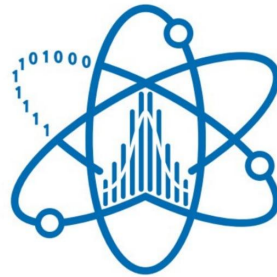


Введение в физику частиц и анализ экспериментальных данных

3 лекция

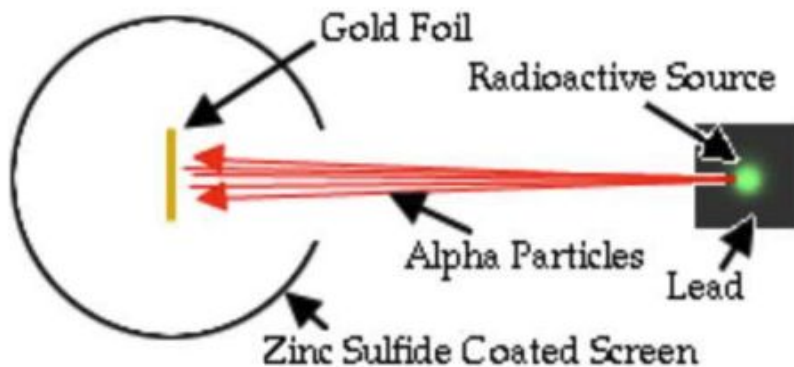
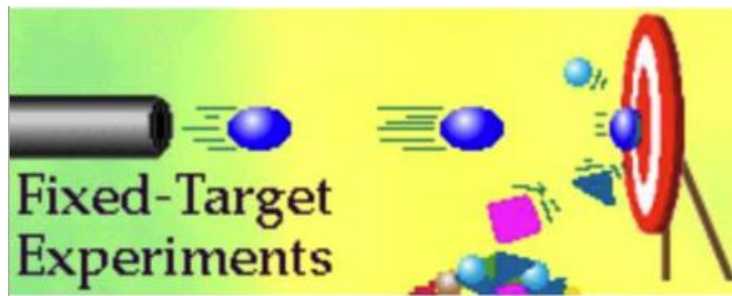


План лекции

- Основная идея ускорения частиц
- Линейные и кольцевые коллайдеры: принципы работы, преимущества и недостатки
- Роль электрических и магнитных полей в ускорении
- Обзор Большого адронного коллайдера (LHC)
- Ускорительная цепочка LHC
- Понятия светимости и pile-up

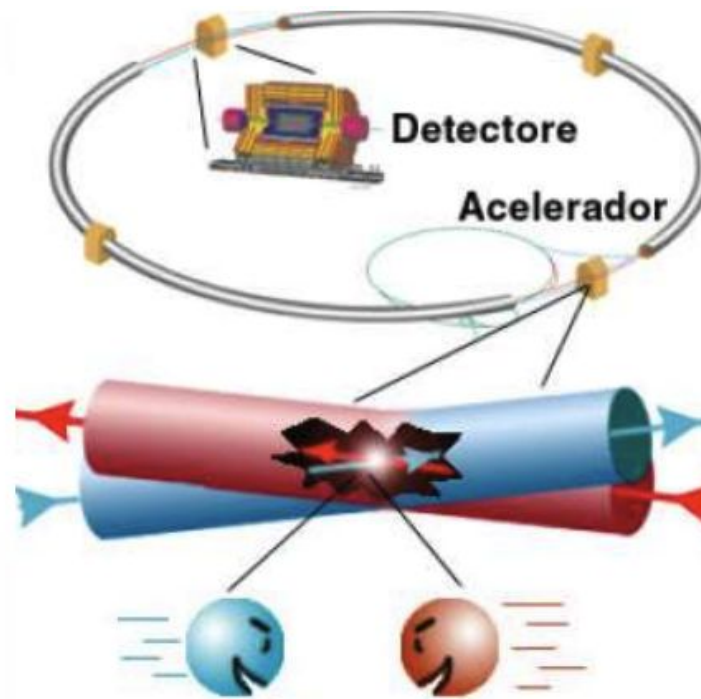
Эксперименты физики высоких энергий

- Первые эксперименты ФВЭ
Beam on fixed target!



Rutherford experiment (1909)

- Эксперименты ФВЭ с середины 70х:
Colliding beams!



Основная идея ускорения частиц

Столкновение с неподвижной мишенью (Fixed target)



$$p_1 = (E_1, \vec{p}_1), \quad p_2 = (m_2, \vec{0})$$

$$s = m_1^2 + m_2^2 + 2 E_1 m_2$$

При $E_1 \gg m_1, m_2$

$$s \approx 2E_1 m_2 \quad \Rightarrow \quad \sqrt{s} \approx \sqrt{2E_1 m_2}$$

Пример:

450 ГэВ протон ударяет частицу в покое

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2 \times 450 \times 1} \approx 30 \text{ ГэВ}$$

Эксперимент-коллайдер



$$p_1 = (E_1, \vec{p}_1), \quad p_2 = (E_2, \vec{p}_2)$$

$$s = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - |\vec{p}_1| \cdot |\vec{p}_2| \cos \theta)$$

При $E_1 \gg m_1, m_2$ $E_1 = E_2 = E$, $\theta = \pi$

$$s = 2(E^2 - E^2 \cos \theta) = 4E^2 \rightarrow \sqrt{s} = 2E$$

Пример:

450 ГэВ протон ударяет 450 ГэВ протон

$$\sqrt{s} \approx 2 \times 450 \text{ ГэВ} = 900 \text{ ГэВ}$$

$\sqrt{s}$ - это энергия в системе центра масс; она определяет, сколько энергии доступно для взаимодействия.

Например, при аннигиляции частицы и античастицы эта величина соответствует максимальной энергии (или массе) образующихся частиц.

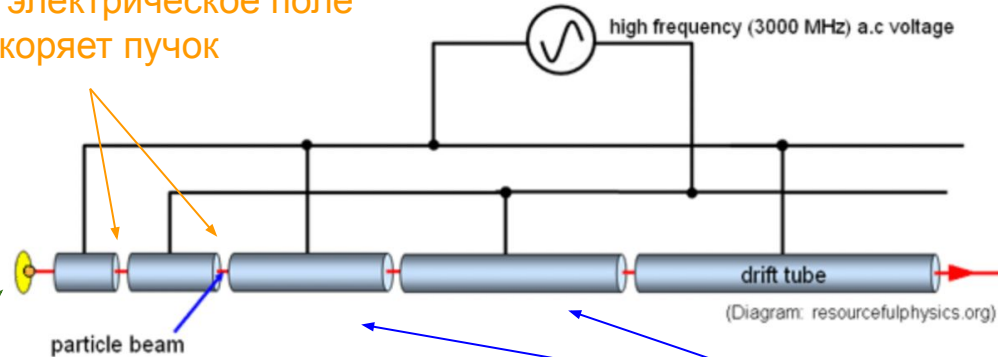
Принцип работы ускорителей: электрические поля

- Для рождения тяжёлых новых частиц необходимо достигать высоких энергий в системе центра масс $\sqrt{s}$
- Практическое решение: использование радиочастотного (RF) высоковольтного ускорения.

Формула прироста энергии: $\Delta E = q V$

В зазорах электрическое поле
ускоряет пучок

Ввод частиц



RF-генератор: генерирует высокочастотное
электромагнитное поле (обычно радиочастотный
диапазон)

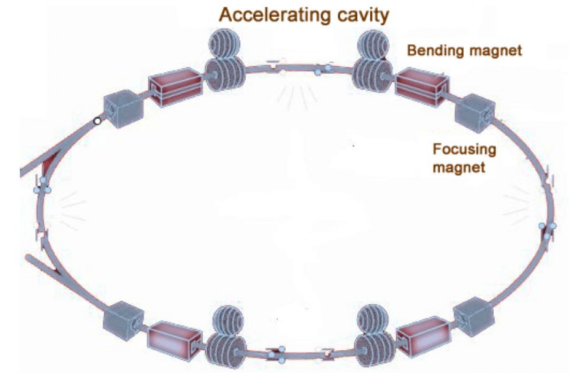
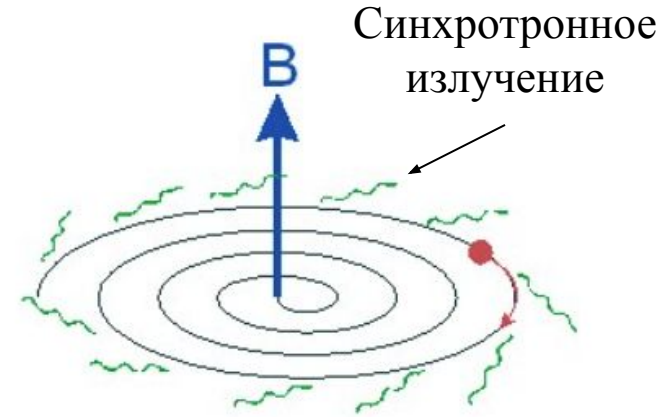
Разная длина, увеличивается со
скоростью частицы

Сила Лоренца и магнитное управление пучком

Сила Лоренца:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

- Электрическое поле E :
 - Ускоряет заряженную частицу вдоль или против направления движения (в зависимости от знака заряда).
 - Увеличивает кинетическую энергию и модуль импульса частицы.
- Магнитное поле B :
 - Действует перпендикулярно скорости частицы (v), изменяя направление движения, но не её энергию (при отсутствии иных потерь).
 - В кольцевых ускорителях (синхротронах) дипольные магниты создают необходимый изгиб траектории для циркуляции пучка.
 - Квадрупольные магниты служат для фокусировки пучка, уменьшая его поперечные размеры и сохраняя высокую плотность частиц.



Синхротронное излучение

При движении заряженных частиц по искривленной траектории (например, в кольцевом ускорителе) они излучают фотоны.

Это излучение называется синхротронным, оно приводит к потере энергии ΔE на каждом обороте.

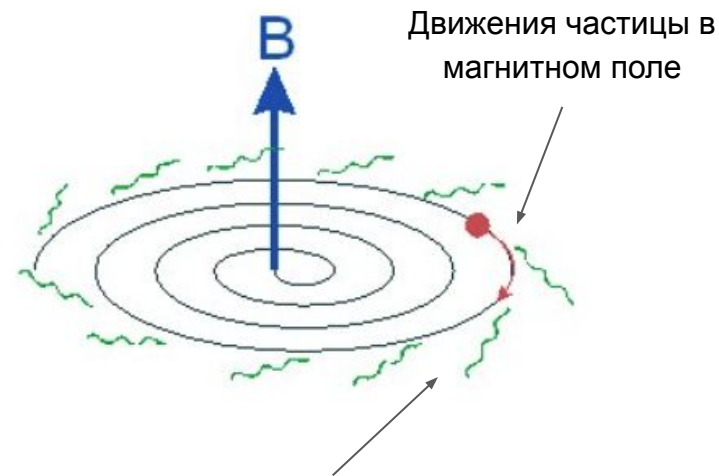
Формула потерь:

$$\Delta E \propto \frac{1}{R} \left(\frac{E}{m} \right)^4$$

Следствия:

- Требуется: увеличивать радиус коллайдера, чтобы снизить потери.
- Необходимы системы охлаждения и компенсации энергии (RF-камеры) для восполнения потерь.
- Для тяжёлых частиц (протоны, ионы) эффект слабее, однако при очень высоких энергиях тоже становится заметным.
- Синхротронное излучение не влияет напрямую на точку столкновения, но ограничивает проектные параметры коллайдера (радиус, энергию).

Синхротронное излучение



Излучения фотонов при изгибе траектории

Детектирование частиц: трееры

Трееры регистрируют потери на ионизацию — таким образом **регистрируются** только **заряженные частицы**

Потери на ионизацию (формула Бете-Блоха):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 q^2 \alpha^2 (\hbar c)^2}{m_e \beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2 m_e \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 \right]$$

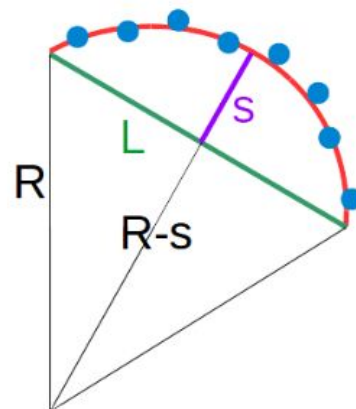
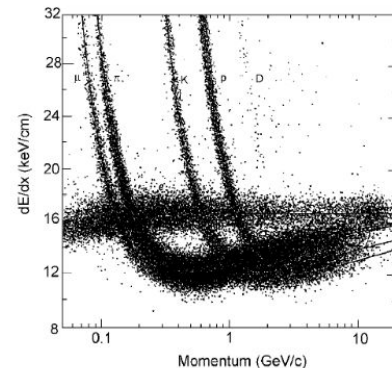
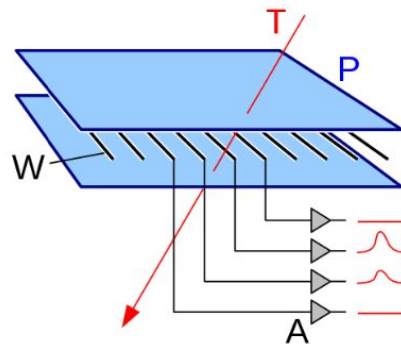
- Зависит от заряда частицы q и её скорости (β , γ), но не от массы.
- Z/A — атомный номер и массовое число материала детектора,
- I — средний потенциал ионизации.

Трекер в магнитном поле (В):

- Позволяет измерять радиус кривизны траектории $\Rightarrow$ определить импульс p .
- Измеряем сагитту s — прогиб дуги трека, связанный с радиусом R :

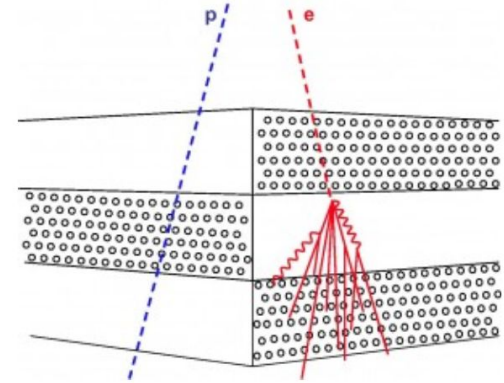
$$R \approx \frac{L^2}{8s}, \quad p = 0.3 B R,$$

где L — длина базиса измерения (расстояние между точками регистрации), B — магнитное поле (в теслах), p — импульс в ГэВ/с.

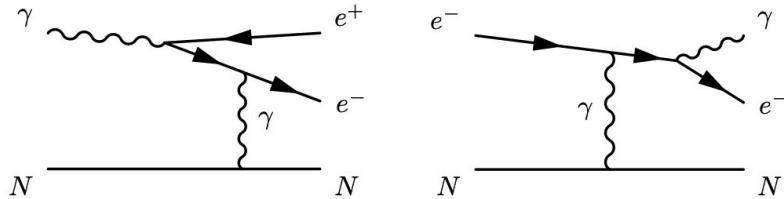


Детектирование частиц: калориметры

- Калориметры **регистрируют электромагнитные (ЕМ) и адронные «ливни» (showers)**, возникающие при взаимодействии частицы с многослойной структурой из поглощающего материала и сцинтилляторов.
- Частица, врезаясь в высокоплотный материал, порождает **каскад вторичных частиц**, энергия которых измеряется по световому сигналу или ионизации



Электромагнитный калориметр ($e^\pm, \gamma$):



Толщина выбирается исходя из радиационной длины (X_0), чтобы полностью «остановить» электромагнитный ливень.

Адронный калориметр (p, n, π , K, ...):

- Ядерная длина взаимодействия (λ_I) больше радиационной длины $\Rightarrow$ требуется более толстый (или более плотный) материал.
- Регистрирует адронные ливни, состоящие из пионов, протонов, нейтронов и т.д.

Линейные коллайдеры

- **Ускорение** происходит в **прямолинейном тракте** (например, LINAC), где частицы проходят через последовательность ускоряющих секций только один раз.
- Каждая секция (**RF-резонатор**) добавляет частице некоторую энергию, суммарно приводя к высокой конечной энергии.

Преимущества:

- Меньше синхротронных потерь
- Простота конструкции
- Оптимально для электрон-позитронных коллайдеров

Недостатки:

- Большая длина(например, проект линейного коллайдера ILC предполагает длину порядка десятков километров).
- Однократное прохождение пучка
- Сложность увеличения светимости

Перспективы и примеры:

Международный линейный коллайдер (ILC) и Compact Linear Collider (CLIC) — проекты будущих электрон-позитронных линейных коллайдеров для прецизионных измерений в области физики за рамками Стандартной модели.

Кольцевые коллайдеры

- Частицы многократно циркулируют в замкнутом кольце (синхротрон)
- В каждом обороте частицы получают дополнительную порцию энергии, постепенно достигая требуемой величины импульса и энергии.

Примеры:

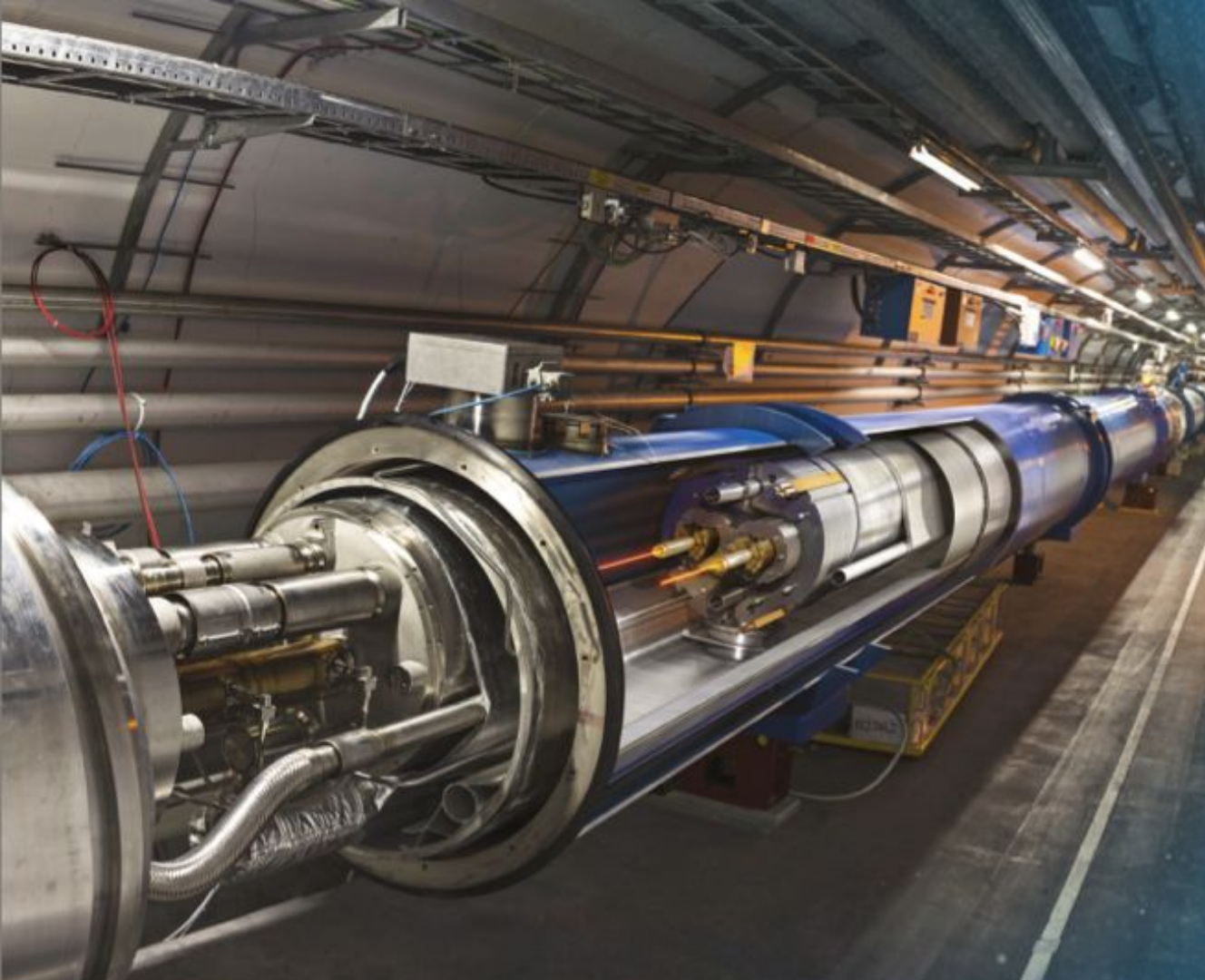
- LEP(Large Electron-Positron Collider) — бывший кольцевой коллайдер на электронах и позитронах.
- Tevatron (Fermilab) — протон-антипротонный коллайдер.
- LHC(Large Hadron Collider) — самый мощный коллайдер для протонов (и тяжёлых ионов).

Преимущества:

- Повторное ускорение
- Компактность
- Высокая светимость

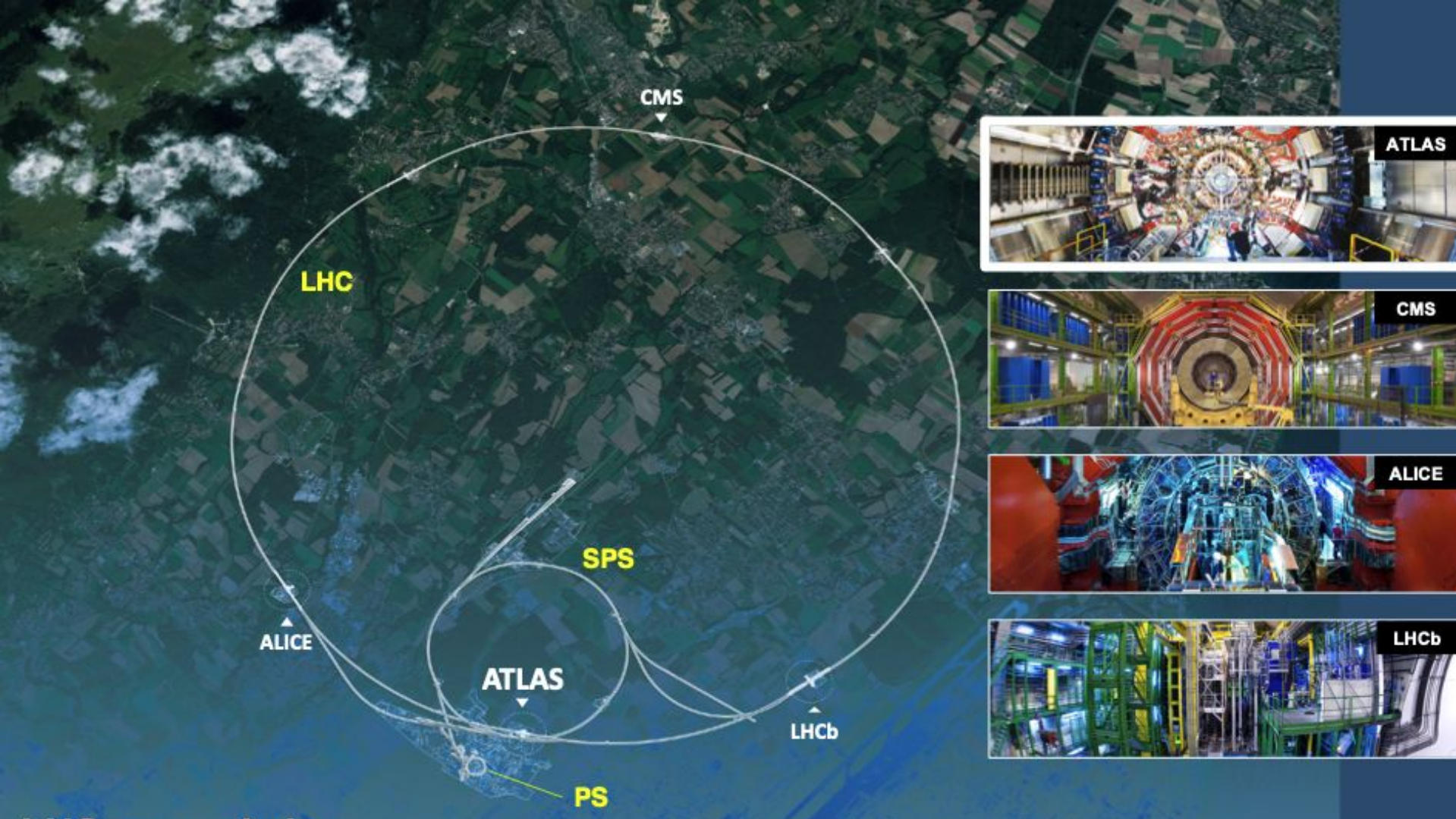
Недостатки:

- Синхротронное излучение
- Особенно критично для лёгких частиц (электронов)
- Требования к вакууму и магнитному полю:
- Для минимизации столкновений с молекулами газа необходим сверхвысокий вакуум.
- Стабильность магнитного поля и точность фокусировки определяют уровень потерь пучка и качество столкновений.
- Необходимы мощные и точные магнитные системы (диполи, квадруполь, корректоры).
- Системы охлаждения (криостаты) для сверхпроводящих магнитов, как в LHC, существенно усложняют инфраструктуру.



Large Hadron Collider (LHC)

- Кольцевой ускоритель и коллайдер с периметром 27 км, расположенный под землёй
- Сверхпроводящие магниты (при $1,9\text{ K} = -271,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) направляют частицы по кольцу
- Протоны и ионы ускоряются до многотэвных энергий и сталкиваются друг с другом



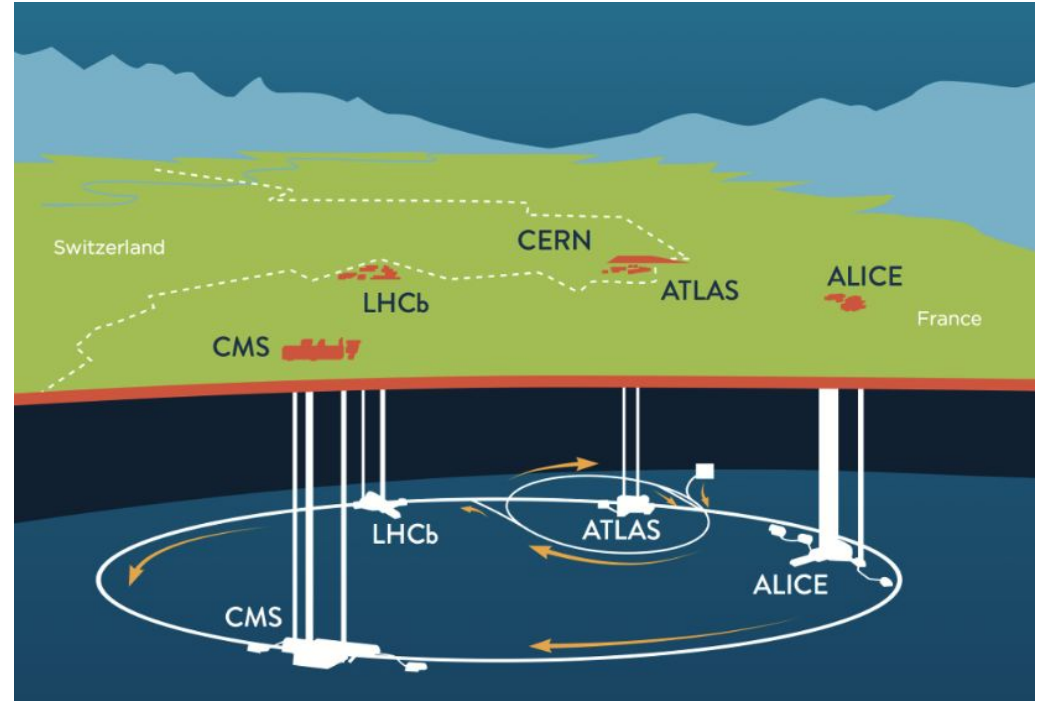
Введение в Большой адронный коллайдер (LHC)

Данные, получаемые в экспериментах, помогают проверить предсказания Стандартной модели и искать признаки новой физики (BSM).

Дальнейшие программы (High-Luminosity LHC) направлены на повышение светимости и расширение возможностей исследования редких процессов.

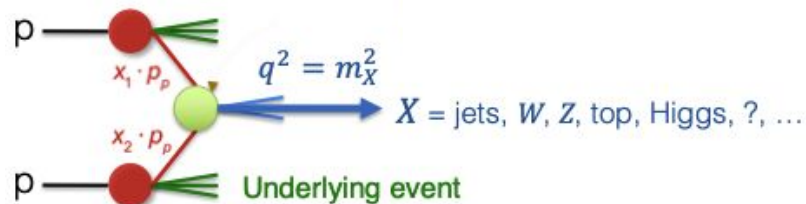
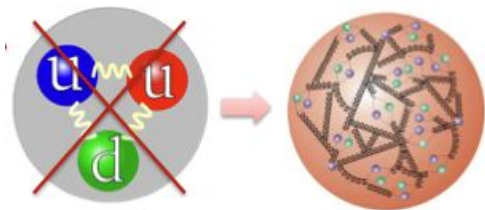
Энергия пучка: до 6.5 ТэВ на пучок (при суммарной энергии столкновений в центре масс 13 ТэВ и выше).

Сверхпроводящие магниты: используются для удержания протонов на круговой орбите (около 1200 дипольных магнитов, охлаждённых с помощью жидкого гелия).

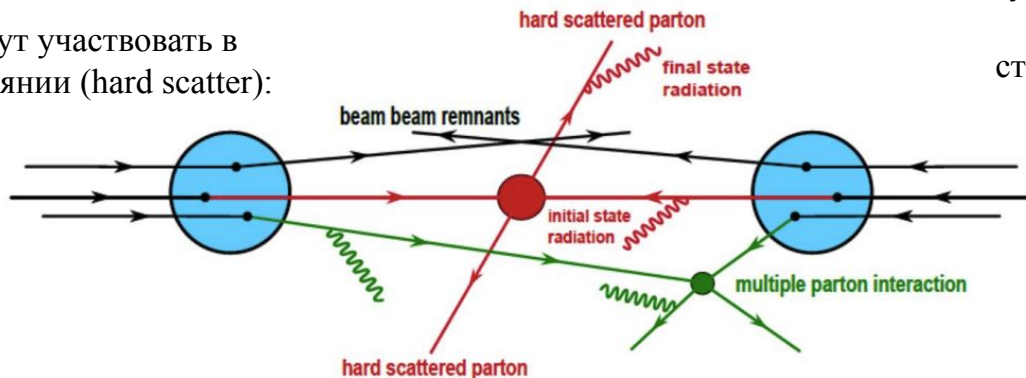


Протон-протонное столкновение

- Столкновения протон–протон описываются свёрткой функций плотности партонов (Parton Density Functions, PDF) с матричным элементом рассеяния «партон–партон».
- Адронные столкновения гораздо более сложны, чем столкновения лептонов.



Два партона могут участвовать в «жёстком» рассеянии (hard scatter):



Излучение до столкновения (initial state radiation) и излучение после столкновения (final state radiation)

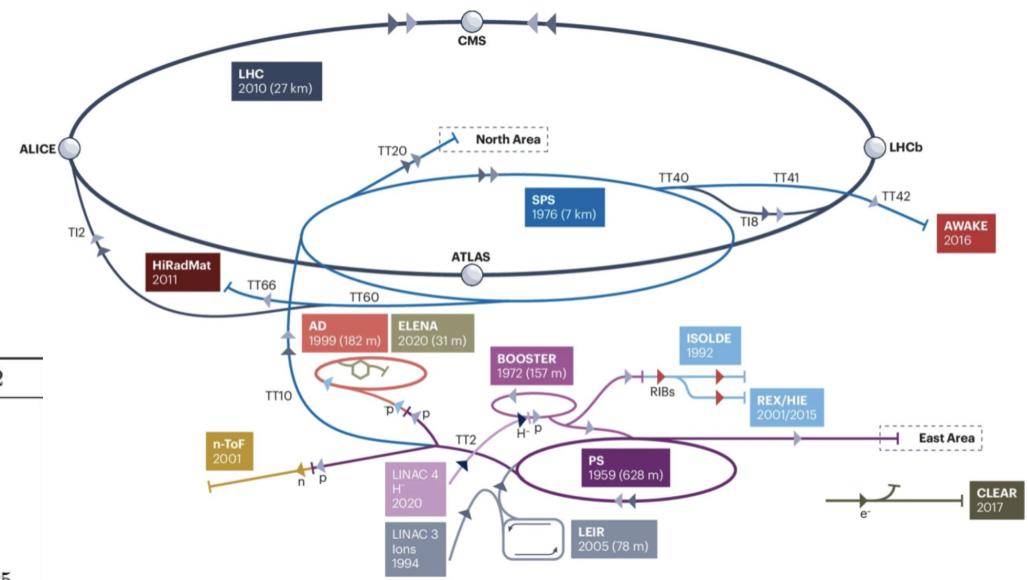
Множественные партоны (MPI) могут приводить к нескольким «жёстким» взаимодействиям в рамках одного события.

Введение в Большой адронный коллайдер (LHC)

Ускорительная цепочка: пучки протонов проходят предварительное ускорение (LINAC, Booster, PS, SPS) и затем вводятся в LHC для достижения максимальной энергии.

Высокая светимость: за счёт колоссального числа протонов в пучке и их сжатия по сечению удаётся достичь большого числа столкновений в единицу времени.

Parameter	Design	Run 1	Run 2
Beam energy	7	3.5 - 4	6.5
Centre-of-mass energy ($\sqrt{s}$) [TeV]	14	7 - 8	13
Bunch spacing [ns]	25	50	25
Bunch Intensity [10^{11} ppb]	1.15	1.6	1.2
Number of bunches (n_b)	2800	1400	2500
Transverse emittance (ϵ) [μm]	3.5	2.2	2.2
Amplitude function at the interaction point (β^*) [cm]	55	80	30→25
Crossing angle [μrad]	285	-	300→260
Peak Luminosity [10^{34} cm ² s ⁻¹]	1.0	0.8	2.0
Peak pileup	25	45	60
Nominal magnetic field (B) [T]	8.73	4.16 - 7.76	7.73

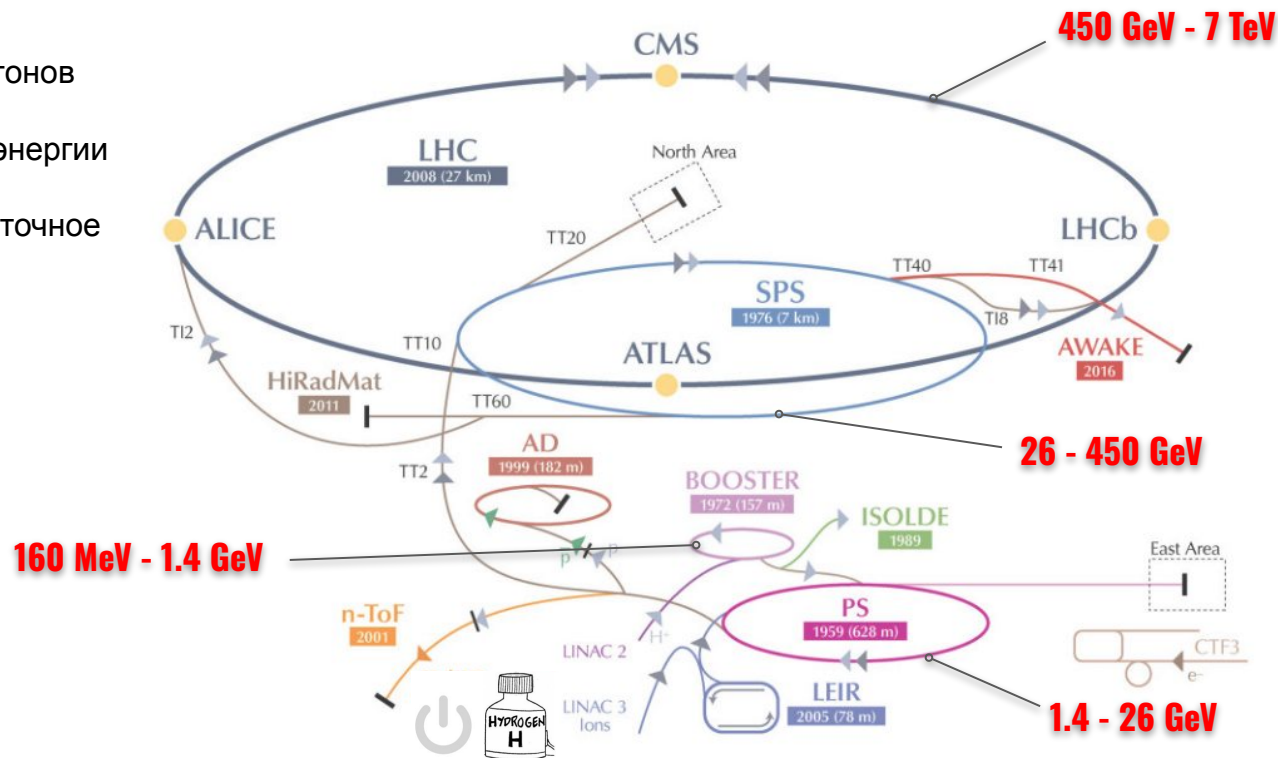


Инфраструктура и технологии уникальные требования к вакууму, радиационной защите и криогенным системам; постоянный мониторинг и управление сотнями тысяч параметров.

16

Ускорительная цепочка LHC

- **LINAC4**: начальное ускорение протонов
- **Booster**: дальнейшее повышение энергии
- **PS (Proton Synchrotron)**: промежуточное ускорение
- **SPS (Super Proton Synchrotron)**: подготовка пучка к финальному этапу
- **LHC**: окончательное ускорение и организация столкновений



Ключевые понятия ЛНС: Светимость

Мгновенная светимость — число столкновений на единицу площади в единицу времени, измеряемое в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Интегральная светимость $\mathcal{L}_{\text{int}}$ — суммарное количество столкновений за период эксперимента, определяемое как

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \int \mathcal{L} dt$$

Формула мгновенной светимости:

$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 n_b f_{\text{rev}} \gamma}{4\pi \sigma_x \sigma_y} F$$

N_b — число частиц в bunch (примерно 1.15×10^{11} протонов),

n_b — число банчей в пучке,

f_{rev} — частота оборотов пучка,

γ — релятивистский фактор Лоренца,

σ_x и σ_y — поперечные размеры пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях,

F — геометрический фактор, учитывающий угол пересечения пучков.

Значение светимости:

Высокая мгновенная светимость увеличивает вероятность наблюдения редких процессов.

Интегральная светимость определяет статистическую точность результатов эксперимента через соотношение:

$$N_{\text{exp}} = \sigma \mathcal{L}_{\text{int}}$$

где σ — сечение интересующего процесса.

Ключевые понятия ЛНС: Светимость

Рассмотрим стандартную формулу мгновенной светимости для коллайдера:

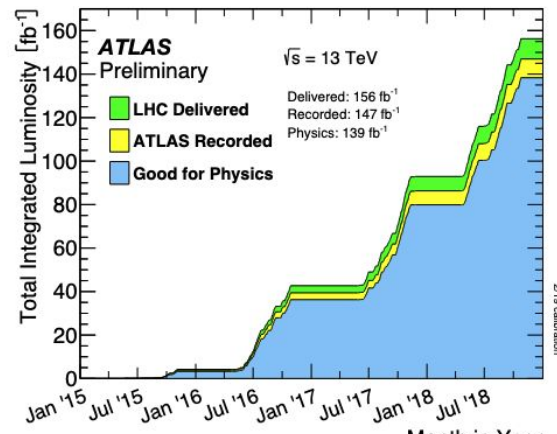
$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi \sigma_x \sigma_y} F,$$

где:

- $N_b = 1.15 \times 10^{11}$ — число протонов в одном bunch,
- $n_b = 2808$ — число bunch'ей в пучке,
- $f_{rev} = 11245 \text{ Hz}$ — частота оборотов пучка (примерно 11,245 кГц),
- $\sigma_x = \sigma_y = 16 \mu\text{m} = 16 \times 10^{-6} \text{ m}$ — поперечные размеры пучка,
- $F = 0.8$ — геометрический фактор, учитывающий угол пересечения пучков.

Подстановка значений:

$$\mathcal{L} = \frac{(1.15 \times 10^{11})^2 \times 2808 \times 11245}{4\pi \times (16 \times 10^{-6})^2} \times 0.8. \quad \longrightarrow \quad \mathcal{L} \approx 1.30 \times 10^{34} \times 0.8 \approx 1.04 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$



Ключевые понятия ЛНС: pile-up

Одновременное протекание нескольких событий в одном временном окне (один bunch crossing)

Сложности с идентификацией и реконструкцией событий, особенно при высокой интенсивности пучка

Виды Pile-up:

- In-time pile-up: события, происходящие в один такт (одновременно с основным столкновением).
- Out-of-time pile-up: события, "пересекающиеся" с соседними тактами, когда сигнал от предыдущего или последующего столкновения влияет на измерения.
- Среднее число взаимодействий на один bunch crossing $\langle \mu \rangle$ рассчитывается по формуле:

$$\langle \mu \rangle = \frac{L_{bunch} \cdot \sigma_{inel}}{f_{rev}},$$

где:

- L_{bunch} — мгновенная светимость на один bunch,
- σ_{inel} — сечение неупругих pp -взаимодействий,
- f_{rev} — частота оборотов пучка.

