1985 г. Август *Том 146, вып. 4*
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СУПЕРКОЛЛАЙДЕРЕ *)

Т. Аппельквист, М. К. Гайар, Дж. Д. Джэксон

Новый ускоритель частиц с очень высокими энергиями предоставит физикам возможность дальнейшего изучения основных составляющих элементов вещества и сил, связывающих их друг с другом.

Цель физики высоких энергий или, точнее, физики элементарных частиц заключается в познании основных составляющих элементов вещества и установлении тех основополагающих сил, которые связывают эти составляющие друг с другом, в результате чего и образуется окружающий нас мир. Эти проблемы считаются самыми фундаментальными еще с незапамятных времен. В нашем столетии попытки их решения привели физиков к необходимости постройки таких огромных ускорителей, как ускоритель в ЦЕРНе — европейской лаборатории физики высоких энергий вблизи Женевы в Швейцарии или же ускоритель в Национальной лаборатории им. Ферми около Чикаго.

Аналогично тому, как рентгеновские лучи, несущие большие энергии и имеющие более короткую длину волны, помогают нам изучать молекулы и даже отдельные атомы на тех масштабах расстояний, на которых это невозможно сделать с помощью обычного света, так и пучки все более энергичных частиц, получаемые с помощью современных больших ускорителей, способны проникать в самую сердцевину любой мишени, поставленной на их пути. Образующаяся при этом исключительно высокая концентрация энергии частично или полностью расходуется на рождение вещества; при этом рождается огромное число частиц, среди которых есть как стабильные, так и распадающиеся за различные времена частицы. Большие, тщательно разработанные детекторы фиксируют и измеряют этот набор частиц зачастую за очень небольшие интервалы времени, измеряемые миллиардными долями секунды. Помимо экспериментальных исследований, проводимых на таких больших ускорителях, в изучение фундаментальных частиц и их взаимодействий дает свой вклад также весьма ценная информация, получаемая из других источников. Исследования космических лучей, измерения на ядерных реакторах, поиски редких распадов ядерноактивных частиц в защищен-

*) Appelquist T., Gaillard M. K., Jackson J. D. Physics of the Superconducting Super Collider.— American Scientist, 1984, v. 72, pp. 151—165.— Перевод Н. М. Дремина.

Авторы статьи были в 1983 г. членами подкомитета по новым ускорителям, возглавляемого Стенли Войчицки, в рамках комитета советников по физике высоких энергий (HEPAP). Этот комитет разрабатывает рекомендации по программам в физике высоких энергий для Департамента энергетики США и Национальной научной ассоциации. Т. Аппельквист — профессор Йельского университета, М. Гайар и Дж. Джэксон — профессора Калифорнийского университета в Беркли, США.

© American Scientist 1984.
© Перевод на русский язык, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1985.

ном от внешнего мира пространстве глубоких подземных туннелей и шахт, а также прецизионные измерения свойств атомных превращений многое добавили к нашему пониманию физики элементарных частиц.

И все же ответы на многие из возникших вопросов можно будет получить, только проникнув еще глубже в сердцевину нуклона. А сделать это можно лишь с помощью соударений частиц со все более высокими энергиями. Именно по этой причине комитет советников Департамента энергетики США рекомендовал в 1983 г. немедленно приступить к сооружению нового ускорителя на исключительно высокие энергии. Предлагаемый ускоритель, в котором два пучка протонов будут сталкиваться лоб в лоб, назван сверхпроводящим суперколлайдером (SSC). Его длина по окружности будет около 150 км. Полная стоимость ускорителя еще не определена, но имеются надежды на то, что после нескольких лет интенсивных исследований и разработок до начала строительства удастся снизить ее до уровня ниже 2 миллиардов долларов.

Выбор энергии для SSC определяется отчасти теоретическими предсказаниями. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий, которая успешно предсказала не только существование, но и массы промежуточных векторных бозонов $W^{\pm}$ и Z^0, вдобавок к ним требует проявления новых свойств (возможно, одной частицы или же набора частиц), лежащих в основе этой теории. Хотя точная шкала масс этой новой области физики еще неизвестна, из общих принципов следует, что она не должна существенно превышать несколько ТэВ, т. е. 10^{12} эВ. Изучение той области масс, где проявятся новые явления, требует пучков сталкивающихся частиц с энергиями во много ТэВ при высокой светимости (т. е. с высокой плотностью потока сталкивающихся частиц).

Необходимая для разработки такого проекта технология уже имеется. После более чем двадцатилетних исследований и разработок по проблеме создания сверхпроводящих магнитов в США уже построен и начал успешно работать большой сверхпроводящий ускоритель — Тэватрон в Национальной лаборатории им. Ферми.

Основополагающее явление, указывающее на принципиальную возможность постройки сверхпроводящих магнитов при очень низких температурах, было известно еще с 1911 г. Однако принятая сейчас теория этого явления была сформулирована Бардином, Купером и Шриффером (БКШ) только в 1957 г. [1]. Ее разработка с доведением до инженерного уровня продолжается и поныне. Детальное описание истории попыток использовать явление сверхпроводимости в большом наборе магнитов было бы делом весьма сложным, требующим, в частности, знания взаимосвязи чисто научных интересов и металлургической технологии. Ведь только сейчас, спустя более двадцати лет со времени формулировки теории БКШ, инженерная технология позволила получить вещества, которые могут быть широко использованы. В ответ на требования применений в строительстве больших ускорителей индустрия смогла произвести в достаточных количествах сложные проводящие материалы довольно однородного качества, что позволило приступить к экстенсивному применению их. В результате сверхпроводящие магниты уже постоянно используются в больших детекторах и линиях проводки пучков частиц. Тэватрон Национальной лаборатории им. Ферми является первым ускорителем частиц высоких энергий, который полностью использует сверхпроводящие магниты. Это — пионерский шаг в ускорительной физике и технике.

Сейчас представляется возможным до конца использовать преимущества новой технологии, получив выигрыш по энергии более чем в десять раз по сравнению с Тэватроном.

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ

За последние два десятилетия в нашем понимании фундаментального строения вещества произошли значительные изменения. Общая картина, возникшая из серии экспериментальных открытий и теоретических расчетов, обладает величественной красотой и в то же время весьма проста. Полученные результаты суммированы в табл. I. Фундаментальными составляющими вещества являются кварки и лептоны — точечноподобные частицы со

Таблица I

Силы	Физические явления	Относительная величина сил *)	Эффективная область	Кванты излучения	Кванты вещества	Предлагаемая квантовая теория поля
Сильные	Ядерные связи, деление ядер, термоядерный синтез	1	10^{-13} см	Глюоны	Кварки	Квантовая хромодинамика
Электромагнитные	Электричество, магнетизм, свет	10^{-2}	Бесконечна	Фотон	Кварки, заряженные лептоны	Единая электрослабая теория
Слабые	Радиоактивный распад	10^{-5}	10^{-16} см	W, Z, хиггсовские частицы	Кварки, лептоны	
Гравитационные	Искривленное пространство-время	10^{-38}	Бесконечна	Гравитон	Все частицы	?

*) В единицах $E \sim 1$ ГэВ или $r \sim 10^{-14}$ см.

спином $\hbar/2$. Если на некоторое время игнорировать очень слабые гравитационные взаимодействия, то все силы, действующие между этими частицами, могут быть расклассифицированы по трем типам: слабые, электромагнитные и сильные. Не столь давно считали, что эти силы никак не связаны друг с другом. Сейчас, однако, в соответствии с новыми представлениями все три силы возникают за счет обмена векторными частицами (обладающими спином, равным единице), названными калибровочными бозонами. Более того, электромагнитные и слабые взаимодействия вообще оказываются отнюдь не изолированными проявлениями сил природы. Они описываются единой электрослабой теорией Глэшоу, Вайнберга и Салама. Эта теория предсказала существование и свойства слабых нейтральных токов, открытых в ЦЕРНе и Лаборатории им. Ферми в начале 70-х годов, и, что еще больше впечатляет, существование и свойства массивных заряженных ($W^{\pm}$) и нейтральных (Z^0) калибровочных бозонов, которые являются партнерами хорошо известного безмассового фотона в обычном электромагнетизме. Недавние открытия на протон-антипротонном коллайдере в ЦЕРНе этих тяжелых бозонов, обладающих массами около 80 и 100 млрд электрон-вольт (ГэВ), свидетельствуют о значительном экспериментальном достижении и одновременно об удовлетворительном подтверждении правильности основных положений принятой сейчас стандартной модели электрослабых взаимодействий [2].

Эта единая электрослабая теория вместе с теорией сильных взаимодействий (названной квантовой хромодинамикой (КХД), потому что заряды в этой теории различаются свойством с условно выбранным названием «цвет») образуют широко принятую сейчас «стандартную модель» частиц и их взаимодействий.

Серьезную поддержку этой модели обеспечивает впечатляющий успех развитой ранее теории — квантовой электродинамики (КЭД), которая описывает взаимодействие заряженных частиц со спином $\hbar/2$ (электронов и позитронов) за счет обмена безмассовым калибровочным бозоном (фотоном). Отсутствие массы у фотона вытекает из требования симметрии квантовой электродинамики, известного под названием калибровочной инвариантности. Первоначальные технические трудности КЭД были преодолены в 40-е

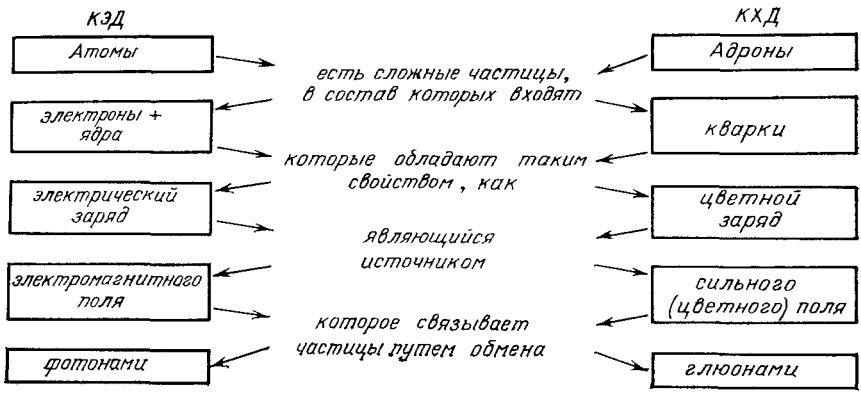

Рис. 1. Квантовая хромодинамика (КХД) распространяет понятия квантовой электродинамики (КЭД), полученные в процессе изучения электромагнитных явлений, на мир кварков, удерживаемых цветными силами внутри адронов.

Однако аналогия между КЭД и КХД отнюдь не полная. Сила связи, обусловленной сильными взаимодействиями, меняется при изменении расстояния обратным образом по сравнению с соответствующими электромагнитными взаимодействиями, как показано на рис. 2 (по [4])

и 50-е годы, в результате чего была создана теория с огромной предсказательной мощью; согласие между новейшими экспериментальными данными и этой теорией находится на уровне миллиардных долей эффекта.

Быстрое увеличение числа известных сильновзаимодействующих частиц (носящих общее название «адроны») в 50-е и 60-е годы привело к предложению Гелл-Манна и Цвейга о том, что ужасающее при первом знакомстве число таких частиц может быть весьма просто понято и упорядочено, если они состоят из трех основных составляющих, которые были названы кварками и отличались друг от друга индексами u, d, s. Эта идея получила существенную поддержку после того, как в Брукхейвенской национальной лаборатории была открыта предсказанная частица, состоявшая из трех s-кварков и названная «омега-минус-гиперон».

Затем пионерские эксперименты, проведенные в Стэнфордском центре линейного ускорителя (SLAC) в конце 60-х годов, по глубоко неупругому рассеянию электронов, сталкивающихся с протонами, показали, что протоны (и нейтроны) содержат внутри себя точечноподобные заряженные составляющие. Таким образом, появились две разные причины, чтобы поверить в сложное строение адронов. Одна из них вытекала из объяснения разнообразия типов адронов и значений их масс, а вторая была связана с их внутренней структурой, проявляющей себя при соударениях частиц с высокой энергией.

Пока теоретики пытались преодолеть сложности теории сильных взаимодействий, экспериментаторы ставили все новые и новые эксперименты, с нейтрино и с электронами, которые показали, что кварки внутри адронов ведут себя, как если бы они были свободными частицами, в том случае, когда их изучают на малых расстояниях, т. е. с помощью соударений при высоких энергиях. В начале 70-х годов была предложена КХД в качестве теории сильных взаимодействий [3]. Мощные силы между кварками приписываются в ней обмену безмассовыми векторными калибровочными бозонами, названными

глюонами. Обмен глюонами в КХД похож на обмен фотонами в КЭД. Некоторые схожие черты КЭД и КХД сопоставляются на рис. 1.

Согласно предсказанию квантовой хромодинамики кварки обладают замечательным свойством «асимптотической свободы». Его физическое содержание заключается в том, что связь между кварками, характеризуемая функцией $\alpha_s(r)$, становится все слабее по мере увеличения доступной энергии или, что эквивалентно, по мере уменьшения расстояния r между сталкивающимися частицами. Потенциал взаимодействия кварков при этом записывается в виде $\alpha_s(r)/r$. Ослабление межкварковых взаимодействий при более тесных соударениях частиц является квантовомеханическим эффектом. Соответствующий квантовомеханический эффект в электромагнетизме известен

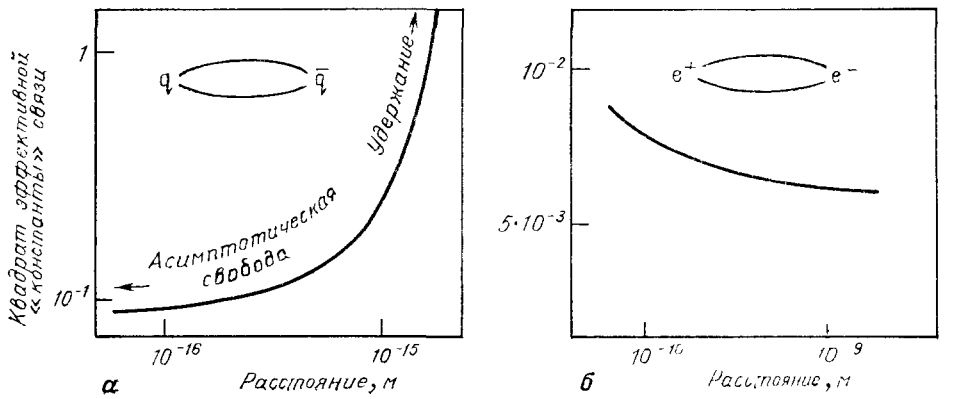

Рис. 2. Сила связи кварк-антикварковой пары (*а*) изменяется с расстоянием совсем иным образом, чем сила связи электрически заряженных частиц в непроводящей среде (*б*).

Когда кварки подходят ближе друг к другу, сила их связи ослабевает. Это явление известно под названием «асимптотической свободы». По мере удаления кварков сила их связи возрастает, что приводит к их удержанию внутри адронов. Наоборот, связь между электрически заряженными частицами становится сильнее при уменьшении расстояния между ними (по [1])

под названием поляризации вакуума и меняется с расстоянием прямо противоположным образом. Это различие КХД и КЭД проиллюстрировано на рис. 2.

Далее, считается, что в КХД силы между кварками, соударяющимися с низкими энергиями или же удаляемыми друг от друга на сравнительно большие расстояния, становятся настолько велики, что никогда не удается полностью отделить два кварка друг от друга. Таким образом, КХД дает возможность качественно понять наличие на малых расстояниях внутри адронов почти свободных кварков, с одной стороны, и, возможно, отсутствие в природе свободных изолированных кварков — с другой. Эта теория весьма богата и сложна. И хотя из нее довольно трудно получать точные предсказания, число общих свидетельств в пользу правильности ее основ все продолжает возрастать.

За последние десять лет реальность кварков как фундаментальных составляющих адронной материи была твердо установлена. Этому в особенности содействовали драматичное открытие в SLAC и Брукхейвене частицы J/ψ и связанного с ней набора частиц, а затем обнаружение ипсилон-частицы в Лаборатории им. Ферми и соответствующего ей набора частиц на Корнелльском электронном накопительном кольце (CESR). Многочисленные семейства массивных пси- и ипсилон-частиц указывают на существование новых кварков, названных c и b. Открытие в 1975 г. тау-лептона в SLAC пополнило лептонный класс частиц. И, наконец, структура электрослабых взаимодействий приучает нас к тому, чтобы группировать кварки и лептоны по «семействам», или «поколениям». В соответствии с этим u- и d-кварки совместно с электроном и электронным нейтрино образуют первое семейство.

Кварки c и s совместно с мюоном и его нейтрино составляют следующее поколение, а b-кварки вместе с еще не наблюдавшимся *) t-кварком, а также с тау-лептоном и его ожидаемым партнером — нейтрино образуют третье семейство. Доказательства существования первых двух семейств настолько прочны, что вряд ли кто-либо из физиков, связанных с физикой частиц, сомневается в том, что t-кварк, а также свидетельства в пользу тау-нейтрино будут найдены в ближайшее время *). Тем самым третье семейство тоже окажется заполненным.

Итак, физика высоких энергий существенно изменилась по сравнению с тем, что было в начале 60-х годов. Целая серия замечательных экспериментальных открытий в сочетании с появлением калибровочных теорий поля привели к заметному продвижению в понимании взаимодействий элементарных частиц. Стандартная модель теория электрослабых взаимодействий была подвергнута тщательной проверке при низких энергиях. С открытием векторных бозонов $W^{\pm}$ и Z^0 ее позиции упрочились еще больше. С другой стороны, квантовая хромодинамика продолжает оставаться наилучшим способом теоретического описания сильных взаимодействий. Несмотря на то, что сейчас нет строгих количественных проверок теории, имеется множество наблюдаемых на опыте явлений, которые удается легко понять и объяснить только в рамках квантовой хромодинамики. Одним из примеров может служить кластеризация адронов, рождаемых при соударениях частиц очень высоких энергий, в сильно коллимированные струи. Отсюда же было получено первое прямое свидетельство о наличии глюонов (опыт был поставлен на электрон-позитронных встречных пучках PETRA в Гамбурге, ФРГ).

НЕКОТОРЫЕ НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Стандартная модель (если под этим понимать единую электрослабую теорию плюс КХД) приводит к последовательному описанию широкого круга явлений, но она не может дать окончательный ответ на все вопросы. Например, она не предсказывает числа поколений кварков и лептонов, а также их масс или хотя бы отношений масс. Неопределенным остается и точное соотношение между силой слабых и электромагнитных взаимодействий, задаваемое эмпирическим углом θ_W. Более того, многие свойства слабых токов никак не ограничиваются такой теорией. И, наконец, возможно, наиболее важной проблемой является то, что пока еще плохо понят один из наиболее существенных аспектов этой теории — тот механизм, который заставляет калибровочные бозоны W и Z иметь столь большие массы, тогда как фотон остается безмассовым.

Это нарушение симметрии, называемой калибровочной инвариантностью, известно под названием механизма Хиггса. Природа столь загадочного явления не ясна, и эта проблема служит особенно важным и тревожащим вызовом экспериментаторам, работающим в физике высоких энергий. Существуют общие аргументы, основанные на самосогласованности теоретических построений, в пользу того, что шкала масс (или энергий), где должен начать проявлять себя хиггсовский механизм нарушения симметрии, окажется не более нескольких ТэВ. Хотя эти энергии, возможно, лежат вне области достижимости современного поколения ускорителей, они, несомненно, окажутся доступными для экспериментирования на адронном коллайдере с максимальными энергиями во много ТэВ.

Тревожность момента усиливается тем фактом, что мы почти ничего не знаем о том, что же удастся найти в этой области энергий. Хиггсовский сектор описывается обычно набором скалярных (бесспиновых) полей, взаимодействия которых приводят к нарушению калибровочной инвариантности и порождают наблюдаемые на опыте массы калибровочных бозонов W и Z.

*) В середине 1984 г. было сообщено об открытии и тяжелого t-кварка. (*Прим. перев.*)

Однако имеются некоторые основания для того, чтобы относиться с определенным скептицизмом к такому механизму. Возможно, лежащая в основе этого явления физика окажется совершенно другой. Независимо от того, какие конкретные экспериментальные факты будут обнаружены, вряд ли можно сомневаться, что дальнейший прогресс теории будет зависеть критическим образом от информации, которую можно получить лишь путем прямого экспериментального исследования хиггсовского сектора.

Утверждение о том, что шкала масс для новых явлений, связанных с хиггсовским сектором, не может превышать нескольких ТэВ, следует строго из «унитарности» в применении к электрослабой теории. Свойство унитарности состоит просто в утверждении, что сумма вероятностей всех возможных исходов эксперимента равна единице. Использовав два десятилетия тому назад это свойство в фермиевской теории слабых взаимодействий, теоретики предсказали новые явления в слабых взаимодействиях при массах меньше нескольких сотен ГэВ. Сейчас мы признаем проявление этих эффектов в виде калибровочных бозонов W и Z.

Конечно, феномен Хиггса может иметь место и при массах, заметно меньших 1 ТэВ. Несомненно, поиски столь легкой хиггсовской частицы следует вести. Однако в своей традиционной формулировке теория утверждает, что массы столь низкого масштаба оказываются нестабильными относительно квантовых поправок. Нацеленные на решение этой проблемы конкретные модели действительно приводят нас к выводу о естественной шкале масс хиггсовского сектора в районе нескольких ТэВ.

Происхождение нарушенной симметрии электрослабых взаимодействий является только одной из множества загадок, с которыми приходится встречаться на переднем крае физики элементарных частиц. Однако, вследствие важности этой проблемы и ее познавательной ценности, к нашим планам на будущее мы уже можем предъявить некоторое четкое минимальное требование: следующий высокоэнергетичный ускоритель, который будет разрабатываться и сооружаться в США, должен сделать возможным высвобождение энергии в несколько ТэВ для рождения новых частиц.

Изучение области масс порядка ТэВ может стать реальностью либо на электрон-позитронных встречных пучках с энергией в несколько ТэВ в системе центра масс, либо на адронном коллайдере с энергией в десятки ТэВ в системе центра масс. Бóльшая величина энергии, требуемой в случае адронного коллайдера, обусловлена тем фактом, что фундаментальные взаимодействия происходят между составляющими адроны кварками и глюонами, каждый из которых несет лишь долю энергии первичного адрона. В обоих случаях необходима высокая светимость для того, чтобы обеспечить достаточный статистический набор данных для проведения серьезных исследований, поскольку «слабые» явления, по определению, должны приводить к редким событиям.

Физические результаты, получаемые из этих двух источников, в равной степени привлекательны и в чем-то дополняют друг друга. Эксперименты на протон-антипротонном коллайдере в ЦЕРНе при энергии в системе центра масс около 0,5 ТэВ показали, что удается намного легче, чем вначале предполагалось, выделить ожидаемые процессы среди множества других, происходящих при соударениях частиц высоких энергий. Адроны предоставляют возможность исследовать большее разнообразие фундаментальных начальных состояний — разных типов кварков и глюонов. Это позволяет изучить существенно более широкий круг явлений. В то же время электрон-позитронные коллайдеры обладают тем преимуществом, что энергия и импульс начального состояния определены лучше. Рекомендуя начать строительство сверхпроводящего суперколлайдера, подкомитет по новым ускорителям комитета советников по физике высоких энергий в 1983 г. исходил из того, что современный уровень технологии делает адронный коллайдер с энергиями, заметно превышающими 1 ТэВ, более доступным.

На таком коллайдере, возможно, удастся наблюдать много новых явлений механизма нарушения симметрии в электрослабых взаимодействиях. Например, можно надеяться получить на нем важную информацию, с помощью которой облегчилось бы дальнейшее продвижение теории по пути «Великого объединения». В то время как сильные взаимодействия становятся все слабее по мере роста энергии, электрослабые взаимодействия, наоборот, усиливаются. Поэтому естественно возникает вопрос, при какой энергии эти весьма разные силы становятся равными и происходит ли такое явление вообще. Если это имеет место, то, возможно, сильные и электрослабые взаимодействия описываются разными частями одной единой теории, в которой кварки и лептоны появляются на равных основаниях. Замечательным обстоятельством является то, что по оценкам такое равенство оказывается возможным, но лишь при исключительно высоких энергиях порядка 10^{14} ГэВ, что находится вне пределов досягаемости любых вообразимых высокоэнергетических установок, которые могут быть построены в лабораторных условиях [5]. Тем не менее даже при энергиях в несколько ТэВ могут быть добавочные частицы или явления, связанные с этим объединением.

Великое объединение кварков и лептонов возможно лишь при наличии очень массивных калибровочных бозонов, ответственных за переходы между этими двумя классами частиц, вдобавок к известным калибровочным бозонам стандартной модели. Одно из замечательных следствий такой расширенной теории состоит в понимании точного равенства значений электрических зарядов электрона и протона. Другое заключается в предсказании распада протона с исключительно малой, но доступной для измерения скоростью. Остальными следствиями Великого объединения являются успешное предсказание электрослабого угла θ_W, возможное наличие отличных от нуля масс нейтрино и существование очень тяжелых (10^{16} ГэВ) магнитных монополей. Астрофизики не медлили с использованием возможностей теории Великого объединения для решения загадок наших дней, таких, как скрытое вещество во Вселенной (массивные нейтрино?), или же для раскрытия последствий того, что произошло в ранней истории Вселенной, таких, как изотропия первичного микроволнового излучения или наблюдаемое отношение числа барионов к числу фотонов. Все возрастающая взаимосвязь физики частиц и космологии является поистине одним из наиболее поразительных и плодотворных результатов последних лет. (В. Ф. Вайскопф обсуждает связи физики частиц и космологии в журнале «American Scientist» за сентябрь — октябрь 1983 г.)

Кроме теории Великого объединения есть другая впечатляющая область теоретического прогресса — суперсимметрия. При нашем сегодняшнем понимании мира частицы с целым спином представляются совершенно не имеющими ничего общего с частицами, спин которых полуцелый. С помощью Великого объединения мы смогли рассматривать на равных кварки и лептоны, обладающие весьма разными взаимодействиями, хотя и не отличающиеся своими спинами, равными 1/2 в обоих случаях. А почему бы не попытаться пойти еще на один шаг дальше и объединить бозоны (с целым спином) и фермионы (с полуцелым спином)? В этом состоит цель суперсимметричных теорий, в которых каждая частица имеет своего суперсимметричного партнера («частицу»), обладающего абсолютно теми же свойствами, за исключением спина, отличающегося на 1/2. Поскольку мы до сих пор еще не обнаружили ни одной суперсимметричной пары, эта симметрия должна быть нарушенной. Партнеры-частицы, если таковые вообще существуют, должны иметь намного большие массы, чем все известные сейчас частицы. Сколь ни странной может показаться идея о суперсимметрии, существуют достаточно привлекательные теоретические соображения (из которых наиболее обещающей является возможность описания гравитационных сил в рамках единой теории всех элементарных взаимодействий) для того, чтобы считать эту идею жизнеспособной и продолжать экспериментальные поиски ее проявлений. Некоторые

из них вполне могли бы заявить о себе уже при энергиях многотэВного сверхпроводящего суперколлайдера.

Итак, за прошедшие два десятилетия наблюдалось множество вдохновляющих указаний на то, что мы находимся на верном пути. Тем не менее все еще остается много нерешенных проблем. Существуют ли другие поколения кварков и лептонов? Есть ли другие, еще более тяжелые калибровочные бозоны? Какова природа хиггсовского сектора? Безмассовы ли нейтрино? И если да, то почему? Как частицы приобретают массу? Существуют ли суперсимметричные партнеры у обычных частиц? Список этих вопросов бесконечен.

РОЛЬ НОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Особенность области физики высоких энергий состоит в том, что исследования на одном из ускорителей частиц, давая ответ на некоторые вопросы, поднимают одновременно множество новых вопросов, на которые можно

Таблица II

Основные открытия, сделанные на некоторых ускорителях за прошедшие 30 лет *)

Ускоритель	Примерные даты	Тип пучка	Приблизительная наивысшая энергия	Основные открытия
Брукхейвенский космотрон	1952—1967	Протонный	3 ГэВ	Ассоциативное рождение странных частиц
Берклиевский беватрон	1954—1972	Протонный	6,4 ГэВ	Антипротон, адронные резонансы
Черновский протонный синхротрон	1960—	Протонный	30 ГэВ	Слабые нейтральные токи
Брукхейвенский AGS	1960—	Протонный	33 ГэВ	Омега-минус-частица, CP-нарушение, J-частица
Двухмильный линейный ускоритель SLAC'a	1966—	Электронный	30 ГэВ	Скейлинг в глубоконеупругом рассеянии электронов на протонах, нарушение четности в слабых нейтральных токах
400 ГэВ-ный ускоритель Лаборатории им. Ферми	1972—	Протонный	400 ГэВ	Ипсилон-частица
Электрон-позитронное асимметричное кольцо (SPEAR) SLAC'a	1972—	Электронный + + позитронный	4,2 ГэВ × × 4,2 ГэВ	Пси-частица — доказательство существования c-кварка, тау-лептон
Электронное накопительное кольцо (CESR) в Корнелле	1978—	Электронный + + позитронный	8 ГэВ × × 8 ГэВ	Возбужденные состояния ипсилон-частицы — доказательство b-кварка
Позитрон-электронный тандемный кольцевой ускоритель (PETRA) DESY (Гамбург)	1979—	Электронный + + позитронный	19 ГэВ × × 19 ГэВ	Струи частиц — доказательство глюона
Черновский протон-антипротонный коллайдер	1981—	Протонный + + антипротонный	270 ГэВ × × 270 ГэВ	Слабые векторные бозоны

*) Этот список далеко не полон. Важный вклад в изучение элементарных частиц был сделан на многих других ускорителях.

надеяться найти ответы лишь с помощью других, обычно еще более мощных ускорителей. Если перечислять только установки в США, то, начав с ранних синхроциклотронов, следует упомянуть космотрон в Брукхейвене, беватрон в лаборатории им. Лоуренса в Беркли, ускорители AGS в Брукхейвене и ZGS в Аргонне, электронный линак в SLAC, 400 ГэВ-ный ускоритель в Национальной лаборатории им. Ферми и электрон-позитронные встречные пучки в SLAC и Корнелле. Как протонные, так и электронные ускорители и коллайдеры были нацелены на решение важных проблем и давали важные и зачастую озадачивающие ответы на многие из вопросов, возникавших в прошедшие годы (табл. II). Прогресс в этой области исследований в основном определяется темпом новых открытий на вступающих в строй установках. Остающиеся на сегодня безответными вопросы естественно возникли из вчерашних открытий. Среди них имеется специфическая и весьма важная проблема электрослабого хиггсовского сектора, решение которой, как представляется, можно найти с помощью доступных сейчас технических разработок.

Мы не знаем, какой окажется физика частиц в области энергий выше ТэВ, но совершенно ясно понимаем, что изучение этого энергетического интервала дает новые, абсолютно необходимые указания нашим попыткам все более глубоко проникнуть в теоретическое описание природы. Такое продвижение кажется возможным благодаря ведущимся уже более двух десятилетий исследованиям и разработкам в области техники сверхпроводящих магнитов. Сверхпроводящий суперколлайдер предоставит самые реальные возможности поистине фундаментального прогресса на пути нашего растущего понимания строения элементарных частиц и единства всех сил природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краткое популярное введение в сверхпроводимость см. в книге: Фейнман Р. П. и др. Фейнмановские лекции по физике.— М.: Мир, 1967, т. 3, гл. 21.
2. Arnison G. et al.— Phys. Lett. Ser. B, 1983, v. 122, p. 103 (перевод: УФН, 1983, т. 141, с. 501); v. 126, p. 398; v. 129, p. 273.
3. Введение в основы КХД можно найти в статье: Rebbi C.— Scientific American, 1983, v. 248, p. 54.—(Перевод: Ребби К.— В мире науки, 1983, № 4, с. 36.— *Перев.*)
4. Wallace D.— New Scientist, 1983, v. 100, p. 668.
5. Gaillard M. K.— American Scientist, 1982, v. 70, p. 506.