ТЕОРИЯ СТРУН И ОБЪЕДИНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

И. Л. БУХБИНДЕР

Томский государственный педагогический университет

STRING THEORY AND UNIFICATION OF FUNDAMENTAL INTERACTIONS

I. L. BUCHBINDER

The basic physical ideas of a theory that aims at unifying all fundamental interactions, the so-called superstring theory, which is now being actively developed, are discussed. The problem of unifying gravity with other fundamental interactions is outlined. A geometrically clear picture, which explains the motion of strings and their interactions, is introduced. The major accomplishments and prospects of the superstring theory are discussed.

Обсуждены основные физические идеи активно развиваемой в последнее время теории всех фундаментальных взаимодействий, называемой теорией суперструн. Отмечена проблема объединения гравитации с другими фундаментальными взаимодействиями. Введена геометрически наглядная картина движения струн и их взаимодействий. Объяснены основные достижения и перспективы теории суперструн.

www.issep.rssi.ru

© Бухбиндер И.Л., 2001

ВВЕДЕНИЕ

В течение уже более пятнадцати лет развитие теоретической физики высоких энергий проходит под знаком суперструнной революции, открывшей замечательные возможности построения объединенной теории фундаментальных взаимодействий и элементарных частиц. Впечатляющие успехи теории суперструн позволили ученым, работающим в этой области, ввести совершенно серьезно, без тени юмора название “теория всего” или TOE (theory of everything), как это впервые было написано по-английски.

Согласно теории суперструн, первичными структурными элементами природы являются не точечные элементарные частицы, как было принято считать, а элементарные одномерные протяженные объекты, называемые струнами. Характерная длина элементарной струны чрезвычайно мала, ее размер порядка планковской длины $L_{\mathrm{Pl}} = (\hbar G/c^3)^{1/2} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-33}$ см, где $\hbar$ – постоянная Планка, c – скорость света, G – гравитационная постоянная (см. обсуждение планковских величин в [1]). По этой причине элементарные струны не могут быть непосредственно заметны на расстояниях много больших планковской длины, которые собственно и доступны в современных экспериментах. Грубо говоря, когда мы смотрим на маленький отрезок издалека, он представляется точкой. Однако с уменьшением пространственно-временных масштабов протяженный характер элементарных объектов начинает существенно проявлять себя и, как вытекает из теории струн, открывается совершенно новый, неожиданный путь к объединенной теории всего.

В процессе развития теория суперструн впитала многие фундаментальные достижения теоретической физики XX века, а также некоторые теоретические построения, которые до этого выглядели достаточно искусственно. Примером может служить старая теория Калуца–Клейна–Фока, основанная на представлении о многомерном физическом пространстве–времени

(см., например, [2]) и по существу вошедшая как элемент в теорию суперструн.

К настоящему времени теория суперструн достигла уровня, аналогичного уровню квантовой теории поля во второй половине 60-х годов XX века, когда общая картина слабо взаимодействующих элементарных частиц была достаточно хорошо развита. Сейчас можно сказать, что в целом наше качественное представление о слабо взаимодействующих струнах выглядит вполне ясным, хотя, конечно, разработка вопросов, деталей, частных случаев, нахождение более адекватных математических методов будут еще долго продолжаться. При этом наблюдается явный прогресс в решении проблем, которые в рамках всех предшествующих подходов представляли собой непреодолимые барьеры. Современный этап суперструнной революции связан с построением теории сильно взаимодействующих струн и изучением структуры струнного вакуума. Здесь достигнуты очень интересные результаты и начинает вырисовываться совершенно новая физика, однако подводить итоги этому этапу теории еще слишком рано.

ПРОБЛЕМА ОБЪЕДИНЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Проблема построения объединенной теории фундаментальных взаимодействий была осознана как реальная физическая проблема во второй половине 70-х годов XX века после создания ставшей уже стандартной теории электрослабых взаимодействий (см., например, [1, 3, 4]). Следует отметить, что предпосылки к объединенной теории возникли достаточно давно и ведут свое начало от эйнштейновской единой теории поля.

Объединение электрослабого и сильного взаимодействий с принципиальной точки зрения может быть проведено в рамках той же системы идей (промежуточные бозоны со спином 1 как переносчики взаимодействия, калибровочная симметрия как метод систематизации элементарных частиц, локальность взаимодействия в пространстве–времени, спонтанное нарушение симметрии, безразмерность фундаментальных констант связи (см. [1, 3], где определяются все эти понятия)), как и объединение слабого и электромагнитного взаимодействий (см. [3]), и ведет к моделям Великого объединения с замечательными предсказаниями о распаде протона и существовании магнитных монополей. При этом исследование квантовых эффектов не вызывает принципиальных проблем, наблюдаемые физические величины, как правило, можно вычислять в виде разложения по степеням констант связи, как говорят, по теории возмущений. Теория позволяет получить значения для любого из коэффициентов разложения. В тех случаях, когда сравнение результатов вычислений с экспериментом оказывается возможным, противоречий между теоретическими предсказаниями и наблюдаемыми на опыте величинами не возникает. Поскольку квантовые модели Великого объединения строятся на основе релятивистской инвариантности, то они автоматически обеспечивают объединение специальной теории относительности и квантовой механики. Однако четвертое фундаментальное взаимодействие – гравитация в эту схему не вписывается, и его объединение с другими фундаментальными взаимодействиями невозможно осуществить в рамках тех идей, которые ведут к моделям Великого объединения.

СТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРИИ СТРУН

Первые идеи теории струн возникли в конце 60-х годов XX века в физике адронов. В 1968 году Г. Венециано установил соотношение, описывающее некоторые свойства адронов (см. обсуждение понятия адрона в [1, 3, 4]). Через два года И. Намбу показал, что соотношение Венециано воспроизводится в модели, называемой моделью бозонной струны. Еще через год П. Рамон, А. Неве, Дж. Шварц нашли, как обобщить соотношение Венециано с учетом фермионов. Картина адронов в виде кварков, соединенных между собой струной, выглядела достаточно привлекательной, она, в частности, хорошо объясняла конфайнмент (см. [1, 3, 4]). К сожалению, оказалось, что свойства модели бозонной струны Намбу не согласуются с самыми основными физическими представлениями физики элементарных частиц.

В 1973 году П. Годард, Дж. Голдстоун, Ч. Ребби и Ч. Торн подробно исследовали квантовую теорию струны Намбу. Важнейшие результаты выглядели необнадеживающе для физики адронов. Бозонная струна ведет к непротиворечивой квантовой теории, только если размерность пространства–времени равна 26. Эта модель описывает бесконечно много элементарных частиц с различными целыми спинами, причем среди них обязательно присутствует тахион – нефизическая частица с мнимой массой и в одном из вариантов модели содержится безмассовая частица со спином 2, не имеющая отношения к адронам. Все эти результаты ясно показывали, что буквально модель струны Намбу не может описывать физику адронов.

Точка зрения на теорию струны как на теорию, претендующую на объединение фундаментальных взаимодействий, возникла в работах Дж. Шерка и Дж. Шварца (1974 год). Эти ученые обратили внимание на то, что безмассовая частица со спином 2 может быть только гравитоном и, значит, теория струн может включать в себя гравитацию. При этом наличие высших измерений рассматривалось как определенное достоинство и трактовалось в духе идей Калуцы–Клейна о том, что лишние пространственные измерения могут быть ответственными за внутренние симметрии теории и, значит,

за принципы систематизации элементарных частиц. Проблема тахиона была решена в 1976 году в рамках так называемой модели фермионной струны, где тахион отсутствовал, а допустимая размерность пространства–времени оказалась равной 10. Подход к построению теории возмущений в моделях бозонных и фермионных струн, ставший сейчас общепринятым, был сформулирован в 1981 году А.М. Поляковым.

Переломным в развитии теории суперструн следует считать 1984 год, когда М. Грин и Дж. Шварц представили модель струны, обеспечивающую объединение бозонов и фермионов. Эта модель имела непротиворечивую квантовую формулировку только в десятимерном пространстве–времени (так же как и фермионная струна). Кроме того, оказалось, что внутренняя согласованность квантовой теории струны Грина–Шварца накладывала жесткие ограничения на возможности систематизации элементарных частиц при низких (по сравнению с планковской) энергиях. Внутреннюю согласованность квантовой теории, полученной на основе некоторой классической модели, связанную с ее математической формулировкой, принято характеризовать термином “отсутствие аномалий”. Таким образом, модель струны, изобретенная Грином и Шварцем, предсказывала размерность физического пространства–времени, принцип систематизации элементарных частиц, объединение бозонов и фермионов. Кроме того, один из вариантов этой модели содержал гравитацию. Становилось ясно, что появился претендент на роль объединенной теории всего.

ЧАСТИЦЫ И СТРУНЫ

Мы начнем рассмотрение простейших свойств струны с обсуждения аналогий и различий между точечной частицей и струной.

Наиболее фундаментальным, основным объектом физики, той сценой, на которой разыгрываются все явления природы, является пространственно-временной континуум или пространство–время, определяемое как множество всех событий. Говорят, что событие P задано, если в каждой из инерциальных систем отсчета указаны момент времени (по часам данной системы отсчета), когда оно произошло, и место (относительно данной системы отсчета), где оно произошло. Таким образом, в каждой инерциальной системе отсчета каждое событие P задается набором D чисел $x^0, x^1, \ldots, x^{D-1}$, называемых координатами события P. Здесь $x^0 = ct$ – временная координата, где c – скорость света, а t – время, $x^1, x^2, \ldots, x^{D-1}$ – пространственные координаты, фиксирующие место, где произошло событие P. Обычно считается, что пространство трехмерно ($D - 1 = 3$) и поэтому $D = 4$. Однако в современной физике все более осознается то обстоятельство, что размерность пространства является физической величиной, а значит, ее численное значение представляет собой опытный факт, который требует теоретического объяснения. По этой причине мы не будем фиксировать численное значение параметра D. Как будет отмечено ниже, именно теория струн предсказывает численное значение размерности D реального пространства–времени. Набор указанных D координат обычно записывается так: x^μ; $\mu = 0, 1, 2, \ldots, D - 1$.

Пусть даны два близких события P (с координатами x^μ) и Q (с координатами $x^\mu + \Delta x^\mu$). Согласно принципам специальной теории относительности, двум таким событиям соответствует число, называемое интервалом и не зависящее от того, в координатах какой из бесконечного числа инерциальных систем отсчета заданы два эти события. Интервал между бесконечно близкими событиями обозначается Δs и определяется следующим образом: $\Delta s^2 = (\Delta x^0)^2 - (\Delta x^1)^2 - \ldots - (\Delta x^{D-1})^2$. Если же два события не являются бесконечно близкими, то им тоже можно сопоставить интервал s, однако его явный вид зависит от того, вдоль какого пути, соединяющего рассматриваемые события, этот интервал вычисляется. Геометрически ясно, что путь, двигаясь по которому мы можем перейти от события P к другому событию Q, есть некоторая кривая в пространстве–времени, то есть функция вида $x^\mu = x^\mu(\tau)$. Кривые в пространстве–времени принято называть мировыми линиями (рис. 1). В ряде случаев параметр τ играет роль интервала, отсчитываемого от события P вдоль мировой линии. Такая интерпретация возможна всегда, когда интервал отличен от нуля.

Пусть в некоторый момент времени точечная частица располагалась в некотором месте пространства так, что ее временная и пространственная координаты соответствовали событию P. Пусть в более поздний момент времени частица будет располагаться в другом месте пространства так, что ее временная и пространственная координаты соответствуют событию Q. Очевидно, что существует бесконечно много мировых линий, начинающихся от события P и заканчивающихся

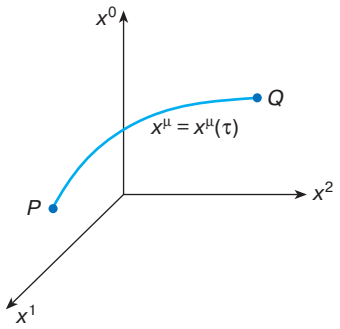


Рис. 1. Мировая линия частицы

в событии Q. Однако, согласно фундаментальному динамическому принципу – принципу действия, реальное движение релятивистской частицы происходит таким образом, чтобы интервал между событиями P и Q, вычисленный вдоль мировой линии, принимал экстремальное значение. В результате интервал $s(x^\mu(\tau))$ между парой событий, вычисленный вдоль произвольной мировой линии $x^\mu = x^\mu(\tau)$, соединяющей эти события, является фундаментальной динамической характеристикой точечной частицы.

Рассмотренная выше геометрическая картина позволяет очень просто перейти к обсуждению основной идеи теории струн. В отличие от релятивистской частицы, являющейся нульмерным геометрическим объектом, (релятивистская) струна представляет собой одномерный геометрический объект, то есть отрезок некоторой кривой $x^\mu = x^\mu(\sigma)$. Следует сразу отметить, что релятивистская струна рассматривается как самостоятельная фундаментальная физическая сущность. То есть релятивистскую струну нельзя понимать как совокупность частиц, взаимодействующих между собой специальным образом и поэтому не разлетающихся. В теории суперструн принимается, что струна есть независимый физический объект, являющийся единым целым. Постулируется, что фундаментальные струны представляют собой первичные элементы материи в природе.

Рассмотрим движение струны. Поскольку струна – это отрезок кривой, то в процессе своего движения она заметает некоторую двумерную поверхность (рис. 2), называемую мировым листом струны. Так как мировой лист – это двумерная поверхность, то каждое событие на нем параметризуется двумя числами, а сам мировой лист определяется как $x^\mu = x^\mu(\tau, \sigma)$. Параметр σ нумерует место на струне $x^\mu = x^\mu(\sigma)$ в начальном ее положении. В процессе эволюции каждое место на струне движется и, следовательно, можно ввести параметр τ, определяющий положение струны при ее движении. Таким образом, параметр τ для струны имеет тот же смысл, что и для релятивистской частицы, он характеризует собственное время.

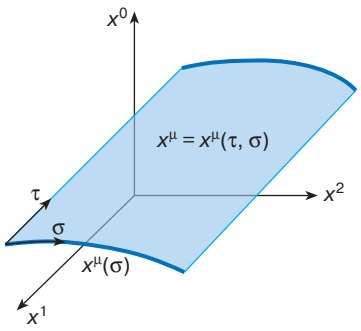


Рис. 2. Мировой лист струны

Пусть при $\tau = \tau_1$ положение струны зафиксировано и описывается функцией $x^\mu = x^\mu(\tau_1, \sigma)$. Пусть, кроме того, некоторое конечное положение струны при $\tau = \tau_2$ также зафиксировано и задается функцией $x^\mu = x^\mu(\tau_2, \sigma)$. Очевидно, имеется бесконечно много мировых листов, начинающихся на начальном положении струны и заканчивающихся на конечном. Какой же мировой лист заметается в процессе реального движения струны? По существу это тот же вопрос, что и вопрос о нахождении мировой линии реального движения частицы. Ответ опять дается принципом действия: реальное движение струны происходит таким образом, что площадь возникающего мирового листа имеет экстремальное значение.

Продолжим наш геометрический анализ. Очевидно, что можно представить себе два типа струн. Во-первых, это открытые струны, когда в начальный момент времени $\tau = 0$ $\quad x^\mu(\sigma_1) \neq x^\mu(\sigma_2)$, где σ_1, σ_2 – значения параметра σ, отвечающие концам струны. Пример открытой струны приведен на рис. 2. Во-вторых, это замкнутые струны, для которых $x^\mu(\sigma_1) = x^\mu(\sigma_2)$. Замкнутая струна представляется замкнутой мировой линией, которая выглядит как петля. В процессе своей эволюции замкнутая струна формирует мировой лист, напоминающий цилиндрическую поверхность.

СТРУННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И СТРУННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Прежде чем говорить о квантовых возбуждениях релятивистской струны, вспомним понятие стоячей волны. Рассмотрим натянутую упругую нить, концы которой жестко закреплены. Как хорошо известно, поперечные колебания такой нити носят характер стоячих волн, собственные частоты которых ω пропорциональны целому числу n. Отсюда вытекает, что существует бесконечно много собственных колебаний с различными частотами ω_n, $n = 1, 2, \ldots$ При переходе к квантовой теории мы должны использовать корпускулярно-волновой дуализм и ввести бесконечный набор частиц с энергиями $E_n = \hbar\omega_n \propto n$. Подобные частицы, являющиеся квантами колебаний упругой среды, принято называть фононами.

Сходный анализ можно провести и для релятивистских струн. С математической точки зрения он значительно сложнее того анализа, который ведет к собственным частотам стоячих волн для поперечных колебаний упругой нити, но качественная физическая картина остается прежней: речь идет о стоячих волнах и соответствующих частицах – квантах колебаний. Конечно, надо отдавать отчет в том, что релятивистская струна существенно отличается от упругой нити, и

никакая аналогия здесь не может быть буквальной. В частности, параметром, аналогичным частоте, для релятивистской струны оказывается квадрат массы. Другими словами, квантами поперечных колебаний релятивистской струны являются частицы, массивные или безмассовые. Кроме того, все эти частицы имеют целочисленные спины, то есть представляют собой бозоны. По этой причине рассматриваемая релятивистская струна называется еще бозонной струной.

Детальное исследование квантовой структуры бозонной струны ведет к фантастическому результату. Оказывается, что квантовая теория бозонной струны свободна от внутренних противоречий (аномалий), если только размерность пространства–времени равна так называемой критической размерности $D = 26$. Теория предсказывает размерность пространства–времени! Анализ спектра масс частиц, описываемых бозонной струной, показывает, что в нем существует частица с массой, удовлетворяющей условию $M^2 < 0$. Гипотетическую частицу такого типа принято называть тахионом. Считается, что тахионы в природе не существуют, и если теория предсказывает наличие тахиона, то она имеет внутренний дефект и не может рассматриваться как теория, имеющая отношение к реальности. Далее в спектре открытой струны имеется безмассовая частица со спином 1, которую естественно отождествить с фотоном. В спектре замкнутой струны содержится безмассовая частица со спином 2, которую можно отождествить только с квантом гравитационного поля – гравитоном (см. обсуждение понятия гравитона в [1]). Кроме того, в спектре содержится бесконечно много массивных частиц со спинами, большими 1, для открытой струны, и со спинами, большими 2, для замкнутой струны с квадратами масс, кратными квадрату планковской массы $m_{\text{Pl}} = (\hbar c/G)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ г – так называемые массивные частицы высших спинов.

Таким образом, модель релятивистской струны обладает многими интересными свойствами. Она как бы объединяет все бозонные частицы, правда, все массивные частицы настолько тяжелы, что в условиях современных экспериментов их возбудить невозможно. Поскольку в бозонных струнах имеются фотон и гравитон, они должны включать электромагнетизм и гравитацию. Кроме того, теория предсказывает размерность пространства–времени. В результате бозонная струна характеризуется свойствами, привлекательными с точки зрения идеи объединения. К сожалению, модель имеет и негативные аспекты. В ней содержится тахион, что сразу делает модель нефизической. В спектре релятивистской струны отсутствуют фермионы. И наконец, неясно, как интерпретировать критическую размерность, тогда как, согласно специальной теории относительности, наблюдаемая размерность пространства–времени равна четырем.

В настоящее время все негативные аспекты, присущие бозонной струне, преодолены в модели суперструны Грина–Шварца. Не вдаваясь в детали, отметим, что важнейшим свойством суперструны является так называемая суперсимметрия, собственно и давшая название модели. Суперсимметрия представляет собой особое расширение релятивистской симметрии специальной теории относительности таким образом, что бозоны и фермионы перестают быть независимыми типами частиц, а оказываются связанными между собой. По этой причине суперсимметрию называют симметрией между бозонами и фермионами (см. популярное обсуждение суперсимметрии в [2, 3, 5]). Согласно общим принципам суперсимметрии, каждому бозону соответствует фермион и каждому фермиону соответствует бозон. Как говорят, бозон и фермион являются суперпартнерами. При этом оказывается, что в спектре суперструны Грина–Шварца не существует фермион, являющийся суперпартнером для тахиона, и, значит, сам тахион должен быть запрещен. Далее в силу симметрии бозоны и фермионы должны входить в спектр суперструны парами. Таким образом, в спектре открытой суперструны должны быть как минимум две безмассовые частицы – фотон и его суперпартнер, являющийся фермионом и называемый фотино. В спектре замкнутой суперструны помимо гравитона присутствует его фермионный суперпартнер, называемый гравитино. Кроме того, в спектре суперструны имеется бесконечно много массивных бозонов и фермионов с высшими спинами и массами, кратными планковской массе.

Условия квантовой непротиворечивости суперструны оказываются еще более необычными, чем в случае бозонной струны. Прежде всего критическая размерность для суперструны $D = 10$. Теория по-прежнему утверждает, что физическое пространство–время многомерно! Кроме того, отсутствие аномалий в модели суперструны Грина–Шварца предсказывает вполне определенный способ классификации элементарных частиц. Таким образом, суперструна Грина–Шварца действительно может претендовать на роль теории всего. В ней объединены бозоны и фермионы, в ней содержится гравитация, она предсказывает способ классификации элементарных частиц. Остается вопрос: что делать с высшими измерениями? Ответ на этот вопрос мы обсудим ниже.

Все, что мы пока говорили, касалось свойств одной струны. Ясно, что предположение о том, что в природе существует только одна струна, выглядит неестественным и очень ограниченным. Это видно хотя бы из того, что спектр струны содержит невзаимодействующие частицы. Но в природе частицы взаимодействуют. Значит,

должны взаимодействовать и струны, вмещающие в себя все частицы. Следует сразу сказать, что проблема струнных взаимодействий во всех аспектах до сих пор не решена. Мы рассмотрим только простые геометрические соображения, иллюстрирующие взаимодействия струн и отражающие некоторые их свойства. При этом мы будем иметь в виду только бозонные струны.

Представим себе, что первоначально имелись две открытые струны, которые в процессе своей эволюции слились так, что в последующем осталась только одна струна. Взаимодействие открытых струн такого вида достаточно просто изображается с помощью мировых листов, как это показано на рис. 3. Возможен тип взаимодействия струн, когда две открытые струны образуют замкнутые струны. Эта ситуация иллюстрируется на рис. 4. И наконец, возможно взаимодействие замкнутых струн такое, как показано на рис. 5.

Замечательная черта струнного взаимодействия проявляется, если попробовать понять его на основе частиц, входящих в струнный спектр. Как мы уже отмечали, спектр струны содержит бесконечно много частиц. При взаимодействиях, изображенных на рис. 3–5,

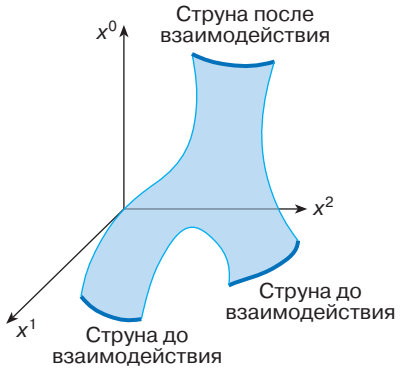


Рис. 3

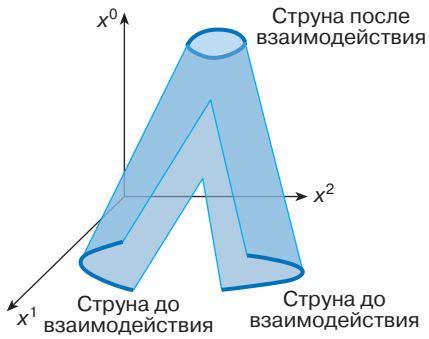


Рис. 4

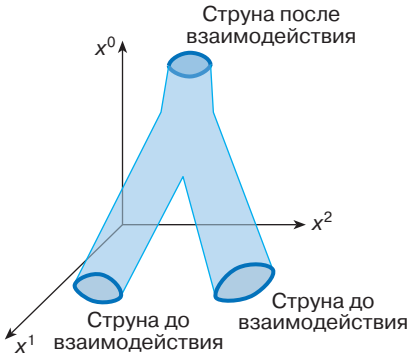


Рис. 5

каждая из взаимодействующих струн как бы несет бесконечно много частиц. Тем самым взаимодействие двух струн означает фактически одновременное взаимодействие всех тех частиц, которые содержатся в спектре этих струн. Поэтому описание взаимодействия суперструн представляет по существу единое взаимодействие сразу бесконечного числа бозонов и фермионов. Это еще раз свидетельствует о теории суперструн как о теории всего.

ЧТО ДЕЛАТЬ С ВЫСШИМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Последний вопрос, который нам осталось обсудить, состоит в том, как согласовать критическую размерность $D = 10$, предсказуемую теорией суперструн, с наблюдаемым четырехмерным пространством–временем. Оказывается, идейные истоки ответа на этот вопрос известны достаточно давно и называются теорией Калуцы–Клейна–Фока.

В 1921 году Т. Калуца предложил рассмотреть эйнштейновскую общую теорию относительности в пятимерном пространстве–времени, считая, что пятое измерение представляет собой окружность. Оказалось, что такое рассмотрение ведет к четырехмерной гравитации, взаимодействующей с электромагнетизмом. В работах О. Клейна и В.А. Фока 1926 года изучены некоторые обобщения подхода Калуцы.

Интерпретация высших измерений в теории суперструн осуществляется в духе теории Калуцы–Клейна–Фока. Многие годы эта теория рассматривалась как оригинальная красивая идея, не связанная с текущими проблемами физики и не получившая развития. Именно в рамках теории суперструн произошел ренессанс такого подхода. История науки еще раз продемонстрировала, что глубокие и красивые идеи никогда не пропадают, какими бы фантастически странными они ни казались.

Проблема высших измерений решается в теории суперструн следующим образом. Десятимерное физическое пространство–время должно иметь специальную структуру. Четыре измерения отвечают наблюдаемому на уровне современных экспериментов четырехмерному пространству–времени. Шесть оставшихся измерений устроены так, что соответствующие координаты меняются в конечных пределах и соответствуют, как говорят, компактному пространству, примером которого может служить тор. При этом характерные границы изменения этих шести координат имеют порядок планковской длины. Таким образом, ответ на вопрос, что делать с высшими измерениями, очень прост – их не видно. Другими словами, на современном уровне энергий, доступных для эксперимента, наличие высших измерений не проявляет себя. Однако если энергии становятся близкими к планковской энергии $E_{\text{Pl}} = m_{\text{Pl}}c^2$, то десятимерность пространства–времени должна проявлять себя в полной мере. Но это именно те энергии, при которых начинают существенно работать эффекты квантовой гравитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бухбиндер И.Л.* Фундаментальные взаимодействия // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 66–73.

2. *Дэвис П.* Суперсила. М.: Мир, 1989.

3. *Окунь Л.Б.* Физика элементарных частиц. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984.

4. *Зельдович Я.Б.*, *Хлопов М.Ю.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

5. *Фридман Д.*, *ван Ньювенхейзен П.* Супергравитация и унификация законов физики // Успехи физ. наук. 1979. Т. 128, № 1. С. 135–156.

Рецензент статьи Ю.В. Грац

* * *

Иосиф Львович Бухбиндер, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики Томского государственного педагогического университета, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Международной академии наук высшей школы. Область научных интересов – квантовая теория поля, суперсимметрия, квантовая гравитация, теория струн. Автор 270 научных статей и двух монографий, изданных в Великобритании.