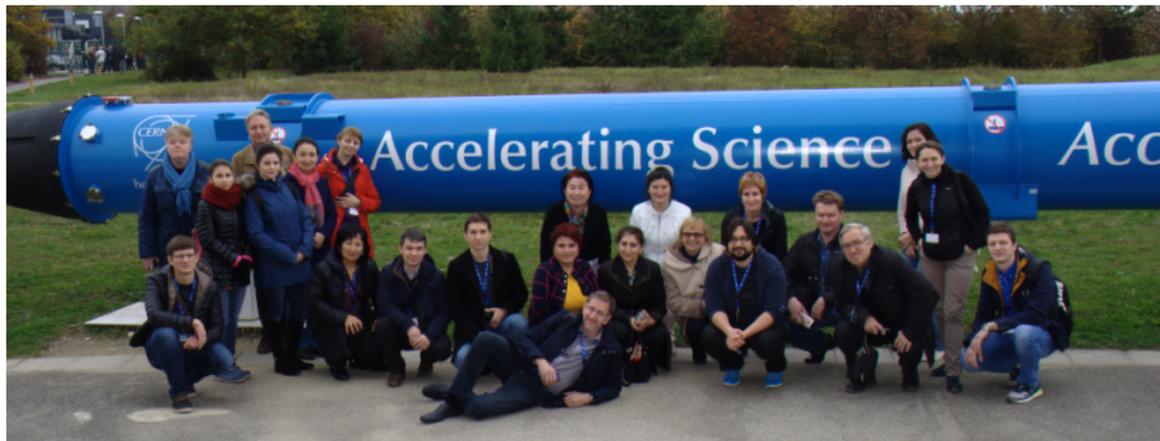
Андрей Михайлович (Герш) Будкер —  
коллайдеры [1963]; электронное охла-  
ждение [1968]

# Синхротрон



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

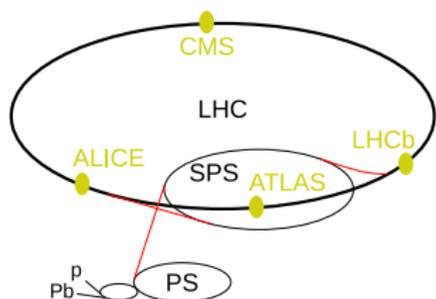
## Современные ускорители



Длина дипольного магнита LHC?

## Современные ускорители

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:

$$L = 26.659 \text{ км}$$

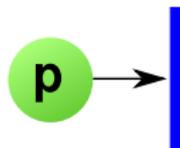
$$B = 7.7 \text{ Т} \Rightarrow E \approx 6.5 \text{ ТэВ}$$

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

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

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

## Немного кинематики: фиксированные мишени



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  $p_1^* + p_2^* = 0$ :

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

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

## Немного кинематики: встречные пучки



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

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

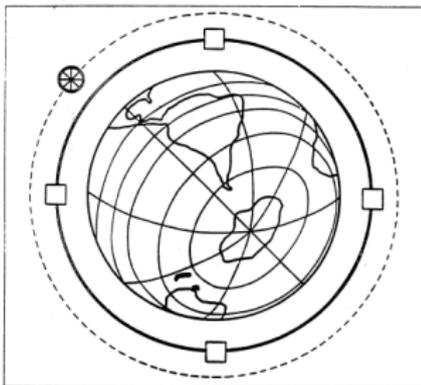
Сравните с фиксированной мишенью:

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

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.

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

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

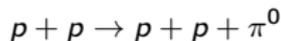
$\lambda$ , м	$pc$
$10^{-6}$	1.2 эВ
$10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^4$ эВ = 12 кэВ
$10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^9$ эВ = 1.2 ГэВ
$1.8 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{12}$ эВ = 7 ТэВ

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

Физики предпочитают запись 1  $\Phi$ м =  $10^{-15}$  м. Почему?

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

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



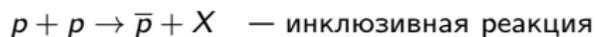
$$E_{\text{fixed}}^* = \sqrt{2m_p(m_p + E)} = \sqrt{2m_p(m_p + \sqrt{m_p^2 + p^2})} > \sum m_i = 2m_p + m_{\pi^0}$$

$$m_p = 938 \text{ МэВ}/c^2 \quad m_{\pi^0} = 135 \text{ МэВ}/c^2$$

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

## 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.

$$p + p \rightarrow \bar{p} + X \quad \text{— инклюзивная реакция}$$

Что "спрятано" под обозначением  $X$ ?

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

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

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

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

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

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

## 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:

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

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

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

## Содержание

- Уровни понимания физики
- Специальная теория относительности
- Кинематика
- Ускорители
- Квантовая электродинамика
- Ядерная физика и Квантовая хромодинамика
- Гравитационные волны