

Not Even Wrong

Peter Woit

Jonathan Cape, London, 2006

Глава 2. Средства производства

*Буржуазия не может
существовать, постоянно не
реконструируя средства
производства...*

Карл Маркс,
“Коммунистический
Манифест”¹

Центральной темой этой книги является новейшая история и современное состояние теоретической физики элементарных частиц, в особенности ее отношений с математикой, но чтобы хоть что-то в этом понять, сначала надо рассмотреть материальные условия, являющиеся основой проведения исследований в физике элементарных частиц. Ускорители и детекторы частиц — вот “средства производства”, используемые для получения того базиса экспериментальных данных, на котором строятся все теоретизирования об элементарных частицах. Продолжающееся усовершенствование и улучшение этих инструментов эксперимента и являлось на протяжении большей части прошлого века двигателем прогресса теории частиц. В данной главе разъясняются основные принципы работы ускорителей, вкратце описывается их история и нынешнее состояние, и наконец, рассматриваются их перспективы на будущее.

Основные принципы

Прежде чем мы сможем объяснить любой из основных физических принципов, необходимых для понимания того, как делается экспериментальная физика элементарных частиц, должны быть установлены определенные фундаментальные соглашения о том, как описывать измерения. Это вопрос о том, какую систему единиц измерения следует использовать. Есть много различных возможных выборов единиц, используемых в разных разделах физики, но у физиков элементарных частиц имеется один предпочтительный набор, иногда называемый “Богом данными” или “естественными” единицами. Они выбираются так, чтобы воспользовавшись основными особенностями специальной теории относительности и квантовой механики избавиться, насколько возможно, от констант, зависящих от единиц измерения. Выбор делается так, чтобы эти константы равнялись 1.

Фундаментальным постулатом специальной относительности является утверждение, что пространство и время образуют единое целое, причем скорость света всегда постоянна, независимо от того, в какой системе отсчета она измеряется. Это и делает предмет парадоксальным с точки зрения привычного опыта: если я попытаюсь двигаться

с большой скоростью в том же направлении, что и луч света, то независимо от того как быстро я буду передвигаться, свет всегда будет удаляться от меня с одной и той же скоростью. Уравнения специальной относительности упрощаются, если единицы измерения для пространства и времени выбраны так, что скорость света является равной числу 1. Например, один из способов сделать это таков: надо заметить, что свет проходит 300 000 километров в секунду, таким образом, он проходит приблизительно фут за наносекунду (приставка “нано” означает “миллиардный”). В результате, измерение длин в футах и времен в наносекундах сделало бы скорость света примерно единичной. Принимая скорость света равной 1, мы фиксируем выбор единиц измерения времени выбором единиц измерения пространства, или наоборот.

Возможно самым известным уравнением, относящимся к специальной теории относительности Эйнштейна, является $E = mc^2$, уравнение, связывающее энергию (E), массу (m) и скорость света (c). Заметьте, что используя единицы, в которых скорость света “ c ” положена равной 1, мы упрощаем это уравнение до $E = m$, таким образом энергия и масса в контексте, описанном этим уравнением, становятся равными. Поэтому физики частиц используют одни и те же единицы для измерения энергии и массы.

В то время как специальная теория относительности связывает между собой методы измерения пространственных размеров и методы измерения времени, квантовая механика связывает измерения времени и энергии. Это будет подробнее объясняться позже, но вот два основных факта квантовой механики:

1. Имеется математический объект, называемый “вектором состояния”, который описывает состояние Вселенной в данный момент времени.
2. Кроме вектора состояния, в теории имеется другой фундаментальный математический объект, называемый гамильтонианом. Это оператор на векторах состояния, что означает, что он преобразует данный вектор состояния в новый вектор. Действуя на вектор состояния общего вида, соответствующий данному моменту времени, он говорит нам, как этот вектор состояния изменится за бесконечно малый дополнительный промежуток времени. Кроме того, если этот вектор состояния соответствует состоянию Вселенной с определенной энергией, гамильтониан сообщает нам, чему равняется эта энергия.

Тот факт, что гамильтониан одновременно описывает как энергию вектора состояния, так и то, насколько быстро вектор состояния изменяется со временем, подразумевает, что единицы, в которых измеряется энергия и единицы, в которых измеряется время, взаимосвязаны. Если Вы замените единицу времени с секунд на полусекунды, то скорость изменения вектора состояния удвоится, удвоится также и энергия. Постоянную, которая связывает единицы времени с единицами энергии, называют постоянной Планка (в честь физика Макса Планка) и традиционно обозначают буквой “ h ”. Общеизвестно, что при определении новой постоянной, в которой он нуждался, Планк сделал неудачный выбор, так как она почти всегда входит в уравнения, деленной на множитель, равный удвоенной математической постоянной пи (3.14159...). В результате физики предпочитают работать с постоянной Планка h деленной на два пи, постоянной, традиционно записываемой как \hbar с чертой и называемой “аш с чертой” (\hbar). Физики частиц выбирают свои единицы так, чтобы сделать аш с чертой равным 1, и это фиксирует единицы времени в терминах единиц энергии, или наоборот.

При таком выборе скорости света и аш с чертой, единицы расстояния связаны с единицами времени, а единицы времени связаны с единицами энергии, которые в свою очередь, как описано выше, связаны с единицами массы. Стандартное соглашение физики элементарных частиц состоит в том, чтобы выражать все в единицах энергии,

и таким образом, надо только выбрать единственную единицу измерения, ту что определяет, как выражаются энергии. Здесь теоретики кланяются экспериментаторам, которые давно нашли самым удобным измерять энергии в электрон-вольтах. Электрон-вольт (сокращенно эВ) — энергия, которую электрон набирает, перемещаясь между двумя металлическими пластинами, имеющими между собой разность напряжений в один вольт. Раз мы решили измерять энергии и массы в единицах эВ, то вышеописанный выбор констант означает, что время и пространство (измеряемые в единицах, обратных энергии) измеряются в “обратных электрон-вольтах” или $(\text{эВ})^{-1}$.

Чтобы почувствовать, на что похожи эти единицы энергии, в следующей таблице даются значения различных масс и энергий, соответствующих нескольким различным явлениям физики элементарных частиц (некоторые будут описаны позже более подробно), все в электрон-вольтах. Стандартные сокращения для больших чисел электрон-вольт включают:

$10^3 \text{ эВ} = 1 \text{ кэВ}$ (кило-электрон-вольт), $10^6 \text{ эВ} = 1 \text{ МэВ}$ (Мега-электрон-вольт), $10^9 \text{ эВ} = 1 \text{ ГэВ}$ (Гига-электрон-вольт), $10^{12} \text{ эВ} = 1 \text{ ТэВ}$ (Тера-электрон-вольт).

Энергия	Пример
0.04 эВ	Энергия атомов в воздухе при комнатной температуре
1.8-3.1 эВ	Энергия фотонов видимого света
100-100 000 эВ	Рентгеновские лучи
20 кэВ	Кинетическая энергия электронов в телевизионном мониторе
Больше 100 кэВ	Гамма-лучи
511 кэВ	Масса электрона
1-10 МэВ	Энергии, полученные в ядерных распадах
105 МэВ	Масса мюона
938 МэВ	Масса протона
93 ГэВ	Масса Z бозона
1 ТэВ	Энергия каждого протона в пучке Тэватрона

Все энергии в этой таблице соответствуют отдельной частице или фотону, таким образом, в привычных масштабах это очень малые количества энергии, 1 ТэВ это примерно кинетическая энергия (энергия движения) медленно движущегося муравья. Есть намного большая энергия, которую теоретики иногда рассматривают, “планковская энергия”, она составляет приблизительно 10^{19} ГэВ. Это предположительно масштаб энергий, на котором становятся важными квантовые эффекты гравитации. Это много более существенное количество энергии, соответствующее примерно химической энергии бензина в баке автомобиля.

В единицах, которые мы обсуждаем, единицей расстояния является обратный электрон-вольт, что в более привычных единицах составило бы около микрона (10^{-6} метров, одна миллионная метра). Время также измерено в обратных электрон-вольтах, и эта единица времени чрезвычайно коротка, примерно 4×10^{-15} секунд. Так как энергии измерены в эВ, а расстояния – в $(\text{эВ})^{-1}$, физики частиц стремятся думать о расстояниях и энергиях как о взаимозаменяемых, одно является обратным к другому. Энергия, соответствующая массе протона, равна примерно 1 ГэВ. Так как эта энергия в миллиард раз больше, чем электрон-вольт, соответствующее расстояние будет в миллиард раз меньше, т.е. $10^{-9} \times 10^{-6} = 10^{-15}$ метров. Можно считать это характерным размером протона.

Физики частиц трактуют свои исследования как относящиеся в равной мере к очень коротким расстояниям или к очень высоким энергиям. Типичные изучаемые физические процессы происходят на некотором специальном приблизительном расстоянии или при приблизительной энергии, и это называется исследуемым “масштабом” расстояний

или энергий. Для ускорителей полная энергия сталкивающихся друг с другом частиц задает масштаб энергий, который можно на них изучать. Исследование все более и более малых расстояний требует все более и более высоких энергий, и в любое данное время фундаментальное ограничение на экспериментальную информацию, которую можно собрать об элементарных частицах, задается технологическими ограничениями на энергии частиц в проводимых экспериментах.

Экспериментальная физика элементарных частиц, краткая история.

История экспериментальной физики элементарных частиц является весьма длинной и сложной; данная глава даст краткий эскиз эпизодов этой истории. Основная задача экспериментальной техники физики элементарных частиц - сблизить друг с другом две частицы и затем пронаблюдать, что при этом произойдет. Самый простой способ - сначала тем или иным путем получить пучок энергичных частиц, а затем ускорить частицы до высоких энергий в некотором ускорителе. Пучок высокоэнергетических частиц затем нацеливается на неподвижную мишень, и чтобы увидеть, какие частицы выходят из области, где пучок поражает мишень, используется некоторый детектор.

Простым примером является устройство телевизора. В телевизоре с электронно-лучевой трубкой пучок электронов (“катодных лучей”) ускоряется высоким напряжением по направлению к мишени, которой служит задняя часть экрана телевизора. Для управления пучком, где электроны достигают энергий приблизительно 20 000 электрон-вольт, используются магнитные поля. Когда пучок падает на экран, столкновения электронов с атомами экрана вызывают реакции, которые приводят к излучению фотонов света, впоследствии детектируемых глазами телезрителя, наблюдающего экран спереди. Таким образом, телевизор является ускорителем пучка электронов, а детектором, который анализирует результаты столкновений с мишенью (экраном) является человеческий глаз.

Столкновения, происходящие в телевизионном экране, вызывают изменения в уровнях энергии атомов экрана, поэтому телевизор мог бы использоваться для изучения атомной физики. Если Вы интересуетесь еще меньшими масштабами или более высокими энергиями, телевизор уже не поможет, так как электронный луч не имеет достаточной энергии, чтобы разрушить атом и добраться до более фундаментальной физики. Чтобы увидеть, что происходит, когда электроны сталкиваются не с атомом в целом, а с его составляющими (ядро и электроны, связанные с ядром), необходимы намного более высокие энергии, чем имеющие место в электронно-лучевой трубке.

В прошлом веке было исследовано много различных возможных источников получения более энергичных частиц. Первый из этих источников - естественная радиоактивность, например радиоактивный распад радия, порождающий альфа-частицы (ядра гелия) с энергией приблизительно 4 МэВ, или в 200 раз больше, чем электронные пучки из электронно-лучевой трубки. В 1910 г. Эрнест Резерфорд, работавший в Кембридже, стал первым, кто обнаружил, что большая часть массы атома содержится в очень маленьком ядре. Он сделал это, пропуская пучок альфа-частиц, порожденный радием, через тонкий лист фольги. Альфа-частицы отклонялись атомами, содержащимися в фольге, и давали картину рассеяния. Резерфорд смог измерить эту картину с помощью экспериментаторов, наблюдавших вспышки, вызываемые альфа-частицами, когда они ударялись в экран, покрытый сульфидом цинка. Полученная картина показала, что альфа-частицы сталкиваются с чем-то очень маленьким, намного меньшим, чем атом.

Резерфорд, таким образом, имел в своем распоряжении пучок альфа-частиц с энергией 4 МэВ и, в качестве детектора, экран, покрытый сульфидом цинка, дававшим вспышки при попадании альфа-частиц. Следующее продвижение технологии имело

место также в 1910 г., благодаря изобретению Чарльзом Вильсоном туманной камеры. Этот намного более тонкий детектор частиц работает с помощью быстрого уменьшения давления в стеклянной камере, где водяной пар конденсируется вдоль следа ионизированных частиц, оставленных энергичной частицей, пролетающей через камеру. Возможность видеть следы всех заряженных частиц, участвующих в столкновении, дает гораздо больше информации о том, что произошло, чем вспышки, регистрируемые в эксперименте Резерфорда.

После 1910 г. был открыт другой источник энергичных частиц, “космические лучи” приходящие с небес. Это частицы, имеющие энергии, как правило, в диапазоне нескольких сотен МэВ, но иногда и много выше. Экспериментальная физика элементарных частиц вплоть до конца 1940-х была занята задачей разобраться в природе космических лучей. Эксперименты включали наблюдение столкновений частиц, возникающих в результате взаимодействия входящих космических лучей с атмосферой или с неподвижной экспериментальной мишенью. В конечном счете оказалось, что большинство космических лучей вызвано энергичными протонами, ударяющимися в верхние слои атмосферы и создающими ливни пионов, мюонов и электронов, доминирующие среди того, что экспериментаторы могут наблюдать на уровне земли. Усовершенствования экспериментов с космическими лучами происходили благодаря сооружению все лучших и лучших детекторов, таких как счетчик Гейгера и фотографические эмульсии. Эти детекторы поднимались на горные вершины или запускались на воздушных шарах, чтобы получить как можно больше самых энергичных столкновений. В этот период состоялись открытия многих новых элементарных частиц, включая позитрон в 1932 г., мюон в 1937 г. и заряженные пионы и каоны в 1947 г.

Космические лучи дают довольно слабый и неконтролируемый пучок частиц с энергиями в сотни МэВ и выше, причем пучок сильно редет при более высоких энергиях. Физики частиц очень хотели получить доступ к намного более интенсивным высокоэнергетическим пучкам частиц, энергией и направлением которых можно было бы точно управлять. Чтобы достичь этого, требовалось найти новые методы ускорения большого числа частиц до высоких энергий. Первый такой ускоритель частиц был разработан и построен Джоном Коккрофтом и Эрнестом Уолтоном в Кэвендишской лаборатории в Кембридже в 1930 г. Эта машина использовала 200-киловольтный трансформатор, и могла ускорить пучок протонов до 200 кэВ. К 1932 г. они перестроили ускоритель, заставив пучок проходить последовательность стадий ускорения, достигнув конечной энергии 800 кэВ. В 1931 г. были реализованы на практике два других типа ускорителей, которые могли достигать подобных энергий. Один работал, создавая электростатический заряд, и был сконструирован Робертом Ван-де-Граафом; другой проект, предложенный Рольфом Видеро, использовал переменное напряжение с радиочастотой.

Проект с переменным напряжением был модернизирован Эрнестом Лоуренсом и его сотрудниками в Беркли, построившими в 1931 г. первый “циклотрон”. В циклотроне пучок частиц искривляется магнитным полем и идет по кругу, ускоряемый переменным напряжением всякий раз, когда он обходит окружность. Первый циклотрон Лоуренса достиг энергии 80 кэВ, а к середине 1931 г. он построил тот, который мог давать энергию пучка больше 1 МэВ. Эта машина имела диаметр всего одиннадцать дюймов, но за следующие несколько лет Лоуренс смог впечатляюще усилить результат. К концу 1932 г. у него был 27-дюймовый циклотрон, производящий пучок с энергией 4.8 МэВ, а в 1939 г. — 60-дюймовый с энергией пучка 19 МэВ. Эти машины становились все дороже и дороже, поскольку требовали все больших и больших магнитов для изгибания пучков все более и более высоких энергий в окружность. Лоуренс нуждался в хорошем финансировании и в квалифицированных работниках. К 1940 г. он получил обещание Фонда Рокфеллера предоставить 1.4 миллиона долларов, чтобы профинансировать машину диаметром в 184 дюйма, которая могла бы достичь энергии 100 МэВ. Но

вмешалась война, и законченный магнит для этой машины был перенаправлен Манхэттенскому проекту для обогащения урана, необходимого, чтобы сделать бомбу для Хиросимы.

После войны и успеха Манхэттенского проекта физики оказались на вершине своей славы и пожинали плоды впечатляющего роста финансирования своих проектов. Лоуренс быстро использовал в своих интересах ситуацию, поняв, что “нет никаких ограничений того, что мы можем делать, но мы должны при этом быть осторожны,”² Его лаборатория в Беркли работала перед войной, имея ежегодный бюджет 85 000 долларов, но сразу после войны он смог увеличить его до 3 миллионов долларов, частично благодаря помощи главы Манхэттенского проекта, генерала Лесли Гроувса.

При более высоких энергиях эффекты специальной теории относительности требуют замены циклотрона на “синхроциклотрон”, в котором частота ускоряющегося напряжения по мере ускорения частиц изменяется. К ноябрю 1946 г. Лоуренс получил обратно большой магнит Манхэттенского проекта для гражданского применения в 184-дюймовой машине, производящей пучок с энергией 195 МэВ. Хотя физики космических лучей были все еще впереди по части фактических открытий частиц, ситуация должна была вскоре измениться. После открытия заряженных пионов в космических лучах в 1947 г. нейтральный пион был обнаружен уже в лаборатории Лоуренса, в 1949 г.

Ускорители на более высокие энергии не могли быть построены на основе одного магнита, вместо этого в них применялось подобное пончику кольцо из меньших магнитов. Этот проект называли “синхротроном”, и Комиссия по ядерной энергии в 1947 г. одобрила сооружение двух из них. Один был назван Космотроном и построен в Брукхэвской Национальной Лаборатории на Лонг Айленде. Он достиг в 1952 г. энергии 3 ГэВ. Второй был построен в Беркли и назван Беватроном. Он имел протонный пучок энергии 6.2 ГэВ и был закончен в ноябре 1954 г. Конец 50-х был расцветом строительства ускорителей, большие машины работали или строились в более чем дюжине мест по всему миру. Русские построили протонный синхротрон на 10 ГэВ в Дубне в 1957 г., в том же самом году, когда состоялся запуск Спутника, бросив еще один чувствительный вызов технологическому превосходству Соединенных Штатов. С тех пор, финансирование физики высоких энергий в Соединенных Штатах стало впечатляюще расти в течение следующих нескольких лет, чтобы затем в середине 60-х выйти на постоянный уровень.

После войны несколько европейских наций в сотрудничестве создали объединенную организацию для ядерных исследований. Эта Европейская Организация Ядерных Исследований (Centre Europeen de Recherche Nucleaire), известная как ЦЕРН (CERN), была основана в 1952 г., и скоро начала строить лабораторию около Женевы. Первый большой ускоритель ЦЕРН, PS (Протонный Синхротрон) был закончен в 1959 г. и работал при энергии 26 ГэВ. Весьма скоро после этого подобная машина, AGS (Синхротрон с Изменяющимся Градиентом, Alternating Gradient Synchrotron), которая могла достигать 33 ГэВ, была введена в эксплуатацию в Брукхэвене. В 60-х годах были построены еще большие машины, хотя теперь в меньшем количестве из-за их огромной стоимости. В 1967 г. Советский Союз построил машину на 70 ГэВ в Серпухове, и в том же самом году в Илинойсе, к западу от Чикаго, была основана новая лаборатория, Фермилаб (названная в честь итальянского физика Энрико Ферми). Там было начато сооружение нового ускорителя, который должен был иметь 2 км в диаметре. Ускоритель Фермилаб был закончен в 1972 г., и имел энергию 200 ГэВ, увеличенную до 500 ГэВ к 1976 г. Тем временем, в ЦЕРН в 1976 г. был построен SPS (Протонный Суперсинхротрон, Super Proton Synchrotron), способный достичь 400 ГэВ.

Доминирующим детектором в конце 50-х и в начале 60-х была пузырьковая камера, усовершенствованная в середине 50-х. Это был, грубо говоря, сосуд, содержащий жидкий водород под давлением. Когда давление быстро уменьшали, жидкость становилась

перегретой, и вдоль траекторий заряженных частиц образовывались следы из пузырьков. Большие пузырьковые камеры, типа 72-дюймовой в Беркли и 80-дюймовой в Брукхэвене, были весьма дороги и в сооружении, и в эксплуатации. Фотографии следов, которые они давали, требовали при анализе больших и тщательных человеческих усилий, хотя в более поздние годы процесс был частично автоматизирован.

Все упомянутые выше машины были протонными ускорителями. Происходило параллельное развитие электронных синхротронов, в том числе, ускорителей на 1.2 ГэВ в КалТехе (1956), на 6 ГэВ в Гарварде (1962) и на 10 ГэВ в Корнелле (1968). Электронные ускорители были менее популярны, чем протонные, так как они работали при более низких энергиях, и в отличие от протонов, электроны не являются сильновзаимодействующими частицами, поэтому они не могли использоваться непосредственно для изучения сильного взаимодействия. Причина, по которой электронные синхротроны работают при более низких энергиях, состоит в том, что электроны испускают много синхротронного рентгеновского излучения, когда пути высокоэнергетических электронов искривляются магнитами. В результате в электронный пучок должна непрерывно подкачиваться энергия. Чтобы обойти эту проблему, вблизи Стэнфорда была построена новая лаборатория, названная Стэнфордским Центром Линейного Ускорителя (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC), и ее основным инструментом стал большой линейный электронный ускоритель. Машина SLAC имеет длину 3 км и достигла своей проектной энергии 20 ГэВ в 1967 г. Ускоритель работает вдоль линии, начинающейся близко к разлому Сан-Андреас, лежащему в основе холмов около Стэнфорда, и идущей на восток к заливу Сан-Франциско. Говорили, что в случае крупного землетрясения лабораторию, вероятно, придется переименовать в SPLAC (Стэнфордский Кусочно-Линейный Ускорительный Центр).

В ускорителях высоких энергий частицы пучка переносят большой импульс, и он должен сохраняться при столкновении. В результате большая часть энергии столкновения идет на большой полный импульс, который должны уносить продукты столкновения. Фактически, доступная для рождения новых частиц энергия, растет лишь как квадратный корень энергии пучка, таким образом, протонный ускоритель на 500 ГэВ в Фермилабе мог дать для рождения новых частиц приблизительно только 30 ГэВ. Ранее многие физики поняли, что если столкнуть два пучка ускорителя лоб-в-лоб, полный импульс будет нулевым, и следовательно, никакая часть энергии пучков не будет тратиться впустую. Проблема здесь состоит в том, что плотность частиц в пучке является весьма низкой, и столкновения частиц из двух пересекающихся пучков происходят сравнительно редко.

Ускорители, сталкивающие два пучка вместе, теперь называют коллайдерами, хотя сначала они часто упоминались как накопительные кольца, так как прежде, чем столкновения могут начаться, множество частиц должно сначала вводиться, а затем сохраняться в кольце ускорителя. Несколько электрон-электронных и электрон-позитронных коллайдеров было построено в 60-х годах, кульминацией стал ADONE во Фраскати (Италия), который имел пучок в 1.5 ГэВ, при полной энергии столкновения 3 ГэВ. Электрон-позитронный коллайдер, построенный в SLAC и названный Стэнфордские Позитрон-Электронные Асимметричные Кольца (Stanford Positron Electron Asymmetric Rings, SPEAR), имел пучки на 3 ГэВ и был закончен в 1972 г. (первая физический сеанс состоялся весной 1973 г.). Позже эта машина должна была сыграть критическую роль в драматических событиях 1974 г., которые будут описаны позже в этой книге, и стали известны как "Ноябрьская Революция". SPEAR все еще использовался в 1978 г. и отвечал за предоставление мне летней практики по работе над экспериментом "Хрустальный Шар", который ставился там в то время.

SPEAR был построен на автостоянке вблизи конца длинного линейного ускорителя, который использовался, чтобы ввести частицы в кольцо. Так как невозможно было

получить одобрение его строительства через стандартные механизмы капитального финансирования Комиссии по ядерной энергии, он в конечном счете был построен за 5 миллионов долларов из оперативного капитала SLAC. Этот вид финансирования требовал, чтобы не сооружалось никаких постоянных зданий. В результате кольцо ускорителя работало в туннеле, сделанном из бетонных блоков ограждения автостоянки, машина управлялась и данные анализировались из разных стоящих поблизости автофургонов.

Ускорители частиц и детекторы выглядят как впечатляюще изохронные приборы, и контраст между этим оборудованием и ветхими структурами в SPEAR был поразителен. Много лет спустя я оказался в художественной галерее в Сохо и заметил выставку очень больших фотографий, содержание которых было странно знакомым. Оказалось, что на фотографиях были детали эксперимента Хрустального Шара. Очевидно, его эстетические аспекты впечатлили фотографа.

Электрон-позитронные коллайдеры все возрастающих размеров строились в 70-х и 80-х, достигнув кульминации в Большом Электрон-Позитронном (Large Electron Positron, LEP) коллайдере ЦЕРН. Это была огромная машина, построенная в туннеле окружности 27 км, несколько раз пересекающем франко-швейцарскую границу. LEP начал действовать в 1989 г. при полной энергии 91.2 ГэВ и работал до ноября 2000 г., когда был наконец закрыт, достигнув полной энергии 209 ГэВ. При 209 ГэВ частицы в LEP теряли 2 процента своей энергии на синхротронное излучение при каждом обходе вокруг кольца. Работа машины требовала количества электроэнергии приблизительно равного 40 процентам от используемого городом Женевой. Удвоение энергии кольца размеров LEP требует увеличения мощности в шестнадцать раз, таким образом весьма вероятно, что никакого электрон-позитронного кольца с более высокой энергией не будет построено в обозримом будущем, так как этому препятствует стоимость необходимой для его работы электроэнергии.

Первый коллайдер, использовавший протоны, был протон-протонным коллайдером, названным Пересекающиеся Накопительные Кольца (ISR, Intersecting Storage Rings), построенным в ЦЕРНе и принятым в 1971 г.. Он работал до 1983 г., достигая полной энергии 63 ГэВ. Следующим значительным продвижением была перестройка ускорителя SPS ЦЕРНа в 1981 г. в протонный-антипротонный коллайдер с полной энергией 540 ГэВ. Коллайдер в Фермилабе, названный "Тэватроном" стал эксплуатироваться в 1983 г. и начал делать физику в 1987 г. при энергии 1.8 ТэВ. Это был первый ускоритель, использующий сверхпроводящие магниты. Использование сверхпроводящих магнитов потребовалось для достижения очень сильных магнитных полей, необходимых, чтобы изогнуть траекторию пучка в окружность длиной 6.3 км.

Технология детекторов сделала за этот период огромные шаги вперед, детекторы разрослись до еще больших по размеру и еще более сложных инструментов, использующих очень продвинутую электронику и много уровней различных технологий обнаружения частиц. Для проектирования, сооружения и управления каждой из этих огромных конструкций, стоимость которых могла составлять значительную долю стоимости очень больших ускорителей, требовались команды из более ста физиков. Стоимость ограничивала число детекторов, которые могли быть построены, и социальная организация экспериментальной физики элементарных частиц претерпевала изменения, поскольку все большее и большее число физиков было занято во все меньшем и меньшем числе экспериментов.

В то время как в Фермилабе было построено и успешно работало большое кольцо, другие новые проекты ускорителей не так преуспевали. В 1978 г. были проведены земляные работы для 4-километрового туннеля, чтобы использовать его под протон-протонный коллайдер по имени ИЗABELЬ (ISABELLE) на 800 ГэВ в Брукхэвене. ИЗABELЬ была новым проектом, использующим сверхпроводящие магниты; технические проблемы с этими магнитами замедлили ее сооружение. К 1983 г. конкурирующий

коллайдер в ЦЕРНе уже находился в эксплуатации, и было принято решение закрыть проект ИЗАБЕЛЬ. Туннель был уже закончен, но оставался пустым много лет до недавнего времени, когда он был использован для размещения машины, названной Релятивистским Коллайдером Тяжелых Ионов, RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), изучающей столкновения тяжелых ядер.

После того, как проект ИЗАБЕЛЬ был закрыт, было принято решение остановить работу над модернизацией ускорителя в Фермилабе и вместо этого посвятить ресурсы намного более честолюбивому новому плану построить нечто, названное Сверхпроводящим Суперколлайдером, (SSC, Superconducting Super Collider). SSC должен был стать 87-километровым кольцом и новым лабораторным комплексом на участке земли поблизости от Вакахачи (Wahachie), Техас. Он был предназначен дать полную энергию 40 ТэВ. Это был бы большой шаг вперед от существующего ускорителя самой высокой энергии, Тэватрона, достигавшего 1.8 ТэВ. Решение поддержать проект было принято в январе 1987 г. на самых высоких уровнях администрации Рейгана. После слушаний, на которых эксперты Министерства энергетики одобрили финансирование SSC, Рейган вспомнил фразу времен своей бытности спортивным репортером, “Бросайте глубоко!”³ и одобрил план. Ему тогда сказали: “г. Президент, Вы собираетесь привести в восторг множество физиков”, на что он ответил, “Это вероятно будет справедливо, потому что я сделал несчастными двух преподавателей физики в средней школе.” Однако решение призвано было, в конечном счете, сделать несчастными намного больше физиков.

Строительство началось в 1991 г. при первоначальной оценке его стоимости в 4.4 миллиарда долларов. По мере того как строительство шло, были сделаны изменения проекта, и предполагаемая стоимость машины увеличилась до 8.25 миллиардов. Администрации Буша и Клинтона продолжали поддерживать программу, но оппозиция этому увеличивалась. Эта оппозиция подпитывалась учеными, стоящими вне физики высоких энергий, которые волновались, что SSC вытеснит другие расходы на науку. Многие в Конгрессе были расстроены таким большим куском правительственного пирога, доставшегося одному месту в Техасе. К осени 1993 г. некоторые эксперты оценили, что общая стоимость может возрасти до 11 миллиардов, и Конгресс проголосовал за аннулирование проекта. Было потрачено 2 миллиарда долларов и выкопано 22 км туннеля.

Трудно переоценить пагубное воздействие закрытия SSC на сообщество физиков элементарных частиц Соединенных Штатов, оно продолжается и в наши дни. Романист Герман Ваук (Herman Wouk) недавно издал роман, озаглавленный “Дыра в Техасе” (A Hole in Texas)¹, главный герой которого — экспериментатор, травмированный опытом SSC. Американские физики-экспериментаторы в области элементарных частиц согласились “бросить глубоко” с SSC в азартной игре за восстановление превосходства в своей области, которое они уже по большей части уступили европейцам. Когда они проиграли эту игру, не было никакого плана отступления, и единственным американским проектом в области высоких энергий осталось продолжать повышение интенсивности пучка Тэватрона. Политическое поражение на высоком уровне в Конгрессе было полной победой тех, кто выступал против любых больших внутренних расходов правительства на чистую науку, представленную физикой элементарных частиц. Господство этих политических сил означало, что нет никакой возможности заменить проект SSC каким-либо сравнимым по стоимости другим проектом.

Действующие ускорители

В настоящее время число работающих во всем мире ускорителей частиц высоких энергий является чрезвычайно малым, меньшим чем когда бы то ни было со времен их изобретения перед Второй Мировой войной. Те несколько, что все еще используются,

за многие годы не смогли существенно повысить свои энергии. LEP, большой электрон-позитронный коллайдер ЦЕРН, был демонтирован, а его 27-километровый туннель будет использоваться для нового протон-протонного коллайдера, который будет называться Большим Адронным Коллайдером (Large Hadron Collider, LHC).

Работающей сегодня машиной с самой высокой энергией является Тэватрон в Фермилабе, ускоритель, который начал использоваться более восемнадцати лет назад. В 1996 г. он был закрыт на пятилетнюю реконструкцию стоимостью в 300 миллионов долларов с целью повысить число столкновений частиц. После энергии пучков следующей по важности характеристикой любого коллайдера служит его «светимость». Светимость коллайдера — это мера того, сколько частиц находится в пучке и насколько мала область взаимодействия, в которой пучки, приходящие с противоположных направлений, сводятся в детекторе. Для любого физического процесса, изучаемого на коллайдере, удвоение светимости заставляет этот процесс происходить вдвое чаще. Исследование многих аспектов взаимодействий частиц требует накопить как можно больше редко происходящих событий. Сложное поведение пучков частиц высоких энергий делает увеличение светимости и искусством, и наукой; как правило, требуется год или больше со времени первого накопления пучков в коллайдере, чтобы он надежно заработал при максимальной светимости, на которую способен.

Когда в марте 2001 г. Тэватрон был снова включен после модернизации, его энергия стала несколько большей (дойдя до 1.96 ТэВ), и все ожидали, что его светимость скоро станет приблизительно в пять раз выше прежней. Оказалось, что достичь этого намного труднее, чем можно было вообразить, и требуется больше года только для того, чтобы вернуть светимость машины к уровню, который она имела до закрытия. Надеялись на то, что к концу 2002 г. эксперименты зарегистрируют приблизительно в пятнадцать раз больше столкновений, чем в более раннем сеансе Тэватрона, но вместо этого было зарегистрировано всего лишь то же число, что и прежде. К 2005 г., четыре года спустя после нового ввода в действие, светимость стала в шесть раз выше, чем перед модернизацией, но оставалась только четвертой частью той, достижения которой ожидали к этому сроку. Фермилаб все еще надеется продолжить улучшение светимости Тэватрона и в конечном счете собрать большое число новых событий, но его опыт оказался очень болезненным и дорогостоящим, сделав слишком ясным, насколько трудны технические проблемы, связанные с большими ускорителями. Тэватрон — чрезвычайно сложный и чувствительный инструмент, с очень большим количеством вещей, которые могут работать не так, как надо. В ноябре 2002 г. пучок был неожиданно потерян, и после расследования оказалось, что источником проблемы было землетрясение на расстоянии в 6 000 миль, на Аляске. На Тэватроне в работе находятся два детектора, Установка Детектора Коллайдера (Collider Detector Facility, CDF) и Д-ноль (DZero) (название относится к области взаимодействия, где он расположен). Это огромные, сложные и дорогие сооружения, каждый из них обслуживает команда приблизительно из 600 физиков. Большая часть экспериментальных усилий тратится на сложную задачу анализа огромного объема полученных данных, это задача, работа над которой может продолжаться много лет после того, как сбор данных был завершен. Фермилаб планирует поддерживать Тэватрон в рабочем состоянии приблизительно до конца этого десятилетия.

Единственным другим ускорителем, эксплуатируемым сейчас при энергиях в какой-то степени близких к энергии Тэватрона, является Адрон-Электронный Кольцевой Ускоритель (Hadron-Electron Ring Accelerator, HERA) в лаборатории Германского Электронного Синхротрона (DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron) вблизи Гамбурга, в Германии. Это протон-электронный коллайдер, имеющий длину окружности 6.3 км, с электронным пучком на 27.5 ГэВ и протонным пучком на 820 ГэВ. Чистая энергия, доступная для рождения частиц в столкновениях, равна приблизительно

300 ГэВ. HERA начала работать в 1992 г. и позволила выполнить многие виды экспериментов, которые были невозможны на электрон-позитронных или протон-антипротонных коллайдерах, но ее энергия значительно ниже энергии Тэватрона.

Электрон-позитронные коллайдеры много более низких энергий используются в Корнелле и в SLAC. Машина, работающая в SLAC, сталкивает электроны энергии 9 ГэВ с позитронами 3.1 ГэВ и служит своего рода специальным инструментом для изучения асимметрии между веществом и антивеществом материи в системах, содержащих b -кварк. Фермилаб также имеет некоторые ускорители более низких энергий, чем Тэватрон, которые используются как для ввода частиц в Тэватрон, так в целях создания пучков частиц для других экспериментов. Сейчас в Фермилабе проводятся два разных эксперимента, предназначенных для изучения нейтрино. Первый из них называется мини-БУН (MiniBoone), “мини”, так как это первая стадия возможного большого эксперимента, “Boone” — сокращение для Бустерного Нейтринного Эксперимента (Booster Neutrino Experiment), названного так, поскольку используется пучок нейтрино энергии 700 МэВ, произведенный протонным синхротроном на 8 ГэВ, который называется “Бустер”. Мини-БУН работает на территории Фермилаба с 2002 г. и как ожидают, сообщит о своих результатах в течение следующего года или чуть позже.

Второй нейтринный эксперимент в Фермилабе известен как NUMI/MINOS. NUMI — акроним для Neutrinos at the Main Injector (Нейтрино в Главном Инжекторе), MINOS для Main Injector Neutrino Oscillation Search (Поиск Осцилляций Нейтрино на Главном Инжекторе). Главный Инжектор — это протонный синхротрон на 150 ГэВ, также используемый для ввода пучков в Тэватрон, но в данном случае дающий пучок нейтрино, энергия которого может регулироваться в диапазоне от 3 до 15 ГэВ. Эксперимент MINOS использует два детектора. Первый, ближний детектор, находится в Фермилабе, а второй, дальний детектор, расположен глубоко под землей на расстоянии 735 км в шахте Судан в штате Миннесота. Сравнивая поведение взаимодействий нейтрино в этих двух детекторах, MINOS будет в состоянии изучать, как нейтрино “осциллируют” между различными типами. Эксперимент был запущен в начале 2005 г. и, согласно плану, будет продолжаться до конца десятилетия.

Американское финансирование экспериментальной физики элементарных частиц много лет находилось на одном уровне в неизменных долларах. В прошлом году оно даже снизилось, поскольку было сохранено на том же самом уровне без учета инфляции. Каждый год в Соединенных Штатах на физику высоких энергий расходуется в общей сложности примерно 775 миллионов долларов, приблизительно 725 миллионов приходит из Министерства энергетики, а остальные 50 миллионов — из Национального научного фонда. Подобная же сумма тратится каждый год в Европе, основная часть этой суммы обыкновенно идет на финансирование ЦЕРН и DESY. Большая часть бюджета ЦЕРН и часть американского бюджета в последние годы идет на финансирование продолжающегося сооружения LHC (Большого Адронного Коллайдера) в ЦЕРН, в этот проект США вносят вклад в 530 миллионов долларов, растянутый на более чем восемь лет. Бюджет Министерства энергетики на 2006 финансовый год содержит сокращение финансирования физики высоких энергий на 3 процента, и перспективы бюджета на следующие несколько лет безрадостны. Огромные американские финансовые дефициты оказывают интенсивное давление на контролируемые расходы для научных исследований, а физика высоких энергий стоит не слишком высоко в списке научных приоритетов федерального правительства.

Ускорители: перспективы на будущее

Единственным большим новым ускорителем, сооружаемым в настоящее время, тем, на который возложены почти все надежды физиков элементарных частиц, является

ЛНС в ЦЕРНе. Эта машина — протон-протонный коллайдер с полной энергией 14 ТэВ. В отличие от Тэватрона, который сталкивает протоны с антипротонами, ЛНС будет сталкивать протоны с протонами, чтобы избежать проблем со светимостью, которые возникают из-за неспособности создать достаточно интенсивный пучок антипротонов.

ЛНС будет находиться в 27-километровом туннеле, который ранее использовался LEP. Его проект был сначала одобрен ЦЕРНом в 1994 г. и последней оценкой того, когда первый пучок будет включен является лето 2007 г., причем первые столкновения и данные, зарегистрированные детекторами появятся позже в том же году. Если все получится, то первые физические результаты могут начать появляться в 2008 году. Там будут два главных детектора, которые являются частью проекта. Они называются АТЛАС (ATLAS, A Toroidal LHC ApparatuS, т.е. Тороидальный Аппарат ЛНС) и CMS (Compact Muon Solenoid, т.е. Компактный Мюонный Соленоид), на каждом из них работают приблизительно по 2 000 физиков из более чем тридцати разных стран. Каждый из детекторов, как ожидают, будет выдавать примерно тысячу терабайт данных в год.

Общая стоимость ЛНС и его детекторов — примерно 6 миллиардов долларов, причем детекторы стоят примерно миллиард долларов каждый. Даже несмотря на то, что часть стоимости проекта взяли на себя Соединенные Штаты и другие страны, она настолько велика, что бюджет ЦЕРНа должен был быть структурирован таким способом, что никакое его участие в любых других больших проектах невозможно до 2010 г.

В то время как главное ограничение на энергию электрон-позитронного кольца ставится проблемой потерь на синхротронное излучение, для протонного кольца это не так, ибо протоны намного тяжелее электронов. Вместо этого, основная проблема заключается в силе магнитного поля, которое должно изгибать пути протонов и поддерживать их движение по окружности. ЛНС будет с этой целью использовать 1 200 сверхпроводящих дипольных магнитов, каждый с очень высокой напряженностью магнитного поля, равной 8.4 Тесла.

Каковы перспективы реализовать протон-протонные столкновения с еще более высокими энергиями, чем достижимые на ЛНС? Есть фактически только два жизнеспособных метода добраться до более высоких энергий: увеличить размеры кольца или усилить магнитные поля. Энергия кольца растет пропорционально его размерам и магнитному полю, таким образом, можно было бы удвоить энергию ЛНС до 28 ТэВ или построив вдвое большее кольцо, или найдя способ сделать магниты с удвоенной напряженностью поля. Проект SSC на энергию 40 ТэВ требовал 87-километрового кольца, и это была главная причина его высокой стоимости. Были построены сверхпроводящие магниты, способные достичь напряженностей поля 16 Тесла, но магниты, которые могут фактически применяться в ускорителе, должны иметь консервативную конструкцию, так как они должны быть очень надежны и изготавливаться по разумной стоимости. Они также должны сохранять свои сверхпроводящие свойства даже при большом синхротронном излучении, создаваемом ускорителем. Были предложены различные проекты VLHC (Very Large Hadron Collider, т.е. Очень Большого Адронного Коллайдера), но все они используют очень большие кольца, с размерами доходящими до 233 км. Сегодняшние политические перспективы такого проекта в Соединенных Штатах не слишком многообещающи, учитывая опыт SSC. Вероятно проекты VLHC не будут рассматриваться всерьез, пока не начнут поступать данные от ЛНС. Если ЛНС сделает новые открытия, которые гарантируют большое значение для физики новой машины, рассчитанной на несколько более высокие энергии, то аргументы за VLHC могут стать убедительными.

Дополнительная трудность при проектировании любого коллайдера на более высокие энергии состоит в том, что при увеличении энергии нужно увеличивать и светимость.

При фиксированной светимости частота “интересных” столкновений (тех, в которых происходит превращение большого количества энергии) уменьшается как квадрат энергии. Таким образом, если Вы удваиваете энергию ускорителя, нужно в четыре раза повысить светимость, чтобы получить то же самое число интересных событий. Как было замечено на Тэватроне, более высоких светимостей добиться трудно, и даже будучи достигнуты, они приводят к новым техническим проблемам, таким как радиационные повреждения частей детекторов вблизи области взаимодействия.

Новое электрон-позитронное кольцо с энергией выше, чем 209 ГэВ, которые имелись у LEP, фактически невозможно из-за проблемы потерь энергии на синхротронное излучение. Любая машина, рассчитанная на более высокие энергии, должна быть линейным коллайдером, состоящим из двух линейных ускорителей, поставленных нос к носу. Один должен ускорять электроны, другой - позитроны. Некоторый опыт проектов такого рода уже существует, так как с 1989 по 1998 гг. линейный ускоритель SLAC работал как Линейный Коллайдер SLAC (SLC), одновременно ускоряя позитронный и электронный пучки приблизительно до 47 ГэВ. После выведения из ускорителя пучки разделялись, и использовались магниты, чтобы послать их по искривленным траекториям, которые в конечном счете сводили пучки лоб в лоб. В последние годы разрабатывалось несколько проектов будущих линейных коллайдеров, наиболее продвинутым из них был проект машины, которая должна была называться TESLA и строиться в DESY, в Гамбурге. TESLA — акроним для TeV Energy Superconducting Linear Accelerator (Сверхпроводящий Линейный Ускоритель ТэВ-ных Энергий), выбранный в честь изобретателя Николы Теслы, именем которого также называют единицу напряженности магнитного поля.

Проект TESLA потребовал бы комплекса длиной 33 км, чтобы породить столкновения с энергией 500 ГэВ (можно довести до 800-1000 ГэВ) и стоил бы, при очень грубой оценке, по меньшей мере 4-5 миллиардов долларов. Хотя в линейном коллайдере нет никаких потерь на синхротронное излучение, пучок там не является непрерывно циркулирующим как в кольце, и таким образом вся энергия, затраченная на ускорение пучков, теряется после их столкновения. Во время своей работы TESLA использовала бы около 200 мегаватт мощности, примерно столько же, сколько требует город с населением 200 000 человек. Усилия по проектированию электрон-позитронного коллайдера были недавно реорганизованы в проект ILC (International Linear Collider, т.е. Международный Линейный Коллайдер), объединив предыдущие усилия по проекту TESLA с различными другими группами. Работающие над ILC физики надеются приблизительно к 2010 г. завершить окончательный проект и быть готовыми к решению начать сооружение, если будет найдено финансирование.

В течение 2001 года в США Консультативная группа по физике высоких энергий Министерства энергетики и Национального научного фонда консультировалась с большей частью сообщества физиков элементарных частиц и пыталась составить долгосрочный план действий для физики высоких энергий Соединенных Штатов. Ее доклад был представлен федеральному правительству в январе 2002 г., и главная рекомендация заключалась в том, что следующий большой проект физики высоких энергий должен быть строительством электрон-позитронного линейного коллайдера. Группа рассмотрела два главных сценария, тот, при котором коллайдер будет строиться в Соединенных Штатах, потребовал бы увеличения бюджета физики элементарных частиц Соединенных Штатов на 30%, а другой, при котором он будет построен за пределами Соединенных Штатов, потребовал бы 10% увеличения. Перспективы 10-ти или 30-ти процентного увеличения бюджета не слишком многообещающи, так как это стало бы большим изменением картины последних лет, когда бюджет исследований по физике высоких энергий в Соединенных Штатах оставался постоянным или сокращался. Если последние тенденции продолжатся, то экспериментальное сообщество физики

элементарных частиц Соединенных Штатов скоро окажется перед суровым выбором. После введения в эксплуатацию ЛНС с его намного более высокой энергией, к 2010 г. работа коллайдера Тэватрон потеряет смысл, и вся деятельность в области самых высоких энергий переместится в Европу. Если не будет найден некий путь финансировать ИС и разместить его в Фермилабе, то будущее этой лаборатории окажется под вопросом, и американская экспериментальная физика высоких энергий, вероятно, станет своего рода болотом и будет способна выполнять только эксперименты специального назначения при более низких энергиях, типа тех, что включают исследования нейтрино.

ЦЕРН развивает другой вид технологии для линейного ускорителя известного как CLIC (Compact Linear Collider, т.е. Компактный Линейный Коллайдер). Он подразумевает использование одного пучка для ускорения другого и является намного более честолюбивым и намного менее разработанным, чем технология ИС. ЦЕРН надеется провести достаточную исследовательско-конструкторскую работу над CLIC к 2010 году, чтобы тогда быть в состоянии решить, продолжать ли полный проект. При весьма оптимистической оценке, такие усилия по проекту потребуют приблизительно пяти лет, строительство - по крайней мере еще пяти, таким образом CLIC не может быть закончен ранее 2020 года. ИС мог бы быть построен пятью годами раньше, что позволило бы его периоду действия наложиться на период действия ЛНС. Физикам хотелось бы получить такое наложение, так как возможно, что нечто обнаруженное на линейном коллайдере могло бы также быть изучено на ЛНС, но это может потребовать изменений в экспериментальной установке. Сейчас кажется наиболее вероятным, что решение продолжить работу над линейным коллайдером будет отложено по крайней мере до 2009-10 гг., когда могут стать доступны некоторые результаты с ЛНС. Если ЛНС обнаружит хиггс или суперсимметричные частицы (это постулированные, но никогда не наблюдавшиеся частицы, их значение будет объясняться в одной из последующих глав) достаточно низких масс, которые можно изучать при более низких энергиях проекта ИС, то возможно будет найден некоторый путь его финансирования. Если никаких таких частиц найдено не будет, это будет доводом в пользу ожидания, когда будет готов более честолюбивый проект CLIC, рассчитанный на более высокие энергии.

В последние годы изучалась и еще одна, более экзотическая, идея нового коллайдера. Это должен был быть мюон-антимюонный коллайдер на энергии до 4 ТэВ. Мюоны являются намного более тяжелыми частицами, чем электроны, таким образом, не будет никакой проблемы синхротронного излучения, но они нестабильны и распадаются на электроны и нейтрино за 2.2 микросекунды. Это время жизни достаточно продолжительно, чтобы они могли сохраняться в течение приблизительно 5 000 оборотов в 6-километровом накопительном кольце. Главная техническая проблема — найти способ достичь полезной светимости в таком коллайдере, но есть и еще одна фундаментальная трудность. Поскольку мюоны распадаются, будет порождаться мощный пучок нейтрино, имеющий достаточную энергию и интенсивность для создания радиационной опасности. Нейтрино взаимодействуют настолько слабо, что они могут пройти, ничего не почувствовав, сквозь всю планету, таким образом, нет никакого способа от них загородиться. Если бы такой ускоритель был построен на 1-километровой глубине в Фермилабе, то, из-за кривизны Земли, нейтрино вышли бы на поверхность Земли на большом расстоянии, породив заметную проблему с радиацией где-нибудь в районе Чикаго.

Из-за этой и других проблем, проекты мюонного накопительного кольца, как полагают, вряд ли приведут в обозримом будущем к жизнеспособному коллайдеру, но вместо этого они могли бы дать нам превосходные фабрики нейтрино. Фабрика нейтрино была бы ускорителем, специально построенным для создания управляемого интенсивного пучка нейтрино в целях изучения свойств самих нейтрино. В разных концах мира уже ставится несколько экспериментов по изучению нейтрино, включая

упомянутые выше эксперименты миниБУН и NUMI/MINOS. Как правило, в таких экспериментах используются детекторы, расположенные глубоко под землей и ищутся столкновения, вызванные нейтрино, прилетающими с Солнца, из ядерного реактора или из ускорителя (размещенного поблизости или вдали). Это область физики высоких энергий, которая не обязательно требует чрезвычайно дорогих ускорителей и детекторов и, вследствие этого, ее будущее более прочно, чем будущее других видов экспериментов, которые хотелось бы провести физикам.

В течение большей части двадцатого столетия, физика высоких энергий извлекала выгоды из непрерывных усовершенствований технологии, что привело к длительному экспоненциальному росту доступных энергий. Это явление несколько напоминает закон Мура в микроэлектронике, утверждающий удвоение плотности интегральных схем каждые восемнадцать месяцев, что имело и будет иметь революционные значения для человеческого общества. К сожалению для физиков частиц, этот период закончился. Без какой-то неожиданной революционной новой технологии, нет никаких шансов, что ускорители двадцать первого века будут в состоянии продолжить экспоненциальный рост, который характеризовал двадцатое столетие. Теоретики и экспериментаторы физики частиц вошли в новый период, в течение которого они должны учиться иметь дело с этой трудной новой реальностью.

Для дальнейшего чтения

Есть несколько превосходных популярных историй физики элементарных частиц, которые подробно охватывают экспериментальную сторону предмета. Две из них: “Взрыв частиц”⁵ Клоуза, Саттона и Мартена и “Открытие субатомных частиц”⁶ Стивена Вайнберга.

Некоторые другие книги и источники информации о темах этой главы:

- Недавняя влиятельная книга историка науки Питера Гализона о “материальной культуре” физики элементарных частиц “Образ и логика”⁷.
- С точки зрения антрополога на научную общину SLAC можно ознакомиться по книге Шэрон Тройк “Время пучка и время жизни: мир физиков высоких энергий”⁸.
- Свежая информация о работе Тэватрона в Фермилабе доступна онлайн по адресу: www.fnal.gov/pub/now
- За прогрессом строительства ЛНС можно следить по сайту: lhc.web.cern.ch/lhc
- Последние новости о проекте Международного Линейного Коллайдера (ILC), смотрите на их вебсайте: www.linearcollider.org
- ЦЕРН Курьер - ежемесячный журнал, освещающий последние новости физики элементарных частиц. Он доступен онлайн по адресу: www.cerncourier.com
- Вебсайт, посвященный недавним новостям и ресурсам по физике элементарных частиц: www.interactions.org
- “Симметрия” - ежемесячная объединенная публикация SLAC и Фермилаба, доступна по адресу: www.symmetrymag.org
- Консультативная группа по физике высоких энергий обеспечивает рекомендации для DOE и NSF о программе физики элементарных частиц в Соединенных Штатах. Она собирается приблизительно три раза в год, и многие презентации доступны онлайн: www.science.doe.gov/hep/agenda.shtm