

Регистрация (детектирование)

Частиц

Николай Зимин





«Физика – наука экспериментальная»

R. Feynman



Регистрация (Детектирование) – очень емкие слова

Определение (извлечение) какой-либо информации об **элементарной частице** посредством проведения (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 $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$



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

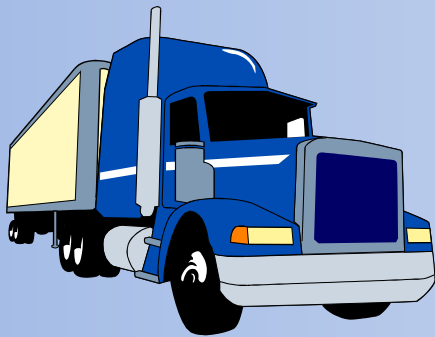
$$v_{bee} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{bee} = 10^{-3} \text{ Дж} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

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

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

Полная запасенная энергия пучков: (большая) макро

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

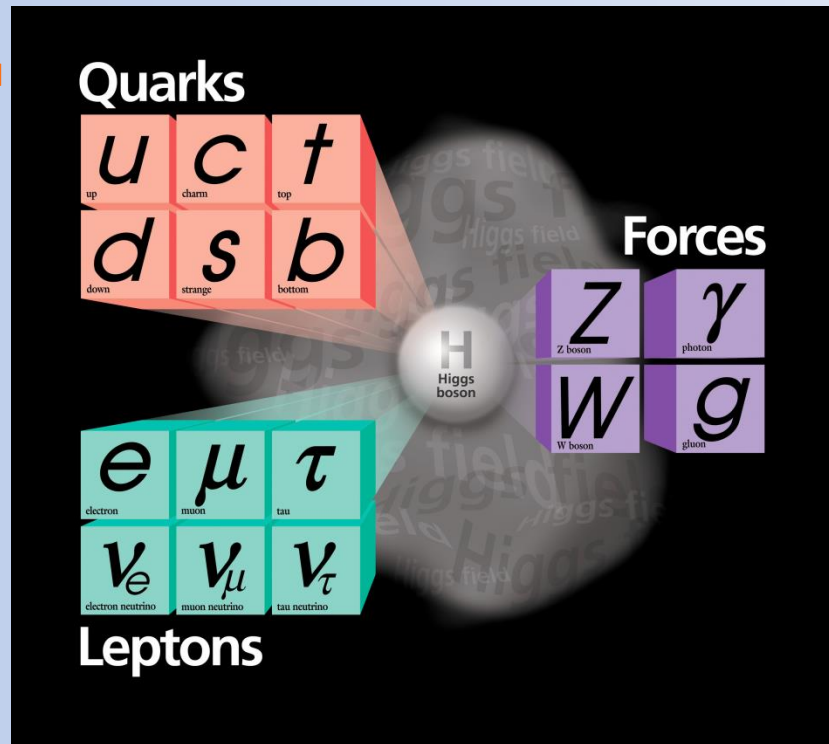
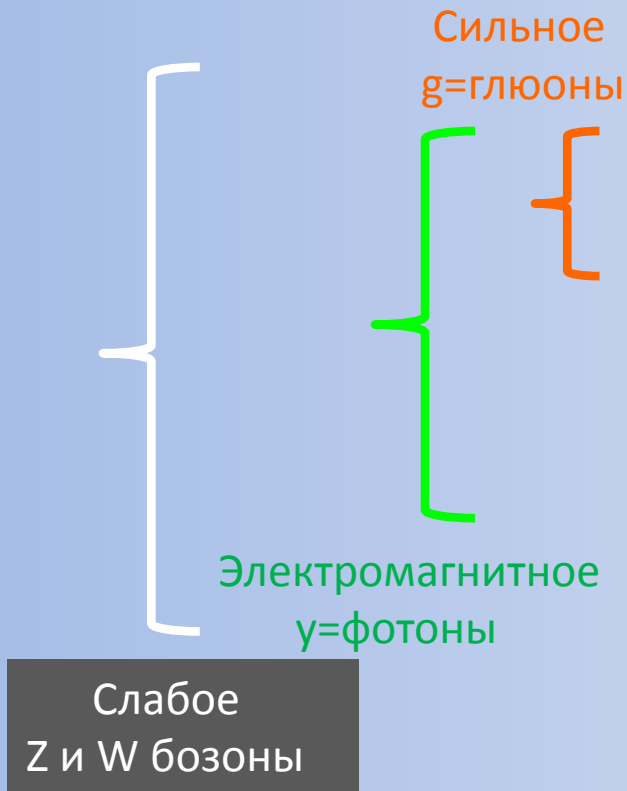


$$m_{truck} = 80 \text{ T}$$

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

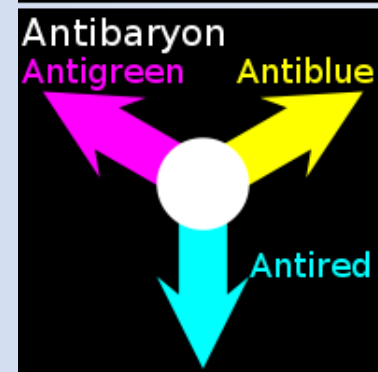
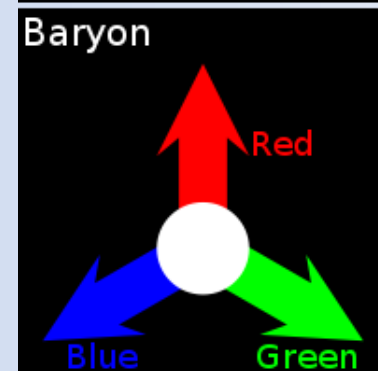
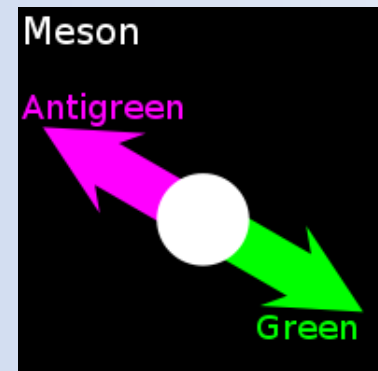
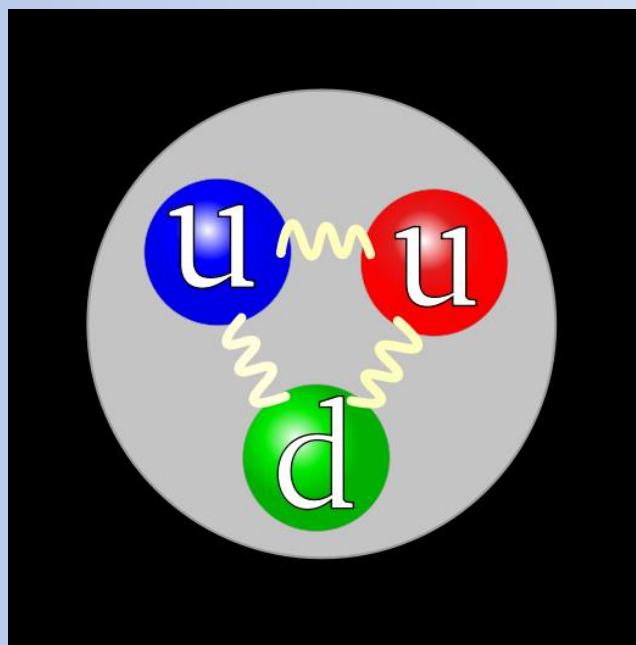
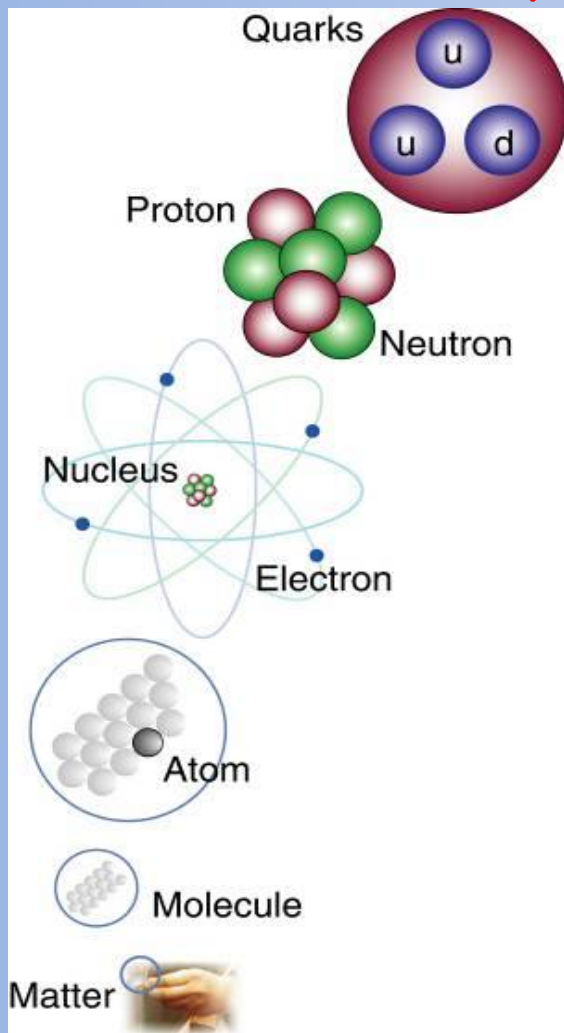
«Элементарные» частицы

Взаимодействия(e)



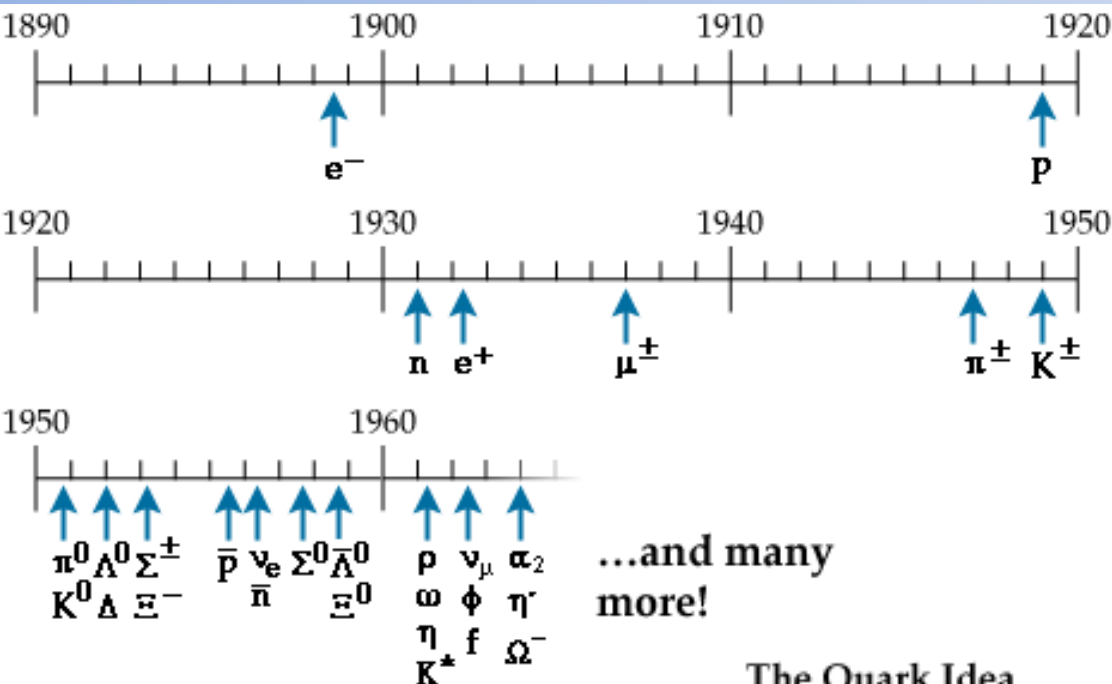
Все известные частицы (> 200 с резонансами)
могут быть сконструированны подобным образом
Комбинации разных типов кварков
Надо добавить «цвет» для кварков

Теория: QCD (eng) или КХД (рус)





История открытия «элементарных» частиц



Электрон-Протон-Нейтрон

Первая античастица - позитрон

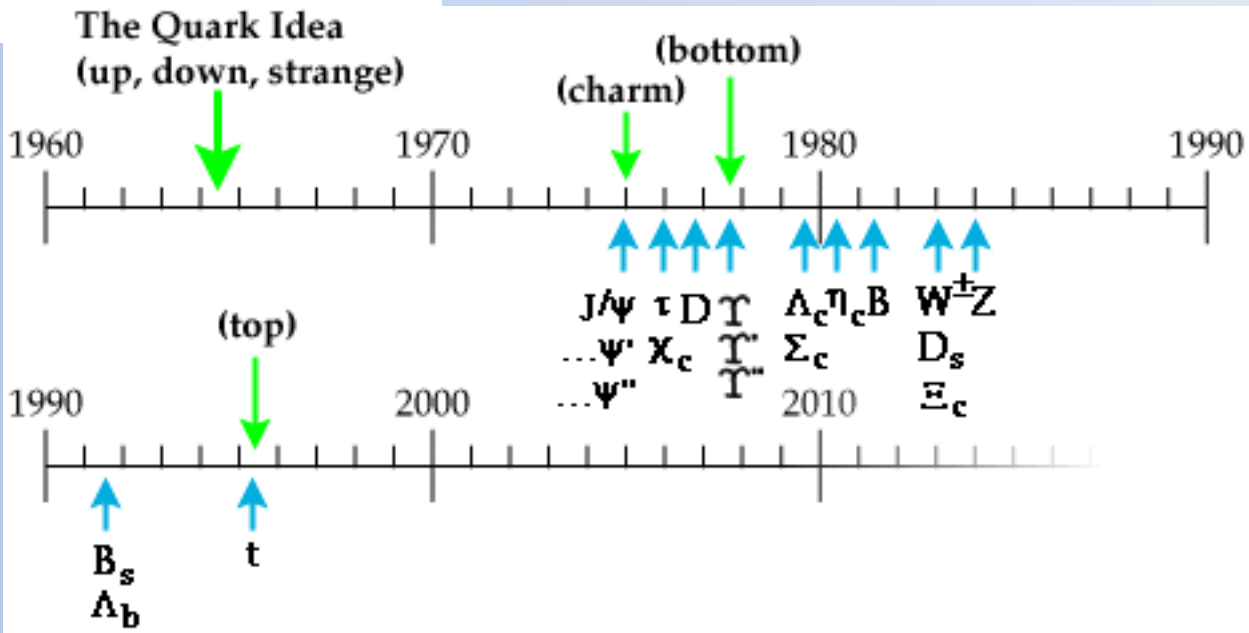
Первые частицы второго поколения мюоны

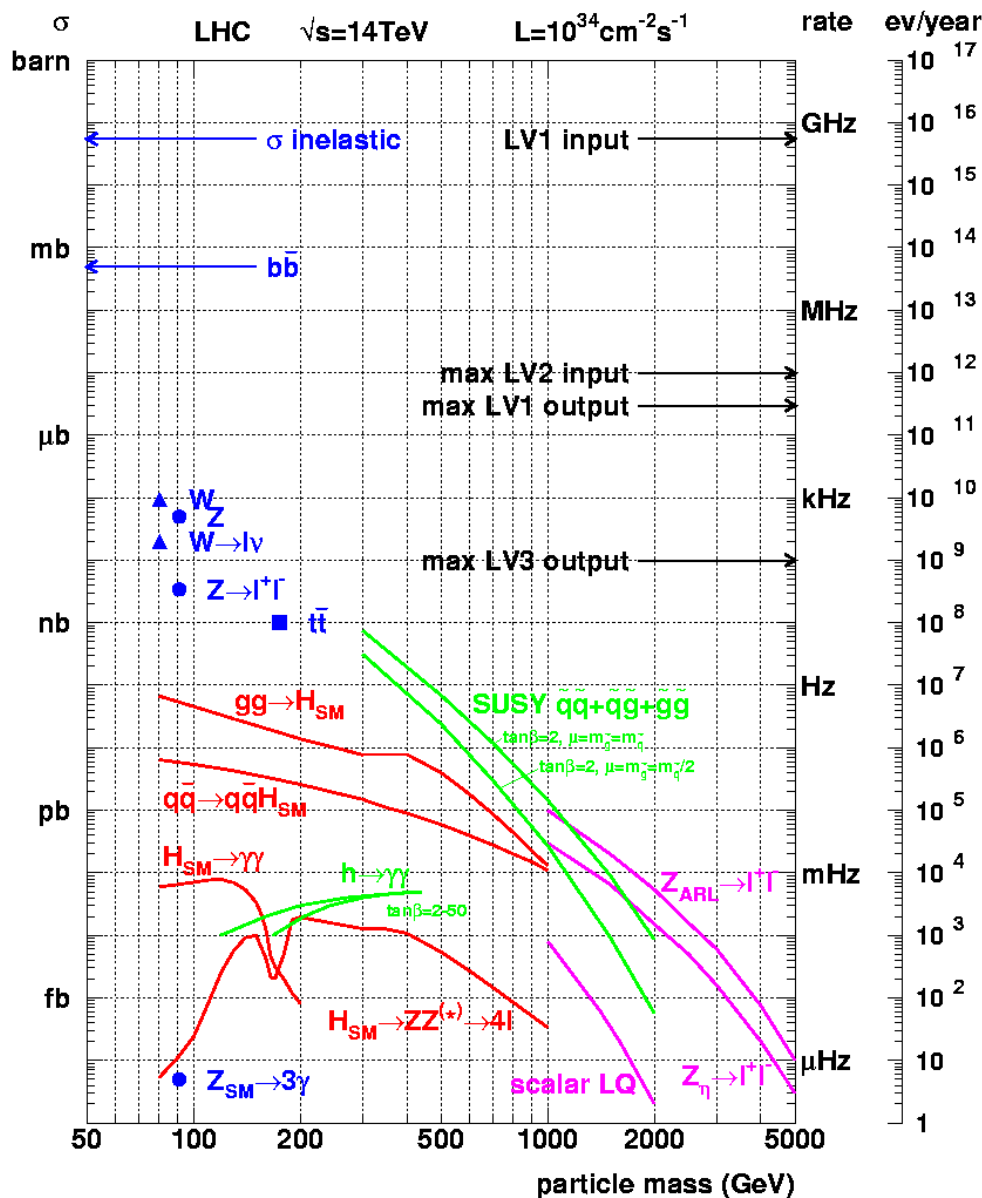
Первые составные частицы-мезоны пионы и каоны (Кварковая теория)

«Зоопарк» частиц

«Открытие» кварков и промежуточных бозонов

u, d, s
с «чармний» очарованный
b «боттомний» 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» $\gamma, e, \mu, \tau, K, p, n$

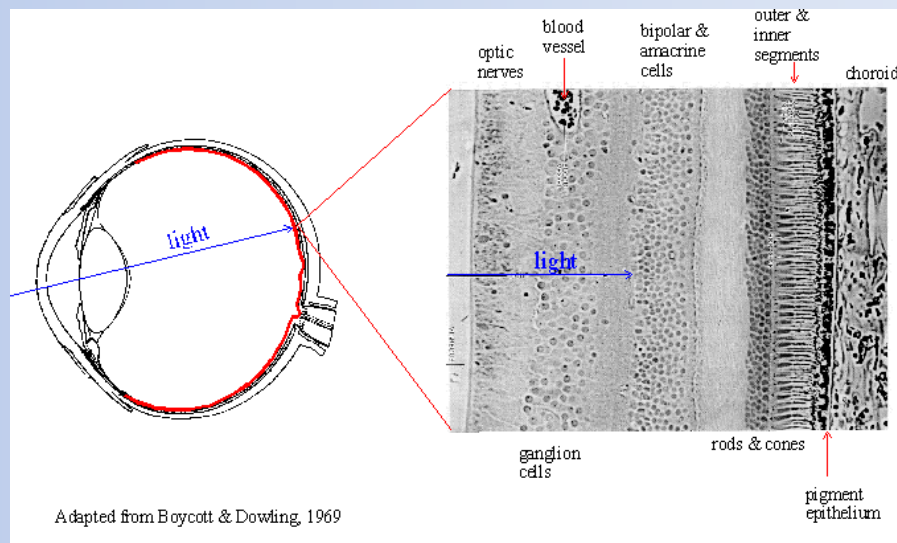
Частица, что бы быть зарегистрированной, должна испытать какое-то взаимодействие с Детектором

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

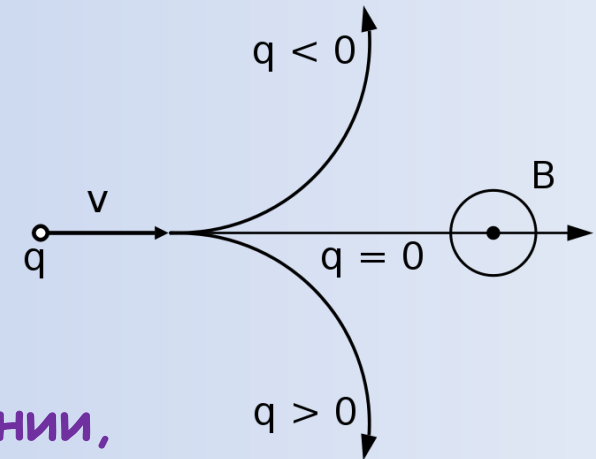
Энергетическая (длина волны) дискриминация

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

Хорошее быстродействие ($\sim 10\text{Hz}$ включая обработку для восстановления изображения)

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

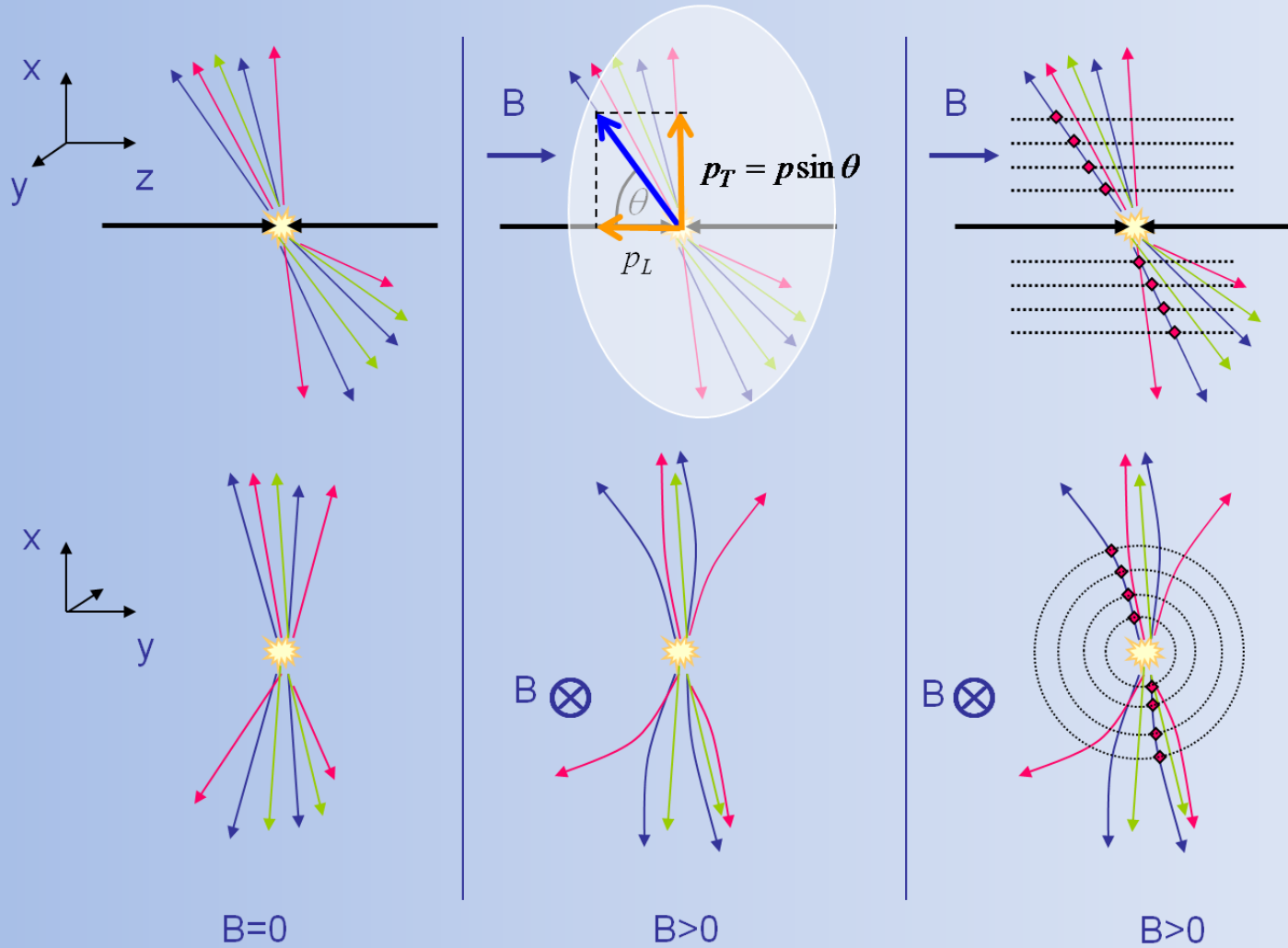
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



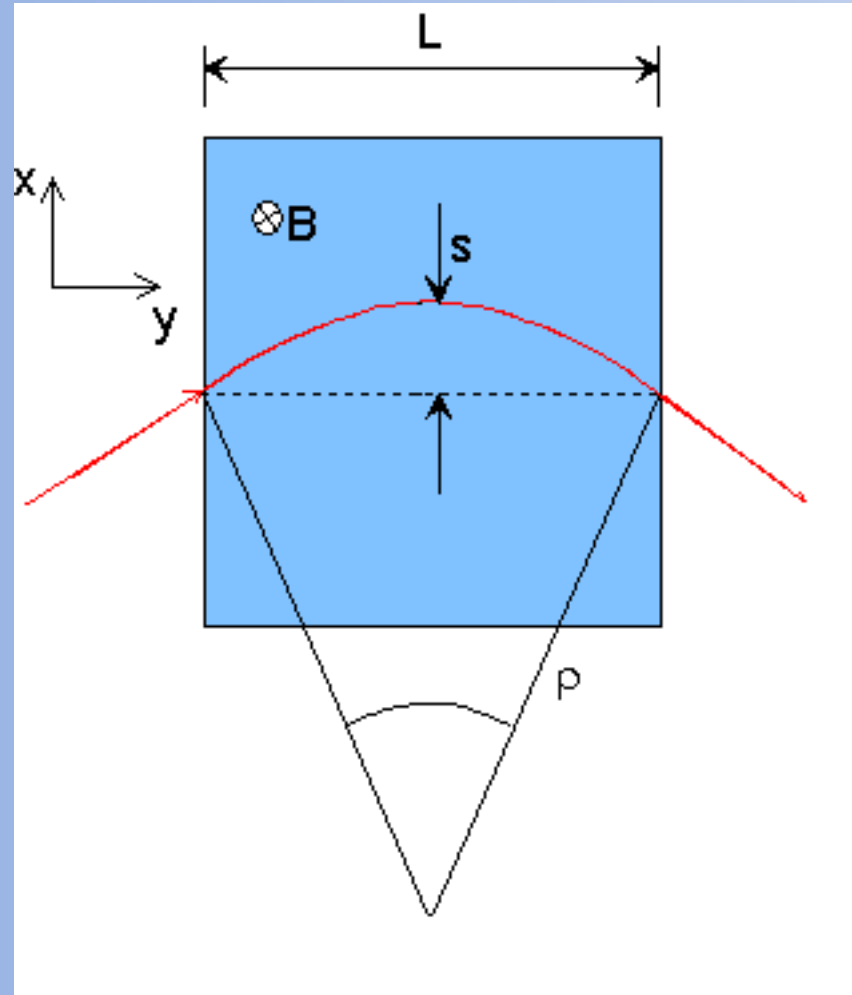
Ускоряется вдоль силовой линии,
вращается по окружности

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

Заряженная частица в МАГНИТНОМ поле



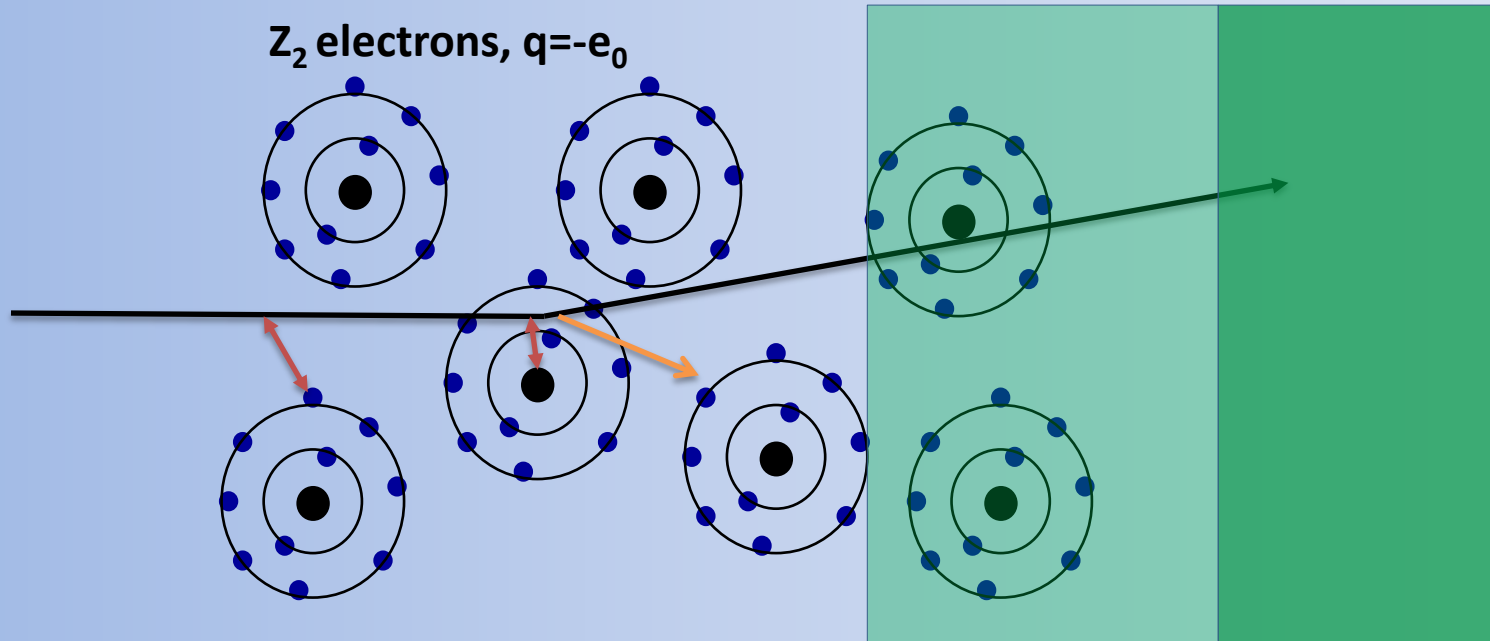
Заряженная частица в МАГНИТНОМ поле



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

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

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



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: Неупругие ядерные процессы

Мюоны: Даже электромагнитное взаимодействие подавлено, MIP's

Каскады (ливни):

Для электронов и фотонов

Электро-магнитные ливни

Для адронов

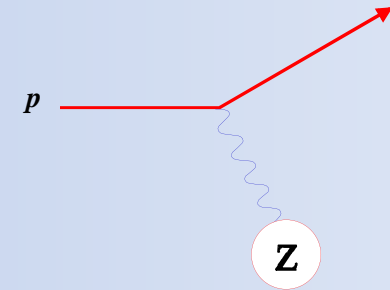
Адронные ливни

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



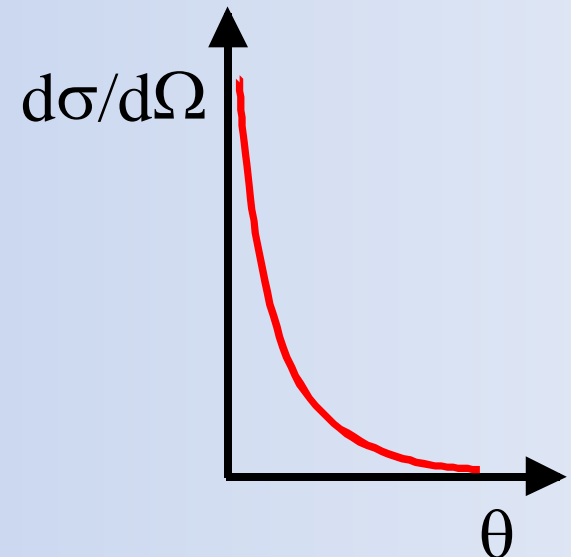
Приближение

- Не релятивистское
- безспиновое

Средний угол рассеяния = 0.

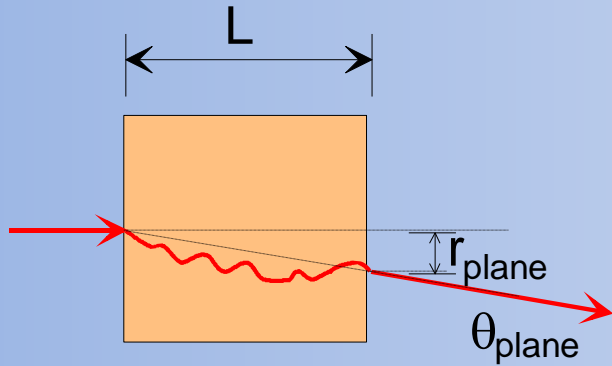
Сечение для нулевого угла бесконечное !

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

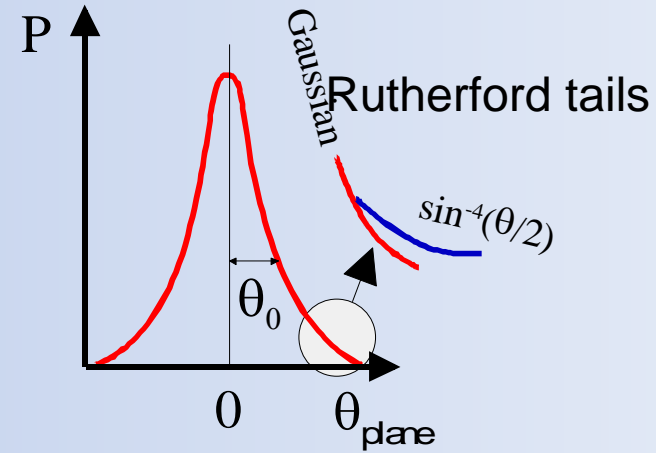


Может играть роль в детекторах с тонкими пленками и проволочками

В достаточно толстом слое вещества частица испытывает
Множественное рассеяние



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

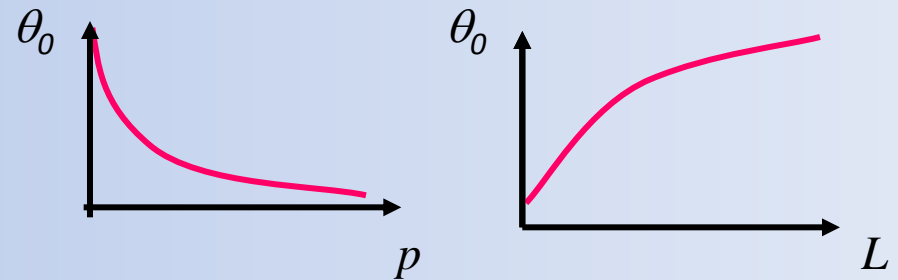


Приближение $\theta_0 \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$

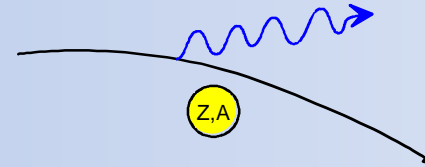
$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{space}^{RMS}$$

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

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

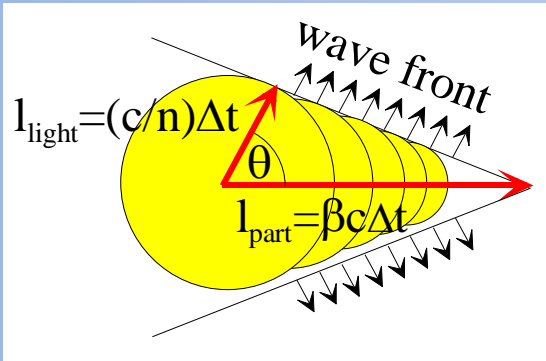
$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

radiation length [g/cm²]

(divide by specific density to get X_0 in cm)

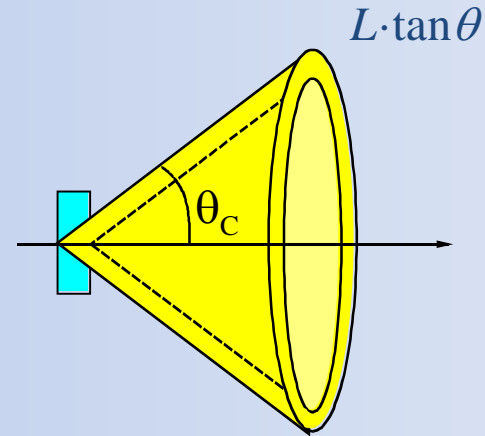
Нашли частицу, прошедшую калориметр - это μ

Черенковское излучение - **заряженная частица** в среде со скоростью, больше пороговой



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

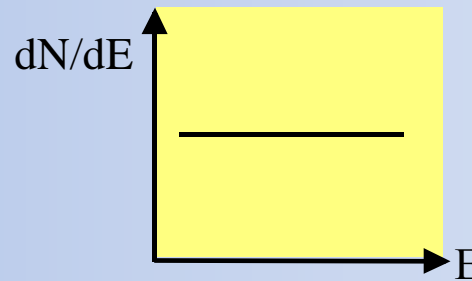
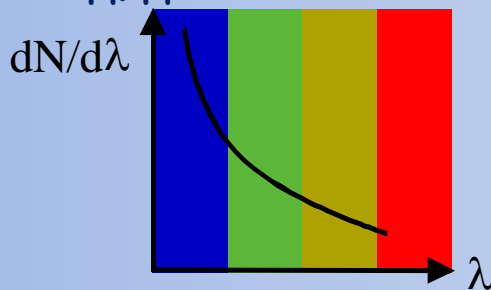
with $n = n(\lambda) \geq 1$



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

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

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



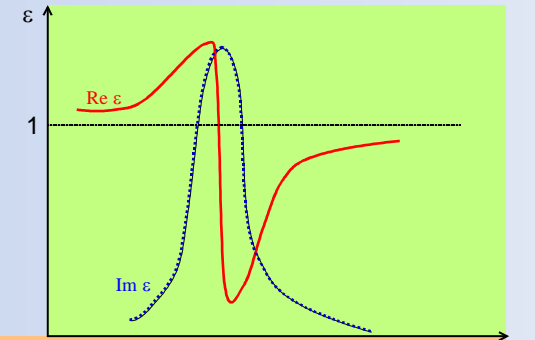
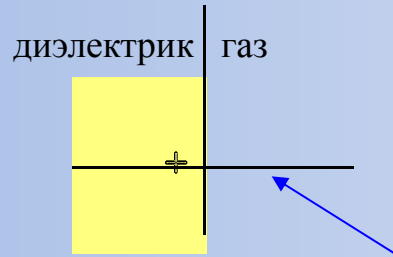
Переходное излучение было предсказано Гинзбургом и Франком в 1946

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



regime:	optical	absorptive	X-ray
effect:	Cherenkov radiation	ionisation	transition radiation

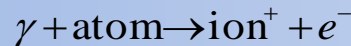
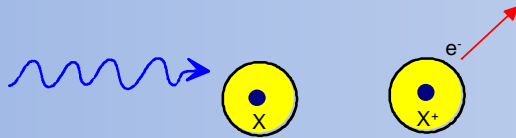
Среда поляризуется. Электронная плотность смещается от равновесия → Диполь, изменяется во времени → излучается энергия.

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

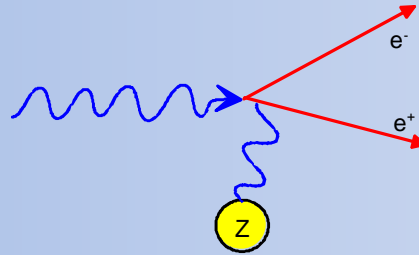
Один из краеугольных камней квантовой революции

Очень широко используется в Физике и 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)

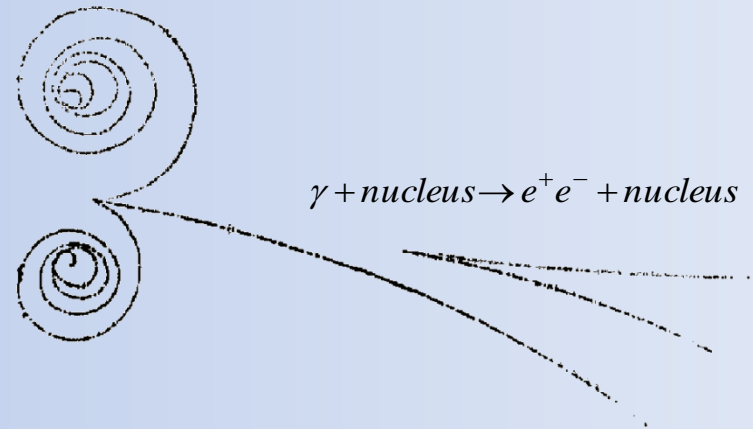
$$\sigma_{pair} \approx 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right) \quad \text{Не зависит от энергии!} \quad \gamma + e^- \rightarrow e^+ e^- + e^-$$

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

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

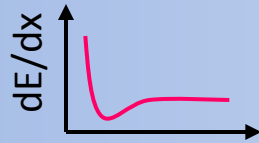
$$\lambda_{pair} = \frac{9}{7} X_0$$

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

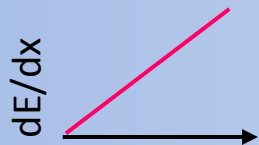


e^+ / e^-

■ Ионизация

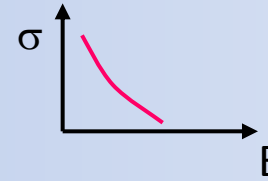


■ Тормозное излучение

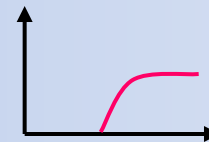


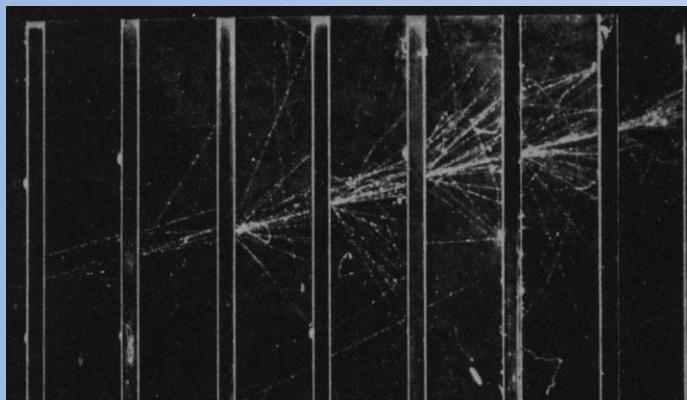
γ

■ Фото-эффект



■ Рождение пар





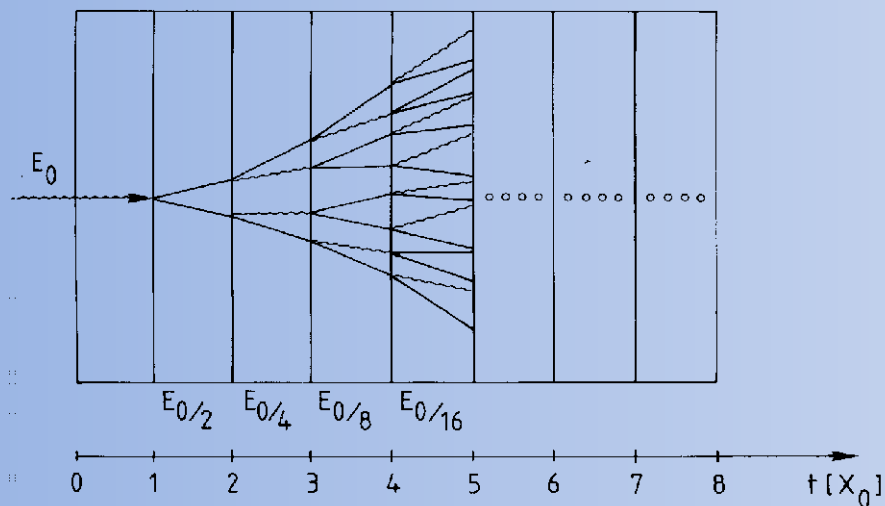
← Ливень от электрона в конденсационной камере со свинцовым поглотителем

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 $E(t) < E_c$

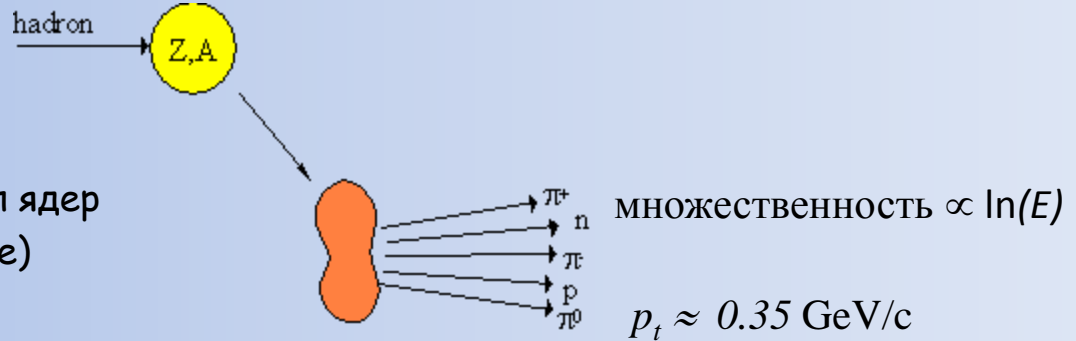
$$N^{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{(t_{\text{max}} + 1)} - 1 \approx 2 \cdot 2^{t_{\text{max}}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

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

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

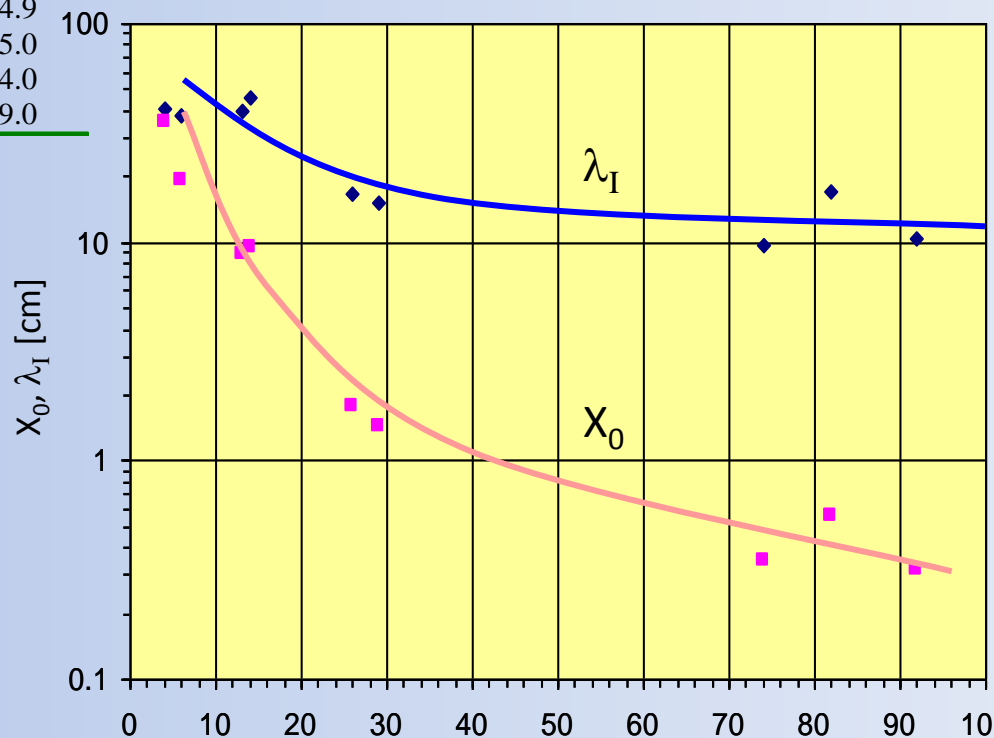
$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \propto A^{\frac{1}{4}} \quad \text{because } \sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7}$$

и ядерная длина взаимодействия

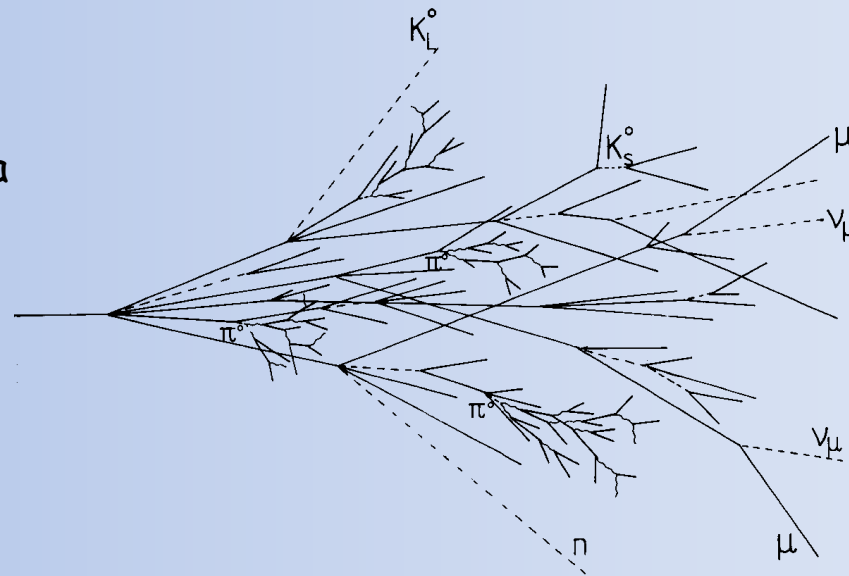
$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{total}} \propto A^{\frac{1}{3}} \quad \lambda_I < \lambda_a$$

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

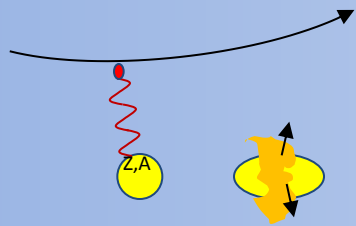
{ От развала ядер (энергия связи)
 нейтроны, нейтрино, мягкие γ , мюоны

→ невидимая энергия → большие флуктуации → энергетическое разрешение

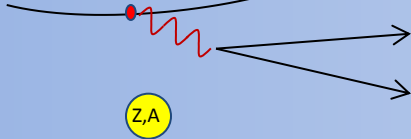
Мюоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях. (как e^+, e^- , но из-за массы ЭМ сечения ($\sim E/m^2$) сильно подавлены).

MIP's

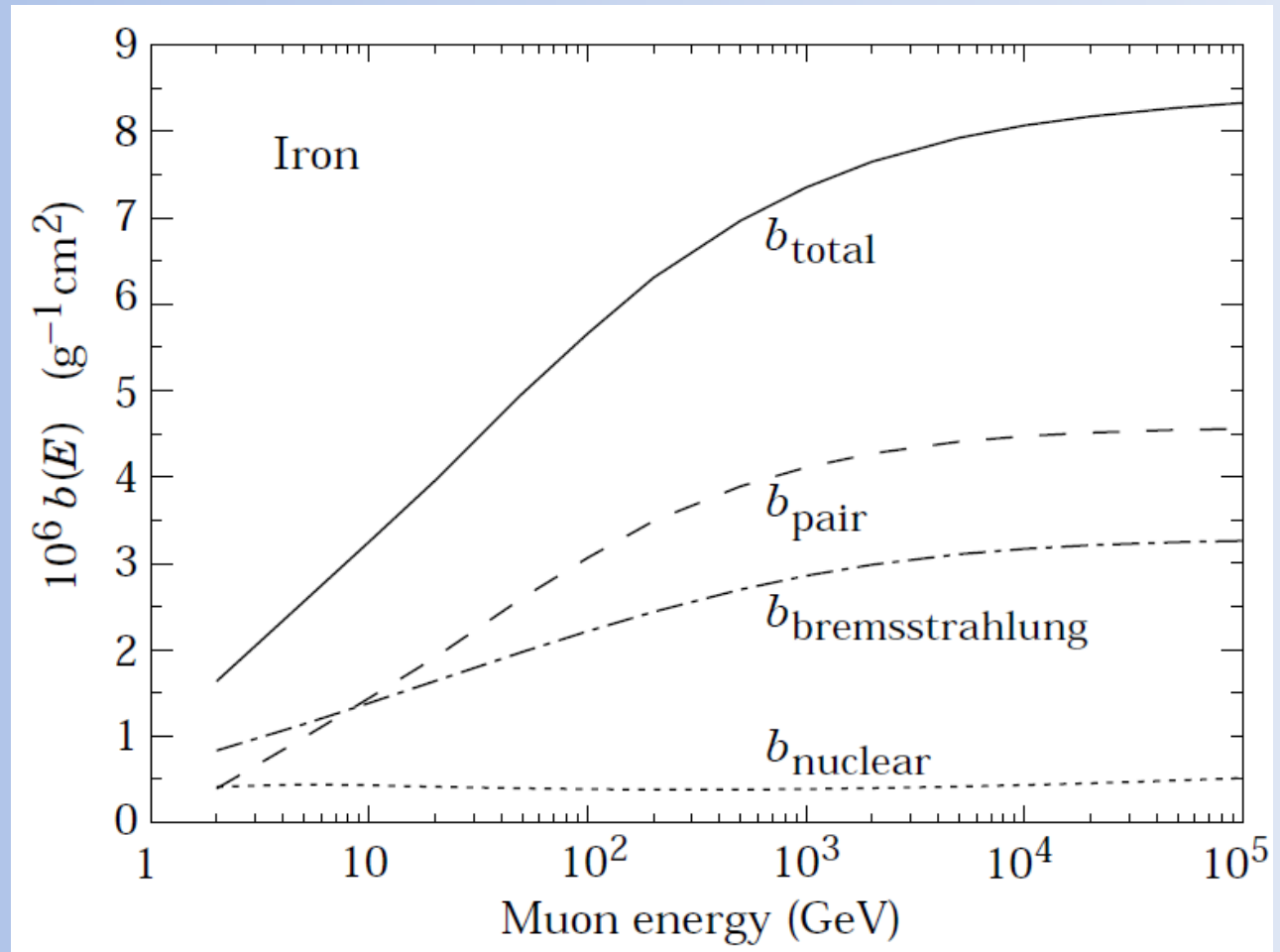
Photo-nuclear interactions



Pair production



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



Огромное спасибо за
неослабевающе
внимание !