

## ФИЗИКА БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

*М. А. Яйтлер*<sup>1</sup>

Институт физики высоких энергий Австрийской академии наук, Вена

Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) в научном центре ЦЕРН (Женева) является в настоящее время самым мощным ускорителем частиц в мире. Его используют для изучения физики элементарных частиц при самых высоких энергиях, доступных для ускорителей. Считается, что хиггс-бозон (последняя еще не открытая частица, предсказанная Стандартной моделью) и самые легкие частицы Минимальной суперсимметричной модели можно создать при энергии LHC. В работе дан краткий обзор физической программы и технологических задач этого коллайдера.

The Large Hadron Collider (LHC) at CERN in Geneva, Switzerland, is currently the most powerful particle accelerator in the world. Its task is to study the physics of elementary particles at the highest energies accessible to accelerators. It is believed that the Higgs boson (the last particle predicted by the Standard Model that has not yet been found) and the lightest particles of the Minimal Supersymmetric Model should be accessible at the energy of the LHC. These lectures give a short overview of the physics program and the technological challenges of this collider.

PACS: 12.60-i; 14.80.Bn; 14.80.Da; 12.38.-t

### 1. ВВЕДЕНИЕ

**1.1. Зачем физикам нужны ускорители?** На этот вопрос можно было бы ответить: «Чтобы ускорять частицы». Однако этот ответ не только бессмысленный («А зачем их надо ускорять?»), но и к тому же неправильный! При энергиях, доступных большим современным ускорителям, частицы быстро становятся релятивистскими: их скорость почти равняется скорости света, предел которой они в рамках специальной теории относительности достигнуть не могут. Таким образом, пройдя первые ступени ускорителей, частицы ускоряются уже очень незначительно, хотя постоянно приобретают все большую и большую энергию. Получается, что установившееся название «ускоритель» не очень удачное.

Зачем же нужна такая высокая энергия? Согласно самой известной формуле современной физики,  $E = mc^2$ , энергия и масса, в сущности, одно и то же и отличаются только коэффициентом (правда, очень большим, если использовать привычные нам единицы длины и времени, т. е. метр и секунду). Таким образом, эта энергия может быть использована для создания частиц, гораздо более тяжелых, чем те, которые «ускоряются» в ускорителе. Топ-кварк ( $t$ ), создаваемый при столкновениях протонов на LHC (или при

---

<sup>1</sup>E-mail: manfred.jeitler@cern.ch

столкновениях протонов и антипротонов на ускорителе FNAL в Чикаго, США), почти в двести раз тяжелее протона. А  $Z$ -бозоны, которые создавались на бывшем электронно-позитронном коллайдере LEP в ЦЕРН, в двести тысяч раз тяжелее электронов.

Но современные ускорители используются не только для того, чтобы придавать частицам высокую энергию. На самом деле в космических лучах встречаются частицы с такой высокой энергией (до  $10^{20}$  эВ, т.е.  $10^{11}$  ГэВ), которую вряд ли удастся когда-нибудь достичь на земных ускорителях. Но в то время как поток космических лучей сверхвысоких энергий очень мал, момент времени, место и угол прихода таких частиц случайны, ускорители дают интенсивный пучок частиц в одном месте, где можно удобно наблюдать за их взаимодействиями. Поэтому не на всех ускорителях пытаются дойти до предела доступных энергий.

Есть специальные установки, с помощью которых можно создать особенно интенсивные пучки частиц при сравнительно низких энергиях, что дает возможность проводить измерения с очень большой статистикой, позволяя наблюдать очень редкие явления и снижать статистические погрешности. Такие ускорители называют «фабриками» (например,  $\phi$ -фабрика DAΦNE в г. Фраскати в Италии,  $B$ -фабрика KEK-B в Японии и т. п.). Они работают на пределе доступной точности («precision frontier»). Ускорители типа LHC работают на пределе доступных энергий («energy frontier»), но и тут требуется большая интенсивность пучков. Это позволяет генерировать большое количество частиц, которые были открыты не так уж давно. Можно сказать, что LHC также является  $W$ - и  $Z$ -фабрикой, и даже  $t$ (топ)-фабрикой.

**1.2. Ускорители и космические лучи.** Конечно, для астрономов и астрофизиков космические лучи представляют большой интерес, так как они несут в себе информацию о сверхмощных источниках энергии и многих процессах во Вселенной. Однако если интересоваться только физикой самих элементарных частиц, то можно задать себе следующий вопрос: «Стоит ли тратить деньги и на космические обсерватории, и на ускорители или же более выгодно сосредоточиться только на одном из этих двух подходов?»

Давайте посмотрим на историю открытия каждой частицы и вспомним, где она была впервые обнаружена: на ускорителе или в космических лучах? Не в каждом случае это можно сказать однозначно, но есть аргументы, на основе которых можно разделить частицы по этим двум категориям исследований так, как указано на рис. 1.

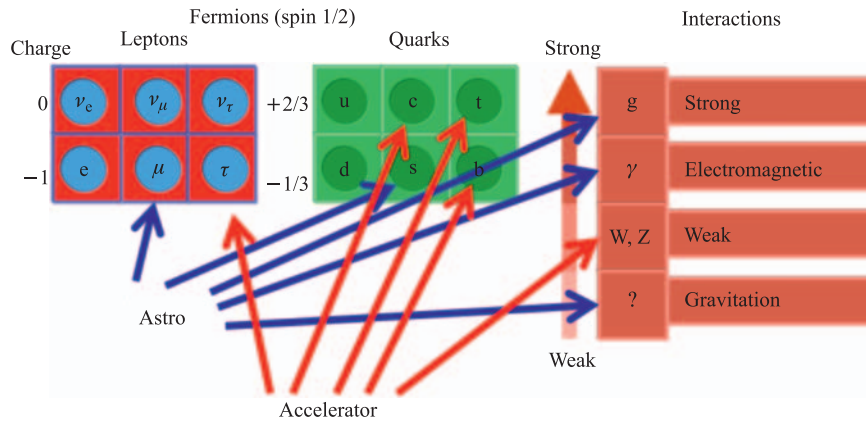


Рис. 1. Частицы Стандартной модели и способ их обнаружения

Значит, если считать только по количеству частиц, то в целом оказывается, что оба подхода сделали приблизительно одинаковый вклад в развитие физики, т. е. имеет смысл вести исследования обоими путями.

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА ЛНС

В последующем мы не будем останавливаться на детальном рассмотрении теоретических моделей, а только приведем те эффекты, которые могли бы наблюдаться на ЛНС.

**2.1. Хиггс-бозон.** Стандартная модель элементарных частиц хорошо описывает большинство известных нам физических процессов, но в то же время она предсказывает одну частицу, которую до сих пор не удалось найти: это так называемый *хиггс-бозон* (*H-boson*). Почему думают, что именно эта частица должна существовать, почему физики ее так упорно ищут, несмотря на то, что до сих пор все попытки ее найти оказались безуспешными?

Дело в том, что большинство известных нам элементарных частиц имеют некую массу покоя. Это не совсем очевидно: мы, конечно, знаем, что все макроскопические тела имеют массу, но это еще не доказывает, что составляющие их элементарные частицы сами имеют массу. Масса макроскопических тел в основном определяется массой составляющих их протонов и нейтронов (каждый протон или нейтрон весит около  $1 \text{ ГэВ}/c^2$ ). Как мы знаем, протон и нейтрон не являются элементарными частицами, а состоят из кварков и глюонов, причем в основном из *up*- и *down*-кварков. Масса этих видов кварков, по всем данным, составляет всего лишь несколько  $\text{МэВ}/c^2$ , а большинство массы протонов и нейтронов, и тем самым массы известной нам материи, возникает в результате взаимодействия этих кварков.

Тем не менее эксперимент точно показывает, что большинство всех элементарных частиц имеют определенную массу. Это все виды кварков, все заряженные лептоны, а также векторные бозоны (*W*- и *Z*-бозоны), которые осуществляют слабое взаимодействие. Осцилляции нейтрино показали, что и различные виды нейтрино должны иметь массу. Значит, в уравнения движения для этих частиц нужно ввести выражение для массы. Однако уравнения движения с массовыми членами неинвариантны относительно локальных преобразований симметрии (так называемых калибровочных преобразований), что



Рис. 2. Питер Хиггс (Peter Higgs) во время посещения эксперимента ATLAS на ускорителе ЛНС в ЦЕРН

несовместимо со свойствами фундаментальных взаимодействий. Выход из этой ситуации получается, если ввести дополнительное поле — поле Хиггса, которое взаимодействует со всеми другими полями и тем самым сообщает массу частицам.

Такая теория была предложена рядом физиков, самым известным из которых является шотландский физик Питер Хиггс (рис. 2). Она детально изложена в учебниках физики элементарных частиц (см., например, [1]). Для физика-экспериментатора главное свойство этой теории заключается в том, что она предсказывает один массивный скалярный бозон  $H$  массой меньше  $1 \text{ ТэВ}/c^2$ , что делает ее доступной для энергий ЛНС. Если такой бозон будет найден на ЛНС, то это, конечно, станет красивым подтверждением теории. Если его не найдут, то это, пожалуй, сделает ситуацию еще более интригующей, так как тогда придется модифицировать Стандартную модель.

**2.2. Суперсимметрия и темная материя.** Теория *суперсимметрии* (см. [2]) постулирует для всех известных частиц наличие «суперсимметричного» партнера: для каждого фермиона — бозона, для каждого бозона — фермиона. Таким образом, электрон имеет в качестве бозонного партнера «сэлектрон», а глюон имеет в качестве фермионного партнера «глюино».

Теория суперсимметрии имеет несколько очень удобных свойств. Во-первых, она решает проблемы так называемой «тонкой настройки» массы бозона Хиггса: можно было бы ожидать, что бозон Хиггса имеет очень большую массу, близкую к планковской, если бы не было тонкой настройки, в рамках которой компенсируются большие положительные и отрицательные вклады. Однако мы знаем, что масса бозона Хиггса не может быть такой большой, потому что тогда она не могла бы выполнять ту функцию, ради которой ее придумали. Суперсимметрия решает эту проблему тем, что суперпартнер каждой частицы компенсирует ее вклад естественным образом.

Во-вторых, она облегчает «великое объединение» различных видов взаимодействий. «Константы связи» электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий на самом деле не являются константными, а меняют свое значение при возрастании энергии взаимодействия (по-английски это явление называется «running coupling constants»). Если экстраполировать значения этих трех параметров к очень высоким энергиям, то в суперсимметричной модели соответствующие кривые пересекаются в одной точке, в то время как в обычной Стандартной модели пары кривых пересекаются в разных точках.

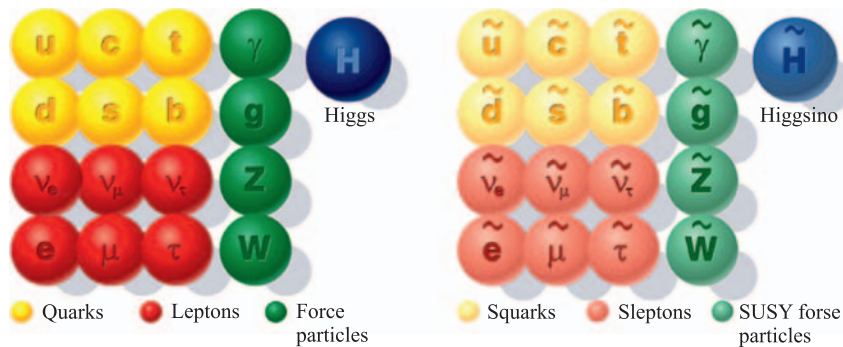


Рис. 3. Теория суперсимметрии постулирует для каждой частицы Стандартной модели (слева) наличие партнера (справа): для фермионов — бозонов, для бозонов — фермионов. Эти частицы не могут быть уже известными частицами Стандартной модели

Этот факт делает теорию суперсимметрии привлекательной, если полагать, что различные виды взаимодействия — это лишь разные формы одного и того же взаимодействия, которые не отличаются друг от друга при очень высоких энергиях.

Следует отметить, что оба аргумента хотя и очень убедительны, но не носят характера обязательного аргумента в пользу бозона Хиггса, без которого Стандартная модель просто не может быть полной и правильной. Аргументы в пользу суперсимметрии носят скорее эстетический характер: они делают теорию более «красивой», но, тем не менее, теория может быть правильной и без суперсимметрии.

С точки зрения экспериментатора проблема теории суперсимметрии заключается в том, что до сих пор еще не удалось найти ни одного суперсимметричного партнера, несмотря на то, что большинство вариантов этой теории предсказывает величины масс для самых легких суперсимметричных частиц в диапазоне, доступном для современных коллайдеров. (Физики иногда шутят по этому поводу: «Ну ничего, все-таки половину всех частиц суперсимметричной модели уже нашли!», имея при этом в виду как раз «обычные» фермионы и бозоны.)

Однако за последние годы в пользу теории суперсимметрии приводят еще другой, экспериментальный аргумент. Астрономические наблюдения показывают, что в нашей Вселенной находится гораздо больше материи, чем та, которую мы можем видеть непосредственно или косвенно в виде звезд, планет и газа. Данные наблюдений по *микрولينзированию* показывают, что эта «темная материя» не может находиться в крупных, массивных объектах (так называемых MACHOs — Massive Astrophysical Compact Halo Objects). Скорее всего, эта материя имеет форму микроскопических частиц, которые взаимодействуют крайне слабым образом и заметны лишь в силу их совокупного гравитационного эффекта (WIMPs — Weakly Interacting Massive Particles; знатоки английского языка оценят типичный американский юмор в этих акронимах).

Большинство вариантов суперсимметрии предсказывает, что самые легкие суперсимметричные партнеры известных нам частиц не распадаются, а являются стабильными (это варианты теории с так называемым «сохранением  $R$ -паритета»). Итак, можно убить двух зайцев разом и предположить, что темная материя состоит как раз из этих стабильных суперсимметричных частиц.

В то время как в других экспериментах ищут естественные WIMPs, которые должны были бы нас окружать со всех сторон, на ЛHC стараются их создать искусственным образом и обнаружить косвенно с помощью других частиц, которые рождаются вместе с ними в тех же реакциях.

**2.3. Дополнительные измерения.** Мы видим, что живем в четырехмерном пространстве Минковского, но все наши эксперименты имеют, конечно, только конечную точность. Если измерений на самом деле больше, но они «закручены» на очень небольших расстояниях, мы можем их и не заметить. Таким образом, одномерный муравей, ползающий вдоль трубочки, мог бы подумать, что эта трубочка всего лишь нитка, если при этом диаметр трубочки достаточно небольшой.

Эта идея не просто научная фантастика, а имеет вполне реальное обоснование. Например, теории суперструн можно последовательно формулировать только в пространствах с количеством измерений больше четырех. Другой аргумент в пользу большего числа измерений — чрезвычайная слабость гравитации по сравнению со всеми другими видами взаимодействий. Есть теории, в которых сила гравитации фундаментально не отличается от силы электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий, но только,

большей частью, «утекает» в другие измерения. Подобную утечку энергии можно было бы обнаружить и в экспериментах на ЛНС.

**2.4. Кварк-глюонная плазма.** Теория кварков объясняет, что свободные кварки невозможно обнаружить из-за их «удержания» (confinement) в адронах: чем больше их удалять друг от друга, тем сильнее они притягивают друг друга. Этот эффект можно себе представить как два шарика, соединенных между собой резинкой: чем сильнее тянуть в разные стороны, тем сильнее будет сопротивление резинки. Резинка при очень большом напряжении в конце концов разорвется, а между кварками будет действовать настолько большая энергия, что ее будет достаточно для создания новых пар кварков и антикварков (энергия взаимодействия превращается в массу образуемых адронов). Эта *адронизация* кварков приводит к образованию струй (jets), которые наблюдаются в экспериментах.

На маленьких расстояниях, однако, кварки являются квазисвободными частицами (*асимптотическая свобода, asymptotic freedom*). Предполагают, что на очень раннем этапе истории Вселенной, вскоре после Большого взрыва, плотность и энергия частиц были настолько большими, что кварки и глюоны (бозоны, которые осуществляют взаимодействие между кварками) как раз и находились в таком квазисвободном состоянии. Другими словами, материя тогда не имела формы отдельных адронов, а состояла из очень густого и горячего «супа» кварков и глюонов — так называемой кварк-глюонной плазмы.

Для подтверждения этой теории физики стараются создать подобные условия в лаборатории. При столкновении протонов на практике наблюдают только элементарные взаимодействия между отдельными кварками и/или глюонами. Для создания кварк-глюонной плазмы более целесообразно использовать столкновения тяжелых ядер, состоящих из большого количества протонов и нейтронов. Такие эксперименты уже проводились на ускорительном комплексе RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) в Брукхейвене в США. Теперь они ведутся на ЛНС при более высоких энергиях с использованием ионов свинца. В то время как на ЛНС обычно сталкиваются протоны, для этих измерений время от времени проводятся специальные сеансы, где используют ионы свинца.

Следует отметить, что было бы интересным исследовать кварк-глюонную плазму не только при очень высоких, но и при более низких энергиях. С этой целью в ОИЯИ в Дубне строится низкоэнергетический коллайдер NICA.

**2.5. В-физика.** В-физика имеет большое значение в рамках изучения *CP*-нарушения. Для исследований в этой области построены специализированные *B*-фабрики (КЕК-В в Японии и закрытый в 2008 г. ускоритель PEP-II в г. Стэнфорд в США) на встречных электронных и позитронных пучках. Для изучения *B*-мезонов с легкими кварками (как  $B_d = d\bar{b}$ ) эти установки, работающие при сравнительно низких энергиях, гораздо лучше любых других ускорителей, потому что они дают очень чистый сигнал (мезоны образуются от распада резонанса  $\Upsilon(4S)$ ). Однако в случае более тяжелых *B*-мезонов (таких как  $B_s = s\bar{b}$ ) их создание путем подобного резонанса невозможно, и на протонных коллайдерах результаты измерений имеют гораздо большую статистику (сечения образования гораздо выше). Таким образом, в этом случае ЛНС имеет большое преимущество перед *B*-фабриками.

**2.6. Другие физические явления, которые можно исследовать на ЛНС.** Приведенные выше физические темы — только самые наглядные примеры той физики, которой занимаются во время анализа данных, полученных с помощью ЛНС. Есть большое количество теорий «экзотической» физики, которые можно пытаться проверить на этом коллайдере. К ним относятся такие объекты, как лептокварки, гравитоны, тяжелые нейтрино, до-

полнительные поколения векторных бозонов ( $Z'$ ,  $W'$ ), теория техницвета (по-английски «technicolor»), которая предлагает отличный от хиггсовской модели альтернативный механизм электрослабой симметрии, и другие. Все это относится к области теорий за пределами Стандартной модели (beyond the Standard Model physics, или BSM).

Однако очень важной областью анализа данных является физика самой Стандартной модели (например, измерение масс векторных бозонов или свойств топ-кварка). Хотя многие из относящихся к ней явлений уже хорошо изучены, это очень важно по двум причинам.

Во-первых, проверка известных явлений на новой установке — это отличный способ ее калибровки. Если, например, массы известных частиц будут отличаться от тех, которые были измерены раньше, это позволит не только улучшить существующие результаты, но и даст возможность обнаружить дефекты детекторов или ошибки в программном обеспечении.

Во-вторых, небольшие отклонения измеренных значений от тех, которые предсказывает теория в рамках Стандартной модели, могут дать косвенную информацию о физических эффектах, недоступных непосредственным измерениям (например, потому что они вызываются неизвестными до сих пор частицами с настолько большими массами, что они не могут быть рождены в LHC). В таком случае физики работают на «precision frontier», т. е. на пределе доступной точности, а не на «energy frontier», т. е. на пределе доступных энергий (см. п. 1.1).

### 3. КАКОЙ УСКОРИТЕЛЬ НАМ ЛУЧШЕ ПОСТРОИТЬ?

В физике элементарных частиц используют два вида ускорителей [4]: те, в которых ускоряемые частицы попадают в неподвижную мишень, и коллайдеры, где сталкиваются два встречных пучка (рис. 4). Понятно, что гораздо проще попасть в мишень диаметром несколько миллиметров или еще больше, чем произвести столкновение с другой частицей, диаметр которой составляет около одного фемтометра ( $10^{-15}$  м в случае протона)

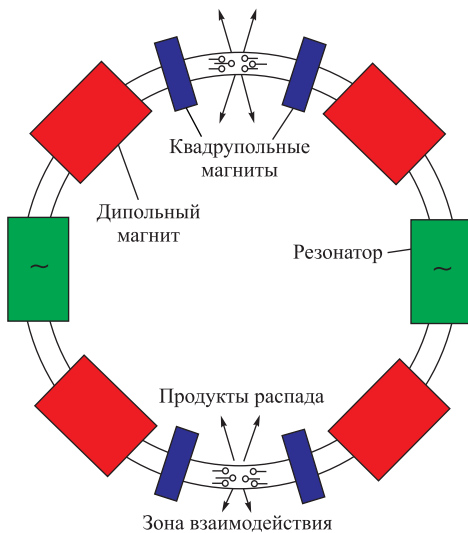


Рис. 4. Общая схема коллайдера с основными элементами: дипольные магниты удерживают частицы на круглой орбите, квадрупольные магниты фокусируют пучки частиц, а резонаторы повышают энергию пролетающих частиц. В зонах взаимодействия установлены детекторы, в которых регистрируются продукты распада

или еще гораздо меньше (в случае столкновений между электронами и позитронами). Поэтому для получения максимального количества событий при сравнительно невысоких энергиях (например, в нейтринной физике) используют ускорители с неподвижной мишенью (например, ускоритель SPS в ЦЕРН или ускоритель J-PARC в Японии).

Конечно, в случае частиц слово «диаметр» не совсем соответствует физической реальности, но можно достаточно хорошо описать вероятность взаимодействия с частицей с помощью ее «сечения», представляя себе при этом частицу в виде твердого шарика с определенным радиусом  $R$  или сечением  $A$  (где  $A = R^2 \times \pi$ ).

**3.1. Зачем нужен коллайдер?** Несмотря на приведенный выше аргумент в пользу ускорителей с неподвижной мишенью, в настоящее время в физике элементарных частиц часто применяют именно коллайдеры. Одна из причин — максимальная энергия столкновения в системе центра масс, доступная ускорителю (как раз это и объясняет, почему LHC — коллайдер [5]).

Можно было бы наивно предположить, что нет такой уж большой разницы в том, попадает ли движущаяся частица на покоящуюся частицу или на летящую ей навстречу. Однако при скоростях частиц, приближающихся к скорости света, необходимо учитывать релятивистскую кинематику, и тогда оказывается, что разница очень существенная.

Если в коллайдере сталкиваются частицы одинаковой массы и энергии, то «инвариантная масса» равняется сумме энергий двух частиц:

$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ -\vec{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2E \\ \vec{0} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Напомним, что «инвариантная масса» четырехвектора  $p^\mu$  определяется как  $\sqrt{p^\mu p_\mu}$  [3]. Если  $p^\mu$  — четырехимпульс частицы, то инвариантная масса равняется массе этой частицы. Инвариантная масса четырехвектора системы двух взаимодействующих частиц устанавливает предел для массы новых частиц, рождение которых возможно во время столкновения.

Если, с другой стороны, обстреливать частицами массы  $m$  мишень, состоящую из таких же частиц, то получаем

$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m \\ \vec{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E + m \\ \vec{p} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

а инвариантная масса  $M$  продуктов столкновения определяется как

$$M^2 = (E + m)^2 - \vec{p}^2 = E^2 + 2Em + m^2 - (E^2 - m^2) = 2Em + 2m^2. \quad (3)$$

Если пучок и мишень состоят из протонов и мы измеряем энергию в единицах ГэВ, можно задать  $m = 1$ . А если в этом случае энергия пучка высокая в сравнении с массой частиц ( $E \gg m$ ), мы получим

$$M = \sqrt{2E}. \quad (4)$$

В настоящее время пучки LHC имеют энергию 3500 ГэВ, так что максимум энергии, доступный в системе центра масс, составляет 7000 ГэВ. Чтобы достичь такой же энергии столкновения в системе центра масс с помощью неподвижной мишени, пучок должен был бы иметь энергию  $7000^2/2 = 24\,500\,000$  ГэВ!



Таких пучков мы не можем генерировать на Земле в настоящее время, и вряд ли это когда-нибудь удастся. Поэтому для получения таких высоких энергий необходимо использовать принцип работы коллайдера. Однако не во всех случаях достижение максимальной возможной энергии в системе центра масс является целью, которую пытаются достичь с помощью коллайдера. Например,  $K$ - и  $B$ -бозоны можно очень легко генерировать на неподвижной мишени. Тем не менее упомянутые выше в п. 1.1  $\phi$ -фабрика DAΦNE в Италии и  $B$ -фабрика KEК-B в Японии, служащие источником именно этих частиц, являются коллайдерами. В их случае выбор технологии коллайдера позволяет получать желаемые частицы очень «чистым» образом, с гораздо меньшей примесью других частиц, чем это было бы возможно сделать на неподвижной мишени.

**3.2. Кто мощнее — ЛНС или космос?** Давайте сравним вычисленную выше энергию пучка с космическими лучами высокой энергии. Самые высокие энергии частиц, измеренные в космических лучах, составляют  $10^{19} - 10^{20}$  эВ, т. е.  $10^{10} - 10^{11}$  ГэВ (почему-то астрофизики предпочитают единицу эВ, в то время как на ускорителях скорее используют МэВ, ГэВ и ТэВ). Согласно соотношению (4) это соответствует энергии в системе центра масс в несколько сотен ТэВ ( $10^5$  ГэВ), что на два порядка выше энергии столкновения, достигнутой в ЛНС.

Как мы видели выше в п. 1.1, ускоритель нужен не только для достижения высокой энергии, но и для создания достаточно интенсивных пучков, дающих возможность исследовать редкие события. Но тем не менее можно сказать, что такие столкновения, которые человек производит искусственным образом на ЛНС, испокон веков происходят на Земле, когда высокоэнергетические космические лучи взаимодействуют с ядрами в земной атмосфере.

**3.3. Не бойтесь черных дыр!** Этот факт был важным аргументом, когда началась дискуссия вокруг возможности возникновения микроскопических черных дыр на ЛНС и опасности, которую эти черные дыры могли бы представлять для нашей планеты. А что если физики-теоретики ошиблись и эти черные дыры не испаряются так быстро, как предполагают; не могут ли они тогда расти все больше и больше и в конечном итоге поглотить всю Землю? В этом плане космические лучи могут нас успокоить: если бы это было возможно, то случилось бы еще очень давно и Земли бы уже попросту не было.

Конечно, разница есть еще и в том, что в случае столкновений космических частиц с ядрами в атмосфере центр масс имеет всегда очень большой импульс и черная дыра могла бы так быстро улететь, что не имела бы возможности дальше расти, в то время как на коллайдере не исключено, что центр масс созданной частицы или черной дыры покоится в лабораторной системе. На это можно возразить, что быстро летящая черная дыра затормозилась бы в Земле за счет своего электрического заряда. Если бы по какой-либо неизвестной нам причине все образующиеся черные дыры были бы нейтральными, то они, пожалуй, могли бы пролететь и через всю Землю. Однако есть нейтронные звезды, плотность которых настолько велика, что они затормозили бы и нейтральные черные дыры, которые остановились бы внутри нейтронных звезд, и превратили бы их в макроскопические черные дыры. Существование большого количества нейтронных звезд, однако, показывает, что этого в природе не происходит и что нашей планете не угрожает опасность со стороны ЛНС.

В случае новых технологических разработок всегда важно задавать себе вопрос о возможных отрицательных последствиях и опасностях. В нашем случае на этот вопрос нашли однозначный ответ. Это хороший пример того, как одна дисциплина — в данном

случае астрофизика — может способствовать развитию другого направления в науке — в данном случае ускорительной техники.

**3.4. Какой коллайдер лучше — электронный или протонный?** ЛHC построили в туннеле, где раньше находился электронно-позитронный коллайдер LEP (Large Electron-Positron Collider). Почему же решили поменять хорошо функционирующий ускоритель на другой? Дело в том, что протонные ускорители позволяют достичь гораздо более высоких энергий, что связано с уменьшением потерь энергии на так называемое синхротронное излучение. Ускоряемый заряд излучает энергию, а в кольцевом ускорителе должна постоянно действовать ускоряющая сила магнитного поля, чтобы удерживать частицы на орбите.

Релятивистский расчет показывает, что эта потеря энергии для частицы с массой покоя  $m$  и с энергией  $E$  пропорциональна четвертой степени лоренц-фактора:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{E}{mc^2} \quad (5)$$

и обратно пропорциональна радиусу ускорителя  $R$ :

$$\Delta E \sim \frac{\gamma^4}{R} = \frac{1}{R} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4. \quad (6)$$

Так как протон приблизительно в 2000 раз тяжелее электрона, этот фактор очень сильно отличается для протонных и электронных ускорителей. Для протонов даже на ЛHC при энергии пучка 3500 ГэВ это не очень существенная потеря, в то время как на LEP, в котором максимальная энергия электронных и позитронных пучков составляла около 100 ГэВ, потеря энергии из-за синхротронной радиации была лимитирующим фактором.

Видно, что очень трудно компенсировать эту потерю энергии увеличением радиуса ускорителя, так как  $\Delta E \sim \frac{1}{m^4 R}$ . Электронный ускоритель с такими же небольшими потерями за счет синхротронной радиации, как на ЛHC, окружность которого составляет 27 км, должен был бы иметь окружность длиной  $27 \cdot 2000^4 \approx 4 \cdot 10^{14}$  км, или около 40 световых лет!

В связи с этим интересно задуматься и над скоростью частиц в ускорителе. Конечно, при таких энергиях, которые гораздо выше их массы покоя, все частицы летят «почти» со скоростью света, но какая все-таки остается разница между их скоростью и скоростью света?

При высоких энергиях полная энергия частицы гораздо больше ее массы:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \gg mc^2, \quad (7)$$

так что

$$1 - \frac{v^2}{c^2} \ll 1 \quad (8)$$

и скорость частицы близка к скорости света:

$$\Delta v = c - v \ll 1. \quad (9)$$

Тогда получается, что лоренц-фактор

$$\frac{E}{mc^2} = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(c - \Delta v)^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - [1 - \frac{2\Delta v}{c} + \frac{\Delta v^2}{c^2}]}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{2\Delta v}{c}}} \quad (10)$$

и относительная разница скорости частицы и скорости света

$$\frac{\Delta v}{c} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2. \quad (11)$$

Измеряя энергии в ГэВ и используя массы

— протона  $m_p c^2 \approx 1$ ,

— электрона  $m_e c^2 \approx 0,0005 = 5 \cdot 10^{-4} \approx \frac{m_p c^2}{2000}$ , мы получаем следующие скорости:

Энергия, ГэВ	$\Delta v$	
	$p$	$e$
1	$5 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$
10	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-9}$
100	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-11}$
1000	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-13}$
10000	$5 \cdot 10^{-9}$	$1,25 \cdot 10^{-15}$

Значит, протоны в ЛНС с энергиями в несколько тысяч ГэВ летят гораздо «медленнее», чем электроны в LEP, энергия которых составляла «всего лишь» около 100 ГэВ.

А почему вообще строят электронные коллайдеры, если они настолько менее эффективны с точки зрения энергетических потерь? Дело в том, что электрон — действительно элементарная частица, в то время как протон состоит из кварков и глюонов. Когда сталкиваются два электрона (или электрон с позитроном), мы видим только это «элементарное» событие. Центр масс системы может или покоиться в лабораторной системе (если пучки имеют одинаковую энергию), или двигаться в одном направлении с точно известным импульсом (последний подход используется в так называемых асимметричных  $B$ -фабриках КЕК-В в Японии и РЕР-ИИ в США, о которых уже говорили в п. 2.5).

В то же время в протонном коллайдере при высоких энергиях сталкиваются отдельные «партоны» (кварки или глюоны), которые обладают неизвестным импульсом (поскольку в любой момент каждый партон имеет неизвестную долю импульса всего протона). Другие партоны протона («spectators», или «наблюдатели») рассеиваются и делают интерпретацию события более сложной (рис. 5 и 6). Поэтому электронные коллайдеры удобнее для прецизионных измерений, в то время как протонные коллайдеры дают более высокие энергии и тем самым позволяют легче обнаружить новые частицы большой массы. Говорят, что протонные коллайдеры — «машины для открытий» (discovery machines), тогда как электронные коллайдеры — «машины для прецизионных измерений» (precision machines).

Конструирование протонных ускорителей также имеет свои технические проблемы. В то время как в электронных ускорителях нужны мощные ускоряющие резонаторы для

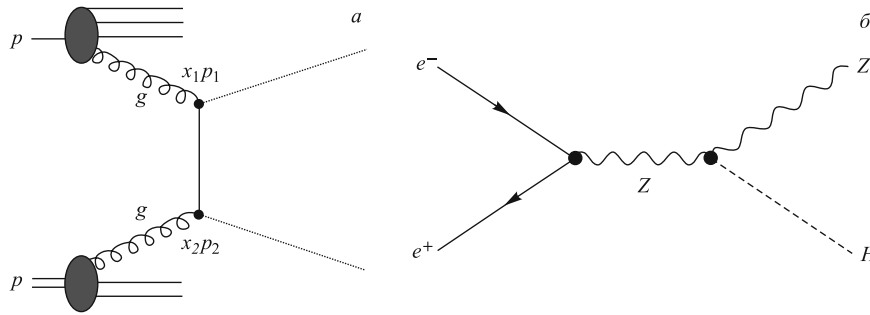


Рис. 5. Во время столкновения двух протонов при высоких энергиях соударяются на самом деле два партона, а остальные — кварки и глюоны — создают нежелательный фон (а). В отличие от этого электроны и позитроны являются действительно «элементарными» частицами, и анализ таких «чистых» событий гораздо проще (б)

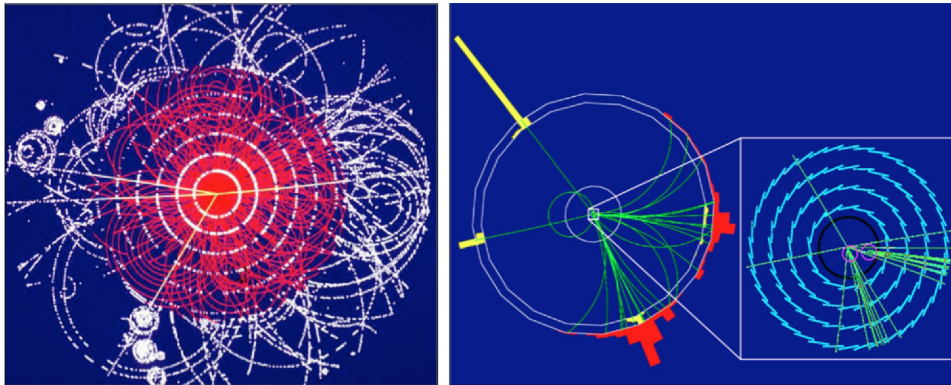


Рис. 6. Моделирование распада бозона Хиггса в LHC и в планируемом международном линейном электронно-позитронном коллайдере

компенсации потерь от синхротронного излучения, а дипольные магниты — для удержания частиц на кольцевой орбите сравнительно небольшого размера, в протонных ускорителях все наоборот. Резонаторы небольшие, потому что потери малы, и можно протоны ускорять постепенно, на протяжении сравнительно долгого времени (около 15 мин). Зато дипольные магниты (рис. 7) должны быть очень мощными, чтобы удержать тяжелые протоны на орбите. Таким образом, для обоих видов ускорителей нужно много электрической энергии, только она тратится в разных местах. В современных ускорителях и магниты, и резонаторы — сверхпроводящие. В этом случае электрические потери меньше, но зато больше энергии уходит на охлаждение жидкого гелия, необходимого для создания сверхпроводящего режима. Как говорят американцы, «There is no such thing as a free lunch» («Нет бесплатного обеда»)!

Конечно, было бы лучше всего объединить оба преимущества в одной установке. Один подход — построить электронный коллайдер линейным, а не в виде кольца. Тогда потребуются очень мощные ускоряющие резонаторы, чтобы на не слишком большом расстоянии (несколько десятков километров) разогнать частицы до конечной энергии. Кроме того, в таком ускорителе каждый электрон имеет шанс вступить во взаимо-

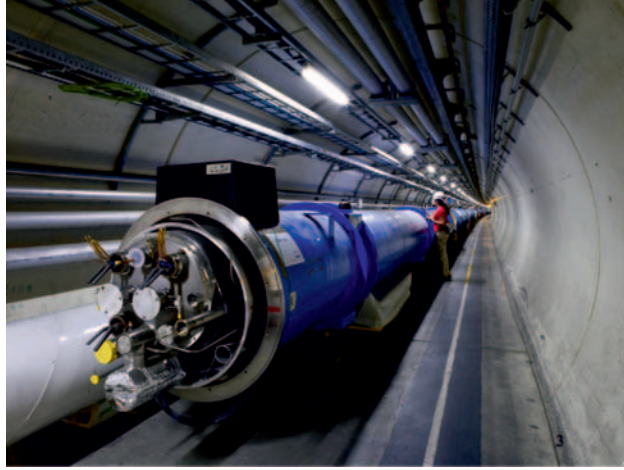


Рис. 7. Дипольный магнит LHC в туннеле ускорителя

действие с другим электроном только один раз, в то время как в кольце те же электроны пролетают миллионы раз (каждый раз сталкиваются только очень немногие частицы в пучке). Зато отпадают потери от синхротронного излучения в магнитном поле.

Другая идея — построить мюонный коллайдер. Мюоны — частицы «элементарные», точно как электроны, но примерно в 200 раз тяжелее (и только в 10 раз легче протонов).

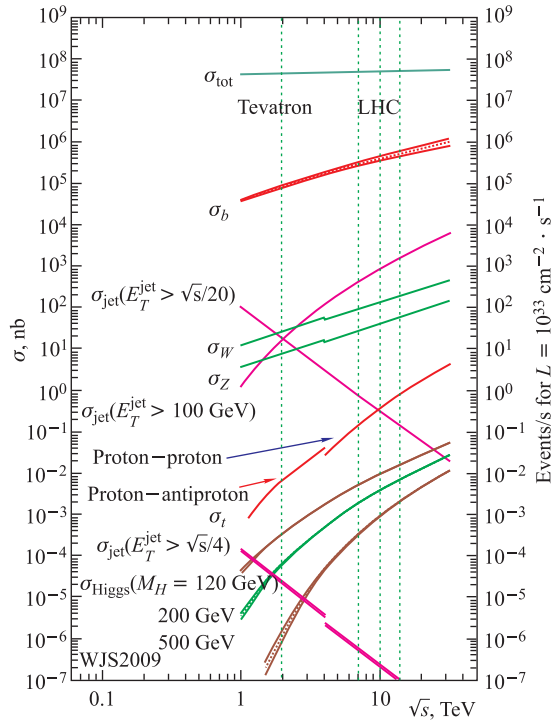


Рис. 8. Сечения различных процессов, возможных на адронном коллайдере, в зависимости от полной энергии в системе центра масс ( $\sqrt{s}$ ). До энергий  $\sqrt{s} = 4$  ТэВ сечения даны для столкновений протон-антипротон, при более высоких энергиях сечения указаны для столкновений протон-протон

Тут проблема заключается в том, что они не стабильные, их надо произвести, потом очень быстро ускорить и довести до столкновения, прежде чем они успеют распасться. Реализовать такой подход очень непросто, и поэтому следующим коллайдером после LHC будет, по всей вероятности, линейный электронно-позитронный коллайдер.

В электронных коллайдерах всегда сталкивают электроны с позитронами потому, что это дает большие сечения при рождении новых частиц и облегчает интерпретацию событий (все квантовые числа сталкивающейся системы равны нулю). В то время как производить позитроны сравнительно просто, создание антипротонов гораздо более сложно. Поэтому в отличие от бывших адронных коллайдеров (SPS в ЦЕРН и тэватрон в FNAL под Чикаго в США), где протоны сталкивались с антипротонами, в LHC используются только протоны. Из протонов можно создать гораздо более интенсивные пучки, чем из антипротонов, что с избытком компенсирует их несколько более низкие сечения взаимодействия (рис. 8).

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА LHC

Проводить столкновения между частицами при высоких энергиях — это только одна часть задачи физика-экспериментатора. Потом, конечно, необходимо исследовать все продукты, возникающие при этих столкновениях. Для этого используют несколько больших установок — детекторов, которые расположены в точках пересечения пучков LHC.

Стоит отметить, что большинство частиц, которые возникают при столкновениях, имеют такое короткое время жизни, что могут пролететь только расстояния гораздо меньше миллиметра и не доходят до детекторов. Их можно обнаружить только с помощью продуктов их распада. Можно подумать, что это сильное ограничение, но на самом деле это не так. И в обычной жизни мы воспринимаем от окружающей среды только то, в основном, что видим или слышим, иными словами, то, что нам передают фотоны и звуковые волны, испускаемые интересующими нас предметами. В случае физики элементарных частиц у нас есть даже несколько больше таких каналов передачи информации, или «частиц-посланников»: фотоны, электроны и мюоны, а также различные адроны, которые живут достаточно долго ( $\pi$ - и  $K$ -мезоны, протоны и др.). Для наблюдения этих частиц служат специализированные детекторы, такие как: кремниевые трековые детекторы (для всех заряженных частиц), электромагнитные калориметры (для фотонов и электронов), адронные калориметры, мюонные камеры и другие. (К сожалению, на языке физики высоких энергий слово «детектор» имеет два разных значения: с одной стороны, специализированное устройство для детектирования определенного вида частиц, а с другой стороны, совокупность таких устройств, расположенных в одном месте и регистрирующих определенную информацию от одних и тех же событий, т. е. установка.)

Есть и частицы, которые мы не «видим» в детекторах, но которые тем не менее дают информацию о событии. Это возможно путем использования закона сохранения импульса. Как мы убедились выше (п. 3.4), в случае протонов импульс продукта столкновения вдоль оси пучка неизвестен (в отличие от электронного коллайдера). Но из закона сохранения импульса следует, что компонента полного импульса, поперечная к направлению протонного пучка, должна равняться нулю. Если сумма поперечных импульсов всех частиц, наблюдаемых в детекторе, отличается от нуля, мы делаем вывод,

что в противоположную сторону полетела как минимум одна частица, которая в детекторе не оставила никакого следа. Этот «недостающий поперечный импульс» (говорят также «недостающая поперечная энергия»; по-английски «missing transverse momentum» или «missing transverse energy») может относиться к нейтрину, известной нам частице, сечение взаимодействия которой в детекторе весьма небольшое (в других лабораториях есть специализированные, очень большие нейтринные детекторы, но даже они регистрируют только очень небольшую долю попавших в них нейтрино, так что в экспериментах ЛНС мы можем их считать невидимыми). С другой стороны, недостающий поперечный импульс может быть унесен и неизвестной еще частицей, которая, может быть, даже стабильная, но не оставляет следов в нашем детекторе.

Как же можно «увидеть» короткоживущие частицы, которые не долетают до детектора? О них мы получаем информацию посредством их продуктов распада. На основе гипотезы, что группа каких-то сигналов в нашем детекторе относится к продуктам распада одной частицы, из их импульсов с помощью формул теории относительности можем вычислить массу этой частицы. Когда гипотеза верна, полученная таким образом «инвариантная масса» будет совпадать с массой соответствующей частицы в рамках экспериментальной погрешности. Когда гипотеза неверна (потому что мы каких-то продуктов распада не зарегистрировали, или, наоборот, включили сигналы, относящиеся к другому распаду), полученное значение не будет находиться в пике, соответствующем массе частицы, а будет входить в «размазанный» фон. С помощью пиков можно идентифицировать известные частицы с небольшим временем жизни (рис. 9) или же надеяться обнаружить новые пики, относящиеся к пока еще не открытым частицам.

Рис. 10 показывает детектор CMS — одну из четырех крупных установок на ЛНС (см. [6]). Протонные пучки пересекаются в центре детектора. Вокруг него расположены различные системы, или «субдетекторы»: ближе всего к центру кремниевый трековый детектор, потом электромагнитный калориметр и адронный калориметр. Вокруг него видна сверхпроводящая катушка большого соленоидального магнита, позволяющего определить

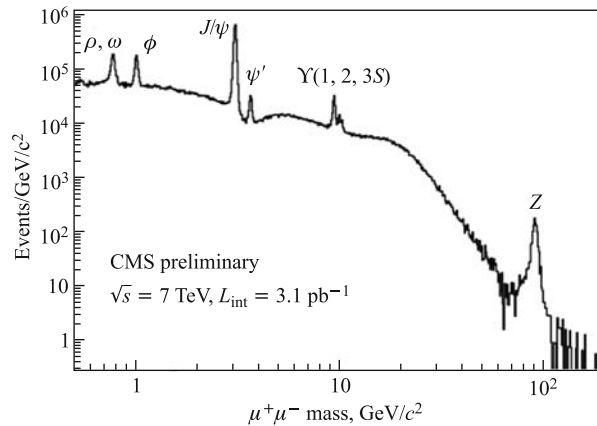


Рис. 9. Спектр инвариантной массы, полученной от событий с сигналами двух мюонов противоположного заряда. Видны пики различных известных нейтральных частиц, которые могут распасться на два мюона:  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\Upsilon$ , и  $Z$ -бозон, а также «размазанный» фон от событий, где гипотеза распада была неверна

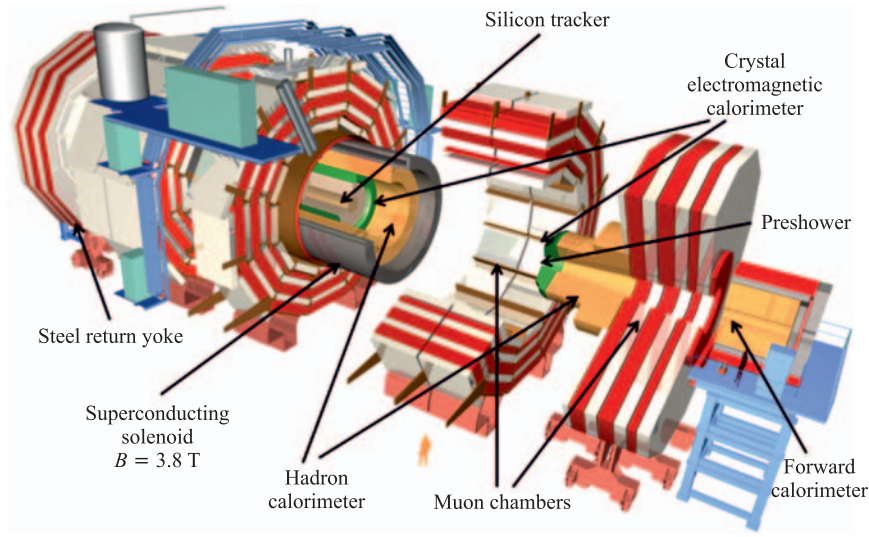


Рис. 10. Схема CMS (Compact Muon Solenoid), установленного на одной из точек пересечения пучков LHC. Для технического обслуживания можно раздвинуть отдельные «колеса», из которых состоит весь детектор, как показано на рисунке. Во время эксплуатации колеса сдвигаются и детектор плотно охватывает зону взаимодействия

знак заряда и импульс заряженных частиц на основе изгиба их треков. Снаружи, вокруг катушки, установлены различные виды мюонных камер и железное ярмо для замыкания магнитной цепи.

Кроме CMS, на LHC есть еще вторая установка общего назначения — ATLAS [7]. В экспериментах на этих двух установках ведут поиск всех возможных проявлений «новой физики», которые можно ожидать увидеть на этом коллайдере. Помимо этих двух экспериментов есть еще два детектора со специализированной программой исследований. Конструкция эксперимента ALICE [8] оптимизирована для исследований по физике столкновений тяжелых ионов. В таких столкновениях появляется очень большое количество треков частиц сравнительно низкой энергии, которые трудно разрешить с помощью детектора типа ATLAS или CMS. Поэтому в центре детектора ALICE находится времяпроекционная камера, которая позволяет отделить друг от друга множество треков низкой энергии. Недосток такой камеры заключается в том, что она работает сравнительно медленно и не позволяет исследовать события, появляющиеся с высокой частотой. Однако в случае использования ионов свинца интенсивность пучков гораздо ниже, чем при работе коллайдера в протонном режиме, так что это ограничение не столь существенно.

Есть еще один детектор, который был специально построен для исследования  $B$ -физики, — LHCb [9]. Для создания  $B$ -мезонов не требуется очень большая энергия, но важно, чтобы система центра масс не покоилась, а двигалась сравнительно быстро. Этот прием позволяет определить время распада  $B$ -мезонов путем точного измерения местоположения вершины. Поэтому физики интересуются прежде всего событиями, в которых продукты распада летят близко к оси протонного пучка ускорителя. Для такого эксперимента нужно отличное пространственное разрешение, но только в узкой области.



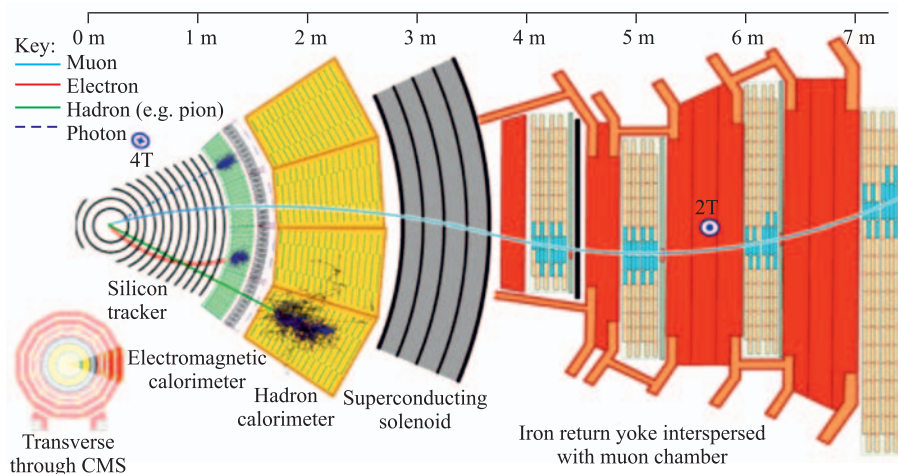


Рис. 11. Треки различных видов частиц и созданные ими ливни в калориметрах в детекторе CMS. Направления магнитного поля внутри и снаружи сверхпроводящей катушки противоположные, поэтому треки мюонов имеют форму латинской буквы *S*. Другие частицы, видимые в детекторе, останавливаются уже в калориметрах

Поэтому детектор эксперимента LHCb выглядит скорее как эксперимент с неподвижной мишенью: все устройства для детектирования частиц расположены только в одну сторону от точки взаимодействия пучков (чтобы снизить себестоимость, этот детектор построен несимметричным, а продукты распада исследуют только по одну сторону от зоны взаимодействия).

## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ НА LHC

Такие крупные установки, как LHC, и выполняемые на ней эксперименты требуют много времени и усилий на техническую разработку компонентов, так как ведется поиск очень редких событий. Для набора соответствующей статистики также требуется много лет эксплуатации. В то же время можно, конечно, постараться усовершенствовать технические параметры ускорителя и детекторов, чтобы достичь более высоких энергий, набрать больше данных и анализировать их с более высокой точностью.

Первая попытка запустить LHC в 2008 г. не удалась из-за технической аварии. После проведения ремонта решили запустить ускоритель не с номинальной энергией пучка 7 ТэВ, а только с половиной этой величины, что дает возможность эксплуатировать сверхпроводящие дипольные магниты безопасным образом при более низком магнитном поле и, следовательно, менее сильных электрических токах. Поэтому, начиная с весны 2010 г., коллайдер LHC работает при энергии пучков 3,5 ТэВ, что дает энергию столкновения в центре масс 7 ТэВ.

Планируются остановка коллайдера и проведение работ, которые позволят достичь первоначально запланированной энергии пучков 7 ТэВ, т. е. энергии столкновения 14 ТэВ. Это максимальная энергия, на которую рассчитан LHC.

Однако это будет еще не окончанием технических доработок. В дальнейшем планируется повысить светимость коллайдера. Ее можно определить как произведение числа частиц в обоих встречных пучках, пересекающихся за единицу времени в точке взаимодействия, делимое на сечение пучков:  $L = N_1 \times N_2/A$ . При конкретном сечении взаимодействия процесса число наблюдаемых событий пропорционально светимости. Таким образом получается, что светимость равняется наблюдаемой на ускорителе частоте процесса, делимой на соответствующее сечение взаимодействия. Повышение светимости позволит исследовать еще более редкие физические процессы, чем доступные в настоящее время.

Правда, при этом возникает дополнительная трудность для физиков-экспериментаторов, которые анализируют данные: при каждом столкновении двух пакетов протонов рассеивается большое количество протонов, сигналы всех этих процессов регистрируются детектором одновременно, и требуются усилия, чтобы их отделить друг от друга. Этот эффект называется «наложением событий», или по-английски «pileup». В настоящее время при каждом прохождении двух пакетов протонов друг через друга сталкивается около 20 протонов, а в будущем не исключено, что это число будет равняться 100 или больше. В таком случае потребуются дополнительные работы для повышения разрешающей способности детекторов.

Ожидается, что LHC и установленные на нем детекторы будут эксплуатироваться как минимум 15–20 лет, так что нынешние школьники будут еще иметь возможность защищать диссертации на основе анализа данных, полученных на LHC.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nachtmann O. et al.* Elementary Particle Physics: Concepts and Phenomena. Springer-Verlag, 1990; *Perkins D. H.* Introduction to High Energy Physics. Addison-Wesley, 1987.
2. *Martin S. P.* A Supersymmetry Primer. hep-ph/9709356.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. Т. 2: Теоретическая физика. М.: Физматлит, 2006.
4. *Bryant P. J., Johnson K.* The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings. Cambridge Univ. Press, 1993.
5. LHC Machine // Eds.: *Evans L., Bryant P.* JINST. 2008. V. 3. P. S08001.
6. *The CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // Ibid. 2008. V. 3. P. S08004.
7. *The ATLAS Collab.* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // Ibid. 2008. V. 3. P. S08003.
8. *The ALICE Collab.* The ALICE Experiment at the CERN LHC // Ibid. 2008. V. 3. P. S08002.
9. *The LHCb Collab.* The LHCb Detector at the LHC // Ibid. 2008. V. 3. P. S08005.