



***В помощь изучающим  
историю и философию науки***

**ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ:  
ОСНОВНЫЕ ИДЕИ И ПРОБЛЕМЫ**

*А.В. Бондаренко, А.В. Кузьмин, А.С. Лахтычкин*

**Из истории физики высоких энергий**

Чтобы понять существующую на сегодняшний день ситуацию в физике высоких энергий, необходимо проследить историю развития ядерной физики начиная с открытия электрона и заканчивая поиском Хиггс-бозона. Наряду с развитием экспериментальной техники и открытием новых частиц развивалась и теория, объясняющая эксперимент. Нужно отдавать себе отчет в том, что настоящий критерий истинности любой теории – это, конечно же, эксперимент. И тут физика высоких энергий – необычайной силы сплав теории и эксперимента! Для объяснения этого рассмотрим историю развития физики высоких энергий, называвшейся ранее физикой элементарных частиц (ФЭЧ).

Ключевое слово в ФЭЧ – «энергия». Типичные экспериментально достижимые энергии сталкивающихся частиц менялись в течение века от нескольких электронвольт (эВ) в первых вакуумных камерах до триллиона эВ (ТэВ) в коллайдере «Тэватрон» в лаборатории им. Э.Ферми в Чикаго. Грубо говоря, рост достижимой энергии в XX в. был экспоненциальным: энергия удваивалась в среднем каждые 2,5 года.

По мере наращивания энергий обнаруживались и новые частицы. Целый «зоопарк» новых частиц! Появился вопрос, как же можно все эти частицы рассортировать, как понять принцип, по которому они

рождаются. И в этом физикам помогли протон и нейтрон – в общем-то очень схожие частицы с близкой массой, различающиеся только зарядом. Тогда появилась теория, что протон и нейтрон – это два разных состояния одного нуклона, и физики ввели понятие «изоспин». Оказалось, что изоспин очень удобен для описания частиц. Однако изоспином можно описывать только отдельные группы частиц, но нельзя объяснить все наблюдаемое огромное многообразие частиц в природе.

Физики продолжали искать симметрию и в 1964 г. предложили кварковую модель. Суть ее в том, что все бозоны и мезоны состоят из кварков. Кварковая модель объясняла все существующее на тот момент многообразие частиц. Несмотря на то, что заряд у кварков оказался дробным! Ведь это только теория! В общем-то, кварковая модель, в чистом виде теория, позволяющая объяснить весь этот «зоопарк» частиц, оказалась правильной. Действительно физики обнаружили кварки при рассеянии частиц на протоне. Протон действительно оказался составной частицей! Это был триумф, когда чисто математическая теория описывает реальность.

Наряду с новыми экспериментальными данными развивалась и теория. В свое время Эйнштейн создал теорию относительности, Максвелл объединил электричество и магнетизм. Параллельно зарождалась квантовая физика. Но чтобы объяснить электромагнитное взаимодействие элементарных частиц, необходимо было объединить уравнения Максвелла и Эйнштейна с уравнениями квантовой физики. Такая теория была создана, и называется она квантовой электродинамикой. Ее предсказания очень точны. Например, магнитный момент электрона совпадает с экспериментальным с точностью до десятого знака после запятой. Точность теории объясняется тем, что отношение следующих поправок к взаимодействию (а именно, к взаимодействию с вакуумом) к предыдущим есть малый параметр  $\alpha$  ( $1/137$ ). Таким образом, ряд сходится, и предсказания квантовой электродинамики чрезвычайно точны.

Кварковая теория расставила все частицы по своим местам в группе симметрии  $SU(3)$ . Однако было одно противоречие: в частице, называемой  $\Delta^+$ , должно содержаться три кварка  $u$  в основном состоянии. Но ведь это противоречит принципу Паули, тогда как кварки являются фермионами и соответственно подчиняются ему. Это было упразднено введением нового квантового числа – цвета. Так появилась квантовая

хромодинамика и был определен новый переносчик взаимодействия (сильного взаимодействия) – глюон. Суть сильного взаимодействия заключается в том, что частица, состоящая из кварков, не может быть цветной. И чем дальше разлетаются кварки в цветном состоянии, тем сильнее между ними взаимодействие. В определенный момент это взаимодействие становится настолько сильным, что рождает из вакуума кварк и антикварк, которые взаимодействуют с той парой и образуют мезоны. Таким образом, мы не можем по отдельности получить кварки: как только мы попытаемся сделать это, так из вакуума тут же рождается пара кварк – антикварк, взаимодействующая с первой парой. В итоге вылетят мезоны. Этот принцип «невыветания» отдельных кварков получил название «конфайнмент».

Частицы, распадающиеся сильным образом, – короткоживущие, так как взаимодействие сильное и большая константа взаимодействия входит в сечения рассеяния. Но физики обнаружили, что некоторые отдельные частицы (каоны) живут гораздо больше, чем известные на тот момент остальные частицы. Так было открыто слабое взаимодействие, которое может менять и кварковый состав, и изоспин.

Слабое взаимодействие объяснила теория Глэшоу – Вайнберга – Салама. Оказалось, что источниками этого взаимодействия являются массивные частицы  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ -бозоны. Также теория предсказала, что слабое и электромагнитное взаимодействия – это асимптотики при разных энергиях одного и того же взаимодействия – электрослабого взаимодействия.

В дальнейшем физика развивалась в соответствии с возможностями существующих ускорителей. Несколько раз в истории люди считали, что все частицы найдены, однако, например, в 1974 г. был открыт новый адрон, которому не было места в схеме, предлагаемой теорией кварков, так как все возможные комбинации кварков были уже использованы. И тогда была выдвинута идея о том, что существует еще один тип кварка –  $c$ -кварк. Ситуация повторилась в 1975 г., когда пришлось ввести  $b$ -кварк. Параллельно увеличивалось и число открываемых лептонов. Отсюда с совершенной очевидностью возник вопрос: а есть ли конец числу частиц? И ответ на этот вопрос так и не ясен, как не ясно и само понятие элементарности: либо это нечто простейшее и конечное, но тогда бесструктурное (что, в лучшем случае, малоосмысленно), либо это нечто другое, связанное с особенностями нашего мировосприятия, либо что-то еще, что требует определенного осмысления, и прежде

всего философско-методологического, не исключая, разумеется, и соответствующих конкретно-научных представлений.

В общем-то сегодня в физике элементарных частиц господствует так называемая стандартная модель (СМ), которая состоит из квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики. Эта модель предсказывает все существующие на настоящий момент экспериментальные данные. Однако также модель электрослабого взаимодействия предсказывает существование Хиггс-бозона, но об этом будет рассказано ниже.

Наряду со стандартной моделью существует еще несколько теорий, – это теории техницвета, суперструн, солитонная теория. Возникает естественный вопрос: какие требования физики предъявляют к этим теориям?

Прежде всего, они должны объяснять все существующее многообразие кварков, их массообразование и взаимодействие. Более того, как мы уже видели, физика высоких энергий находится на пути объединения всех взаимодействий в одну теорию, описывающую все четыре фундаментальных взаимодействия.

Все три взаимодействия – электромагнитное, слабое и сильное объединяются при  $10^{15}$  ГэВ, становясь единым взаимодействием. Есть идея включить в эту систему еще и гравитационное взаимодействие. Если это удастся сделать, то мы получим теорию великого взаимодействия, которая даст единое описание всех взаимодействий. В частности, будет, видимо, понятна сердцевина кварков, понятно, откуда взялась в природе постоянная Планка и т.д. И тогда можно будет заявить, что физика элементарных частиц пришла к своему теоретическому и логическому завершению.

Все эти взаимодействия (электромагнитное, сильное и слабое) описываются одним и тем же классом фундаментальных теорий – так называемыми калибровочными теориями. Суть калибровки заключается в вычитании бесконечной энергии нулевого состояния (состояния, когда частицы нет) из энергии какого-то состояния частицы (которое тоже обладает бесконечной энергией, что получается при процедуре вторичного квантования). Если получившаяся разность энергий конечна, то теория считается калибровочной, а эта разность принимается за энергию состояния.

Теория Вайнберга – Салама вместе с квантовой хромодинамикой позволяет объяснить все наблюдаемые в настоящее время явления в мире элементарных частиц. Ожидается, что в ближайшие годы будут найдены

бесспиновые хиггсовские бозоны, которые требуются для обоснования модели Вайнберга – Салама. Проектируются и строятся ускорители, по энергии на порядок большие, чем действующие. На них ожидается открытие новых тяжелых частиц, предсказываемых современными теориями Великого объединения.

Более подходящей на роль единой теории является суперструнная теория, в которой частицы описываются бесконечно тонкими нитями длиной  $10^{-30}$  см. К сожалению, теория еще далека от завершения, и ее предсказания мы можем проверить только на больших энергиях для гравитационного взаимодействия. Такие энергии наблюдаются только в космосе, – это и есть черные дыры.

Какие теории окажутся верными, может показать только опыт. Так всегда было, и так будет. Сколько времени может занять создание единой теории материи, сказать трудно, – легче предсказать, сколько времени потребуется на строительство конкретных, гигантских по старым меркам, установок, которое уже запланировано на 10–20-летний срок. За это время будет исследован диапазон энергий в системе центра масс вплоть до 14 ТэВ на протон-протонных и электрон-позитронных коллайдерах.

В нынешнем столетии такой быстрый рост энергии будет, по-видимому, невозможен, замедление этого роста видно уже в последние 10–20 лет. Современные экспериментальные машины для ФЭЧ – огромные и очень дорогостоящие сооружения, на одно строительство которых уходит несколько лет. Однако это еще не означает конца эры ускорителей, и определенный прогресс здесь все еще ожидается.

Современные ускорительные комплексы (коллайдеры) представляют собой накопительные кольца, в которых вращаются навстречу друг другу разогнанные до огромных энергий сгустки электронов, протонов или других частиц. В определенных местах эти сгустки сталкиваются. Продукты столкновений регистрируются установленными вокруг этих точек детекторами.

Самый крупный электрон-позитронный коллайдер – LEP (Large Electron-Positron Collider) Европейской лаборатории физики элементарных частиц (CERN) расположен на территории сразу двух стран – Швейцарии и Франции. Его окружность составляет 27 км, и в настоящее время он работает на энергии центра масс сталкивающихся частиц 200 ГэВ. Эта цифра и является пределом для циркулярных электрон-позитронных коллайдеров. В случае протонов достижимы и большие

энергии. В 2006 г. в том самом туннеле, где сейчас расположен LEP, вступит в строй протонный коллайдер LHC (Large Hadron Collider), рассчитанный на энергию 7 ТэВ.

Как мы видим, цифра 7 ТэВ никак не сопоставима с энергией объединения всех взаимодействий, поэтому сложно продумать будущее физики высоких энергий и способы проверки теорий. Однако кое-что на этом пути все же делается, и об этом будет рассказано дальше.

И в заключение первого раздела отметим, что несмотря на огромные деньги, затрачиваемые на исследования в физике высоких энергий, и кажущуюся никчемность этих исследований, физика высоких энергий дает огромный толчок прикладным наукам, будь то наука, лежащая в основе атомной промышленности, или та, на которую опирается развитие Интернета.

### Стандартная модель

Как мы уже отмечали, в настоящее время в физике элементарных частиц господствует стандартная модель (СМ), которая включает в себя минимальную теорию электрослабых взаимодействий Глэшоу – Вайнберга – Салама и калибровочную теорию сильных взаимодействий – квантовую хромодинамику (КХД). У физиков уже давно возникло четкое понимание, что стандартная модель не может быть фундаментальной теорией, а в лучшем случае претендует на роль низкоэнергетичной асимптотики какой-то другой, более глубокой теоретической схемы. Они имеют разный статус и степень доверия. Не будет сильным преувеличением сказать, что большинство современных физиков-элементарщиков верят в открытие суперсимметрии на строящемся физиками всего мира в CERN-коллайдере LHC.

Чем же СМ не удовлетворяет физиков? Во-первых, СМ содержит около 20 свободных параметров (массы фундаментальных частиц, константы взаимодействий, вакуумные средние, элементы параметризации матрицы Каббиво – Кобаяши – Маскава и, возможно, недиагональные элементы массовой матрицы для нейтрино). Во-вторых, в СМ проведено последовательное объединение только электромагнитного и слабого взаимодействий, которые можно рассматривать как различные грани универсального электрослабого взаимодействия. Универсальность обоих взаимодействий проявляется начиная с энергий порядка масс  $W^+$ -,  $W^-$ - и  $Z^0$ -бозонов. Сильное взаимодействие рассмат-

ривается как независимое, а гравитация вообще не входит в теоретическую схему СМ. В-третьих, СМ не дает ответа на вопрос о происхождении иерархии масс наблюдаемых элементарных частиц, количестве поколений фундаментальных фермионов, размерности нашего пространства-времени и механизме барионной асимметрии Вселенной.

Рассмотрим подробнее механизм генерации масс элементарных частиц в СМ. Помимо полей, отвечающих трем фундаментальным взаимодействиям (электромагнитному, сильному и слабому), в СМ предполагается существование еще одного поля, которое практически неотделимо от пустого пространства и не совпадает с гравитационным полем. Его принято называть полем Хиггса. Считается, что все пространство заполнено этим полем и что все фундаментальные частицы (лептоны, кварки и калибровочные бозоны) приобретают массу в результате взаимодействия с полем Хиггса. Те частицы, которые сильно взаимодействуют с полем Хиггса, являются тяжелыми, а слабо взаимодействующие – легкими. Приближенно можно сказать, что этот эффект напоминает электрон в кристалле. Из-за электромагнитного взаимодействия с атомами кристаллической решетки электрон приобретает эффективную массу, отличную от массы свободного электрона. Но это лишь аналогия, на самом деле дело обстоит гораздо сложнее и все гораздо непонятнее. Например, СМ не может объяснить, почему одни частицы сильно взаимодействуют с полем Хиггса, а другие – слабо.

В силу корпускулярно-волнового дуализма полю Хиггса должна соответствовать по крайней мере одна частица – квант этого поля, называемый бозоном Хиггса или, для краткости, просто Хиггсом. Бозон – потому что спин кванта поля Хиггса должен быть равен нулю, т.е. частицы Хиггса подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна. Хиггс – имя собственное. Оно принадлежит английскому физико-теоретику Питеру В. Хиггсу (Peter W. Higgs), который в 1964 г. предложил механизм генерации масс калибровочных бозонов при помощи процедуры спонтанного нарушения локальной симметрии исходного лагранжиана взаимодействия. Как неперенный продукт такой генерации возникает частица Хиггса. На этот счет доказана строгая математическая теорема. Стоит отметить, что без этого механизма вся конструкция СМ принципиально не может иметь места.

До сих пор бозон (или бозоны) Хиггса экспериментально не найдены. Без доказательства его (их) существования СМ не может считаться окончательно подтвержденной. Существуют достаточно жест-

кие экспериментальные ограничения на массу нейтрального бозона Хиггса как снизу, так и сверху. Нижнее ограничение на массу Хиггса получено в экспериментах на LEP и составляет на лето 2001 г.  $M_H > 114,4$  ГэВ на 95%-м уровне достоверности. Ограничение сверху получается из анализа вклада бозона Хиггса в различные измеренные на эксперименте параметры СМ (так называемый глобальный фит СМ) и составляет  $M_H < 196$  ГэВ на 95%-м уровне достоверности.

Если предположить, что СМ верна в своем минимальном варианте, то существует всего один (нейтральный) бозон Хиггса. В этом случае основной реакцией для детектирования частицы Хиггса должна стать реакция аннигиляции электрон-позитронной пары в виртуальный  $Z^0$ -бозон, который, в свою очередь, излучает Хиггс ( $H$ ). В зависимости от типа распада  $Z$ -бозона каналы поиска бозона Хиггса классифицируют следующим образом: четырехструйный канал, т.е. канал распада  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $Z^0 \rightarrow q\bar{q}$ ; канал с так называемой «потерянной энергией», т.е. когда  $H \rightarrow b\bar{b}$ , а  $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$ , поскольку нейтрино всех сортов не регистрируются детекторами LEP; «лептонный» канал, когда  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $Z^0 \rightarrow l^+ l^-$ . На детекторе ALEPH было три события – кандидата на роль Хиггс-бозона, превышение сигнала над шумом равнялось 2,4 сигма, а по правилам, принятым в международном сообществе физиков, считается, что частица наблюдалась при превышении сигнала над шумом на 3 сигма, и была открыта при превышении сигнала над шумом на 5 сигма.

Рассмотрим последние достижения экспериментальной физики элементарных частиц. Одно из них – это смешивание нейтрино различных типов. Новейшие результаты, полученные SNO, в совокупности с результатами предыдущих экспериментов ясно показывают, что солнечные электронные нейтрино могут переходить в нейтрино других типов, а полное число электронных нейтрино, излученных Солнцем, находится в полном согласии с предсказаниями моделей Солнца. Стандартная модель легко объяснила этот факт, просто присвоив нейтрино всех типов массы. Этот эксперимент позволяет найти верхнее ограничение на сумму масс всех известных нейтрино. Используя это ограничение и усредняя по огромному числу нейтрино во Вселенной, можно показать, что нейтрино вносят только малую часть в общее количество массы и энергии, содержащееся в нашей Вселенной.

Еще одно интересное открытие, сделанное в Японии – это наблюдение бариона с положительной странностью. Назовем эту частицу  $Z^+$ . Итак, прежде всего ясно, что это не трехкварковое состояние. На уровне

кварков положительная странность означает, что этот барион содержит странный антикварк. Но поскольку это барион, т.е. частица с барионным числом  $+1$ , постольку число кварков в нем должно превышать число антикварков на три. Итак, это может быть связанное состояние четырех легких кварков и странного антикварка (условно такое состояние можно назвать пентакварком). Интересен и тот факт, что экспериментальные поиски  $Z^+$ , результаты которых вылились в сенсацию, как раз вдохновлялись предсказаниями киральной солитонной модели барионов. В рамках этой модели утверждается, что все легкие барионы – это солитонные решения уравнений квантовой хромодинамики. То есть они составлены не из отдельных конституэнтных кварков, а представляют собой как бы размазанное в пространстве поле. Если говорить на языке квантовой теории поля, протон в этой модели состоит не из вторично квантованных частиц, а есть почти классическое решение уравнений («почти» – потому что квантование в этой модели все же присутствует, но это обычное, квантово-механическое, а не квантово-полевое квантование). Заметим, что солитонная модель сама по себе квантовой хромодинамике и, соответственно, стандартной модели не противоречит.

Как еще можно проинтерпретировать эту частицу? Возможно, что  $Z^+$  – не кварковый барион, т.е. не связанное состояние нескольких кварков, а связанное состояние нейтрона и каона, так называемая «молекула». Это как бы аналогично атомному ядру, ведь там отдельные нуклоны, хотя и связаны вместе, сохраняют свою обособленность, и никто не считает, что ядра – это мешки, наполненные кварками.

Все эти открытия в экспериментальной ФЭЧ, несмотря на то что они легко включаются в стандартную модель, очень существенны для построения теории, способной заменить стандартную модель. Один из вопросов, который возник, – вопрос о том, почему массы нейтрино столь малы. Как оказалось, что в теории, где характерные массы частиц составляют миллионы и миллиарды эВ, появляются частицы в миллионы раз легче? Каково происхождение этого малого параметра? Предложено несколько вариантов объяснения, и среди них выделяется наиболее элегантный, опирающийся на все то же Великое объединение. Реализуется ли этот вариант в природе или же это всего лишь красивая теоретическая конструкция? Ближайшее будущее покажет.

Наконец, еще одна задача, решение которой необходимо для построения единой теории, – это квантовая теория гравитации. На основании тех результатов, которые сейчас появляются в этом направлении,

можно судить, что она даст ответ на многие фундаментальные вопросы о структуре вещества, пространства, времени: почему в природе существует минимальный электрический заряд? почему фундаментальные постоянные имеют именно такие, а не иные, значения? почему наше пространство трехмерно? почему нам дан именно такой набор элементарных частиц? Возможно, что рано или поздно ответы на эти вопросы даст зарождающаяся сейчас так называемая М-теория.

### **Методологические проблемы исследований в области физики высоких энергий**

Можно выделить следующие методы познания в современной ФЭЧ: *теория* – объяснение результатов эксперимента; предсказание; *эксперимент* (ускорители и плазма) – повышение энергии пучков; повышение светимости (количества событий); повышение точности в изучении уже известных процессов (фабрики); другие подходы, например использование мю-мезонных коллайдеров; *наблюдение* («пассивные методы») – высокоэнергетичные космические частицы; гравитационные волны.

**Теории.** Согласно «Советскому энциклопедическому словарю», эксперимент – это чувственно-предметная деятельность в науке, а теория – это система основных идей в той или иной отрасли знания, причем практика, т.е. эксперимент, является критерием истинности и основой развития теории. Поэтому большинство теорий строятся из попыток объяснить эксперимент. А чтобы теория стала популярной и общепринятой, она должна предсказывать результаты других экспериментов. Так что же мешает этому процессу? Помимо нехватки экспериментальных данных и бытовых проблем, вроде нехватки денег, можно выделить что-то вроде «человеческого фактора».

Во-первых, человеческая психика всегда сопротивляется чему-то новому, т.е. даже если уже есть теория и эксперимент, отлично согласующиеся друг с другом, человеку трудно найти в себе элементарную смелость принять это. Человек, привыкший воспринимать природу через чувственно-предметную деятельность, долго сживался с новыми представлениями о сущности процессов в микромире. Несмотря на то, что квантовая механика продемонстрировала свою способность рассчитывать процессы, происходящие в микромире, ощущение недопонимания внутренних основ этой загадочной теории остается. Во-вторых, человеку хочется, чтобы все было просто и красиво, а это зачастую

приводит к заблуждениям. Физика элементарных частиц дала много примеров того, как наивные утверждения о простоте или о «красивости» заводили ученых в тупик. Например, сначала считалось, что  $P$ -четность сохраняется, но эксперимент мадам Ву показал несостоятельность этой гипотезы. Потом ученые, в том числе и Ландау, решили, что  $CP$ -четность уж точно сохраняется, но это также было опровергнуто. Эти соображения основывались только на представлениях о «красоте», но всеобщая вера в них привела к тому, что многие просто не хотели замечать их ошибочность, хотя уже получали результаты, противоречащие этим «законам». Сейчас считается, что сохраняется  $CPT$ -четность (следует из существования причинно-следственной связи). В-третьих, возникает проблема «конечности» человеческого мозга, ведь, чтобы открыть что-то новое, для начала нужно знать, что уже сделано. При современных темпах развития науки лет через сто человек за время своей жизни просто не успеет выучить то, что уже изучено. Для примера: возраст молодого ученого составляет 35 лет, для любой другой профессии – это возраст зрелости.

Если вспомнить пору, когда Эйнштейн сделал свои великие открытия, то он говорил тогда, что ему достаточно знать массу электрона, чтобы построить всю систему мироздания. В те далекие времена многим казалось, что мир устроен очень просто. Как показало развитие физики, мир устроен очень непросто.

**Ускорительная физика.** Что такое современная ускорительная физика в области высоких энергий? Это столкновение встречных электрон-позитронных либо протон-антипротонных пучков с равной энергией, что обеспечивает наибольшую энергию в системе отсчета центра инерции, причем оба пучка ускоряются в одном кольце. Другие частицы либо трудно получить в требуемых количествах, либо они мало живут. Электронные пучки проще в расчетах, поскольку электроны – элементарные частицы, но в силу малости их массы они имеют большие синхротронные потери, что ограничивает максимально достижимую энергию. В случае протонов достижимы большие энергии, но они гораздо труднее в расчетах, поскольку каждый из них состоит из трех кварков, взаимодействующих между собой сильным образом. Более того, во взаимодействии принимают участие не целиком протон и антипротон, а кварки и глюоны, входящие в их состав, поэтому чтобы получить энергию столкновения в нужной нам реакции, энергию пучков надо поделить на количество частиц в протоне и антипротоне.

Как уже говорилось, в 2006 г. в том самом туннеле, где сейчас расположен LEP, вступит в строй протонный коллайдер LHC, рассчитанный на энергию 7 ТэВ. Однако это еще не предел, – циркулярные протонные машины можно, в принципе, создавать и на энергии 100–1000 ТэВ. Поэтому технически возможно создание еще одного протонного суперколлайдера. Сейчас эта идея находится на стадии предварительного обсуждения, «кодовое название» будущей машины – VLHC (Very Large Hadron Collider). Если она когда-нибудь и вступит в строй, то не ранее чем через 20–30 лет.

Что же будет с электрон-позитронными коллайдерами? Здесь на смену круговым ускорителям придут линейные электрон-позитронные коллайдеры. Такие коллайдеры уже находятся на стадии концептуального дизайна, через несколько лет они начнут воплощаться «в железе» и через 10–15 лет вступят в строй. Типичная энергия такого линейного ускорителя (так называемого «линака») составит 500–1000 ГэВ. Кроме того, на линаке можно будет устраивать столкновения не только электронов, но и фотонов практически с той же энергией. Так что линак может работать и в режиме «фотонного коллайдера».

Еще одной совершенно свежей идеей является так называемый мюонный коллайдер, в котором будут разгоняться и сталкиваться не электроны, а мюоны – достаточно тяжелые и нестабильные частицы. Идея, которая казалась поначалу безумной, теперь выглядит в принципе реализуемой, хотя и очень сложной с технической точки зрения. Мюонные коллайдеры на 2–4 ТэВ находятся сейчас на начальном этапе концептуальной разработки. Их появление предвидится только через 15–20 лет. Интересно, что кроме выполнения своей непосредственной функции мюонные коллайдеры смогут играть роль и своеобразных «нейтринных фабрик» – мощных направленных источников мюонных нейтрино.

Сверхвысокие энергии не являются единственным способом узнать новое о природе. Есть особые зоны и при умеренных энергиях, где тщательное и кропотливое изучение тонких эффектов может привести (и приводит!) к открытиям. Такие ускорители называются «фабриками». Они работают на одной энергии и избирательно изучают необычные свойства каких-то конкретных частиц. Так, сейчас имеются «ф-фабрики», «Z-фабрики» и т.д., работающие на энергиях  $\phi$ -мезона, Z-бозона и т.д. соответственно. Идея «фабрик» оказалась очень плодотворной, так что в будущем ожидается создание и других фабрик.

Прогресс в развитии ФЭЧ базируется на «трех китах» современной физики: на технологии, эксперименте и теории. При отсутствии какого-либо из этих компонентов развитие физики попросту остановилось бы. Поэтому чтобы попытаться увидеть будущее ФЭЧ, надо понимать, каких достижений можно ожидать во всех трех областях. Можно ли рассчитывать на дальнейший прогресс в физике? Существуют ли для него пределы или принципиальные ограничения?

Продолжается поиск принципиально новых возможностей для увеличения энергии линейных коллайдеров. Для того чтобы разогнать частицу до энергий порядка 1000 ТэВ или выше на типичных дистанциях не более 100 км, требуется создать ускоряющий градиент электрического поля порядка 1 В/А. Но настолько сильные поля уже будут вырывать электроны из атомов и изменять структуру практически любых материалов. Поэтому при первой же попытке разогнать частицы таким сильным полем сам ускоритель начнет разрушаться!

**Наблюдение.** Принципиально иным направлением экспериментальной ФЭЧ является неускорительная физика. Идея заключается в том, что в природе и так существуют потоки частиц высокой энергии (иногда даже выше, чем энергии, достижимые на ускорителях), поэтому наша задача – всего лишь научиться их регистрировать. Два основных класса таких частиц – это заряженные космические лучи внесолнечного происхождения и потоки нейтрино, преимущественно солнечные и атмосферные. Свежее открытие в этой области – обнаружение масс и смешивания разных типов нейтрино на детекторе «СуперКамиоканде» в Японии. Дальнейшее развитие будут иметь работы по астрофизике на все больших по размерам составных телескопах на Земле и в космосе. Изучение потоков нейтрино из космоса с помощью расположенных под толщей земной поверхности нейтринных детекторов позволит разобраться, что же происходит внутри Солнца, при взрывах сверхновых звезд, какие процессы идут в ядрах галактик.

В скором времени завершится строительство гигантских детекторов гравитационных волн, что даст возможность изучать крупномасштабные процессы во Вселенной на протяжении всей истории ее существования. Возможно, удастся найти и изучить с помощью развиваемых в настоящее время методик темную материю во Вселенной.

Однако неускорительную физику вряд ли ожидает роль лидера экспериментальной ФЭЧ, – слишком уж неэффективно пассивное экспериментальное наблюдение.

Вообще, работы по астрофизике будут иметь приоритетное значение наряду с работами по физике элементарных частиц. Дело в том, что эти две науки оказываются все более связанными друг с другом в русле изучения проблем Большого взрыва, от которого нам в наследство остались вещество во Вселенной и реликтовое микроволновое излучение. Переход в исследованиях в области физики элементарных частиц на более высокий уровень энергий позволит продвинуться в анализе явлений, происходивших на ранних стадиях развития Вселенной, когда температура вещества соответствовала температурам, возникающим при столкновениях тяжелых ядер, ускоренных до гигантских энергий. Такие эксперименты планируются на строящемся в ЦЕРН коллайдере LHC.

\* \* \*

Физика элементарных частиц еще далека от насыщения. Несмотря на некоторое замедление в ее развитии, в ближайшие 10–15 лет вступит в строй новое поколение ускорителей, что гарантирует нам несколько существенных открытий в ФЭЧ. Это неизбежно приведет к принципиально новому и более глубокому пониманию природы.

Уже сейчас можно уловить намеки на будущую теорию, призванную заменить стандартную модель. Предполагается, что подобная теория должна содержать элементарные частицы, которых нет в СМ. Современным ускорителям не хватает энергии, чтобы родились такие новые реальные частицы, поскольку ожидаемые массы самых легких неизвестных частиц скорее всего близки к 1 ТэВ или несколько превышают 1 ТэВ. Однако не найденные пока еще частицы могут входить как промежуточные виртуальные в реакции и распады, которые можно наблюдать на современных ускорителях. Только добавка от новых частиц окажется на пять-шесть и более порядков меньше, чем основной эффект, обусловленный СМ. Поэтому чтобы обнаружить эту добавку на фоне естественных статистических флуктуаций и систематических ошибок, которые присутствуют в каждом эксперименте, необходимо увеличивать статистику и выбирать такие процессы, в которых эффект СМ проявляется в высоких порядках теории возмущений, а потому мал. Можно ожидать, что на фоне подавленной «стандартной физики» отчетливее проявятся эффекты «нестандартной физики», которые в этом случае могут быть немалыми и даже определяющими.

Новосибирский государственный  
университет, г. Новосибирск