



Ш.Л.Глэшоу.
Очарование физики.
Ижевск: НИЦ «Регулярная
и хаотическая динамика»,
2002, 336 с. Перевод
с английского Н.А.Зубченко.
Тираж 1500 экз.

Физика частиц: от лоскутного одеяла к гобелену

В XX век человечество вступило, зная лишь одну элементарную частицу — электрон. Вскоре к нему добавился квант света (фотон), затем протон, в 30-е годы — нейтрон, позитрон, мезоны; было предсказано существование нейтрино. А после Второй мировой войны произошел «демографический взрыв» — массовое открытие доселе неизвестных частиц в космических лучах и на ускорителях. «Что ни сезон, то мезон», — говорил С.И.Вавилов. К концу 50-х годов частиц насчитывали уже много десятков; требовался новый Менделеев, чтобы обнаружить в них какую-то систему.

И вскоре были сформулированы две фундаментальные идеи, которые позволили это сделать. Первая заключалась в нахождении принципа, позволяющего объединять, то есть сводить к меньшему числу (в идеале к одному), известные физические взаимодействия между частицами — гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное. Отдельные силы ученые стали рассматривать как разные проявления более универсальных взаимодействий, а первый шаг в деле унификации сделал еще Джеймс Максвелл, объединивший электричество и магнетизм.

Другая идея представляла собой гипотезу о существовании частиц с дробным электрическим зарядом (их называли кварками), из которых стро-

ятся все адроны, то есть частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Тогда адроны, в том числе протоны и нейтроны, уже перестают быть точечными, бесструктурными объектами.

В обе эти концепции первостепенный вклад внес физик-теоретик из Гарвардского университета Шелдон Ли Глэшоу. В книге собраны его статьи о науке, времени и себе, написанные в разные годы. Первая часть «Жизнь физика» — о себе. Мы узнаем, что его родители эмигрировали в Америку в начале прошлого века из России (из Бобруйска), где его отец, сменив фамилию Глуховский на Глэшоу, стал преуспевающим нью-йоркским водопроводчиком. А дети уже получили хорошее образование — двое сыновей стали врачами, а младший физиком.

Шелдон родился в 1932 году в Манхэттене. Будучи школьником, пробился в финал конкурса «Поиск научных талантов», проводимого фирмой «Вестингауз». В подвале дома отец устроил для Шелли лабораторию, где тот ставил опыты на томатах — исследовал, как влияет на их рост замена в воде серы на селен. Казалось бы, у юноши склонности к химии и биологии, но пересилила физика, которой он обучался в Корнельском университете.

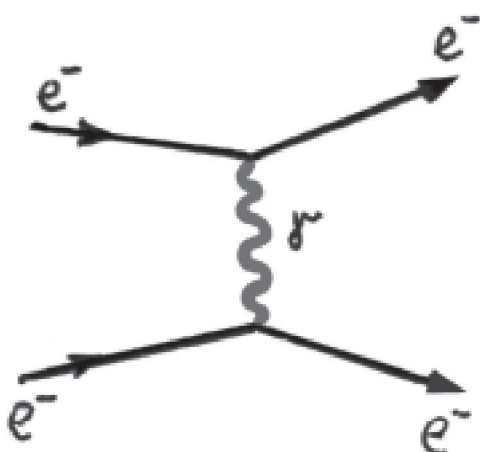
А диссертацию Глэшоу писал в Гарварде под руководством известного

теоретика, лауреата Нобелевской премии Джулиуса Швингера. (Любопытно, что нобелевский лауреат Уолтер Гилберт, разработавший методы секвенирования ДНК, был по образованию физиком и сначала занимался элементарными частицами.)

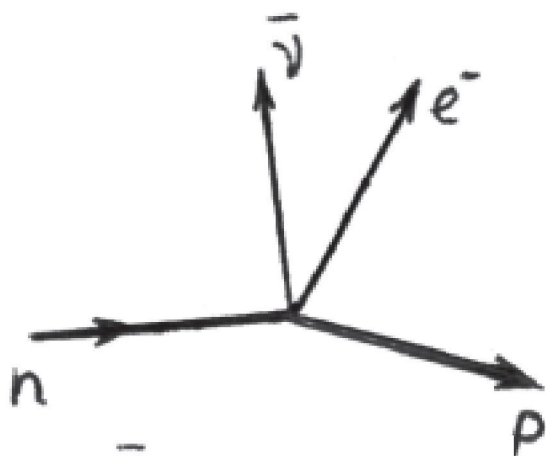
Главная заслуга Глэшоу — вклад в теорию, объединившую электромагнитные и слабые силы. Ее создали совместными усилиями, но работая независимо, Глэшоу, его бывший одноклассник Стивен Вайнберг, а также пакистанец Абдус Салам (за это достижение все трое были отмечены высшей научной наградой в 1979 году).

Электромагнитное взаимодействие всем хорошо знакомо. Оно происходит путем обмена виртуальными фотонами между несущими электрический заряд частицами (см. рисунок; подобные схемы называют диаграммами Фейнмана). Слабые силы проявляют себя не так заметно, но благодаря им происходит, например, бета-распад, когда нейтрон превращается в протон и испускаются электрон и антинейтрино. Эти силы играют важную роль в жизни звезд, в синтезе атомных ядер.

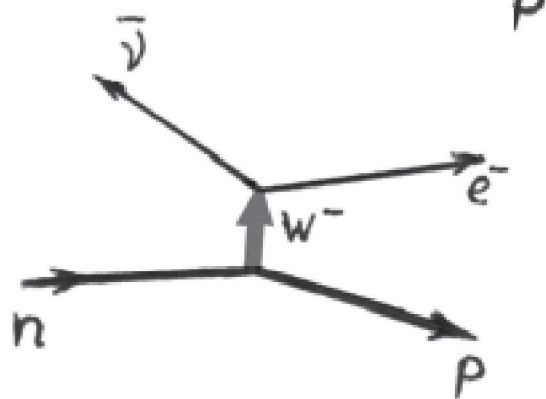
Первую теорию слабых сил предложил в 1933 году Энрико Ферми. Он полагал, что при бета-распаде нейтрон становится протоном и одновременно рождаются две частицы —



Электромагнитное взаимодействие между двумя электронами



Бета-распад по теории Ферми



Бета-распад по теории Глэшоу, Вайнберга и Салама

электрон и антинейтрино. Тут образцом для него служил атом: при его переходе с верхнего энергетического уровня на нижний излучается фотон, который изначально в атоме не содержался. По Ферми, все четыре участвующие в бета-распаде частицы взаимодействуют в одном и том же месте; графически это выглядит как четыре линии, пересекающиеся в одной точке (см. рис.).

Поскольку никаких частиц-посредников в его схеме нет, казалось бы, электромагнитные и слабые силы действуют совершенно по-разному. Но еще в 30-е годы несколько физиков высказали мысль, что могут существовать промежуточные частицы, переносящие слабое взаимодействие. Тогда, скажем, бета-распад будет выглядеть так: нейтрон превра-

щается в протон, испуская некую виртуальную частицу W (от английского «weak» — слабый), а затем W распадается на электрон и антинейтрино (см. рис.), и это уже похоже на обмен фотонами.

Первым математически строго и единообразно описал оба взаимодействия Глэшоу, но на его пути возникло серьезное препятствие: электромагнитные силы действуют на любых расстояниях (это объясняется тем, что у переносящих его виртуальных фотонов нулевая масса покоя), а слабые силы проявляют себя только на очень малых масштабах (порядка 10^{-15} см). Значит, массы их переносчиков должны быть велики, порядка ста масс протона. Как возникло такое расхождение с электромагнетизмом?

В решении этой проблемы успеха достигли Вайнберг и Салам, которые основывали свои рассуждения на эффекте спонтанного нарушения симметрии. Известно, что при фазовых переходах симметрия системы может изменяться; так, при кристаллизации жидкости она уменьшается — появляются выделенные направления. Нечто похожее, видимо, бывает и в физике частиц, где при более высоких энергиях симметрия выше, а при охлаждении она спонтанно нарушается, из-за чего переносчики слабого взаимодействия обретают большую массу. В этом процессе должны участвовать новые гипотетические частицы «хиггсы» (см. «Научный комментатор» в № 8 за 1994 год), и возникла задача их экспериментального обнаружения.

Можно сказать, что поиск хиггсов стал одним из главных стимулов для построения более мощных ускорителей. В связи с этим Глэшоу вспоминает, какие надежды физики возлагали на сверхпроводящий суперколлайдер SSC, который в конце 80-х годов начали строить в Техасе (см. «Химию и жизнь», 1991, № 4). Однако затем этот циклопический проект — длина кольца должна была составить более 80 км — отменили; к счастью, строительство других установок было продолжено.

Итак, согласно Глэшоу, Вайнбергу и Саламу, электромагнитные и слабые процессы есть разные проявления одной и той же силы. При высоких энергиях (или на малых расстояниях — менее 10^{-16} см), когда легко могут рождаться массивные частицы-переносчики, они протекают как единое взаимодействие, а при более низких энергиях — как два отдельных.

Их теория объяснила так много опытных данных и уверенность в правильности этого подхода была столь велика, что Нобелевский комитет решил наградить авторов, не дожидаясь главного подтверждения — экспериментального открытия предсказанных переносчиков. Оно пришло только четыре года спустя, в 1983 году, когда в ЦЕРНе получили эти

частицы (несущие электрические заряды W^- и W^+ , а также нейтральный Z^0), причем их массы оказались близки к расчетным.

Идею кварков выдвинули американцы Марри Гелл-Манн и Джордж Цвейг. Чтобы объяснить взаимодействие кварков между собой, был введен новый тип заряда, названный «цветом» (никакого отношения к оптике он не имеет) — им обладают и кварки, и обеспечивающие связь между ними частицы-глюоны; все они стали как бы хромофорами, поэтому теорию сильного взаимодействия нарекли квантовой хромодинамикой.

Поразительная особенность кварков заключается в том, что в свободном виде они не встречаются — только как составные части адронов (напомню, что так называют частицы, участвующие в сильном взаимодействии). Комбинируя кварки и антикварки по два и по три так, чтобы в сумме получались целочисленные электрические заряды, можно составить все имеющиеся в природе адроны. С точки зрения хромодинамики ядерные силы уже не фундаментальны — они представляют собой побочный эффект от взаимодействия между кварками в нуклонах. Химики знают похожее явление: ван-дер-ваальсовы силы между атомами тоже, в сущности, есть побочный продукт электромагнитных сил внутри них.

Вначале типов кварков было три — «верхний», «нижний» и «странный». А вот лептонов (частиц, не обладающих цветом и потому игнорирующих сильное взаимодействие) было четыре: электрон и его нейтрино, а также аналогичная электрону, но более тяжелая частица мюон и его нейтрино. Полагая, что между кварками и лептонами должна быть определенная симметрия, Глэшоу и другие теоретики предсказали существование четвертого кварка. Шелдон был настолько уверен в этом, что на ежегодной конференции в апреле 1974 года пообещал съесть свою шляпу, если до следующего такого мероприятия его не найдут. И шляпа уцелела: в ноябре того же года две группы американских экспериментаторов обнаружили частицу, несущую новый кварк, который называли «очарованным».

К настоящему времени и лептонов, и кварков стало уже по шесть. Обе шестерки разбиты на три сходные пары — как бы на три поколения, отличающиеся по массам. Именно эту великолепную дюжину рассматривают как набор истинно элементарных,

то есть не имеющих внутренней структуры, составляющих материи.

Нынешнее описание электрослабого и сильного взаимодействий составляет хорошо разработанную теоретическую схему, которую именуют «стандартной моделью». Правда, она содержит много свободных параметров, которые не выводятся «на кончике пера», а берутся из эксперимента.

Разумеется, унификация только двух из четырех сил не могла удовлетворить ученых. Вдохновленные успехом электрослабой теории, они стали пытаться охватить единым подходом и сильное взаимодействие; эту программу назвали Большим, или Великим (Grand), объединением.

Она заключается в поиске математической конструкции, которая обладала бы настолько широкой симметрией, что, во-первых, содержала бы как частные случаи более узкие симметрии, соответствующие электрослабому и сильному взаимодействиям, а во-вторых, описывала бы более общее взаимодействие, в котором на равных правах участвовали бы и кварки, и лептоны.

Симметриями в математике ведает теория групп, значит, необходимо найти достаточно общую группу, в которую можно вложить, как составные части, уже найденные. И вот в начале 70-х годов Глэшоу вместе со своим гарвардским коллегой Говардом Джорджи предложил наиболее экономную математическую реализацию Большого объединения — они рассмотрели наименьшую из групп, обладающих таким свойством (вообще же их очень много).

Их теория вводила единую суперсилу, которая действует при очень больших, можно сказать, фантастических энергиях (выше 10^{15} ГэВ), — тогда кварки и лептоны могут превращаться друг в друга. По их идее, при уменьшении энергии от исходного взаимодействия сначала отщепляется сильное, а при дальнейшем замедлении частиц (в районе 300 ГэВ) электрослабое тоже распадается на два (слабое и электромагнитное). Мы наблюдаем в природе эти отдельные силы, потому что имеем дело с достаточно холодной Вселенной.

Но если кварки способны переходить в лептоны, то нуклоны, а вместе с ними все ядра и атомы становятся в принципе неустойчивыми. Согласно простейшему варианту теории Джорджи—Глэшоу, период полураспада протонов составляет около 10^{31} лет, и тогда в течение жизни одного чело-

века в его теле с близкой к единице вероятностью распадется по крайней мере один протон, а в большой массе воды (тысячи тонн) подобных распадов должно быть несколько за месяц.

Значит, можно попытаться зарегистрировать такие события, для чего в разных странах поставили соответствующие эксперименты, однако они не дали положительного результата. То есть пока захватывающее воображение вывод о нестабильности всей материи не подтвердился — видимо, в своей исходной форме гипотеза Джорджи—Глэшоу содержит какую-то ошибку, и вот уже двадцать лет физики ищут ее, предлагая другие варианты Великого объединения. Но успеха они еще не достигли, поэтому электрослабая теория, с которой навеки связано имя Глэшоу, до сих пор остается последним крупным прорывом в деле унификации сил.

Однако в природе есть еще гравитация, и некоторые теоретики уже пытаются охватить и ее. Здесь популярна теория суперструн, в которой частицы рассматривают не как точечные сущности, а как сверхмалые петельки (струны), колеблющиеся в многомерном пространстве. Интересно сравнить взгляды на эти построения Глэшоу и нашего известного специалиста по физике высоких энергий академика Л.Б.Окуня, высказанные ими примерно в одно время.

Наш ученый пишет: «Самые активные молодые теоретики ушли в суперструны, они работают в пространствах 10, 26 и даже 506 измерений... Это не кратковременная мода... Я думаю, что мы являемся свидетелями очень важного события в истории физики, по своему значению не уступающего созданию квантовой теории поля... Когда теория будет создана, она придаст новый, более глубокий смысл таким понятиям, как пространство, время, поле».

А Глэшоу считает, что пока этот экспериментальный подход «завел целое поколение блестящих аспирантов в десятимерную трясиину невразумительной математики... Даже самые амбициозные защитники суперструн признают, что пройдут еще десятилетия, прежде чем они смогут сделать какие-либо экспериментально проверяемые предсказания».

Энергию электрослабого объединения (достаточную для рождения W - и Z -частиц) смогли достичь на ускорителе, а вот энергия Большого объединения ни на каких рукотворных установках никогда получена не будет — ведь эти вехи раз-

Из философий прошлого современной физике элементарных частиц наиболее близко учение Платона. В самом деле, эти частицы суть представления групп симметрий, и, стало быть, они аналогичны симметричным платоновым телам.

Вернер Гейзенберг.

Что такое элементарная частица? (1977)



КНИГИ

деляют десять порядков. Вообще, сейчас в физике частиц возникла ситуация, когда в большом диапазоне энергий может не быть принципиально новых явлений. «Если верить этой философии отчаяния, — пишет Глэшоу, — то нас уже не ожидают никакие сюрпризы».

Возможно, перед экспериментаторами действительно простирается пустыня, но и в этом случае прогресс физики частиц все равно не прекратится — ведь можно добывать косвенные данные, и поиск распада протона был одним из примеров таких непрямых опытов. Кроме того, часто на помощь приходят астрономия и астрофизика: те невероятно высокие энергии, которые фигурируют в теориях, но недостижимы в лаборатории, проявляли себя, согласно современным представлениям о Большом взрыве, в первые мгновения после начала расширения материи из состояния сингулярности. Последствия тех процессов отражены в структуре и свойствах наблюдаемого нами космоса, и потому вся Вселенная есть огромная экспериментальная установка.

(Эти вопросы хорошо изложены в известной популярной книге С. Вайнберга «Первые три минуты». М.: Энергоиздат, 1981, а недавно вышла книжка отечественного автора М.Ю. Хлопова «Космомикрофизика». М.: УРСС, 2003, специально посвященная взаимосвязям физики элементарных частиц и космологии.)

Как показывает история науки, познание мира идет одновременно с двух сторон — ученые как бы прокладывают туннель навстречу друг другу. С одной стороны, они добывают факты и математически описывают их, а с другой — развивают математику, исходя из ее собственной внутренней логики, а затем пытаются применить ее к описанию природы. И на данном этапе вперед может выйти именно математика, для которой нет ограничений ни по энергиям, ни по расстояниям. Не будем забывать, что самый мощный ускоритель — это голова человека и неограниченная скорость есть только у мысли.

В последние десятилетия стало ясно, что законы взаимодействия частиц, а также значения входящих в них фундаментальных числовых констант в высшей степени неординарны: ведь они обеспечили возможность сложной иерархической организации материи, приведшей к возникновению жизни и даже разума. Хочется понять, в чем причина этого, и тут широко обсуждают антропный космологический принцип (см. статью «О тайне мира — пусть хотя бы лепет...» в «Химии и жизни», 1988, № 12).

Можно предположить, что физический мир есть реализация чрезвычайно богатой по строению и внутренним взаимосвязям математической структуры, и тогда удивительная содержательность природы (вплоть до феномена сознания) есть просто отражение ее свойств. Но что эта структура собой представляет? Увидеть ее нелегко, поскольку математика сильно разрослась и разветвилась. И все же иногда удается установить единство в многообразии этой науки, что приводит к крупным достижениям, например доказательству Великой теоремы Ферма (см. «Химию и жизнь», 2001, № 7–8).

Ричард Фейнман говорил, что новое уравнение не выводят, а угадывают. Точно так же можно попытаться угадать и симметрию, отвечающую единой теории поля. Пока ее ищут ощупью, двигаясь как бы снизу: определяют группы симметрии, соответствующие отдельным типам взаимодействий, а затем пытаются вложить их в более общую. Возможно, надо пойти с другого конца и посмотреть, нет ли искомой симметрии среди тех, которые играют особую роль внутри самой математики.

В ней действительно есть объекты, занимающие выделенное, центральное положение. К ним относятся правильные многогранники, с античных времен привлекавшие пристальное внимание ученых. Среди них наиболее сложен и интересен икосаэдр, и знаменитый немецкий математик Феликс Клейн посвятил ему специальную книгу. Так вот, он пишет, что

в икосаэдре сходятся, переплетаются многие ветви математики, то есть характеризующая эту фигуру симметрия имеет в ней глубокие корни. Поэтому можно думать, что именно с икосаэдром окажется как-то связанным математический аппарат будущей теории поля.

(Как известно, группа вращений икосаэдра изоморфна, то есть фактически совпадает с группой четных перестановок пяти элементов. Свойство четности означает, что при перестановке двух элементов изменяется знак определенной функции, и именно так — знакопеременно — ведет себя квантово-механическая волновая функция, описывающая частицы-фермионы. Получается, что симметрия икосаэдра сразу приводит к базовой пятёрке фермионов, наличие которой, исходя из совсем других соображений, постулируют в своей модели Великого объединения Джорджи и Глэшоу.)

В нобелевской лекции Глэшоу сказал, что «в 1956 году, когда он делал свои первые шаги в науке, теория элементарных частиц напоминала лоскутное одеяло... С тех пор многое изменилось — мы располагаем теорией, которая представляет собой цельное произведение искусства: лоскутное одеяло превращается в гобелен». Теперь ученые убедились, что создание гобелена идет тяжело — нитки рвутся и спутываются. И все же контуры общей картины уже проступают.

Наука XX века, открыв целый мир частиц и в большой степени наведя в нем порядок, оставила нынешним поколениям исследователей самое интересное — сделать заключительный шаг и понять, какая математическая структура лежит в его основе. Как говорит Глэшоу, «приблизиться к единому и истинному синтезу». Или, по выражению Окуня, отыскать «магический желудь, таящий в себе все древо физики».

Л.И.Верховский