

ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Б.А.Арбузов

Институт физики высоких энергий, г. Серпухов

Последние годы отмечены большим прогрессом в физике высоких энергий. С одной стороны, широкий фронт экспериментальных работ, проводимых в различных ускорительных центрах мира, привел к ряду очень важных открытий. С другой стороны, большие достижения имеются в теоретическом осмыслении явлений при высоких энергиях, в том числе и вновь открытых. Среди открытий, сделанных в последние годы, можно отметить явление масштабной инвариантности, явление роста полных сечений при увеличении энергии, открытие семейства Ψ -частиц, весьма сильные указания на существование тяжелого лептона, наконец, большое количество новых эффектов в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях, которые указывают на существование частиц с новым квантовым числом, называемым обычно "чармом".

Многообразные эксперименты, которые вылились в эти открытия, стали возможны, в первую очередь, благодаря созданию мощных протонных ускорителей, встречных протон-протонных и электрон-позитронных колец.

Накопленная экспериментальная информация и усилия теоретиков привели к тому, что начинает вырисовываться картина структуры элементарных частиц и их взаимодействий. Не все детали этой картины ясны, и, более того, мы пока не можем быть полностью уверены в справедливости картины в целом, однако в рамках её в настоящее время мы можем хотя бы качественно описать имеющиеся сведения о взаимодействиях частиц при высоких энергиях. Будущие эксперименты при еще более высоких энергиях на новых ускорительных комплексах позволят проверить современные представления и уточнить их детали.

Каковы же эти современные представления ?

Сейчас известны три сорта частиц: сильно взаимодействующие частицы адроны, частицы, не имеющие сильных взаимодействий, — лептоны и, наконец, третью группу образует единственная частица — фотон. Основная масса частиц принадлежит к первой группе. Многочисленные данные указывают на то, что эти частицы имеют сложную составную структуру. Согласно таким представлениям адроны состоят из фундаментальных частиц, получивших, как известно, название кварков. Минимальное число кварков, из которых можно построить известные частицы, составляет четыре (u , d , s , c), они отличаются друг от друга квантовыми числами: изотопическим спином, странностью и чармом. Кроме того, из принципа Паули следует, что для правильного описания совокупности барионов и барионных резонансов (протон, нейтрон, гипероны, их резонансы) необходимо существование трех сортов каждого кварка. За квантовым числом, различающим эти сорта кварков утвердилось название "цвет". При этом возможны два варианта кварковой модели: модель с дробными зарядами кварков и модель с целыми зарядами кварков. Обе модели приводят к одинаковой систематике частиц, но, вообще говоря, дают различные предсказания для электромагнитных взаимодействий адронов. Перед кварковой моделью в такой форме стоит основной вопрос: почему, несмотря на интенсивные поиски, не найдены цветные состояния адронов и, прежде всего, сами кварки? Есть различные возможности. Во-первых, кварки могут иметь очень большую массу. Тогда они должны будут в конце концов обнаружены в опытах на будущих ускорителях со сверхвысокими энергиями. Следующая возможность заключается в том, что кварки (с целыми зарядами) нестабильны, что и объясняет отрицательный результат их поисков. И, наконец, наиболее широко обсуждается в последнее

время возможность "заключения кварков". Согласно этой гипотезе кварки имеют небольшие массы, одна из возможностей – всего несколько МэВ, но взаимодействие между ними устроено таким образом, что кварки не могут покинуть внутренней области частицы. Простейшая модель такой ситуации – потенциал с бесконечными стенками. Существует ряд вариантов таких моделей "мешков", которые феноменологически достаточно хорошо описывают данные. Однако возникает вопрос, как понять возникновение таких "мешков" с точки зрения квантовой теории поля. Здесь надежды связаны в основном с теорией, в которой сильное взаимодействие между кварками осуществляется путем обмена безмассовыми цветными векторными частицами, которые получили название глюоны. При этом теория должна быть строго калибровочно-инвариантной, а кварки обязательно имеют дробные заряды. Благодаря сильным инфракрасным особенностям в такой теории потенциал взаимодействия между кварками может бесконечно возрастать на больших расстояниях. В настоящее время это предположение кажется вполне вероятным, но доказать его пока не удалось. Рассматриваются и другие возможности получения "мешка", в частности, потенциалов, имеющих бесконечные стенки на конечном расстоянии. Так или иначе решить вопрос о том, являются ли фундаментальные составляющие материи "заключенными" или нет – важнейший вопрос науки о строении вещества, – могут лишь дальнейшие исследования при сверхвысоких энергиях. В частности, теория с безмассовыми глюонами дает достаточно определенные предсказания для поведения ряда процессов при сверхвысоких энергиях. Рассмотрим для примера глубоконеупругое рассеяние электронов или нейтрино на нуклонах. В рамках представления о кварках хорошее описание глубоконеупругих процессов дается кварк-партоновой моделью, которая приводит при высоких энергиях к масштабной инвариантности, т.е. к зависимости структурных функций только от отношения кинематических переменных. Если же учесть влияние обмена глюонами между кварками, возникают логарифмические отклонения от масштабной инвариантности. Некоторые отклонения от масштабной инвариантности наблюдаются уже при существующих энергиях, однако пока нельзя сказать, являются ли они логарифмическими степенными или какими-либо иными. Для решения этого вопроса необходимо повышение энергии опытов по реакциям электронов с нуклонами. В частности, большие возможности открывают здесь электрон-протонные встречные кольца. Другой пример характерного

предсказания глюонной теории – адроны нового типа, состоящие не из кварков, а из глюонов – так называемые "комки клея".

С другой стороны, существуют альтернативные варианты калибровочных теорий с массивными глюонами и незаклученными кварками, которые также имеют свои предсказания.

Следующий важнейший вопрос составной модели – количество кварков с различными квантовыми числами. В настоящее время проводятся интенсивные поиски частиц, в составе которых присутствует четвертый кварк, обладающий новым квантовым числом – "чармом". Существование такого квантового числа предсказывается на основании симметрии слабых взаимодействий. В настоящее время имеются убедительные данные, что чармованные частицы уже наблюдаются в опытах с массами в районе 2 ГэВ. Однако рассматриваются возможности существования также и еще более новых квантовых чисел, носителями которых являются еще более тяжелые частицы (4–6 ГэВ и больше). Для изучения вопроса об их существовании требуются и более высокие энергии.

Основой теории элементарных частиц является квантовая теория поля, основанная на фундаментальных принципах, таких как условия причинности, релятивистской инвариантности, унитарности, т.е. сохранения вероятности. Следствием этих принципов являются дисперсионные соотношения, связывающие между собой действительные и мнимые части амплитуд, а также ряд асимптотических теорем, накладывающих ограничения на поведение как упругих, так и инклюзивных процессов при высоких энергиях. Поэтому продвижение к более высоким энергиям дает возможность проверки основных принципов теории. Например, отклонения от предсказаний свидетельствовали бы о существовании элементарной длины, что могло бы в корне изменить наши представления об основах теории.

В настоящее время очень важными с точки зрения общей структуры физики элементарных частиц становятся исследования по слабым взаимодействиям. Существенный прогресс здесь связан с едиными калибровочными теориями слабых и электромагнитных взаимодействий.

Как известно, традиционная четырехфермионная теория слабых взаимодействий принадлежит к классу неперенормируемых. Вследствие этого возникают связанные между собой проблемы унитарного предела при высоких энергиях и высших порядков в теории. Дело в том, что все опыты, которые мы имеем в настоящее время (будь то

распады или нейтринные реакции) проверяют лишь первый порядок теории возмущений. Если же мы рассмотрим высшие порядки теории, подобные тем, какие в электродинамике приводят к аномальному магнитному моменту или Ламбовскому сдвигу, возникают неустраняемые расходимости, и разложение по константе связи теряет смысл. Точно также разложение по константе связи теряет смысл при высоких энергиях в районе и выше унитарного предела $s = 2\pi/G \approx (1000)^2 (\text{ГэВ})^2$, т.е. 1000 ГэВ в системе центра масс. Теория говорит нам, что в обоих случаях необходимо учитывать все порядки теории возмущений в целом, что пока может быть осуществлено лишь в простых моделях, но не в реальной теории. Так или иначе достижение или хотя бы приближение к энергии унитарного предела дает возможность экспериментально ответить на самые фундаментальные вопросы теории слабого взаимодействия. При этом, впрочем, могут быть обнаружены важные эффекты и при несколько более низких энергиях, если окажутся справедливыми единые калибровочные теории, к обсуждению которых мы переходим. Трудности перенормируемой теории заставляют с особым вниманием относиться к возможностям теорий, в которых осуществляется перенормируемость. Такую возможность удалось осуществить в рамках единых калибровочных теорий, которые к настоящему времени завоевали широкую популярность и почти уверенность в их справедливости. Основой таких теорий является исходный перенормируемый лагранжиан, в котором взаимодействие переносится безмассовыми калибровочными векторными полями Янга-Миллса. Очень важным моментом является спонтанное нарушение инвариантности. Это явление лежит в основе описания сверхтекучести и сверхпроводимости. При этом согласно теореме Н.Н.Боголюбова всегда возникают коллективные возбуждения, соответствующие в квантовой теории поля частицам с нулевой массой. Однако в случае калибровочной теории эти возбуждения устраняются калибровочным преобразованием, что приводит к появлению массы у векторных частиц. В результате мы приходим к теории, в которой объединено взаимодействие с безмассовым фотоном и массивными векторными частицами, переносящими слабое взаимодействие. Семейство, в которое, как мы отмечали, в настоящее время входит лишь один фотон, при этом расширяется минимум до четырех частиц. Новые частицы W^\pm и Z^0 имеют ограничения на массы, например, в простейшей модели Салама-Вайнберга $M_W > 34 \text{ ГэВ}$, $M_Z > 74 \text{ ГэВ}$. Некоторые предсказания калибровочной модели хорошо согласуются с

опытом, это прежде всего относится к безмассовым нейтринным реакциям, идущим за счет нейтральных токов. Именно открытие нейтральных токов, которые были предсказаны калибровочной теорией, в сильной степени способствовало укреплению её позиций. Детали нейтральных реакций также хорошо согласуются с простейшей моделью. Также следует отметить предсказание нового квантового числа "чарма", вытекающее в рамках калибровочных теорий из требования симметрии теории слабых взаимодействий, которое необходимо для перенормируемости теории и устранения нейтральных токов с изменением странности, что на опыте не наблюдается. Судя по последним экспериментальным данным новое квантовое число "чарм" можно считать открытым. Однако следует заметить, что нейтральные токи и новые квантовые числа могут появляться не только в рамках калибровочной теории, но и в других моделях. Поэтому прямым подтверждением такой теории могло бы быть только доказательство существования промежуточных векторных частиц W и Z . Это может быть достигнуто либо прямым открытием этих частиц, либо обнаружением изменения режима полного сечения слабого взаимодействия при энергии в системе центра, соответствующего массе W или Z . И в том и в другом случае требуется энергия в системе центра масс 100-200 ГэВ.

Мы видим, что физика слабых взаимодействий приводит нас к заключению об областях энергий, к которым нужно стремиться в первую очередь. Это область энергий, характерная для калибровочных теорий – 100-200 ГэВ в системе центра и область унитарного предела – 1000 ГэВ в той же системе. Для слабых взаимодействий перспективными являются, например, встречные кольца электронов и протонов, в которых можно изучать слабые эффекты в реакциях

$$e + p \rightarrow e + \text{адроны},$$

$$e + p \rightarrow \nu + \text{адроны},$$

$$e + p \rightarrow W, Z + \dots$$

Важной также является возможность получения пучков поляризованных электронов по и против направления их движения.

Выше мы кратко описали современное состояние представлений о структуре частиц и их взаимодействиях. Следует интенсивно работать для того, чтобы проверить эту картину и внести необходимые уточнения, а, может быть, и изменения. Например, в простую картину

с четырьмя кварками и четырьмя лептонами не укладывается тяжелый лептон, убедительные указания на существование которого недавно получены. Эти данные и другие данные, особенно полученные при более высоких энергиях, без сомнений, приведут к дальнейшему уточнению наших знаний о природе частиц и их взаимодействиях.