



Юрий Курочкин

заведующий лабораторией теоретической физики Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
доктор физико-математических наук

Передовая фундаментальной науки

Современную физику элементарных частиц можно рассматривать как естественное развитие идей атомизма древнегреческих философов Демокрита, Левкиппа, древнеримского поэта и философа Лукреция Кара. Люди хотели объяснить многообразие наблюдаемых в природе объектов и явлений сравнительно небольшим количеством сущностей.

Теория корпускулярного строения материи (вещества) наряду с концепцией непрерывных первооснов всего сущего красной нитью проходит через учения философов, натурфилософов, физиков и математиков. Великого И. Ньютона, заложившего основы целостной научной (механистической) картины мира своими трудами по механике, оптике, другим разделам физики, которая достигла вершины развития в «Небесной механике» П.-С. Лапласа, принято рассматривать как сторонника корпускулярной концепции в отличие от голландца Х. Гюйгенса, часто представляемого в истории науки приверженцем волновой природы света. Наблюдаемое прямолинейное его распространение наиболее естественно объяснялось как движение частиц по инерции в соответствии с первым законом Ньютона. При этом частицы света для

своего распространения не требовали специальной среды в постулированном Ньютоном абсолютном пространстве, в то время как волны, по представлениям того времени, предполагали наличие эфира. Ученый отдавал себе отчет в том, что ряд явлений оптики, им же открытых, не могут быть объяснены только корпускулярной природой света. «Неизмышляющий гипотез» Ньютон предоставил потомкам окончательно разбираться, в чем здесь дело.

Гениальные догадки М. Ломоносова и А. Лавуазье о роли корпускулярного строения вещества в некоторых химических превращениях и в понимании природы теплоты трудами Дж. К. Максвелла, Л. Больцмана и др. в XIX в. получили свое математическое воплощение. Заложена их работами классическая статистическая физика (молекулярно-

кинетическая теория), являющаяся основой любых микроскопических теорий, последовательно была развита и построена американским ученым Дж.В. Гиббсом.

На протяжении столетий концепции дискретного и непрерывного в своем диалектическом единстве и борьбе существовали, развивались, и одним из результатов этого явилась физика элементарных частиц, или физика высоких энергий. Началом ее современного этапа естественно считать открытие в конце XIX в. первой элементарной частицы — электрона. Параллельно с экспериментальными работами Дж.Дж. Томсона голландский физик Г.А. Лоренц развивал теорию электромагнетизма, построенную Дж.К. Максвеллом. Выдающийся современный российский физик и математик академик Л.Д. Фад-



деев назвал ее основой научно-технического прогресса, окупающей все последующие фундаментальные исследования. В соответствии с духом идей молекулярно-кинетической теории Лоренц дополнил учение Максвелла гипотезой о существовании атомов электричества (носителей электрического заряда) — электронов. Сделано это было независимо от экспериментов Дж.Дж. Томсона. Теория, созданная Г.А. Лоренцем, объясняющая многие электромагнитные, оптические и теп-



ловые свойства вещества, получила название электронной. Она породила проблемы, приведшие к созданию специальной теории относительности (СТО), где механический принцип относительности (принцип Галилея) был обобщен на все физические процессы, а не только на механическое движение и стал звучать так: физические явления в инерциальных системах отсчета при одинаковых начальных условиях протекают одинаково.

Кроме того, потребовалось сформулировать еще один постулат, а именно: скорость света (скорость распространения электромагнитных волн) в вакууме не зависит от скорости источника и направления распространения.

В СТО совершенно по-новому устанавливаются отношения пространства и времени при описании физических систем, движущихся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Данные понятия естественным образом объединяются в четырехмерное пространство-время. Действительно, положение материальной точки при ее движении задается тремя координатами, к примеру, в декартовой системе, связанной с некоторой инерциальной системой отсчета и моментом времени, в которой данные координаты определены. В принципе, то же можно сказать и о материальной точке в механике Ньютона. Однако в ней отсутствует универсальная физическая константа — скорость распространения электромагнитных сигналов (в частности, скорость света) в вакууме c . Благодаря ей можно ввести четвертую координату $x_0 = ct$, которая имеет размерность длины, как и три остальные в системе единиц, например СИ. В этом смысле пространство и время в СТО становятся равноправными.

Теория электромагнетизма послужила источником выводов о существовании следующей элементарной частицы —

фотона, понятие о котором возникло в работах Альберта Эйнштейна, предложившего рассматривать свет как совокупность квантов — частиц, несущих определенную энергию. Им были введены понятия спонтанного и вынужденного излучения света атомами. Последнее явилось основополагающим для создания квантовых генераторов электромагнитного излучения в оптическом (лазер), микроволновом и рентгеновском диапазонах. На основе представления о фотонах ученый также объяснил явление фотоэффекта и ряд других явлений (Нобелевская премия 1922 г.).

Научное сообщество начинало усваивать урок — электромагнитное излучение, в том числе и свет, может быть как волнами, что следовало из уравнений Максвелла, так и частицами. Человечество активно осваивало полезные свойства электромагнитных волн, создавало радиоустройства, но пока еще не дошло до фотоэлементов, электронных ламп и лазеров.

Открытая в 1896 г. А. Беккерелем естественная радиоактивность детально и всесторонне исследовалась его соотечественниками — П. Кюри и М. Складовской-Кюри. Однако если их работы были связаны главным образом с открытиями новых радиоактивных элементов и разработкой методов изучения радиоактивности, то исследование радиоактивности британцем Э. Резерфордом и его учениками положили начало ядерной физике. На протяжении почти полувека физика элементарных частиц рассматривалась как составная часть ядерной физики. Резерфорд поместил распадающийся радиоактивный элемент в магнитное поле и доказал, что лучи радиации при этом расщепляются на три составляющие. Две из них отклоняются в противоположные по отношению друг к другу стороны, а одна не отклоняется вовсе.

Первая представляла собой поток легких частиц — электронов, вторая — тяжелых — полностью ионизированных атомов гелия, или α -частиц. Неотклоняющийся луч оказался потоком γ -квантов (фотонов высокой частоты). Данный классический опыт приводят как пример одновременного проявления трех сил природы (фундаментальных взаимодействий) — сильного, слабого и электромагнитного.

Сотрудники Резерфорда сумели выделить поток α -частиц и использовать его как луч, зондирующий вещество. При облучении ими тонких пленок вещества Резерфорд обнаружил в веществе очень плотные, малых размеров положительно заряженные образования. На основе результатов данных опытов было установлено существование ядер и предложена модель строения атома, которая получила название планетарной: атомы состоят из ядер и электронов, вращающихся вокруг них подобно тому, как планеты вращаются вокруг Солнца. Противоречия модели с теорией излучения классической электродинамики Максвелла — Лоренца привели к созданию первой квантовой теории атома — теории Бора (1913 г.). Однако, явившись значительным шагом на пути развития представлений о механизме излучения атомами, она не смогла устранить возникающих противоречий. Это было сделано в рамках квантовой механики. Австрийский ученый Э. Шредингер (1926 г.), опираясь на идеи французского ученого Луи де Бройля (1924 г.), сформулировал уравнение, играющее роль, подобную той, что играет второй закон Ньютона в классической механике. Идеи де Бройля были необыкновенно революционными: согласно его гипотезе, всем материальным частицам приписывались волновые свойства, что получило блестящее экспериментальное подтверждение как в том, что выведенная из уравнения Шредингера самим авто-

ром формула для спектров излучения водородоподобных атомов совпала с формулой Нильса Бора, так и в опытах по непосредственной проверке волновых свойств электронов. Впоследствии были созданы электронные микроскопы, основанные на волновых свойствах электронов, позволившие впервые разглядеть атомы и молекулы.

Появившаяся благодаря трудам Н. Бора, Луи де Бройля, Э. Шредингера, В. Гейзенберга, М. Борна, В. Паули, П.А. Дирака и других ученых квантовая механика делает первые успешные шаги в описании спектров атомов, объясняет α -распад ядер как квантово-механическое явление в ядерной физике. Возникающие новые вопросы стимулируют развитие теории. Удачно стартовавшая квантовая механика должна быть справедлива во всех инерциальных системах отсчета, подчиняться постулатам СТО. Это означало, что ее уравнения должны сохранять форму при преобразованиях Лоренца, составляющих математическую основу специальной теории относительности.

Следующий шаг совершил британский ученый П.А.М. Дирак. Занимаясь квантовой механикой и внося значительный вклад в ее развитие, он постоянно имел в виду, что формулы данной теории должны подчиняться требованиям теории относительности.

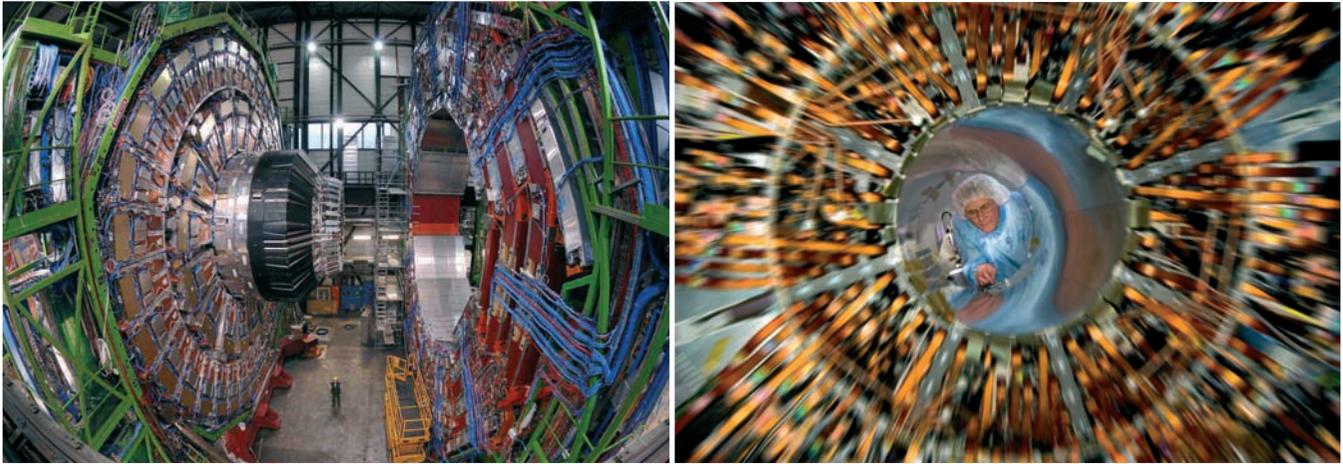
Установленное Дираком уравнение, носящее его имя и являющееся результатом усилий по синтезу двух величайших теорий XX в. — квантовой механики и СТО, оказалось на удивление удачным. Ученый не ставил задачу сформулировать уравнение, описывающее частицы со спином $\frac{1}{2}$, но его открытие обладало и этой особенностью. Все трудности, возникавшие при интерпретации полученных решений, обернулись триумфом квантовой теории и новыми открытиями в области физики частиц. Удивительно точное и всеобъемлющее описание свойств электрона, этого важнейшего зонда структуры физической материи, и предсказание абсолютно нового природного явления — существования античастиц (позитрона) — вот первые впечатляющие результаты.

ATLAS

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) — установка, предназначенная для изучения широкого спектра явлений, созданная по классической схеме: компактный внутренний детектор, в котором отслеживаются траектории частиц, за ним следуют калориметры, измеряющие их энергию, а снаружи расположены мюонные детекторы. Одна из самых впечатляющих характеристик ATLAS — это огромный, даже по современным меркам, размер: длина — 43 м, диаметр — 22 м, масса — 7 тыс. т.

CMS

CMS (Compact Muon Solenoid — компактный мюонный соленоид) — детектор, предназначенный для решения тех же научных задач, что и ATLAS, однако для этого используются иные технические подходы и дизайн магнитной системы. Установка построена вокруг массивного соленоидального магнита, имеющего форму цилиндрической катушки из сверхпроводящего кабеля, генерирующего поле напряженностью 4 Тл. Оно ограничивается стальным «хомутом», который создает основную массу детектора. На первый взгляд слово «компактный» здесь может показаться неуместным, но оно подчеркивает, что установка заметно меньше сестринского эксперимента ATLAS: длина — 20 м, диаметр — 15 м, масса — 15 тыс. т.



Безмассовое уравнение Дирака прекрасно описывает самую загадочную элементарную частицу — нейтрино, а также кварки — частицы-кирпичики мироздания.

Параллельно достижениям теории, которые не укладываются ни в какие привычные представления, и часто независимо от новых концепций экспериментаторы, в особенности школы Э. Резерфорда, получают новые результаты, раскрывающие тайны строения материального мира. Так, в 1925 г. была обнаружена третья элементарная частица — протон. Существование ядра атома водорода — положительно заряженной частицы с зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона, предсказал сам Э. Резерфорд. Следующие элементарные частицы экспериментально были открыты уже только в 1932 г.

В этом году, богатом на достижения в различных областях физики, была экспериментально открыта первая античастица — позитрон, существование которой следовало из уравнения Дирака, а также нейтрон, сыгравший драматическую роль в судьбах человечества. Именно нейтрон образуется при делении радиоактивного элемента,

например ^{235}U (уран-235), вызывая цепную реакцию, протекающую в атомных бомбах и реакторах. Подобно рентгеновским лучам, потоки нейтронов благодаря их волновым свойствам, а также электронейтральности эффективны в процессах исследования структуры вещества. Данное открытие позволило установить структуру атомных ядер как образований из нейтронов и протонов.

Казалось бы, сбылась мечта древних философов: вырисовывается стройная, простая и понятная картина мира. Однако забрезжившая было ясность сменилась новыми вопросами, связанными с необходимостью объяснения существования вновь открываемых частиц, которых обнаруживалось все больше. Методом борьбы с возникшими проблемами становятся принципы симметрии.

Ход развития СТО и квантовой теории показал определяющую роль симметрии в физике, чему особенно способствовали работы американского ученого венгерского происхождения Ю. Вигнера. Соображения симметрии позволили сформулировать уравнения Янга — Миллса, похожие на уравнения электромагнитной теории Максвелла, но, в отличие от последних, нелинейные. Уравне-

ния Дирака, Клейна — Фока — Гордона, Максвелла и Янга — Миллса позволили сформулировать то, что принято называть Стандартной моделью частиц и их взаимодействий. На сегодняшний день она является основой современных представлений о глубинном строении материи — физики элементарных частиц и высоких энергий. Стандартная модель частиц и их взаимодействий, основываясь на концепции локальной калибровочной симметрии, решает проблему объединения трех видов фундаментальных взаимодействий (электромагнитного, слабого и сильного), а также классификации частиц, разделяя их на элементарные — лептоны и кварки — и ответственные за взаимодействия между ними — фотоны и калибровочные бозоны. В ней заложен механизм возникновения массы элементарных частиц благодаря спонтанному нарушению калибровочной симметрии, предложенный Хиггсом. Открытие Хиггсовского бозона, ответственного за данный механизм, будет очередным триумфом Стандартной модели. Поэтому важнейшей в программах физических исследований на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН будет задача обнаружения бозона Хиггса. Беларусь является страной — участницей двух крупнейших международных проектов, а именно

ATLAS и CMS, в которых ведется поиск бозона Хиггса.

Однако даже в случае открытия бозона Хиггса и триумфа Стандартной модели останутся проблемы описания в ее рамках сложных неточечных частиц (таких как, например, нейтрон и протон), получения эффективных потенциалов, ответственных за образование и существование частиц, состоящих из кварков. С этим тесно связана фундаментальная проблема — невылетание (конфайнмент) кварков и существование кварк-глюонной плазмы. Актуальными остаются проблемы включения в общую схему объединения взаимодействий гравитации, объяснения квантованности электрического заряда и ряд других. Пока не выяснена природа нарушения таких дискретных симметрий, как СР-инвариантности теории (комбинированной четности) или ее Т-инвариантности (инвариантности теории относительно обращения времени). Следует также отметить проблему дополнительных измерений сверх четырех измерений физического пространства-времени. Это только некоторые, но далеко не все вопросы современной физики элементарных частиц.

К ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ В БЕЛАРУСИ

Первые научные исследования в области физики элементарных частиц в Беларуси осуществлены академиком Ф.И. Федоровым, основателем отечественной научной школы теоретической физики.

Ученый применил развитый его учителем В.А. Фоком метод функционалов к решению актуальной задачи квантовой электродинамики, рассчитал естественные ширины спектральных линий атомов и поперечное сечение камптовского рассеяния гамма-кванта

на электроны. Результаты исследований легли в основу его кандидатской диссертации «О применении метода функционалов к некоторым проблемам теории излучения» (1936 г.).

Широко известны его труды в области теоретической оптики (уравнения связи Друде — Борна — Федорова в классической электродинамике, федоровский сдвиг луча света при отражении электромагнитных волн от плоской границы раздела сред с определенными свойствами), акустики, физики частиц и гравитации.

Основные идеи ковариантного (независимого от выбора инерциальной системы отсчета) подхода Федорова в физике элементарных частиц изложены в известной его монографии «Группа Лоренца». Связь подхода Федорова к параметризации группы Лоренца и ее представлений с классическим кватернионным исчислением и новый метод к релятивистской кинематике столкновений частиц и релятивистской динамике изложены в книге А.В. Березина, Ю.А. Курочкина, Е.А. Толкачева «Кватернионы в релятивистской физике».

Много известных специалистов в области частиц и теории гравитации вышли из научной школы Ф.И. Федорова. Вот неко-

торые из них: А.А. Богуш, Л.М. Томильчик, Л.Г. Мороз, И.С. Сацункевич, А.В. Минкевич, Е.А. Толкачев, Ю.А. Курочкин, Е.В. Докторов, М.И. Левчук, В.И. Кувшинов, Л.Ф. Бабичев, М.В. Галынский, Р.Г. Шуляковский, А.К. Горбацевич и др.

В Беларуси, как и в большинстве других стран, нет возможностей создания приборной базы для проведения актуальных экспериментов в области частиц. Данные обстоятельства обуславливают необходимость широкого сотрудничества наших ученых с зарубежными коллегами, участия в крупных международных проектах, таких как ATLAS и SMS на БАК в ЦЕРН.

Исследования в области физики частиц в республике проводятся в рамках ГНФИ «Поля и частицы» 2006—2010 гг. в ряде институтов НАН Беларуси: в лаборатории теоретической физики (заведующий — доктор физико-математических наук Ю.А. Курочкин) Института физики им. Б.И. Степанова, Объединенном институте энергетических и ядерных исследований — Сосны, Научно-исследовательском институте ядерных проблем БГУ, Национальном научно-учебном центре физики частиц и высоких энергий БГУ, на кафедрах в университетах Минска, Гомеля, Бреста.

