



ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Ю. В. НОВОЖИЛОВ

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ
КВАНТОВОЙ
ТЕОРИИ ПОЛЯ



1955

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Кандидат физико-математических наук
Ю. В. НОВОЖИЛОВ

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

ЛЕНИНГРАД

1955

Брошюра рассчитана на широкие круги советской интеллигенции, интересующиеся проблемами современной физики: инженеров, преподавателей физико-математических дисциплин, научных работников, студентов и т. д., а также школьников 10 класса.

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Квантовая теория поля — это современная теория элементарных частиц, из которых, как мы считаем сейчас, состоит вещество. Поэтому проблемы квантовой теории поля являются вместе с тем проблемами строения вещества.

Строение вещества издавна интересовало ученых. Вопрос о том, существуют ли мельчайшие неделимые частицы вещества, интересовал еще древних греков. Но, конечно, в те времена знания о природе были недостаточны для построения научной теории; проблема строения вещества представляла собой тогда предмет размышлений, а не исследований. Первой ступенью на пути познания тайн строения вещества была молекулярная теория Ломоносова. На этой ступени изучения вещества элементарными частицами считались молекулы, поскольку при всех известных тогда взаимодействиях молекулы вели себя как единое целое.

Дальнейшие исследования показали, однако, что молекулы ведут себя как единое целое не во всех случаях. Если внешнее воздействие на молекулу достаточно велико, то может произойти распад ее. Оказалось, что молекула — сложная частица, состоящая из атомов. Во всех известных в это время явлениях атомы были неделимыми. В связи с этим элементарными частицами стали считать атомы.

Мы знаем, что свойства атомов определяют свойства химических элементов. Поэтому на этой ступени развития науки — в XVIII—XIX вв. — теорией элементарных частиц была химия. Она описывала, как ведут себя атомы при взаимодействии, какие соединения возможны из атомов

данных веществ; исследовала закономерности свойств атомов и установила, какими величинами нужно характеризовать атом.

Выдающимся достижением химии того времени стала периодическая система Д. И. Менделеева, свидетельствовавшая о существовании глубокого внутреннего единства в закономерностях атомных свойств. Но химия, детально описывая химические свойства атомов, не могла ответить на вопрос, почему атомы обладают такими свойствами, сколько видов атомов существует в природе, какова внутренняя связь между ними. Установив периодичность свойств химических элементов, химия не могла ее объяснить.

Развитие физики в начале XX в. показало, что атомы не есть элементарные частицы. Поэтому следующей ступенью в изучении строения вещества была атомная теория, создание которой связано с именами датского ученого Бора и англичанина Розерфорда. Оказалось, что атом представляет собой сложную систему, состоящую из атомного ядра и движущихся вокруг ядра электронов. Выяснилось, в частности, что периодические свойства химических элементов тесно связаны со строением атома — с количеством электронов в атоме. Элементарными частицами стали называть электроны и протоны — ядра атома водорода.

В 1932 г. была открыта новая частица — нейтрон. Сразу же советский ученый Д. Д. Иваненко и, независимо от него, немецкий ученый Гейзенберг выдвинули гипотезу, что атомные ядра состоят из нейтронов и протонов. Опыты подтвердили эту гипотезу. Вместо атомов титул «элементарная частица» стал применяться к электронам, протонам и нейтронам.

Кроме того, была известна еще одна элементарная частица — фотон. Фотоны — это кванты света («порции» света). Фотоны испускаются или поглощаются атомами и ядрами при изменении состояния (т. е. если изменяется движение частиц в атоме или ядре). После открытия нейтрона некоторые ученые надеялись, что наконец достигнута полная ясность в строении вещества. Все вещество представлялось состоящим из атомов, построенных из нейтронов, протонов и электронов. Но эти надежды были развеяны в следующем же году, когда был открыт позитрон. Любопытно отметить, что существование позитрона — частицы, отличающейся от электрона знаком заря-

да, — непосредственно вытекало из квантовой теории электрона.

Важнейшим обстоятельством, связанным с открытием позитрона, было открытие превращаемости электрона и позитрона. Оказалось, что в известных условиях электрон, который считался ранее неизменной и неразрушимой частицей, вместе с позитроном могут превратиться в фотоны, и, наоборот, фотон при взаимодействии с атомным ядром может превратиться в пару позитрон—электрон.

Некоторые элементарные частицы были предсказаны теорией. Опыты по так называемому бета-распаду ядер привели к гипотезе о существовании еще одной элементарной частицы — нейтрино, что увеличило число элементарных частиц до шести. Развитие физики атомного ядра выдвинуло проблему о ядерных силах, т. е. силах, действующих между частицами в ядре. Пытаясь объяснить характерную особенность этих сил — их большую величину при малом радиусе действия, — японский ученый Юкава в 1935 г. предположил, что существует еще один тип элементарных частиц — мезоны — с массой, в 200—300 раз большей, чем масса электрона. Мезоны с такими свойствами были в конце концов найдены в 1947 г. Они называются π -мезонами.

В предвоенные, и особенно в послевоенные, годы происходило исключительно быстрое развитие физики элементарных частиц; она росла вместе с ядерной физикой и физикой космических лучей.

Быстрому развитию физики элементарных частиц и квантовой теории поля способствовало важное практическое значение ядерной физики, благодаря чему техника эксперимента в физике элементарных частиц возросла в значительно большей степени, чем в какой-либо другой отрасли физики, и в этой области сосредоточились большие научные силы.

Для исследования элементарных частиц сейчас используются ускорители (синхроциклотроны), мощность которых возрастает с каждым годом. В ускорителях можно создавать искусственно некоторые элементарные частицы. Кроме того, используется также точная радиоволновая техника. Очень много данных доставляет нам изучение космических лучей.

Благодаря усовершенствованию экспериментальной техники в последние годы сделано немало важнейших открытий. Стало уже обычным, что почти каждый год обна-

руживаются новые частицы. Число известных элементарных частиц уже превышает 20, и трудно сказать, сколько еще таких частиц существует.

Все известные в настоящее время частицы перечислены в табл. 1. Сейчас достоверно установлено, что не только электрон, позитрон и фотон могут испытывать превращения, но и любая элементарная частица не является неизменной. Взаимопревращаемость можно считать свойством элементарных частиц.

Элементарные

№ п/п.	Название	Символ	Масса	Электр. заряд
1	Фотон	γ	0	0
2	Нейтрино	ν	0	0
3	Гравитон	G	0	0
4	Электрон	e	1	—
5	Позитрон	p	1	+
<i>L</i> -мезоны				
6	Положительный μ -мезон	μ^+	210	+
7	Отрицательный μ -мезон	μ^-	210	—
8	Нейтральный π -мезон	π^0	265	0
9	Отрицательный π -мезон	π^+	276	—
10	Положительный π -мезон	π^-	276	+
<i>K</i> -мезоны				
11	ζ -мезоны	ζ^\pm	550	\pm
12	κ -мезоны	κ^\pm	915	\pm
13	Заряженные τ -мезоны	τ^\pm	965	\pm
14	Нейтральный τ -мезон	τ^0	965	0
15	χ -мезоны	χ^\pm	950—980	\pm
16	θ^2 -мезон	θ^0	1 000	0
17	Протон	P	1 836	+
18	Нейтрон	N	1 838.5	0
Гипероны				
19	Нейтральный гиперон	Λ	2 190	0
20	Положительный гиперон . . .	Υ^+	2 200	+
21	Отрицательный гиперон . . .	Υ^-	2 600	—

Таблица составлена по данным, известным к январю 1955 г.

Таким образом, понятие «элементарная частица» теперь имеет иной смысл, чем лет 25 назад. Разнообразие элементарных частиц, взаимопревращаемость и возможная сложность некоторых из них ныне очевидны для любого физика. Развитие физики элементарных частиц полностью подтвердило положение о неисчерпаемости электрона, высказанное В. И. Лениным еще в 1909 г. в связи с кризисом в физике.

Элементарные частицы характеризуются следующими

Таблица 1

частицы

Спин	Время жизни (в секундах)	Схема распада
1	∞	
$1/2$	∞	
2	∞	
$1/2$	∞	
$1/2$	∞	
$1/2$	2.1×10^{-6}	$\mu^+ \rightarrow p + 2\nu$
$1/2$	2.1×10^{-6}	$\mu^- \rightarrow e + 2\nu$
0	10^{-14}	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
0	2.6×10^{-8}	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$
0	2.6×10^{-8}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
?	10^{-14}	$\rho \rightarrow \pi^+ + ?$
?	?	$\omega \rightarrow \mu + \nu (?)$
?	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	$\tau \rightarrow 3\pi$
?	?	$\tau^0 \rightarrow 3\pi$
?	10^{-9}	$\chi^\pm \rightarrow \mu^\pm + 2 \text{ нейтральных частицы}$
?	10^{-10}	$\theta^0 \rightarrow \pi^+ + L^\pm$
$1/2$	768	$N \rightarrow P + e + \nu$
	3×10^{-10}	$\Lambda \rightarrow P + \pi^-$
	10^{-9}	$Y^+ \rightarrow P + \pi^0$
	?	$Y^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$

основными величинами: массой покоя, т. е. той массой, которой обладают частицы в состоянии покоя, — электрическим зарядом и спином. Спин — это особое свойство элементарной частицы: собственный момент количества движения частицы. Можно сказать, что частица, обладающая спином, ведет себя как волчок. Кроме того, со спином связывается также и собственный магнитный момент частицы, т. е. то, что она ведет себя как магнит. Спин частицы может быть равен только целому или полуцелому числу постоянных Планка (о постоянной Планка мы скажем ниже, на стр. 19). В таблице элементарных частиц спины всех частиц даны в единицах постоянной Планка. Массы покоя частиц даны в единицах массы покоя электрона. Заряды элементарных частиц могут быть только равны и противоположны по знаку заряда электрона. Вопросительные знаки в таблице означают, что эти свойства еще неизвестны. В предпоследнем столбце табл. 1 приведено время жизни частицы по отношению к ее распаду на частицы меньшей массы. С этой точки зрения некоторые частицы устойчивы (время жизни бесконечно велико). Схема распада частицы приведена в последнем столбце.

Элементарные частицы приведены в таблице в порядке возрастания их массы покоя. Все частицы с массами, превышающими массу электрона, но меньшими массы протона, называются мезонами. Мезоны подразделяются на две группы: *L*-мезоны и *K*-мезоны.

L-мезоны — это легкие мезоны; к ним принадлежат μ -мезоны и π -мезоны. Существование *L*-мезонов твердо установлено, и их свойства довольно хорошо изучены (конечно, по сравнению со свойствами других мезонов); π -мезоны можно сравнительно легко производить искусственным образом в ускорителях элементарных частиц (синхроциклотронах). К *K*-мезонам относятся мезоны, масса которых превышает массу π -мезонов, но меньше массы протона. Среди *K*-мезонов лучше всего установлено существование заряженных τ -мезонов, из которых положительный τ -мезон наблюдается часто. В опытах наблюдается и нейтральный τ -мезон.

Элементарные частицы с массой, превышающей массу нейтрона, именуют гиперонами. Иногда их называют тяжелыми мезонами. Пока установлено существование заряженных гиперонов, обладающих примерно одинаковой массой, а также существование очень тяжелого нейтрального гиперона.

Возможно, что не все из частиц, перечисленных в таблице, элементарны, и будущие опыты могут даже уменьшить их число. Однако у нас пока нет опытных фактов,ставляющих сомневаться в элементарности частиц табл. I, за исключением, быть может, гиперонов. К этой таблице мы вернемся позже с позиции квантовой теории поля.

В теории элементарных частиц — квантовой теории поля — за последние годы (начиная с 1947) также достигнуты большие успехи. Но квантовая теория поля не может сейчас дать ответ на вопрос — сколько элементарных частиц должно быть и почему существуют именно такие частицы, а не другие. В современной квантовой теории поля предполагается, что свойства частицы (масса, спин, заряд) заданы, — известны из опыта. Эта теория устанавливает законы движения для частиц и изучает их взаимодействие. От современной квантовой теории поля требуются ответы на вопросы о законах, управляющих столкновением частиц, их превращением, о возможном состоянии систем элементарных частиц. И даже на такие, более простые вопросы квантовая теория поля не всегда может дать ответ. Однако исключительные успехи ее в объяснении разнообразных опытов не допускают сомнения в том, что основные идеи квантовой теории поля верны и что, опираясь на результаты современной теории, можно будет сделать следующий шаг и построить теорию, объясняющую число и характерные свойства элементарных частиц — их массу, заряд и т. д.

Развитие квантовой теории поля не только обогащает наши представления о строении вещества, о «природе вещей», — оно важно и с практической точки зрения. Среди других задач квантовая теория поля, в частности, должна решить задачу о ядерных силах, т. е. силах, действующих внутри атомного ядра.

Квантовая теория поля — важнейший раздел современной физики. Физика элементарных частиц — это как бы передний край фронта физики. Именно здесь ожидаются открытия принципиального характера.

КЛАССИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Вся современная физика подразделяется на две части — классическую и квантовую. Классическая рассматривает движение массивных тел, квантовая — изучает

строение атомов и молекул и движение элементарных частиц. Квантовая физика — это физика явлений микро-масштаба. Квантовые законы резко отличаются от законов классической физики и переходят в них только в случае явлений большого масштаба.

Квантовая теория поля опирается на классическую теорию поля и квантовую механику и получается перенесением квантовых законов в теорию поля. Поэтому изложение основных идей квантовой теории поля нам придется начать с рассказа о классических полях и квантовой механике.

Что же представляет собой классическое поле? Прежде всего, заметим, что слово «поле» употребляется в физике в различном смысле. Говорят, например, о поле скоростей жидкости, о температурном поле и т. д. Представление о таких полях было введено для удобства рассмотрения других явлений, и поэтому подобные поля можно было бы назвать «математическими», чтобы отличать их от физических полей, которые представляют собой особый вид материи. Мы будем в дальнейшем рассматривать только физические поля. Отметим, кроме того, что физические поля существуют и в вакууме (отсутствие вещества), в то время как бессмысленно говорить о «математических» полях в вакууме.

Представление о поле было введено в физике для описания взаимодействия между частицами. Первоначально считалось, что описание взаимодействия с помощью поля — лишь один из способов описания и эквивалентно другому способу, основанному на предположении о возможности мгновенных действий на расстоянии.

С точки зрения существования поля взаимодействие между частицами описывается следующим образом. Присутствие частицы вызывает в окружающем пространстве изменения, обнаруживаемые посредством сил, которые будут действовать на другое тело, внесенное в это пространство. Говорят, что частица создает поле; наличие поля проявляется в силах, действующих на другие частицы.

Примерами классических полей служит электромагнитное поле и поле тяготения.

Поле тяготения создается любыми телами и действует на любые тела. Для поля тяготения характерно, что в нем все тела движутся одинаково. Если мы бросим с некоторой высоты пяточок и двухпудовую гирию, то, несмотря на разницу в массах, оба тела будут падать с одинаковым

ускорением (если, конечно, не принимать во внимание сопротивление воздуха).

Поле тяготения тем больше, чем больше масса тела. Даже тело весом в несколько тонн создает поле практически ничтожное, так что его можно не учитывать. Поле тяготения значительно только для масс астрономических масштабов. Именно поэтому нам кажется, что между телами на Земле не действует сила тяготения и они притягиваются только к Земле. Физика элементарных частиц имеет дело с ничтожными массами, а потому в квантовой теории поля не учитывается влияние поля тяготения на движение частиц.

Для квантовой теории поля весьма важное значение имеет изучение классического электромагнитного поля. Электромагнитное поле создается только телами, обладающими электрическими зарядами и движением электрических зарядов в телах — электрическими токами. Если в свободное пространство мы внесем заряженное тело (или провод с током), то в окружающем пространстве произойдут изменения, которые, как и в случае поля тяготения, можно обнаружить, если поместить другое заряженное тело (или провод с током). Таким образом, область действия зарядов и токов определяется тем пространством, где существует электрическое поле. Электромагнитное поле есть причина действия силы на заряженное тело или электрический ток.

Электромагнитное поле в какой-либо точке пространства описывается с помощью напряженностей полей — напряженности электрического и напряженности магнитного поля.

Смысл этих величин может быть понят на простейшем примере: если заряды покоятся, то сила, действующая между ними, определяется только напряженностью электрического поля и пропорциональна ей; магнитное же поле, характеризующееся только напряженностью магнитного поля, создается постоянными магнитами и постоянными электрическими токами. Весьма важен закон электромагнитной индукции, согласно которому изменение магнитного поля создает электрическое поле. Поэтому состояние меняющегося электромагнитного поля нужно характеризовать обеими напряженностями. Знать электромагнитное поле — это значит знать численные величины напряженностей магнитного и электрического полей и их направления в каждой точке пространства.

Считая, что все действия передаются посредством поля, мы тем самым признаем, что в природе существует только «принцип близкодействия», и отвергаем так называемый «принцип дальнодействия», или «действия на расстоянии». Согласно принципу дальнодействия, считалось возможным, что какое-либо тело или событие в одной точке пространства тотчас же действовало на тело или событие другой точки пространства, минуя промежуточные области. Заметим, что согласно такой точке зрения нужно было бы исследовать большие пространства, чтобы быть уверенным в отсутствии причин, могущих заметно воздействовать на изучаемое явление.

Согласно же принципу близкодействия, т. е. с точки зрения существования поля, все события в каком-либо определенном месте и в определенный момент вполне определяются тем, что происходило в соседних точках пространства в предшествовавший момент времени. Принцип «дальнодействия» был общепринятым до создания электромагнитной теории Максвелла. При рассмотрении процессов, не зависящих от времени, «принцип близкодействия» приводит к тем же результатам, что и «принцип дальнодействия». Поэтому, например, в нашей речи часто встречаются формулировки, соответствующие принципу дальнодействия: мы говорим — «ток отклоняет магнитную стрелку», «одноименно заряженные тела отталкиваются» и т. д.

«Принцип близкодействия» и реальность поля подтверждаются многочисленными фактами. Как мы увидим ниже, теория относительности противоречит «принципу дальнодействия», и поэтому блестящее согласие теории относительности с опытом можно считать доказательством физической реальности поля. Одним из замечательных успехов теории электромагнитного поля было объяснение природы света. Свет—это электромагнитные волны. При этом видимому свету соответствует лишь небольшая часть шкалы электромагнитных волн. Теория электромагнитного поля предсказала, как можно получить такие волны искусственным образом. Великое изобретение А. С. Попова — радио — это также один из триумфов теории поля.

Можно ли наглядным образом представить себе классическое электромагнитное поле? Чтобы ответить на этот вопрос, прежде всего рассмотрим, что значит «наглядное представление». Когда какая-либо область науки хорошо изучена, когда хорошо известны взаимосвязи между явле-

ниями в этой области, вырабатывается система представлений, позволяющая объяснить все явления в этой области. Тогда наглядное представление — это представление посредством привычных моделей и понятий. Совершенно очевидно, что наглядным образом можно объяснить лишь явления, не выходящие за рамки существующих теорий, не требующие создания новых представлений. Если же новые факты выходят за рамки известных теорий, то бессмысленно пытаться объяснить их с точки зрения старых представлений наглядным образом. Тогда нужно создавать новую систему представлений.

В истории физики известны попытки наглядного объяснения электромагнитных явлений с помощью механических моделей. Во время развития электромагнитной теории общепринятыми были механические представления. Механика к этому времени достигла известной завершенности, хорошо объясняла многочисленные явления, представления ее были привычны, и многим казалось, что и все остальное должно укладываться в рамки механических воззрений. Для объяснения электромагнетизма было введено понятие об универсальной упругой среде, заполняющей все пустое пространство, — мировом эфире. Все тела считались погруженными в эфир и пронизанными эфиром. Электромагнитное поле по этой модели действовало в эфире, оно представлялось посредством механических напряжений в упругом эфире. Свет рассматривался как распространение упругих колебаний в эфире. Но с развитием электромагнитной теории, с открытием новых опытных фактов при такой трактовке возникало все больше трудностей. Эфир приходилось наделять самыми противоречивыми свойствами: он должен был вести себя как твердое тело при быстрых колебаниях и не сопротивляться движению планет, эфир сравнивался с жидкостью, со смолой и т. д. В дальнейшем, в связи с этими трудностями, стали рассматривать эфир как особую материальную среду, наделенную свойствами, не имеющими ничего общего со свойствами обычных тел. Предполагалось только, что эфир может служить системой отсчета, т. е. что можно говорить о скорости Земли относительно эфира. Но и такое представление об эфире оказалось неудовлетворительным. Опыт американского ученого Майкельсона и другие опыты установили, что нельзя определить движение Земли относительно эфира. Понятие эфира как некоторой субстанции потеряло смысл, поскольку нельзя опре-

делить движение тел относительно эфира. Нелепо было пытаться объяснить электромагнитные явления посредством упругих свойств среды — эфира, — которая не могла быть обнаружена в опытах. Понятие эфир было полностью устранено из электромагнитной теории в созданной Эйнштейном теории относительности (1905).

В теории относительности с самого начала предполагается, что эфира не существует.

Таким образом, все попытки механического объяснения электромагнитных явлений не имели успеха. Электромагнитное поле нельзя представить с помощью наглядных механических моделей. Его можно сделать наглядным и привычным, лишь изучив подробно все его свойства. Мы можем, например, представить электромагнитное поле с помощью линий напряженности электрического поля или эквипотенциальных поверхностей; можем изобразить магнитное поле с помощью магнитных силовых линий и т. д.

Представление о поле, в частности об электромагнитном, — одно из основных в современной физике. Электромагнитное поле представляет собой особый вид материи. Оно обладает энергией, определяющейся значениями напряженностей поля. Для классического электромагнитного поля характерно, что его энергия может меняться непрерывным образом.

В связи с попытками идеалистического истолкования замены механической теории электромагнитной, Ленин писал: «...как ни необычно ограничение механических законов движения одной только областью явлений природы и подчинение их более глубоким законам электромагнитных явлений и т. д., — все это только лишнее *подтверждение* диалектического материализма».¹

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Создание теории относительности устранило трудности, существовавшие в электромагнитной теории в связи с представлениями об эфире. Это придало классической теории электромагнитного поля законченный вид. В основе теории относительности лежит один из универсальных

¹ В. И. Ленин. Соч., т. 14, стр. 248.

законов природы, и поэтому современная физическая теория, в том числе любая теория поля, невозможна, если она не опирается на теорию относительности. Теория относительности — большой шаг в нашем познании природы. Как известно, сейчас теория относительности важна не только с принципиальной точки зрения, но и потому, что на ней основывается расчет работы машин атомной техники.

Принцип относительности Эйнштейна утверждает, что все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, т. е. во всех системах отсчета, движущихся с постоянной скоростью, и что скорость распространения взаимодействий конечна и равна скорости света c . Это означает, в частности, что не существует таких тел, видов энергии, скорость движения которых могла бы превышать скорость распространения света c . Иначе говоря — теория относительности несовместима с принципом дальнего действия. Действительно, при конечной скорости распространения взаимодействия движение одной из частиц может повлиять на другую частицу только через некоторый промежуток времени, т. е. в некоторый определенный момент времени взаимодействие возможно лишь между бесконечно близкими точками пространства. Таким образом, в теории относительности взаимодействие возможно только посредством поля. Нужно подчеркнуть, что все сказанное относится к любому полю, к любым взаимодействиям.

Теория относительности внесла глубокие изменения в наши представления о пространстве и времени. Теперь мы уже не можем рассматривать отдельно пространство и время. Ведь с точки зрения теории относительности время не абсолютно, т. е. не является таким, которое, по словам Ньютона, «протекает само по себе, независимо от чего бы то ни было внешнего», и которое одинаково во всех системах отсчета. С точки зрения теории относительности время течет различно в различных инерциальных системах отсчета, поскольку скорость распространения сигналов не может быть больше скорости света c . Если t — время и x, y, z — координаты в одной инерциальной системе отсчета, а t' — время и x', y', z' — координаты в другой инерциальной системе отсчета, движущейся относительно первой системы отсчета с постоянной скоростью v вдоль оси x , — то эти времена и координаты связаны соотношениями:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Эти формулы были впервые выведены выдающимся физиком Лоренцом и называются преобразованиями Лоренца.

Утверждая предельный характер скорости света c (скоростей движения тел или каких-либо видов энергии, превышающих скорость света, не существует), теория относительности тем самым придает скорости света характер фундаментальной постоянной. Законы ньютоновой физики получаются как частный случай законов теории относительности для медленных скоростей — если $v \ll c$.

Теория относительности уточнила наши представления о причинной связи, показала, что означают понятия «абсолютное будущее» или «абсолютное прошедшее» по отношению к рассматриваемому событию, и таким образом определила условия, когда имеет смысл говорить о двух событиях как о причине и о следствии. Причинная связь возможна только между такими событиями, которые разделены промежутком времени, превышающим время, нужное для прохождения светом пространственного расстояния между этими событиями. Про такие события говорят, что они разделены временеподобным интервалом. Это следствие теории относительности приобретает особое значение в квантовой теории поля.

Важное условие, касающееся построения физических теорий, вытекает из факта, что законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. Если мы, например, переходим от одной инерциальной системы отсчета к другой, то должны при этом выразить координаты и время в старой системе отсчета через координаты и время в новой системе, т. е. произвести преобразования Лоренца. Очевидно, что преобразованиям такого же рода мы должны подвергнуть и другие величины в уравнениях, описывающих законы природы, например энергию и импульс, электрический ток. Так как законы природы одинаковы в обеих системах отсчета, то и уравнения, соответствующие законам природы, в них должны иметь одинаковый вид (или, как говорят физики, должны быть инвариантны) относительно преобразований Лоренца. Это условие, таким образом, ограничивает возможный вид раз-

личных выражений в уравнениях теории, и, как увидим в дальнейшем, оно имеет применение в квантовой теории поля.

Одно из следствий теории относительности — установление связи между понятиями энергии и массы: энергия E равна численно массе m , умноженной на квадрат скорости света $E = mc^2$. Это значит, что массой обладают и физические поля, например электромагнитное поле, так как эти поля обладают энергией. Таким образом, теория относительности обобщила закон сохранения энергии, включив в его рассмотрение энергию, соответствующую массе покоя частиц. Кроме того, теория относительности видоизменила и его форму, установив, что закон сохранения энергии и закон сохранения импульса тесно связаны и составляют единый закон сохранения энергии и импульса. Как известно, этот закон сохранения — один из фундаментальных законов природы, конкретное выражение философского положения о неуничтожаемости и несотворимости материи и движения, о взаимопревращаемости разных видов материи.

На основе своей теории относительности Эйнштейн построил и так называемую общую теорию относительности. В этой теории рассматривается всемирное тяготение. Оказывается, что характер геометрии пространства и времени тесно связан с распределением масс и их движением, т. е. свойства пространства и времени определяются свойствами материи, а не есть что-то неизменное. Как формулирует академик В. А. Фок, общая теория относительности есть теория тяготения, которая вместе с тем представляет собой теорию пространства и времени. Как уже указывалось выше, тяготение не играет роли при взаимодействии элементарных частиц ввиду их малой массы. Но, подобно тому как, отправляясь от классического электромагнитного поля, физики построили квантовую электродинамику, так и на основе общей теории относительности построена квантовая теория поля тяготения (гравитационного поля).

КВАНТОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Опыты показали, что микромир — мир атомов, молекул и элементарных частиц — нельзя мыслить по образцу макромира. Строение атомов, молекул и атомного ядра, движение электронов и других элементарных частиц опре-

деляются законами квантовой физики, и их нельзя понять исходя из представлений классической физики — физики макромира.

Оказывается, что энергия внутренних состояний атомов, молекул, атомных ядер может принимать только прерывные значения. Переход атома из одного состояния в другое сопровождается излучением или поглощением света вполне определенной энергии: излучение имеет прерывный характер. Такие порции энергии называют квантами. С точки зрения классической механики такая особенность атомных состояний непонятна.

Микрочастицы обладают и свойствами частиц классической механики — корпускул, и волновыми свойствами. Например, если пучок электронов проходит через кристалл, то на пластинке за кристаллом можно наблюдать картину, характерную только для волновых процессов. С другой стороны; мы, например, можем определить координату электрона, что возможно только для частицы. С точки зрения классической механики, свойства частиц и волновые свойства взаимно исключают друг друга, в то время как квантовая механика дает им непринужденное объяснение.

Чтобы понять особенности квантово-механического описания, рассмотрим в качестве примера, как характеризуется состояние частицы в квантовой и классической механиках.

Состояние частицы в классической механике будет задано полностью, если мы зададим координаты и импульс частицы. Тогда с помощью уравнений движения (например, с помощью уравнений Ньютона) мы сможем определить состояние частицы в любой последующий момент времени и найти траекторию частицы.

В квантовой механике не существует таких состояний частицы, в которых обе величины — импульс и координата частицы — имели бы определенные значения. Поэтому одновременное задание импульса и координат частицы в квантовой механике невозможно, а понятие траектории не существует: ведь для определения траектории нужно знать и импульс и координаты частицы. Если в каком-то квантовом состоянии импульс частицы имеет определенное значение, то координата частицы не имеет определенного значения, и наоборот. Это значит, что в состоянии, когда, например, импульс частицы имеет определенное значе-

ние, значения координаты частицы будут различны для различных измерений и можно говорить только о вероятности того или иного результата.

Квантовое состояние характеризуется так называемой волновой функцией; вид ее определяется значениями всех тех величин, которые могут иметь определенное значение в этом состоянии. Если мы зададим квантовое состояние частицы в начальный момент времени, т. е. если зададим волновую функцию частицы, то состояние частицы в последующий момент времени определяется с помощью уравнения движения для волновой функции. Это уравнение, называемое уравнением Шредингера (австрийский физик), по своему типу есть уравнение распространения волны, т. е. уравнение движения для частицы в квантовой механике есть уравнение для волнового процесса, что выражает существование волновых свойств у микро-частиц.

Зная волновую функцию, мы можем найти распределение вероятностей для результатов измерений тех физических величин, которые в этом состоянии не имеют определенного значения. Например, можно вычислить вероятность того или иного значения координаты частицы.

Таким образом, квантовая механика есть теория статистическая — она дает лишь вероятности результатов измерения. Распределение вероятностей координат x и импульсов частицы p_x всегда таково, что произведение неопределенности импульса частицы Δp_x на неопределенность сопряженной ему координаты частицы Δx не может быть меньше некоторой постоянной величины — половины постоянной Планка h : $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{2}$. Это соотношение называется соотношением неопределенности. Оно было найдено немецким физиком Гейзенбергом. Соотношение неопределенностей означает, что чем точнее определена координата частицы, тем больше неопределенность в значении импульса. Разумеется, аналогичные соотношения неопределенностей имеют место и для любых двух других величин, не могущих иметь одновременно определенные значения в одном и том же квантовом состоянии. Величина наименьшего произведения неопределенностей различна для различных физических величин.

Соотношение неопределенностей характеризует предел применимости классических представлений о частице, т. е.

границу области, где частице возможно одновременно приписывать определенные значения всех величин, которые могут быть измерены в отдельности (координаты, импульс, энергия и т. д.). Подобно тому как для теории относительности характерно введение новой фундаментальной постоянной — скорости света, так и для квантовой механики характерно введение новой фундаментальной постоянной — постоянной Планка $h = 1,05 \cdot 10^{-27} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$.

Переход от квантовой механики к классической соответствует формальному переходу $h \rightarrow 0$. Если, например, мы положим $h = 0$ в соотношениях неопределенностей $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{2}$, то получим возможность одновременных определенных значений координаты и импульса в классической теории.

Что же изменится и что существенно, если рассматривать с квантовой точки зрения не частицу, а поле?

Во-первых, поле можно рассматривать только релятивистским образом (т. е. в согласии с требованиями теории относительности). Далее, частица имеет только три степени свободы (три координаты), в то время как поле — это система с бесконечно большим числом степеней свободы. Действительно, когда шла речь о классическом поле, мы говорили, что поле определяется заданием величин (например, напряженностей электромагнитного поля) в каждой точке пространства. Таким образом, даже если в каждой точке задавать только одну величину — одну «координату поля», то для общей характеристики поля нужно столько «координат поля», сколько имеется точек в пространстве. Каждой «координате поля», по аналогии с механикой частицы, мы должны сопоставить «импульс». Такое рассмотрение поля как своеобразной механической системы позволяет сразу же перенести в теорию поля все результаты обычной квантовой механики. По аналогии с квантовой механикой частицы, мы можем заключить, что не существует таких состояний поля, когда «координата» и «импульс» в одной и той же точке поля в одно и то же время имеют определенные значения. Но энергию и количество движения всего поля, напряженности поля можно выразить через «координаты» и «импульсы». Значит, тем самым решен вопрос о том, какие из этих основных величин поля могут иметь одновременно определенные значения, какими величинами можно характеризовать

состояния поля, каковы соотношения неопределенностей для различных полевых величин.

Далее, так как в квантовой теории поля «координаты» поля можно рассматривать в различных точках пространства и в различное время, то возникает вопрос — в каком случае «координаты» поля в двух точках пространства в разные моменты времени независимы? Ответ на это дает теория относительности: причинная связь возможна только между точками, соединенными временеподобным интервалом, и, следовательно, в таких точках нельзя рассматривать «координаты» поля независимо.

Дальнейшие математические вычисления приводят к замечательному выводу. Оказывается, что энергия и количество движения всего поля могут быть представлены в виде суммы энергий и количества движения отдельных возбуждений поля — квантов поля. Более детальное исследование квантов поля показывает, что они обладают свойствами элементарных частиц.

Таким образом, применение законов квантовой механики к классической теории поля, построенной в соответствии с теорией относительности, дает нам квантовую теорию поля, и при этом автоматически получается, что мы можем трактовать кванты поля как элементарные частицы.

Из того факта, что в квантовой теории поля также нет таких состояний, при которых все величины имеют определенные значения, сразу же следует вывод, что, как и квантовая механика, квантовая теория поля есть статистическая теория. Если, например, происходит столкновение двух частиц, то мы не можем предсказать однозначно результат измерения, — можем предсказать лишь вероятность того или иного результата — вероятность рассеяния на определенный угол, вероятность образования новых частиц при столкновении и т. д.

Первые работы, прокладывающие путь в квантовую теорию поля, появились тотчас же после создания в 1925—1926 гг. основ квантовой механики. В этих работах были установлены релятивистские уравнения движения для частиц, т. е. уравнения, согласующиеся с теорией относительности; разработан метод, позволяющий рассматривать процессы рождения и поглощения частиц, т. е. рассматривать системы с меняющимся числом частиц. Такой метод называется методом вторичного квантования.

Уже в 1925 г. советский ученый В. А. Фок и, независи-

мо от него, шведский физик Клейн нашли первое релятивистское уравнение — уравнение Клейна—Фока, используемое сейчас для частиц, не обладающих спином. Соответствующее релятивистское уравнение для электрона, пригодное для всех частиц с половинным спином, было предложено английским ученым Дираком в 1928 г. Согласно уравнению Дирака, для частицы, описываемой этим уравнением, возможны состояния как с положительной, так и с отрицательной кинетической энергией. Но по своему смыслу кинетическая энергия не может быть отрицательной, и поэтому свойства уравнения Дирака были вначале непонятны. Между тем, прекрасное согласие всех выводов из этого уравнения с опытом убеждало в его правильности. Выход был найден позже самим Дираком, который показал, что решения с отрицательными энергиями связаны с движением частицы со знаком заряда, противоположным знаку заряда электрона, — позитрона. В дальнейшем позитрон был обнаружен на опыте. Ряд интересных расчетов, основанных на теории Дирака, провел в те годы советский ученый И. Е. Тамм. Он рассмотрел превращение электрона и позитрона в фотоны и рассеяние света свободным электроном с учетом возможного рождения электронно-позитронных пар. Советские ученые Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц рассмотрели образование электронно-позитронных пар при столкновении заряженных частиц.

Необходимый для последовательного изучения превращений частиц метод вторичного квантования был разработан Дираком в 1927 г. применительно к частицам, обладающим целочисленным спином. Дирак развил этот метод на примере фотонов — квантов электромагнитного поля. В последующем году немецкие ученые Иордан и Вигнер распространили метод вторичного квантования на случай электронов. Исчерпывающая теория вторичного квантования была дана в 1932 г. Фоком. Это было первое ясное и последовательное изложение метода вторичного квантования и его связи с квантовой механикой. До появления работы Фока связь вторичного квантования с обычной квантовой механикой не была вполне понятна, так что в некоторых работах (особенно в статьях Иордана) предполагалось, что метод вторичного квантования выходит за рамки квантовой механики и является «общей теорией дискретной структуры материи». Фок тогда же значительно развил метод рассмотрения систем с меняю-

щимся числом частиц. Сейчас об этом методе иногда пишут как о методе рассмотрения в «пространстве Фока».

Первая теория квантового поля была построена для изучения электромагнитного поля, взаимодействующего с электронами, немецкими учеными Гейзенбергом и Паули в 1927—1930 гг. В квантовой электродинамике Гейзенберга и Паули имелись затруднения. Некоторые соотношения этой теории не имели инвариантного вида, требуемого теорией относительности. Не было показано, как можно получить взаимодействие частиц посредством квантового поля. В 1932 г. Дирак, на примере движения в одном измерении, показал, как должно появляться в квантовой теории поля известное кулоновское взаимодействие между зарядами. В том же году идея Дирака была развита для реального трехмерного движения Фоком и Б. Подольским. Новой квантовой электродинамике был придан окончательный вид в совместной работе Дирака, Фока и Подольского. «Многовременная теория Дирака—Фока—Подольского» была важнейшим этапом в развитии квантовой теории поля.

В дальнейшем, в 1932—1934 гг., для последовательного и строгого исследования взаимодействия электронов с электромагнитным полем Фок создал метод функционалов, который применяется и для изучения других полей.

С открытием новых частиц и в связи с проблемой ядерных сил представления квантовой электродинамики стали распространяться и на другие теории поля. Первыми предприняли попытку объяснения ядерных сил как обусловленных переносом электронов или позитронов и нейтрино Тамм и другой советский ученый, Д. Д. Иваненко, в 1934 г. В 1935 г. японский ученый Юкава показал, что для качественного объяснения ядерных сил необходимо предположение о существовании новых элементарных частиц — мезонов. В связи с этим в последующем была развита теория мезонного поля. На этом заканчивается первый этап квантовой теории поля, когда были установлены математические основы теории и основные ее представления.

ЧАСТИЦЫ — ЭТО КВАНТЫ ПОЛЯ

Идея о частицах как квантах поля является руководящей в представлениях современной квантовой теории поля. Эти представления, с одной стороны, есть квантовые

представления, с другой — включают в себя все представления теории относительности.

Уже в самой идее о частицах как квантах поля заключено представление о возможности рождения и поглощения частиц.

Рассмотрим сначала одно какое-то поле, не взаимодействующее с другими полями, — свободное поле.

Квантовое поле может находиться в различных состояниях, отличающихся друг от друга по значениям тех величин, которые сохраняются во все время движения поля, т. е. по значениям величин, для которых существуют законы сохранения, — по энергии, заряду и т. д.

Но с точки зрения квантовых представлений состояния поля можно отличать по значениям не всех сохраняющихся величин, а лишь тех, которые могут иметь одновременно определенные значения. Например, известно, что, кроме законов сохранения энергии и импульса, имеются также закон сохранения электрического заряда, закон сохранения момента количества движения. Из этих величин импульс и момент количества движения не могут иметь совместно определенные значения. Поэтому состояния квантового поля мы можем отличать по значениям энергии, импульса и заряда, либо по значениям энергии, момента количества движения и заряда. При взаимодействии поле может переходить из одного состояния в другое. При переходе поля из одного состояния в другое энергия и импульс поля могут изменяться только порциями (квантами), представляющими собой энергию и импульс (или энергию и момент количества движения) частицы. Переход поля из состояния большей энергии в состояние меньшей энергии представляет собой излучение частицы, сопоставляемой этому полю; переход поля из состояния меньшей энергии в состояние большей энергии связан с поглощением кванта поля — частицы поля. Чем больше имеется частиц, тем больше энергия поля, больше возбуждение поля. Отсюда очевидно, что состояние свободного поля, обладающее наименьшей энергией по сравнению с другими состояниями свободного поля, — это вакуумное состояние, когда в поле нет частиц.

В настоящее время известно много различных квантовых полей. Их число значительно больше, чем в классической физике, где известны только два поля — электромагнитное и гравитационное (поле тяготения). Числа видов

квантовых полей мы пока еще не знаем, так как этот вопрос связан с числом видов элементарных частиц.

Квантовые поля можно подразделять по ряду признаков. Важнейшая характеристика поля — это тип статистики, которой подчиняются его частицы. Под статистикой частиц подразумевается свойство, определяющее поведение ансамбля одинаковых частиц. Существует два типа статистик: Бозе—Эйнштейна и Ферми—Дирака, названные так по именам их создателей — индийского физика Бозе и А. Эйнштейна, итальянского физика Ферми и Дирака. Для частиц, подчиняющихся статистике Бозе—Эйнштейна (их называют обычно бозе-частицами, или бозонами), характерно, что в ансамбле бозе-частиц в одном и том же состоянии может находиться произвольное число частиц. Для частиц, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака (ферми-частиц или фермионов), характерно, что в одном и том же состоянии не может находиться более одной частицы. Как было установлено Паули с помощью соображений теории относительности, тип статистики тесно связан со спином частицы. Оказывается, что все частицы, обладающие полуцелым спином (известные и неизвестные), должны подчиняться статистике Ферми—Дирака, а все известные и неизвестные частицы с целым спином — статистике Бозе—Эйнштейна.

Связь спина и статистики выдвигает спин частицы на место фундаментального свойства, характеризующего квантовое поле. Установление этой глубокой связи — одно из больших принципиальных достижений квантовой теории поля и теории относительности.

Из таблицы элементарных частиц видно, что нейтрино, электрон, позитрон, μ -мезон, протон и нейтрон — это ферми-частицы, а фотон, гравитон и π -мезон — бозе-частицы. Спины остальных частиц еще не установлены, и поэтому пока нельзя определить тип статистики, которому подчиняются все остальные частицы. Заметим, что объяснение периодической системы Менделеева, а также подразделение тел на диэлектрики, проводники и полупроводники основываются на свойствах статистики электронов. При развитии атомной физики эти свойства формулировались как обобщение опытных данных в виде запрета Паули (в одном состоянии не может находиться более одного электрона). Таким образом, развитие квантовой теории поля позволило глубже понять происхождение атомных закономерностей, связанных с запретом Паули.

Другой характеристикой поля будет заряд. Квантовые поля могут обладать электрическим зарядом. С этой точки зрения все поля подразделяются на заряженные и нейтральные. Примером нейтральных полей могут служить нейтринное поле, электромагнитное и поле тяготения. Замечателен вывод квантовой теории поля о симметрии по заряду: каждому заряженному полю непременно соответствуют как положительно заряженные частицы, так и отрицательно заряженные частицы. Корни этого вывода заключены в математическом аппарате теории и не могут быть объяснены просто.

Так, например, из уравнения Дирака для электрона необходимым образом вытекает существование антиэлектрона-частицы, имеющей ту же массу, но другой знак заряда (позитрон). Так как уравнение Дирака годится для всех частиц со спином, равным половине, то отсюда непосредственно вытекает, что всем частицам со спином $1/2$ соответствуют и античастицы. Если частица обладает электрическим зарядом, то заряд античастицы должен иметь противоположный знак, массы же частицы и античастицы должны быть одинаковыми. Из таблицы мы видим, что, действительно, существует два типа μ -мезонов. Что касается протона и нейтрона, то в таблицу не внесены антипротон и антинейтрон, так как они еще не обнаружены в опытах; антипротон и антинейтрон должны обладать очень большой массой (той же, что протон и нейтрон); поэтому искусственное образование этих частиц требует больших энергий, еще не достигнутых в современных ускорителях элементарных частиц. Но физики-теоретики в своих расчетах исходят из предположения, что обе эти античастицы существуют.

Из таблицы видно, что вывод квантовой теории поля о симметрии относительно заряда хорошо подтверждается и для всех частиц с целым спином. Необъясненным остается квантовый характер заряда, — почему все заряженные частицы имеют заряд одной и той же величины.

Таким образом, все квантовые поля распадаются на две большие группы по типу статистики, а каждая из этих групп, в свою очередь, распадается на поля, с каждым из которых связывается «семейство частиц», если поле заряжено. Так, мы говорим об электронно-позитронном поле, квантами которого являются электроны и позитроны, о μ -мезонном поле, кванты которого — μ -мезоны. Три частицы — положительный, отрицательный и нейтральный

π -мезоны считаются квантами π -мезонного поля. Полю тяготения сопоставляется частица, называемая гравитоном. Гравитон до сих пор не был обнаружен экспериментально, и имеется мало надежд, что его удастся обнаружить, по крайней мере в ближайшие десятилетия. Дело в том, что поле тяготения чрезвычайно слабо по сравнению с другими полями, и поэтому вероятность образования гравитона в результате взаимодействия квантовых полей ничтожна. Электромагнитное поле, которому сопоставляются фотоны, в квантовой теории поля рассматривается на равных правах с другими полями, хотя фотон (как и гравитон) не обладает массой покоя.

До сих пор мы говорили об отдельных квантовых полях в связи с идеей: «частицы — это кванты поля». Но эта идея определяет также и представление о взаимодействии в квантовой теории поля, являющееся новым по сравнению с представлениями о взаимодействии в классической теории. Например, взаимодействие между электроном и позитроном осуществляется посредством электромагнитного поля следующим образом. Электрон и позитрон взаимодействуют с электромагнитным полем; мерой этого взаимодействия служит заряд электрона и позитрона. Благодаря взаимодействию с электромагнитным полем электрон испускает фотоны, а позитрон поглощает эти фотоны; вместе с фотонами действие от электрона передается позитрону; в свою очередь, позитрон испускает фотоны, поглощаемые затем электронами. Следовательно, взаимодействие между электроном и позитроном (или между двумя электронами) происходит посредством обмена фотонами — «перекидывания» фотонами.

Аналогичным образом мы можем рассматривать в квантовой теории поля взаимодействия между фотонами (что вообще невозможно в рамках классической теории поля). Это взаимодействие может осуществляться посредством любого поля, с которым взаимодействует электромагнитное поле; например, посредством электронно-позитронного поля, μ -мезонного, π -мезонного и т. д. Но электромагнитное поле нейтрально, а электронно-позитронное поле, μ -мезонное и π -мезонное несут заряд. Так как при любых превращениях элементарных частиц всегда выполняется закон сохранения заряда, то фотоны могут образовывать заряженные частицы только парами: например, парами электрон—позитрон или парами положительный μ -мезон — отрицательный μ -мезон. Взаимодействие меж-

ду фотонами может происходить, таким образом, посредством «перекидывания» от одного фотона к другому электронно-позитронных пар или пар μ -мезонов.

По разобранной выше схеме построена и теория ядерного взаимодействия. Нейтрон и протон в этой теории считаются разными состояниями одной частицы — нуклона. Нейтрон — это такое состояние нуклона, когда его энергия минимальна и электрический заряд равен нулю, а в протонном состоянии энергия также минимальна, но заряд равен единице. Ядерные силы — это силы, действующие между нуклонами. Нуклоны взаимодействуют с различными полями. Но как показывают данные опытов, из изученных взаимодействий наиболее сильно взаимодействие нуклонов с π -мезонным полем. Поэтому сейчас считается, что взаимодействие между нуклонами осуществляется, в основном, посредством π -мезонного поля: один нуклон испускает π -мезоны, другой поглощает их, и наоборот. При обмене заряженными π -мезонами электрический заряд передается от одного нуклона другому: нейтрон, излучив отрицательный π -мезон, становится протоном, а протон, поглотив отрицательный π -мезон, превращается в нейтрон. Аналогичным образом при излучении положительного π -мезона протон превращается в нейтрон, а нейтрон, поглотив этот мезон, превращается в протон. Так ядерные силы связаны с обменом зарядами между протоном и нейтроном. Представление о ядерных силах, осуществляемых посредством обмена тяжелыми частицами π -мезонами, позволяет хорошо объяснить малый радиус действия ядерных сил: они проявляются лишь на расстояниях, меньших 10^{-13} см. Дело в том, что, с точки зрения квантовой теории поля, радиус действия сил тем меньше, чем больше масса покоя квантов поля, посредством которого осуществляется взаимодействие. Для объяснения радиуса действия 10^{-13} см необходимо, чтобы масса покоя квантового поля была равна 200—300 электронным массам. Масса же π -мезонов равна 265 (заряженные мезоны) и 276 электронным массам (нейтральный мезон).

Советские физики в исследовании взаимодействий π -мезонов с нуклонами имеют ряд достижений. Много вычислений в этой области проведено под руководством акад. И. Е. Тамма.

В настоящее время проблема ядерных сил находится в малоудовлетворительном состоянии. До сих пор точно

не установлен вид взаимодействия между нуклонами и π -мезонным полем. В квантовой теории поля можно сравнительно просто выписать все возможные формы взаимодействия между разными полями, основываясь на том соображении, что выражение для взаимодействия в уравнении движения не должно зависеть от выбора системы отсчета. Дальнейший отбор истинного вида взаимодействия из возможных видов определяется сравнением теории с опытом. Но в настоящее время теория еще не столь совершенна, чтобы можно было уверенно высказаться в пользу определенного варианта взаимодействия. Кроме того, весьма вероятно, что для больших энергий существенное значение имеет взаимодействие нуклонов с более тяжелыми мезонами — например с τ -мезонами.

Помимо взаимодействия двух полей (парное взаимодействие), известны также прямые взаимодействия трех полей: взаимодействие электронно-позитронного, μ -мезонного и нейтринного полей или взаимодействие нуклонного, электронно-позитронного и нейтринного полей. Это значит, в частности, что между нейтроном и протоном, кроме π -мезонного взаимодействия, имеется также взаимодействие, осуществляемое посредством электронно-позитронного и нейтринного полей. Передача такого взаимодействия будет происходить путем излучения одной частицей (например, нейтроном) электрона и нейтрино и последующим поглощением их другой частицей (протоном). Но ввиду малости постоянного взаимодействия электронно-позитронного, нуклонного и нейтринного полей такое дополнительное взаимодействие между нейтроном и протоном чрезвычайно мало по сравнению с их π -мезонным взаимодействием.

Взаимодействие частиц — это только одно из проявлений взаимодействия полей. Кроме взаимодействия частиц, взаимодействие квантовых полей ведет к превращениям частиц.

Возможность того или иного превращения определяется, конечно, не только существованием взаимодействия между полями, но и законами сохранения. При вычислениях в квантовой теории поля не нужно специально учитывать законы сохранения, — эти законы содержатся в математическом аппарате квантовой теории поля. Например, основное уравнение квантовой теории поля представляет собой, по существу, закон сохранения энергии. Если бы мы попытались вычислить вероятность такого фиктив-

ного процесса, где не выполняется хотя бы один закон сохранения, то получили бы автоматически, что такая вероятность равна нулю.

Взаимодействием полей объясняется неустойчивость некоторых элементарных частиц по отношению к распаду на частицы меньшей массы. Рассмотрим в качестве примера распад положительного π -мезона. Поле π -мезонов взаимодействует с полем μ -мезонов и нейтринным полем. Благодаря этому взаимодействию π -мезонное поле может передать положительный заряд и часть энергии и импульса μ -мезонному полю, а другую часть энергии и импульса — нейтринному полю, или, иначе говоря, положительный π -мезон может распасться на положительный μ -мезон и нейтрино. Такое превращение возможно, так как при этом выполняются законы сохранения. Обратное превращение — распад μ -мезона на π -мезон и нейтрино — невозможен, так как масса покоя μ -мезона меньше массы покоя π -мезона. Чем сильнее взаимодействие между полями, тем больше вероятность превращения частиц, тем, следовательно, больше вероятность распада и меньше время жизни частицы. Из таблицы элементарных частиц видно, что время жизни нейтрального π -мезона во много раз меньше, чем время жизни заряженных π -мезонов. Это связано с тем, что π -мезоны слабо взаимодействуют с μ -мезонным полем. Между тем, для распада нейтрального π -мезона это взаимодействие несущественно, так как аналогичный распад нейтрального π -мезона невозможен в силу закона сохранения заряда. Более быстрый распад нейтрального π -мезона вызывается более сильным взаимодействием нейтральных π -мезонов с электромагнитным полем. Непосредственно эти мезоны не могут взаимодействовать с электромагнитным полем, так как у них нет электрического заряда, но они сильно взаимодействуют с протонами, обладающими электрическим зарядом. Распад же заряженных π -мезонов на фотоны невозможен в силу закона сохранения заряда.

В классической физике проводилась строгая грань между двумя основными понятиями — понятием частицы и понятием поля. Частица создавала поле, посредством поля осуществлялось взаимодействие между частицами. В квантовой же теории поля такая грань исчезла. На разобранных только что примерах мы убедились, что в квантовой теории поля корпускулярный или волновой характер действий поля зависит от типа рассматриваемого

явления. Взаимодействие между электронами осуществляется посредством обмена фотонами — через электромагнитное поле; с другой стороны, взаимодействие между фотонами происходит через электронно-позитронное поле, посредством обмена электронно-позитронными парами. В первом случае электроны выступают в роли частиц классической физики, во втором случае — в роли излучения.

Почему же из всех квантовых полей при переходе к большим масштабам — при переходе к «классическим» полям — остаются заметными только электромагнитное поле и поле тяготения? Это объясняется малым радиусом действия сил, связанных со всеми остальными полями. Электромагнитное поле и поле тяготения отличаются от других полей тем, что кванты этих полей не обладают массой покоя. Так как радиус действия сил обратно пропорционален массе покоя квантов поля, то для электромагнитного поля и поля тяготения радиус действия очень велик, благодаря чему эти поля имеют значительную величину на расстояниях, во много раз превосходящих размеры атомов. Иначе говоря, эти поля существуют в областях, рассматриваемых классической физикой. Действие же других полей в столь больших областях обнаружить нельзя ввиду малого радиуса сил; электронно-позитронное, нуклонное и мезонные поля могут проявляться только в квантовых явлениях.

НОВЫЕ ИДЕИ

Несмотря на большие успехи, квантовая теория поля не была последовательной теорией. Трудности квантовой теории поля проявлялись в появлении расходящихся выражений для различных физических величин.

Методом решения уравнений квантовой теории поля служит так называемая теория возмущений. В теории возмущений предполагается, что взаимодействие между полями мало, что в нулевом приближении квантовые поля можно считать не взаимодействующими, что взаимодействие полей — это малое размещение, вызывающее переходы полей из одного состояния в другое (рождение и поглощение частиц, взаимодействие между частицами и т. д.).

При таком способе решения в первом приближении получились результаты, хорошо согласующиеся с опытом,

что рассматривалось как подтверждение теории. Однако при попытках уточнить расчеты неизменно возникали затруднения: в следующих приближениях теории возмущений вычисления приводили к бесконечно большим значениям как для физических величин — энергии, электрического тока и др., так и для вероятностей переходов — вероятностей превращений, вероятностей рассеяния. Создалось парадоксальное положение, когда первое приближение при расчетах давало конечный результат, в то время как последующие приближения, которые должны были бы вносить только малые поправки к первому приближению, давали расходящиеся результаты. Это положение осложнялось еще тем, что нельзя было считать весь метод вычислений негодным, так как первое приближение хорошо согласовывалось с экспериментом во всех известных случаях. Много попыток предпринималось для того, чтобы улучшить теорию, но эти попытки оставались безуспешными до тех пор, пока, благодаря усовершенствованию экспериментальной техники, не были получены новые опытные данные, указавшие путь развития теории.

В 1947 г., с помощью мощной микроволновой техники, американские физики Лэмб и Розерфорд обнаружили сдвиг уравнений электронов в атоме водорода по сравнению с тем значением, которое давала теория: частота света, излучаемого атомом при переходах, оказалась отличной от теоретической. Аналогичные сдвиги были обнаружены также для электронов в атомах дейтерия (тяжелого водорода) и гелия. Величина сдвигов была незначительной: частота отличалась от теоретической менее чем на одну тысячную долю. Кроме того, в других опытах было установлено, что магнитный момент электрона также отличается от теоретического значения примерно на одну тысячную часть. Хотя величина расхождения эксперимента и теории была мала, но к этому времени эксперимент достиг такой степени точности, что это расхождение выходило за пределы возможных ошибок. Эти опыты и дали толчок замечательному развитию квантовой теории поля в последние годы.

Объяснение сдвига и дополнительного магнитного момента было получено путем учета так называемых вакуумных флуктуаций¹ электромагнитного и электронно-по-

¹ Ф л у к т у а ц и я — беспорядочное изменение какой-либо величины.

зитронного поля. Что же представляют собой флуктуации поля? Для ответа на этот вопрос нужно более подробно рассмотреть представление о вакууме квантового поля. Мы определяли вакуумное состояние квантового поля как состояние наименьшей энергии. Поскольку частицы — это кванты поля, «элементарные возбуждения» поля, то вакуумное состояние поля — это состояние без частиц. Для электромагнитного поля вакуум — это состояние без фотонов, для электронно-позитронного поля вакуум — без электронов и позитронов. Отсутствие частиц в поле не означает, что нет и самого поля. Это означает только, что поле находится в невозбужденном состоянии. Можно показать, основываясь на разобранных ранее квантово-механических закономерностях, что в вакуумном состоянии обязательно существует поле. Из аппарата квантовой теории электромагнитного поля вытекает, что напряженность электрического поля и число фотонов — это величины, которые не могут иметь в одном и том же состоянии определенные значения. Но в вакуумном состоянии число частиц известно точно: оно равно нулю. Поэтому в вакуумном состоянии напряженность электрического поля не может быть также равна нулю, — это противоречило бы соотношению неопределенностей для числа частиц и напряженности электрического поля. В вакуумном состоянии, таким образом, напряженность поля отлична от нуля и не имеет определенного значения, — поле флуктуирует. Вакуумные флуктуации характерны для любого квантового поля, не только для электромагнитного поля.

Сдвиг уровней атомных электронов может быть теперь объяснен следующим образом. Уровни энергии электрона в атоме определяются взаимодействием электрона с атомным ядром. Вакуумные флуктуации электромагнитного поля изменяют движение электрона; в поле вакуумных флуктуаций электрон как бы колеблется, дрожит, что видоизменяет его взаимодействие с атомным ядром; измененному взаимодействию соответствуют сдвинутые уровни энергии. Вычисления дополнительного магнитного момента электрона подтвердили, что и этот эффект связан со взаимодействием электрона и вакуумных флуктуаций электромагнитного поля.

Кроме вакуумных флуктуаций электромагнитного поля, в сдвиг уровней вносят небольшую долю и вакуумные флуктуации электронно-позитронного поля: вакуум электронно-позитронного поля как бы поляризуется, — в нем

возникают электрические токи и заряды (конечно, общий поляризационный заряд равен нулю). Эти токи и заряды связаны с образованием «виртуальных» электронно-позитронных пар, которые можно представить как пары электрон—позитрон, поглощающиеся после образования. Поляризационные токи и заряды также влияют на взаимодействие электрона с ядром.

Теоретические вычисления сдвига атомных уровней и дополнительного магнитного момента электрона, основанные на представлении о вакуумных флуктуациях, оказались в прекрасном совпадении с опытом. В этом заключается доказательство реальности вакуумных флуктуаций.

Этот вывод квантовой теории поля имеет и философское значение. С точки зрения диалектического материализма пространство и время представляют собой формы существования материи: невозможно пространство вне связи с материей, не может существовать нематериальное «пустое пространство». Реальность вакуумных флуктуаций означает, что вакуум («пустое пространство») материален. Это представляет собой физическое доказательство правильности философского тезиса о пространстве как форме существования материи и является новым подтверждением правильности материалистического мировоззрения.

В новейшем развитии квантовой теории поля были пересмотрены также представления о заряде и массе частиц. До возникновения проблемы взаимодействия с вакуумными флуктуациями предполагалось, что масса покоя квантов изолированного поля (не взаимодействующего с другими полями) есть масса покоя частиц, сопоставляемых этому полю. Например, считалось, что масса и заряд квантов свободного электронно-позитронного поля равны массе и заряду электрона или позитрона. Представление об изолированном, свободном поле является, однако, идеализацией: в действительности поля всегда находятся во взаимодействии. Даже тогда, когда поле пребывает в вакуумном состоянии, оно взаимодействует с другими полями благодаря вакуумным флуктуациям. С точки зрения реальности вакуумных флуктуаций невозможно представление о невзаимодействующих полях.

Взаимодействие поля с вакуумными флуктуациями другого поля изменяет свойства этого поля. Так, взаимодействие электронно-позитронного поля с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля изменяет свойства

электронно-позитронного поля, а взаимодействие электромагнитного поля с вакуумными флуктуациями электронно-позитронного поля изменяет свойства электромагнитного поля. Квантовые вычисления показывают, что изменение свойств электронно-позитронного поля состоит в появлении дополнительной электромагнитной массы и дополнительного заряда у электрона (и у позитрона) и поправок к уровням энергии, к вероятностям переходов (радиационные поправки). Влияние вакуумных флуктуаций на электромагнитное поле проявляется в возможности таких эффектов, как рассеяние света на свете, рассеяние света электростатическим полем и т. д.

Таким образом, при учете вакуумных флуктуаций оказывается, что такие фундаментальные величины, как масса и заряд электрона, зависят от взаимодействия полей. Но взаимодействие между электронно-позитронным и электромагнитным полями существует всегда, и, следовательно, масса и тот заряд электрона, который наблюдается в эксперименте, представляют собой уже полную массу и полный заряд электрона с учетом полевых добавок. Значит, масса и заряд кванта свободного электронно-позитронного поля не равны массе и заряду электрона и не имеют физического смысла. Построенная на этих идеях процедура вычислений получила название перенормировки.

С помощью перенормировки массы и заряда электрона были устранены все бесконечно большие выражения («бесконечности») из окончательных результатов вычислений. Теперь можно вычислять вероятности любых процессов в любом приближении.

Однако перенормировки — не вполне последовательная процедура. Перенормировка исходит из подразделения полной массы электрона m на «начальную» массу m_0 (массу кванта свободного электронно-позитронного поля) и электромагнитную массу: $m = m_0 + \delta m$, а также аналогичное подразделение заряда электрона e на начальный заряд e_0 и дополнительный заряд δe : $e = e_0 + \delta e$. Но такое подразделение, строго говоря, лишено смысла, поскольку смысл имеют только полная масса и полный заряд электрона. При вычислениях согласно процедуре перенормировки предполагается, что величины δm и δe малы по сравнению с полными массой m и зарядом e . Между тем, в результате вычислений электромагнитная масса δm и дополнительный заряд δe оказываются бесконечно большими. В оправдание обычно ссылаются на будущую пра-

вильную теорию, говорят, что бесконечно большие значения δm и δe — это следствие несовершенства современной теории, что в будущей правильной теории эти величины должны быть конечны и малы по сравнению с m и e .

Каким же образом удастся с помощью столь непоследовательной процедуры устранить из теории все бесконечности? Оказывается, что в квантовой теории электромагнитного поля, взаимодействующего с электронно-позитронным полем, все встречающиеся бесконечности входят в выражение для вероятности процессов таким образом, что эти бесконечности можно отожествить с электромагнитной массой δm и дополнительным зарядом δe . Затем говорится, что в отдельности δm и δe не имеют смысла, что хотя δm и δe получились бесконечно большими, но в правильной теории они будут конечными величинами, и поэтому δm и δe вместе с «начальными» массой m_0 и зарядом e_0 должны быть объединены в конечные величины — полную массу $m = m_0 + \delta m$ и полный заряд $e = e_0 + \delta e$. Значения m и e берутся из эксперимента.

Таким образом, перенормировка не устраняет трудности квантовой теории поля, но изолирует эти трудности, показывает, что они несущественны для рассмотрения вероятностей переходов и средних значений физических величин. Трудности теории поля можно связать с проблемой «структуры» электрона и других элементарных частиц, поскольку, повидимому, величины δm и δe определяются «структурой» частицы (под «структурой» не следует понимать механическую структуру). Успех квантовой теории поля в устранении бесконечностей из всех выражений для вероятности процессов можно тогда толковать в том смысле, что «структура» электрона несущественна для процессов, рассматриваемых теорией поля сейчас. Ряд интересных исследований по перенормировке провел советский ученый академик Л. Д. Ландау с сотрудниками.

Переход от теории без перенормировки к квантовой теории поля с перенормировкой означает учет неразрывной связи частицы и поля. Успех теории при таком переходе является выражением существенного характера этой связи. Трудности теории с этой точки зрения следует видеть в том, что неразрывную связь с частицей поля не удастся учесть последовательным образом: не удастся еще построить теорию, содержащую с самого начала только экспериментальную массу и экспериментальный

заряд электрона и не пользующуюся вспомогательными величинами m_0 и e_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приступая к изложению идей квантовой теории поля, мы исходили из представления, что вещество состоит из элементарных частиц. Теперь, когда оказалось, что элементарные частицы сами по себе — это кванты различных полей, можно сказать в том же смысле, что природа вещества определяется квантовыми полями.

Современная квантовая теория поля — это, по существу, совокупность ряда теорий, относящихся к отдельным полям и взаимодействиям двух полей: электронно-позитронного с электромагнитным, нуклонного с мезонным и т. д. Конечно, будущая полная теория элементарных частиц должна рассматривать все квантовые поля совместно. Будущая теория должна дать объяснение числу видов элементарных частиц, их массам и другим свойствам. Возможно, что трудности современной теории — расходимость электромагнитной массы, дополнительного заряда — могли бы быть устранены при совместном рассмотрении всех квантовых полей. Но создание такой единой теории элементарных частиц пока затрудняется отсутствием опытных данных; они могли бы облегчить поиски руководящего принципа для построения единой теории квантовых полей.

Новые неожиданные открытия могут быть сделаны при изучении элементарных частиц. В частности, недавно были обнаружены факты, заставляющие сомневаться в элементарности гиперона. Истолкование этих опытных данных ведет к представлению о гипероне как о возбужденном нуклоне. Если последующие опыты подтвердят подобное представление, то тогда придется по-иному подойти к вопросу об элементарности протона и нейтрона. Тогда эти опыты будут началом изучения нового мира — мира протона.

Но какие бы ни были новые открытия, основные представления квантовой теории поля сохранят свою силу в своей области. Развитие теории пойдет по пути создания более полной теории, отражающей глубже объективную реальность и содержащей современную квантовую теорию поля как частный случай.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Квантовая теория поля и физика элементарных частиц	3
Классические поля	9
Теория относительности и теория поля	14
Квантовые закономерности и теория поля	17
Частицы — это кванты поля	23
Новые идеи	31
Заключение	37

Редактор: кандидат физико-математических наук *Г. Ф. Друкарев*

М-45039.

Подписано к печати 3/VIII 1955 г.

Тираж 9000.

№ заказа 1170.

Объем 2 $\frac{1}{4}$ п. л.

Типография ЛОЛГУ.

Цена 75 коп.