

**БИБЛИОГРАФИЯ**

539.12.01(049.3)

**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ СТРУН**

**Lüst D. Theisen S.** Lectures on String Theory.—Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1989.—346 p.—(Lecture Notes in Physics. V. 346).

Рецензируемая книга представляет собой обработанный в 1989 г. вариант лекций, прочитанных авторами в ФРГ зимой 1987—1988 г. Она посвящена бурно развивающейся в последние годы области теоретической и математической физики, условно называемой «теорией струн». Ключевой идеей этой теории служит попытка ввести в рассмотрение одномерные протяженные объекты, называемые струнами. При этом возбуждения струны, при квантовании описываемые дискретным спектром, отвечают реально наблюдаемым частицам. Наинизшие возбуждения отвечают безмассовым частицам, а далее растут как масса, так и спин возбуждений. Таким образом, получается теория с бесконечным числом спинов частиц. Струна, очевидно, описывается единственным существенным размерным параметром — своим натяжением. Если мы хотим описывать струнами все имеющиеся взаимодействия, в том числе гравитацию, необходимо ввести характерный масштаб натяжения порядка массы Планка  $M_P = (hc/G)^{1/2} \approx 10^{19}$  ГэВ. Таким образом, не следует ожидать экспериментального обнаружения высших возбуждений струн при современных энергиях ускорителей. Поэтому развитие теории определяется в основном некоторыми внутренними критериями. Как следствие, теория струн инициировала развитие нескольких связанных областей теоретической физики, хотя и не достигла к настоящему моменту первоначальной задачи (1984 г.) объединения всех известных взаимодействий, включая гравитационное. Одной из новых важнейших областей служат двумерные конформные теории, имеющие множество приложений также и в области твердого тела, так как они описывают критические точки фазовых переходов в двумерных системах. Благодаря теории струн вспыхнул интерес к множеству других направлений. К сожалению, представляется невозможным их сколько-нибудь детальное описание при одновременном рассмотрении всех интересных проблем. С этой точки зрения, авторы предлагаемой книги сумели удержаться в точности посередине, сохранив широту охвата материала при детальности его изложения, что позволяет использовать книгу в качестве хорошего учебника по теории струн. Свои общие взгляды на излагаемый предмет авторы книги изложили в вводной гл. 1.

Гл. 2 посвящена подробному описанию классической бозонной струны. А именно, обсуждаются различные возможные виды классического действия (Полякова, Намбу-Гото) и их симметрии. Чтобы почувствовать динамику струны, предлагаются несколько примеров классических решений струнных уравнений движения.

Следующая гл. 3 посвящена квантованию струн. Это проделывается как ковариантным способом, так и в калибровке светового конуса. При квантовании струны естественно возникает два новых понятия, имеющих важнейшее значение для дальнейшего. Это — алгебра Вирасоро (более подробному описанию которой посвящено специальное приложение к этой главе) и критическая размерность струны, которая, как известно, определяется условием отщепления духов (или унитарности в бездуховых калибровках) вместе с требованием лоренц-инвариантности. Конечно, в критической размерности  $D=26$ , где эти сложности отсутствуют, сохраняется, тем не менее, проблема, связанная с тем, что основное состояние струны отвечает частице, имеющей отрицательный квадрат массы (тахин). В этой главе спектр состояний струны изучен весьма подробно для первых нескольких уровней возбуждений; рассматриваются также вопросы, связанные с включением внутренних степеней свободы, которые необходимы, чтобы описать калибровочные частицы. Наконец, здесь же содержится общее введение в метод континуального интегрирования струн — проблема, к которой авторы позже неоднократно возвращаются. В этих рамках впервые в книге возникают духи, связанные с репараметризационной инвариантностью струны.

Как уже отмечалось, развитие теории струн потребовало дальнейшего прогресса также в изучении двумерных конформных теорий поля. Дело в том, что основным динамическим принципом в теории струн служит ее конформная инвариантность — основное состояние струнного вакуума (во вторично-квантованном, смысле) должно описываться какой-либо двумерной конформной теорией поля. Поэтому задача исследования и классификации таких теорий приобретает первостепенное значение, и кажется естественным изложение в гл. 4 настоящей книги введения в методы конформных теорий поля. Начав с общего описания в рамках бутстрапного подхода, предложенного Белавиным, Поляковым и Замолотчиковым, авторы книги далее применяют развитый аппарат непосредственно к свободной бозонной струне, представляющей из себя простейший пример конформной теории.

Менее тривиальный пример конформной теории — это уже введенные репараметризационные духи. Их изучение как с точки зрения конформной теории, так и с точки зрения применения к построению BRST-формализма в теории струн посвящена следующая гл. 5 книги.

Гл. 7 и 8 книги (о гл. 6 см. ниже) заканчивается описание «классических» результатов теории струн, полученных до 1984 г., с которого начался новый виток интереса к проблеме. В этих главах изучается замкнутая фермионная струна, как классическая, так и квантовая. При этом однажды уже пройденный в случае бозонной струны путь повторяется с незначительными отличиями. Так, критическая размерность фермионной струны  $D=10$ , и существует сектор (называемый сектором Рамона), где отсутствует тахон. По-видимому, единственным новым моментом является наблюдение суперсимметрии (десятимерной) при определенном обрезании фоковского пространства обоих секторов фермионной струны, называемом GSO-проекцией. Такая струна с суперсимметрией называется суперструной.

В гл. 9 изложен более современный подход к фермионной струне, вычислена статсумма свободной фермионной струны. В частности, ключевое значение имеет введенное понятие спиновой структуры, позволяющее обобщить понятие GSO-проекции.

Гл. 10 книги построена целиком на идеях около 1984 г. о том, какими способами можно строить новые модели струн. Именно, можно рассмотреть бозонную струну, у которой одна из 26 компонент компактифицирована на окружность, т. е. координаты принимают значение в пространстве с нетривиальной топологией. Спектр такой струны меня-

ется в зависимости от радиуса окружности. Несколько более общий случай такой струны описывается компактификацией нескольких координат на многомерный тор. Тор можно себе представлять как пространство  $\mathbb{R}^n$ , факторизованное по некоторой решетке. Выберем в качестве такой решетки решетку, образованную корнями какой-либо алгебры Ли. Из требований непротиворечивости (типа модулярной инвариантности) эта решетка должна быть четной и самодуальной. Алгебр с такими решетками очень мало (с размерностью 16 — см. ниже, это —  $SO(32)$ ,  $SO(16) \times SO(16)$  и  $E_8 \times E_8$ ). Это естественным образом приводит авторов книги к понятию гетеротической струны, образованной из 10 суперструнных мод правой (конечно, ориентация чисто условна) киральности и 10 бозонных мод левой киральности. При этом остальные 16 мод бозонной струны предполагаются компактифицированными на решетку группы  $E_8 \times E_8$  (группа, выделенная исключительно из феноменологических соображений) или  $SO(32)$ .

Если предыдущая гл. 10 была практически полностью посвящена обсуждению спектра струны, то в гл. 11 изучается ее взаимодействие. В действительности, описание взаимодействий гетеротической струны требует изучения конформных теорий с дополнительной непрерывной двумерной симметрией, описываемой алгеброй токов со спином 1 — бесконечномерных алгебр Каца — Мури. Оказывается, операторы, рождающие физические частицы из струн, реализуют представления таких алгебр. При этом гетеротической струне, компактифицированной на решетку корней алгебры  $E_8 \times E_8$ , отвечает алгебра Каца — Мури  $E_8 \times E_8$ . Таким образом, в гл. 11 изучена связь струн, решеток и конформных теорий с дополнительной симметрией Каца — Мури.

Другой пример конформной теории с дополнительной симметрией — суперконформные теории — изучен в гл. 12. Многие объекты, возникавшие уже ранее при изучении фермионной струны, теперь получают естественную интерпретацию в рамках конформного подхода.

Следует отметить, что вычисления корреляторов в произвольной (несвободной) конформной теории (или амплитуд в теории струн, например, фермионных) — весьма сложная задача. Поэтому важным техническим шагом является обнаруженная Книжником и Фриданом, Мартиником и Шенкером возможность бозонизации фермионных струн, т. е. возможность представить корреляторы как средние от экспонент свободных бозонных полей. Такого рода подход, подробно изложенный в гл. 13 книги, приводит авторов к существенному понятию ковариантной решетки.

Следует отметить, что вся вышеизложенная идеология 10-мерной гетеротической струны легко может быть обобщена на 4-мерную струну. Единственным недостатком последней является большое количество допустимых решеток и, следовательно, невозможность и общих (кинематических) требований фиксировать теорию более или менее однозначно. Тем не менее в гл. 14 авторы излагают весьма много «экспериментального» материала о 4-мерных гетеротических струнах.

Поскольку именно последний вопрос — область научных интересов авторов, нетрудно понять, что он изложен наиболее полно и подробно. Можно сделать вывод, что своей конечной целью авторы считали введение читателя именно в последнюю проблему, потребовавшую для своего объяснения весь аппарат современной теории струн. Естественно, такой способ подачи материала не свободен от некоторых недостатков, связанных с расстановкой акцентов на современные тематики. Так, поскольку проблема описания 4-мерных гетеротических струн была актуальна два года тому назад, когда писалась данная книга, вне круга вопросов, охваченных авторами, осталось несколько более актуальных в настоящее время тем; другие же, хотя и были вскользь затронуты авторами,

не были в должной степени рассмотрены. К последним относятся многопетлевые вычисления, которым авторы посвятили гл. 6 книги. Действительно, в отличие от теории поля, в теории струн имеются серьезные надежды отсуммировать весь ряд теории возмущений, связанные с ясной геометрической трактовкой  $g$ -петлевого вклада как происходящего от двумерной римановой поверхности рода  $g$  (т. е. с  $g$ -ручками), причем мера в континуальном интеграле служит плотностью на пространстве модулей таких поверхностей.

Следует отметить, что авторы книги в последней гл. 15 коснулись еще одной важной темы — эффективной теории поля, которой описываются безмассовые возбуждения струн. Поскольку только такие возбуждения можно надеяться обнаружить экспериментально, это кажется весьма важным.

Таким образом, можно сделать вывод, что книга Люста и Тейзена — весьма полезный обзор по теории струн с точки зрения изучения множества различных моделей. Следует так же отметить как несомненное достоинство книги ряд весьма полезных приложений, содержащих сводки необходимых формул.

Книга, несомненно, будет полезна для физиков-теоретиков, в том числе не занимающихся непосредственно проблемами теории струн, для ученых, занимающихся математической физикой, а также для всех желающих получить представление о современной теории струн.

*А. Д. Миронов*

539.184.26(049.3)

### ИССЛЕДОВАНИЯ АТОМА ВОДОРОДА

The Hydrogen Atom: Proceedings of the Symposium held in Pisa, Italy, June 30—July 2, 1988/Eds. G. F. Bassani, M. Inguscio, T. W. Hansch.— Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer-Verlag, 1989.— 353 p.

История создания и развития квантовой механики и квантовой электродинамики (КЭД) тесно связана с исследованиями спектра энергии атома водорода и водородоподобных ионов. Так, одним из первых подтверждений релятивистской теории электрона Дирака явился расчет на ее основе тонкой структуры уровней энергии атома водорода, который прекрасно совпал с экспериментом. Другим впечатляющим примером может служить проверка идеи о наличии аномального магнитного момента электрона на основе исследований сверхтонкого расщепления уровней. Проведение соответствующих количественных оценок для аномального магнитного момента электрона и сдвиг Лэмба  $\delta$  ( $H$ ,  $n=2$ ), трактуемых как проявление вакуумных радиационных эффектов, способствовало развитию теории перенормировок, лежащей в основе КЭД.

В современном понимании к водородоподобным атомам следует отнести положительные ионы изоэлектронной последовательности водорода, мюоний ( $e^- \mu^+$ ), позитроний ( $e^- e^+$ ), мюонный и пионный водород ( $\mu^- p$  и  $\pi^- p$ ) и т. д. Иными словами, водородоподобные атомы — это простейшие связанные состояния двух частиц, взаимодействующих через электромагнитное поле, являющихся наиболее доступным объектом для проверки различных предсказаний КЭД.

В рецензируемый сборник вошли материалы докладов, представленных на международном симпозиуме, посвященном теоретическим и экспериментальным исследованиям водородоподобных атомов (Пиза, июнь — июль 1988 г.).