



Регистрация (детектирование)

Частиц

Николай Зимин





«Физика – наука экспериментальная»

R. Feynman



Регистрация (Детектирование) – очень емкие слова

Определение (извлечение) какой-либо информации об **элементарной частице** посредством проведений (косвенных) измерений с помощью «детекторов» частиц

Детектор – тоже очень емкое слово

Классификаций много

по назначению – «что регистрировать»

по принципу регистрации

по типу конструкции

по размерам, числу каналов регистрации и т.д., т.е.

счетчик Гейгера, дрейфовая трубка или сцинтиллятор и

целые гигантские Комплексы (АТЛАС, CMS, DELPHI, D0 ...)

это все **ДЕТЕКТОРЫ**

Частица (элементарная) – либо предмет изучения, либо «инструмент» для изучения процессов взаимодействия или других частиц (короткоживущих, составных и т.д.)

Главная цель Физики высоких энергий -
изучение «фундаментальных» или «элементарных»
частиц и их взаимодействий.

Что для этого надо?

Теория (SM, SUSY ...) или идея Фикс

Ускорители (LHC, Tevatron, LEP, SPS, У-70, NICA ...)

Детекторы (огромные комплексы...)

Увлеченные квалифицированные специалисты,
работающие в Коллаборациях

«Встречные пучки»

Сечение и Светимость (Люминосити)

Сечение σ или дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ – это вероятность взаимодействия между элементарными частицами или частицами и атомами ...

Пример: 2 сталкивающихся пучка



σ имеет размерность площади

Единица: 1 barn (b) = 10^{-24} cm²

$$R_{int} \propto N_1 N_2 / (A \cdot t) = \sigma \cdot L$$

Luminosity L [cm⁻² s⁻¹]

Частота регистрируемых событий пропорциональна их σ и **Светимости**, которая обеспечивается коллайдером.

Просуммировав по времени работы детектора получим **Число событий** для данной **Интегральной Светимости**. Она используется для **Абсолютной Нормировки**, что бы сравнивать данные разных экспериментов.

LHC $\sim 10^{34}$ cm⁻² s⁻¹

LEP $\sim 10^{31}$ cm⁻² s⁻¹

1 eV - это очень маленькая энергия $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$



$$m_{bee} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{bee} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{bee} = 10^{-3} \text{ Дж} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{LHC} = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 7 \text{ TeV}$$

- Энергия E : eV, TeV
- Импульс p : eV/c
- масса m_0 : eV/c²

Полная запасенная энергия пучков: (большая) макро

$$E_{total} = 10^{11} \text{ protons} \cdot 2808 \text{ bunches} \cdot 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 7 \cdot 10^{26} \text{ eV} \approx 3.5^8 \text{ Дж}$$

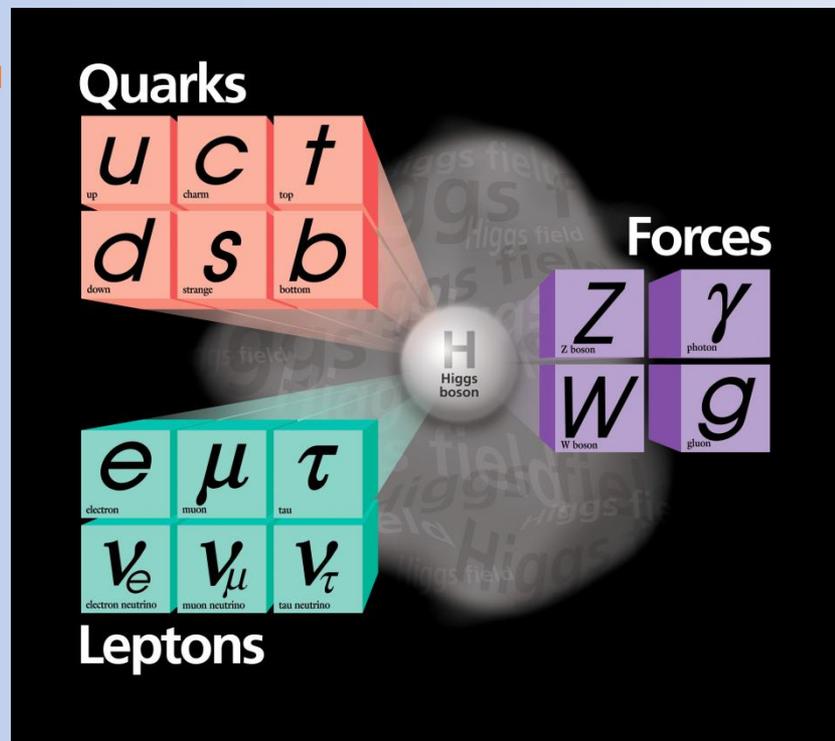
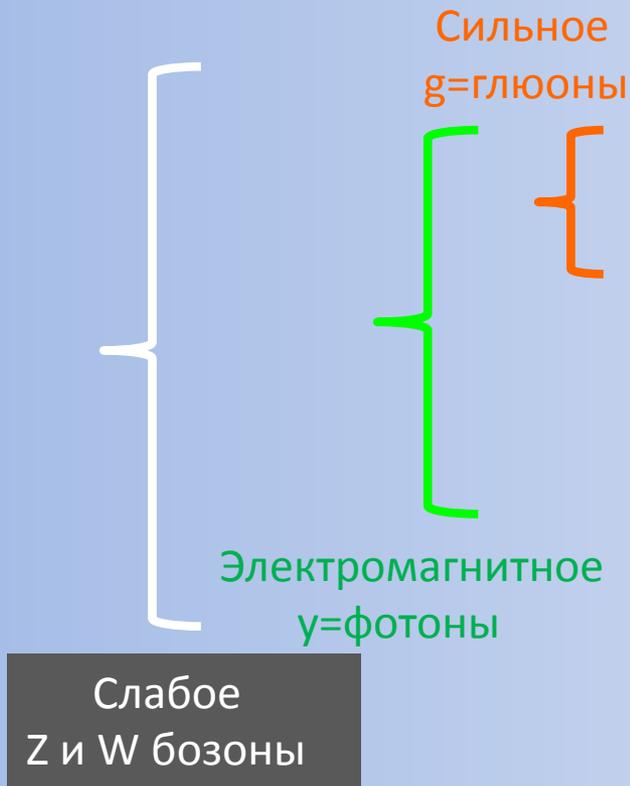


$$m_{truck} = 80 \text{ T}$$

$$v_{truck} = 300 \text{ km/h}$$

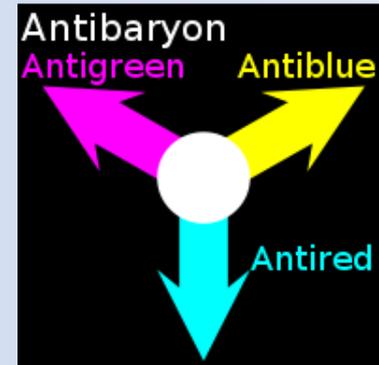
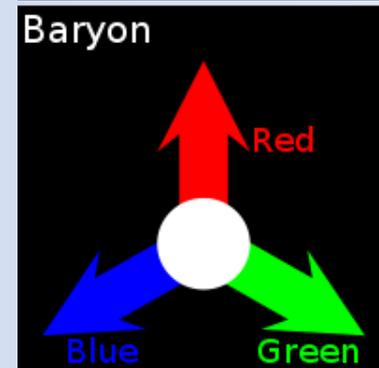
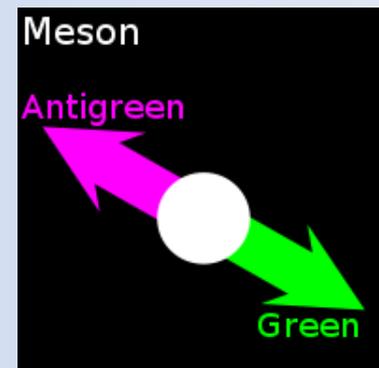
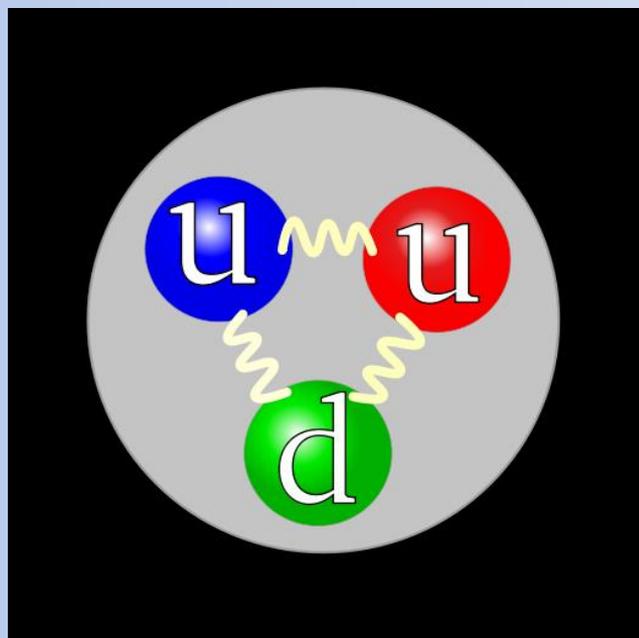
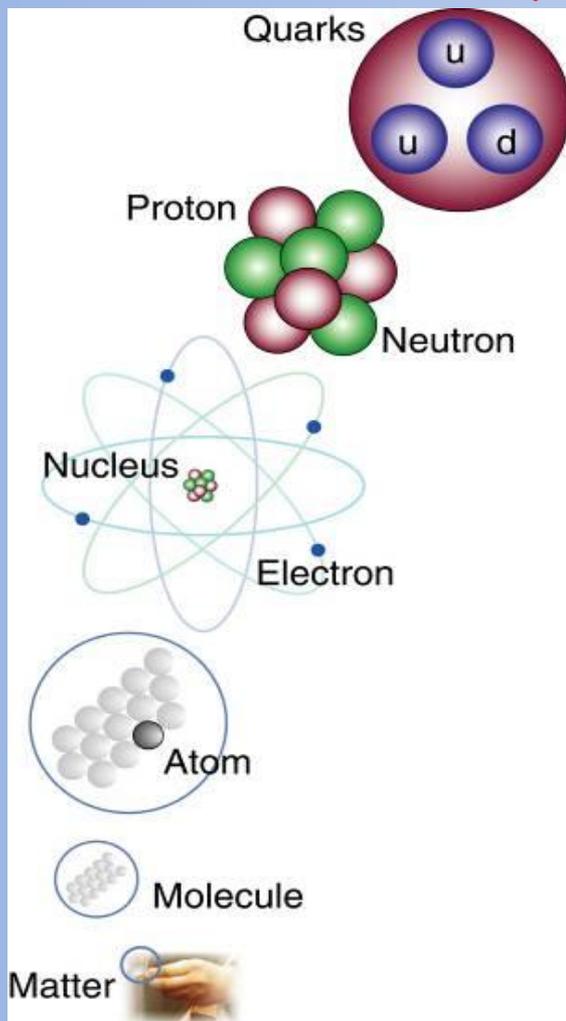
«Элементарные» частицы

Взаимодействия(e)



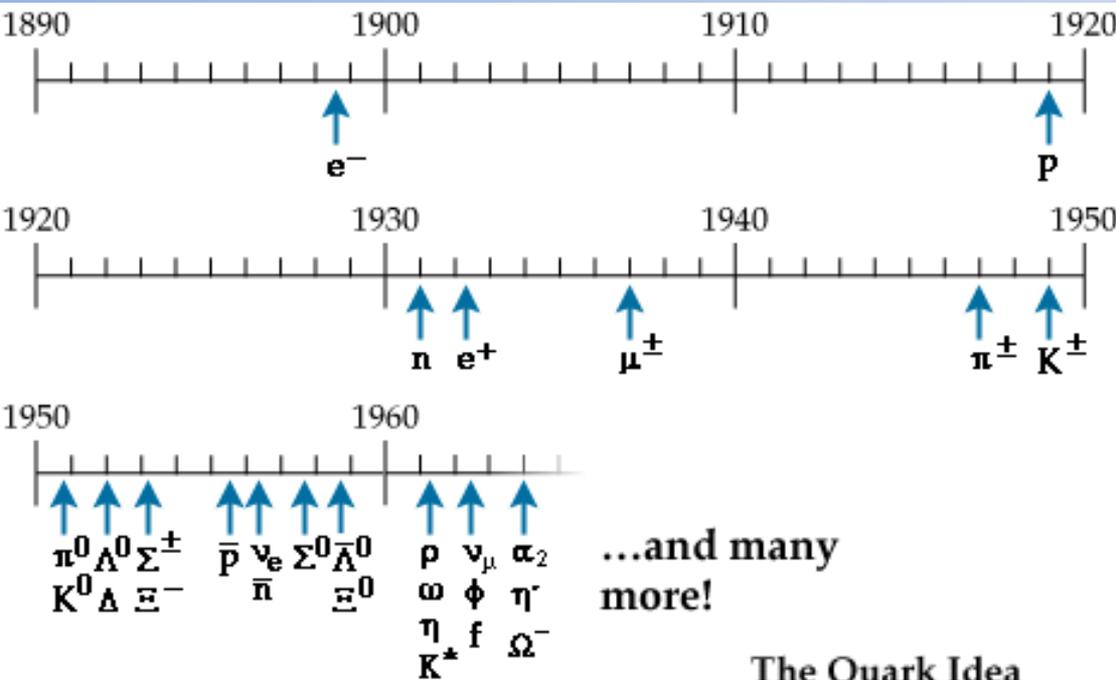
Все известные частицы (> 300 с резонансами)
могут быть сконструированны подобным образом
Комбинации разных типов кварков
Надо добавить «цвет» для кварков

Теория: QCD (eng) или КХД (рус)





История открытия «элементарных» частиц



Электрон-Протон-Нейтрон

Первая античастица - позитрон

Первые частицы второго поколения мюоны

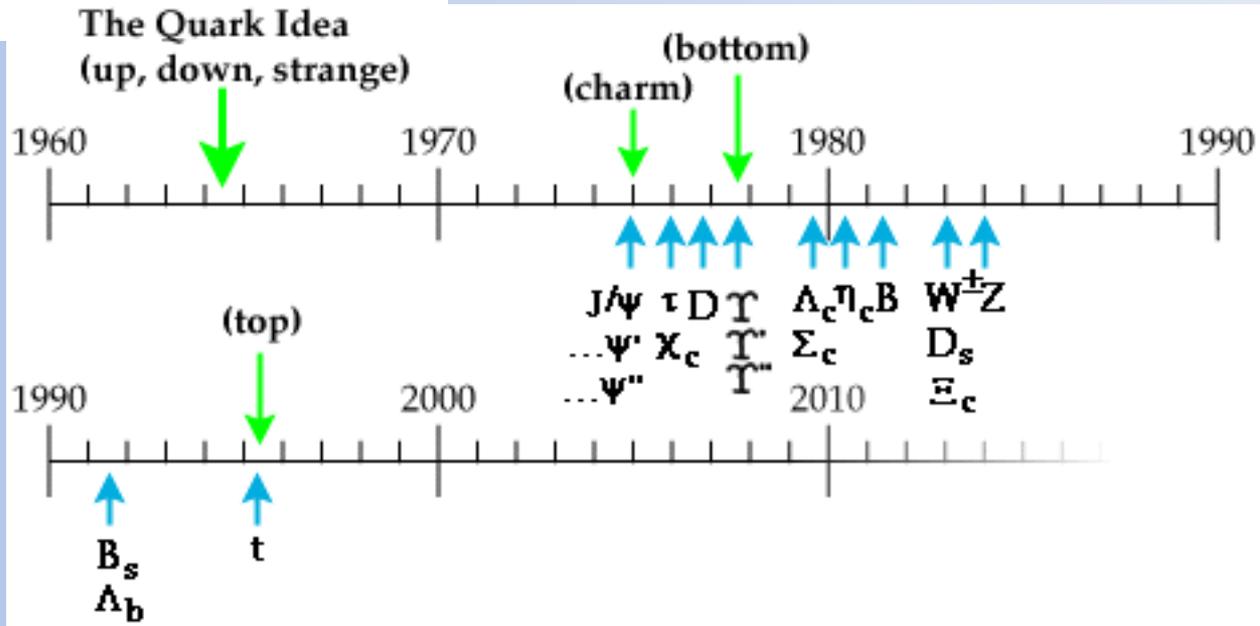
Первые составные частицы-мезоны пионы и каоны (Кварковая теория)

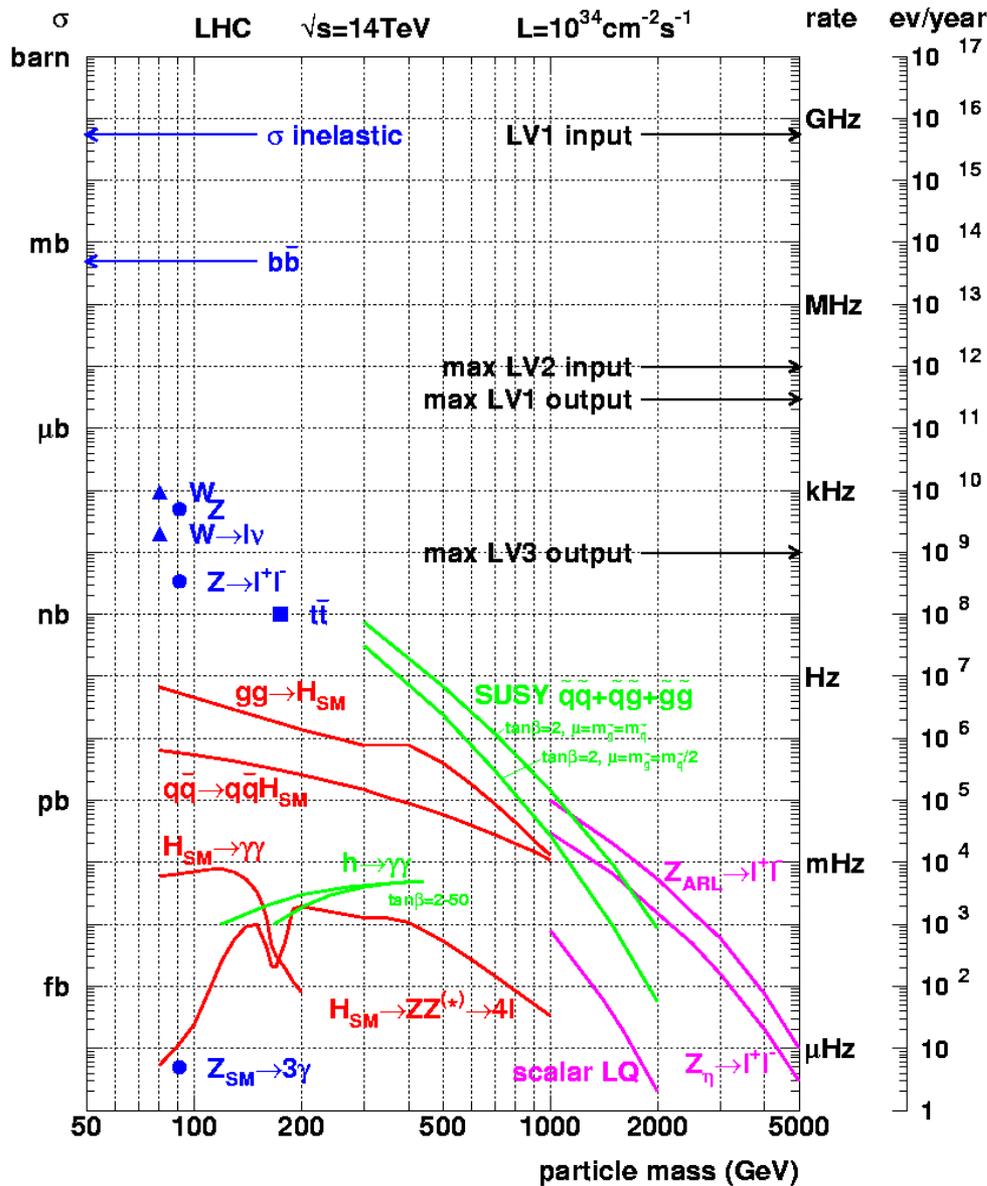
«Зоопарк» частиц

«Открытие» кварков и промежуточных бозонов

u, d, s
c «чармоний» очарованный
b «боттомоний» красота
t «топ»

Векторные бозоны Z, W





«Хорошо изученные процессы»,
нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

«Новая Физика LHC»
Это мы хотим выделить и записать для дальнейшего анализа...

Замечания...

Мы не будем рассматривать все известные частицы...
Сконцентрируемся только на частицах с достаточно большим временем жизни, позволяющим их зарегистрировать

«Семейства» $\gamma, e, \mu, \tau, K, p, n$

Частица, что бы быть зарегистрированной, должна испытать какое-то взаимодействие с Детектором

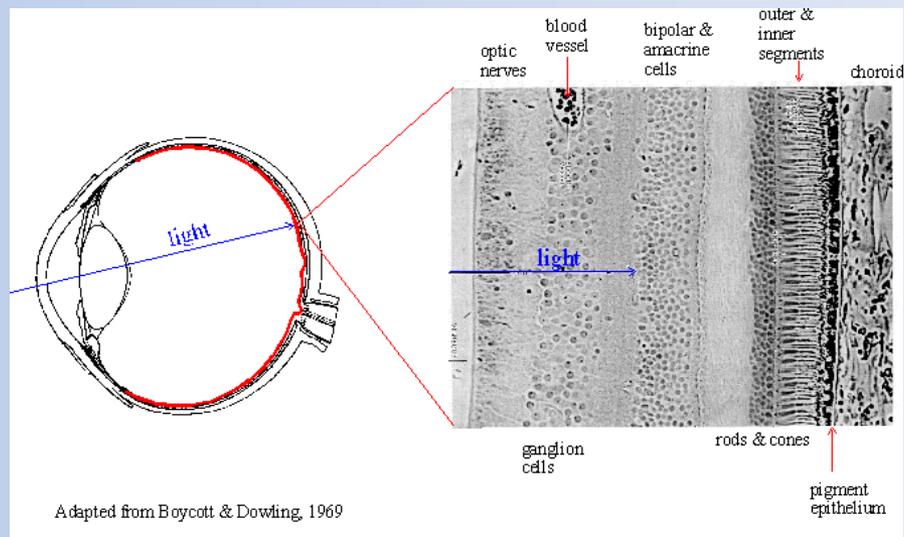
Если в результате частица не сильно меняет свои свойства, взаимодействие должно быть

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ

- Детектор - это любой (какой-то) инструмент, что бы измерять какие-то характеристики или свойства частиц т.е. заряд, E , p , m , время жизни, спин, квантовые номера, что бы идентифицировать ее (частицу)

Кожа человека - «калориметр»,
детектор ультрафиолета

“Старейший детектор фотонов”
(воспроизведен млрд-ы раз)



Хорошее пространственное разрешение
Большой динамический диапазон ($1:10^6$)

+ автоматическая адаптация порога

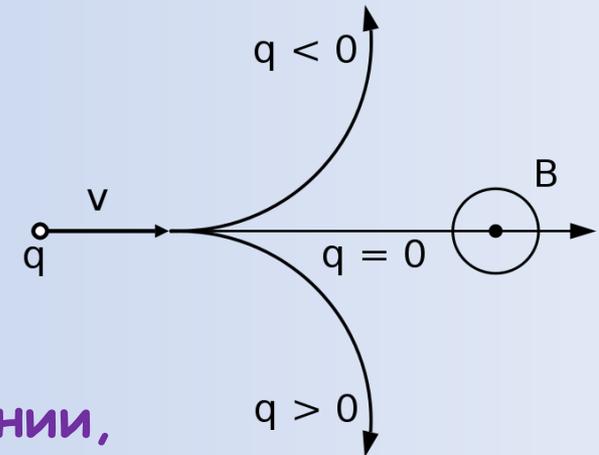
Энергетическая (длина волны) дискриминация

Хорошая чувствительность: 500 - 900 должны попадать в глаз каждую секунду и далее в мозг, что бы регистрировать непрерывный сигнал

Хорошее быстродействие (~ 10Hz включая обработку для восстановления изображения)

В классической электродинамике взаимодействие заряда q с электрическим и магнитным полем описывается силой Лоренца

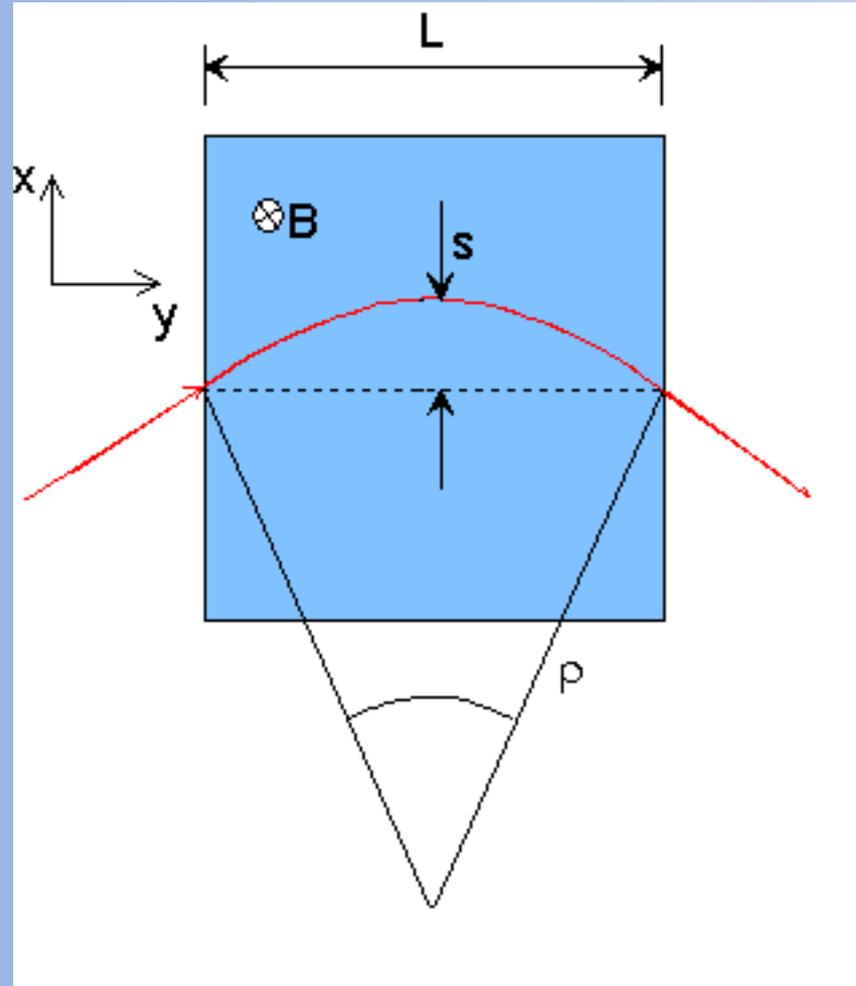
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



Ускоряется вдоль силовой линии,
вращается по окружности

$\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$
 $\vec{F}, \vec{E}, \vec{B}, \vec{v}$ (скорость частицы) (вектора)

Заряженная частица в МАГНИТНОМ поле

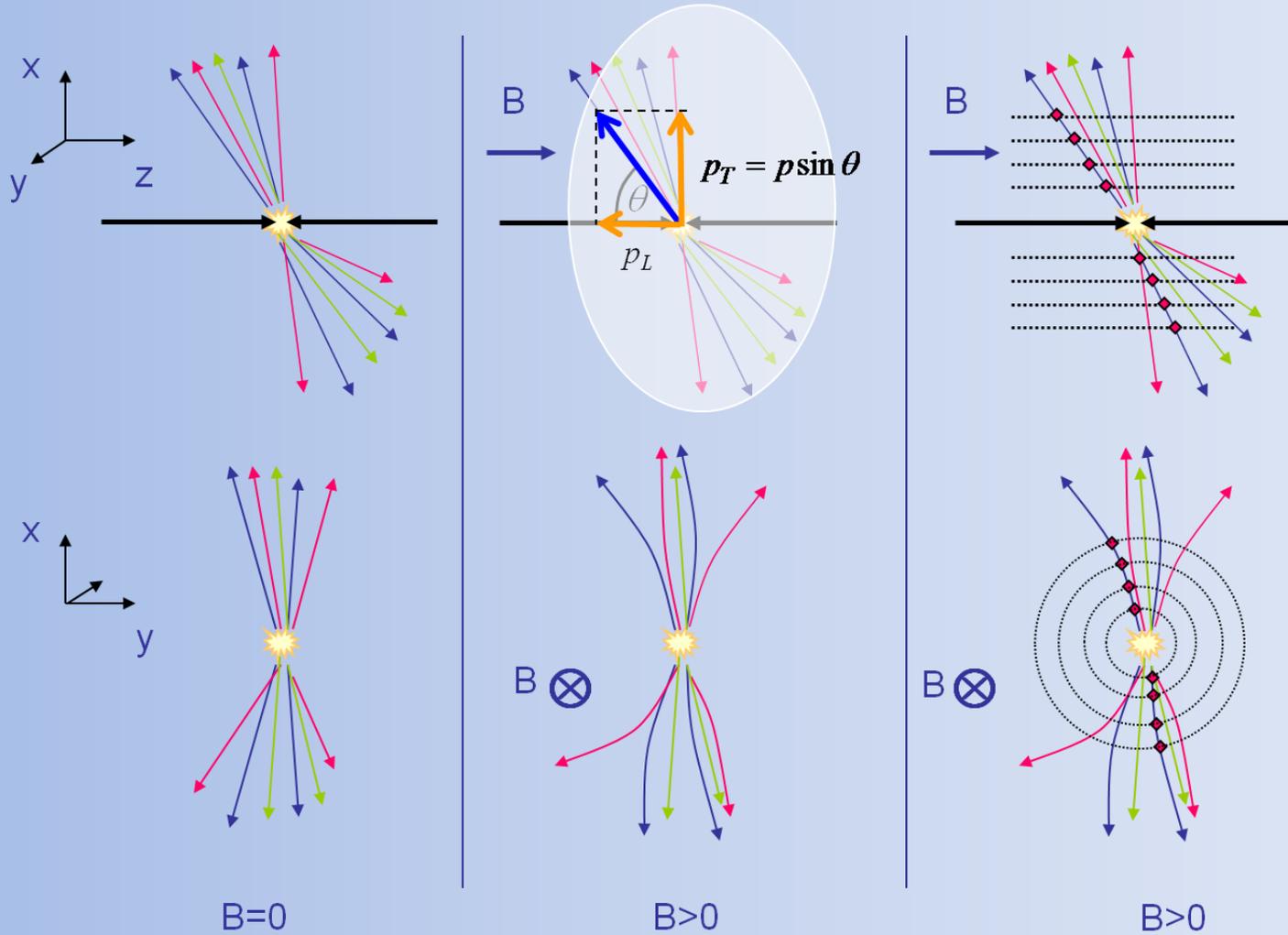


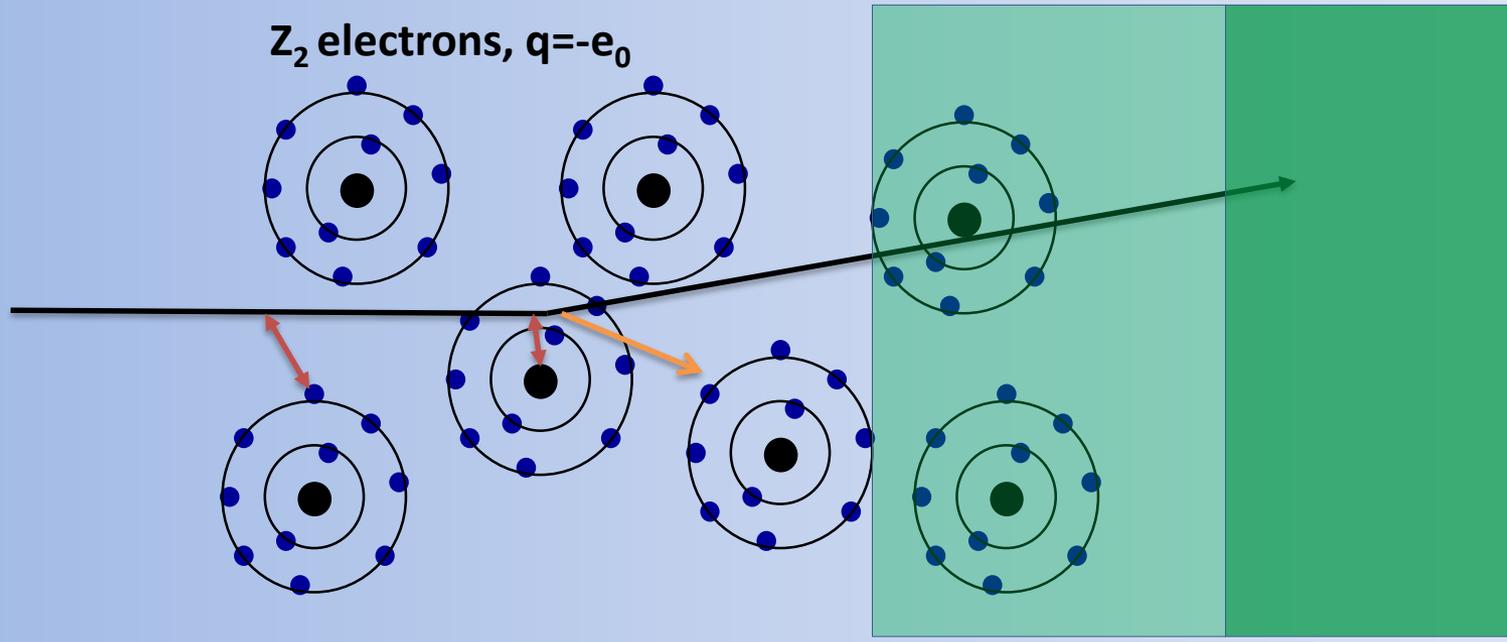
$$p_T = qB\rho \quad \rightarrow \quad p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \quad (\text{T} \cdot \text{m})$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \alpha/2 \approx \alpha/2 \quad \rightarrow \quad \alpha \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$s = \rho(1 - \cos \alpha/2) \approx \rho \frac{\alpha^2}{8} \approx \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{p_T}$$

Заряженная частица в МАГНИТНОМ поле





Взаимодействуя с атомными электронами, частица теряет энергию на **ионизацию и возбуждение атомов.**

Взаимодействуя с ядрами, частица отклоняется (испытывает рассеяние). При этом могут испускаться **фотоны тормозного излучения.** И проявляется **многократное рассеяние.**

В случае, когда скорость частицы в среде больше, чем скорость света, образующаяся ударная ЭМ волна проявляется как **Черенковское излучение.** Когда частица пересекает границу двух сред с разными показателями преломления, образуется **Переходное излучение** в рентгеновском диапазоне.

Взаимодействие частиц с веществом

В зависимости от типа частицы, проходящей через вещество она тем или иным способом взаимодействует с атомами вещества (с его электронами и ядрами)

Заряженные частицы: электромагнитные взаимодействия

ИСПЫТЫВАЮТ:

Упругое рассеяние

Множественное рассеяние

теряют энергию:

Ионизация и возбуждение

Тормозное излучение

Черенковское излучение

Переходное излучение

ФОТОНЫ: Фото-эффект, Комptonовское рассеяние,

(и от предыдущего взаимодействия)

Рождение пары частиц => электрон-позитрон

Адроны: Эл-маг. и Неупругие ядерные взаимодействия

Мюоны: Даже электромагнитное взаимодействие подавлено, MIP's

Каскады (ливни):

Для электронов и фотонов

Электро-магнитные ливни

Для адронов

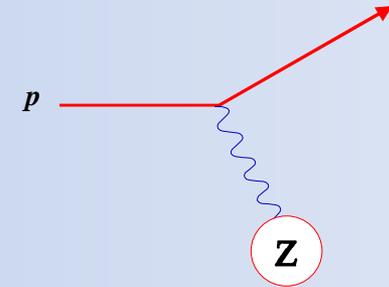
+ Адронные ливни

Взаимодействие частиц с веществом

Заряженные частицы

Упругое (Резерфордовское) рассеяние

Налетающая заряженная частица с импульсом p эластично взаимодействует с ядром мишени Z
 Сечение описывается формулой Резерфорда



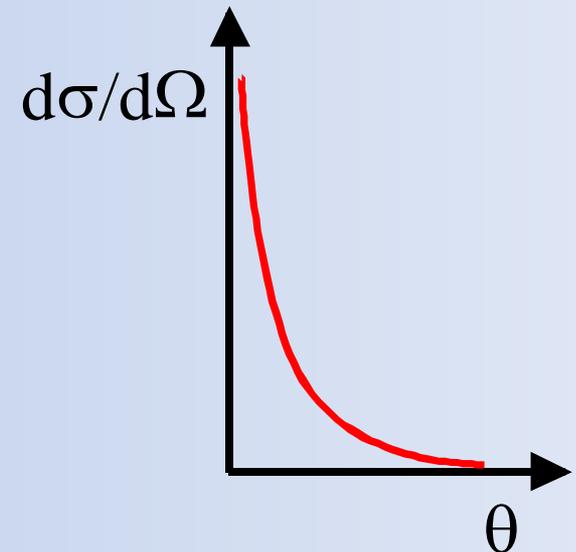
Приближение

- Не релятивистское
- безспиновое

Средний угол рассеяния = 0.

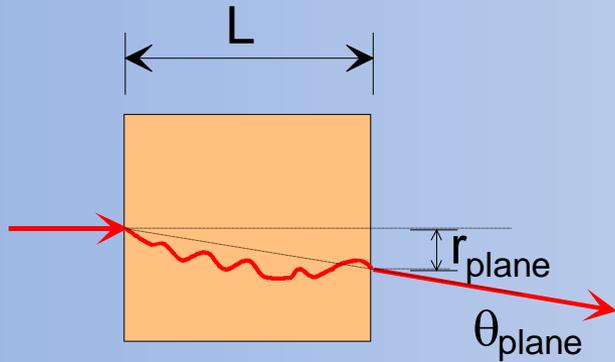
Сечение для нулевого угла бесконечное !

Такое рассеяние не ведет к значительным потерям энергии (ядро тяжелое!)

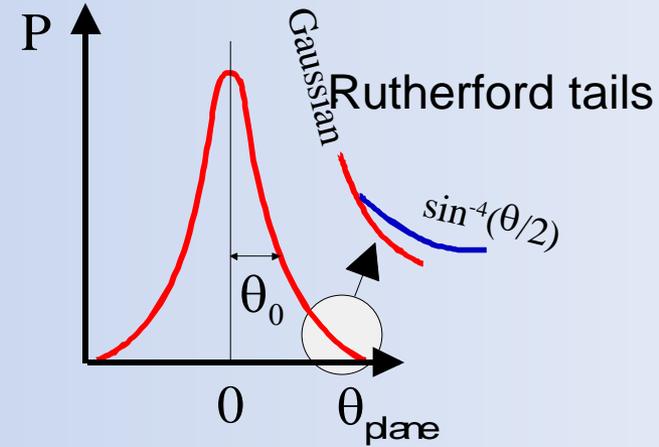


Может играть роль в детекторах с тонкими пленками и проволочками

В достаточно толстом слое вещества частица испытывает
Множественное рассеяние



Финальное смещение и направление – результат многих независимых случайных рассеяний
 → Центральная предельная теорема
 → **Гауссовское распределение**

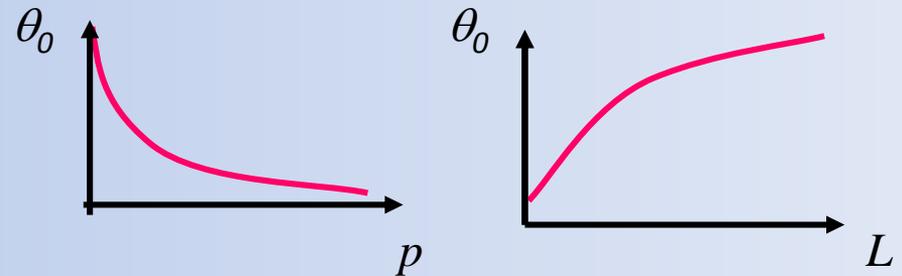


Приближение $\theta_0 \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$

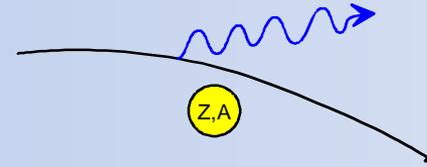
$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{space}^{RMS}$$

X_0 - радиационная длина вещества (среды)

Разрешение детектора деградирует



Потери энергии на тормозное излучение



$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \propto \frac{E}{m^2}$$

Эффект важен для e^\pm и для ультррелятивистских μ (>1000 GeV)

$$\frac{m_\mu^2}{m_e^2} = \frac{105^2 \text{ MeV}^2}{0.5^2 \text{ MeV}^2} = 4.4 \cdot 10^4$$

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

Потери энергии растут с ростом начальной энергии

$$\longrightarrow E = E_0 e^{-x/X_0}$$

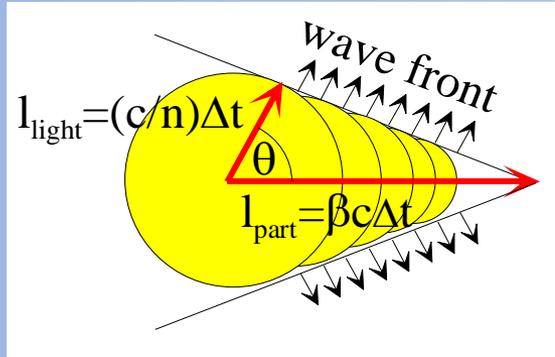
$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

radiation length [g/cm²]

(divide by specific density to get X_0 in cm)

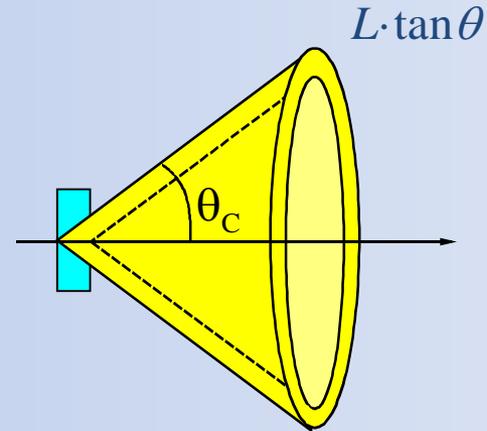
Нашли частицу, прошедшую калориметр - это μ

Черенковское излучение - **заряженная частица** в среде со скоростью, больше пороговой (скорость света в веществе, показатель преломления)



$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

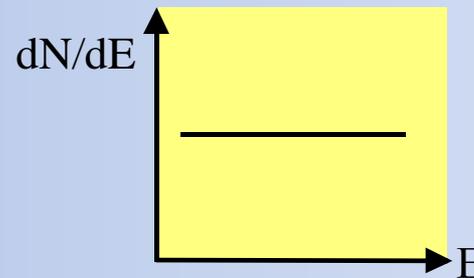
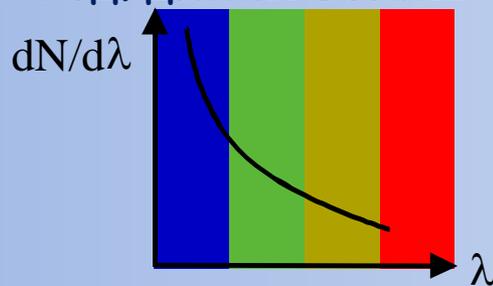
with $n = n(\lambda) \geq 1$



$$\beta_{thr} = \frac{1}{n} \rightarrow \theta_c \approx 0 \text{ Черенковский порог}$$

$$\theta_{max} = \arccos \frac{1}{n} \text{ Предельный угол } (\beta=1)$$

Число испущенных фотонов на ед. длины и ед. длины волны



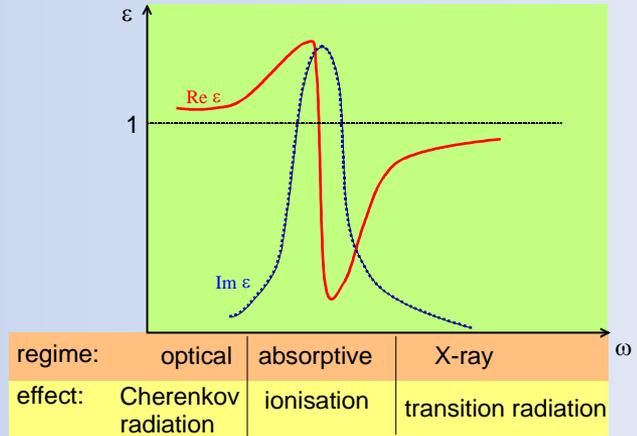
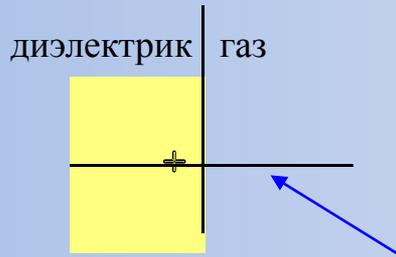
Переходное излучение было предсказано Гинзбургом и Франком в 1946

Релятивистская теория: Г. Гарибян, ЖЭТФ 63 (1958) 1079

Часто называют **Подпороговым Черенковским излучением**

Возникает при пересечении границы между средами с разными показателями преломления (газ – диэлектрик)

Упрощенная картина



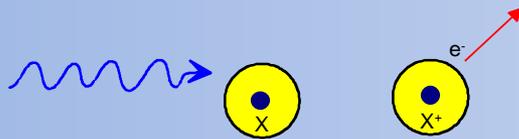
Среда поляризуется. Электронная плотность смещается от равновесия → Диполь, изменяющийся во времени → **излучается энергия.**

На одной границе:

$$W = \frac{1}{3} \alpha \hbar \omega_p \gamma \quad \omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad \left(\begin{array}{c} \text{plasma} \\ \text{frequency} \end{array} \right) \quad \hbar \omega_p \approx 20 \text{eV (plastic radiators)}$$

Фотон, что бы быть зарегистрированным, должен или «родить» заряженную частицу(ы), или передать ей энергию.

■ Фото-эффект:



Возможен только в соседстве с третьим партнером столкновения
 → выбиваются электроны К-оболочки.

Сечение сильно возрастает, если $E_\gamma \approx E_{shell}$

$$\sigma_{photo}^K = \left(\frac{32}{\epsilon^7} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha^4 Z^5 \sigma_{Th}^e \quad \epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \quad \sigma_{Th}^e = \frac{8}{3} \pi r_e^2 \quad (\text{Thomson})$$

При высоких энергиях ($\epsilon \gg 1$)

$$\sigma_{photo}^K = 4\pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \frac{1}{\epsilon} \quad \boxed{\sigma_{photo} \propto Z^5}$$

Впервые наблюдал Heinrich Hertz в 1887
JJ Tompson понял, что это "corpuscles" (electrons) in 1897
Einstein объяснил в 1905
Ввел постоянную Планка

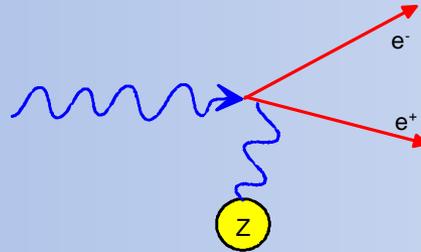
Один из краеугольных камней квантовой революции

Очень широко используется и в Физике, и в быту...
Фотодиоды, фототранзисторы, фотоумножители
Сенсоры изображений (Фото/Видео камеры, ТВ...)
Фотоэлектронная спектроскопия

...

Фотон, что бы быть зарегистрированным, должен или родить заряженную частицу(ы), или передать ей энергию

Рождение пары



Возможно в Кулоновском поле ядра или электрона, если $E_\gamma \geq 2m_e c^2$

Порог

Сечение (в релятивистском приближении)

$$\sigma_{pair} \approx 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right)$$

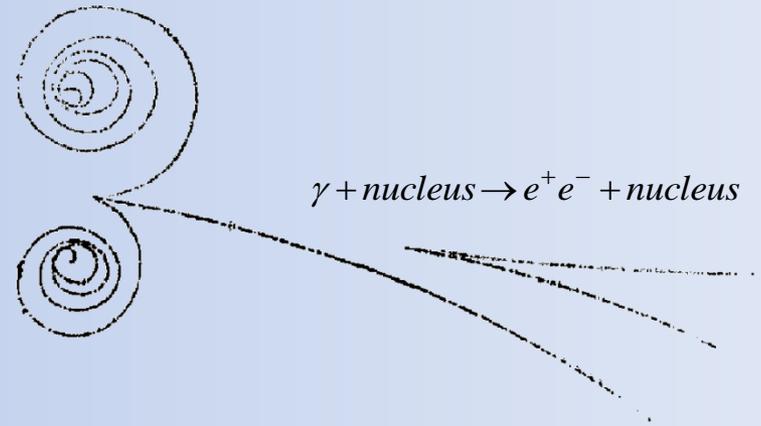
Не зависит от энергии! $\gamma + e^- \rightarrow e^+ e^- + e^-$

$$\approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

$$\approx \frac{A}{N_A} \frac{1}{\lambda_{pair}}$$

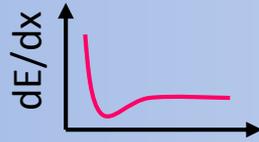
$$\lambda_{pair} = \frac{9}{7} X_0$$

Доля переданной e^+ и e^- энергии не симметрична при высоких энергиях.

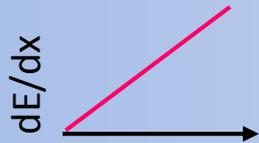


e^+ / e^-

■ Ионизация

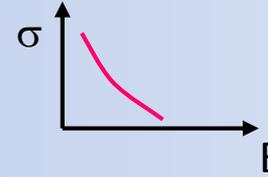


■ Тормозное излучение

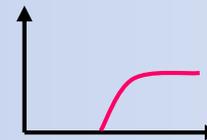


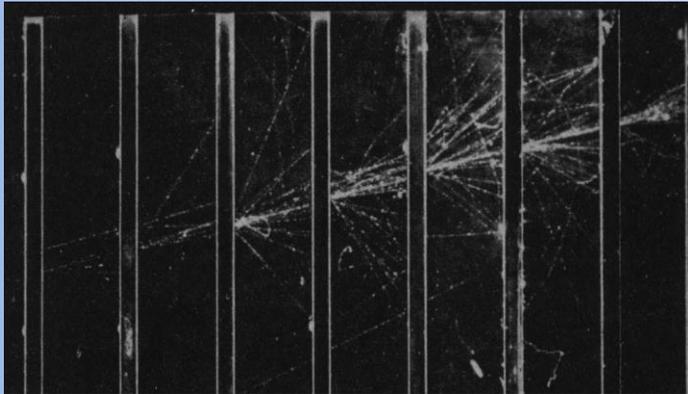
γ

■ Фото-эффект



■ Рождение пар





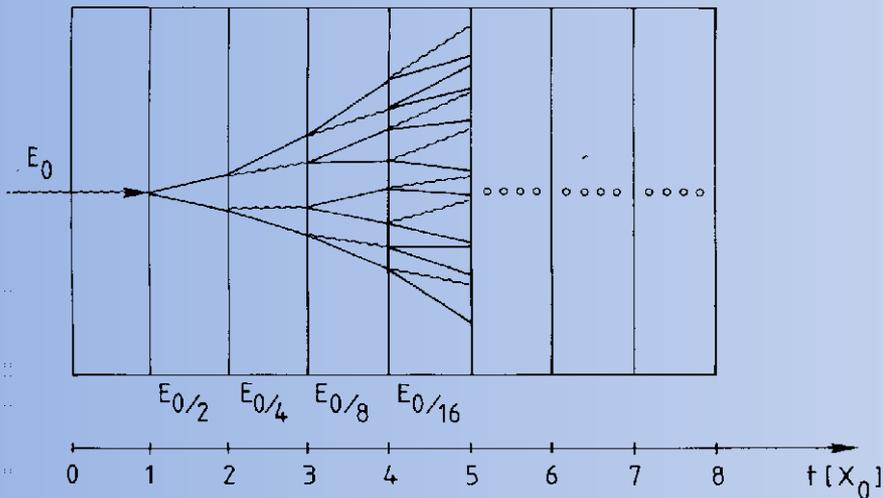
← Ливень от электрона в конденсационной камере со свинцовым поглотителем

Может инициироваться электроном или фотоном

Рассмотрим только тормозное излучение и рождение пар.

Предположим: $X_0 \sim \lambda_{\text{pair}}$

Упрощенная модель



$$N(t) = 2^t \quad E(t) / \text{particle} = E_0 \cdot 2^{-t}$$

Процесс продолжается $E(t) < E_c$

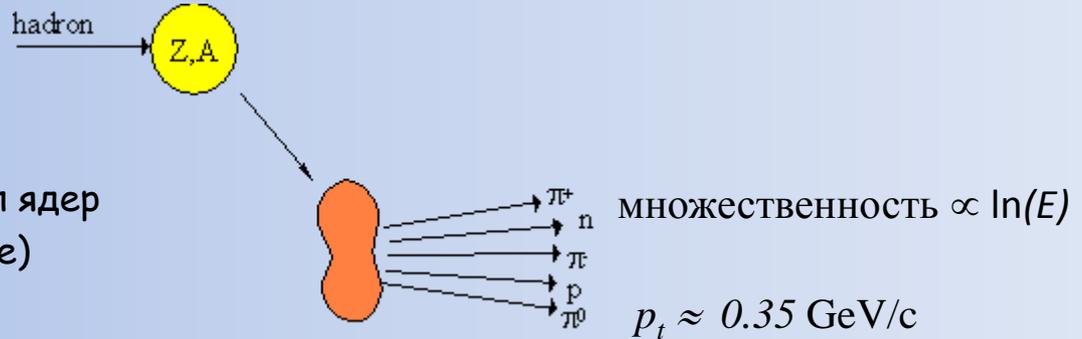
$$N^{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{(t_{\text{max}}+1)} - 1 \approx 2 \cdot 2^{t_{\text{max}}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

После $t = t_{\text{max}}$ доминирующие процессы - ионизация, эффект Комптона и фото-эффект → Поглощение энергии.

Ядерные взаимодействия

Взаимодействие адронов высоких энергий с веществом происходит в основном посредством неупругих ядерных процессов.



Происходит возбуждение и развал ядер
 → Ядерные фрагменты (radioactive)
 + рождение вторичных частиц.

Начиная с энергий ($>1 \text{ GeV}$) сечение слабо зависит от энергии и от типа налетающей частицы ($\pi, p, n, K\dots$).

$$\sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

По аналогии с X_0 вводится адронная длина поглощения

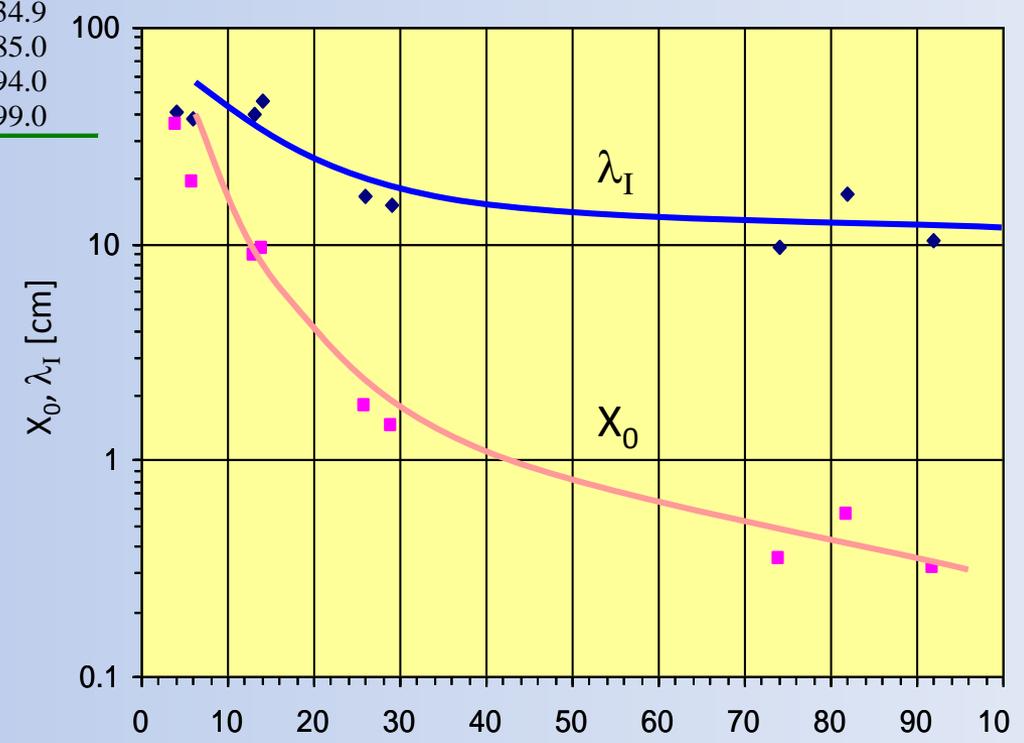
$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \propto A^{\frac{1}{4}} \quad \text{because } \sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7}$$

и ядерная длина взаимодействия

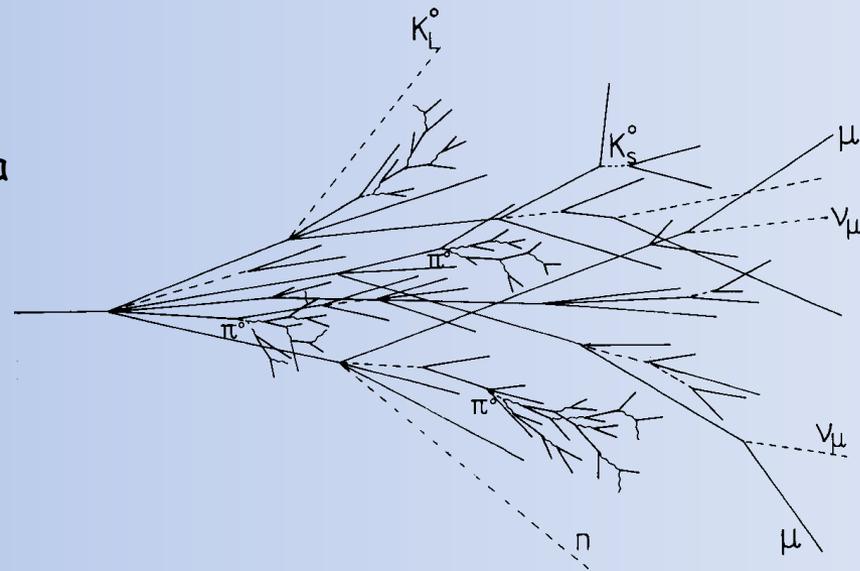
$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{total}} \propto A^{\frac{1}{3}} \quad \lambda_I < \lambda_a$$

| Material | Z | A | ρ [g/cm ³] | X_0 [g/cm ²] | λ_I [g/cm ²] |
|----------------|----|--------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Hydrogen (gas) | 1 | 1.01 | 0.0899 (g/l) | 63 | 50.8 |
| Helium (gas) | 2 | 4.00 | 0.1786 (g/l) | 94 | 65.1 |
| Beryllium | 4 | 9.01 | 1.848 | 65.19 | 75.2 |
| Carbon | 6 | 12.01 | 2.265 | 43 | 86.3 |
| Nitrogen (gas) | 7 | 14.01 | 1.25 (g/l) | 38 | 87.8 |
| Oxygen (gas) | 8 | 16.00 | 1.428 (g/l) | 34 | 91.0 |
| Aluminium | 13 | 26.98 | 2.7 | 24 | 106.4 |
| Silicon | 14 | 28.09 | 2.33 | 22 | 106.0 |
| Iron | 26 | 55.85 | 7.87 | 13.9 | 131.9 |
| Copper | 29 | 63.55 | 8.96 | 12.9 | 134.9 |
| Tungsten | 74 | 183.85 | 19.3 | 6.8 | 185.0 |
| Lead | 82 | 207.19 | 11.35 | 6.4 | 194.0 |
| Uranium | 92 | 238.03 | 18.95 | 6.0 | 199.0 |

For $Z > 6$: $\lambda_I > X_0$



Вовлечены разнообразные процессы.
 Намного более сложная картина по сравнению с электромагнитными каскадами.



Адронный ливень включает 2 компоненты:

адронную

+

электромагнитную



Заряженные адроны p, π^\pm, K^\pm

Ядерные фрагменты

Нейтральные пионы $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

→ электромагнитные каскады

$$n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$$

Пример $E = 100 \text{ GeV}$: $n(\pi^0) \approx 18$

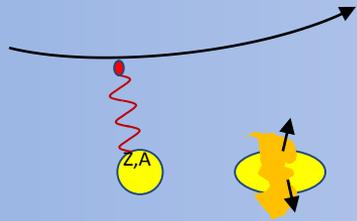
{ от развала ядер (энергия связи),
 нейтроны, нейтрино, мягкие γ , мюоны

→ невидимая энергия → большие флуктуации → плохое энергетическое разрешение

Мюоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях. (как e^+, e^- , но из-за массы Е-М сечения ($\sim E/m^2$) сильно подавлены).

MIP's

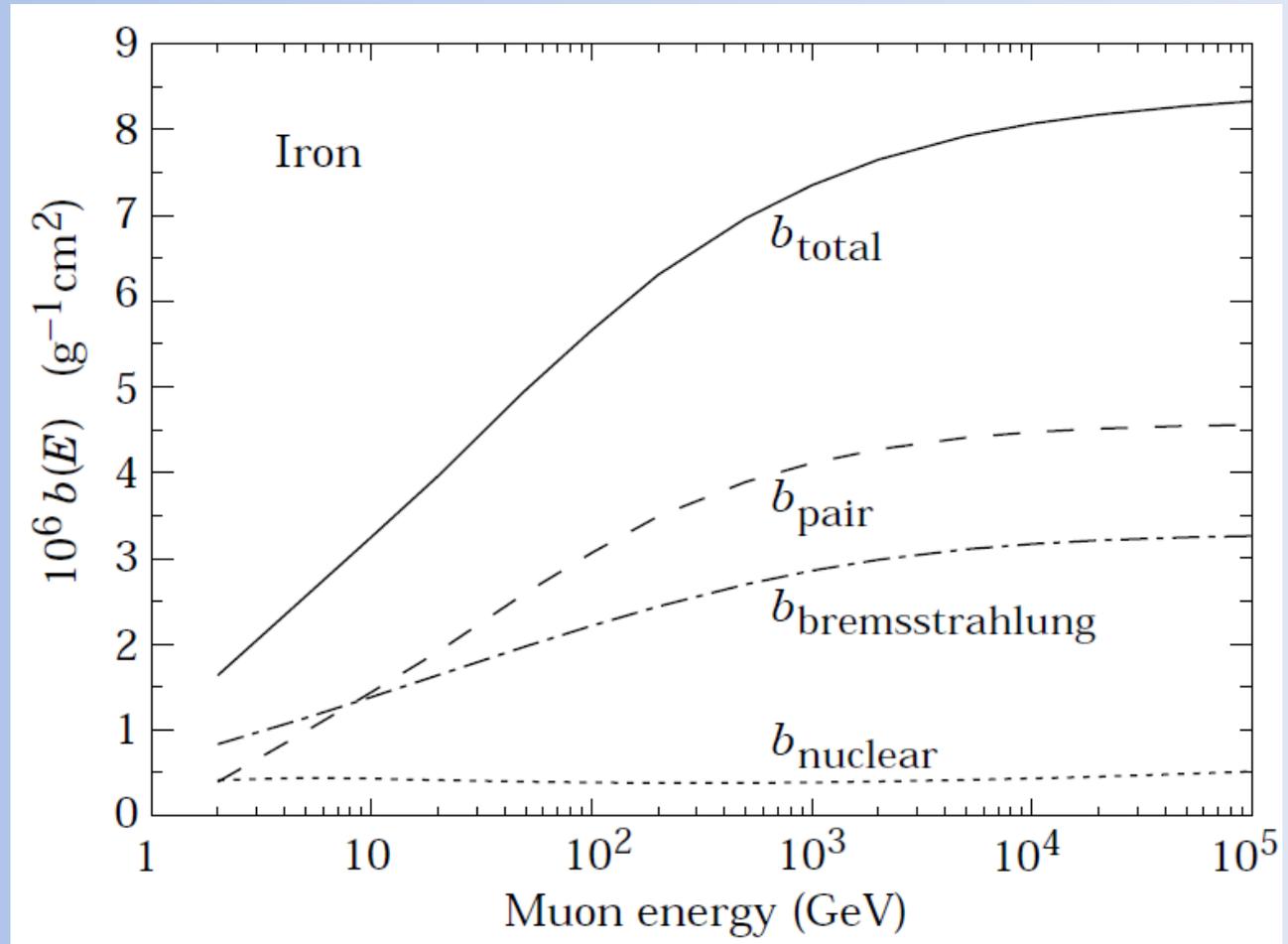
Photo-nuclear interactions



Pair production



$$\frac{dE}{dx} = b(Z, A, E_\mu) \cdot E_\mu$$





Огромное спасибо за
неослабевающе
внимание !