

Регистрация (детектирование) частиц

Николай Зимин и Рустем Оспанов





«Физика – наука экспериментальная»

R. Feynman



Частица (элементарная или составная)

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

Регистрация (Детектирование)

Определение (извлечение) какой-либо информации об (квантовой) частице посредством проведения (косвенных) измерений с помощью «детекторов» частиц

Детектор – 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**

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

Что для этого надо?

Теория (Стандартная модель, SUSY, ...)

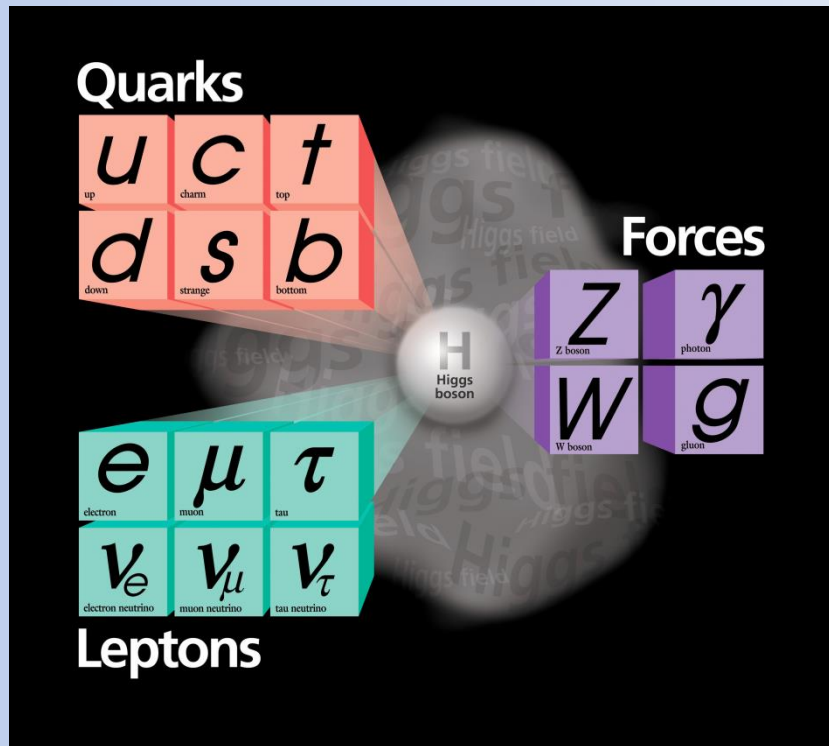
Ускорители (LHC, Tevatron, LEP, NICA, космические лучи...)

Детекторы (маленькие или огромные...)

Увлеченные квалифицированные специалисты,
работающие в Коллаборациях

«Элементарные» частицы

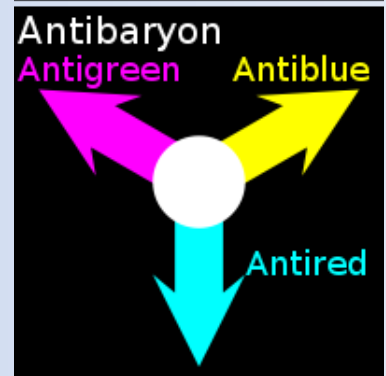
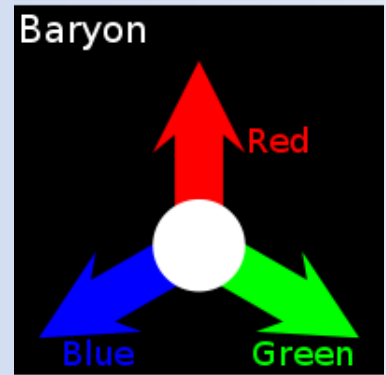
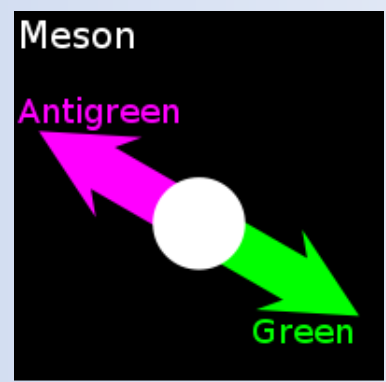
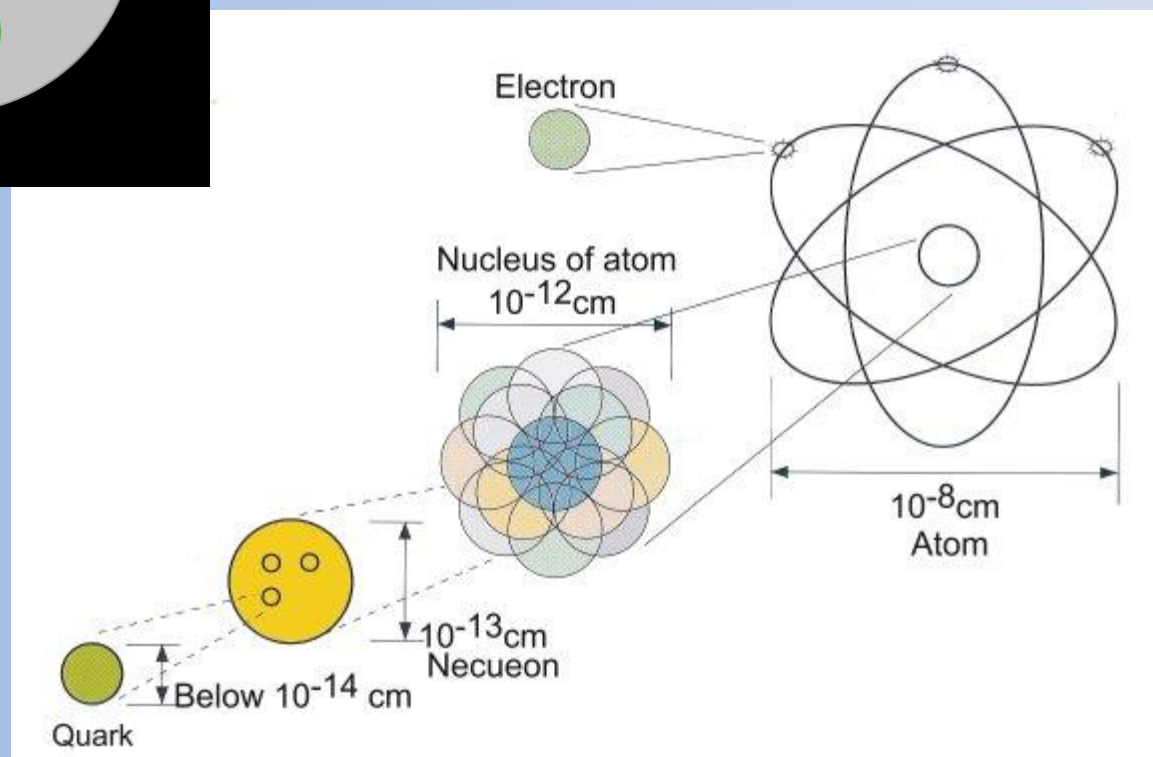
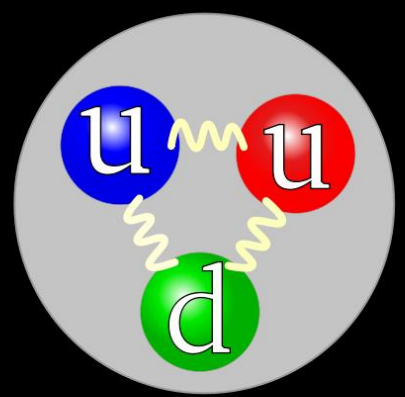
Взаимодействия(e)



Только электрон, мюон и фотон регистрируются детектор
Кварки не могут наблюдаться в свободном состоянии

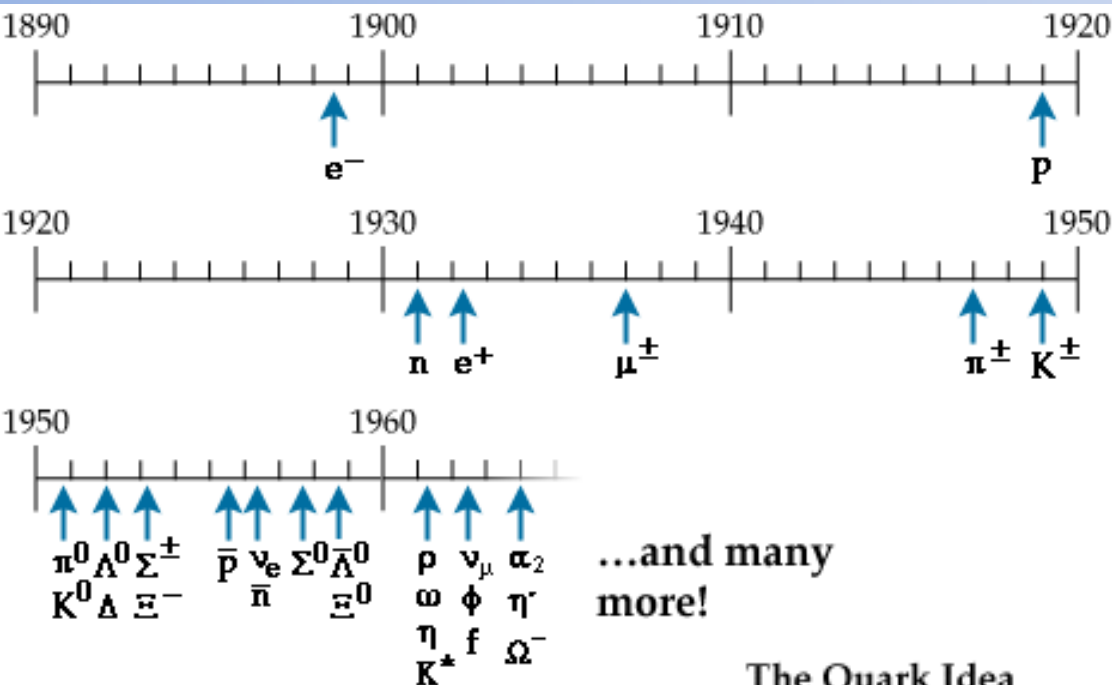
Все известные адронные частицы (> 300 с резонансами)
могут быть сконструированны подобным образом:
Комбинации разных типов кварков
Надо добавить «цвет» для кварков

Теория: QCD (eng) или КХД (рус)





История открытия «элементарных» частиц



Электрон-Протон-Нейтрон

Первая античастица - позитрон

Первые частицы второго поколения мюоны с помощью космических лучей

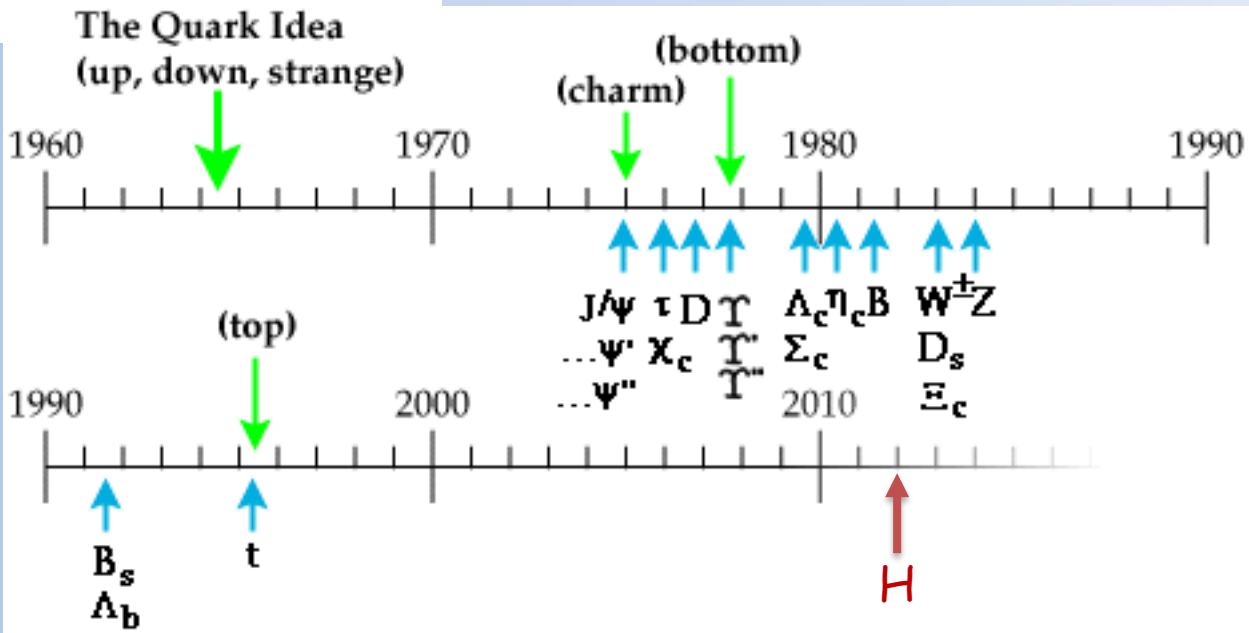
Первые составные частицы-мезоны пионы и каоны (Кварковая теория)

«Зоопарк» частиц

«Открытие» кварков и промежуточных бозонов

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

Векторные бозоны Z, W
Higgs boson



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



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

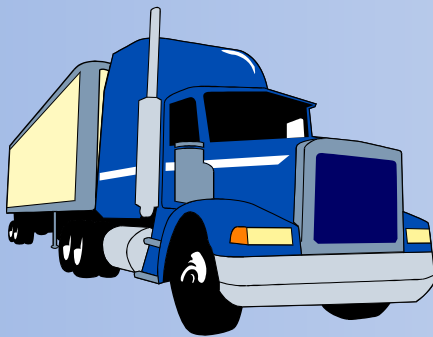
$$v_{bee} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{bee} = 10^{-3} \text{ Дж} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{LHC} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 6.5 \text{ TeV}$$

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

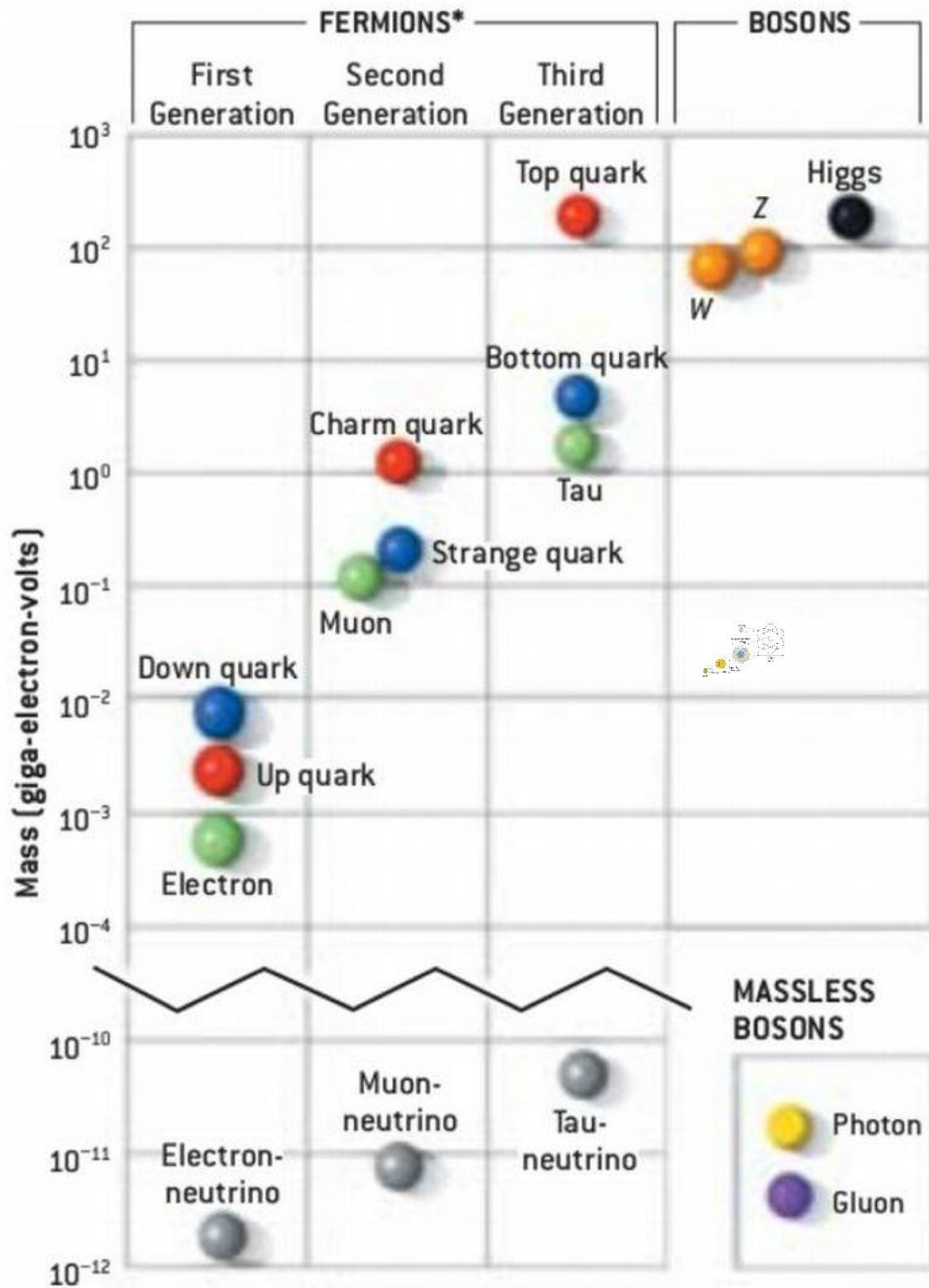
Полная запасенная энергия пучков LHC: (большая) макро

$$E_{total} = 10^{11} \text{ protons} \cdot 2808 \text{ bunches} \cdot 6.5 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 2 \cdot 10^{27} \text{ eV} \approx 300 \text{ МДж}$$



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

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

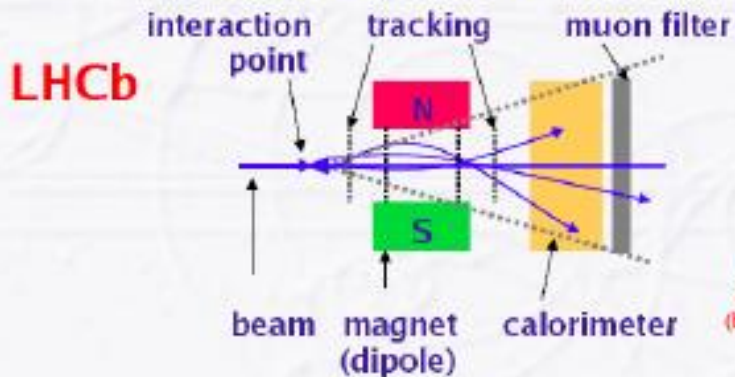


$$m_{\mu} = 105.7 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}$$

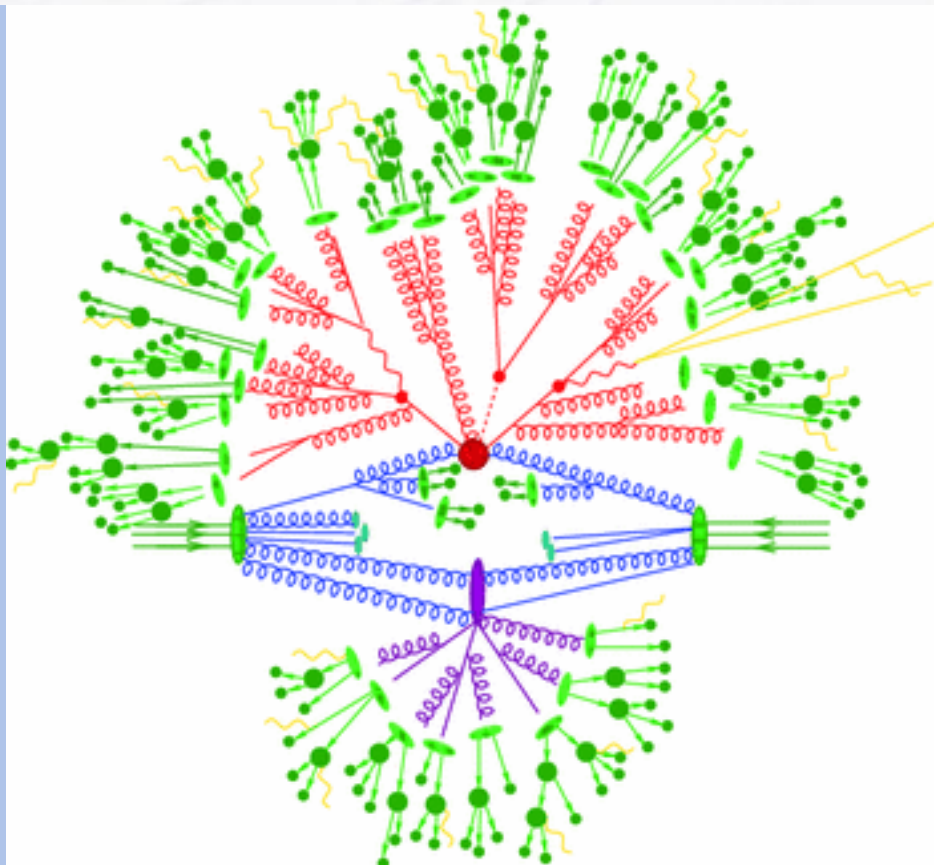
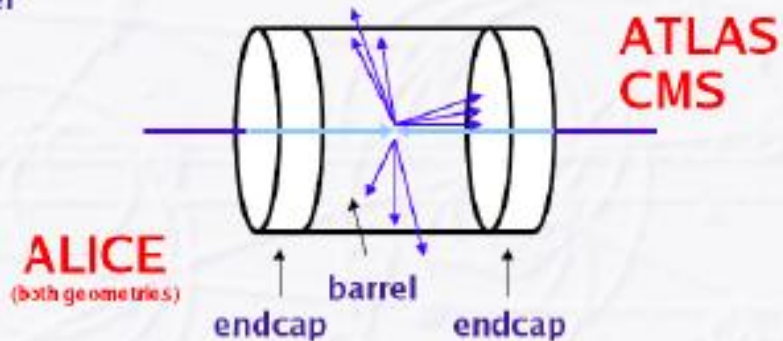
Fixed target geometry

"Magnet spectrometer"



Collider geometry

" 4π multi purpose detector"



«Встречные пучки»

Сечение и Светимость (Люминосити)

Сечение σ – это вероятность взаимодействия между элементарными частицами или частицами и атомами ...

σ имеет размерность площади
Единица: 1 barn (b) = 10^{-24} cm²

Пример: 2 сталкивающихся пучка

Светимость (Luminosity L)

Единица: [cm⁻² s⁻¹]



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

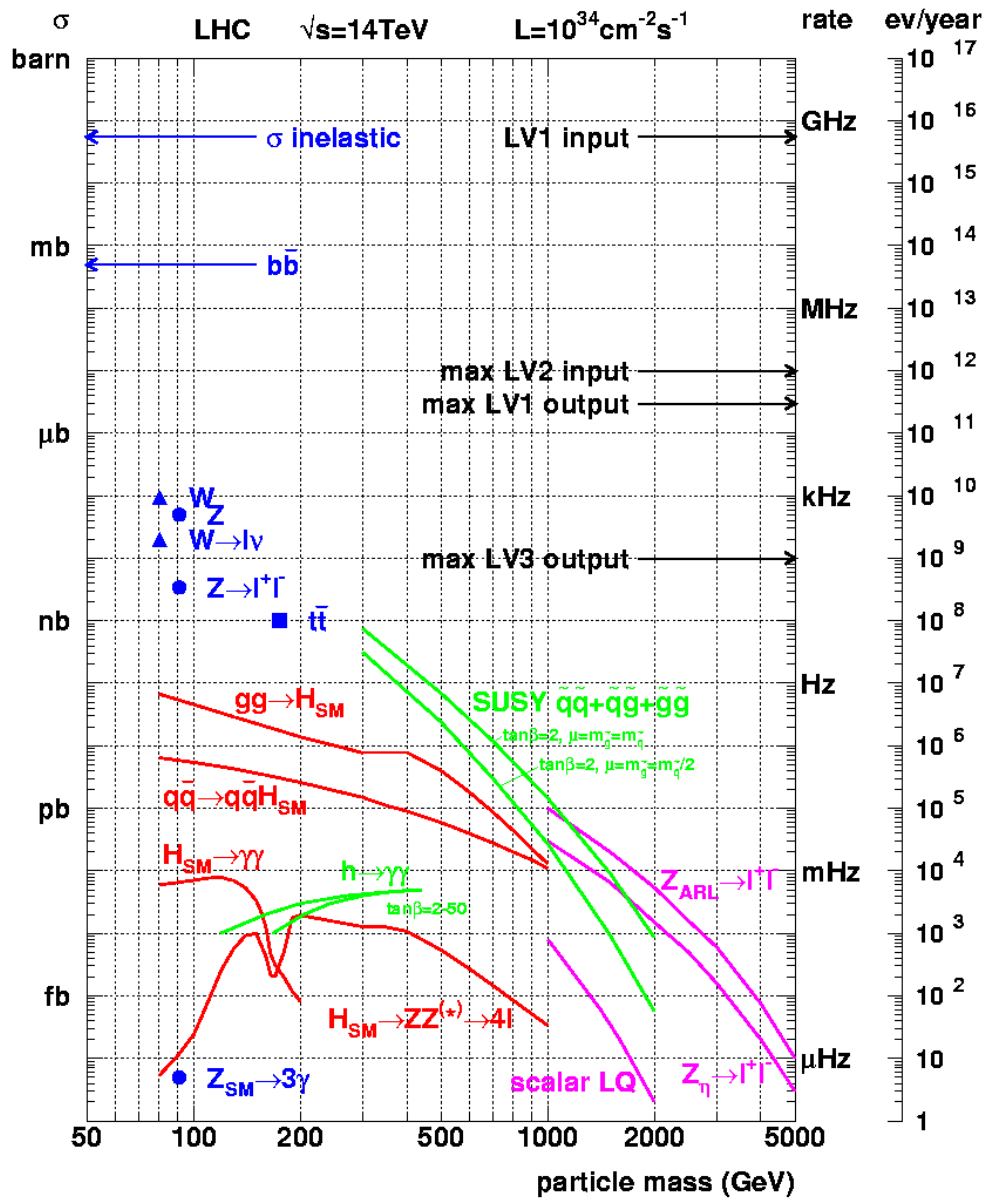
Частота регистрируемых событий (R_{int})

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



«Хорошо изученные процессы КХД»
 Нет необходимости и возможности регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

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

Сконцентрируемся только на частицах с достаточно большим временем жизни, позволяющим их зарегистрировать.

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

«Электромагнитные» γ , e^{\pm} , μ^{\pm}

«Электромагнитные и адронные» π^{\pm} , K^{\pm} , p^{\pm}

«Адронные» K^0 , n

Все другие частицы регистрируются через эти 8 частиц, путём восстановления массы распада и других параметров, например $H \rightarrow \gamma\gamma$

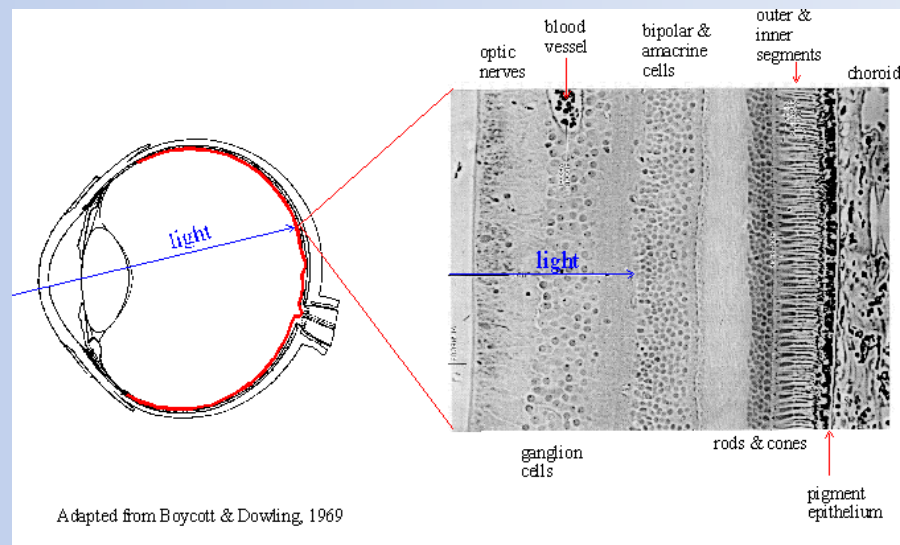
Детектор - это любой (какой-то) инструмент, что бы идентифицировать ее (частицу), и что бы измерять какие-то характеристики или свойства частицы т.е. заряд, E, p, m, время жизни, спин, квантовые номера

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

Хорошее пространственное разрешение
Большой динамический диапазон (1:10⁶)
+ автоматическая адаптация порога

Энергетическая дискриминация (длина волны)

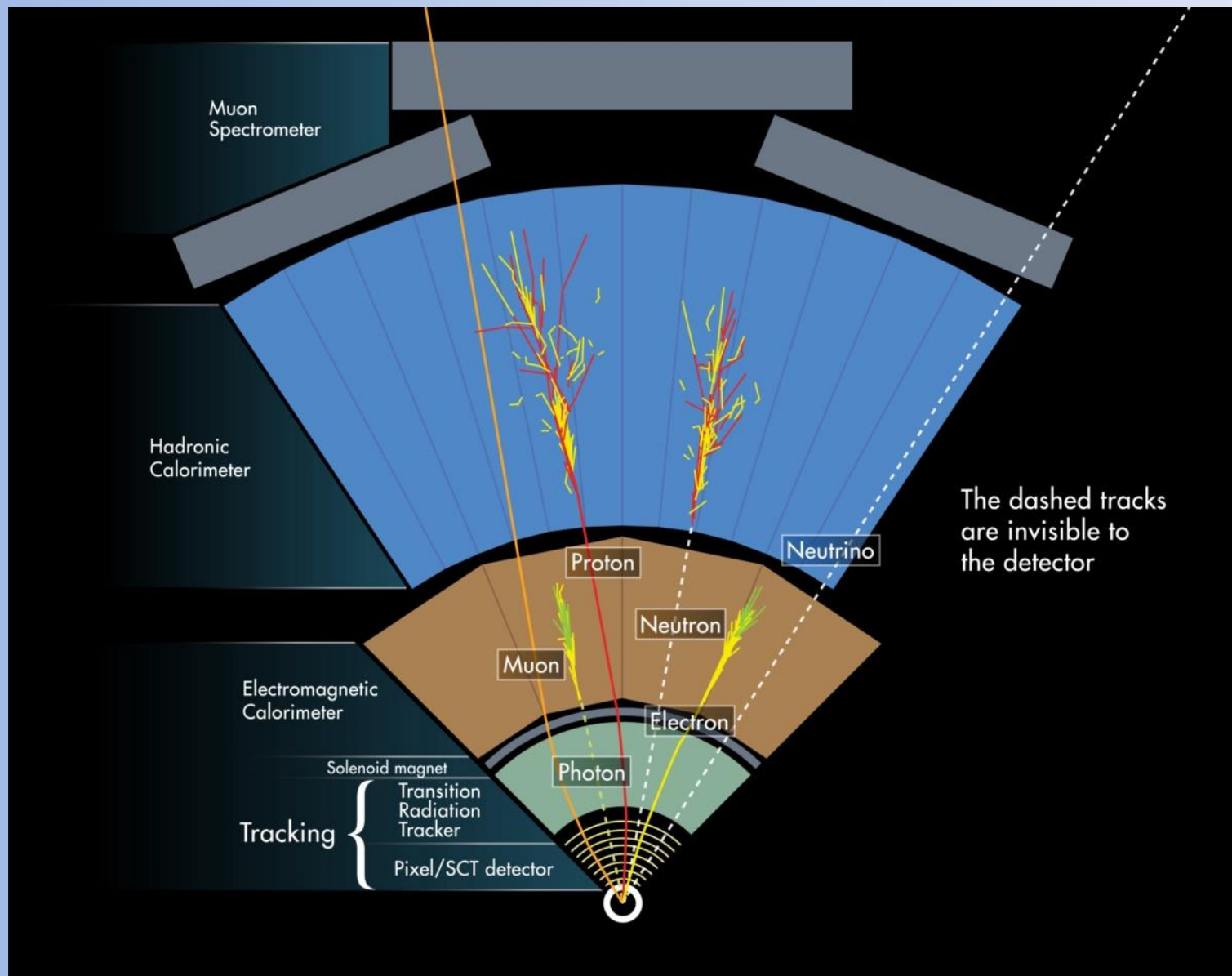
Хорошее быстродействие: ~ 10 Hz для восстановления изображения



Типы детекторов

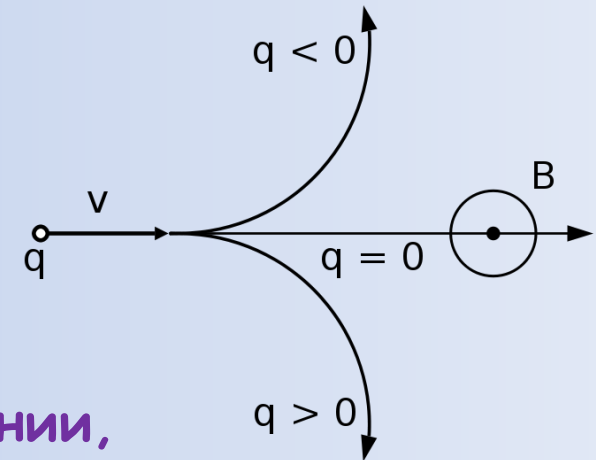
- Трековые детекторы
 - Регистрация траектории заряженных частиц
 - Часто детектор помещён в магнитное поле для определения момента импульса
- Калориметры
 - Измерение полной энергии частиц путём их полного поглощения
 - Идентификация электромагнитных и адронных ливней
- Детекторы идентификации
 - Измерение массы по времени пролёта (зная момент импульса)
 - Угол излучения черенковского света

Пример детектора на LHC



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

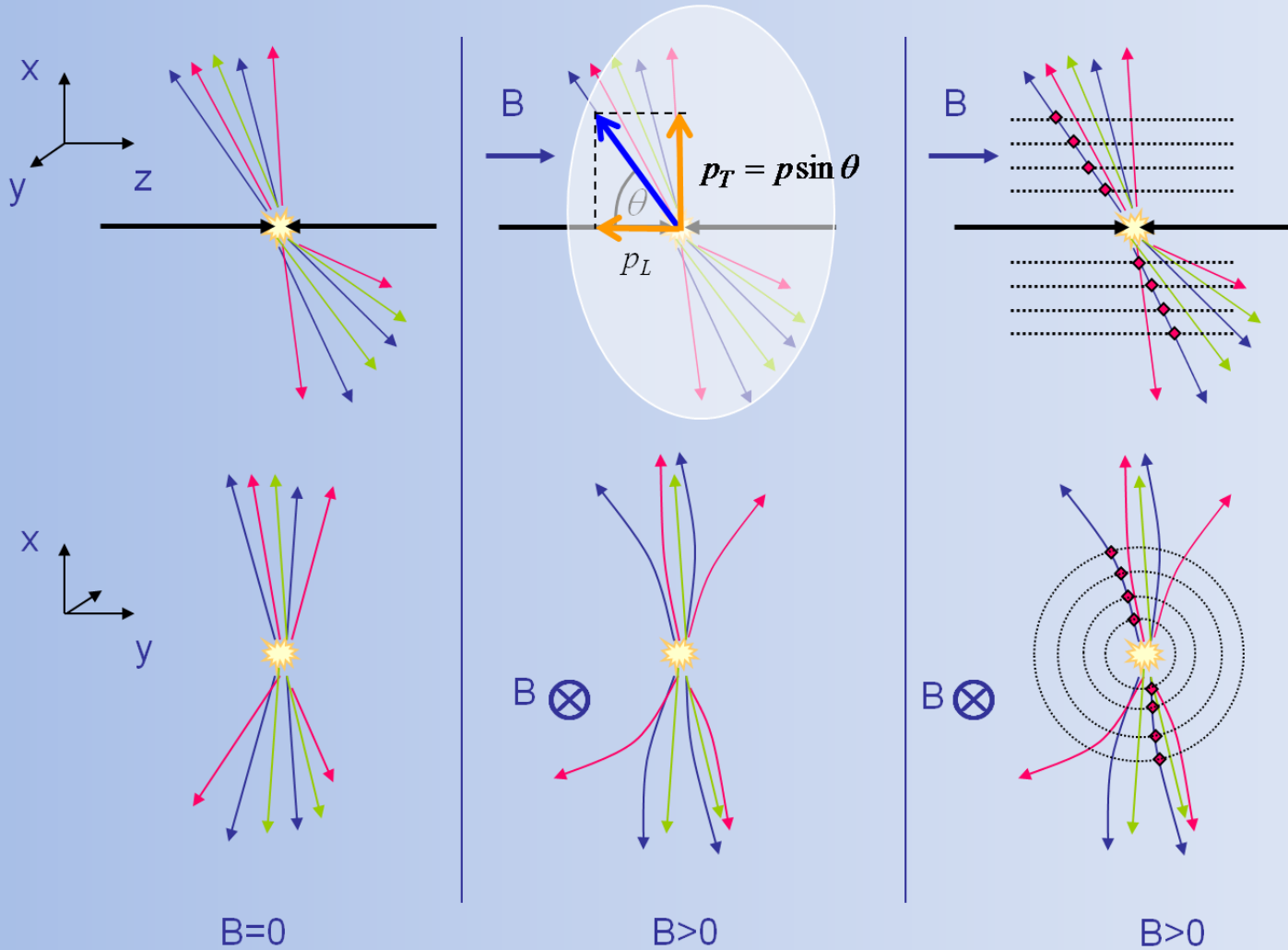
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



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



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

Взаимодействие частиц с веществом

В зависимости от типа частицы, 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

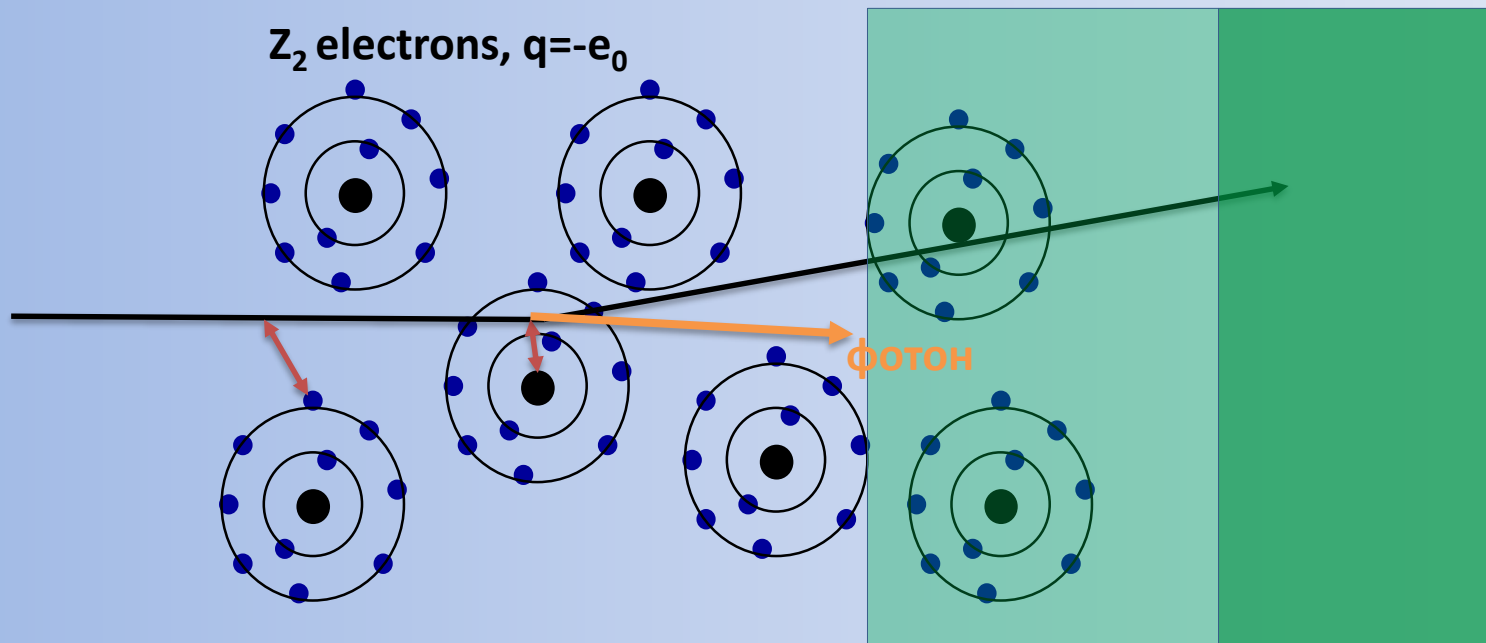
Переходное излучение

Рождение электрон-позитрон пары

ФОТОНЫ: Фото-эффект, Комптоновское рассеяние,
Рождение электрон-позитрон пары

Адроны: Электромагнитные и/или ядерные взаимодействия

МЮОНЫ: Электромагнитное взаимодействие подавлено массой мюона



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.

Упругое (Резерфордовское) рассеяние

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

Приближение

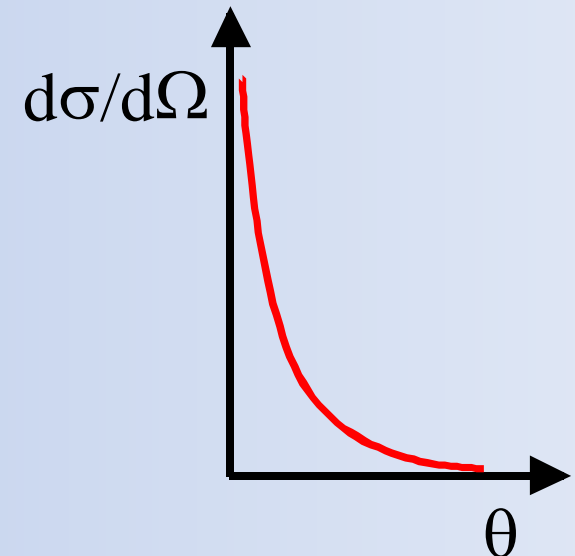
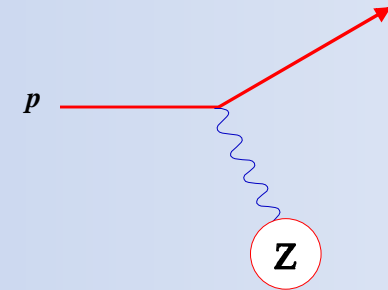
- Не релятивистское
- безспиновое

Средний угол рассеяния = 0.

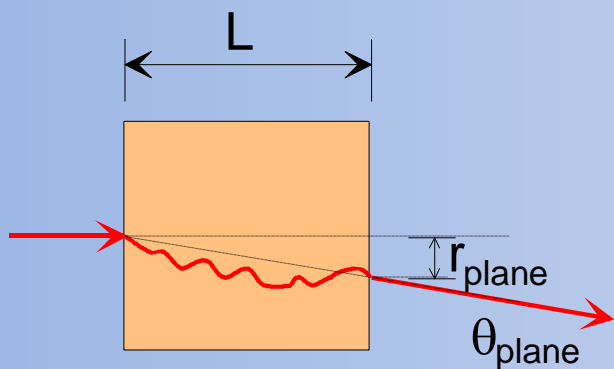
Сечение для нулевого угла бесконечное!

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

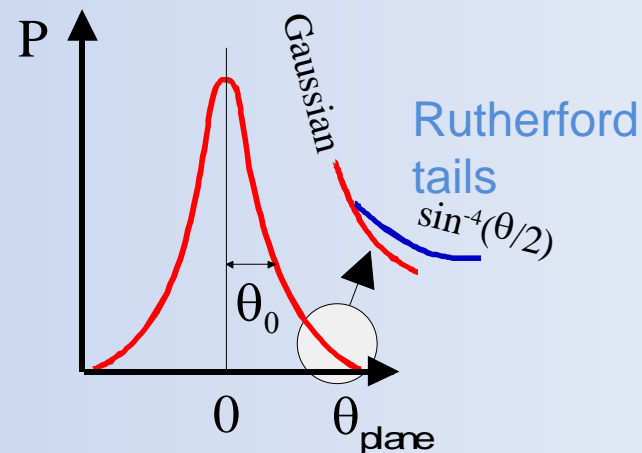
Может играть роль в детекторах с тонкими пленками и проволочками



В достаточно толстом слое вещества частица испытывает многократное Кулоновское рассеяние в поле ядра



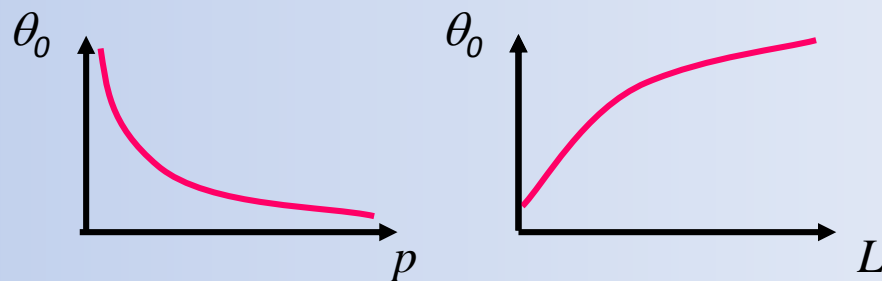
Финальное смещение и направление – результат многих независимых случайных рассеяний
 → Центральная предельная теорема
 → Гауссовское распределение



$$\theta_0 = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} \propto \frac{1}{\beta \cdot p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

X_0 - радиационная длина вещества (среды)

Разрешение детектора деградирует при увеличении его массы

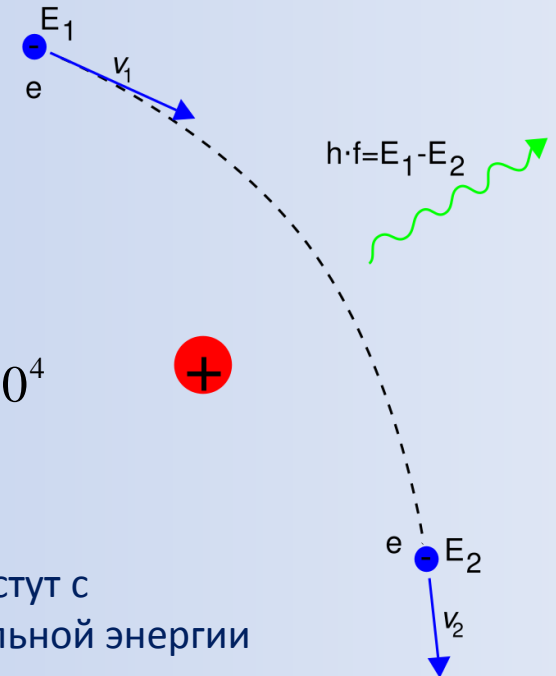


Взаимодействие заряженных частиц с веществом Тормозное излучение или bremsstrahlung

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

Эффект важен для e^\pm
и для ультрарелятивистских
мюонов с энергией >1000 GeV

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



$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \implies E = E_0 e^{-x/X_0} \quad \text{Потери энергии растут с увеличением начальной энергии}$$

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

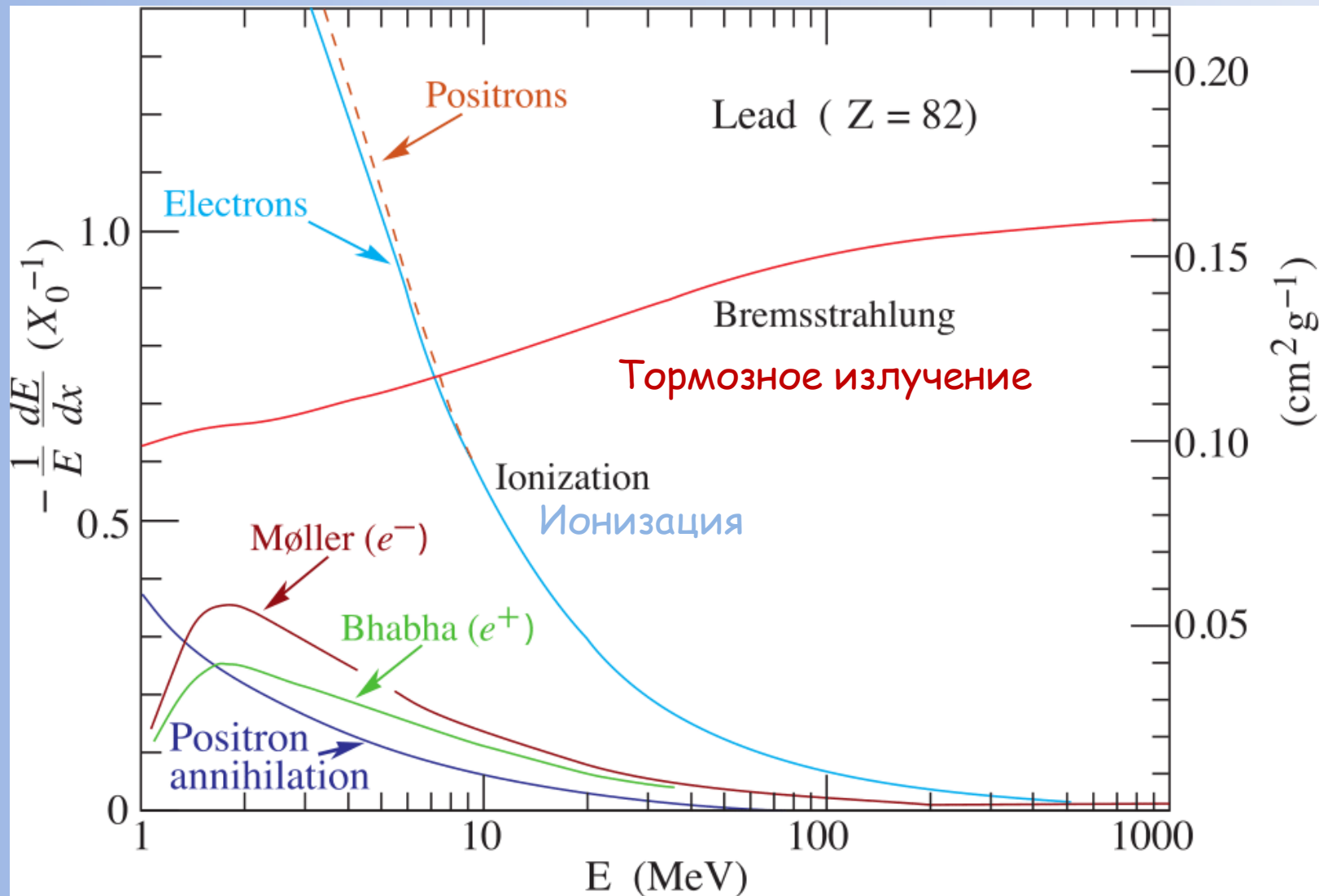
Радиационная длина (radiation length) [g/cm²]

(divide by specific density to get X_0 in cm)

$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}$$

Нашли частицу, прошедшую калориметр - это μ

Потеря энергии электрона на единицу радиационной длины



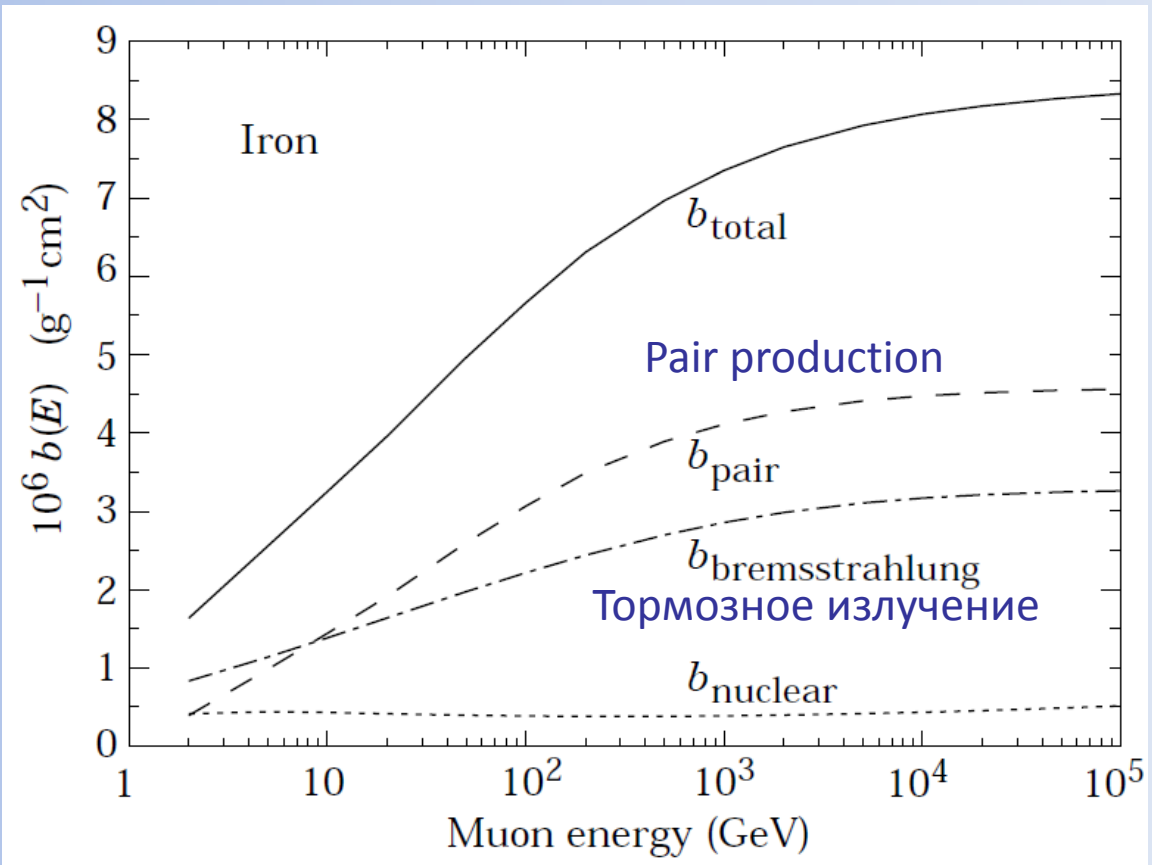
Мюоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях как e^+, e^- , но из-за массы Е-М сечения ($\sim E/m^2$) сильно подавлены.

Главных механизм потери энергия это ионизация до энергии $< 1 \text{ TeV}$

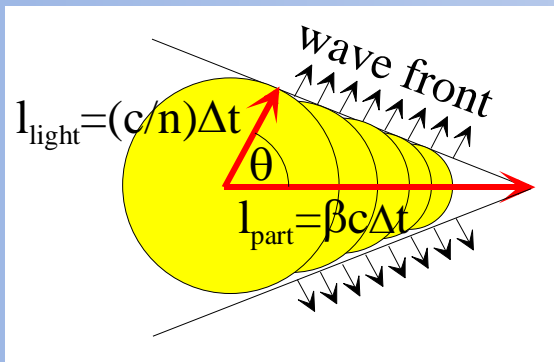
$$\frac{m_\mu^2}{m_e^2} = \frac{105^2 \text{ MeV}^2}{0.5^2 \text{ MeV}^2} = 4.4 \cdot 10^4$$

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

1 TeV мюон теряет в среднем 2% энергии в 3 метрах железа

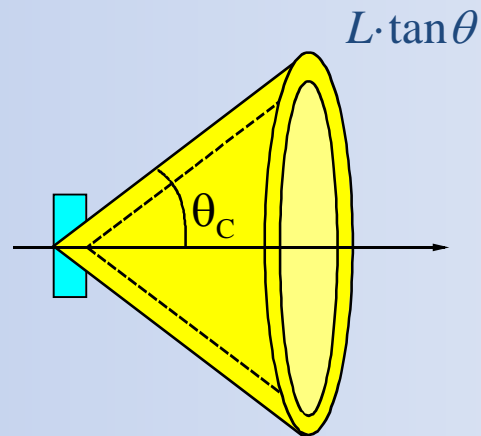


Черенковское излучение - **заряженная частица** в среде со скоростью, больше пороговой (скорость света в веществе, показатель преломления)



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

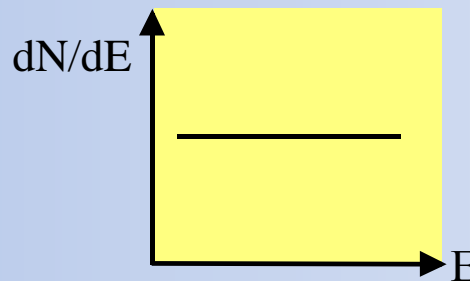
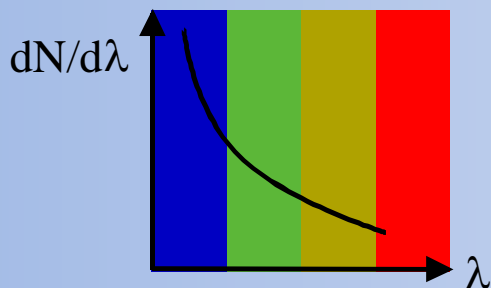
with $n = n(\lambda) \geq 1$



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

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

Число испущенных фотонов на ед. длины волны и от энергии



Переходное излучение было предсказано Гинзбургом и Франком в 1946

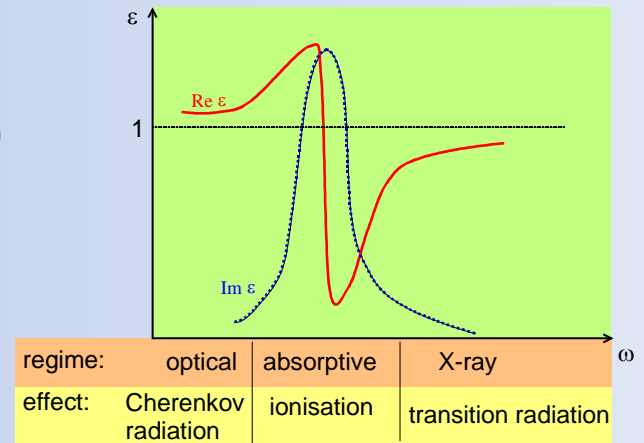
Релятивистская теория: Г. Гарибян, ЖЭТФ 63 (1958) 1079

Борис Анатольевич Долгошеин (МИФИ) – отец ATLAS TRT

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



Часто называют **Подпороговым Черенковским излучением**



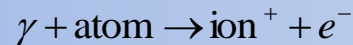
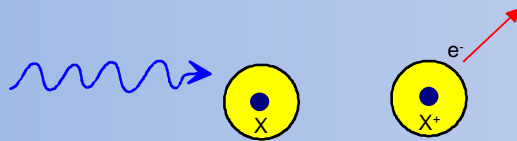
Среда поляризуется. Электронная плотность смещается от равновесия → Диполь, изменяющийся во времени → **излучается энергия.**

На одной границе:

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

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 ($\epsilon \gg 1$)

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



Взаимодействие фотонов с веществом



Фото-эффект впервые наблюдал Heinrich Hertz в 1887
JJ Thomson понял, что это рождение "corpuscles" (e) in 1897
Einstein объяснил в 1905 используя постоянную Планка

Один из краеугольных камней квантовой революции

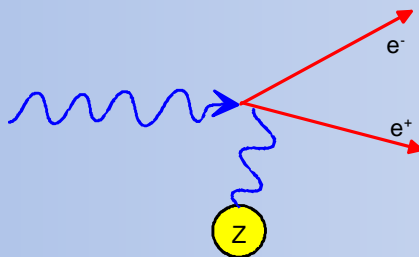
Очень широко используется и в Физике, и в быту...
Фотодиоды, фототранзисторы, фотоумножители
Сенсоры изображений (Фото/Видео камеры, ТВ...)

...

Взаимодействие фотонов с веществом

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

Рождение пары



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

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

Возможно в Кулоновском поле ядра или электрона, выше E порога:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2$$

Сечение (в релятивистском приближении)

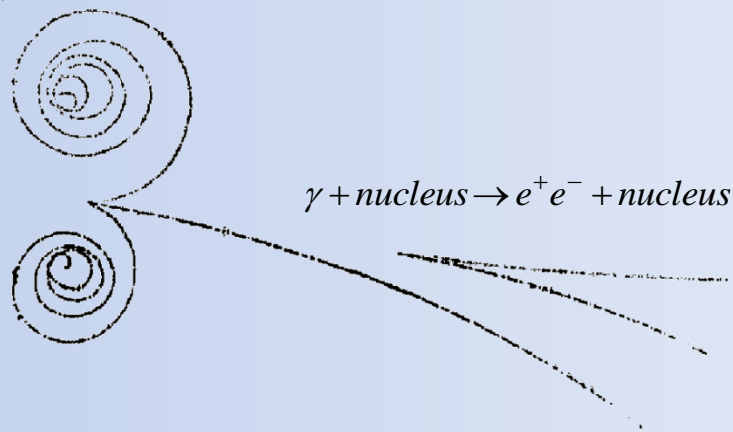
$$\sigma_{pair} \approx 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \right) \quad \text{Не зависит от энергии!} \quad \gamma + e^- \rightarrow e^+ e^- + e^-$$

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

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

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

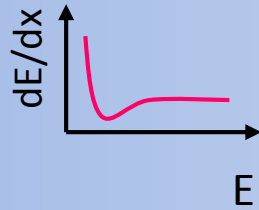
Доля переданной e^+ и e^- энергии не симметрична при высоких энергиях.



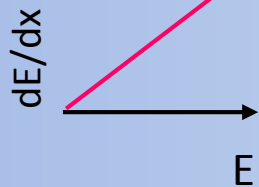
$$\gamma + nucleus \rightarrow e^+ e^- + nucleus$$

e^+ / e^-

■ Ионизация

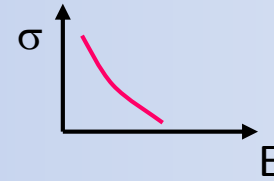


■ Тормозное излучение

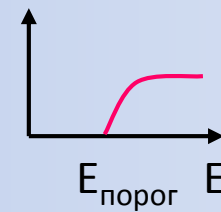


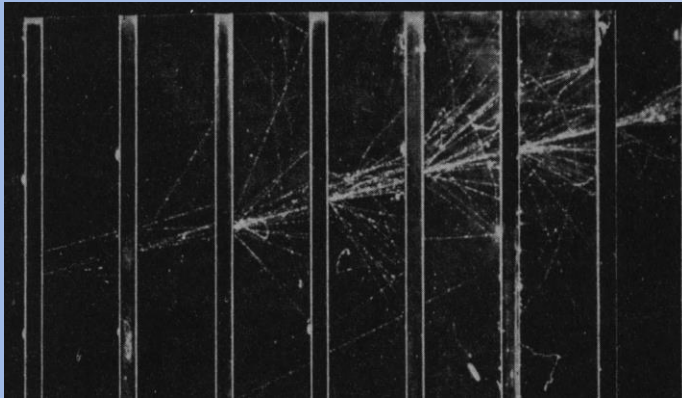
γ

■ Фото-эффект



■ Рождение пар





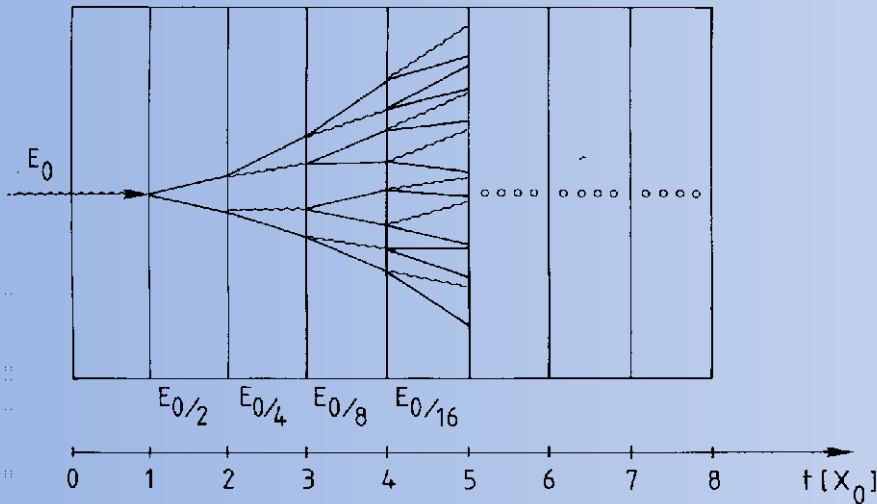
← Ливень от электрона в конденсационной камере со свинцовым поглотителем

Может инициироваться электроном или фотоном

Рассмотрим только electron:

- 1) тормозное излучение с рождением фотон
- 2) рождение e+e- пар фотоном

Упрощенная модель



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

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

Процесс продолжается $E(t) < E_c$

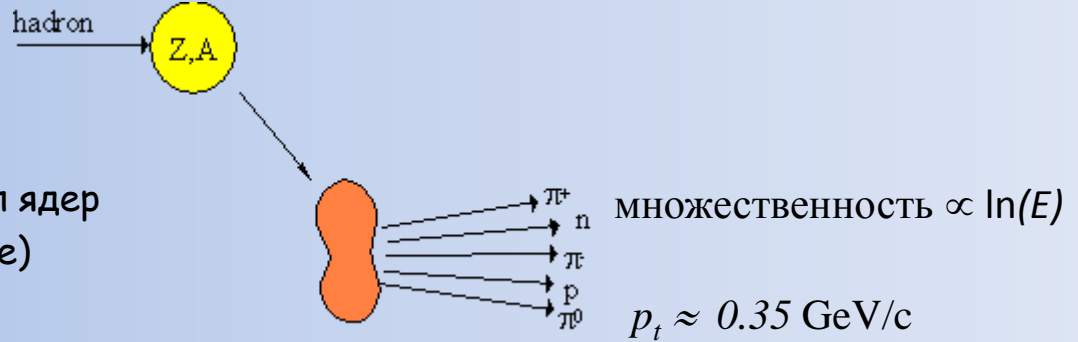
$$N^{total} = \sum_{t=0}^{t_{max}} 2^t = 2^{(t_{max}+1)} - 1 \approx 2 \cdot 2^{t_{max}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

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

После $t = t_{max}$ 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 GeV) сечение в основном зависит от атомного числа A . Слабо зависит от энергии и от типа налетающей частицы (π , p , n , K ...).

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

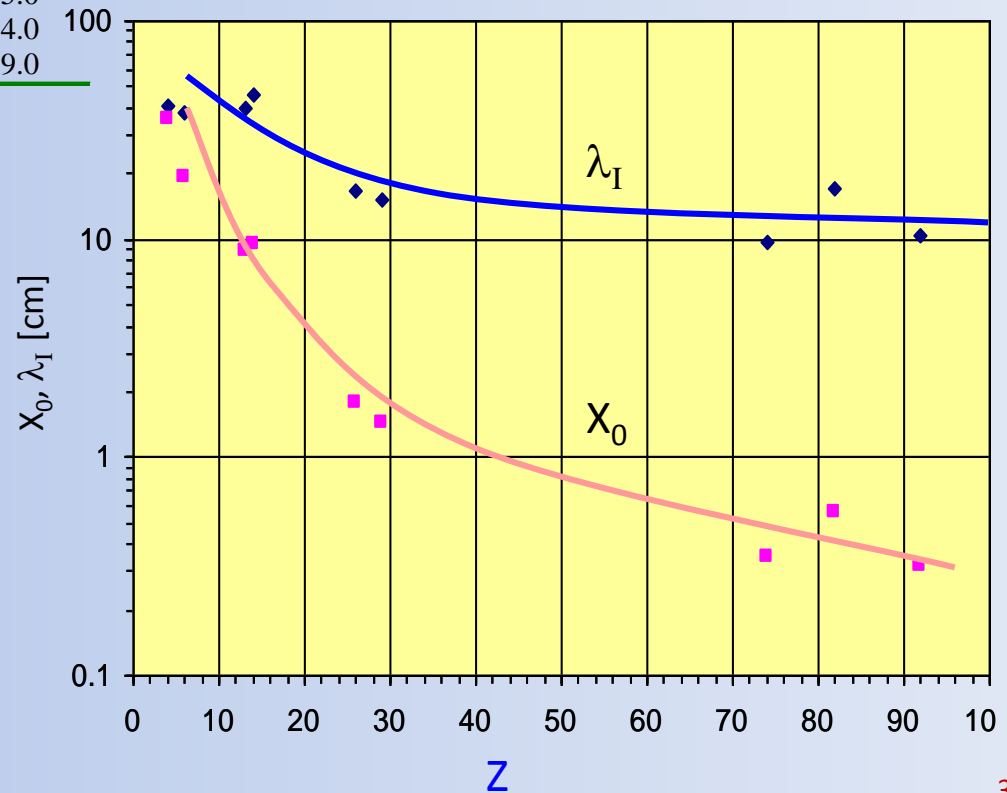
По аналогии с X_0 , вводится адронная длина поглощения:

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \propto A^{\frac{1}{3}} \quad \text{because } \sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7}$$

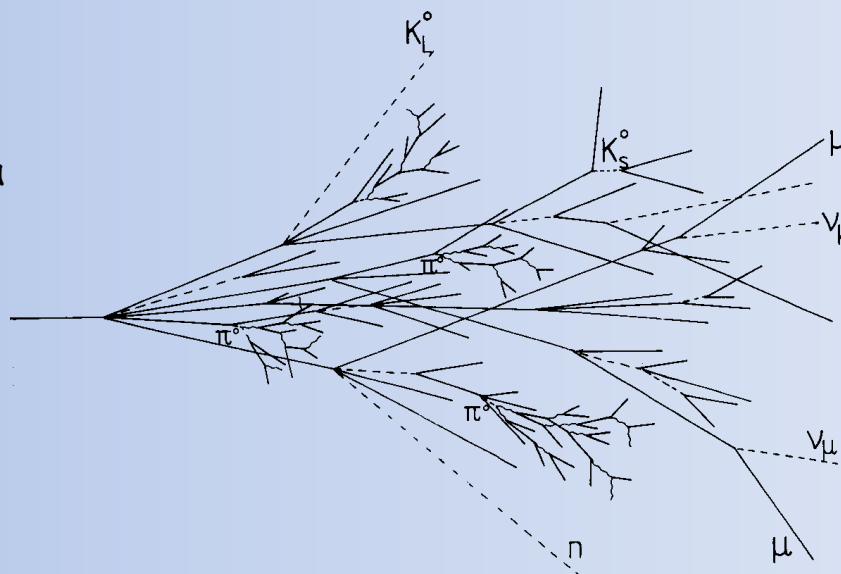
Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_I [g/cm ²]
Hydrogen (gas)	1	1.01	0.0899 (g/l)	63	50.8
Helium (gas)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94	65.1
Beryllium	4	9.01	1.848	65.19	75.2
Carbon	6	12.01	2.265	43	86.3
Nitrogen (gas)	7	14.01	1.25 (g/l)	38	87.8
Oxygen (gas)	8	16.00	1.428 (g/l)	34	91.0
Aluminium	13	26.98	2.7	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

Высокая энергия ЛНС требует большие детекторы что бы полностью остановить частицы рождённые в столкновениях

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

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

Ядерные фрагменты

→ электромагнитные каскады

от развала ядер (энергия связи),

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

нейтроны, нейтрино, мягкие γ , мюоны

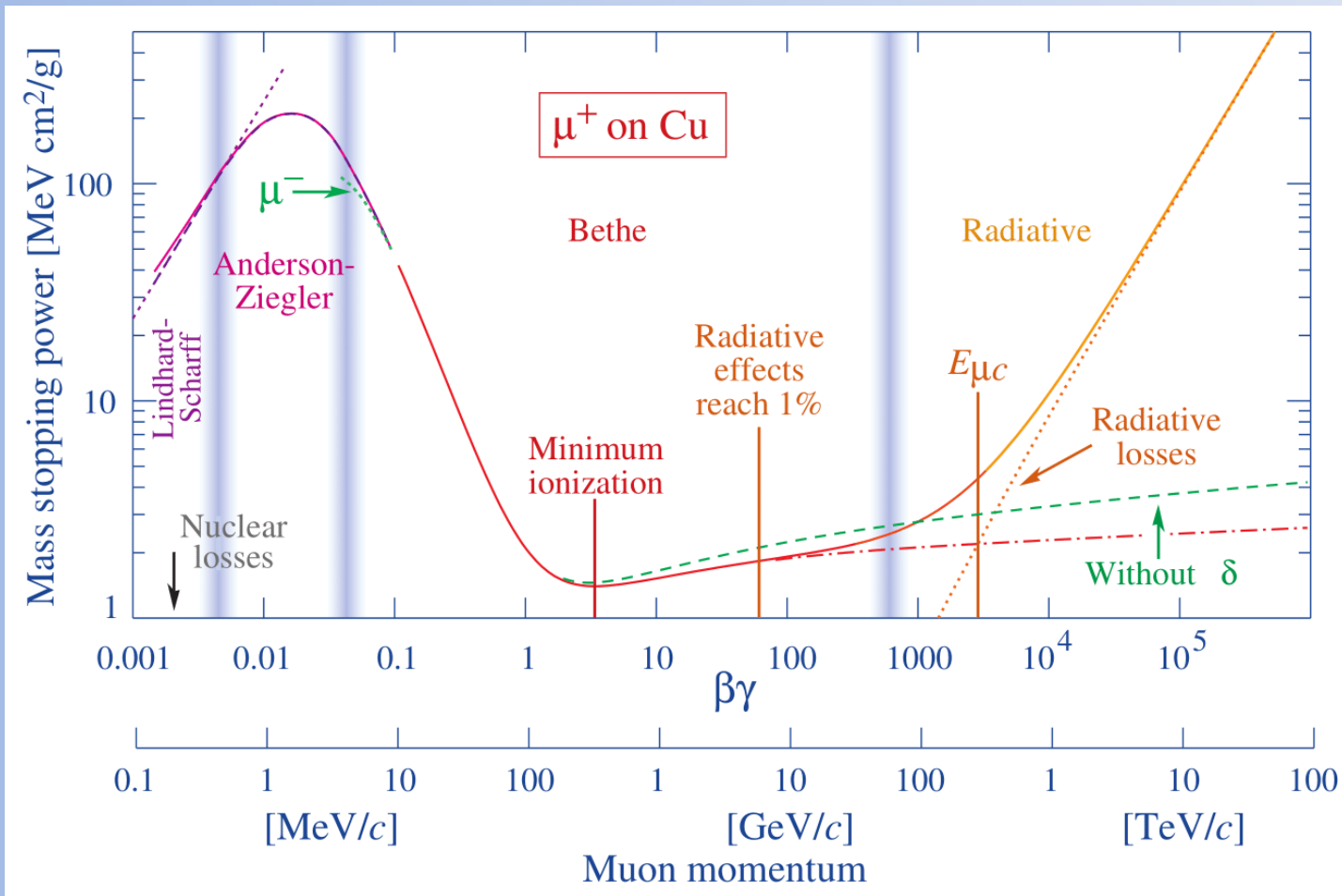
Невидимая энергия, большие флуктуации

Малая часть энергии регистрируется активными элементами

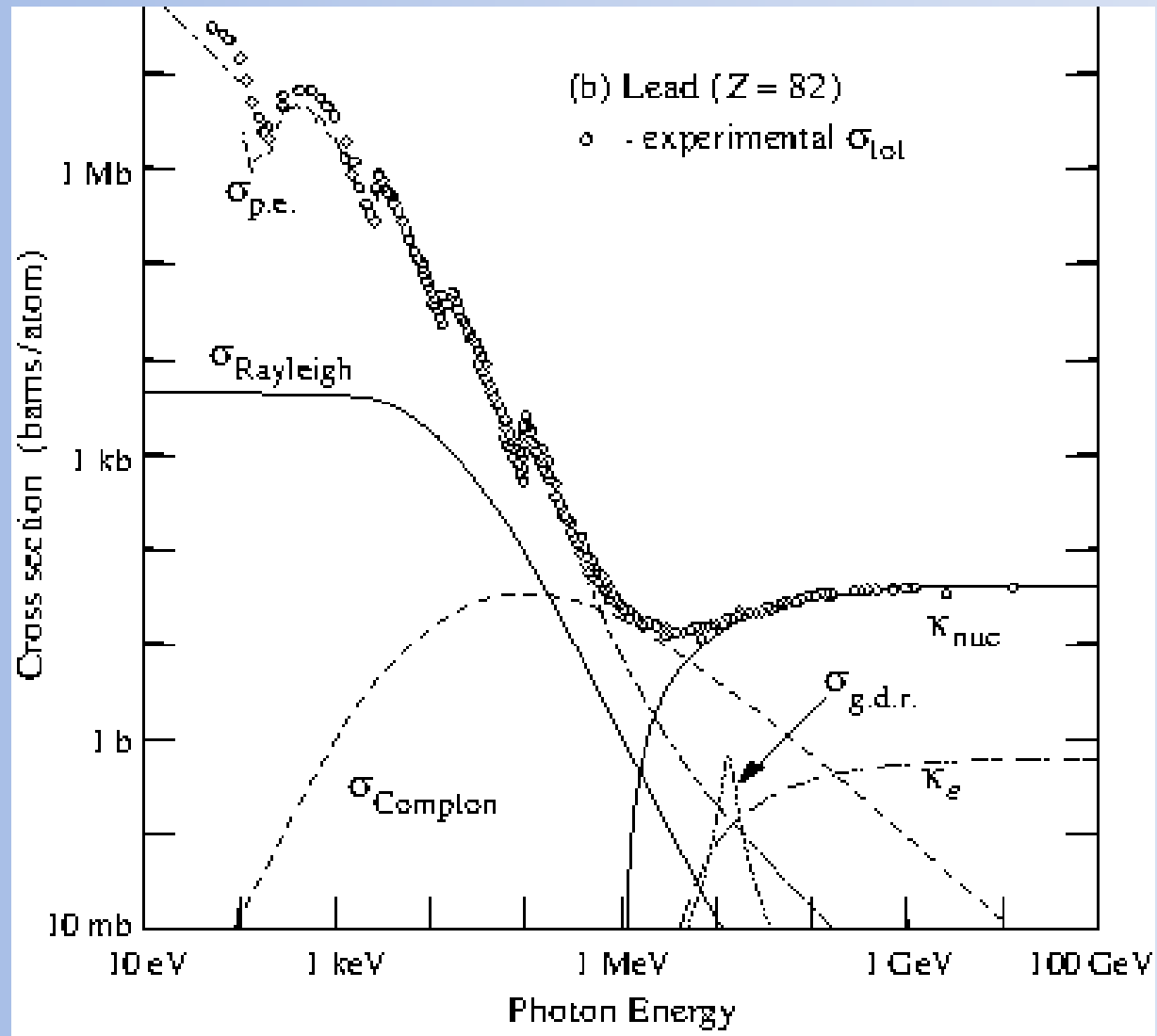
→ Плохое энергетическое разрешение адронных калориметров

Огромное спасибо за
внимание!

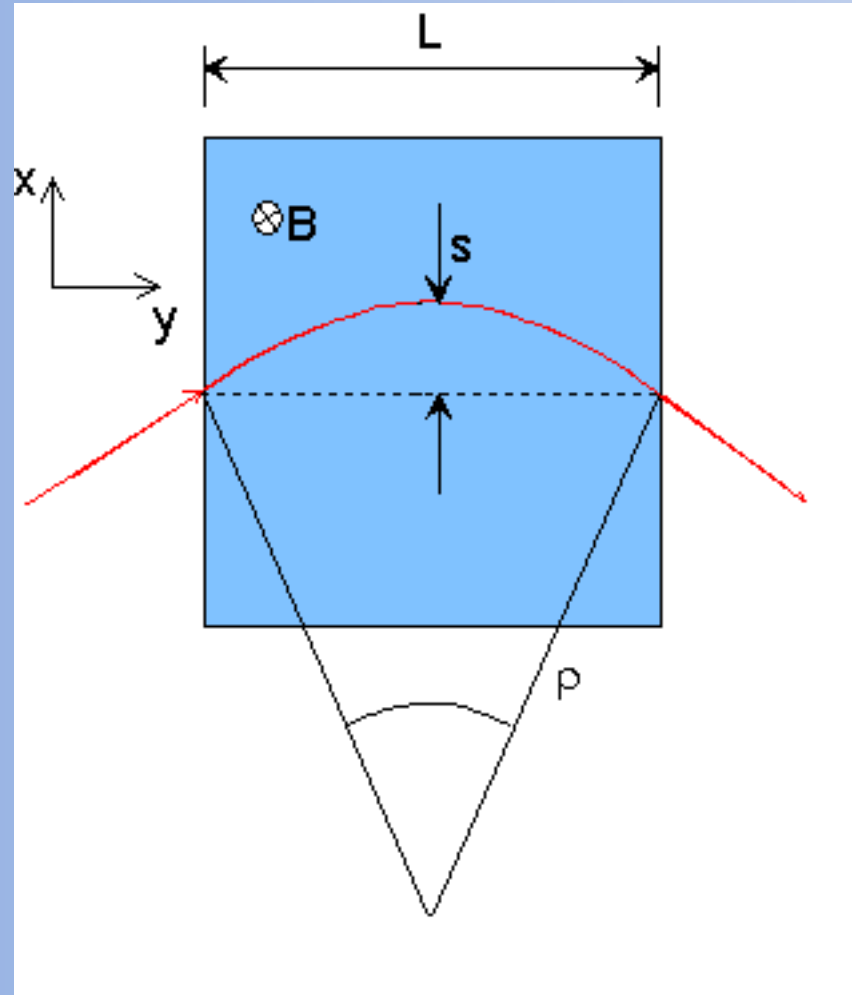
Потеря энергии мюона на ед. длины



Сечение фотонов



Заряженная частица в МАГНИТНОМ поле



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

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

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