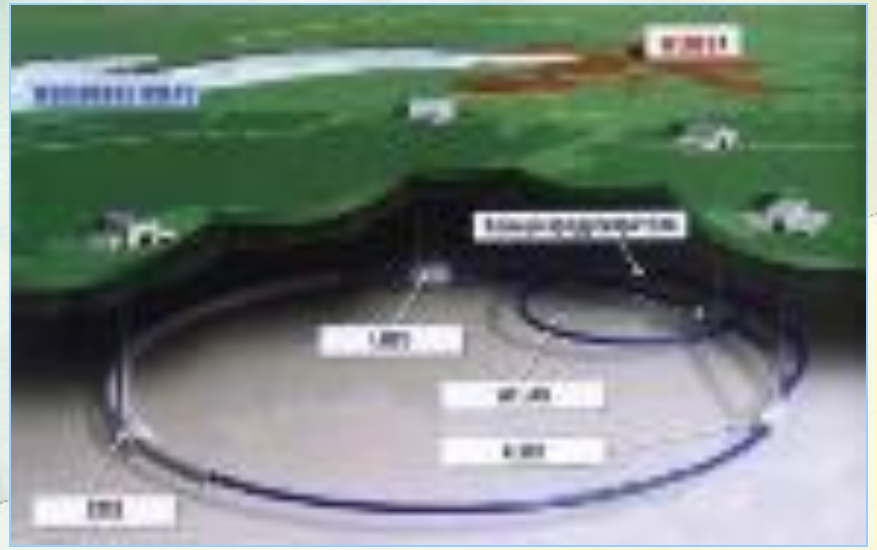


Большой адронный коллайдер

БАК

Большой адронный коллайдер

(англ. Large Hadron Collider, LHC) - ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, построенный в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (фр. Conseil Europйen pour la Recherche Nuclйaire, CERN).

Большой адронный коллайдер

построен с целью разгона частиц (протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца))и их столкновения для моделирования в уменьшенной версии "Большого взрыва" в результате которого предположительно возникла вселенная.

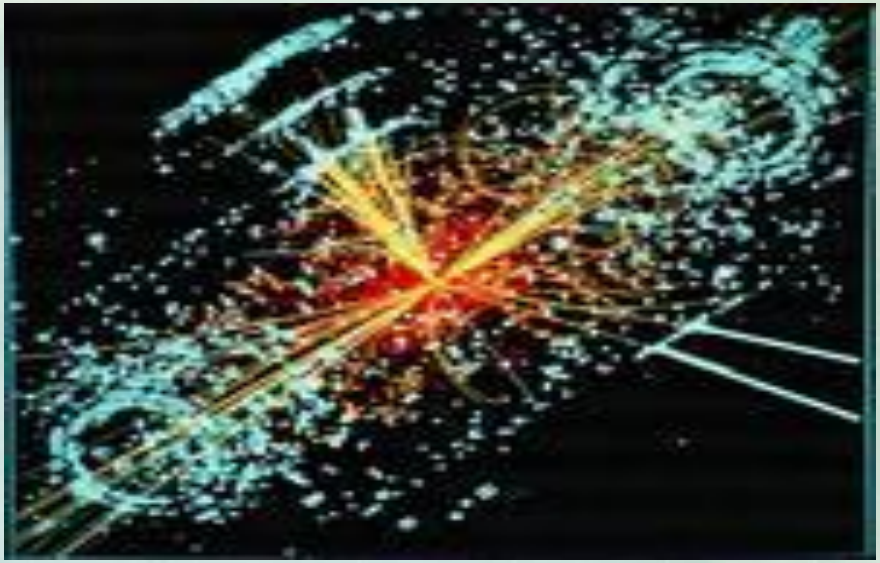
Слово **коллайдер** происходит от глагола *collide* — «сталкиваться, соударяться». БАК отличается от обычных ускорителей частиц именно тем, что они в нём будут сталкиваться.

Большим он называется потому, что это самый большой на данный момент ускоритель, построенный людьми; длина его окружности равна 27 километрам.

Туннель БАК фактически имеет форму восьмиугольника с четырьмя дугами, соединенными короткими прямыми секциями, в которых располагаются экспериментальные установки (детекторы) и системы управления пучком

с какой стати его там и тут называют *андронным*.

Адроны — это элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, к которым относятся и ядерные силы. Их название происходит от греческого *hadros* — «толстый, большой».

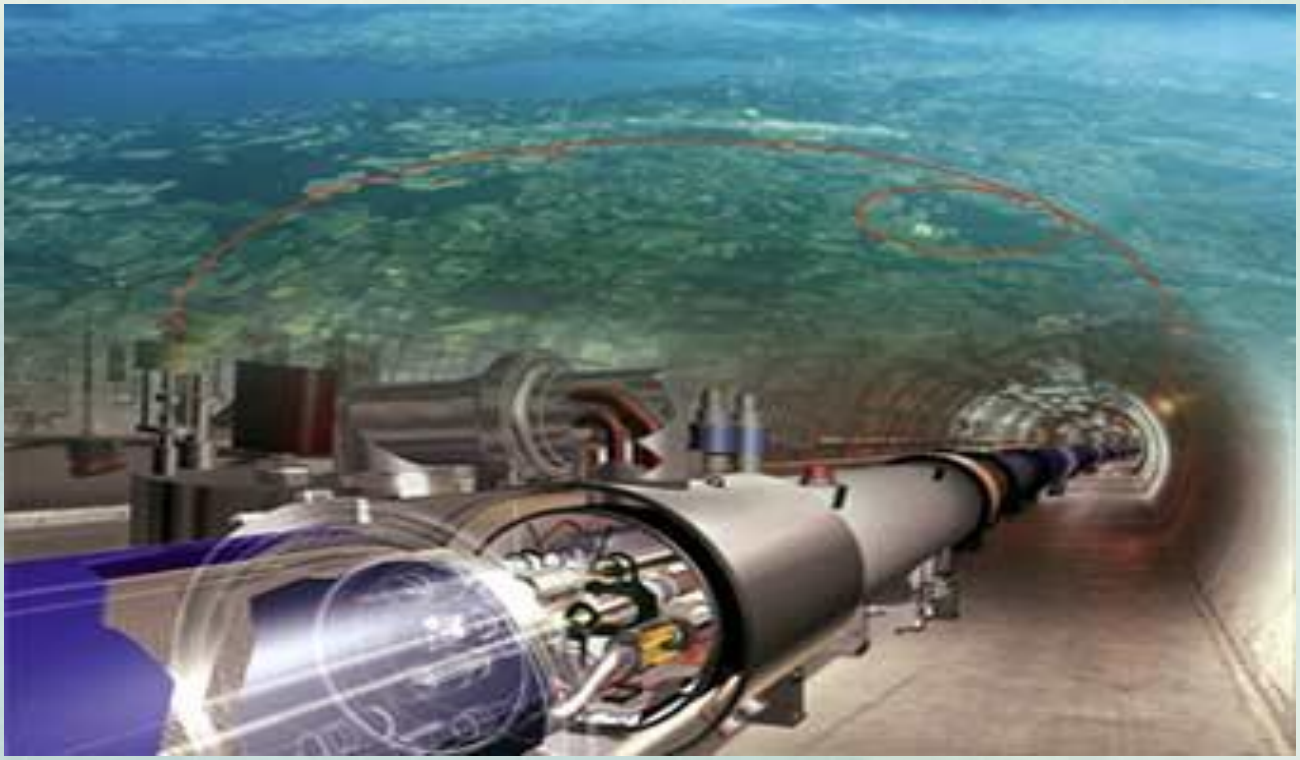


Целью проекта LHC прежде всего является открытие бозона Хиггса — важнейшей из экспериментально не найденных частиц Стандартной Модели (СМ) — а также поиск явлений физики вне рамок СМ. Также большое внимание планируется уделить исследованиям свойств W и Z-бозонов, ядерным взаимодействиям при сверхвысоких энергиях, процессам рождения и распадов тяжёлых кварков (b и t).

В этой связи наиболее часто упоминается теоретическая возможность появления в коллайдере микроскопических черных дыр, а также теоретическая возможность образования сгустков антиматерии и магнитных монополей с последующей цепной реакцией захвата окружающей материи.

Почему тела имеют массу?

Ответить на этот вопрос Европейский Совет по ядерным исследованиям (ЦЕРН) планировал после запуска Коллайдера.



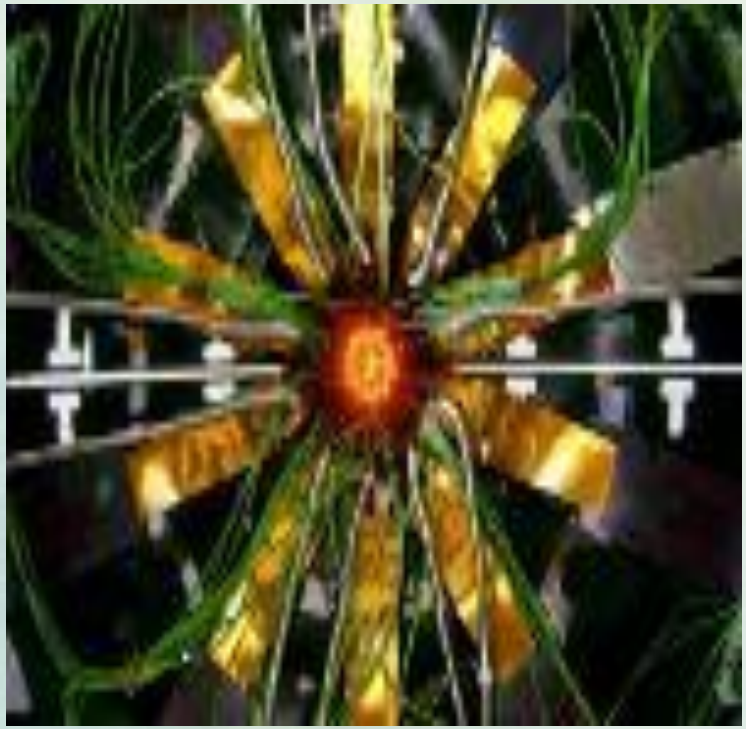
Учёные выдвигают гипотезу о том, что масса обычных частиц создается невидимым распространенным повсюду полем виртуальных частиц Хиггса. При столкновении частиц высоких энергий образуются бозоны Хиггса, и, возможно, благодаря механизму Хиггса появляется масса. На Коллайдере планировали пробовать найти микрочерные дыры, магнитные монополи, а также исследовать вероятность того, что любая известная фундаментальная частица обладает невидимым сверхсимметричным двойником.

Устройство LHC

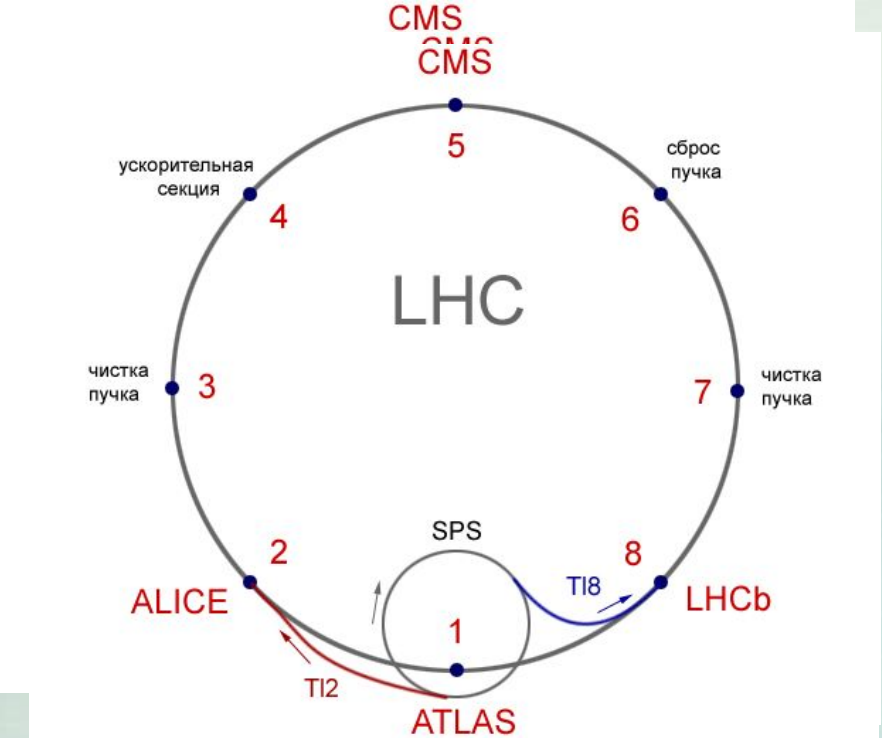
С точки зрения научной задачи сам ускоритель выполняет только полдела — он лишь сталкивает частицы. Изучением результатов столкновения занимаются детекторы элементарных частиц — специальные многослойные установки, собранные вокруг точек столкновения. Иногда ускорителем называют тандем «ускоритель + детекторы»; в этом случае, если надо подчеркнуть, что речь идет именно об ускорителе, а не о детекторах, часто говорят «ускорительное кольцо».

Далее пойдёт речь именно об устройстве ускорительного кольца LHC.

LHC — циклический (то есть кольцевой) коллайдер; пучки протонов или ядер свинца циркулируют в нём непрерывно, совершая свыше 10 тысяч оборотов в секунду и сталкиваясь на каждом круге со встречным пучком.



На рисунке показана схема расположения основных элементов ускорительного кольца LHC.



Всё кольцо LHC поделено на восемь секторов, границы которых отмечены точками от 1 до 8.
На каждом участке (1–2, 2–3 и т. д.) стоят в ряд магниты, управляющие протонным пучком.

Благодаря магнитному полю поворотных магнитов сгустки протонов не улетают прочь по касательной, а постоянно поворачиваются, оставаясь внутри ускорительного кольца.

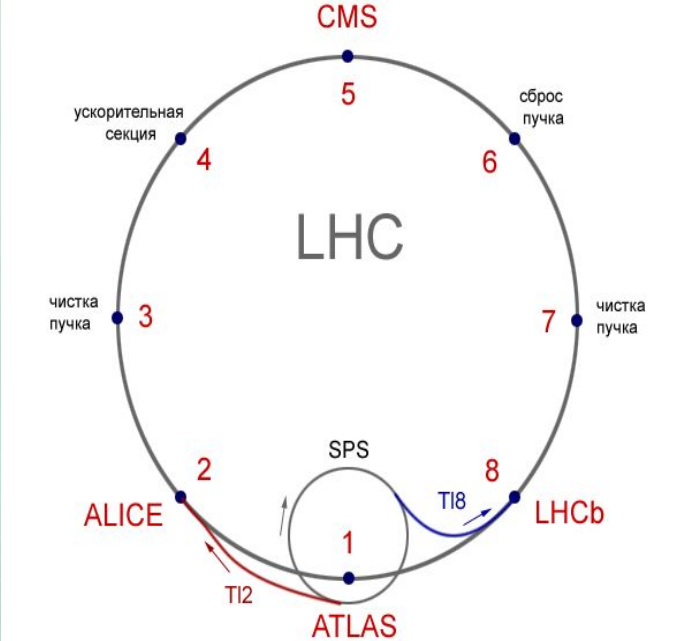
Эти магниты формируют орбиту, вдоль которой движутся протоны. Кроме того, специальные фокусирующие магниты сдерживают поперечные колебания протонов относительно «идеальной» орбиты, не давая им задевать стенки довольно узкой (диаметром несколько сантиметров) вакуумной трубы.

Внутри ускорителя идут рядом друг с другом две вакуумные трубы, по которым циркулируют два встречных протонных пучка, каждый в своем направлении.

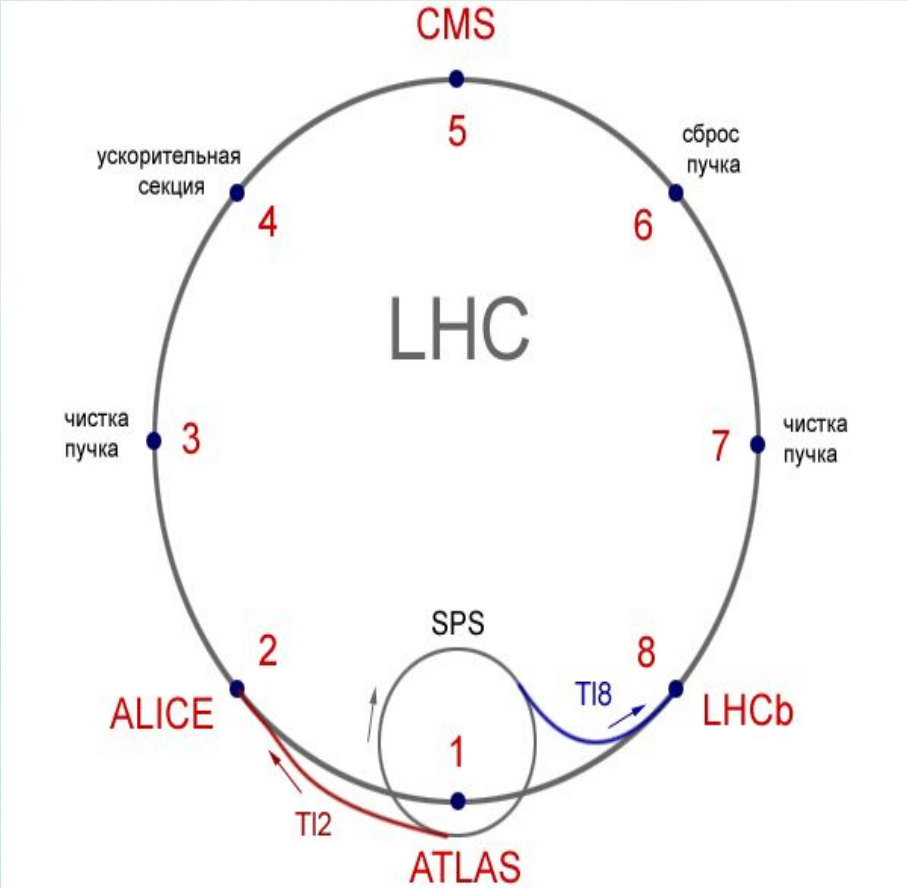
Эти две трубы объединяются в одну только в специально выделенных местах — в точках 1, 2, 5, 8. В этих точках происходят столкновения встречных протонных пучков, и именно вокруг них построены **четыре основных детектора**:

два крупных — ATLAS и CMS,
и два средних — ALICE и LHCb.

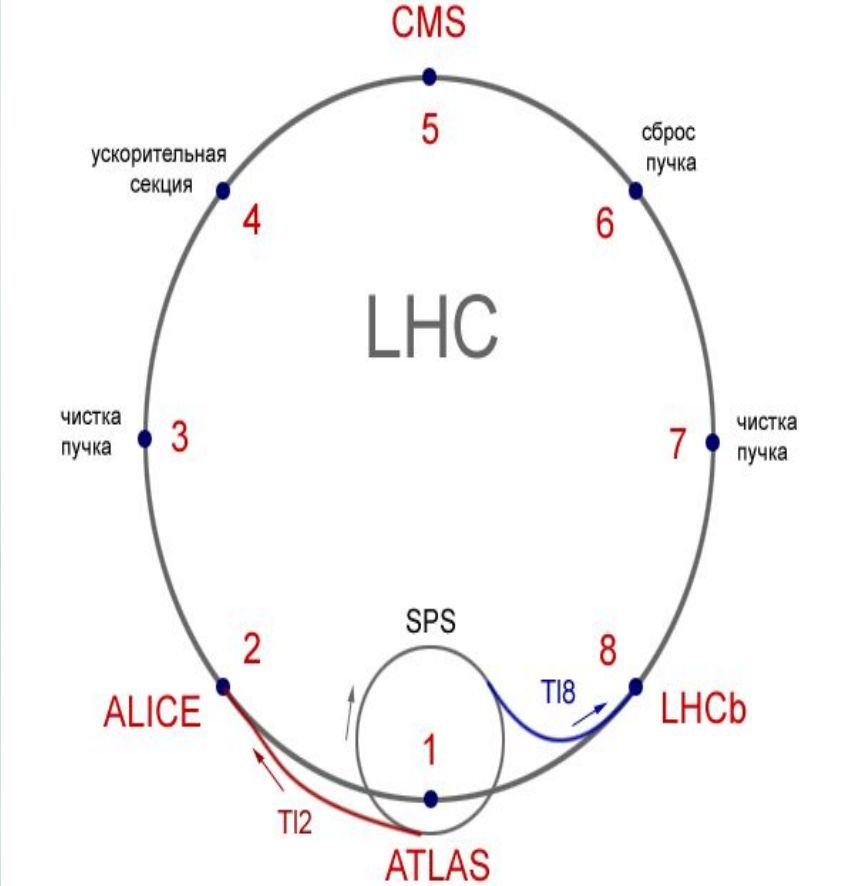
Вблизи двух крупных детектора установлены также два специализированных мелких детектора — TOTEM и LHCf.



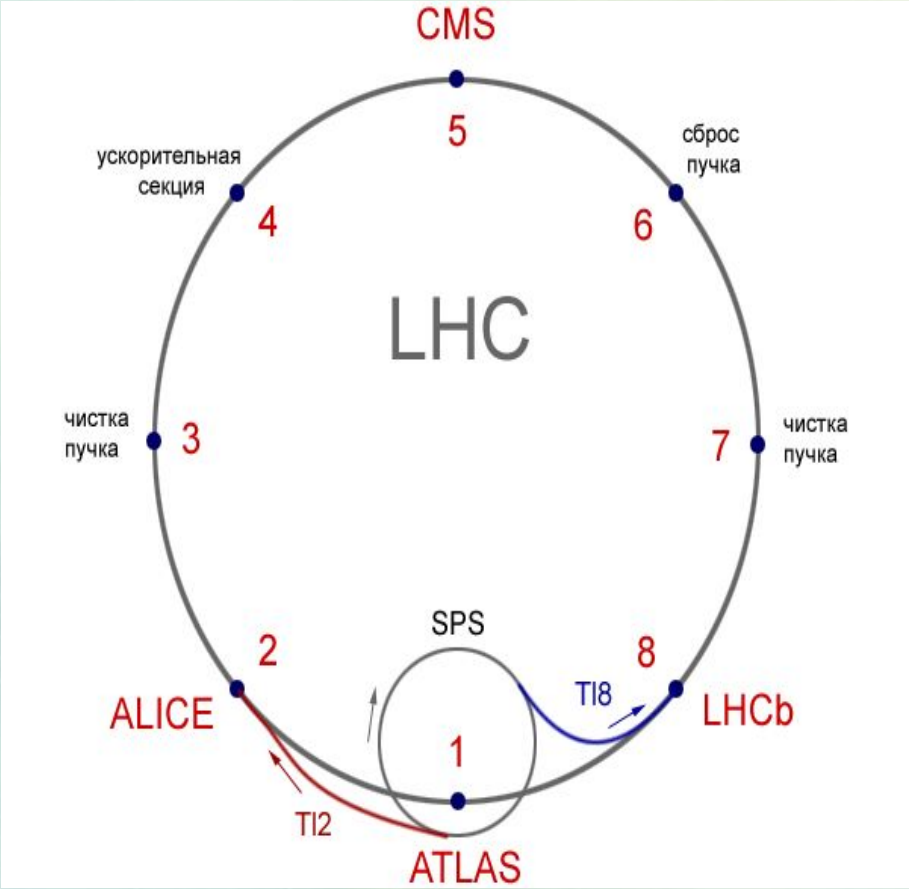
В точке 4 расположена **ускорительная секция**. Именно здесь протонные пучки при разгоне получают с каждым оборотом дополнительную энергию.



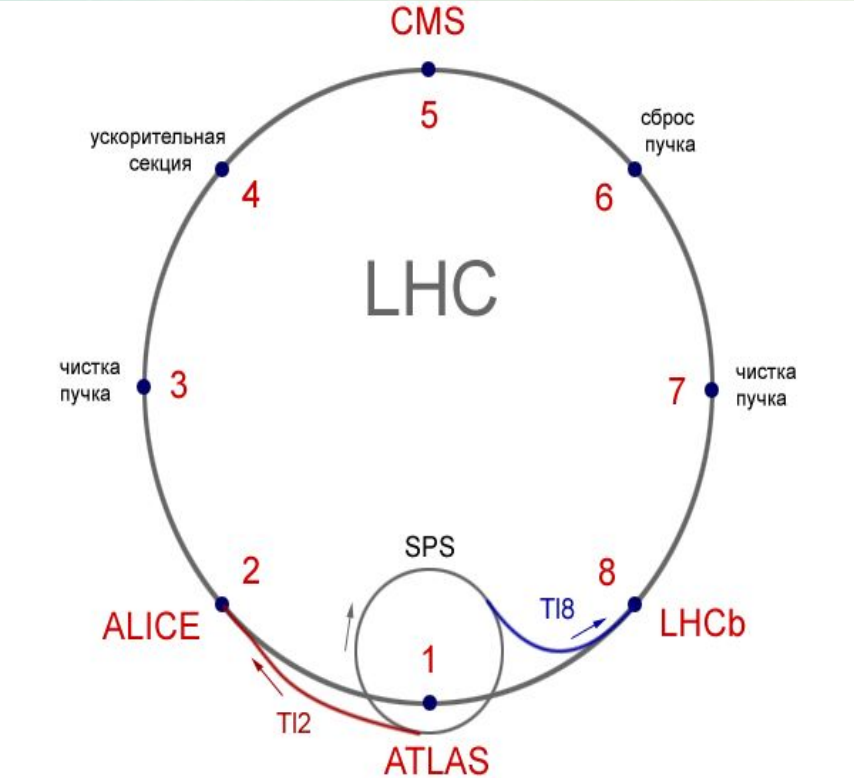
В точке 6 находится система **сброса пучка**. Здесь установлены быстрые магниты, которые в случае необходимости уводят пучки по специальному каналу прочь от ускорителя.



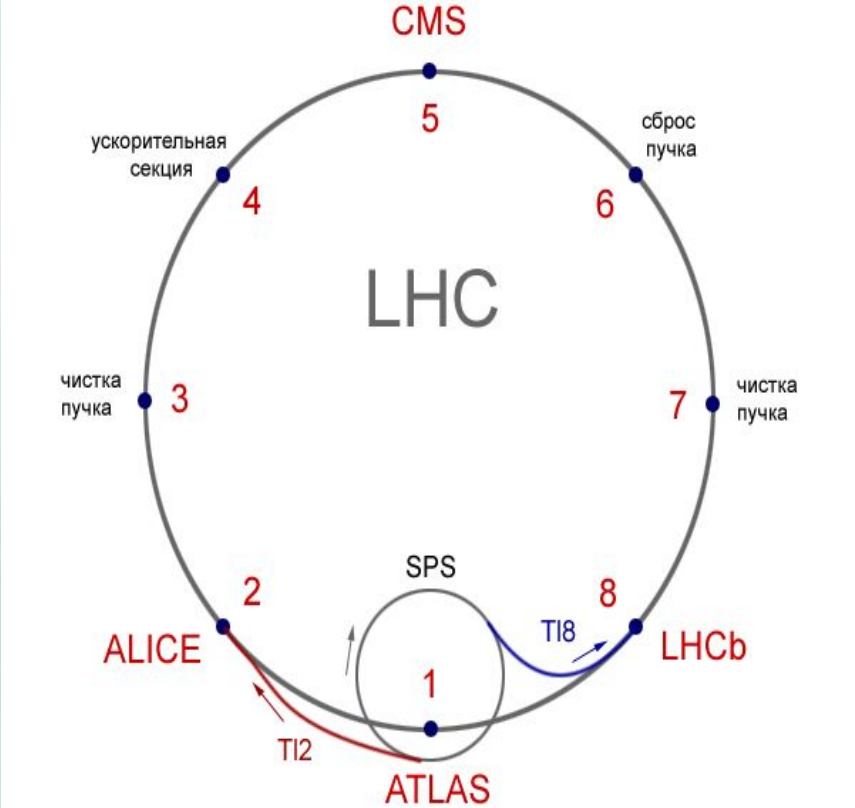
В точках 3 и 7 установлены системы чистки пучка; кроме того, эти места зарезервированы для возможных будущих экспериментов.



Протонные пучки попадают в LHC из предварительного ускорителя SPS. Линии передачи пучка (TI2 и TI8), соединяющие два этих кольцевых ускорителя вместе со специальными магнитами на каждом из них, составляют вместе **инжекционный комплекс** коллайдера LHC (от слова «инжекция» — впрыскивание пучка).

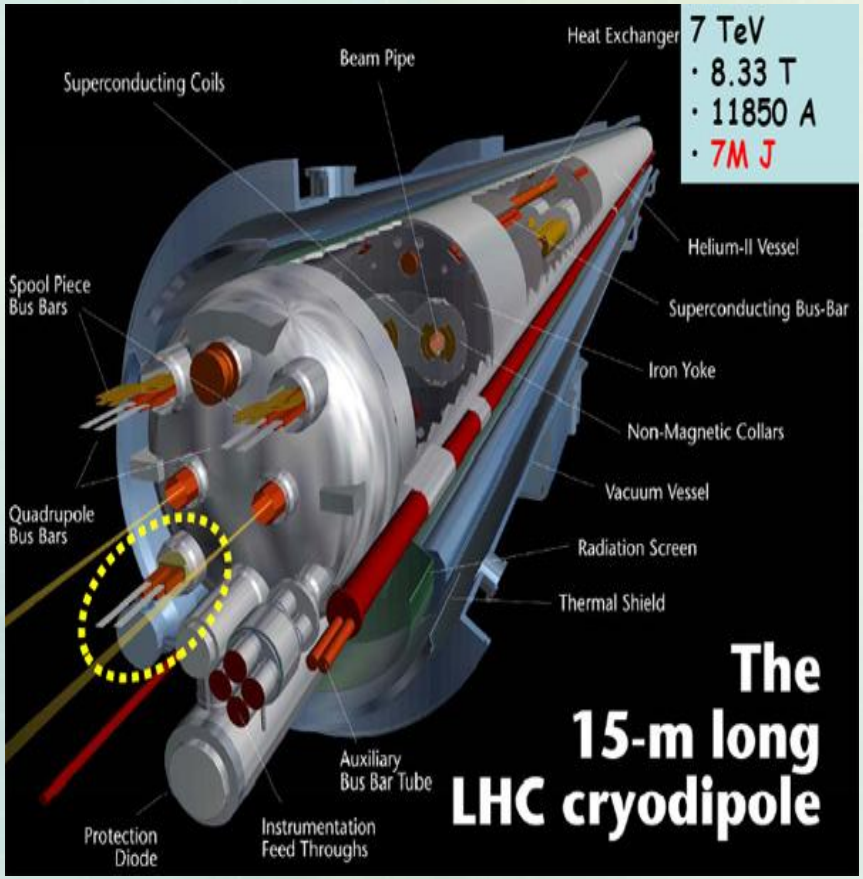


Поскольку на SPS пучок крутится только в одну сторону, инжекционный комплекс состоит из двух линий и имеет несимметричный вид.
В ускорительное кольцо SPS протоны попадают из источника через цепочку еще меньших ускорителей.



Магнитная система LHC

Как и любое тело, сгусток элементарных частиц, предоставленный сам себе, будет двигаться прямолинейно и равномерно. Для того чтобы удерживать его на круговой траектории внутри ускорителя (а также поддерживать от падения вниз под действием силы тяжести), требуется постоянно воздействовать на пучок магнитным полем.



На LHC для управления пучками используется несколько тысяч магнитов разного назначения. Именно они являются самой важной (и самой дорогой) частью ускорителя.

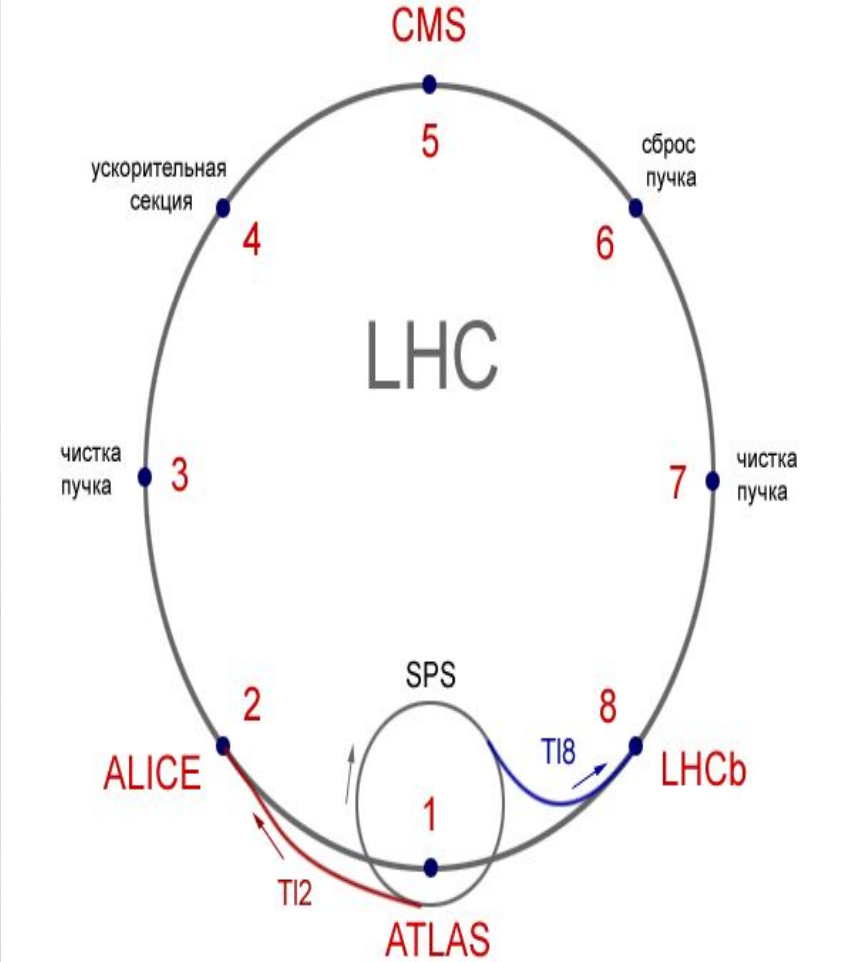
Траекторией пучков управляют поворотные магниты, которые слегка разворачивают пролетающий сквозь них пучок и удерживают его внутри кольцевой вакуумной трубы.

Имеются также фокусирующие магниты, не дающие пучку расплыться, и разнообразные корректирующие магниты. В точках инжекции и сброса пучка установлены специальные быстрые магниты.

Инжекционный комплекс

Инжекционный комплекс — это сложное инженерное сооружение, работоспособность которого зависит не только от правильной настройки магнитной системы, но и от точной синхронизации ритма работы SPS и LHC.

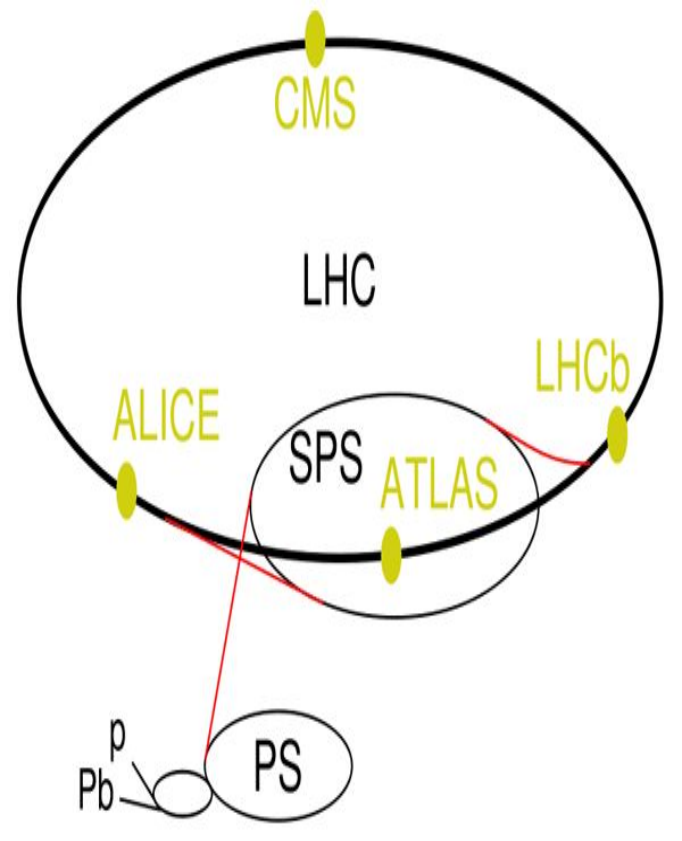
Протоны поступают в LHC из предварительного ускорителя SPS («Протонного суперсинхротрона»). Имеются две линии передачи пучка, которые отходят от SPS в двух местах и подходят к ускорительному кольцу LHC вблизи точек 2 и 8 (эти линии называются Tl2 и Tl8).



Инжекция (то есть «впрыскивание») протонов в LHC происходит не непрерывно, а импульсами. Во время работы LHC линии передачи пустуют, а в предварительном ускорителе SPS накапливается очередная порция протонов. В конце каждого цикла работы LHC высокоэнергетический пучок сбрасывается, и коллайдер подготавливается к приему новой порции электронов. В течение нескольких минут следует серия импульсных включений и выключений быстрых магнитов на концах линии передачи протонов, в ходе которых протонные сгустки переводятся из SPS в LHC и один за другим выстраиваются на свои «позиции» в пучке, не мешая уже циркулирующим сгусткам.

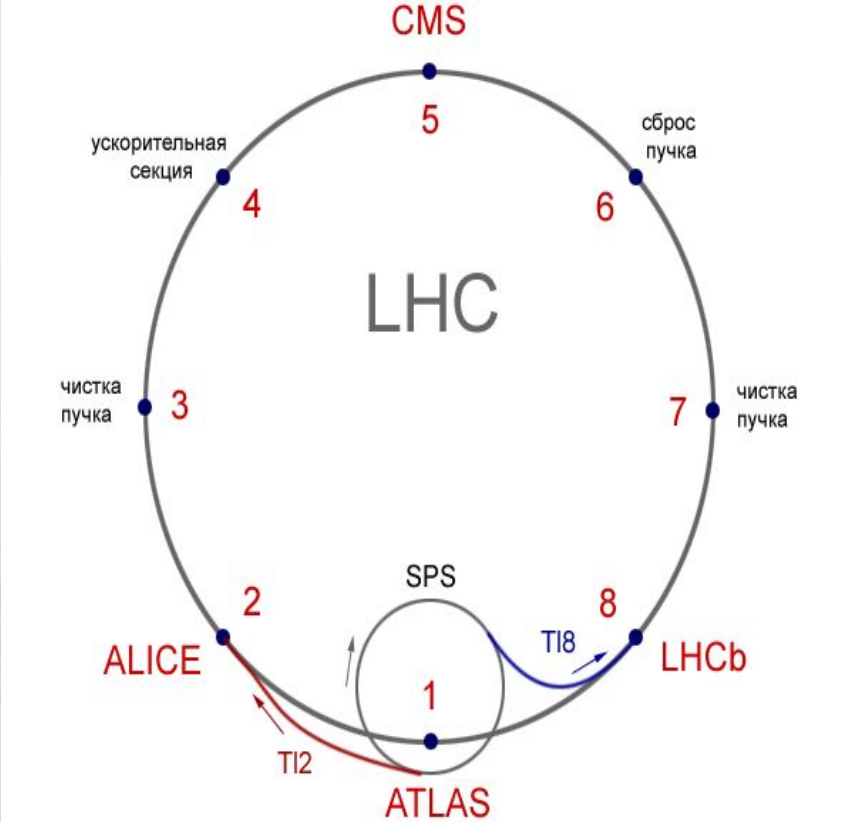
Перед тем как попасть в SPS, протоны проходят через несколько ускорителей меньшего размера.

Вначале с помощью ионизации протоны добываются из газообразного водорода, затем их разгоняют до энергии 50 МэВ в линейном ускорителе и впрыскивают в бустер PSB. Там протоны разгоняются до энергии 1,4 ГэВ, переводятся в протонный синхротрон PS, ускоряются до 25 ГэВ и только после этого попадают в SPS. В нём они разгоняются до 450 ГэВ и инжектируются в LHC. Похожую последовательность ускорителей проходят и ядра свинца, правда в их случае есть специфика, связанная с нагревом и атомизацией свинцового образца и ионизацией атомов.



Ускорительная секция

Протоны впрыскиваются в LHC на энергии 0,45 ТэВ и ускоряются до 7 ТэВ уже внутри основного ускорительного кольца. Этот разгон происходит во время пролета протонов сквозь несколько резонаторов, установленных в точке 4.



Резонатор

представляет собой полую металлическую камеру сложной формы , внутри которой возбуждается стоячая электромагнитная волна с частотой колебаний примерно 400 МГц. Эффективное и однородное ускорение всего пучка переменным полем оказывается возможным благодаря тому, что весь пучок разбит на отдельные сгустки, следующие на строго определенном расстоянии друг за другом. Когда сгусток протонов пролетает сквозь резонатор, электромагнитное колебание находится как раз в такой фазе, чтобы электрическое поле вдоль оси пучка подталкивало протоны вперед.

Фаза колебания поля в резонаторе настроена так, что в момент пролета частиц электрическое поле не максимально, а *нарастает*. Так делается для того, чтобы автоматически выравнивать энергию ускоряемых частиц. Если какой-то протон случайно оказался более энергичным, чем соседи, он вырывается вперед и на следующем круге приходит в ускоряющую камеру с небольшим опережением. Из-за этого он получает чуть меньше добавочной энергии, чем остальные протоны. И наоборот, если протон случайно потерял немного энергии и оказался в хвосте своего сгустка, то при следующем пролете через ускорительную секцию он получил побольше энергии.

Это свойство сгустка частиц называется автофазировкой

Ускорение протонов с энергии инжекции 0,45 ТэВ до 7 ТэВ происходит довольно медленно, примерно за 20 минут. Скорость этого процесса ограничена вовсе не мощностью ускорительной секции, а скоростью усиления магнитного поля в поворотных магнитах — ведь оно должно расти синхронно с энергией частиц для того, чтобы удерживать их в вакуумной трубе неизменного радиуса.

Колебания электромагнитного поля в резонаторе порождают сильные токи, текущие по поверхности камеры. Для того чтобы избежать тепловых потерь энергии, резонаторы на LHC тоже работают в сверхпроводящем состоянии при температуре 4,5 К (–268,7°С). Впрочем, внутренняя поверхность резонатора не идеальна и неизбежно содержит маленькие дефекты, на которых выделяется тепло. Но поскольку резонаторы сделаны из меди, это тепло быстро отводится.

Система сброса пучка

Протонный пучок на полной энергии и интенсивности обладает большой разрушительной силой (представьте себе энергию летящего реактивного самолета, сфокусированную в поперечнике меньше миллиметра). В норме пучок циркулирует внутри вакуумной камеры и не задевает аппаратуру. Однако если в управляющей магнитной системе произойдет сбой или траектория пучка слишком сильно отклонится от расчетной, пучок станет опасен, и его нужно будет быстро сбросить. Кроме того, сброс ослабевшего пучка надо делать каждые несколько десятков часов и при нормальной работе ускорителя.

Система сброса пучка

Всем этим занимается специальная система сброса пучка

В ней размещены специальные быстрые магниты, которые при необходимости включаются в считанные микросекунды и слегка отклоняют пучок. В результате протоны сходят с круговой орбиты, затем пучок дефокусируется, по специальному каналу уходит прочь от ускорителя и в отдельном зале безопасно поглощается массивными карбон-композитными блоками (блоки от этого сильно нагреваются, но не плавятся).

Вакуумная и криогенная техника, система контроля и безопасности

Для того чтобы протонные пучки могли свободно циркулировать в LHC, внутри ускорительной трубы создан сверхглубокий вакуум. Давление остаточных газов составляет порядка 10^{-13} атм.

Однако даже при таком низком давлении время от времени происходит столкновение протонов с молекулами остаточного газа, что сокращает время «жизни пучка» до нескольких дней.

Несмотря на то что вакуумная труба небольшая, радиусом примерно 5 см, она очень длинная, так что полный объем, подлежащий вакуумированию, сопоставим с крупным зданием. Кроме того, из-за многочисленных контактов и соединений, а также из-за большой площади внутренней поверхности вакуумной камеры задача по поддержанию нужного вакуума оказывается очень непростой.

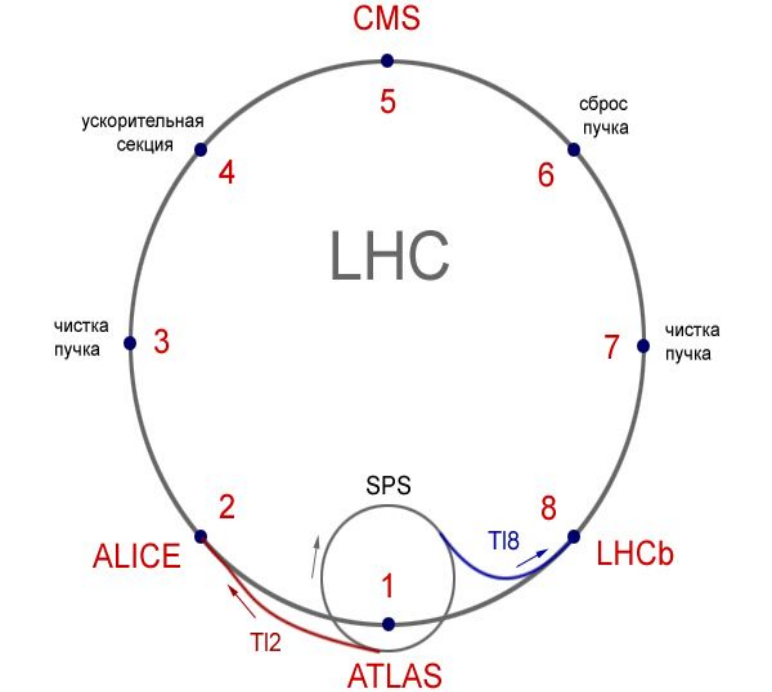
Криогенная система

Еще одной важной частью инфраструктуры ускорителя является криогенная система, охлаждающая ускорительное кольцо. Она поддерживает в поворотных магнитах (а также в некоторых других элементах) температуру 1,9 К (то есть –271,25°С), при которой сверхпроводник безопасно держит нужный ток и создает требуемое магнитное поле.

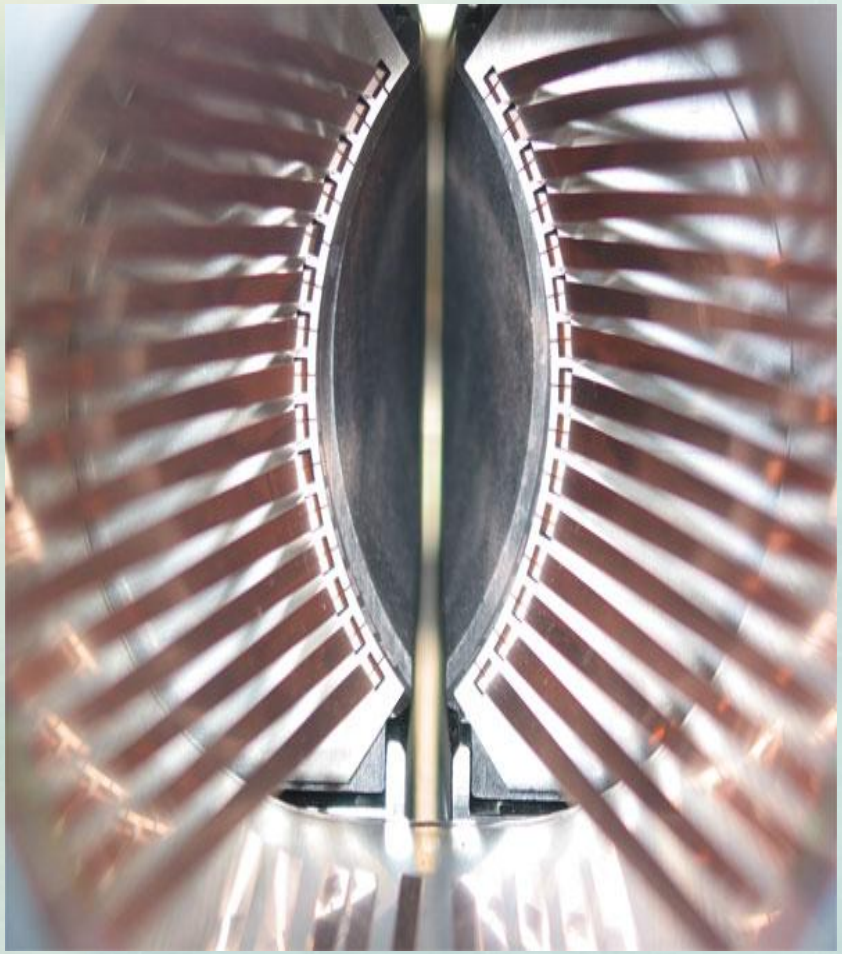
Для поддержания рабочей температуры ускорителя используется уникально высокая теплопроводность сверхтекучего гелия. По гелиевому каналу на LHC можно передавать киловатты теплового потока при перепаде температур всего 0,1 К на расстоянии в километр!

Криогенная система на LHC многоступенчатая. Для охлаждения используется 12 миллионов литров жидкого азота и почти миллион литров жидкого гелия. LHC в ходе работы будет потреблять 2-3 грузовика жидкого азота и порядка 500 литров жидкого гелия в день.

В точках 3 и 7 расположены устройства для «чистки» пучка. Когда протонный пучок движется внутри вакуумной трубы, то протоны колеблются в поперечной плоскости, и некоторые из них могут отклониться от идеальной траектории довольно далеко. Такие «блуждающие» протоны (на языке физиков — «гало пучка») могут задеть стенки вакуумной трубы или аппаратуру. Даже если это будет ничтожная доля от всего протонного пучка, они могут локально нагреть или даже повредить аппаратуру.



коллиматор



Система чистки пучка механическим образом отсекает гало пучка. Для этого в непосредственную близость к пучку (на расстояние всего пару миллиметров!) придвигаются массивные блоки — «челюсти» коллиматора. Они поглощают «блуждающие» протоны, но не мешают основной части пучка. Впрочем, «отсеченные» протоны тоже небезопасны — они сильно нагревают материал коллиматора, а также порождают на нём поток частиц более низкой энергии («вторичное гало»), которое тоже приходится отсекать вторичными коллиматорами.

Светимость коллайдера

Важной «инструментальной» характеристикой коллайдера является его **светимость**; чем она больше, тем чаще происходят столкновения частиц из встречных пучков. Светимость зависит от количества частиц в каждом пучке и от того, насколько плотно частицы собраны, то есть насколько хорошо пучок сфокусирован в точке столкновений.

Светимость L выражается в $см^{-2} \cdot с^{-1}$. Для того чтобы узнать, как часто будет происходить какой-то процесс на данном коллайдере, надо умножить сечение процесса на светимость коллайдера. Например, при проектной светимости LHC, равной 10^{34} $см^{-2} \cdot с^{-1}$, процесс рождения хиггсовского бозона с массой 200 ГэВ, имеющий сечение 20 pb (= $2 \cdot 10^{-35}$ $см^2$), будет происходить со средней частотой один раз в пять секунд.

Часто используют также **интегральную светимость** (или интеграл светимости), то есть светимость, умноженную на время работы ускорителя. Ее обычно выражают в обратных пикобарнах (pb^{-1}) или обратных фемтобарнах (fb^{-1}; 1 fb^{-1} = 1000 pb^{-1}). Например, коллайдер со светимостью 10^{34} $см^{-2}\cdot с^{-1}$, проработав в течение «стандартного ускорительного года» (10 миллионов секунд, что примерно равно четырем месяцам), наберет интегральную светимость 100 fb^{-1}. Это значит, что какой-нибудь редкий процесс с сечением 1 fb, произойдет за это время примерно 100 раз (однако из-за неидеальной эффективности детектора количество реально зарегистрированных событий будет, конечно, меньше).

КРАТКИЕ ФАКТЫ

- **СКОРОСТЬ ПРОТОНОВ**: 99,9999991% от скорости света
- **ЧИСЛО ПРОТОНОВ В СГУСТКЕ**: до 100 млрд (10^{11})
- **ЧИСЛО СГУСТКОВ**: до 2808
- **ЧИСЛО ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКАМИ ПРОТОНОВ ЗОН ДЕТЕКТОРОВ**: до 31 млн в секунду, в 4 зонах
- **ЧИСЛО СТОЛКНОВЕНИЙ ЧАСТИЦ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ**: до 20
- **ОБЪЕМ ДАННЫХ НА ОДНО СТОЛКНОВЕНИЕ**: около 1,5 МБ
- **ЧИСЛО ЧАСТИЦ ХИГГСА**: 1 каждые 2,5 секунды (при полной интенсивности пучка и согласно определенным предположениям о свойствах частиц Хиггса)

Варианты развития событий

Существует несколько вариантов того, какие результаты будут получены на LHC:

- Будет обнаружен лишь один хиггсовский бозон со свойствами, близкими к Стандартной модели, и больше ничего.
- Будет обнаружен лишь один хиггсовский бозон, но со свойствами, заметно отличающимися от Стандартной модели, либо не будет найдено ни бозона Хиггса, ни других новых частиц.
- Будут обнаружены новые частицы, которых нет в Стандартной модели.

Вариант 1

самый «пессимистический».

При нём Стандартная модель (СМ) окончательно достраивается, но накопившиеся вопросы относительно происхождения Стандартной модели ответа не получают. Широко распространено мнение, что при таком развитии событий не будет выделено финансирование на международный линейный электрон-позитронный коллайдер ILC, и развитие физики элементарных частиц на время застопорится.

Вариант 2

достаточно интересный.

Во многих теориях при подходящем наборе параметров возникает картина, подобная СМ, но со слегка отличным от СМ бозоном Хиггса. Измеренные на LHC свойства бозона укажут теоретикам направления дальнейшего развития теории. Если бозон Хиггса не будет обнаружен, то это значит, что нарушение электрослабой симметрии происходит за счет какого-то необычного механизма, и развитие получат бесхиггсовские теории.

С точки зрения эксперимента это будет не самый лучший вариант, так как все эти теории будут опять плохо проверяемы.

Вариант 3

самый интересный.

При таком развитии событий будет открыт новый глубинный «пласт» устройства нашего мира, и уже теоретикам придется напрячься, чтобы понять его. В этом случае есть все шансы на бурное развитие как экспериментальной, так и теоретической ФЭЧ.