

# Проблемы физики элементарных частиц

С.С. Герштейн

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## 1. Стандартная Модель

Основу современных представлений о физике элементарных частиц составляет так называемая *Стандартная Модель (СМ)*, согласно которой существуют три поколения лептонов (электрон, мюон,  $\tau$ -лептон вместе со своими нейтрино) и три поколения кварков. Причем каждый тип (“аромат”) кварка может присутствовать в трех различных состояниях, отличающихся особым квантовым числом — “цветом”. Кварки и лептоны участвуют в универсальном электрослабом взаимодействии, переносчиками которого являются калибровочные поля и соответствующие им частицы: фотон ( $\gamma$ ),  $W^\pm$ ,  $Z^0$ -бозоны, а цветовые заряды кварков являются источниками особых калибровочных цветовых полей, которым отвечают глюоны — переносчики сильных взаимодействий. Существующая теория (СМ) однозначно предсказывает свойства калибровочных полей и законы взаимодействия их с кварками, лептонами и между собой. (Исключением является лишь область взаимодействия кварков и глюонов при низких энергиях, где оказываются неприменимыми общие методы теории возмущений.)

Все существующие к настоящему моменту экспериментальные данные (в особенности прецизионные измерения на LEP) находятся в согласии со Стандартной Моделью. Последним остающимся вопросом, решение которого необходимо для полного подтверждения СМ, является проблема спонтанного нарушения калибровочной симметрии электрослабого взаимодействия, приводящая к появлению массы у  $W$ - и  $Z$ -бозонов. Наиболее популярным механизмом этого нарушения является в настоящее время механизм Хиггса, требующий существования скалярного бозона. (Хотя, в принципе, существуют и другие альтернативные механизмы.)

Одним из достоинств механизма Хиггса является перенормируемость теории, позволяющая однозначно вычислять радиационные поправки к электрослабым процессам. Из прецизионных измерений LEP удалось на основе вычислений радиационных поправок правильно предсказать массу  $t$ -кварка и диапазон возможных масс бозона Хиггса. К сожалению, из слабой (логарифмической) зависимости величины радиационных поправок от массы хиггсовского бозона диапазон предсказываемых масс оказывается довольно широким. Согласно оценкам масса хиггсовского бозона во всяком случае не должна превышать 260 ГэВ. Не исключена возможность существования и “легкого” бозона Хиггса с массой около 100 ГэВ. Поиски бозона Хиггса являются главной задачей коллайдера LHC. Основной трудностью в поисках бозона Хиггса является фон от многоструйных событий, наблюдающихся в адрон-адронных столкновениях при высокой энергии. В принципе, если “повезет”, “легкий” бозон Хиггса с массой, меньшей 200 ГэВ, может быть обнаружен и раньше, на коллайдере Лаборатории Ферми при наличии достаточно большой светимости и совершенного вершинного детектора, регистрирующего  $b$ -кварки по их времени жизни. Важное значение для проверки СМ будет дальнейшее изучение свойств  $t$ -кварка и уточнение его характеристик.

Очень перспективными для детального изучения  $t$ -кварка могут быть линейные  $e^+e^-$ -коллайдеры и мюонный коллайдер. Возможности создания  $\gamma\gamma$ -коллайдера на основе ли-

нейных электронных коллайдеров (так же, как и  $\mu\mu$ -коллайдер) исключительно интересны для поиска и детального изучения бозонов Хиггса в условиях меньшего, чем на адронных коллайдерах, физического фона.

## 2. Минимальное расширение СМ

Блестящее согласие современных экспериментальных данных со Стандартной Моделью является вместе с тем несколько обескураживающим, так как СМ, использующая довольно большое число феноменологических параметров (масс кварков и лептонов, углов смешивания и др.), представляет собой лишь эффективную теорию, параметры которой, можно надеяться, будут определены из более широких симметрий.

В связи с этим важное значение имеет поиск суперсимметричных партнеров обычных частиц. Одним из доводов в пользу существования суперсимметрии является то, что при ее наличии обе электрослабые константы сравниваются с константой сильного КХД-взаимодействия при одной и той же энергии, приводя к Великому Объединению электрослабых и сильных взаимодействий. Наличие суперсимметрии дает возможность объединить эти взаимодействия и с гравитацией. Поиск суперсимметричных частиц (SUSY) является одной из важнейших задач для коллайдера Лаборатории Ферми и ЛНС.

## 3. Поиски редких распадов

Если Великое Объединение происходит (как это ожидается) при энергиях порядка  $10^{15}$  ГэВ, то его объекты (промежуточные бозоны) будут недоступны для прямого обнаружения на ускорителях. Однако следствия Великого Объединения могут быть обнаружены при более низких энергиях в виде дополнительных бозонов (например,  $Z'$ , предсказываемый в некоторых моделях) или в исключительно редких распадах. Одним из таких распадов является распад протона, поиск которого принадлежит “неускорительной” физике.

Вместе с тем поиск и обнаружение некоторых исключительно редких распадов вторичных частиц, рождающихся на ускорителях высокой энергии, также может послужить способом выбора моделей Великого Объединения. Для пояснения можно привести следующее сравнение. Прямым и окончательным подтверждением одной природы слабых и электромагнитных взаимодействий явилось обнаружение на опыте  $W$ - и  $Z$ -бозонов, измерение их масс и ширин распада. Однако, если бы не были изобретены коллайдеры и непосредственное наблюдение  $W$ - и  $Z$ -бозонов оказалось бы невозможным, косвенная проверка электрослабой теории все же была возможна путем изучения свойств нейтральных токов и сравнения их с заряженными. Аналогичным образом, можно надеяться, удастся проверить гипотезу Великого Объединения. (Дополнительные возможности предоставляет при этом космология.)

В связи с этим большой интерес представляет поиск ненаблюдавшихся редких распадов частиц, содержащих  $s$ -,  $c$ -,  $b$ -кварки, и прецизионное изучение известных распадов. Например, увеличение на несколько порядков точности отношения  $e\nu_e$ - и  $\mu\nu_\mu$ -распадов псевдоскалярных  $K$ -,  $D_s$ -,  $B_c$ -мезонов может дать сведения о таких объектах, как лепто-кварки (если даже прямое наблюдение их в  $e\nu$ -,  $\mu\nu$ -реакциях окажется невозможным на существующих или проектируемых ускорителях). Важнейшие сведения можно получить из наблюдения (или отсутствия) распадов  $\mu \rightarrow e\gamma$  или конверсии  $\mu \rightarrow e$  на уровне относительной вероятности  $10^{-13} \div 10^{-14}$ . Поэтому важное значение имеют ускорители с высокой интенсивностью,  $K$ - и  $\pi$ -мезонные фабрики. Надо отметить, что обсуждаемые в настоящее время возможности использовать высокоинтенсивные протонные ускорители на

энергию 1,5–2 ГэВ для электробридинга и создания безопасных АЭС могут предоставить необходимую базу и для изучения редких процессов ( $\mu \rightarrow e\gamma$  и др.).

#### 4. Проблема нарушения $CP$ -симметрии

Природа сил, нарушающих комбинированную  $CP$ -четность, остается в течение 35 лет невыясненной. Между тем она имеет фундаментальное значение как для физики элементарных частиц, так и для космологии. Возможно, что именно наличие этих сил и несохранение барионного числа обеспечили барионную асимметрию Вселенной. Взаимодействия, нарушающие  $CP$ -четность, наблюдались пока только в распадах долгоживущих  $K_L^0$ -мезонов. Существуют две возможности их объяснения. Одна из них предполагает существование так называемых сверхслабых взаимодействий с константой  $\sim 10^{-9} G_F$  (где  $G_F$  — константа слабого взаимодействия). Эти силы проявляются в распадах  $K_L^0$ -мезонов благодаря очень малой разности масс  $K_L^0$ - и  $K_s^0$ -мезонов и практически будут недоступны при изучении большинства других распадов (например,  $K^+$ - и  $K^-$ -мезонов).

Другая (наиболее популярная в настоящее время) возможность состоит в том, что  $CP$ -нарушающие силы появляются из-за того, что слабое взаимодействие, перемешивающее тяжелые кварки с легкими, имеет комплексную фазу. Малость  $CP$ -нарушающих сил (порядка  $10^{-3}$  от слабых) связана в этой модели с малостью углов смешивания кварков, а само взаимодействие можно было бы назвать милислабым. В случае милислабых взаимодействий должен быть отличен от нуля и иметь величину порядка  $10^3$  особый параметр распада  $K_L^0$ -мезонов ( $\frac{\epsilon'}{\epsilon}$ ). Измерения этого параметра дают пока неоднозначные результаты. Если этот параметр окажется отличным от нуля, то возникнут возможности изучения  $CP$ -нарушающих сил в прецизионных опытах по распаду других частиц ( $K^+$ - и  $K^-$ -мезонов).

В концепции милислабых взаимодействий особое значение имеет изучение распадов частиц, содержащих тяжелые  $b$ -кварки. Подобные эксперименты планируются на  $b$ -фабриках ( $e^+e^-$ -коллайдерах), а также возможны на адронных коллайдерах (например, на Тэватроне Лаборатории Ферми после реконструкции). Достоинством адронных коллайдеров для этой цели является большее сечение рождения  $b$ -кварков, а недостатком — наличие большого фона. Наиболее приспособленной для систематического изучения  $CP$ -нарушения в распадах  $b$ -кварков может, по-видимому, быть специализированная установка ЛНСВ на сооружаемом коллайдере ЛНС.

#### 5. Проблема невылетания кварков и адронная спектроскопия.

##### Спиновые эффекты

В настоящее время нельзя считать решенной проблему “пленения” цвета (конфайнмента кварков). Определенным указанием здесь служит явление так называемой асимптотической свободы на малых расстояниях, согласно которому силы, связывающие кварки, растут с ростом расстояний между ними. Однако при переходе к “большим” расстояниям порядка  $10^{-13}$  см обычные методы теории возмущений оказываются неприменимыми, в связи с этим остается нерешенной и проблема неразделимости кварков.

С теоретической точки зрения возможно, что ответ удастся получить с помощью так называемых решеточных вычислений. Вместе с тем представляется, что ключ к решению проблем непертурбативной КХД могут дать экспериментальные исследования в области адронной спектроскопии (поиски экзотических состояний: глобулов, гибридов, многокварковых состояний), а также изучение спиновых явлений. В этом отношении важное значение

имеют ускорители с фиксированной мишенью (в том числе Серпуховский ускоритель, SPS в ЦЕРНе, инжектор и Тэватрон Лаборатории Ферми).

## 6. Дальние нейтрино и неускорительная физика

Фундаментальной проблемой является вопрос о сохранении барионного и лептонных чисел. В связи с этим особое значение имеют опыты по поиску осцилляции нейтрино на больших расстояниях. Указанные эксперименты планировались нами ранее на УНК с выводом пучка нейтрино на подземную лабораторию Гран-Сассо в Италии (от 600-ГэВ ускорителя) и на Байкальский нейтринный детектор (от ускорителя на 3 ТэВ).

В настоящее время осуществляются проекты дальних нейтрино от инжектора Тэватрон Лаборатории Ферми и в ЦЕРН. Возможно, однако, что разности масс различных типов нейтрино и их параметры смешивания столь малы, что базы в 100 км будет недостаточно для обнаружения осцилляций. Уникальную возможность в этом случае представляют эксперименты с солнечными нейтрино, проводимые детекторами разного типа, а также регистрация атмосферных нейтрино и нейтрино от сверхновых. Вместе с поисками нестабильности протона, поисками экзотических частиц в окружающей среде, изучением природы так называемой “темной материи” во Вселенной и др. — все это составляет предмет неускорительной физики элементарных частиц, которая существенно дополняет исследования, проводимые на ускорителях, и приобретает особенно важную роль в связи с гипотезой Великого объединения.