

В теории косвенных измерений автор впервые формулирует требование, которое должно быть наложено на устройство, пригодное для косвенного измерения некоторой величины, относящейся к системе (x). Требование это относится к характеру взаимодействия между данной системой (x) и другой системой (y), над которой возможны уже прямые измерения. Нужно, чтобы, измеряя состояние системы (y) после взаимодействия, мы могли заключить о состоянии системы (x) до взаимодействия. Характер взаимодействия должен это обеспечить. В предположении взаимно-однозначного соответствия между величинами, относящимися к системам (x) и (y), требование это сводится к тому, чтобы после взаимодействия часть волновой функции, соответствующая рассеянной волне, имела вид произведения функции от x на функцию от y . Как указано в примечании на стр. 367, а также в конце лекций (стр. 401), предположение о взаимной однозначности не является необходимым и вводится только для простоты; если его не вводить, то простое произведение может быть заменено суммой произведений членов определённого вида.

На основе сформулированного требования разбирается весьма интересный пример косвенного измерения импульса нейтрона, а также пример устройства для измерения координаты частицы (гейзенберговский микроскоп). При анализе этих примеров используются результаты, полученные в лекциях по избранным вопросам оптики.

Дальнейшим весьма интересным примером является измерение координаты частицы, находящейся на вершине потенциального барьера. Несмотря на краткость курса лекций по основам квантовой механики (имеется только пять лекций), курс этот чрезвычайно содержателен и изложенные в нём идеи Л. И. Мандельштама заслуживают дальнейшей разработки, которая могла бы и устранить отмеченные в настоящей рецензии неясности.

Кроме упомянутых курсов лекций, в пятый том включены вступительные лекции к ряду семинаров по оптике, теории колебаний и другим физическим проблемам. В этих вступительных лекциях, чрезвычайно ярких и увлекательных, перечисляются проблемы, которые должны быть рассмотрены на семинаре, и каждая из областей физики, о которых говорит Л. И. Мандельштам, предстаёт перед читателем как живая, со всеми её текущими вопросами. Особо следует отметить лекции по вопросам теории колебаний — области, где Л. И. являлся глубоким знатоком.

Книга в целом чрезвычайно интересна и заслуживает самого внимательного изучения.

В. Фок

Сдвиг уровней атомных электронов и дополнительный магнитный момент электрона согласно новейшей квантовой электродинамике. Сборник статей. Перевод и рефераты В. И. Григорьева и Н. П. Клепикова. Под редакцией и со вступительной статьёй Д. Д. Иваненко. Изд. иностранной литературы. Москва, 1950. Стр. 222. Цена 14 р. 50 к.

Рецензируемая книга представляет собой сборник переводных статей и рефератов, посвящённых последним достижениям в области релятивистской квантовой механики (главным образом тех её разделов, которые касаются квантовой электродинамики и теории электрона).

Для того чтобы ясно представить себе смысл и значение содержащихся в сборнике работ, следует вспомнить исторический ход развития релятивистской квантовой механики. Обычная — нерелятивистская — квантовая механика, математически основывающаяся на уравнении Шредингера, несмотря на ряд блестящих успехов, оказалась не в состоянии объяснить некоторые экспериментальные факты, как, например, тонкую структуру спектра атома водорода. Более того, сам факт спонтанного

излучения света возбуждённым атомом не мог быть последовательно объяснён в рамках нерелятивистской теории, ибо она рассматривает электромагнитное поле как нечто, заданное извне; спонтанное же излучение, как мы теперь знаем, связано с обратным действием поля электрона на самый электрон. Далее, никакого объяснения не получало экспериментально установленное существование собственного механического и магнитного момента у электрона, и представление о спине приходилось вводить в теорию *ad hoc*, как некоторое дополнительное предположение.

Эти неудачи нерелятивистской квантовой механики были совершенно естественны и неизбежны, ибо во всех перечисленных случаях речь шла о релятивистских эффектах, которые, по сути дела, не могли охватываться квантовой механикой Шредингера. Возникла необходимость создания квантовой теории, учитывающей требования специального принципа относительности, — необходимость создания релятивистской квантовой механики. Соответствующие работы и появились в конце двадцатых — начале тридцатых годов нашего века, причём уже первые шаги возникающей релятивистской квантовой теории ознаменовались значительными успехами: получила решение проблема спонтанного излучения света атомами; тонкая структура водородного спектра была объяснена теорией в полном соответствии с данными эксперимента того времени; наконец, существование спина оказалось непосредственным следствием релятивистских квантовых свойств электрона, описываемых уравнением Дирака. При этом отношение механического момента электрона к магнитному, вычисленное теоретически, прекрасно совпадало с имевшимися экспериментальными данными.

Дальнейшие исследования привели к новым успехам релятивистской квантовой механики, самые, казалось бы, невероятные следствия которой (существование позитрона) оправдывались опытом. Теоретические расчёты всех без исключения наблюдаемых эффектов взаимодействия электрона с электромагнитным полем, как-то: фотоэффекта, рассеяния света на электроне, тормозного излучения света, образования и аннигиляции электронно-позитронных пар и др. — оказались в прекрасном согласии с экспериментом. Созданная на этой основе (в основном, советскими учёными — Ландау и Румером, Иваненко и Соколовым, Таммом и Беленьким) каскадная теория ливней в космических лучах сумела объяснить ряд экспериментальных фактов и является сейчас надёжным подспорьем для дальнейших исследований, касающихся уже более сложных, неэлектромагнитных процессов в космических лучах.

Казалось бы, положение релятивистской квантовой механики незыблемо. Однако это не так. Следует отметить, прежде всего, что ряд принципиальных вопросов, давно уже стоявших перед теоретической физикой, не находил (и не находит) в релятивистской квантовой механике своего разрешения. Почему заряд электрона e (точнее, безразмерная величина

$\frac{e^2}{hc}$, где h — постоянная Планка, c — скорость света) имеет то,

а не другое значение? Почему не наблюдается элементарных частиц с зарядом, кратным e ? Почему отношения масс элементарных частиц имеют то, а не другое значение? На все эти вопросы релятивистская квантовая механика (равно как и прежние теории) не даёт никакого ответа. Правда, одно это обстоятельство само по себе вряд ли можно считать серьёзным дефектом теории. Плохо, конечно, что все указанные факты внутренне никак не связаны с аппаратом теории но всё же, вероятно, можно было бы примириться с этим, — считая, что решение таких вопросов лежит за рамками релятивистской квантовой механики и входит в компетенцию некоей будущей теории, — если бы релятивистская квантовая механика сама по себе была внутренне непротиворечивой наукой. Но фактически, повидимому, дело обстоит не так. Наряду с

блестящими успехами релятивистская квантовая механика с самого своего зарождения приводила и приводит к ряду абсурдных, физически бессмысленных результатов, свидетельствующих о её несовершенстве (а может быть, и внутренней противоречивости). С одним из таких бессмысленных результатов мы встречаемся в первой же задаче, с которой имела дело квантовая электродинамика, — в теории спонтанного излучения света атомами. Именно, попытка рассчитать так называемую «естественную» ширину спектральной линии, обусловленную конечным «временем жизни» возбуждённого состояния, привела к нелепому выводу о бесконечно большом сдвиге частоты излучаемого света (чего в действительности, конечно, отнюдь не наблюдается). Любопытно, однако, что наряду с этим самая ширина спектральной линии получилась совершенно правильной, так что если бы можно было «забыть» о бесконечном сдвиге частоты, то всё было бы в порядке. В дальнейшем оказалось, что такое положение вещей является характерным для всех без исключения случаев, рассматриваемых в квантовой электродинамике: при попытке более точно учесть взаимодействие электрона с полем излучения мы приходим к бесконечным (т. е. физически бессмысленным) выражениям для всех тех эффектов, которые в первом приближении прекрасно объяснялись теорией. Некоторые из этих бесконечностей были уже давно хорошо известны в физике. Они встречались ещё в классической электродинамике, в которой, как известно, электромагнитная масса электрона оказывалась бесконечной, если считать электрон точечным зарядом. В квантовой теории эта трудность с бесконечной собственной массой сохранилась в полной мере. Более того, квантование привело к новым осложнениям, не имеющим аналога в классической теории и обусловленным именно квантовым характером поля. Дело в том, что, как показывает квантовая электродинамика, даже в вакууме, когда фотонов нет, напряжённость электромагнитного поля равна нулю только в среднем; точное же значение её является неопределённым и флуктуирует около нуля. Благодаря взаимодействию с этими так называемыми нулевыми колебаниями электрон приобретает дополнительную энергию, которая формально оказывается бесконечной (так называемая «поперечная» собственная масса, она обусловлена взаимодействием с поперечными колебаниями поля). Этот последний результат — бесконечное значение собственной энергии — является, разумеется, физически бессмысленным и свидетельствует лишь о каких-то дефектах теории. Существенно, однако, что от него нельзя просто «отмахнуться», ибо те же самые нулевые колебания поля в вакууме обуславливают, в конечном счёте, и спонтанное излучение света возбуждённым атомом.

Аналогичные трудности (появление формально бесконечного дополнительного заряда у электрона) появляются и при последовательном квантовомеханическом рассмотрении электронно-позитронного вакуума.

Создалась парадоксальная ситуация, вероятно, единственная в истории науки. С одной стороны, расчёты различных наблюдаемых эффектов, произведённые в первом неисчезающем приближении теории возмущений, приводят к прекрасному совпадению с экспериментом во всех без исключения случаях. С другой стороны, попытки улучшить расчёт, более точно и последовательно, учитывая взаимодействие электрона с полем излучения, приводят к появлению физически бессмысленных расходящихся выражений — тоже во всех без исключения случаях. При этом физическая причина появления ряда бесконечностей — взаимодействие с «квантовым вакуумом» (т. е. с нулевыми колебаниями поля) — та же самая, что и причина, обуславливающая ряд наблюдаемых эффектов (например, спонтанное излучение света возбуждёнными атомами).

Не видя путей решения возникшей проблемы, теоретики вынуждены были попросту игнорировать появляющиеся бесконечные выражения, огра-

ничиваясь только результатами первого неисчезающего приближения теории возмущений. Надежда возлагалась на то, что будущая теория сумеет разобраться в процессах, происходящих при больших энергиях, и несколько видоизменит обычные формулы электродинамики, так что расходящиеся сейчас члены окажутся конечными и обусловят лишь малую, лежащую за пределами точности современного эксперимента, поправку к результатам первого приближения. Такой подход к делу, в известной степени оправдывавшийся хорошим совпадением предсказаний теории с опытом, оказался довольно плодотворным. Так, например, А. А. Соколову, Гайтлеру и Вильсону удалось построить последовательную квантовомеханическую теорию реакции излучения при рассеянии мезонов нуклонами (или света — электронами).

С принципиальной точки зрения, однако, такое положение вещей было совершенно неудовлетворительным, и ещё в предвоенные и военные годы появилось значительное количество работ, посвящённых попыткам анализа и устранения возникших трудностей. Однако все они носили в значительной степени «академический» характер, никак не будучи связаны с экспериментом, точность которого тогда была недостаточной для этих целей. Неудивительно поэтому, что указанные исследования не привели к какому-либо положительным результатам. Как и всегда в таких случаях, новый толчок развитию теории дали новые факты, открытие которых стало возможным благодаря появлению новой экспериментальной техники.

Речь идёт всё о тех же явлениях, с объяснения которых началось развитие релятивистской квантовой механики, — о тонкой структуре водородного спектра и о магнитном моменте электрона. С помощью созданных в последние годы весьма точных радиоспектроскопических методов исследования было выяснено, что: а) тонкая структура водородного спектра не полностью передаётся теорией Дирака (уровни $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$, которые теоретически должны совпадать, фактически разделены интервалом в 1062 Мгц); б) магнитный момент электрона μ не равен одному магнетону Бора μ_0 (как то требуется теорией Дирака), а несколько превышает это значение:

$$\mu = \mu_0 + \mu_0 \delta,$$

где $\delta = 0,0012 + 0,0002$.

Таким образом, впервые эксперимент разошёлся с предсказаниями первого приближения релятивистской квантовой механики. Идея объяснения сдвига термов (высказанная ещё в 1938 г. Д. И. Блохинцевым) весьма проста. Как мы уже говорили выше, благодаря взаимодействию электрона с нулевыми колебаниями поля излучения энергетические уровни электрона в атоме смещаются (сдвиг частоты спектральной линии). Формально в современной теории этот сдвиг оказывается бесконечным (что связано с формально бесконечной собственной массой электрона), и потому до сих пор он просто игнорировался. Если же, однако, в будущей, нам пока не известной, теории смещение уровней окажется конечным, то для различных уровней оно будет, вообще говоря, различным, и расстояние между уровнями изменится по сравнению с вычисляемым из обычного уравнения Дирака. Возникает вопрос: нельзя ли ещё в рамках современной теории найти разность смещений двух различных уровней и, если она окажется конечной, рассматривать её как реальный эффект; бесконечные же абсолютные значения смещений отнести за счёт несовершенства нашей теории, которое-де в дальнейшем будет устранено? Этот приём получил название перенормировки массы, ибо практически он сводится к тому, что в смещении уровня выделяется расходящаяся часть, формально совпадающая с бесконечной собственной массой свободного электрона; она объединяется затем с «механической» («изначально» стоявшей в уравнении Дирака) массой с экспериментально наблюдаемую, конечную массу элек-

трона m . Конечный же остаток от этой вычитательной операции трактуется как наблюдаемый эффект.

Таким путём Бете действительно удалось количественно объяснить смещение уровней в атоме водорода. Аналогичные идеи были использованы и при вычислении дополнительного магнитного момента электрона

(Люттингер), причём теоретическое значение, равное $\mu_0 \frac{1}{2\pi} \frac{e^2}{\hbar c}$, оказалось в прекрасном согласии с экспериментальными данными.

Таким образом, взаимодействие электрона с «квантовым вакуумом» оказалось существенным и вполне реальным эффектом. Проблема исследования этого взаимодействия заняла центральное место в современной релятивистской квантовой механике.

Следует отметить, однако, что, невзирая на внешний успех, работу Бете трудно было признать убедительной. Дело в том, что вычитание расходящихся выражений математически является совершенно неоднозначной операцией, позволяющей получить любой результат; поэтому совпадению с опытом, собственно говоря, не приходится удивляться. С этой же неоднозначностью связано возможное нарушение релятивистской инвариантности расчёта (несмотря на формально инвариантный вид теории). Возникла необходимость более чёткой, чем раньше, формулировки квантовой электродинамики, позволяющей контролировать инвариантность на каждом этапе вычислений. Такая формулировка была дана в ряде работ; много работ было посвящено также приложению новых методов к решению ряда конкретных задач, до сих пор не поддававшихся удовлетворительной теоретической трактовке. В результате создался, по существу, новый раздел релятивистской квантовой механики, задачей которого является изучение взаимодействия элементарных частиц с нулевыми колебаниями электромагнитного и мезонных полей.

В работах нового «вакуумного» направления достигнут ряд успехов; однако следует всё же отметить, что основные принципиальные трудности релятивистской квантовой механики попрежнему остаются неразрешёнными. Эти проблемы передаются в наследство «будущей теории»; свою же основную задачу авторы нового направления видят только в разработке однозначных и хотя бы формально инвариантных вычислительных методов, которые позволили бы исследовать радиационные поправки, отодвинув на задний план трудности с расходясьностями.

Между тем безразличное отношение к решению принципиальных проблем теории не проходит даром, ибо если в ней есть коренные физические дефекты, то они неизбежно рано или поздно скажутся, несмотря ни на какие чисто математические «регуляризационные» ухищрения. И действительно, даже математически наиболее совершенная из всех зарубежных работ в этой области — статья Паули и Вилларса — по существу не даёт инвариантного способа вычислений в рамках существующей теории, ибо, как отмечают сами авторы, у них не выполняется теорема Лауэ. Эта трудность, на наш взгляд, ещё не получила вполне последовательного разрешения. Есть основания думать, что она не случайна, а обусловлена весьма глубокими причинами, связанными с чисто формальным характером инвариантности современной квантовой электродинамики.

Всё изложенное даёт основание считать, что проблема взаимодействия электрона с «квантовым вакуумом» ещё далеко не решена. Неясно даже, может ли она быть полностью разрешена в рамках современной теории. Тем не менее, даже сама постановка этой задачи является серьёзным достижением и представляет большой интерес; не случайно работы в области «теории вакуума» пользуются сейчас большим вниманием теоретиков. Именно работам этого нового направления и посвящён рецензируемый сборник.

Открываясь вступительной статьёй редактора, сборник содержит 10 полностью переведённых статей и 82 реферата экспериментальных

и теоретических работ. Полностью переведены: статья Вейскопфа «Новейшее развитие теории электрона», содержащая обзор развития электродинамики от Лоренца до самого последнего времени; три экспериментальные работы, посвященные открытию и исследованию сдвига уровней в атоме водорода и дополнительного магнитного момента электрона; упоминавшиеся выше теоретические работы Бете и Люттингера; статьи Дайсона (обзор новых методов в квантовой электродинамике) и Френча и Вейскопфа (исследование сдвига уровней прежними методами) и, наконец, работа Паули и Вилларса «О инвариантной регуляризации релятивистской квантовой теории», в математическом отношении являющаяся, пожалуй, наиболее совершенной из всех зарубежных работ этого направления. Рефераты охватывают весьма широкий круг литературы по теории «квантового вакуума» и смежных вопросов, начиная со старых работ Дирака и Гейзенберга и кончая 1950 г. Подбор статей для перевода произведен, по нашему мнению, весьма удачно; жаль только, что не переведена вторая статья Дайсона («Матрица S в квантовой электродинамике»). Удивительным образом эта весьма важная работа даже не прореферирована в сборнике. На наш взгляд, следовало бы также перевести (а не просто прореферировать) работу Вельтона «Некоторые наблюдаемые эффекты, обусловленные квантомеханическими флуктуациями электромагнитного поля», которая выгодно отличается от большинства работ нового направления своей физической «прозрачностью» и отсутствием формалистических устремлений. Наконец, хотелось бы видеть переведенными работы Фейнмана по новой формулировке квантовой механики и квантовой электродинамики, являющиеся, по мнению рецензента, наиболее интересными и глубокими из всех зарубежных работ в этой области.

Качество переводов и рефератов, в основном, удовлетворительно; однако в одном месте всё же вкралась существенная ошибка: в реферате № 56 (посвященном работе Снайдера «О внешней поляризации вакуума») говорится (стр. 204), что a_k представляет собой оператор уничтожения позитрона, в то время как фактически эта величина определена у Снайдера как оператор рождения позитрона.

Вступительная статья весьма ясно и подробно характеризует идейную сторону нового направления и излагает историю его развития. В полной мере отмечается там (так же как и в примечаниях редактора в тексте статей) роль и значение работ советских учёных в этой области. По мнению рецензента, однако, в статье недостаточно подчеркнут формальный характер многих достижений «вакуумного» направления. То обстоятельство, что принципиальные трудности теории попрежнему остаются нерешёнными, хотя и отмечается во вступительной статье, но, на наш взгляд, недостаточно подчёркивается там.

Отмеченные недочёты, однако, не умаляют сколько-нибудь серьёзно ценности рецензируемого сборника. Он содержит богатый и хорошо систематизированный материал и окажется весьма полезным как для теоретиков, работающих в данной области, так и вообще для физиков, желающих ознакомиться с новейшим развитием релятивистской квантовой механики. Следует пожелать, чтобы издание такого рода сборников продолжалось и впредь.

В. Бонч-Бруевич

Редактор Г. В. Розенберг

Техн. редактор С. С. Гаврилов

Подписано к печати 26.IX 1951 г. Бумага 60×92^{1/16} 5,625 бум. л. 11,25 печ. л. (включая 6 вклеек) 12,62 уч.-изд. 44880 тип. зн. в печ. л. Т07256. Тираж 4370 экз. Цена 10 руб.

13-я типография Главлитиздатов при Совете Министров СССР.
Москва, Гарднеровский пер., 1а