

ПРИРОДА

№ 9 - 1999 г.

Д.И.Казаков

Ждем новых открытий в физике элементарных частиц!

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!
<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

Ждем новых открытий в физике элементарных частиц!

Д. И. Казаков

Дмитрий Игоревич Казаков, доктор физико-математических наук, заместитель директора Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Область научных интересов – физика высоких энергий, квантовая теория поля.

В ПОСЛЕДНЕЙ четверти XX в. на наших глазах и при нашем содействии произошло рождение новой картины микромира: построена Стандартная Модель (СМ) фундаментальных сил природы. Она венчает достижения 20-го столетия в понимании устройства мироздания. Появление Стандартной Модели имеет эпохальное значение и эквивалентно созданию классической теории электромагнетизма в прошлом веке, которое положило начало использованию электрической энергии, или рождению квантовой механики в начале этого столетия, открывшему эру атома. Основанная на общем физическом принципе локальной симметрии, Стандартная Модель намечает путь к описанию всех сил природы – от микро- до макрокосмоса – в рамках единой всеобъемлющей теории.

СТРУКТУРА МАТЕРИИ

Согласно современным воззрениям, материя имеет следующую иерархическую структуру: окружающее нас вещество состоит из атомов и молекул, атомы содержат сердцевину – атомное ядро – и электронную оболочку, атомное ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов, они в свою очередь построены из еще более элементарных составляющих, называемых кварками (рис.1). Кварки, как и электрон (первая открытая элементарная частица), не имеют внутренней структуры и считаются истинно элементарными, по крайней мере, на уровне сегодняшних знаний. Электрон – исторически первый представитель целого семейства слабовзаимодействующих

частиц — лептонов. Таким образом, фундаментальными частицами материи (с ненулевой массой покоя) в настоящий момент признаны кварки и лептоны. Основные характеристики кварков и лептонов сведены¹ в табл.1.

Во главу угла классификации частиц положен принцип симметрии. Под симметрией понимается инвариантность (неизменность) уравнений, описывающих свойства частиц и их взаимодействия, при различных преобразованиях, таких, например, как изменение системы отсчета, изменение фазы волновой функции, вращение в пространстве внутренних степеней свободы и т.д. Подобные преобразования, если использовать математический язык, образуют различные группы симметрии, с которыми связаны дискретные характеристики — квантовые числа, сохраняющиеся неизменными при преобразованиях данной группы. Так, с группой вращений пространства-времени связано понятие собственного момента количества движения частицы, или спина. Спин квантуется, т.е. может принимать только целые и полуцелые значения в единицах постоянной Планка \hbar — фундаментальной постоянной квантовой физики. Другой пример — группа фазовых преобразований волновой функции частицы, знакомая нам из квантовой механики. Сохраняющейся величиной здесь оказывается электрический заряд, который тоже квантуется в единицах элементарного заряда (каковым считается заряд протона).

Частицы характеризуются и другими квантовыми числами, такими как барионный или лептонный заряды, изотопический спин, цветовой заряд и т.д., отражающими их свойства по отношению к группам симметрии различных взаимодействий, а кроме того — массой покоя. Группа симметрии служит ключевым понятием в формулировке теории данного взаимодействия. Именно она определяет набор частиц, которые участвуют во взаимодействии, их

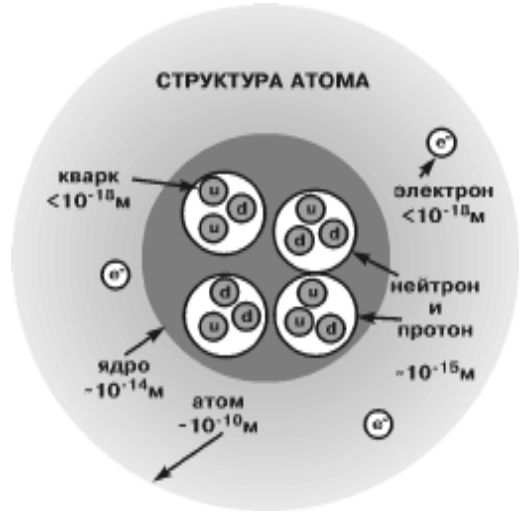


Рис.1. Структура атома. Если бы мы захотели нарисовать эту картинку, соблюдая масштаб и так, чтобы протон или нейтрон имели бы размер изображенного атома, тогда кварки и электроны представлялись бы точками диаметром меньше 0.1 мм, а весь атом — кругом поперечником в 10 км.

свойства или квантовые числа, а также число и тип частиц — переносчиков взаимодействия.

Фундаментальные частицы материи имеют спин 1/2 и подчиняются статистике Ферми-Дирака, т.е. они являются квантами соответствующих фермионных полей и в квантовой теории поля описываются антикоммутирующими² операторами. Во взаимодействиях они выступают как точечные образования, не имеющие внутренней структуры, хотя и обладающие внутренними степенями свободы, которые задаются соответствующей группой симметрии. В настоящий момент известно шесть типов кварков и шесть типов лептонов. При этом наблюдается замечательное свойство повторяемости. Самые легкие частицы — электрон, электронное нейтрино, верхний и нижний кварки, которые, как говорят,

¹ Contemporary Physics Education Project, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 1990.

² Антикоммутирующими называются такие операторы, которые при перестановке изменяют знак: $\hat{a}\hat{b} = -\hat{b}\hat{a}$.

Таблица 1
Фундаментальные частицы и переносчики взаимодействий в Стандартной Модели
ЧАСТИЦЫ МАТЕРИИ

фермионы, спин 1/2					
Лептоны			Кварки		
Аромат	Масса, ГэВ/ c^2	Электрич. заряд	Аромат	Масса, ГэВ/ c^2	Электрич. заряд
ν_e электронное нейтрино	$<2 \cdot 10^{-8}$	0	u верхний	$4 \cdot 10^{-3}$	2/3
e электрон	$5.1 \cdot 10^{-4}$	-1	d нижний	$7 \cdot 10^{-3}$	-1/3
ν_μ мюонное нейтрино	$<3 \cdot 10^{-4}$	0	s очарованный	1.5	2/3
μ мюон	0.106	-1	c странный	0.15	-1/3
ν_τ тау нейтрино	$<4 \cdot 10^{-2}$	0	t топ	174	2/3
τ тау	1.784	-1	b боттом	4.7	-1/3

ПЕРЕНОСЧИКИ СИЛ

бозоны, спин 1		
Электрослабые	Масса ГэВ/ c^2	Электрич. заряд
γ фотон	0	0
W^-	80.6	-1
W^+	80.6	+1
Z^0	91.16	0
Сильные	Масса ГэВ/ c^2	Электрич. заряд
g глюон	0	0

Спин, или внутренний угловой момент частицы, дан в единицах \hbar , электрический заряд – в единицах элементарного заряда. Массы даны в единицах ГэВ/ c^2 (по соотношению $E=mc^2$ с учетом того, что энергия измеряется в электрон-вольтах).

принадлежат к первому поколению, затем репродуцируются дважды во втором и третьем поколениях с разницей только в массе (все остальные характеристики частиц остаются прежними). Поэтому мы выделяем три поколения фундаментальных частиц материи. Не исключено, что тремя поколениями исчерпываются все материальные частицы, по крайней мере на данном этапе их идентификации.

Поскольку в математике все группы конечной размерности классифицированы и их свойства изучены, это позволяет не только создать классификацию известных элементарных частиц, но также предсказать новые частицы и найти их квантовые числа. Вопрос состоит лишь в том, какая группа симметрии соответствует физической реальности, отвечает тому или иному взаимодействию.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
 ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Различают четыре вида фундаментальных взаимодействий материальных частиц: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное, перечисленные в порядке убывания их интенсивности (основные свойства представлены в табл.2, примеры – на рис.2). Теории всех видов взаимодействий строятся на основе единого принципа *локальной симметрии*. Локальной называется такая группа симметрии, параметры преобразования которой зависят от пространственно-временной точки. Эту симметрию называют еще *калибровочной симметрией*, и с ней связаны специальные калибровочные поля. Переносчиками взаимодействия являются кванты

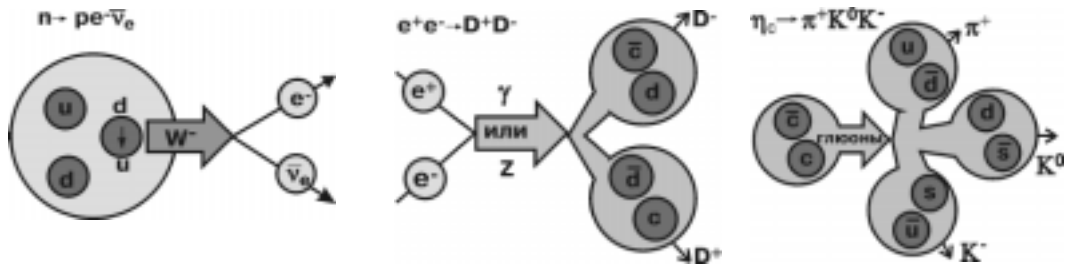
Таблица 2
СВОЙСТВА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Взаимодействие	Гравитационное	Слабое	Эл.магнитное	Сильное	
Свойства		(Электрослабое)		Фундаментальное	Остаточное
На что действует:	массу-энергию	аромат	эл. заряд	цветовой заряд	
Кто участвует:	все частицы	кварки, лептоны	заряженные частицы	кварки, глюоны	адроны
Переносчики:	гравитон	W^+, W^-, Z^0	γ	глюоны	мезоны
Сила взаимодействия: двух кварков (по отношению к эл.маг.),	$\left. \begin{matrix} 10^{-18}M \\ 3 \cdot 10^{-17}M \end{matrix} \right\}$	0.8	1	25	не применимо к кваркам
сближенных на расстоянии		10^{-41}	10^{-4}	1	
двух адронов на расстоянии	$10^{-15}M$	10^{-36}	10^{-7}	1	не применимо к адронам 20

Цветовой заряд. Каждый кварк несет в себе один из трех «сильных» или «цветовых» зарядов. Имеется восемь возможных типов цветового заряда глюонов. Также как электрически заряженные частицы взаимодействуют путем обмена фотонами, в сильных взаимодействиях «цветные» частицы обмениваются глюонами. Лептоны, фотоны и W- и Z-бозоны не имеют цветового заряда и соответственно не участвуют в сильных взаимодействиях. Кварки и глюоны невозможно изолировать, они заключены в «бесцветных» адронах. Удержание (конфайнмент) кварков и глюонов – следствие множественных обменов глюонами между «цветными» объектами. Если их развести, цветовая сила между ними достигает постоянного значения и энергия взаимодействия возрастает. В конце концов это приводит к рождению кварк-антикварковой пары. Наблюдаемыми оказываются только «бесцветные» комбинации, называемые адронами (мезоны и барионы).

Остаточные сильные взаимодействия. Сильная связь между «бесцветными» протонами и нейтронами с образованием ядер атомов является остаточным эффектом сильного взаимодействия между их «цветными» составляющими, подобно тому как электромагнитное взаимодействие связывает электрически нейтральные атомы в молекулах. Эта связь проявляется в форме обмена мезонами между адронами.

Материя и антиматерия. Для каждой частицы существует античастица, обозначаемая символом соответствующей частицы с чертой сверху. Частица и античастица имеют одинаковую массу и спин, но противоположные заряды. Для некоторых электрически нейтральных бозонов (например, Z^0 , γ и $\eta_c = c\bar{c}$, но не $K^0 = d\bar{s}$) частицы и античастицы идентичны.



β -распад нейтрона с образованием протона (переход $d \rightarrow u$), электрона и анти-нейтрино через промежуточный (виртуальный) W-бозон.

Аннигиляция электрона и позитрона, сталкивающихся при высокой энергии, с образованием D^- и D^+ -мезонов через виртуальные фотон или Z-бозон.

Множественное рождение мезонов из облака виртуальных глюонов, порожденных аннигиляцией c и \bar{c} -кварков в составе η_c -мезона.

Рис.2. Примеры фундаментальных взаимодействий: слабого (слева), электрослабого (в середине) и сильного (справа).

калибровочных полей, которые имеют спин 1 (глюоны, фотон, промежуточные векторные³ бозоны) или спин 2 (гравитоны, табл.1). Они подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна и описываются коммутирующими⁴ операторами.

Электромагнетизм. Кварки и лептоны, обладающие электрическим зарядом, принимают участие в электромагнитном взаимодействии. Теория электромагнитных взаимодействий – квантовая электродинамика (КЭД) – представляет собой простейшую калибровочную теорию. КЭД – естественное распространение квантовой механики на систему с произвольным числом частиц. Как и в последней, в КЭД вероятность любого процесса определяется квадратом модуля амплитуды соответствующих функций и поэтому не зависит от фазы, которая может быть произвольной. Уравнения КЭД инвариантны относительно группы локальных фазовых вращений. Эта группа носит название $U(1)_{EM}$.

Электрослабая теория. Однако в Стандартной Модели электромагнитное взаимодействие в чистом виде не существует, оно перемешивается со слабым взаимодействием в рамках единой электрослабой теории. Эта теория объединяет слабые и электромагнитные взаимодействия подобно тому, как теория Максвелла связывает электричество и магнетизм в единую теорию электромагнетизма, и продвигает нас еще на один шаг по пути к общему описанию сил в природе. Группа симметрии электрослабой теории более сложная, она состоит из двух подгрупп и обозначается как $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$. Чтобы пояснить смысл этого обозначения, заметим, что кварки и лептоны, имея собственный угловой момент – спин, разделяются на две категории, называемые условно правыми и левыми. У правых частиц спин ориентирован вдоль направления движения, а у левых – в противоположном. Характерная особенность слабых взаимодействий

– отсутствие симметрии между левым и правым: левые частицы (или правые античастицы) принимают участие в слабом взаимодействии, а правые – нет. При этом левые частицы образуют пары – изотопические дублеты. Так, например, левые электрон и электронное нейтрино или верхний и нижний кварки образуют дублеты. Компоненты дублета отличаются друг от друга квантовым числом, называемым слабым изоспином, который принимает значения $\pm 1/2$. При этом в слабых взаимодействиях обе компоненты дублета участвуют одинаково, и теория слабых взаимодействий строится инвариантной относительно вращения в пространстве слабого изоспина. Этому отвечает подгруппа $SU(2)_L$, где индекс L соответствует левым частицам. Второй множитель, $U(1)_Y$, связан с фазовыми вращениями, как в КЭД, но только с измененным зарядом. Место электрического заряда здесь занимает общий для всего дублета так называемый гиперзаряд Y , отличающийся от электрического заряда частицы на величину ее слабого изоспина.

Группа симметрии электрослабой теории, в отличие от электродинамики, оказывается нарушенной и проявляется в полной мере лишь при больших энергиях. Масштаб нарушения⁵ составляет порядка 100 ГэВ, ниже этого порога остается только электромагнитная подгруппа $U(1)_{EM}$. Переносчиками слабых взаимодействий служат промежуточные векторные бозоны W и Z , а электромагнитного – фотон. W - и Z -бозоны имеют массу, которая почти в 100 раз превышает массу протона, а фотон – безмассовая частица.

Спонтанное нарушение симметрии. Таким образом, в электрослабой теории, в отличие от электродинамики, локальная симметрия нарушена. Именно из-за этого возникает масса у кварков, лептонов и промежуточных векторных бозонов. Механизм нарушения $SU(2)_L$ симметрии по-прежнему остается невы-

³ Векторными называют частицы со спином 1.

⁴ Коммутирующими называются такие операторы, которые при перестановке не изменяют знак: $\hat{a}\hat{b} = \hat{b}\hat{a}$.

⁵ По поводу единиц измерения энергии и масс частиц см. пояснения к табл.1.

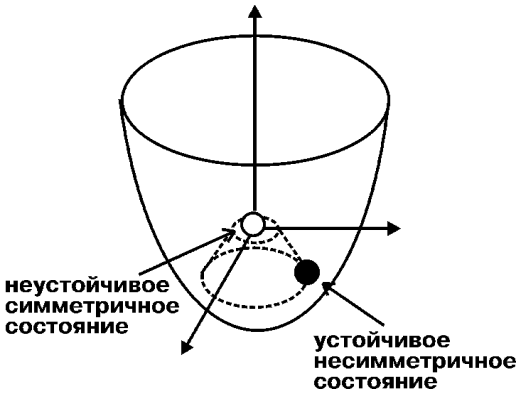


Рис. 3. Спонтанное нарушение симметрии вращения относительно вертикальной оси.

ясненным. Наиболее популярен так называемый механизм Хиггса. Сущность его в том, что вводится дополнительное поле H , которое приобретает ненулевое среднее значение $\langle H \rangle$ — конденсат. Образование конденсата приводит к нарушению симметрии, однако весьма специальным образом: все взаимодействия по-прежнему описываются симметричными уравнениями, а нижнее энергетическое состояние — вакуум — становится несимметричным. Такое нарушение симметрии называют «спонтанным».

Явление спонтанного нарушения симметрии можно продемонстрировать на простом механическом примере. Рассмотрим бутылку из-под шампанского с обычным, вогнутым доньшком (рис. 3). Бутылка инвариантна относительно вращений вокруг вертикальной оси, проходящей через ее центр. В то же время, если бросить внутрь нее горошину, последняя непременно займет какое-то случайное положение на ободке, которое разрушит исходную симметрию. Таким образом, имея симметричную конструкцию, мы получаем несимметричное низшее состояние. Это и есть пример спонтанного нарушения симметрии.

Именно с таким явлением мы сталкиваемся в электрослабой теории. Поле Хиггса, также как кварки и лептоны,

описывается изотопическим дублетом, и теория строится инвариантной относительно вращений в пространстве изоспина. Однако вакуумное среднее хиггсовского поля $\langle H \rangle$ имеет ненулевое значение, которое указанную симметрию разрушает. Это приводит к далеко идущим следствиям: происходит генерация масс кварков, лептонов и промежуточных векторных бозонов. Массы всех частиц оказываются пропорциональными $\langle H \rangle$.

Итак, механизм Хиггса предполагает существование дополнительного поля, квант которого — нейтральная массивная скалярная⁶ частица, именуемая хиггсовским бозоном. Эта частица принимает участие в электрослабом взаимодействии и должна наблюдаться в эксперименте. То, что мы хиггсовский бозон не видим, объясняется недостаточной для его рождения энергией, достигнутой пока на имеющихся ускорителях. Это справедливо и в том случае, если хиггсовский бозон окажется составной, а не фундаментальной частицей.

Сильное взаимодействие. Сильное взаимодействие связывает между собой кварки, образуя адроны — сильно взаимодействующие частицы. К адронам относятся протоны, нейтроны, гипероны и другие барионы — частицы с полуцелым спином, а также π , K , ρ и другие мезоны — частицы с целым спином (табл. 3). Все они — связанные состояния кварков, а взаимодействия между адронами — «всего лишь» остаточные эффекты сильного взаимодействия кварков. Лептоны не принимают участия в сильных взаимодействиях.

Сильное взаимодействие кварков теория связывает с наличием у них «цветового» заряда. Это новое квантовое число, введенное для объяснения существования адронов, построенных из трех кварков одного типа, спины которых ориентированы в одном направлении. Так как кварки — фермионы, т.е. описываются антикоммутирующими операторами, симметричные комбинации тако-

⁶ Скалярными называются частицы, имеющие спин 0.

Таблица 3
Кварковый состав барионов (примеры)

Адроны					
Барионы qqq или антибарионы $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Символ	Имя	Кварковый состав	Электрический заряд	Масса, ГэВ/ c^2	Спин
p	протон	$u u d$	1	0.938	1/2
\bar{p}	антипротон	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	нейтрон	$u d d$	0	0.940	1/2
Λ	лямбда	$u d s$	0	1.116	1/2
Ω^-	омега	$s s s$	-1	1.672	1/2

Кварковый состав мезонов (примеры)

Адроны					
Мезоны $q\bar{q}$					
Символ	Имя	Кварковый состав	Электрический заряд	Масса, ГэВ/ c^2	Спин
π^+	пион	$u \bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	каон	$s \bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	ро	$u \bar{d}$	+1	0.770	1
D^+	д-плюс	$c \bar{d}$	+1	1.869	0
η_c	эта-ц	$c \bar{c}$	0	2.980	0

го рода должны были бы отсутствовать, ибо волновая функция обращается в ноль. Парадокс разрешается с введением нового квантового числа, которое позволяет антисимметризовать волновую функцию. Это число было названо «цвет», хотя и не имеет никакого отношения к обычному цвету. Поскольку «цвет» никак не проявляется в эксперименте, теория сильных взаимодействий строится инвариантной относительно локальных вращений в пространстве «цветов». Так как число «цветов» равно трем, группа симметрии сильных взаимодействий есть $SU(3)_c$, где индекс c означает «цвет». Сильные взаимодействия переносятся векторными частицами, называемыми *глюонами*; они сами имеют цветовой заряд (в отличие от фотонов, которые осуществляют электромагнитное взаимодействие, но заряда не имеют). Это связано с тем, что группа симметрии сильных взаимодействий представляет собой неабелеву группу, т.е. содержит некоммутирующие друг с другом преобразования. Глюоны,

так же как и фотон, являются безмассовыми частицами. Теория сильных взаимодействий получила название «квантовая хромодинамика» (КХД) по аналогии с уже упоминавшейся квантовой электродинамикой.

Гравитация. Надо признать, что последовательной и непротиворечивой формулировки квантовой теории гравитации, где, как предполагается, гравитационное взаимодействие переносится квантом гравитационного поля – гравитоном, пока нет. Не исключено, что такая формулировка невозможна в рамках локальной квантовой теории поля, лежащей в основе описания трех остальных взаимодействий, и требует привлечения новых концепций. Пример нового подхода демонстрирует нелокальная теория протяженных объектов – струн, в пределах которой в принципе возможно построить квантовую теорию гравитации. Однако в силу слабости гравитации по сравнению с другими взаимодействиями (гравитационное взаимодействие двух электронов в 10^{41} раз

слабее электростатического), в Стандартной Модели его обычно пренебрегают.

Все фундаментальные частицы Стандартной Модели, как частицы материи, так и переносчики взаимодействий (за исключением гравитона и возможного хиггсовского бозона), к настоящему времени открыты экспериментально на ускорителях, и точность, с которой многие выводы СМ проверены на опыте, — чрезвычайно высока: от 10^{-2} для КХД до 10^{-8} для КЭД.

ЗА ПРЕДЕЛАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Хотя Стандартная Модель уже увенчана несколькими Нобелевскими премиями как за теорию, так и за экспериментальные открытия, в ней все же есть ряд нерешенных проблем. Под вопросом остается не подтвержденный экспериментально механизм нарушения электрослабой симметрии (механизм Хиггса), а также механизм нарушения СР-инвариантности (инвариантности относительно зеркального отражения пространственных координат с одновременной заменой частицы на античастицу). Неясно, почему именно таков спектр масс кварков и лептонов и имеет ли массу нейтрино. Попытки решения проблем СМ выводят нас за ее рамки и связаны с возможностью существования новой симметрии, новых частиц и взаимодействий, которые возникают при энергиях заметно выше 100 ГэВ, т.е. на сегодня пока недоступных экспериментальной проверке.

Одна из приоритетных задач функционирующих и строящихся ускорителей — завершение проверки СМ, прежде всего поиск хиггсовского бозона, а также поиск новых явлений, не укладывающихся в рамки этой модели, новых частиц и симметрий. Достигнуть поставленной цели можно двумя способами: или увеличить точность теоретических расчетов и эксперимента, чтобы заметить отклонение предсказаний СМ от результатов наблюдений, или увеличить энергию и светимость ускорителей, чтобы наблюдать рождение новых частиц. (То

же с некоторыми оговорками относится и к неускорительным экспериментам.)

На первом пути есть шанс обнаружить следы новых частиц и измерить их массы за счет вклада последних в наблюдаемые эффекты при энергиях ниже порога их рождения. Именно так на ускорителе LEP (ЦЕРН) была найдена масса топ-кварка еще до его открытия в Национальной лаборатории им.Э.Ферми (США). Аналогичным образом прецизионные измерения масс W-бозона и топ-кварка на LEP и Теватроне (лаборатория им.Э.Ферми) позволяют определить массу хиггсовского бозона при энергиях ниже порога его рождения в случае, если механизм Хиггса действительно реализован в природе.

Здесь следует сделать некоторое отступление и заметить, что в СМ масса хиггсовского бозона не предсказывается, хотя и существуют косвенные ограничения на ее величину. Это связано с тем, что масса этого бозона выражается через значение конденсата поля Хиггса $\langle H \rangle$, упомянутого выше (которое может быть вычислено, например, по известной массе Z-бозона), и константу, характеризующую взаимодействие хиггсовских бозонов между собой, так называемую константу самодействия (которая не предсказывается теорией). Ограничения на ее значения следуют из требований устойчивости хиггсовского потенциала (как в классической механике) и отсутствия состояний с неправильной нормой, так называемых духов. Эти условия эквивалентны тому, что константа самодействия не обращается в ноль или бесконечность при изменении ее с энергией. (Заметим, что в квантовой теории поля ни одна константа взаимодействия таковой строго говоря не является и, как следствие поляризации вакуума, зависит от масштаба или от энергии. Поляризация вакуума есть наблюдаемый эффект, и зависимость констант взаимодействия от энергии, которая носит логарифмический характер, имеет экспериментальные подтверждения.) Из требования, чтобы константа хиггсовского самодействия была положительной и конечной при энергиях ниже,

скажем, 1 ТэВ, вытекает ограничение на массу хиггсовского бозона в интервале 70–500 ГэВ/ c^2 . Если потребовать выполнение этих условий до энергий порядка массы Планка $\sim 10^{19}$ ГэВ (масштаб квантовой гравитации), то получим гораздо более узкий интервал в 135–280 ГэВ/ c^2 . К сожалению, массы свыше 90–100 ГэВ/ c^2 недоступны пока прямому экспериментальному определению.

Заметным достижением 1998 г., как было признано на XXIX Международной конференции по физике высоких энергий в Ванкувере⁷, стало экспериментальное установление верхней границы массы хиггсовского бозона из совокупности ускорительных данных. С 95%-м уровнем достоверности масса хиггсовского бозона в СМ ограничена значением 280 ГэВ/ c^2 . Эта оценка, по-видимому, не сильно изменится в ближайшее время. Экспериментальный же предел, следующий из того, что хиггсовский бозон не обнаружен на ускорителе LEP, составляет сейчас около 90 ГэВ/ c^2 . К этому выводу приводит анализ событий электрон-позитронной аннигиляции с рождением либо двух пар лептонов, либо пары лептонов и пары адронных струй, либо двух пар струй. Имеющиеся события такого рода укладываются в рамки фонового процесса рождения пары Z-бозонов.

СУПЕРСИММЕТРИЯ

Другое направление исследований — поиск новых частиц, и прежде всего суперсимметрии — гипотетической новой симметрии, которая может проявляться при высоких энергиях. Хотя еще нет никаких прямых указаний на ее существование, это наиболее популярный и многообещающий выход за рамки СМ, и поиску суперсимметрии уделяется сейчас много внимания. Поэтому остановимся на ней поподробнее.

Как уже говорилось, все фундаментальные частицы СМ можно разбить на

два класса: фермионы, или частицы со спином $1/2$, и бозоны, или частицы со спином 1 и 0. К первым относятся кварки и лептоны, а ко вторым — калибровочные бозоны и бозон Хиггса. Всего насчитывается 90 фермионных степеней свободы и 28 бозонных. Тем самым СМ в высшей степени несимметрична по отношению к фермионам и бозонам, они никак не связаны между собой, и группы внутренней симметрии, как, например, группа вращений изоспина или цветового заряда кварков, не связаны с группой пространственной симметрии, группой Лоренца. А такая связь, если она существует, позволила бы поместить все частицы в один мультиплет и создать теорию единого взаимодействия.

Подобная симметрия между бозонами и фермионами, названная *суперсимметрией*, была предложена математиками около 25 лет назад. Вскоре были построены суперсимметричные модели квантовой теории поля, пригодные для описания взаимодействия частиц. Сразу же стало понятным, что если, следуя принципу локальности симметрии, сделать суперсимметрию локальной, получится теория, связывающая между собой частицы со спинами 0, $1/2$, 1, $3/2$ и 2, т.е. теория гравитации или супергравитации. Тем самым в рамках суперсимметрии удастся построить единую калибровочную теорию всех известных взаимодействий, хотя технически это и очень сложно⁸.

Тем не менее были предприняты попытки создать суперсимметричное обобщение СМ, и разработанную теорию назвали Минимальной Суперсимметричной Стандартной Моделью (МССМ). Особенность МССМ в том, что каждая частица СМ, будь то бозон или фермион, входит в один мультиплет с аналогичной частицей, отличающейся значением спина на $1/2$. Эти частицы называют суперпартнерами обычных частиц. Так, суперпартнерами кварков и лептонов являются скварки и слептоны

⁷ XXIX International Conference on High Energy Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada, 1998.

⁸ Supersymmetry and Supergravity / Ed. M. Jacob. Amsterdam, 1986.

со спином 0, суперпартнерами калибровочных бозонов — калибрино (глюино, эйно, вйно, и фойно) со спином 1/2, а хиггсовского бозона — хиггсино также со спином 1/2. Эти частицы, если бы суперсимметрия не нарушалась, должны бы иметь такие же массы, как и обычные частицы, и наблюдаться на опыте. Поскольку это не так, то предполагается, что суперсимметрия — нарушенная симметрия. Масштаб нарушения составляет порядка тэраэлектронвольт, так что при энергии много больше 1 ТэВ суперсимметрия восстанавливается. Следствием нарушения суперсимметрии становится расщепление масс внутри супермультиплета, и суперпартнеры оказываются значительно тяжелее обычных частиц.

ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Появление масштаба в 1 ТэВ не случайно. Он имеет отношение к проблеме объединения трех фундаментальных взаимодействий (сильного, слабого

и электромагнитного) в единое целое с одной общей константой и группой симметрии. Такая теория получила название теории Великого объединения взаимодействий⁹. На первый взгляд это кажется невозможным, поскольку, как следует из табл.1, значения констант трех взаимодействий существенно различны. Однако, как мы уже отмечали, константы взаимодействия зависят от энергии, и при энергиях порядка 10^{15} – 10^{16} ГэВ их значения сравниваются. Чтобы получить пересечение трех кривых в одной точке, необходимо знать их экспериментальные значения при какой-нибудь энергии и закон эволюции. Последний зависит от модели. В СМ этот закон известен: константы ведут себя как обратные логарифмы энергии, отнесенной к характерному масштабу взаимодействия. После прецизионного измерения констант на ускорителе LEP

⁹ Amaldi U., Boer W. de, Furstenau H. // Physics Letters. 1991. V.В260. P.447–455.

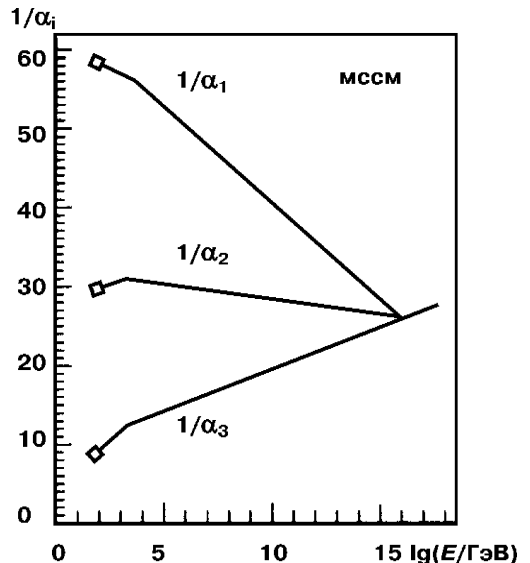
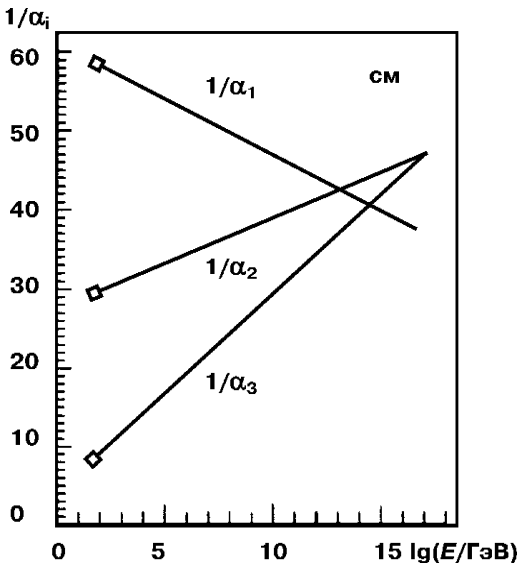


Рис. 4. Зависимость констант трех фундаментальных взаимодействий (электромагнитного, слабого и сильного) от логарифма характерной энергии. Слева — в Стандартной Модели, справа — в Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели.

стало возможным проверить гипотезу Великого объединения. Константы разошлись (рис.4, слева). С другой стороны, если предположить существование суперсимметрии, результат зависит от того, на каком масштабе происходит ее нарушение. Например, если этот масштаб равен 1 ТэВ, кривые трех взаимодействий замечательным образом пересекаются в одной точке (рис.4, справа). Поскольку идеи суперсимметрии неотделимы от концепции объединения различных сил природы, Великое объединение взаимодействий в рамках МССМ рассматривается часто как указание в пользу суперсимметрии.

Пока нет никаких экспериментальных подтверждений существования суперсимметрии, главным аргументом ее апологетов остается эстетическая и математическая привлекательность. Именно в рамках суперсимметрии удастся решить ряд проблем теорий Великого объединения и объяснить существование столь различных масштабов: характерного масштаба слабого взаимодействия ($\sim 10^2$ ГэВ) и масштаба, на котором происходит объединение трех взаимодействий ($\sim 10^{16}$ ГэВ). Суперсимметрия же составляет и основу современных усилий по построению единой теории, описывающей все виды фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию.

СУПЕРПАРТНЕРЫ

В рамках МССМ можно попытаться предсказать массы суперпартнеров, однако результат будет зависеть от деталей механизма нарушения суперсимметрии. Тем не менее общая оценка дает значения масс скварков и sleptонов в районе от сотен ГэВ/ c^2 до одного ТэВ/ c^2 , причем некоторые частицы могут быть и заметно легче, а для калибрино, которые делятся на заряженные — зарядино и нейтральные — нейтралино, можно получить массы и менее 100 ГэВ/ c^2 . При этом суперпартнеры в простейших моделях с так называемой R-четностью (новой дискретной симметрией, относительно которой обычные

частицы имеют заряд +1, а суперпартнеры -1) рождаются всегда парами, легчайшая же суперсимметричная частица, обычно нейтралино, оказывается стабильной.

Все это имеет непосредственное значение для эксперимента, ибо такие суперпартнеры можно обнаружить уже сегодня на существующих ускорителях. Характерной особенностью событий с рождением суперпартнеров должен быть недостаток энергии и импульса, частично уносимых недетектируемым стабильным нейтралино. Отсутствие подобных событий устанавливает границы масс новых частиц: около 25 и 90 ГэВ/ c^2 для нейтральных и заряженных частиц соответственно.

Существование суперпартнеров нашло бы свое проявление и в макромасштабах, в частности в космологии. Дело в том, что если легчайшая суперсимметричная частица стабильна, то она даст вклад в недостающую массу Вселенной. Проблема здесь состоит в несоответствии между наблюдаемой геометрией Вселенной и плотностью вещества в ней.

Согласно астрофизическим наблюдениям метрика Вселенной плоская (т.е. имеет нулевую кривизну). Этот факт находит свое обоснование в инфляционной модели развития Вселенной после Большого Взрыва. Однако Вселенная будет плоской лишь при плотности вещества, равной критической. Меньшая плотность приводит к открытой Вселенной с отрицательной кривизной, а большая — к закрытой с положительной кривизной.

Современные результаты наблюдений свидетельствуют, что видимая материя дает примерно 1–10% необходимой массы. Сенсационные данные последнего года¹⁰, полученные из наблюдений взрывов сверхновых типа Ia, указывают на возможность того, что еще около 60% вклада в плотность материи дает космологическая посто-

¹⁰ Perlmutter S., Aldering G., Goldenhaber G. et al. // *Astrophys. Journ.* 1999.

янная, введенная Эйнштейном в уравнение общей теории относительности. Недостающие 30–40% приходится на так называемую темную материю, которая не обнаруживает себя, ибо не дает электромагнитного излучения, и имеет неясное происхождение. Так вот, легчайшие нейтрально как раз и могли бы быть недостающими частицами темной материи. В этом случае требование соответствия критической плотности накладывает сильное ограничение на возможные массы суперпартнеров, причем верхняя граница массы нейтрально как раз и составляет около $300 \text{ ГэВ}/c^2$, что согласуется с предсказаниями МССМ.

СУПЕРСИММЕТРИЧНЫЙ БОЗОН ХИГГСА

Любопытная ситуация возникает в МССМ с хиггсовским бозоном, и, возможно, поиск хиггсовского бозона окажется критическим для жизнеспособности идеи суперсимметрии в самое ближайшее время. В этом состоит «горячая точка» физики высоких энергий до конца нашего тысячелетия. Дело в том, что в суперсимметричных теориях константа самодействия хиггсовского бозона известна и тем самым его масса может быть предсказана. В МССМ, в отличие от SM, существует не один, а пять хиггсовских бозонов: два нейтральных CP-четных, один нейтральный CP-нечетный и два заряженных. Легчайший из них, такой же как и стандартный хиггсовский бозон, имеет массу меньше, чем Z-бозон. Правда, это справедливо лишь в классической теории, и еще существуют квантовые поправки, однако они радикально не меняют ситуацию. В двух нескольких отличных сценариях нарушения суперсимметрии массы хиггсовского бозона предсказываются соответственно в районе 95 и $120 \text{ ГэВ}/c^2$. Заметим, что это существенно меньше нижней границы $134 \text{ ГэВ}/c^2$, полученной в SM при условии справедливости теории вплоть до энергии в 10^{19} ГэВ . Таким образом, наблюдение легкого хиггсовского бозона явилось бы сильным, хотя

и косвенным свидетельством в пользу суперсимметрии.

В то же время эксперимент стремительно подбирается к проверке предсказаний МССМ. В настоящий момент на ускорителе LEP-2 достигнута энергия в системе центра масс 189 ГэВ , и до конца тысячелетия планируется довести ее до 200 , что при достаточной светимости позволит установить, существует ли хиггсовский бозон с массой до $105 \text{ ГэВ}/c^2$. Таким образом, простейший суперсимметричный сценарий будет подтвержден или опровергнут менее чем через два года. Останется второй вариант, предсказания которого лежат вне пределов досягаемости LEP-2. Далее это кольцо будет разобрано, и в его туннеле начнется монтаж адронного коллайдера LHC. Эстафету примет протон-антипротонный коллайдер Теватрон с энергией сталкивающихся пучков по 2 ТэВ . К сожалению, на первой стадии его светимости будет недостаточно, чтобы выделить интересующие нас процессы из фона, и ждать придется еще несколько лет. Усовершенствованный коллайдер, обладая в 20 раз большей светимостью, позволит поднять экспериментальную границу массы хиггсовского бозона до $120\text{--}130 \text{ ГэВ}/c^2$. Тогда вопрос с минимальной суперсимметрией будет прояснен. Однако окончательную точку поставит LHC с энергией пучков по 20 ТэВ , который начнет работать после 2006 г. Набрав соответствующую статистику, там можно будет проверить не только суперсимметричный сценарий, но и «дотянуться» до хиггсовского бозона Стандартной Модели. Там же должны быть открыты и некоторые суперпартнеры, если они существуют.

Конечно, было бы чрезвычайно интересно получить подтверждение реализации суперсимметрии в физике частиц. Однако пока гораздо более существенным остается выяснение механизма нарушения симметрии в Стандартной Модели. Если хиггсовский бозон не будет обнаружен, это создаст большие проблемы для SM и потребует разработки новой концепции. По-видимому, нас ожидают интересные времена.