

4. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. Трехмерные сверхрешетки в матрицах опалов // Кристаллография.– 1993.– Т. 38.– № 3.– С. 111–120.
5. Богомолов В.Н. Жидкости в ультратонких каналах (Нитяные и кластерные кристаллы) // Успехи физических наук.– 1978.– Т. 124.– № 1.– С. 171–182.
6. Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskii A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects // Il Nuovo Cimento.– 1995.– V. 17D.– No. 11–12.– P. 1349–1354.
7. Trifonov S.V., Ivanova M.S., Markov V.N., Pan'kova S.V., Veisman V.L., Solov'ev V.G. Synthesis and physical properties of single crystals of zeolite-like aluminophosphates of the AFI type // Glass Physics and Chemistry.– 2007.– V. 33.– No. 3.– P. 259–261.
8. Марков В.Н., Соловьёв В.Г. Ячейка для измерения электропроводности микрокристаллов цеолитов // Приборы и техника эксперимента.– 1990.– № 5.– С. 232–234.
9. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.– М.: Энергоатомиздат, 1991.– С. 563.
10. Ito K., Hijikata K., Torikoshi K., Phelan P.E. Thermoelectric voltage at metallic point contacts from nonequilibrium effects // Transactions of the ASME.– 1995.– V. 117.– No. 4.– P. 822–827.
11. Нанотехнологический комплекс «Умка» (сканирующий туннельный микроскоп): Руководство пользователя.– М.: ИНАТ, 2006.– С. 19.

Павлов Е.В.

ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ИДЕИ ТЕОРИИ СТРУН И М-ТЕОРИИ

Один из создателей и разработчиков струнной теории Эдвард Виттен сказал, что теория струн - это теория XXI века, и она случайно оказалась в XX веке.

Необходимость разработки и изучения этой проблемы объясняется тем, что теория струн дает определенный способ объяснения свойств всех взаимодействий и всех видов материи. Это значит, что теория струн может претендовать на роль единой теории поля.

Поэтому представляется необходимым познакомить с основными базовыми положениями струнной теории, в первую очередь, студентов физико-математических факультетов, а также студентов других факультетов, слушающих курс "Концепции современного естествознания", уделяя внимание физическим сторонам теории струн.

Частицы, которые известны как фундаментальные (кварки, лептоны), а также частицы, переносящие взаимодействия (фотон, гравитон, глюоны, промежуточные векторные бозоны), согласно стандартной модели рассматриваются как нуль-мерные объекты, т.е. материальные точки. Каждая из этих частиц, известных как "элементарные", в теории струн представляет собой своеобразную колеблющуюся нить, названную струной, которая принимается как одномерное образование.

В 1968 г. молодой физик - теоретик Габриэле Венециано обдумывал способы объяснения многочисленных экспериментально наблюдаемых характеристик сильного ядерного взаимодействия. Этой проблемой он занимался в течение нескольких лет. В то время Венециано работал в Женеве в ЦЕРНЕ. Однажды не без удивления он понял, что экзотическая математическая формула, придуманная Леонардом Эйлером в 1730 г. в чисто математических целях - так называемая бета-функция Эйлера, - похоже, способна описать все многочисленные свойства частиц, участвующих в сильном ядерном взаимодействии. Это свойство бета-функции позволяло дать математическое описание многим огромным массивам данных, накопленным при изучении особенностей сильного взаимодействия.

Однако одновременно возникла другая проблема. Она заключалась в том, что, несмотря на достижения, связанные с применением бета-функции, никто не мог объяснить причину успешного функционирования бета-функции. Эта формула нуждалась в объяснении.

Необходимое объяснение было дано в 1970 г. Физический смысл, скрывавшийся за формулой Эйлера, выявили Йохиро Намбу, Холгер Нильсен и Леонард Сасскинд. Эти физики показали, что сильное взаимодействие элементарных частиц в точности описывается с помощью функции Эйлера, если их рассматривать в виде маленьких колеблющихся одномерных струн. Если длину струн принять настолько малой, что приближенно их можно по-прежнему рассматривать как точечные частицы, то, рассуждали эти физики, их свойства не будут противоречить уже накопленным результатам экспериментальных наблюдений.

Струны бывают замкнутыми и открытыми. Замкнутые струны представляют собой одномерные петли. Фундаментальные частицы, такие, например, как электроны, кварки, мюоны и др., представляют собой крошечные петли вибрирующих струн. Открытые струны - это струны со свободными концами. В среднем размер струн сопоставим с планковской длиной ($\approx 10^{-33}$ см).

Согласно теории струн все известные свойства элементарных частиц зависят от различных резонансных частот колебаний струн. Каждая из резонансных мод колебаний струны проявляется в виде частицы, характерные масса и заряды которой определяются конкретным видом колебания струны. Например, один вид колебаний струны соответствует электрону, а другой - кварку. Фотон, глюон, промежуточные векторные бозоны представляют собой всего лишь иные моды колебаний струн.

Наблюдаемые различия между элементарными частицами обусловлены разными модами резонансных колебаний струн, тогда как сами струны одинаковы.

Полезно показать, как особенности колебаний струны связаны с известными характеристиками элементарных частиц. Например, если частица имеет не равную нулю массу, то согласно теории струн эта масса определяется некоторой резонансной модой колебаний соответствующей струны. Согласно специальной теории относительности масса и энергия являются взаимно связанными величинами. Но энергия моды колебания струны зависит от ее амплитуды и от длины волны. Энергия колебаний тем больше, чем больше амплитуда колебаний и чем короче длина волны. В соответствии с этим струны более массивных частиц совершают более интенсивные колебания, а струны более легких частиц колеблются менее интенсивно.

Важной характеристикой струн является их натяжение. Каким образом можно оценить величину натяжения струн? Так как одна из мод колебаний струны соответствует гравитону, то оказалось возможным использовать разработанную для гравитона теорию, согласно которой интенсивность гравитационного взаимодействия, обусловленного колебаниями струны, обратно пропорциональна натяжению струны. Но известно, что гравитационное взаимодействие является чрезвычайно слабым, и поэтому величина натяжения струны согласно расчетам оказалась невероятно большой - 10^{39} тонн. Это натяжение известно как планковское натяжение.

В отличие от струн рояля, которые закреплены так, что их длина не может изменяться, для фундаментальных струн не существует никакого закрепления, которое ограничивало бы их размер. Поэтому чудовищное натяжение заставляет эти струны сжиматься до планковских размеров, т.е. до $\approx 10^{-33}$ см.

С другой стороны, такое натяжение должно приводить и к огромному значению энергии колебаний струны и, следовательно, к огромному значению массы соответствующей частицы.

Согласно квантовой механике энергия колебаний струны должна принимать дискретный ряд значений, каждое из которых кратно минимальной величине энергии. В соответствии с теорией величина этой минимальной энергии равна планковской, т.е. 10^{19} ГэВ. Но в этом случае возникает вопрос об объяснении величины масс реально регистрируемых частиц, у которых масса не превышает нескольких ГэВ.

Объяснение основано на том, что в данном случае нужно учитывать наличие квантовых флуктуаций. Оказалось, что для струны энергия квантовых флуктуаций является отрицательной.

В итоге общая наименьшая энергия колеблющейся струны уменьшается примерно на величину планковской энергии. В связи с этим было обнаружено, что мода колебаний, соответствующая гравитону, характеризуется полной компенсацией энергии, что и приводит к нулевой массе гравитона.

Первоначально, как об этом уже было сказано, теория струн была использована при исследованиях сильного взаимодействия. Действительно, некоторые конфигурации колеблющихся струн в этой теории имели свойства, которые напоминали свойства глюонов, которые ответственны за сильное взаимодействие. Но кроме глюонов в теории были обнаружены и некоторые другие частицы-переносчики взаимодействия.

Изучив дополнительные моды колебаний струн, Шварц и Шерк в 1974 г. поняли, что свойства этих других частиц-переносчиков взаимодействия удивительно точно совпадают с предполагаемыми свойствами гипотетической частицы-переносчика гравитационного взаимодействия - гравитона.

В частности, было установлено, что в спектре колебаний струн должна присутствовать мода, которая соответствует частице со спином, равным 2, а масса этой частицы должна быть равна нулю. Такие характеристики свойственны гравитону.

После этого Шерк и Шварц заявили, что теория струн - это не просто теория сильного взаимодействия, но что это квантовая теория, которая включает также и гравитацию, а Эдвард Виттен объявил: "Теория струн обладает замечательным свойством: она предсказывает гравитацию".

Теория струн включает гравитацию и предоставляет способ объединения общей теории относительности и квантовой механики. Такое объединение оказалось возможным вследствие того, что струна способна сглаживать квантовые флуктуации, что неприемлемо для точечной частицы. В итоге устраняются противоречия между квантовой механикой и общей теорией относительности.

Теория струн дает нам квантовомеханическое описание гравитации, требующее переосмотра общей теории относительности на длинах порядка планковской. На длинах порядка планковской должна вступать в игру новая геометрия, согласующаяся с новой физикой теории струн. Эту новую геометрию называют квантовой геометрией.

Первоначальный вариант теории струн рассматривал только моды с целочисленным значением спина, т.е. была создана бозонная теория струн. В 1971 году Пьер Рамон модифицировал теорию бозонных струн, включив в нее фермионные моды колебаний. Неожиданно оказалось, что в этой новой теории бозонные и фермионные моды содержались парами. Это обстоятельство соответствовало новому понятию, вошедшему в физику и известному как суперсимметрия. Появилась суперсимметричная теория струн, или теория суперструн.

Затем физики Джулиус Весс и Бруно Zumino пришли к выводу, что новый вид симметрии - суперсимметрия - может быть использован и в теориях, основанных на точечной модели частиц. В результате получила развитие суперсимметричная квантовая теория поля. Суперсимметричная версия теории струн позволила избавиться и от имевшей место тахионной проблемы.

На первоначальном этапе развития теории струн было обнаружено, что при некоторых вычислениях приходится иметь дело с отрицательными вероятностями. Но затем оказалось, что если допустить для струн возможность колебаться в девяти пространственных направлениях, то все отрицательные вероятности исчезают. Таким образом, теория струн требует, чтобы Вселенная кроме трех привычных пространственных измерений должна иметь еще шесть, но свернутых. С учетом одного временного измерения Вселенная должна иметь всего десять измерений. Размер дополнительных свернутых измерений сравним с планковской длиной, т.е. такой, как и у струн. Дополнительные измерения должны быть свернуты так, чтобы им удовлетворял один конкретный класс шестимерных геометрических объектов. Они носят название пространств Калаби-Яу в честь двух математиков.

Струны могут колебаться по всем девяти направлениям пространства. При этом моды резонансных колебаний струн зависят от геометрической формы дополнительных измерений.

Для примера можно сослаться на то, что звучание органной трубы или валторны зависит от резонансной моды колебаний воздуха, а это определяется формой и размерами каналов этих инструментов.

Так как моды резонансных колебаний струн проявляются в виде масс и зарядов элементарных частиц, то размеры и форма дополнительных измерений должны определять эти характеристики элементарных частиц.

Следовательно, геометрия дополнительных измерений определяет фундаментальные физические свойства, такие, как масса частиц и заряды, которые мы наблюдаем в нашем обычном трехмерном пространстве.

В настоящее время теория струн является частью более общей теории, которая носит название М-теории. Буква М появилась от слов: мистическая, материнская, мембранная, матричная.

Перед созданием М-теории физики обнаружили, что на самом деле разработано пять разных вариантов теории струн. Поэтому была надежда, что должна быть создана теория, которая объединила бы все пять вариантов. Оказалось, что если ввести еще одно (десятое) дополнительное пространственное измерение, то это позволяет объединить все пять вариантов теории струн. (В середине 1990-х гг. было обнаружено, что в первоначальных (1970-е, 1980-е гг.) приближенных расчетах было пропущено одно пространственное измерение.)

М-теория рассматривает одиннадцать измерений (десять пространственных и одно временное). М-теория включает в себя не только колеблющиеся струны, но и такие объекты, как колеблющиеся двумерные мембраны и трехмерные капли. Важную роль играют и протяженные объекты других размерностей. Протяженные трехмерные объекты названы 3-бранами, протяженные четырехмерные - 4-бранами (и так далее). В общем случае, p -брана имеет p пространственных измерений. В связи с этим иногда струны называют 1-бранами, а мембраны - 2-бранами.

Теория струн позволила подтвердить идею Бекенштейна, предложенную им в 1970 году, о том, что черные дыры обладают энтропией. Энтропия - это мера беспорядка и хаотичности. Но если понятие энтропии применить по отношению к черной дыре, то необходимо было найти структурные элементы черной дыры. Но так как всегда считали, что у черных дыр нет достаточной структуры, то большинство физиков отказывались принять идею Бекенштейна. Даже после того, как Хокинг показал, что температура черной дыры не равна нулю, и, следовательно, черная дыра должна обладать энтропией, вопрос о структурных составляющих черных дыр по-прежнему оставался открытым. Лишь в конце 1996 г. удалось использовать теорию струн для нахождения микроскопических компонентов некоторого класса черных дыр. Теоретически было показано, что если использовать набор бран определенной размерности, то из них можно построить черные дыры. Количество способов выстраивания струн внутри черных дыр оказалось огромным. Полученные результаты совпали с величиной энтропии, вычисленной Бекенштейном и Хокингом. Площадь горизонта событий - это и есть точная мера энтропии черной дыры.

В заключение можно отметить, что если теория струн верна, то уже первые результаты, полученные на ее основе, демонстрируют поразительное проникновение в сущность пространства, времени и материи, т.е. в сущность устройства нашей Вселенной.

Литература

1. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. - М.: Едиториал УРСС, 2004. - 288 с.
2. Грин М. // УФН. - 1986. - Т. 150. - № 4. - С. 577-579.
3. Казаков Д.И. // УФН. - 1986. - Т. 150. - № 4. - С. 561-575.
4. Маршаков А.В. // УФН. - 2002. - Т. 172. - № 9. - С. 977-1020.
5. Морозов А.Ю. // УФН. - 1992. - Т. 162. - № 8. - С. 83-175.
6. Хван М.П. Неистовая Вселенная: от Большого взрыва до ускоренного расширения, от кварков до суперструн. - М.: ЛЕНАНД, 2006. - 408 с.
7. Энтони С. // УФН. - 1986. - Т. 150. - № 4. - С. 579-583.
8. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. - М.: Изд-во ЛКИ, 2007. - 584 с.