ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

И. Л. БУХБИНДЕР

Томский государственный педагогический университет

FUNDAMENTAL INTERACTIONS

I. L. BUKHBINDER

The paper is devoted to a brief review of basic information on four fundamental interactions of Nature. The most important macroscopic and quantum aspects of gravitational, electromagnetic, weak and strong interactions are discussed in connection with unification tendencies. We find it possible that there is a single fundamental interaction divided into four separate interactions only at low energies.

Статья посвящена краткому обзору основных сведений о четырех фундаментальных взаимодействиях Природы. Обсуждаются важнейшие макроскопические и квантовые аспекты гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий. Рассмотрены аспекты квантовой гравитации. Обращено внимание на возможное существование единого фундаментального взаимодействия, разделенного на четыре отдельных взаимодействия только при низких энергиях.

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения физики высоких энергий все больше укрепляют представление, что многообразие свойств Природы обусловлено взаимодействующими элементарными частицами. Дать неформальное определение элементарной частицы, по-видимому, невозможно, поскольку речь идет о самых первичных элементах материи. На качественном уровне можно говорить, что истинно элементарными частицами называются физические объекты, которые не имеют составных частей.

Очевидно, что вопрос об элементарности физических объектов – это в первую очередь вопрос экспериментальный. Например, экспериментально установлено, что молекулы, атомы, атомные ядра имеют внутреннюю структуру, указывающую на наличие составных частей. Поэтому их нельзя считать элементарными частицами. Сравнительно недавно открыто, что такие частицы, как мезоны и барионы, также обладают внутренней структурой и, следовательно, не являются элементарными. В то же время у электрона внутренняя структура никогда не наблюдалась, и, значит, его можно отнести к элементарным частицам. Другим примером элементарной частицы является квант света – фотон.

Современные экспериментальные данные свидетельствуют, что существует только четыре качественно различных вида взаимодействий, в которых участвуют элементарные частицы. Эти взаимодействия называются фундаментальными, то есть самыми основными, исходными, первичными. Если принять во внимание все многообразие свойств окружающего нас Мира, то кажется совершенно удивительным, что в Природе есть только четыре фундаментальных взаимодействия, ответственных за все явления Природы.

Помимо качественных различий фундаментальные взаимодействия отличаются в количественном отношении по силе воздействия, которая характеризуется термином *интенсивность*. По мере увеличения интенсивности фундаментальные взаимодействия располагаются в следующем порядке: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. Каждое из этих взаимодействий характеризуется соответствующим параметром, называемым константой связи, численное значение которого определяет интенсивность взаимодействия.

Каким образом физические объекты осуществляют фундаментальные взаимодействия между собой?

© Бухбиндер И.Л., 1997

На качественном уровне ответ на этот вопрос выглядит следующим образом. Фундаментальные взаимодействия переносятся квантами. При этом в квантовой области фундаментальным взаимодействиям отвечают соответствующие элементарные частицы, называемые элементарными частицами – переносчиками взаимодействий. В процессе взаимодействия физический объект испускает частицы – переносчики взаимодействия, которые поглощаются другим физическим объектом. Это ведет к тому, что объекты как бы чувствуют друг друга, их энергия, характер движения, состояние изменяются, то есть они испытывают взаимное влияние.

В современной физике высоких энергий все большее значение приобретает идея объединения фундаментальных взаимодействий. Согласно идеям объединения, в Природе существует только одно единое фундаментальное взаимодействие, проявляющее себя в конкретных ситуациях как гравитационное, или как слабое, или как электромагнитное, или как сильное, или как их некоторая комбинация. Успешной реализацией идей объединения послужило создание ставшей уже стандартной объединенной теории электромагнитных и слабых взаимодействий. Идет работа по развитию единой теории электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий, получившей название теории великого объединения. Предпринимаются попытки найти принцип объединения всех четырех фундаментальных взаимодействий. Мы последовательно рассмотрим основные проявления фундаментальных взаимодействий.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Это взаимодействие носит универсальный характер, в нем участвуют все виды материи, все объекты природы, все элементарные частицы! Общепринятой классической (не квантовой) теорией гравитационного взаимодействия является эйнштейновская общая теория относительности. Гравитация определяет движение планет в звездных системах, играет важную роль в процессах, протекающих в звездах, управляет эволюцией Вселенной, в земных условиях проявляет себя как сила взаимного притяжения. Конечно, мы перечислили только небольшое число примеров из огромного списка эффектов гравитации.

Согласно общей теории относительности, гравитация связана с кривизной пространства–времени и описывается в терминах так называемой римановой геометрии. В настоящее время все экспериментальные и наблюдательные данные о гравитации укладываются в рамки общей теории относительности. Однако данные о сильных гравитационных полях по существу отсутствуют, поэтому экспериментальные аспекты этой теории содержат много вопросов. Такая ситуация порождает появление различных альтернативных теорий гравитации, предсказания которых практически неотличимы от предсказаний общей теории относительности для физических эффектов в Солнечной системе, но ведут к другим следствиям в сильных гравитационных полях.

Если пренебречь всеми релятивистскими эффектами и ограничиться слабыми стационарными гравитационными полями, то общая теория относительности сводится к ньютоновской теории всемирного тяготения. В этом случае, как известно, потенциальная энергия взаимодействия двух точечных частиц с массами m_1 и m_2 дается соотношением $V(r) = -G\frac{m_1 m_2}{r}$, где r – расстояние между частицами, G – ньютоновская гравитационная постоянная, играющая роль константы гравитационного взаимодействия. Данное соотношение показывает, что потенциальная энергия взаимодействия $V(r)$ отлична от нуля при любом конечном r и спадает к нулю очень медленно. По этой причине говорят, что гравитационное взаимодействие является дальнодействующим.

Из многих физических предсказаний общей теории относительности отметим три. Теоретически установлено, что гравитационные возмущения могут распространяться в пространстве в виде волн, называемых гравитационными. Распространяющиеся слабые гравитационные возмущения во многом аналогичны электромагнитным волнам. Их скорость равна скорости света, они имеют два состояния поляризации, для них характерны явления интерференции и дифракции. Однако в силу чрезвычайно слабого взаимодействия гравитационных волн с веществом их прямое экспериментальное наблюдение до сих пор не было возможно. Тем не менее данные некоторых астрономических наблюдений по потере энергии в системах двойных звезд свидетельствуют о возможном существовании гравитационных волн в природе.

Теоретическое исследование условий равновесия звезд в рамках общей теории относительности показывает, что при определенных условиях достаточно массивные звезды могут начать катастрофически сжиматься. Это оказывается возможным на достаточно поздних стадиях эволюции звезды, когда внутреннее давление, обусловленное процессами, ответственными за светимость звезды, не в состоянии уравновесить давление сил тяготения, стремящихся сжать звезду. В результате процесс сжатия уже ничем не может быть остановлен. Описанное физическое явление, предсказанное теоретически в рамках общей теории относительности, получило название гравитационного коллапса. Исследования показали, что если радиус звезды становится меньше так называемого гравитационного радиуса $R_g = 2GM/c^2$, где M – масса звезды, а c – скорость света, то для внешнего наблюдателя звезда гаснет. Никакая информация о процессах, идущих в этой звезде, не может достичь внешнего наблюдателя.

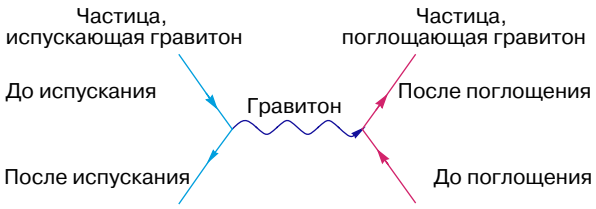
При этом тела, падающие на звезду, свободно пересекают гравитационный радиус. Если в качестве такого тела подразумевается наблюдатель, то ничего, кроме усиления гравитации, он не заметит. Таким образом, возникает область пространства, в которую можно попасть, но из которой ничего не может выйти, включая световой луч. Подобная область пространства называется черной дырой. Существование черных дыр является одним из теоретических предсказаний общей теории относительности, некоторые альтернативные теории гравитации построены именно так, что они запрещают такого типа явления. В связи с этим вопрос о реальности черных дыр имеет исключительно важное значение. В настоящее время имеются наблюдательные данные, свидетельствующие о наличии черных дыр во Вселенной.

В рамках общей теории относительности впервые удалось сформулировать проблему эволюции Вселенной. Тем самым Вселенная в целом становится не предметом спекулятивных рассуждений, а объектом физической науки. Раздел физики, предметом которого является Вселенная в целом, называется космологией. В настоящее время считается твердо установленным, что мы живем в расширяющейся Вселенной.

Современная картина эволюции Вселенной основывается на представлении о том, что Вселенная, включая такие ее атрибуты, как пространство и время, возникла в результате особого физического явления, называемого Большой Взрыв, и с тех пор расширяется. Согласно теории эволюции Вселенной, расстояния между далекими галактиками должны увеличиваться со временем, и вся Вселенная должна быть заполнена тепловым излучением с температурой порядка 3 К. Эти предсказания теории находятся в прекрасном соответствии с данными астрономических наблюдений. При этом оценки показывают, что возраст Вселенной, то есть время, прошедшее с момента Большого Взрыва, составляет порядка 10 млрд лет. Что касается деталей Большого Взрыва, то это явление слабо изучено и можно говорить о загадке Большого Взрыва как о вызове физической науке в целом. Не исключено, что объяснение механизма Большого Взрыва связано с новыми, пока еще неизвестными законами Природы. Общепринятый современный взгляд на возможное решение проблемы Большого Взрыва основывается на идее объединения теории гравитации и квантовой механики.

ПОНЯТИЕ О КВАНТОВОЙ ГРАВИТАЦИИ

Можно ли вообще говорить о квантовых проявлениях гравитационного взаимодействия? Как принято считать, принципы квантовой механики носят универсальный характер и применимы к любому физическому объекту. В этом смысле гравитационное поле не представляет исключения. Теоретические исследования показывают, что на квантовом уровне гравитационное взаимодействие переносится элементарной частицей, называемой гравитон. Можно отметить, что гравитон является безмассовым бозоном со спином 2. Гравитационное взаимодействие между частицами, обусловленное обменом гравитоном, условно изображается следующим образом:



Частица испускает гравитон, в силу чего состояние ее движения изменяется. Другая частица поглощает гравитон и также изменяет состояние своего движения. В результате возникает воздействие частиц друг на друга.

Как мы уже отмечали, константой связи, характеризующей гравитационное взаимодействие, является ньютоновская константа G. Хорошо известно, что G – размерная величина. Очевидно, что для оценки интенсивности взаимодействия удобно иметь безразмерную константу связи. Чтобы получить такую константу, можно использовать фундаментальные постоянные: $\hbar$ (постоянная Планка) и c (скорость света) – и ввести какую-нибудь эталонную массу, например массу протона m_p. Тогда безразмерная константа связи гравитационного взаимодействия будет $Gm_p^2/(\hbar c) \sim 6 \cdot 10^{-39}$, что, конечно, является очень малой величиной.

Интересно отметить, что из фундаментальных постоянных G, $\hbar$, c можно построить величины, имеющие размерность длины, времени, плотности, массы, энергии. Эти величины называются планковскими. В частности, планковская длина l_{Pl} и планковское время t_{Pl} выглядят следующим образом:

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad t_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5 \cdot 10^{-43} \text{ с}.$$

Каждая фундаментальная физическая константа характеризует определенный круг физических явлений: G – гравитационные явления, $\hbar$ – квантовые, c – релятивистские. Поэтому если в какое-то соотношение входят одновременно G, $\hbar$, c, то это значит, что данное соотношение описывает явление, которое одновременно является гравитационным, квантовым и релятивистским. Таким образом, существование планковских величин указывает на возможное существование соответствующих явлений в Природе.

Конечно, численные значения l_{Pl} и t_{Pl} очень малы по сравнению с характерными значениями величин в макромире. Но это означает только то, что

квантовогравитационные эффекты слабо проявляют себя. Они могли быть существенны лишь тогда, когда характерные параметры стали бы сравнимыми с планковскими величинами.

Отличительной чертой явлений микромира является то обстоятельство, что физические величины оказываются подверженными так называемым квантовым флуктуациям. Это означает, что при многократных измерениях физической величины в определенном состоянии принципиально должны получаться различные численные значения, обусловленные неконтролируемым взаимодействием прибора с наблюдаемым объектом. Вспомним, что гравитация связана с проявлением кривизны пространства–времени, то есть с геометрией пространства–времени. Поэтому следует ожидать, что на временах порядка t_{Pl} и расстояниях порядка l_{Pl} геометрия пространства–времени должна стать квантовым объектом, геометрические характеристики должны испытывать квантовые флуктуации. Другими словами, на планковских масштабах нет никакой фиксированной пространственно-временной геометрии, образно говоря, пространство–время представляет собой бурлящую пену.

Последовательная квантовая теория гравитации не построена. В силу чрезвычайно малых значений l_{PL}, t_{Pl} следует ожидать, что в любом обозримом будущем не удастся поставить эксперименты, в которых проявили бы себя квантовогравитационные эффекты. Поэтому теоретическое исследование вопросов квантовой гравитации остается единственной возможностью продвижения вперед. Есть ли, однако, явления, где квантовая гравитация могла бы оказаться существенной? Да, есть, и мы о них уже говорили. Это гравитационный коллапс и Большой Взрыв. Согласно классической теории гравитации, объект, подверженный гравитационному коллапсу, должен сжиматься до сколь угодно малых размеров. Это означает, что его размеры могут стать сравнимыми с l_{Pl}, где классическая теория уже неприменима. Точно так же в процессе Большого Взрыва возраст Вселенной был сравним с t_{PL} и она имела размеры порядка l_{Pl}. Это означает, что понимание физики Большого Взрыва невозможно в рамках классической теории. Таким образом, описание конечной стадии гравитационного коллапса и начальной стадии эволюции Вселенной может быть осуществлено только с привлечением квантовой теории гравитации.

СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Это взаимодействие является наиболее слабым из фундаментальных взаимодействий, экспериментально наблюдаемых в распадах элементарных частиц, где принципиально существенными являются квантовые эффекты. Напомним, что квантовые проявления гравитационного взаимодействия никогда не наблюдались. Слабое взаимодействие выделяется с помощью следующего правила: если в процессе взаимодействия участвует элементарная частица, называемая нейтрино (или антинейтрино), то данное взаимодействие является слабым.

Типичный пример слабого взаимодействия – это бета-распад нейтрона

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

где n – нейтрон, p – протон, e^- – электрон, $\bar{\nu}_e$ – электронное антинейтрино. Следует, однако, иметь в виду, что указанное выше правило совсем не означает, что любой акт слабого взаимодействия обязан сопровождаться нейтрино или антинейтрино. Известно, что имеет место большое число безнейтринных распадов. В качестве примера можно отметить процесс распада лямбда-гиперона Δ на протон p и отрицательно заряженный пион π^-. По современным представлениям нейтрон и протон не являются истинно элементарными частицами, а состоят из элементарных частиц, называемых кварками.

Интенсивность слабого взаимодействия характеризуется константой связи Ферми G_F. Константа G_F размерна. Чтобы образовать безразмерную величину, необходимо использовать какую-нибудь эталонную массу, например массу протона m_p. Тогда безразмерная константа связи будет $G_F m_p^2 \sim 10^{-5}$. Видно, что слабое взаимодействие гораздо интенсивнее гравитационного.

Слабое взаимодействие в отличие от гравитационного является короткодействующим. Это означает, что слабое взаимодействие между частицами начинает действовать, только если частицы находятся достаточно близко друг к другу. Если же расстояние между частицами превосходит некоторую величину, называемую характерным радиусом взаимодействия, слабое взаимодействие не проявляет себя. Экспериментально установлено, что характерный радиус слабого взаимодействия порядка 10^{-15} см, то есть слабое взаимодействие, сосредоточен на расстояниях меньше размеров атомного ядра.

Почему можно говорить о слабом взаимодействии как о независимом виде фундаментальных взаимодействий? Ответ прост. Установлено, что есть процессы превращений элементарных частиц, которые не сводятся к гравитационным, электромагнитным и сильным взаимодействиям. Хороший пример, показывающий, что существуют три качественно различных взаимодействия в ядерных явлениях, связан с радиоактивностью. Эксперименты указывают на наличие трех различных видов радиоактивности: α-, β- и γ-радиоактивных распадов. При этом α-распад обусловлен сильным взаимодействием, γ-распад – электромагнитным. Оставшийся β-распад не может быть объяснен электромагнитным и сильным взаимодействиями, и мы вынуждены принять, что есть еще одно фундаментальное взаимодействие, названное слабым. В об-

щем случае необходимость введения слабого взаимодействия обусловлена тем, что в природе происходят процессы, в которых электромагнитные и сильные распады запрещены законами сохранения.

Хотя слабое взаимодействие существенно сосредоточено внутри ядра, оно имеет определенные макроскопические проявления. Как мы уже отмечали, оно связано с процессом β-радиоактивности. Кроме того, слабое взаимодействие играет важную роль в так называемых термоядерных реакциях, ответственных за механизм энерговыделения в звездах.

Удивительнейшим свойством слабого взаимодействия является существование процессов, в которых проявляется зеркальная асимметрия. На первый взгляд кажется очевидным, что разница между понятиями левое и правое условна. Действительно, процессы гравитационного, электромагнитного и сильного взаимодействия инвариантны относительно пространственной инверсии, осуществляющей зеркальное отражение. Говорят, что в таких процессах сохраняется пространственная четность *P*. Однако экспериментально установлено, что слабые процессы могут протекать с несохранением пространственной четности и, следовательно, как бы чувствуют разницу между левым и правым. В настоящее время имеются твердые экспериментальные доказательства, что несохранение четности в слабых взаимодействиях носит универсальный характер, оно проявляет себя не только в распадах элементарных частиц, но и в ядерных и даже атомных явлениях. Следует признать, что зеркальная асимметрия представляет собой свойство Природы на самом фундаментальном уровне.

Несохранение четности в слабых взаимодействиях выглядело настолько необычным свойством, что практически сразу после его открытия теоретики предприняли попытки показать, что на самом деле существует полная симметрия между левым и правым, только она имеет более глубокий смысл, чем это ранее считалось. Зеркальное отражение должно сопровождаться заменой частиц на античастицы (зарядовое сопряжение *C*), и тогда все фундаментальные взаимодействия должны быть инвариантными. Однако позднее было установлено, что эта инвариантность не является универсальной. Существуют слабые распады так называемых долгоживущих нейтральных каонов на пионы π^+, π^-, запрещенные, если бы указанная инвариантность реально имела место. Таким образом, отличительным свойством слабого взаимодействия является его *CP*-неинвариантность. Возможно, что это свойство ответственно за то обстоятельство, что вещество во Вселенной значительно превалирует над антивеществом, построенным из античастиц. Мир и антимир несимметричны.

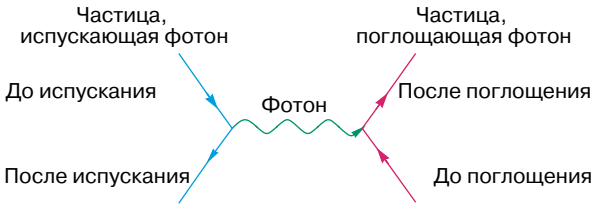
Вопрос о том, какие частицы являются переносчиками слабого взаимодействия, долгое время был неясен. Понимания удалось достичь сравнительно недавно в рамках объединенной теории электрослабых взаимодействий – теории Вайнберга–Салама–Глэшоу. В настоящее время общепринято, что переносчиками слабого взаимодействия являются так называемые $W^{\pm}$- и Z^0-бозоны. Это заряженные $W^{\pm}$ и нейтральная Z^0 элементарные частицы со спином 1 и массами, равными по порядку величины 100 m_p.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В электромагнитном взаимодействии участвуют все заряженные тела, все заряженные элементарные частицы. В этом смысле оно достаточно универсально. Классической теорией электромагнитного взаимодействия является максвелловская электродинамика. В качестве константы связи принимается заряд электрона *e*.

Если рассмотреть два покоящихся точечных заряда q_1 и q_2, то их электромагнитное взаимодействие сведется к известной электростатической силе. Это означает, что взаимодействие является дальнодействующим и медленно спадает с ростом расстояния между зарядами.

Классические проявления электромагнитного взаимодействия хорошо известны, и мы не будем на них останавливаться. С точки зрения квантовой теории переносчиком электромагнитного взаимодействия является элементарная частица фотон – безмассовый бозон со спином 1. Квантовое электромагнитное взаимодействие между зарядами условно изображается следующим образом:



Заряженная частица испускает фотон, в силу чего состояние ее движения изменяется. Другая частица поглощает этот фотон и также изменяет состояние своего движения. В результате частицы как бы чувствуют наличие друг друга.

Хорошо известно, что электрический заряд является размерной величиной. Удобно ввести безразмерную константу связи электромагнитного взаимодействия. Для этого надо использовать фундаментальные постоянные $\hbar$ и *c*. В результате приходим к следующей безразмерной константе связи, называемой в атомной физике постоянной тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}.$$

Легко заметить, что данная константа значительно превышает константы гравитационного и слабого взаимодействий.

С современной точки зрения электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой различные стороны единого электрослабого взаимодействия. Создана объединенная теория электрослабого взаимодействия – теория Вайнберга–Салама–Глэшоу, объясняющая с единых позиций все аспекты электромагнитных и слабых взаимодействий. Можно ли понять на качественном уровне, как происходит разделение объединенного взаимодействия на отдельные, как бы независимые взаимодействия?

Пока характерные энергии достаточно малы, электромагнитное и слабое взаимодействия отделены и не влияют друг на друга. С ростом энергии начинается их взаимовлияние, и при достаточно больших энергиях эти взаимодействия сливаются в единое электрослабое взаимодействие. Характерная энергия объединения оценивается по порядку величины как 10^2 ГэВ (ГэВ – это сокращенное от гига-электрон-вольт, 1 ГэВ = 10^9 эВ, 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ эрг = = $1{,}6 \cdot 10^{19}$ Дж). Для сравнения отметим, что характерная энергия электрона в основном состоянии атома водорода порядка 10^{-8} ГэВ, характерная энергия связи атомного ядра порядка 10^{-2} ГэВ, характерная энергия связи твердого тела порядка 10^{-10} ГэВ. Таким образом, характерная энергия объединения электромагнитных и слабых взаимодействий огромна по сравнению с характерными энергиями в атомной и ядерной физике. По этой причине электромагнитное и слабое взаимодействия не проявляют в обычных физических явлениях своей единой сущности.

СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Сильное взаимодействие ответственно за устойчивость атомных ядер. Поскольку атомные ядра большинства химических элементов стабильны, то ясно, что взаимодействие, которое удерживает их от распада, должно быть достаточно сильным. Хорошо известно, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Чтобы положительно заряженные протоны не разлетелись в разные стороны, необходимо наличие сил притяжения между ними, превосходящих силы электростатического отталкивания. Именно сильное взаимодействие является ответственным за эти силы притяжения.

Характерной чертой сильного взаимодействия является его зарядовая независимость. Ядерные силы притяжения между протонами, между нейтронами и между протоном и нейтроном по существу одинаковы. Отсюда следует, что с точки зрения сильных взаимодействий протон и нейтрон неотличимы и для них используется единый термин *нуклон*, то есть частица ядра.

Характерный масштаб сильного взаимодействия можно проиллюстрировать рассмотрев два покоящихся нуклона. Теория приводит к потенциальной энергии их взаимодействия в виде потенциала Юкавы

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-r/r_0}}{r},$$

где величина $r_0 \approx 10^{-13}$ см и совпадает по порядку величины с характерным размером ядра, g – константа связи сильного взаимодействия. Это соотношение показывает, что сильное взаимодействие является короткодействующим и по существу полностью сосредоточено на расстояниях, не превышающих характерного размера ядра. При $r > r_0$ оно практически исчезает. Известным макроскопическим проявлением сильного взаимодействия служит эффект α-радиоактивности. Следует, однако, иметь в виду, что потенциал Юкавы не является универсальным свойством сильного взаимодействия и не связан с его фундаментальными аспектами.

В настоящее время существует квантовая теория сильного взаимодействия, получившая название квантовой хромодинамики. Согласно этой теории, переносчиками сильного взаимодействия являются элементарные частицы – глюоны. По современным представлениям частицы, участвующие в сильном взаимодействии и называемые адронами, состоят из элементарных частиц – кварков.

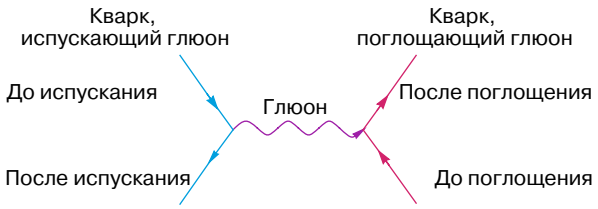
Кварки представляют собой фермионы со спином 1/2 и ненулевой массой. Наиболее удивительным свойством кварков является их дробный электрический заряд. Кварки формируются в три пары (три поколения дублетов), обозначаемые следующим образом:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \qquad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \qquad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

Каждый тип кварка принято называть ароматом, так что существуют шесть кварковых ароматов. При этом u-, c-, t-кварки имеют электрический заряд $\frac{2}{3}|e|$, а d-, s-, b-кварки – электрический заряд $-\frac{1}{3}|e|$, где e – заряд электрона. Кроме того, существуют три кварка данного аромата. Они отличаются квантовым числом, называемым цветом и принимающим три значения: желтый, синий, красный. Каждому кварку соответствует антикварк, имеющий по отношению к данному кварку противоположный электрический заряд и так называемый антицвет: антижелтый, антисиний, антикрасный. Принимая во внимание число ароматов и цветов, мы видим, что всего существуют 36 кварков и антикварков.

Кварки взаимодействуют друг с другом посредством обмена восемью глюонами, которые представляют собой безмассовые бозоны со спином 1. В процессе взаимодействия цвета кварков могут

изменяться. При этом сильное взаимодействие условно изображается следующим образом:



Кварк, входящий в состав адрона, испускает глюон, в силу чего состояние движения адрона изменяется. Этот глюон поглощается кварком, входящим в состав другого адрона, и меняет состояние его движения. В результате возникает взаимовоздействие адронов друг на друга.

Природа устроена так, что взаимодействие кварков всегда ведет к образованию бесцветных связанных состояний, которые как раз и являются адронами. Например, протон и нейтрон составлены из трех кварков: p = *uud*, n = *udd*. Пион π^- составлен из кварка *u* и антикварка $\bar{d}$: $\pi^- = u\bar{d}$. Отличительная черта кварк-кваркового взаимодействия через глюоны состоит в том, что с уменьшением расстояния между кварками их взаимодействие ослабляется. Это явление получило название асимптотической свободы и ведет к тому, что внутри адронов кварки можно рассматривать как свободные частицы. Асимптотическая свобода естественным образом вытекает из квантовой хромодинамики. Имеются экспериментальные и теоретические указания на то, что с ростом расстояния взаимодействие между кварками должно возрастать, в силу чего кваркам энергетически выгодно находиться внутри адрона. Это означает, что мы можем наблюдать только бесцветные объекты – адроны. Одиночные кварки и глюоны, обладающие цветом, не могут существовать в свободном состоянии. Явление удержания элементарных частиц, обладающих цветом, внутри адронов получило название конфайнмента. Для объяснения конфайнмента предлагались различные модели, однако последовательное описание, вытекающее из первых принципов теории, до сих пор не построено. С качественной точки зрения трудности связаны с тем, что, обладая цветом, глюоны взаимодействуют со всеми цветными объектами, в том числе и друг с другом. По этой причине квантовая хромодинамика является существенно нелинейной теорией и приближенные методы исследования, принятые в квантовой электродинамике и электрослабой теории, оказываются не вполне адекватными в теории сильных взаимодействий.

ТЕНДЕНЦИИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Мы видим, что на квантовом уровне все фундаментальные взаимодействия проявляют себя одинаковым образом. Элементарная частица вещества испускает элементарную частицу – переносчик взаимодействия, которая поглощается другой элементарной частицей вещества. Это ведет к взаимовлиянию частиц вещества друг на друга.

Безразмерная константа связи сильного взаимодействия может быть построена по аналогии с постоянной тонкой структуры в виде $g^2/(\hbar c) \approx 10$. Если сравнить безразмерные константы связи, то легко заметить, что самым слабым является гравитационное взаимодействие, а затем располагаются слабое, электромагнитное и сильное.

Если принять во внимание уже развитую объединенную теорию электрослабых взаимодействий, называемую сейчас стандартной, и следовать тенденции объединения, то возникает проблема построения единой теории электрослабого и сильного взаимодействий. В настоящее время созданы модели такой единой теории, получившие название модели великого объединения. Все эти модели имеют много общих моментов, в частности характерная энергия объединения оказывается порядка 10^{15} ГэВ, что значительно превосходит характерную энергию объединения электромагнитных и слабых взаимодействий. Отсюда вытекает, что прямое экспериментальное исследование великого объединения выглядит проблематичным даже в достаточно отдаленном будущем. Для сравнения отметим, что наибольшая энергия, достижимая на современных ускорителях, не превышает 10^3 ГэВ. Поэтому если и будут получены какие-либо экспериментальные данные относительно великого объединения, то они могут носить только косвенный характер. В частности, модели великого объединения предсказывают распад протона и существование магнитного монополя большой массы. Экспериментальное подтверждение этих предсказаний было бы грандиозным триумфом тенденций объединения.

Общая картина разделения единого великого взаимодействия на отдельные сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия выглядит следующим образом. При энергиях порядка 10^{15} ГэВ и выше существует единое взаимодействие. Когда энергия становится ниже 10^{15} ГэВ, сильное и электрослабое взаимодействия отделяются друг от друга и представляются как различные фундаментальные взаимодействия. При дальнейшем уменьшении энергии ниже 10^2 ГэВ происходит отделение слабого и электромагнитного взаимодействий. В результате на масштабе энергий, характерных для физики макроскопических явлений, три рассматриваемых взаимодействия выглядят как не имеющие единой природы.

Заметим теперь, что энергия 10^{15} ГэВ отстоит не так далеко от планковской энергии

$$E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} \ \text{ГэВ},$$

при которой становятся существенными квантово-гравитационные эффекты. Поэтому теория великого объединения с необходимостью ведет к проблеме квантовой гравитации. Если далее следовать тенденции объединения, мы должны принять идею о существовании одного всеобъемлющего фундаментального взаимодействия, которое разделяется на отдельные гравитационное, сильное, слабое и электромагнитное последовательно по мере понижения энергии от планковского значения до энергий, меньших 10^2 ГэВ.

Построение такой грандиозной объединяющей теории, по-видимому, неосуществимо в рамках системы идей, приведших к стандартной теории электрослабых взаимодействий и моделям великого объединения. Требуется привлечение новых, возможно кажущихся сумасшедшими, представлений, идей, методов. Несмотря на очень интересные подходы, развитые в последнее время, такие, как супергравитация и теория струн, проблема объединения всех фундаментальных взаимодействий остается открытой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы сделали обзор основных сведений, касающихся четырех фундаментальных взаимодействий Природы. Кратко описаны микроскопические и макроскопические проявления этих взаимодействий, картина физических явлений, в которых они играют важную роль.

Везде, где это было возможно, мы старались проследить тенденцию объединения, отметить общие черты фундаментальных взаимодействий, привести данные о характерных масштабах явлений. Конечно, излагаемый здесь материал не претендует на полноту рассмотрения и не содержит многих важных деталей, необходимых для систематического изложения. Подробное описание затронутых нами вопросов требует использования всего арсенала методов современной теоретической физики высоких энергий и выходит за рамки данной статьи, научно-популярной литературы. Нашей целью было изложение общей картины достижений современной теоретической физики высоких энергий, тенденции ее развития. Мы стремились вызвать интерес читателя к самостоятельному, более подробному изучению материала. Конечно, при таком подходе неизбежны определенные огрубления.

Предлагаемый список литературы позволяет более подготовленному читателю углубить свое представление о вопросах, рассмотренных в статье.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Окунь Л.Б.* α, β, γ, ..., Z. М.: Наука, 1985.
2. *Окунь Л.Б.* Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1984.
3. *Новиков И.Д.* Как взорвалась Вселенная. М.: Наука, 1988.
4. *Фридман Д., ван. Ньювенхейзен П.* // Успехи физ. наук. 1979. Т. 128. № 135.
5. *Хокинг С.* От Большого Взрыва до черных дыр: Краткая история времени. М.: Мир, 1990.
6. *Девис П.* Суперсила: Поиски единой теории природы. М.: Мир, 1989.
7. *Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1987.
8. *Готтфрид К., Вайскопф В.* Концепции физики элементарных частиц. М.: Мир, 1988.
9. *Coughlan G.D., Dodd J.E.* The Ideas of Particle Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.

* * *

Иосиф Львович Бухбиндер, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики Томского государственного педагогического университета, профессор кафедры квантовой теории поля Томского государственного университета. Член-корреспондент Сибирского отделения Международной академии наук высшей школы, член Нью-Йоркской академии наук, член Американского математического общества, член Международной ассоциации математической физики. Область научных интересов: статистическая механика, теория твердого тела, релятивистская квантовая механика, квантовая теория поля в искривленном пространстве, квантовая гравитация, суперсимметрия и супергравитация, теория струн. Автор 209 научных статей и двух монографий.