

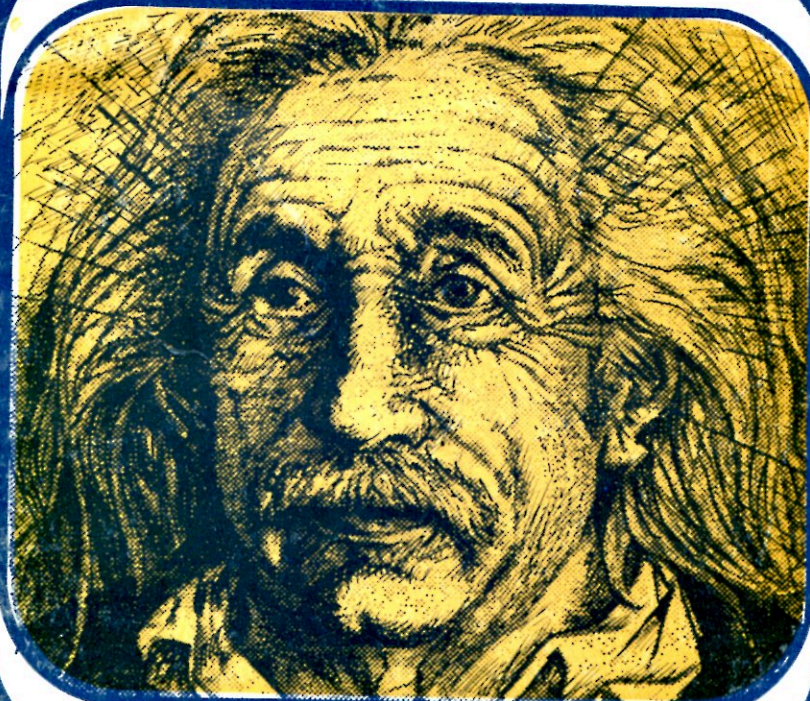
ЗНАНИЕ

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
ФИЗИКА

**ЭЙНШТЕЙН
И СОВРЕМЕННАЯ
ФИЗИКА**

10'79



Л. Д. Ландау

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЭЙНШТЕЙН
И СОВРЕМЕННАЯ
ФИЗИКА

Серия
«Физика»,
№ 10, 1979 г.

СБОРНИК СТАТЕЙ

Издается
ежемесячно
с 1946 г.

Издательство
«Знание»
Москва
1979

Э 33 Эйнштейн и современная физика. Сборник статей. М., «Знание», 1979.

80 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 10. Издается ежемесячно с 1946 г.)

Брошюра посвящена столетию со дня рождения одного из выдающихся физиков — Альберта Эйнштейна. В ней рассмотрены некоторые аспекты научного творчества и мировоззрения Эйнштейна. В брошюре освещены актуальные проблемы общей теории относительности, показан вклад Эйнштейна в развитие квантовой теории и стиль научного мышления физиков XX в. Материал рассчитан на широкий круг читателей.

20401

22.3

И Ю. КОБЗАРЕВ,

доктор физико-математических наук

**ЭЙНШТЕЙН И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
ПЕРВОЙ ТРЕТИ XX ВЕКА**

Трудно усомниться в том, что первая треть XX в. была одним из самых героических периодов как в истории физики в целом, так и в теоретической физике. Для экспериментальной физики этот период начался прямым вторжением в мир атомных масштабов, предпосылки которого создали открытия 90-х гг. XIX в.: рентгеновские лучи, радиоактивность, исследование катодных лучей, а закончился он открытием нейтрона, заложившим основу протонно-нейтронной модели ядра. Трудность пройденной дистанции становится очевидной, если вспомнить, что к 1900 г. не было вообще сколько-нибудь прямых экспериментальных данных в пользу «атомной гипотезы»; существование атомов оспаривалось рядом влиятельных физиков и химиков (среди которых был Э. Мах), и еще в 1909 г. М. Планк считал спор достаточно серьезным, для того чтобы объяснять: «Если я говорю, что атом водорода весит $1,6 \cdot 10^{-24}$ г., то это положение не менее обосновано, чем то, что Луна весит $7 \cdot 10^{25}$ г. Правда, я не могу ни положить атом водорода на чашку весов, ни вообще увидеть его. Но и Луну я тоже не в состоянии положить на весы».

Как бы ни были блистательны достигнутые результаты, все же, вероятно, первоклассный экспериментатор 90-х гг., такой, как, скажем, Рентген, наверное, мог бы без особенно больших психологических затруднений понять работу Чедвика, в которой был открыт нейтрон; а если бы он с помощью машины времени оказался в его рабочей комнате, то он бы понял и ход опыта и сам метод эксперимента. Эпоха гигантских ускорителей, аппаратуры, весящей сотни тонн, и обработки результатов эксперимента с помощью ЭВМ «on line»* еще была впереди.

* «on line» — английский термин, обозначающий обработку результатов в процессе проведения эксперимента. — *Прим. ред.*

Зато почти немислимо представить себе теоретика поколения Пуанкаре и Лоренца, читающего, скажем, одну из важнейших работ конца 20-х гг.: статью Паули и Гейзенберга «К квантовой динамике волновых полей», в которой впервые в замкнутой и полной форме на примере квантовой теории электромагнитного поля была рассмотрена та теоретическая структура, которая и сейчас, в 1979 г., лежит в основе современной «теории материи» — релятивистская квантовая теория поля. Конечно, теоретик 90-х гг. узнал бы функцию Лагранжа в § 1 и, может быть, с удовольствием проследил бы за переходом от полевого описания к механике дискретной системы, но все дальнейшие выводы происходят в мире коммутационных соотношений, четырехмерной геометрии пространства — времени и статистики Бозе—Эйнштейна. В этом мире он не узнал бы не только объектов и понятий, но и всю структуру отношений между ними, характер самих вопросов и ответов — все изменилось полностью за тридцатилетие.

Прежде всего изменился сам стиль и характер теоретических работ. На рубеже XX в. теоретическая физика занималась математическим описанием интуитивно легко воспринимаемых и в этом смысле понятных образов. В консервативном варианте (Пуанкаре) это был механический эфир и ньютоновская механика; в более абстрактном варианте (Лоренца) это было электромагнитное поле в эфире, почти лишенном механических свойств, который зато как бы отождествился с ньютоновским абсолютным пространством. В обоих случаях все происходило в универсальном ньютоновском времени.

К концу 20-х гг. теоретики «отказались от наивной наглядности в пользу анализа понятий и соответствия между наблюдаемыми данными и математическими величинами теоретического формализма». (Из предисловия В. Паули к его «Теории относительности» в издании 1956 г.). Место наглядной картины мира заняли образы, которые хотя и не являются совершенно недоступными интуиции, но в полной форме могут быть описаны только на языке абстрактных математических структур, таких, как четырехмерная Риманова геометрия или Гильбертово пространство.

Как бы ни был огромен пройденный путь, он был пройден за время профессиональной жизни одного человека. Так что тот самый А. Зоммерфельд (1868—

1951 гг.), который начал свою жизнь в физике в 1891 г. с работы «Механическое представление электромагнитных явлений в покоящихся телах», где предлагалась модификация гироскопической модели эфира, придуманной В. Томсоном для объяснения электрических и магнитных процессов, издал в 1929 г. дополнительный том к своей знаменитой в те годы книге «Строение атома и спектры», в котором излагалась волновая механика, в том числе если не квантовая теория поля, то уравнение Дирака.

Эйнштейн не захотел пройти весь путь вместе с наукой своего времени; присущий ему неконформизм сделал его взаимоотношения с теоретической физикой его времени сложными и необычными. Если в 1905 г. он выдвинул гипотезу квантов света, которая опередила время примерно на 20 лет и практически единодушно (с серьезными основаниями) считалась неприемлемой вплоть до 1925 г. экспертами всех возрастов — от Планка до Бора и Гейзенберга, то после 1925 г. Эйнштейн, не приняв квантовую механику, оказался вообще вне русла, по которому теоретическая физика развивалась в последующее тридцатилетие. И тем не менее именно по высказываниям теоретиков, принадлежавших к поколению «молодых людей», родившихся около 1900 г., на долю которых выпало сделать решающие работы конца 20-х гг., придавшие основам квантовой теории ту форму, которую она сохраняет почти без изменений и сейчас, прежде всего Гейзенберга, Дирака и Паули, мы увидим, что любой из них не только подчеркивал важность конкретных результатов Эйнштейна для развития теории — конкретные результаты были и у других теоретиков и поколения Планка, и поколения Эйнштейна. Мы увидим, что именно Эйнштейна они считают создателем стиля и духа новой физики.

Я уже цитировал Паули, легко найти аналогичные высказывания у Дирака и Гейзенберга. Так, в лекции Дирака «Методы теоретической физики» (перевод в УФН 102, 291, 1972) мы прочтем: «Чтобы понять атмосферу, в которой работали в то время физики-теоретики, нужно представить себе огромную притягательную силу, которой обладала теория относительности. Теория относительности буквально встряхнула научный мир, вспыхнув в конце долгой и трудной войны. Каждый хотел забыть напряжение войны и жадно примыкал к по-

вому образу мышления, новой философии. Энтузиазм был абсолютно беспрецедентным в истории науки». Наверное, упоминаемые Дираком исторические обстоятельства действительно сыграли свою роль в том, что «каждый» — не только профессиональные теоретики, но и пресса, и самые широкие круги образованной публики проявили в 20-е гг. огромный и шумный интерес к частной и общей теории относительности. Этому шумному интересу, конечно, очень содействовало еще и то, что в 1919 г. английские астрономы Ф. Дайсон, А. Эддингтон и К. Дэвидсон сообщили о количественном подтверждении предсказания Эйнштейна, относящегося к отклонению света вблизи Солнца. Половина эффекта, как известно, связана с неевклидовостью пространства — и волшебная материализация слухов о таинственных неевклидовых геометриях, постоянно проникавших в публику уже около полстолетия, наряду со столь же удивительными сообщениями о нестарящихся путешественниках и других открытых Эйнштейном волшебствах не могла не поражать воображения публики. Но для профессиональных молодых теоретиков, видимо, более существенным был сам стиль «новой философии» — готовность к пересмотру основных понятий, если к этому приводит анализ опытных фактов, и смелое оперирование абстрактными математическими структурами, заменившими наглядные модели. Чтение известных мемуаров В. Гейзенберга «Часть и целое» сразу делает очевидным, в какой степени так или иначе интерпретируемая «точка зрения Эйнштейна» относительно целей и методов теоретической физики определила мышление теоретиков поколения Гейзенберга. Тем более были они поражены, когда Эйнштейн отказался принять копенгагенскую интерпретацию квантовой механики и, по существу, квантовую механику вообще, которая, как им казалось, полностью соответствовала стилю теоретической физики, созданному Эйнштейном.

Основные результаты, полученные Эйнштейном, относятся к 1905—1925 гг. Рассмотрим их в контексте того, что происходило в физике тех лет.

Основным итогом развития, происходившего в это время, было создание атомной теории, основанной на модели атома Резерфорда, электромагнитных взаимодействиях ядер и электронов друг с другом и квантовой механике. Уже в 1930 г. было достаточно очевидно,

что теория в принципе объясняет «все» свойства материи в земных условиях, от химической связи до упругих постоянных и цветов тел, пока не затрагивается ядро атома. Конечно, на самом деле только создание метода перенормировок в конце 40-х гг. позволило оценить, насколько далеко может продвигаться теория в проблемах, не связанных со структурой ядер, и, конечно, сравнительно не так уж много величин можно вычислить прямо через массу электрона, массы ядер, заряд электрона и постоянные h и e , но способность теории объяснить основные черты самых разнообразных явлений, от химической связи до теплоемкости металлов, и воспроизводить основные зависимости между физическими величинами была ясна уже тогда и с тех пор находила все новые и новые подтверждения.

Наиболее законченные и в этом смысле классические достижения Эйнштейна — частная и общая теория относительности, в то время когда они создавались, находились вне основной линии развития физики. Частная теория относительности оказалась включенной в нее сравнительно быстро — с появлением работы Дирака 1928 г., в которой было открыто релятивистское волновое уравнение для электрона. Применение методов квантовой механики к взаимодействию электрона Дирака с электромагнитным полем Максвелла — Лоренца дает квантовую электродинамику (КЭД), теорию электромагнитных взаимодействий фотонов и электронов, являющуюся наиболее последовательным обоснованием атомной теории в целом. Таким образом, после создания КЭД теория относительности легла в основу всего здания существующей теории атомных явлений.

Правда наличие у протонов и нейтронов не только электромагнитных, но и сильных взаимодействий делает более ограниченной применимость аналогичных методов КЭД к взаимодействию электронов с ядрами, и, разумеется, практически большинство расчетов в «атомной теории», скажем, в теории твердого тела, делается в нерелятивистском приближении, без всякого явного использования методов квантовой электродинамики и релятивизма; практически атомная физика осталась нерелятивистской.

Зато при изучении взаимодействий элементарных частиц, как электромагнитного, так и открытых уже в 30-е гг. слабого и сильного, аппарат частной теории от-

посительности давно уже стал повседневным инструментом и теоретика, и экспериментатора. Ни одна формула не может быть написана и ни один опыт не может быть обработан без использования релятивистской кинематики. Это, конечно, связано с тем, что здесь мы имеем дело с энергиями порядка или, как правило, даже много большими энергии покоя частиц.

Что касается общей теории относительности, то это удивительное создание Эйнштейна еще более опередило время и в течение более пятидесяти лет оставалось изолированным. Ситуация начала существенно меняться только в последнее десятилетие. Сейчас значительная часть теоретиков, занимающихся теорией фундаментальных взаимодействий, работают над проблемой объединения нескольких известных сейчас типов взаимодействия — электромагнитных, слабых и сильных. Существенное продвижение на пути к объединению электромагнитного и слабого взаимодействий было достигнуто Вайнбергом и Саламом; существует большое формальное сходство между теорией Вайнберга и Салама и принимаемой сейчас теорией сильных взаимодействий — квантовой хромодинамикой. Это позволяет надеяться, что возможна объединенная теория всех трех взаимодействий.

Существует некоторое структурное сходство и между теориями всех этих взаимодействий и эйнштейновской теорией тяготения. Поэтому многие теоретики пытаются сейчас строить единую теорию всех взаимодействий, включая гравитацию.

Необычное положение Эйнштейна в физике его времени, сделавшее его образ почти легендарным, как бы самим олицетворением профессии физика-теоретика, и одновременно обрекшее его после 1927 г. на почти полную изоляцию, сложилось не сразу.

Друг Эйнштейна М. Бессо, познакомившийся с ним около 1897 г., вспоминал о нем как о «молодом человеке со страстным интересом к науке, поглощенным проблемами осязаемости атомов и эфира». Сейчас мы знаем, что первая, оставшаяся неопубликованной, статья Эйнштейна, написанная, по-видимому, в 1895 г., содержала предложения по обнаружению «деформаций» эфира, соответствующих магнитному полю тока, по наблюдениям за распространением света в таком «деформированном» эфире, и таким образом имеем прямое

свидетельство интереса Эйнштейна к эфиру. Потом тема эфира исчезает; впервые опубликованные статьи Эйнштейна 1901—1904 гг. посвящены атомам.

Наиболее значительные из этих работ: три статьи по статистическому обоснованию термодинамики 1902—1904 гг. продолжают линию развития, начатую и разработавшуюся Максвеллом и Больцманом, в работах которых можно найти достаточно развитую теорию систем со многими степенями свободы в условиях теплового равновесия, т. е. начала статистической физики. Молодой Эйнштейн начинал там, где завершил свой научный путь современник Максвелла и Больцмана, Дж. Гиббс — в упомянутых трех статьях он независимо от Гиббса развил, хотя в менее полном виде и хронологически несколько позже, общие основы статистической физики, получив то, что теперь называют распределением Гиббса, выражение энтропии через статистический вес и ряд других результатов.

Эти работы Эйнштейна находятся таким образом непосредственно в русле великой традиции Максвелла — Больцмана, и не удивительно, что дальнейшие его работы, идущие в этом направлении, и прежде всего работы по теории броуновского движения, близко перекликаются с работами Смолуховского (1872—1917 гг.), получившего образование в Вене и слушавшего там лекции Больцмана, который независимо и одновременно с Эйнштейном разработал теорию броуновского движения. Можно упомянуть еще работу Эйнштейна по теории опалесценции 1910 г., непосредственно иницированную статьей Смолуховского на эту же тему.

Работы Эйнштейна по теории броуновского движения открыли дорогу для экспериментального подтверждения не только и не столько существования атомов, которое в то время получало доказательства самого разного рода, в том числе столь наглядное, как обнаружение дифракции рентгеновских лучей на кристаллах, сколько основных идей статистической физики, до этого нередко ставившихся под сомнение.

Две другие работы 1905 года, опубликованные в том же немецком физическом журнале «Annalen der Physik», означали вступление на совершенно новые пути. Первая из них, «К электродинамике движущихся тел», содержала основы частной теории относительности, во второй «Об одной эвристической точке зре-

ния, касающейся возникновения и превращения света», обсуждалась гипотеза о том, что излучение состоит из отдельных корпускул — квантов света.

Первая из этих статей принесла Эйнштейну славу нового Коперника. Вторая очень долго считалась ошибочной, ее отвергал и М. Планк, в 1913 г., и Н. Бор в 1922, и даже Гейзенберг в 1925 г., который, если судить по его уже упомянутым выше мемуарам, на вопрос Эйнштейна, как он относится к квантам света, ответил: «Можно ли поверить в существование квантов света, я еще не решил». В обоих случаях реакция сообщества теоретиков была вполне рациональной и понятной.

Посмотрим, в чем было дело.

Оценка работы по частной теории относительности как коперниковского переворота содержалась уже в ранних высказываниях М. Планка, вероятно, самого влиятельного немецкого теоретика того времени. Как сообщает биограф Эйнштейна Ф. Франк, еще в 1910 г. М. Планк, рекомендуя Эйнштейна Пражскому университету, писал: «Если теория Эйнштейна окажется верной, а я думаю, что так будет, его будут считать Коперником XX столетия». На рубеже 20-х гг. слова Г. Вейля о «теоретико-познавательном подвиге Эйнштейна, ставящем его имя наравне с именем Коперника», звучали, скорее всего, уже привычно.

Разумеется, современники Эйнштейна прекрасно знали работы Лоренца, Пуанкаре и других его предшественников, наиболее важные из них цитируются, скажем, в известном обзоре Паули, но как раз они не могли не ощутить тот резкий скачок к совершенно новому взгляду на вещи, который содержался в работах Эйнштейна.

Лоренц и Пуанкаре, доказав «теорему относительности» — невозможность обнаружить движение относительно эфира, совсем не считали проблему ясной. Что касается Пуанкаре, то об этом красноречиво свидетельствует известное место из большой статьи 1905 г., в которой он, сравнивая все построение Лоренца—Пуанкаре с теорией Птолемея, пишет об ожидаемом Копернике; Лоренц же в работе 1904 г. вообще, по-видимому, не считает принцип относительности строгим и даже не формулирует его явно.

Это не удивительно. Метод, которым Лоренц и Пуанкаре доказывали теорему относительности, вовсе не

предполагал того, что мы привыкли видеть теперь, ни введения равноправных инерциальных систем отсчета, оснащенных своими масштабами и синхронизированными часами, ни вообще изучения преобразований координат от одной системы отсчета к другой. В методе Лоренца и Пуанкаре все оставалось «по старому», как в классической физике: классический эфир, связанная с ним система координат и измерявшееся в ней истинное, ньютоновское время. Тем не менее, заглянув в работы Лоренца и Пуанкаре, мы увидим там формулы преобразований Лоренца, которые, как всем известно, связывают координаты и время в двух инерциальных системах. Но в том-то и дело, что у Лоренца и Пуанкаре это не так!

В этих работах преобразования Лоренца связывают координаты и времена событий для двух процессов. Один из них происходит в покоящемся относительно эфира теле, другой — в таком же движущемся. Зная теорию относительности, легко получить, что такая связь действительно дается формулами Лоренца. Лоренц и Пуанкаре теории относительности не знали и делали прямое доказательство совсем другим методом.

Предполагая, что процесс, о котором идет речь, — электромагнитный и описывается электродинамикой Лоренца, при некоторых гипотезах о структуре электрона, приводивших к «правильной» зависимости массы от скорости (т. е. той, которую мы теперь выводим безмодельно из постулатов Эйнштейна или других, аналогичных им), Лоренц и, в более последовательной и полной форме, Пуанкаре получили, что если процесс в неподвижном теле описывается решением уравнений электродинамики Лоренца, то и процесс в движущемся теле будет также решением, если ввести нужные лоренцевские сжатие и соответствующие запаздывания. Предполагая, что все это универсально — все силы и массы преобразуются так же, как электромагнитные, они пришли к выводу, что движение относительно эфира обнаружить нельзя. Так, например, в опыте Майкельсона темное пятно в интерферометре сместится, если интерферометр начнет двигаться, но и сам интерферометр сожмется, и в результате темное пятно попадет на то же деление шкалы, — и так всегда. Все это было совершенно верно, но несудивительно, что Пуанкаре ждал Коперника — при таком описании поведение электронов

и интерферометров кажется, конечно, совершенно мистическим.

Переход Эйнштейна к рассмотрению всех инерциальных систем как равноправных был переворотом, который и был воспринят как Коперниковский. Насколько он был трудным, лучше всего видно из того, что Пуанкаре несколько раз делал первые шаги к анализу измерений в движущейся системе отсчета: в 1900, 1904 и 1908 гг. — и никогда не довел его до конца. Вполне возможно, что Пуанкаре до встречи с Эйнштейном на Сольвеевском конгрессе 1911 г. вообще не знал, что преобразования Лоренца могут иметь смысл преобразований от одной системы отсчета к другой. Во всяком случае в 1908 г., если судить по статье «Динамика электрона», он этого не знал.

Эйнштейн, конечно, не «объяснил», почему масштабы и часы ведут себя так, как они это делают, но, рассмотрев всю совокупность инерциальных систем и проанализировав измерения в них, он увидел, что речь идет не о причудливых компенсациях, а о новой, пользуясь его терминологией, «кинематике», т. е. о том, что пространство и время имеют свойства, отличные от предполагавшихся ранее. При этом свойства эти таковы, что оказывается выполненным и принцип относительности, т. е. полная эквивалентность всех инерциальных систем отсчета, и одновременно скорость света оказывается постоянной, универсальной для всех этих систем.

Основой конструкции Эйнштейна было одновременное введение в каждой системе отсчета времени и координат, определяемых синхронизированными светом часами и стандартными масштабами. Это позволило сразу обнаружить полное равноправие всех таких систем и относительность релятивистских эффектов. На смену эфирцентрической картине Лоренца — Пуанкаре пришла картина, уравнивавшая в правах всех инерциальных наблюдателей.

На профессионалов-теоретиков прозрачность и логичность нового подхода, избавившего от необходимости искать объяснение того, почему Природа так упорно и точно компенсирует сжатия и запаздывания, производила неотразимое впечатление; одновременно становилось ясным и то, что вся старая картина мира с абсолютным ньютоновским временем и абсолютной од-

новременностью в действительности есть только грубое приближение. Выяснилось, что на самом деле все обстоит сложнее, и само понятие «состояние мира в данный момент» не имеет смысла. «Мир» перестал быть чередой следующих «во времени» состояний — теперь он состоит из событий, которые только частично упорядочены соотношениями «до — после».

Появившаяся через три года работа Минковского указала естественное геометрическое воплощение этой картины, введя в физику, кажется, впервые, необычную по своей абстрактности математическую структуру — четырехмерную неевклидову геометрию.

В работе Эйнштейна по теории относительности одним из основных инструментов исследования была предельно конкретная реализация основных понятий: время сопоставлялось синхронизированным часам, координаты — измерениям со стандартными масштабами. Дальнейшие мысленные эксперименты с этими объектами позволяли — с учетом общих постулатов теории — увидеть неизбежность отказа от представления о неограниченной применимости классических представлений о времени и пространстве.

Анализы опытов с часами, линейками и световыми лучами в сочетании с использованием абстрактной четырехмерной геометрии, теории групп и других новшеств в работах по теории относительности, последовавших за работой Эйнштейна, уже знаменовали появление того стиля и метода, который затем сыграл решающую роль и при создании самим Эйнштейном общей теории относительности, и в период рождения квантовой теории.

Проблема принципа относительности в оптике и электродинамике назревала весь XIX в., и каким бы неожиданным не оказалось данное Эйнштейном решение, на самом деле, это было в значительной степени «снятием лесов» с уже построенного здания электродинамики Максвелла и Лоренца. Тот факт, что на самом деле в частной теории относительности идет речь об универсальных пространственно-временных закономерностях, в тот момент не имел большого значения, так как в 1905 г. кроме электромагнитного взаимодействия физики знали только гравитационное. Таким образом, эвристические возможности частного принципа относительности, накладывающего жесткие ограничения на

форму физических теорий, можно было пробовать только на гравитации, о которой, по существу, было очень мало известно. Несколько таких попыток Эйнштейн сделал в 1906—1907 гг., но здесь он столкнулся с задачей, не имевшей себе равных по трудности: если сравнивать историю релятивистской теории тяготения — общей теории относительности — с историей электродинамики, то нужно было, зная только закон Кулона, воссоздать, опираясь на принцип относительности, всю электродинамику Максвелла—Лоренца; даже и это дает только неполное представление о трудности задачи, так как переход от небесной механики Ньютона к теории тяготения Эйнштейна потребовал такого глубокого пересмотра основных понятий, что его можно сравнить только с тем, что произошло при создании квантовой механики. В конце концов Эйнштейн решил эту проблему, но в 1905—1907 гг. после первых попыток он все же снова возвратился к атомной теории, все более и более переходившей в то время в центр внимания теоретиков его поколения.

Несомненно, что в 1905—1911 гг. Эйнштейн рассматривал себя прежде всего как физика, занимающегося прежде всего атомной теорией; это проявилось даже в том, что для лекции, прочитанной им при вступлении в 1909 г. в его первую профессорскую должность (а такая лекция согласно немецкой научной традиции, к которой Эйнштейн принадлежал, считалась программной), он выбрал тему «О значении атомной теории для современной физики».

В самой атомной физике работы Эйнштейна и Смолуховского о Броуновском движении и близких вопросах с принципиальной точки зрения сияли классическую проблематику статистической интерпретации термодинамики. После того, как этот вопрос был решен, стали более ясно вырисовываться две проблемы, оказавшиеся потом неразрывно соединенными: проблема квантовой теории, связанная с тем, что в мире атомов применимость классических закономерностей ограничена квантовыми, на что уже в 1905 г. указывали многие факты, и сама проблема создания модели атома.

Эйнштейн, в отличие, например, от Лоренца, а затем Бора и Зоммерфельда, никогда не проявлял интереса к задаче разработки модели атома, но сама квантовая проблема, начиная с уже упоминавшейся работы

1905 г., стала в последующие шесть лет основным предметом его усилий.

Работы Эйнштейна 1905—1911 гг. сыграли чрезвычайно большую роль в развитии квантовой теории в эти годы, в это время они вместе с работами и идеями самого Планка определяли ее развитие и прокладывали путь для других исследователей, число которых начало быстро расти, начиная приблизительно с 1910 г.

При этом решающее значение имела тогда вовсе не статья о квантах света. Эта работа в то время почти не нашла последователей и продолжателей и считалась скорее ошибочной. Наибольшее значение в начальный период, несомненно, имела работа Эйнштейна о теплоемкости твердых тел, в которой он показал, что квантовая гипотеза, примененная к колебаниям атомов в твердых телах, объясняет отклонения от предсказаний классической статистики. Это открыло путь для многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, в результате которых стало ясно, что квантовые закономерности не относятся только к черному излучению, а распространяются на все атомные явления; одновременно при этом снялись кричащие противоречия между предсказаниями статистики, основанной на классической механике, и опытом, перед лицом которых сторонники атомной теории, начиная с Максвелла, вынуждены были беспомощно умолкать. В немалой степени все это было одной из причин того, что к 1911 г. когда в Брюсселе собрался первый Сольвеевский конгресс, среди его участников было уже доминирующим убеждение в необходимости создания новой механики атомных явлений, учитывающей квантовые закономерности...

Краткая, но очень полная история развития квантовой теории в период 1900—1913 гг. содержится в знаменитой статье Н. Бора 1913 г., где, в частности, говорится: «На всеобщее значение теории Планка для обсуждения поведения атомных систем впервые указал Эйнштейн. Соображения Эйнштейна были затем развиты и применены к различным явлениям в особенности Штарком, Нернстом и Зоммерфельдом».

Названный здесь И. Штарк был, кажется, единственным, кто в этот период пытался развивать самую смелую из идей Эйнштейна того периода — гипотезу квантов света. Большинство же теоретиков, в том числе Планк и Лоренц, правильно (в рамках того, что

тогда можно было себе вообразить) считали в то время, что эту гипотезу нельзя совместить с явлениями интерференции и дифракции.

Как сам Эйнштейн преодолевал эту трудность? Нет ничего более ошибочного, чем рассматривать его работы по теории световых квантов как непрерывное поступательное движение к идее корпускулярно-волнового дуализма. В действительности Эйнштейн исходил из наивно-реалистической картины, намеки на которую содержатся уже в самой статье 1905 г. В развернутой форме она изложена в докладе на Зальцбургском съезде немецких физиков 1909 г. Тогда Эйнштейн считал, что волновая картина, описываемая уравнениями Максвелла, возникает только при больших плотностях квантов: «Все же мне кажется пока наиболее естественным, что появление электромагнитных полей света должно быть связано с особыми точками, так же, как появление электростатических полей в электронной теории. Не исключено, что в такой теории всю энергию электромагнитного поля можно будет считать локализованной в этих особых точках, совсем как в старой теории дальнего действия. Я представляю себе каждую такую точку, окруженную силовым полем, которое в основном носит характер плоской волны с амплитудой, уменьшающейся с удалением от особой точки. Если большое число таких особых точек находится на расстояниях, малых по сравнению с размерами силового поля одной особой точки, то силовые поля будут перекрываться и в целом дадут волновое силовое поле, быть может очень мало отличающееся от волнового поля в смысле современной электромагнитной теории света».

Такая картина, конечно, не имеет ничего общего с дополнительным описанием корпускулярных и волновых свойств частиц, которое дает современная квантовая теория. В частности, она предполагает, что интерференция будет исчезать при малых интенсивностях, чего на опыте не происходит.

В период 1905—1911 гг. Эйнштейн, как свидетельствует его переписка тех лет, напряженно пытался реально построить теорию электромагнитного поля, которая была бы конкретным воплощением приведенной выше картины. Эти попытки оказались неудачными. Одновременно как раз успех работ Эйнштейна по квантовой теории теплоемкости все больше указывал на то, что

квантовые закономерности универсальны и относятся не только к электромагнитному полю. Но это означало, что поиски объяснения квантовой природы света в конкретной модели электромагнитного поля теряли смысл.

Насколько явно или неявно это видел сам Эйнштейн, мы, может быть, и не узнаем, но в письме к Бессо 13 мая 1911 г. он писал: «Вопрос о действительном существовании квантов я уже больше не задаю. Я также не пытаюсь больше их конструировать, поскольку знаю, что мне с этим не справиться».

Наверное, чувство безнадежности дальнейших попыток решения проблемы квантов было одной из причин, по которым Эйнштейн как раз начиная с 1911 г. целиком уходит в проблему теории тяготения — наступает героический период 1911—1915 гг., закончившийся созданием прекраснейшей из известных нам физических теорий — теории тяготения Эйнштейна.

Несомненно, что сама постановка задачи была хорошо подготовлена. Интуитивная неудовлетворенность развитой Ньютоном теорией дальнего действия ощущалась с самого начала, в том числе самим Ньютоном. Попытку построить полевою теорию тяготения можно найти у Максвелла, а настойчивость, с которой А. Пуанкаре вплоть до 1908 г. возвращался к теории Лесажа, дававшей, как теперь кажется, очень наивную механическую модель тяготения, бросается в глаза. Сам Пуанкаре ясно понимал уже в 1904 г. несовместимость ньютоновской теории с постулатом универсальной Лоренц-инвариантности и в 1905 г. предложил описание тяготения с помощью запаздывающих потенциалов. Эпизодические попытки включить тяготение в систему релятивистских идей предпринимались в период 1905—1911 гг. Одна из них была сделана в 1907 г. самим Эйнштейном и уже использовала идею, ставшую затем доминантой его поисков, — принцип эквивалентности.

Предпринимались также и попытки объяснить релятивистскими эффектами хорошо уже известную тогда аномальную прецессию перигелия Меркурия. Тем не менее вплоть до статей Эйнштейна 1911 г. все это оставалось разрозненными эпизодами.

По-видимому, история всех известных физических теорий, кроме общей теории относительности, есть история трудного приспособления «мыслей к фактам и мыслей друг к другу». Все они описывали или объясняли

области явлений, достаточно изученные на опыте, и опирались на уже установленные частные закономерности. Но начав строить релятивистскую теорию тяготения, Эйнштейн вторгся в область явлений, которая для эксперимента того времени оставалась еще совершенно «Неизведанной Землей».

Даже сейчас релятивистские эффекты порядка v/c , не говоря уже о полностью релятивистском эффекте гравитационных волн, пока не наблюдались в лаборатории. Только совсем недавно астрономы открыли компактные системы двойных звезд, где релятивистские эффекты велики и где, кстати, по-видимому, проявляется и торможение, вызванное излучением гравитационных волн. Только сейчас становятся многочисленными, разнообразными и точными также и измерения эффектов общей теории относительности в Солнечной системе. Только сейчас можно сказать, что наблюдения и измерения широким фронтом вошли в области, описываемые релятивистской теорией тяготения Эйнштейна, становящейся повседневным инструментом теоретической астрофизики и основным орудием в интерпретации данных наблюдений (гипотеза черных дыр, космология), и таким образом теория здесь опередила опыт по крайней мере на полстолетия.

История теоретической физики знает много блестящих работ и все же трудно найти что-то сравнимое с тем, что сделал Эйнштейн в геронческие годы 1911—1915. Все работы его великого десятилетия 1905—1915 поражают прежде всего необычайным инстинктом реальности, помогавшим ему угадывать истину и двигаться вперед в зыбком тумане, казалось бы, противоречивых фактов и идей, и блестящим мастерством теоретика, позволявшим ему превратить угаданное в систему четко сформулированных общих принципов, кладущихся в основу теории. Нигде это не проявилось с такой силой, как в работах по общей теории относительности. Начиная работу, Эйнштейн мог использовать хорошо проверенный факт равенства тяжелой и инертной массы, а для проверки своих теорий располагал прецессией Меркурия, это исчерпывало факты, к которым надо было приспособлять теорию. Очевидно, что дороги от явлений к теории не было, но Эйнштейн смог, опираясь на факт равенства масс и на предположение Маха об относительности сил инерции, угадать постулат,

ставший основой дальнейшей работы, названный им принципом эквивалентности. Хорошо известно, что в формулировке Эйнштейна принцип эквивалентности понимается как утверждение о том, что присутствие поля тяготения эквивалентно переходу к ускоренной системе отсчета. Это утверждение, конечно, не является точным, пределы его применимости и сейчас однозначно не установлены, однако в руках Эйнштейна он стал орудием необычайной силы. В процессе «приспособления мыслей друг к другу» всегда существенную роль играл мысленный эксперимент, вскрывающий самому экспериментирующему истинное содержание тех понятий и постулатов, с которыми он работает. Вряд ли когда-нибудь мысленные опыты играли такую большую роль, как при создании общей теории относительности. Экспериментируя с принципом эквивалентности в релятивистских условиях, Эйнштейн шаг за шагом пришел к предсказанию явления красного смещения, неевклидовости пространственной метрики, необходимости использования общей римановой геометрии, к принципу общей ковариантности и в 1915 г. к окончательной форме уравнений тяготения.

В 1911 г., когда Эйнштейн опубликовал первую из серии своих работ по теории тяготения, его статьи не проходили незамеченными, и вслед за Эйнштейном к теории тяготения обратился целый ряд теоретиков, но никто из них не оценил значение принципа эквивалентности; на пути к тензорной теории у Эйнштейна в первые годы не было спутников, кроме работавшего с ним М. Гроссмана. Только Гильберт с его блестящим интеллектом, у которого Эйнштейн побывал в Геттингене летом 1915 г., оценил его великий замысел и принял участие в его окончательной реализации.

Нельзя сказать, что весь ученый мир с замиранием сердца следил за героическими усилиями Эйнштейна: внимание большинства наиболее сильных теоретиков как эйнштейновского поколения: Бора, Зоммерфельда, Лауэ, Дебая, Борна и Эренфеста, так и следующего поколения теоретиков, начинавших работать на рубеже 20-х гг., было в основном поглощено проблемами быстро развивающейся квантовой теории. Вряд ли многие вообще изучали тогда общую теорию относительности, кроме, конечно, двух блестящих молодых людей — Паули, начавшего свой путь с нескольких работ по об-

шей теории относительности и написавшего обзор «Теория относительности», и сейчас, как мне кажется, не имеющий себе равных по глубине понимания, и Ферми, значительная часть ранних работ которого также посвящена проблемам общей теории относительности. Как бы то ни было, наиболее значительные вклады в развитие теории в первые 10 лет ее существования принадлежат астрономам и математикам: Фридману, де-Ситтеру, Гильберту, Вейлю и самому Эйнштейну, который еще в 1917 г., применив свои уравнения тяготения к описанию мира в целом, заложил основу современной космологии.

Сразу же после завершения общей теории относительности Эйнштейн снова вернулся к проблеме квантовой теории, дав свой известный вывод формулы Планка, использующий понятие спонтанного и вынужденного переходов, в котором содержался зародыш идеи современных лазеров; но какие бы блестящие идеи ни содержали работы Эйнштейна 1916—1926 гг., относящиеся к квантовой теории, а в их числе работа, где содержалась идея Бозе-конденсации, легшая в основу современных теорий микроскопических квантовых эффектов — сверхпроводимости и сверхтекучести, — не эти работы формировали в то время ход событий, определявшийся прежде всего усилиями Бора, Зоммерфельда, а позже и Борна и их молодых сотрудников и учеников.

Наиболее близкой к эйнштейновским работам блестящего десятилетия 1905—1915 гг. была работа де-Бройля и Шредингера и, конечно, не случайно различные тона отзывов в письмах к Бессо: о работе Гейзенберга «настоящее колдовское исчисление... В высшей степени остроумно, и благодаря своей сложности застраховано от доказательства ошибочности» и о работах Шредингера: «Шредингер сделал две замечательные работы о правилах квантования. Раскрывается глубокая истина...» Тем не менее и сделанное Шредингером быстро оказалось включенным в «колдовское исчисление» операторов и Гильбертовых векторов.

Эйнштейн не считал решение, данное современной квантовой теорией, удовлетворительным. Дальнейшие его тридцатилетние труды были посвящены упорным поискам теории, которая должна была объединить электромагнитное и гравитационное взаимодействие и одновременно дать новое решение проблемы квантов. Попытки

эти не привели к успеху, и все же они, как и многое, что делал Эйнштейн, чем-то предвосхитили будущее; та игра с Лагранжианами теории поля, которой Эйнштейн занимался последнее тридцатилетие своей жизни, если не по результатам, то по стилю напоминает то, что сегодня делают теоретики, ищущие единые теории взаимодействий элементарных частиц. То, что Эйнштейн не квантовал свои теории, не так мешает сходству, так как и сейчас начинают с установления классического Лагранжиана.

Программа построения единой теории всех взаимодействий, которую пытаются сейчас осуществить, предполагает фактически далекий выход за пределы возможностей существующих опытов. Удастся ли это сделать, вряд ли можно предсказать; пока успех, достигнутый Эйнштейном при построении общей теории относительности, остается неповторенным и непревзойденным.

ЛИТЕРАТУРА

Визгин В. П. Эйнштейн и другие, к истории создания общей теории относительности. — «Природа», 1979, № 5, с. 27.

Кобзарев П. Ю. А. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория. — «Природа», 1979, № 5, с. 8.

Кобзарев П. Ю. Доклад А. Пуанкаре и теоретическая физика накануне создания общей теории относительности. — «Успехи физических наук», 1974, т. 113, с. 679.

Э. М. ЧУДИНОВ,

доктор философских наук, профессор

РАЦИОНАЛИЗМ ЭЙНШТЕЙНА И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Эйнштейн не только заложил фундамент современной физики, но и внес существенный вклад в формирование стиля научного мышления XX века. Впрочем, эти два момента не следует противопоставлять друг другу: создание новых фундаментальных научных теорий так или иначе сопряжено с разработкой новых эталонов научного описания, объяснения и обоснования, т. е. всего того, что определяет стиль научного мышления.

Если попытаться кратко охарактеризовать стиль научного мышления Эйнштейна, то это можно было бы сделать, назвав этот стиль рационалистическим. Рационализм составляет, пожалуй, одну из самых характерных черт творческого метода Эйнштейна, его способа познания мира. Он во многом определил направление научной деятельности Эйнштейна и был идейной основой оценки Эйнштейном тенденций в развитии современной физики. Лишь приняв во внимание ту фундаментальную роль, которую играла рационалистическая концепция в мировоззрении Эйнштейна, можно понять мотивы, руководствуясь которыми он создавал специальную и общую теорию относительности, стремился к созданию единой теории поля, отвергал квантовую механику в ее копенгагенской интерпретации.

Рационализм Эйнштейна многогранен. Его составляющие неравноценны по той роли, которую они сыграли в развитии современной физики. Поэтому для того, чтобы ответить на вопрос: в каком отношении находится рационализм Эйнштейна к современной физике — необходимо проникнуть в его микроструктуру.

Рационализм не был изобретением Эйнштейна. Он сформировался еще на ранних этапах развития философской и научной мысли. При этом сам термин «рационализм» выражал различное содержание. Можно выде-

лить три основных его значения. Во-первых, рационализм олицетворял веру в безграничность познавательных возможностей человеческого разума. В этом смысле он не был каким-то особым методом научного познания, а совпадал с научным познанием как таковым. Наука по своей сущности рационалистична, а философский рационализм всегда служил ее естественной философской основой. Во-вторых, под рационализмом в философии понимается гносеологическая концепция, утверждающая приоритет логико-теоретического познания перед чувственно-эмпирическим. Наконец, в-третьих, термин рационализм служил обозначением определенной онтологической концепции — понимания мира как гармонической, рационально построенной системы.

Традиционный гносеологический рационализм представлял собой философскую односторонность, столь же ущербную, как и его альтернатива — эмпиризм. Если эмпиризм рассматривал теоретическое знание как непосредственный продукт опыта, результат его индуктивного обобщения, то рационализм трактовал теоретическую компоненту как обладающую полной автономией по отношению к чувственному опыту, эксперименту. Внутренняя логика развития рационализма неизбежно приводила его к априоризму.

Именно таким был рационализм Декарта и Канта. Будучи математиком, Декарт хорошо понимал, что математические истины не являются продуктом непосредственного обобщения опыта и не нуждаются в эмпирической проверке. Что же в таком случае служит критерием истинности математических знаний? Ответ на этот вопрос подсказывался аксиоматической структурой геометрии. Истинность геометрических теорем выводится из аксиом. Аксиомы — это исходные принципы математического знания. Следуя Евклиду, Декарт считал, что аксиомы принимаются без доказательства именно потому, что их истинность самоочевидна. Он обобщил эту версию аксиоматического метода в математике и экстраполировал ее на все научное знание. Он считал, что в основе всего знания лежат интуитивно ясные самоочевидные принципы, из которых можно вывести все содержание науки, причем не только математики, но и физики. Эти принципы по Декарту являются врожденными, что и обуславливает априорный характер всего научного знания.

В отличие от Декарта Кант отрицал существование априорных идей, изначально присущих человеческому разуму. Но он считал, что человеческое мышление располагает некоей априорной формальной структурой категорий, которая накладывается на данные чувственного опыта и позволяет осмыслить их. Эта структура служит основой так называемых априорных синтетических суждений, посредством которых формулируются все законы теоретического естествознания, в том числе и физики.

Хотя в споре между эмпиризмом и рационализмом Эйнштейн отдавал свои философские симпатии рационализму (Эйнштейн, в частности, высоко ценил философию Канта), он никогда не разделял его крайности — априоризма. Его собственный рационализм был способом преодоления как эмпиризма, так и априоризма. Для достижения этой цели Эйнштейн проводил четкое различие между процедурами выдвижения и подтверждения теории. С его точки зрения, теория обладает автономией по отношению к опыту при ее создании. Это проявляется в том, что содержание теории не может быть логически выведено из опыта. Эйнштейн писал: «Не существует никакого индуктивного метода, который мог бы вести к фундаментальным понятиям физики»¹. Эти понятия представляют, по Эйнштейну, свободные творения человеческого разума. Но физическая теория все же связана с опытом. Эта связь состоит в том, что выводы, вытекающие из нее, допускают эмпирическую проверку. Если процедура выдвижения теории демонстрирует несостоятельность эмпиризма, индуктивизма, то процедура ее подтверждения указывает на ложность априоризма.

Представление Эйнштейна о характере отношения физической теории к опыту лишено той односторонности, которая свойственна традиционному рационализму. Оно соответствует действительной природе физического познания. Ни одна физическая теория, в особенности если она фундаментальная, не может рассматриваться как чисто индуктивное обобщение опытных данных. Можно указать на два обстоятельства, свидетельствующих в пользу несостоятельности идеи индуктивной выводимости физической теории из опыта. Во-первых, ни-

¹ А. Эйнштейн, Собр. научных трудов, т. IV. М., 1967, с. 213.

дуктивная выводимость теории означала бы, что опыт однозначно определяет характер базирующейся на нем теории. Однако в действительности дело обстоит иначе: одни и те же эмпирические данные совместимы с различными, подчас взаимоисключающими теоретическими построениями. Во-вторых, физическая теория включает в себя не только описание тех опытных данных, на которые она непосредственно опирается. В нее входит также формальный аппарат, который является результатом развития логики и математики и который не может быть получен из каких-либо конкретных экспериментов.

Одной из иллюстраций индуктивной невыводимости физической теории может служить общая теория относительности Эйнштейна. Было бы наивно думать, что она вытекает из единственного эмпирического факта — эквивалентности тяжелой и инертной масс. Прежде всего сам по себе этот факт не приводит к общей теории относительности. Он связан с ней лишь при условии определенной его интерпретации (при соответствующем изменении его интерпретации он может рассматриваться как эмпирическая предпосылка не общей теории относительности, а, например, конкурирующей с ней тензорно-скалярной теории гравитации). Но даже в том случае, когда факт эквивалентности тяжелой и инертной масс берется в трактовке, приводящей к общей теории относительности, он не может считаться достаточным ее основанием. Из него нельзя получить ни вывода о том, что гравитация имеет геометрическую природу, ни ковариантных уравнений гравитационного поля. Для получения этих выводов нужны дополнительные гипотезы. В частности, для вывода гравитационных уравнений требуется постулирование следующих формальных условий: пространство—время четырехмерно, его структура определяется симметричным метрическим тензором, уравнения должны быть инвариантными относительно группы непрерывных преобразований. Все это связано с чисто логическим развитием теории.

Физическое знание имеет не индуктивную, а гипотетико-дедуктивную структуру. Законы физики первоначально выступают как некоторые гипотезы о структуре мира. Из них методами дедукции выводятся эмпирически проверяемые следствия. Проверка следствий означает проверку всей теоретической системы. Гипотетико-дедуктивная форма построения теории представляет,

таким образом, способ ее подключения к результатам эксперимента.

Гипотетико-дедуктивная схема была свойственна физике со времени ее возникновения. Но это обстоятельство не всегда ясно осознавалось самими учеными. Например, Ньютон считал, что законы физики являются результатом индуктивного обобщения опыта и решительно выступал против метода гипотез. Осознание гипотетико-дедуктивной структуры физики пришло лишь тогда, когда эта наука приобрела более абстрактный характер, когда ее понятия лишились наглядности и возможности прямой их эмпирической интерпретации. Не случайно заслуга в этом принадлежит Эйнштейну — автору наиболее сложных и абстрактных теорий.

Открытие гипотетико-дедуктивной структуры физического познания еще не делает Эйнштейна рационалистом в гносеологическом значении этого слова. Действительный рационализм Эйнштейна связан со специфическим пониманием этой структуры, с определенной расстановкой акцентов. Несмотря на то что физическое познание имеет гипотетико-дедуктивную структуру, ученые пользуются ею по-разному. Некоторые из них приходят к гипотезам через эксперимент (хотя, разумеется, эти гипотезы не выводятся индуктивно из опыта), другие — через размышления над основаниями физики. В этом проявляется различие их творческих методов. Метод, которым пользуются ученые второго рода, рационалистичен в том смысле, что в их творческой деятельности делается акцент на более или менее свободном развитии теории, которое должно в конечном счете привести к предвосхищению результатов эксперимента. Эйнштейн, несомненно, принадлежал к этой категории ученых. Он был рационалистом по своему творческому методу, по стратегии научного поиска.

Это подтверждается всем творчеством Эйнштейна и в особенности тем, как Эйнштейн создавал свои основные детища — специальную и общую теорию относительности. Так, при создании специальной теории относительности Эйнштейн отталкивался не от опыта Майкельсона², а от противоречия между механикой и элект-

² Американский историк науки Д. Холтон нашел документы, свидетельствующие о том, что Эйнштейн, по-видимому, не знал результатов опыта Майкельсона в момент создания специальной теории относительности.

троединимой. Это противоречие состояло, как известно, в том, что законы механики удовлетворяли принципу относительности Галилея, тогда как законы электродинамики — нет. Эйнштейн считал это противоречие недопустимым. Он преодолел его путем обобщения принципа относительности, что и составило содержание его специальной теории относительности. Аналогичная картина наблюдалась и при создании общей теории относительности. К этой теории Эйнштейн пришел на основе чисто логических соображений. Его не удовлетворяла выделенность инерциальных систем, по отношению к которым можно было бы сформулировать инвариантные законы. Он считал, что физические законы могут быть сформулированы в общековариантной форме, одинаковой как для инерциальных, так и неинерциальных систем. Реализация этого замысла и привела Эйнштейна к общей теории относительности.

Рационализм как философская концепция представляет собой «философскую надстройку» над творческим методом Эйнштейна. Он не сводится к постулированию гипотетико-дедуктивной структуры физического знания, а является акцентированием на тех ее аспектах, в которых проявляется автономия логико-теоретического знания по отношению к эмпирии. Это, естественно, относится к характеристике процедуры выдвижения теории. Само по себе акцентирование еще не есть преувеличение. Поэтому рационализм Эйнштейна не следует квалифицировать как философскую крайность, аналогичную эмпиризму.

Но рационализм Эйнштейна не ограничивается констатацией относительной самостоятельности теории в период ее выдвижения. Он проявляется и в специфическом понимании процедуры подтверждения теории. Далеко не всякое совпадение эмпирических следствий теории с результатами эксперимента может служить ее подтверждением. Эйнштейн по этому поводу пишет, что «часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений»³. В связи с этим возникают два вопроса: какого рода факты, согласующиеся

³ А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. IV. М., 1967, с. 266.

с теорией, могут считаться ее подтверждением, и достаточно ли одних фактов для проверки истинности теории? Рассматривая эти вопросы, Эйнштейн вводит понятие о «неэмпирическом» критерии истины и гипотезах *ad hoc*⁴.

Когда физическая теория сталкивается с фактами, которые не укладываются в нее, возникает целая совокупность теорий, гипотез, призванных объяснить эти факты. Хотя все они могут быть согласованы с этими фактами, последние подтверждают их в разной степени. В связи с этим возникает вопрос о выборе одной из нескольких конкурирующих между собой теорий и гипотез. Эйнштейн считал, что этот выбор может быть осуществлен на основе принципа простоты. Из нескольких конкурирующих теорий, согласующихся с одними и теми же фактами, истинна та, которая является наиболее простой.

Эйнштейн проводил различие между двумя типами теорий — специально придуманными для объяснения уже известных фактов и теми, из которых факты получаются как логические следствия. Он отдавал явное предпочтение теориям второго типа, считая теории первого типа теориями *ad hoc*. Он сконструировал типично рационалистическую модель научного познания. Подлинно научная теория обладает определенного рода суверенностью по отношению к фактам. В своем развитии она искусственно не приспособливается к фактам, а, наоборот, предвосхищает их. В такого рода модели не остается места для теорий *ad hoc*.

Эйнштейн продемонстрировал свой рационалистический идеал процедуры подтверждения теории на примере критического анализа лоренцевской интерпретации отрицательных результатов опыта Майкельсона по определению «истинного» движения Земли относительно неподвижного эфира. Как известно, этот опыт привел к неожиданному результату: оказалось, что скорость света не зависит от движения его источника. Этот результат находился в очевидном противоречии с классической механикой, в частности, с классическим законом сложения скоростей. Для того чтобы преодолеть это противоречие и спасти как классическую механику, так и теорию неподвижного эфира, Лоренц выдвинул свою контракционную гипотезу, согласно которой длины всех

⁴ *ad hoc* (лат.) — для данного случая.

тел, проходящих через эфир, сокращаются. Эйнштейн так оценил теорию Лоренца: «Известно, что противоречие между теорией и опытом формально было устранено гипотезой Г. А. Лоренца и Фицджеральда, согласно которой движущиеся тела испытывают определенное сокращение в направлении своего движения. Но эта гипотеза, введенная *ad hoc*, кажется всего лишь искусственным средством спасения теории; опыт Майкельсона и Морли обнаружил, что эти явления согласуются с принципом относительности даже тогда, когда этого нельзя было ожидать от теории Лоренца. Поэтому создавалось впечатление, что от теории Лоренца надо отказаться, заменив ее теорией, которая основывается на принципе относительности, ибо такая теория позволила бы сразу предвидеть отрицательный результат опыта Майкельсона—Морли»⁵. Эйнштейн считал огромным методологическим преимуществом теории относительности то, что эта теория, созданная независимо от опыта Майкельсона, в то же время превосходит его. Путь развития теории относительности соответствовал рационалистическому идеалу физического познания.

В каком отношении к реальному физическому познанию находится эйнштейновская рационалистическая концепция процедуры подтверждения теории? Прежде всего несколько слов о принципе простоты. Роль этого принципа в физическом познании общепризнанна. Он позволяет осуществлять выбор одной из многих теорий, опирающихся на одни и те же эмпирические факты. Единственное замечание, которое можно сделать в адрес эйнштейновской интерпретации этого принципа, заключается в том, что вряд ли правомерно рассматривать этот принцип как априорное требование, предъявляемое к теории. Хотя принцип простоты внешне выглядит как своего рода неэмпирический критерий истины, в действительности он сам должен пройти проверку. Это особенно ярко проявляется в тех ситуациях, когда в понятие простоты вкладывается различное содержание и требуется найти такой смысл этого понятия, который наиболее полно соответствует физике. Иллюстрацией этого может служить заочная полемика между Пуанкаре и Эйнштейном по вопросу о том, что следует понимать под простотой, когда речь идет об эмпирической проверке физической геометрии.

⁵ А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. I. М., 1965, с. 66.

Пуанкаре еще в самом начале нашего века обратил внимание на то, что эмпирическая проверка одной геометрии невозможна. Мы всегда проверяем не изолированную геометрию, а геометрию плюс физику. Допустим, мы считаем физическим аналогом евклидовой прямой луч света. В том случае, если траектория реального светового луча не совпадает с евклидовой прямой, т. е. луч света искривляется в поле тяготения, у нас всегда имеется возможность двойкой интерпретации этого эмпирического факта. Во-первых, мы можем утверждать, что физический принцип, определяющий экстремальность траектории светового луча, верен, что луч света распространяется по прямой, но эта прямая представляет собой геодезическую линию в искривленном неевклидовом пространстве. Во-вторых, мы можем интерпретировать этот факт как доказательство неправильности физического принципа экстремальности светового луча. В этом случае принимается, что само физическое пространство является евклидовым, но траектория светового луча не имеет прямолинейного характера.

Хотя оба описания факта искривленности светового луча в гравитационном поле эмпирически эквивалентны, ученый, по мнению Пуанкаре, всегда предпочтет второй способ описания, основанный на сохранении евклидовой геометрии. Причина этого заключается в том, что евклидова геометрия является наиболее простой. Таким образом, в решении вопроса о выборе одного из двух описаний одних и тех же фактов Пуанкаре апеллировал к принципу простоты.

Совершенно иным к решению данной проблемы был подход Эйнштейна. Эйнштейн считал, что наибольшую ценность имеет не простота геометрии, а простота системы — геометрия + физика. Причем в данном случае понятие простоты употребляется не в смысле интуитивной простоты, которую имел в виду Пуанкаре, называя наиболее простой евклидову геометрию, а в смысле общности предпосылок теоретической системы. Такого рода простота не только не исключает сложности геометрии, а, наоборот, предполагает ее. Основываясь на таком понимании простоты, Эйнштейн отдает предпочтение первой интерпретации эмпирического факта, на который обратил внимание Пуанкаре.

История показала, что эйнштейновская трактовка

простоты является наиболее глубокой. Но каким образом ученые пришли к этому выводу? Пользуясь своей концепцией простоты, Эйнштейн создал общую теорию относительности. Общая теория относительности была не только наиболее простым описанием таких физических фактов, как искривление светового луча. Из нее следовали совершенно новые эмпирические выводы, которые нельзя было ожидать, основываясь на концепции евклидовости пространства. Именно то, что эти выводы оказались правильными, служит доказательством не только общей теории относительности, но и эйнштейновской концепции простоты.

Значительно сложнее обстоит дело с оценкой эйнштейновской концепции суверенности теории и отношения Эйнштейна к теориям *ad hoc*. Безусловно, что такого рода концепция не была произвольно придумана Эйнштейном. Она возникла на основе обобщения его научной практики, прежде всего практики создания специальной и общей теории относительности. Но Эйнштейн, насколько об этом можно судить по его философским эссе, считал подобную практику универсальной. Однако при попытке придать универсальный характер рационалистическому пониманию процедуры подтверждения теории, Эйнштейн столкнулся с трудностями. Оказалось, что далеко не всегда теория может предвосхищать факты. В некоторых случаях ученые вынуждены пользоваться гипотезами *ad hoc*. Примером тому может служить эйнштейновская гипотеза Λ -члена.

Когда Эйнштейн вывел свои гравитационные уравнения, он обнаружил, что на их основе невозможно сконструировать разумную космологическую модель. Такого рода модель должна строиться в предположении конечности количества материи (во избежание гравитационного парадокса) и конечности пространства (что служило условием выполнимости принципа Маха). Но такого рода модель не могла быть устойчивой: под действием сил гравитации космологическая система неизбежно сколлапсирует, превратится в точку. Для стабильности модели необходимо было постулировать поле сил отталкивания, уравновешивающее гравитационное поле. Эйнштейн был вынужден принять этот постулат для того, чтобы решить космологические проблемы. Он ввел в правую часть своих уравнений Λ -член, симболизирующий силы отталкивания,

С точки зрения эйнштейновских эталонов подтверждения теории гипотеза Λ -члена является типичной гипотезой *ad hoc*, а поэтому априори неудовлетворительной гипотезой. Но Эйнштейн все же был вынужден воспользоваться этой гипотезой, поскольку он не видел никаких других средств решения космологической проблемы⁶. Реальность такова, что новая теория редко возникает в своей «идеальной» форме. Чаще всего к новой теории ведут многочисленные, подчас весьма искусственные гипотезы *ad hoc*. Они образуют строительные леса новой теории. И хотя эти гипотезы приносят некий «иррациональный» элемент в научное познание, их значение может оказаться прогрессивным⁷.

Эйнштейн не всегда и не во всех случаях делал упор на приоритет логического перед чувственным. Иногда он поступал как раз наоборот. Характер акцентирования во многом определялся историческим контекстом обсуждения проблемы. Примером тому может служить решение Эйнштейном так называемой проблемы наблюдаемых в физике. Когда Эйнштейн создавал специальную теорию относительности, он в целом ряде случаев

⁶ Несколько слов хотелось бы сказать о дальнейшей судьбе гипотезы Λ -члена. В 20-е гг. выяснилось, что ради тех целей, для которых была введена космологическая постоянная, ее можно было бы и не вводить. Исследования показали, что Вселенная расширяется. Поэтому она может быть описана лишь такими космологическими моделями, метрика которых изменяется во времени. Для таких моделей космологическая постоянная не является необходимой, ибо эффект расширения исключает коллапс. Когда Эйнштейн принял идею нестатичности Вселенной (под влиянием работ А. Фридмана), он с удовлетворением заметил, что от космологической постоянной можно отказаться (см. А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. II, с. 349, 350, 352). Ряд космологов последовали примеру Эйнштейна и отказались от космологической постоянной. Но все же некоторые космологи продолжают сохранять верность гипотезе Λ -члена, считая, что она придает уравнениям Эйнштейна наиболее общую форму. Оказалось, что легче выпустить джинна из бутылки, чем вернуть его обратно.

⁷ Из всего этого можно сделать вывод, что некоторые гипотезы *ad hoc*, как их понимал Эйнштейн, могут иметь познавательную ценность. Это свидетельствует об ограниченности рационалистического идеала научного познания, предложенного Эйнштейном. Но все же имеется и такой тип гипотез *ad hoc*, о рациональном значении которых говорить почти не приходится. В данном случае под ними подразумеваются не просто гипотезы, предназначенные для объяснения уже известных фактов, а гипотезы, лишенные какого-либо эвристического значения (см. Л. Б. Баженов, Структура и функции естественнонаучной теории. М., 1978).

подчеркивал необходимость исключения из физики чисто умозрительных конструкций, необходимость операционального определения понятий. Так, Эйнштейн считал несостоятельным ньютоновское понятие абсолютно пространства, поскольку такого рода пространство принципиально ненаблюдаемо и его нельзя обнаружить никакими экспериментами. Он также считал неудовлетворительным чисто интуитивное понимание одновременности событий. Ему принадлежит идея операционального определения понятия одновременности, которое явилось важной предпосылкой специальной теории относительности. Именно в это время Эйнштейн сочувственно относится к некоторым идеям Маха, который раньше Эйнштейна подверг философской критике идею принципиально ненаблюдаемых объектов.

Впоследствии при обсуждении проблемы наблюдаемых Эйнштейн меняет расстановку акцентов. Это изменение во многом обусловлено тем, что физику захлестнула волна эмпиризма. Некоторые физики считали, что физические теории должны представлять собой описание только наблюдаемых величин и отношений между ними. Эйнштейн считал неприемлемым узкоэмпирическое толкование проблемы наблюдаемых. Он подчеркивал два момента: во-первых, теория не может ограничиться описанием только наблюдаемых величин; во-вторых, то, что наблюдается исследователем, существенно зависит от теории.

Иллюстрацией нового устроения Эйнштейна может служить его позиция в полемике с Гейзенбергом в 1926 г. Гейзенберг утверждал, что электронные орбиты следует исключить из теории ввиду их принципиальной ненаблюдаемости. Квантовая механика должна ограничиться описанием наблюдаемых частот. Обосновывая свою точку зрения, Гейзенберг сослался на Эйнштейна, который в своей специальной теории относительности отказался от ненаблюдаемого абсолютного времени и ввел только наблюдаемое время в данной координатной системе. Эйнштейн отверг стремление Гейзенберга свести теорию к описанию наблюдаемых величин. Гейзенберг так характеризует рассуждения Эйнштейна по данному вопросу: «Можно ли наблюдать данное явление или нет — зависит от теории. Именно теория должна установить, что можно наблюдать, а что нельзя. Он заметил еще, что говорить о том, будто сле-

дует принимать во внимание только наблюдаемые величины, даже опасно. Поэтому каждая разумная теория должна позволять измерять не только прямо наблюдаемые величины, но и величины, наблюдаемые косвенно»⁸.

Если на заре возникновения новой физики Эйнштейн с одобрением отзывался о философской позиции Маха, то позднее, в особенности в 30-е и 40-е гг., его философские симпатии на стороне Канта. Эйнштейн высоко оценил кантовскую идею о зависимости чувственного элемента знания от логического. Кантовский тезис, согласно которому человек видит, воспринимает явление через призму логических категорий, Эйнштейн считал одной из лучших формулировок принципа наблюдаемости.

Рационализм Эйнштейна не сводится к определенной трактовке проблемы соотношения чувственного и логического. Он выходит за рамки чистой гносеологии и обретает черты онтологической концепции — философского учения о бытии. Между мышлением и бытием существует гармония. Свойством простоты, по Эйнштейну, обладает не только наше мышление, но и сама природа. Простота природы состоит, в частности, в том, что она представляет собой детерминированную систему. Познание природы состоит в выявлении лежащих в ее основе фундаментальных причин.

Обычно философские истоки онтологического рационализма Эйнштейна связывают с именем выдающегося нидерландского мыслителя Спинозы. Повод для такой трактовки дает и сам Эйнштейн, который связывает свое онтологическое учение о природе как детерминированной системе с идеями Спинозы. Но философия Спинозы, по-видимому, не единственный источник онтологического рационализма. Воззрения Эйнштейна на природу как на однозначно детерминированную систему уходят своими корнями в классическую физику.

Это обстоятельство определило и отношение Эйнштейна к квантовой механике. Эйнштейн внес огромный вклад в становление и развитие квантовой теории, открыв квантовую природу света, индуцированное излучение и т. д. Но он не признал квантовую механику в том ее виде, как она была оформлена в работах Гей-

⁸ В. Гейзенберг. Теория, критика, философия. — «Успехи физических наук», 1970, т. 102, с. 303—304.

зенберга, Борна и Бора. Главной причиной этого неприятия был статистический характер квантовомеханических законов. Причем не столько сам статистический характер закона, сколько рассмотрение статистики как наиболее фундаментального аспекта, не выводимого из динамических законов. Возражая сторонникам квантовой механики, Эйнштейн говорил, что «бог не играет в кости». В природе, по Эйнштейну, нет объективных случайностей. Случайность, неопределенность не укладывались в рационалистическую модель мира Эйнштейна.

Вообще говоря, Эйнштейн не отвергал квантовую механику, но считал, что вероятностный характер этой теории — временное явление. Он верил в то, что статистические законы квантовой механики могут быть в конечном счете объяснены на основе более фундаментальных динамических законов микромира. Убежденность Эйнштейна в том, что случайность является выражением неполноты нашего знания, что она может быть преодолена и устранена из науки на основе более глубокого познания природы, была весьма характерна для рационализма Эйнштейна. В письме к известному английскому философу К. Попперу Эйнштейн в этой связи писал: «Я... не верю в правоту Вашего тезиса о невозможности получения статистических выводов из детерминистической теории. Представьте себе классическую статистическую механику (газовую теорию или теорию броуновского движения). Например: материальная точка движется с постоянной скоростью по замкнутому кругу; я могу вычислить возможность ее нахождения в данный момент времени в рамках данной области окружности. То, что является существенным, просто состоит в следующем: я не знаю начального ее положения или не знаю его точно»⁹.

Такая оценка квантовой механики объясняет, почему эта физическая теория не играла фундаментальной роли в планах Эйнштейна по дальнейшему развитию физики, в его поисках единства физического мира. Он писал: «Я не думаю, что эта теория является подходящей исходной точкой для будущего развития»¹⁰. В ка-

⁹ А. Эйнштейн. Письмо к Попперу. Эйнштейновский сборник 1975—1976. М., 1978, с. 285.

¹⁰ А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. IV, с. 290.

ком же направлении должна развиваться физика? На этот вопрос Эйнштейн отвечает следующим образом: «При выборе направления я склонен руководствоваться моим опытом построения теории тяготения. Уравнения этой теории подают, по моему мнению, большие надежды на получение чего-либо **точного**, чем все остальные уравнения физики»¹¹. Эйнштейн, таким образом, избрал путь, который, с одной стороны, приводит к исключению вероятностного описания как основы физики и вместе с тем обеспечивает чисто геометрическое описание физической реальности.

Как можно видеть из всего вышесказанного, рационализм Эйнштейна внутренне неоднороден и не допускает однозначной оценки. Его нельзя рассматривать как концепцию, адекватную современной физике во всех своих деталях. Вместе с тем это и не просто ограниченность. Эйнштейн обязан такими своими достижениями, как специальная и общая теория относительности. Но она же привела его к неприятию квантовой механики.

¹¹ А. Эйнштейн, Собр. научных трудов, т. IV, с. 291.

М. А. ЕЛЪЯШЕВИЧ,
академик АН БССР

ВКЛАД ЭЙНШТЕЙНА В РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Важное место в творчестве Эйнштейна занимает его вклад в разработку квантовой теории. В исследованиях по квантовой теории излучения и его взаимодействиях с веществом, начиная с основополагающей статьи 1905 г. (ст. 7), опубликованной в «Annalen der Physik», Эйнштейн выдвинул важнейшую идею квантов света — фотонов — и открыл корпускулярно-волновой дуализм для электромагнитного излучения. Он объяснил с квантовой точки зрения элементарные процессы взаимодействия излучения с веществом, а впоследствии ввел коэффициенты, характеризующие вероятности оптических квантовых переходов и получившие название коэффициентов Эйнштейна, дал известный вывод формулы Планка и впервые высказал идею вероятностной интерпретации корпускулярно-волнового дуализма. Эйнштейн также заложил основы квантовой теории теплоемкостей вещества. Наконец, Эйнштейн применил к одноатомному идеальному газу статистический метод, предложенный Бозе для излучения, что привело к созданию квантовой статистики для систем частиц с симметричными собственными функциями (статистики Бозе—Эйнштейна). Все это явилось очень большим вкладом в развитие квантовых представлений. Отметим, что до конца своей жизни Эйнштейн думал о проблемах квантовой теории и вел знаменитую дискуссию с Бором о полноте квантовомеханического описания явлений микромира, начавшуюся еще в период становления квантовой механики.

Все работы Эйнштейна по вопросам квантовой теории связаны между собой и с его работами по другим вопросам, особенно по статистической термодинамике, являются весьма существенной частью его научной деятельности как великого физика XX в.

Вместе с тем в огромной литературе об Эйнштейне

главное внимание, естественно, уделялось его фундаментальным работам по теории относительности, основным создателем которой он являлся, и лишь в сравнительно небольшой доле исследований с должной глубиной анализировался его вклад в квантовую теорию.

В учебной и монографической литературе часто упрощенно и порой неправильно характеризуются работы Эйнштейна по вопросам квантовой теории. Так до сих пор обычно говорят о первой работе Эйнштейна (ст. 7) по этим вопросам как о работе по фотоэффекту, хотя знаменитому уравнению для фотоэффекта в ней посвящен лишь один параграф и ее содержание несравнимо шире (как это правильно подчеркивал Борн, а также известный историк науки Клейн). Недооценивается значение работ Эйнштейна 1909 г. (ст. 17, 19), в которых была развита идея корпускулярно-волнового дуализма для излучения на основе рассмотрения флуктуаций энергии и импульса равновесного излучения [3].

Говоря о работе Эйнштейна 1916 г. (ст. 44), в которой были рассмотрены вероятности оптических квантовых переходов и дан принципиально важный вывод формулы излучения Планка, не обращают должного внимания на анализ Эйнштейном проблемы обмена импульсом между атомными системами и излучением и на подчеркивание роли случайности при сопоставлении волновых и корпускулярных представлений (на важность чего специально указывал Паули в статье, посвященной вкладу Эйнштейна в квантовую теорию).

Работам Эйнштейна уделяется значительное место в ряде книг по истории развития квантовой теории, однако в этих книгах не могла быть детально разобрана связь между работами Эйнштейна по квантовой теории и другими его работами, показана эволюция его взглядов. До сих пор отсутствует достаточно полное рассмотрение противоречий в научном творчестве Эйнштейна, которые выразились в том, что во второй период своей деятельности, при разработке единой теории поля, Эйнштейн выступал против тех идей вероятностной интерпретации квантовой механики, одним из родоначальников которых был он сам.

Задача данной статьи — дать обзор важнейших работ Эйнштейна периода 1905—1925 гг. по квантовой теории, обратив особое внимание на их генезис, на раз-

витие Эйнштейном основных квантовых идей и на эволюцию его взглядов.

Для понимания возникновения и развития идей Эйнштейна в области квантовой теории, впервые высказанных в работах 1905 г., необходим анализ, с одной стороны, его предшествующих работ 1901—1904 гг., а с другой — состояния к 1905 г. проблемы равновесного теплового излучения, при разработке которой Планк впервые ввел квантовые представления. Сразу отметим, что работы Эйнштейна по теории излучения не явились непосредственным продолжением работ Планка, а были связаны с последними более сложным образом; Эйнштейн в значительной степени опирался на работы Вина, предшествовавшие работам Планка.

Две самые первые статьи Эйнштейна были посвящены молекулярным явлениям. Уже в этих статьях проявились исключительная физическая интуиция Эйнштейна и стремление к нахождению, исходя из анализа конкретного материала, общих подходов к изучаемым явлениям. В первой статье Эйнштейн рассматривает явления капиллярности, используя термодинамические соотношения, и делает определенные предположения о потенциальной энергии парных взаимодействий молекул. Из опытных данных он вычисляет значения постоянных, характеризующих это взаимодействие, и приходит к выводу: «Резюмируя, можно сказать, что оправдалось наше фундаментальное предположение: каждому атому соответствует молекулярное поле притяжения, не зависящее от температуры и способа, которым этот атом связан химически с другими атомами» (ст. 1).

Во второй статье (ст. 2) Эйнштейн развивает термодинамическую теорию разности потенциалов между металлом и полностью диссоциированным раствором соли металла, используя представления о молекулярных силах в жидкостях и применяя выражения для энергии парного взаимодействия молекул из предыдущей статьи. Таким образом, термодинамическое рассмотрение производится на молекулярной основе. Развивая подобный подход, Эйнштейн ставит проблему общего статистического обоснования термодинамики и публикует в 1902—1904 гг. три работы, посвященные данной проблеме.

Первую из этих работ (ст. 3) он начинает следующим образом: «Как ни велики достижения кинетиче-

ской теории теплоты в области физики газов, теория эта до сих пор не имеет удовлетворительной механической основы, поскольку законы теплового равновесия и второе начало термодинамики пока еще не удалось получить из одних только уравнений механики и теории вероятностей, хотя Максвелл и Больцман в своих теориях почти достигли этой цели. В настоящем исследовании ставится задача восполнить этот пробел. Одновременно с этим получается обобщение второго начала, имеющее большое значение для применений термодинамики. Кроме того, математическое выражение для энтропии выводится с точки зрения механики». Не останавливаясь подробно на этих очень интересных и глубоких по физическому содержанию работах Эйнштейна, необходимо подчеркнуть, что Эйнштейн ввел независимо от Гиббса, с работами которого он был в то время не знаком, так называемый канонический ансамбль (не пользуясь этим термином), дал общее обоснование связи энтропии и вероятности, вывел второе начало термодинамики. Впоследствии в 1911 г., уже ознакомившись с работами Гиббса, Эйнштейн писал (ст. 28), отвечая на критику некоторых его высказываний: «...по-моему, следует предпочесть предложенный Гиббсом в его книге путь, исходным пунктом которого является канонический ансамбль. Если бы книга Гиббса была мне известна в то время, я вообще не стал бы публиковать упомянутые работы, а ограничился бы рассмотрением некоторых частных вопросов». Самостоятельная разработка Эйнштейном статистической термодинамики в общей форме сыграла очень важную роль в дальнейших его исследованиях по квантовой теории, в них он широко применял статистические методы, глубоко понимая их сущность. Вместе с тем Эйнштейна интересовали элементарные молекулярные взаимодействия в жидкостях и растворах, и он естественным образом пришел к рассмотрению элементарных процессов взаимодействия излучения с веществом. Для ряда исследований Эйнштейна характерно сочетание применения статистических методов и рассмотрения элементарных процессов; такое сочетание имеется в его работах по броуновскому движению (ст. 6, 8, 9, 14, 16), выполненных начиная с 1905 г., и особенно в его работах по квантовой теории, которые рассматриваются ниже.

Следует обратить специальное внимание на последние параграфы третьей статьи Эйнштейна по статистической термодинамике (ст. 5), относящейся к 1904 г. и непосредственно предшествовавшей его работам 1905 г. по квантовой теории, по броуновскому движению и по специальной теории относительности. Эйнштейн рассматривает в начале статьи выражение для энтропии системы через логарифм вероятности $\ln W$, «...совершенно аналогичное выражению, найденному Больцманом для идеальных газов и введенному Планком в его теории излучения» (ст. 5). Здесь Эйнштейн впервые упоминает теорию излучения Планка. В § 3, «О смысле постоянной k в атомно-кинетической теории», Эйнштейн показывает, что обозначаемый им как $2k$ коэффициент пропорциональности между S и $\ln W$ (т. е. постоянная Больцмана k , впервые введенная в явном виде Планком в 1900 г.) равен отношению газовой постоянной R к числу Авогадро N . При этом Эйнштейн ссылается на работы Больцмана по теории газов и указывает, что «величина $3k$ равна отношению средней кинетической энергии атома к абсолютной температуре». Весьма важен § 4 статьи: «Общий смысл постоянной k », в котором Эйнштейн для системы, соприкасающейся «с системой, обладающей бесконечно большой по сравнению с ней энергией и абсолютной температурой T », рассматривает отличие мгновенного значения энергии E от ее среднего значения \bar{E} , вводит величину $\epsilon = E - \bar{E}$ флуктуацию энергии — и получает для среднего квадрата флуктуации формулу:

$$\bar{\epsilon}^2 = 2kT^2 \frac{d\bar{E}}{dT}. \quad (1)$$

Эйнштейн пишет: «Величина $\bar{\epsilon}^2$ есть мера тепловой стабильности системы; чем больше $\bar{\epsilon}^2$, тем менее стабильна система. Таким образом, абсолютная постоянная k определяет тепловую стабильность систем».

Дальнейшее развитие Эйнштейном представлений о термических флуктуациях в жидкостях и растворах привело его к теории броуновского движения. Для нас, однако, особый интерес представляет применение представления о флуктуациях энергии к излучению, что было сделано Эйнштейном в последнем параграфе его статьи (который так и называется «Применение к из-

лучению») и, несомненно, явилось существенным этапом в развитии его взглядов на излучение. В начале параграфа Эйнштейн указывает, что уравнение (1) «...позволило бы определить точное значение универсальной постоянной k , если бы было можно найти среднее значение квадрата флуктуации энергии некоторой системы». Далее он пишет: «Однако при современном состоянии наших знаний этого сделать нельзя. Из опыта можно заключить, что флуктуации энергии вообще происходят только в физических системах одного единственного типа; такой системой является пустое пространство, содержащее тепловое излучение».

Таким образом, для Эйнштейна равновесное излучение было системой, к которой он мог применить развитые им общие методы статистической термодинамики.

Главной задачей экспериментальных и теоретических исследований равновесного теплового излучения («излучения черного тела») было установление вида универсальной функции спектрального распределения энергии излучения, которую мы будем записывать для спектральной плотности энергии излучения $\rho_\nu = \rho_\nu(T)$, рассчитанной на единицу объема интервала частот (мы пользуемся обозначением ρ , применявшимся Эйнштейном в его работах). Функция ρ_ν связана с полной (интегральной) плотностью энергии излучения $\rho(T)$, подчиняющейся закону Стефана—Больцмана:

$$\rho = a T^4, \quad (2)$$

где a — постоянная, соотношением

$$\rho = \int_0^\infty \rho_\nu d\nu. \quad (3)$$

Закон (2) был сперва установлен эмпирически Стефаном в 1879 г., а затем выведен Больцманом теоретически в 1884 г., исходя из термодинамики и из соотношения классической электродинамики $p = \rho/3$ между давлением изотропного излучения p и его плотностью ρ . Отметим, что это общее соотношение сохраняется для равновесного излучения и в квантовой теории.

Важным этапом в установлении вида функции $\rho_\nu(T)$, предшествовавшим работам Планка, были работы Вина (1893 г.), исходившего, как и Больцман, из термодинамики и классической электродинамики. Рассматривая равновесное излучение в объеме с отражаю-

щими стенками и учитывая изменение длины волны этого излучения согласно принципу Доплера при отражении от движущейся стенки, Вин вывел закон, согласно которому универсальная функция $\rho_\nu(T)$ должна иметь общий вид:

$$\rho_\nu(T) = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (4)$$

где F — произвольная функция от отношения ν/T .

Подчеркнем, что так же, как и закон Стефана—Больцмана (2), закон (4) является общим; он справедлив для равновесного излучения, и в квантовой теории — эффект Доплера объясняется и согласно этой теории. Отметим, что, как легко проверить, закон (2) является следствием закона (4) и соотношения (3).

Вопрос о конкретном виде функции $F\left(\frac{\nu}{T}\right)$ и, следовательно, искомой функции $\rho_\nu(T)$ (а также о значении постоянной a в законе (2), которая зависит от вида функции F) не мог быть решен на основе общих соотношений термо- и электродинамики и представлял весьма трудную задачу, вообще неразрешимую методами классической физики. Эта проблема была решена в 1900 г. Планком, нашедшим закон излучения. Мы пишем этот закон в обозначениях Эйнштейна в работе 1905 г. (ст. 7):

$$\rho_\nu = \rho_\nu(T) = a \nu^3 \frac{1}{\exp\left(\beta \frac{\nu}{T}\right) - 1}, \quad (5)$$

Постоянные a и β выражаются через фундаментальные постоянные — постоянную Планка h (впервые появившуюся в его работах в 1899 г.), постоянную Больцмана k и скорость света c — по формулам:

$$a = \frac{8\pi h}{c^3}, \quad (6)$$

и

$$\beta = \frac{h}{k}. \quad (7)$$

Закон излучения Планка (5) находится в согласии с общей формулой Вина (4),



Предельными случаями закона Планка являются законы, получающиеся при $\beta \nu/T = h \nu/k T \gg 1$ и при $\beta \nu/T = h \nu/k T \ll 1$.

В первом случае, когда величина кванта энергии $h \nu$ много больше тепловой энергии $k T$:

$$\rho_{\nu} = \rho_{\nu}(T) = \alpha \nu^3 \exp(-\beta \nu/T). \quad (8)$$

Этот *чисто квантовый* закон излучения был получен Вином еще в 1896 г. из соображений, связанных со сходством между распределением Максвелла молекул газа по скоростям v и спектральной зависимостью плотности излучения при больших ν/T . Для распределения Максвелла характерна экспоненциальная зависимость от скорости молекул v и температуры T , имеющая вид $\exp(-\gamma v^2/T)$, где γ — постоянная. Вин предположил (развивая идеи, ранее высказанные в 1887 г. В. А. Михельсоном, на которого он ссылается), что молекулы со скоростью v испускают и поглощают свет с длиной волны λ , обратно пропорциональной v^2 (т. е. с частотой ν , пропорциональной v^2), а это дает зависимость экспоненты от $1/\lambda T$, т. е. от ν/T , и сразу приводит к определению вида функции F в (4) и к закону излучения (8). Приравнивание экспоненты в (8) экспоненте в распределении Максвелла соответствует с современной точки зрения возникновению фотона с энергией $h \nu$ за счет кинетической энергии быстрых молекул или обратному процессу. Таким образом, работа Вина содержала в скрытом виде квантовую гипотезу. Закон излучения Вина (8) с эмпирическими постоянными α и β хорошо подтверждался опытными данными для больших значений ν/T .

Во втором случае, когда величина кванта энергии $h \nu$ много меньше тепловой энергии $k T$,

$$\rho_{\nu} = \frac{\alpha}{\beta} \nu^2 T = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} k T. \quad (9)$$

Этот *чисто классический* закон, получивший впоследствии название закона Рэля—Джинса, может быть, как известно, выведен на основании подсчета числа $Z(\nu)$ собственных колебаний электромагнитного поля, приходящихся на единицу интервала частот и единицу объема, которое оказывается равным $Z(\nu) = 8 \pi \nu^2/c^3$, и предположения, что на каждое такое колебание (одну колебательную степень свободы электромагнитного по-

ля) приходится средняя энергия kT (согласно классическому закону равномерного распределения энергии по степеням свободы). Пропорциональность спектральной плотности излучения абсолютной температуре, наблюдающаяся при высоких температурах и малых частотах (при больших длинах волн), сыграла существенную роль при установлении Планком закона излучения (5). Планк стремился найти закон, который давал бы наряду с известным ему законом излучения Вина, справедливым при больших ν/T , и соответствующие опыту результаты при малых ν/T .

При выводе закона излучения (5) Планк впервые в явном виде ввел квантовую гипотезу. Очень важно отчетливо представлять себе, какие основные предположения были сделаны Планком в его классических работах. Прежде всего Планк моделировал вещество, с которым излучение, характеризуемое спектральной плотностью ρ_ν , находится в равновесии, совокупностью элементарных электрических осцилляторов, гармонически колеблющихся с различными частотами ν и обменивающихся энергией с полем излучения в результате резонансного испускания и поглощения электромагнитных волн соответствующих частот. Планк последовательно решал для совокупности таких осцилляторов (которые он называл «резонаторами») две задачи: во-первых, задачу нахождения связи ρ_ν со средней энергией одного резонатора \bar{E}_ν , во-вторых, задачу определения этой средней энергии при данной температуре T , общей для вещества и излучения, т. е. при полном термодинамическом равновесии.

В результате решения первой задачи, рассматривая методами классической электродинамики поглощение и испускание электромагнитной энергии отдельными резонаторами как *непрерывные* процессы, Планк получил формулу:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \bar{E}_\nu. \quad (10)$$

Для решения второй задачи — определения \bar{E}_ν — Планк искал выражение для средней энтропии одного резонатора частоты ν , S_ν , с тем чтобы, пользуясь термодинамической связью энергии и энтропии, найти \bar{E}_ν . Первоначально Планк стремился вывести закон излучения Вина (8) как удовлетворяющий опытным данным

(вывод самого Вина он не считал достаточным). Ему удалось подобрать выражение для S_ν , приводящее к формуле:

$$\bar{E}_\nu = b \nu \exp(-a \nu / T), \quad (11)$$

где a и b — постоянные. При подстановке (11) в (10) получается закон излучения Вина (8).

Выражение Планка для S_ν имело вид:

$$S_\nu = -\frac{\bar{E}_\nu}{a \nu} \left(\ln \frac{\bar{E}_\nu}{b \nu} - 1 \right), \quad (12)$$

где, как потом выяснилось, $b = h$, а $a = h/k$. Таким образом, отношение $\bar{E}_\nu / b \nu = E_\nu / h \nu$ представляет среднее число квантов энергии, а отношение $\bar{E}_\nu / a \nu = k \cdot \bar{E}_\nu / h \nu$ — среднее число квантов энергии, умноженное на постоянную Больцмана k , в согласии с квантованием энергии резонаторов, введенным Планком в последующих работах. Мы видим, что и Планк пользовался квантовым выражением (в данном случае для энтропии), не осознавая этого.

В дальнейшем Планк вывел закон (5), справедливый и для малых значений ν/T (после того как он сначала получил его полуэмпирическим методом), определив среднюю энтропию резонатора S_ν , исходя из связи полной энтропии S совокупности резонаторов данной частоты с вероятностью W при фундаментальной гипотезе о дискретности энергии резонаторов. Согласно этой *квантовой гипотезе* Планка резонатор, колеблющийся с частотой ν , может обладать лишь энергиями, кратными порциям энергии $\epsilon = h \nu$ (квантам энергии, как их стали называть впоследствии), т. е. возможные значения энергии отдельного резонатора равны:

$$E_\nu = n \epsilon = n h \nu, \quad (13)$$

где n — целое число.

Полученное Планком из вероятностного рассмотрения выражение для средней энтропии резонатора было более общим, чем выражение (12). Из него следовало, что $\bar{E}_\nu = h \nu / [\exp(h \nu / k T) - 1]$ и подстановка в (10) давала закон излучения Планка (5) со всеми постоянными.

Следует подчеркнуть, что квантовая гипотеза Планка (13) относилась к *квантованию энергии вещества* и что процессы поглощения и испускания излучения Планк

рассматривал как непрерывные в соответствии с классической электродинамикой. Существенно также, что конкретные элементарные процессы взаимодействия излучения с веществом Планка не интересовали. Резонаторы были лишь моделью, необходимой ему для вывода законов излучения. Он, в частности, писал: «...вовсе не существенно, основаны ли колебания элементарных резонаторов на токах проводимости (само собой разумеется, при отсутствии электрического сопротивления) либо на токах конвекции (движении электрически заряженных частиц)». Дав закон для квантования энергии резонатора, Планк еще не думал о применении данного закона к конкретным атомным системам.

Понимание этих особенностей подхода Планка очень важно при анализе того нового, что внес Эйнштейн в развитие квантовых представлений.

Рассмотрение работ Эйнштейна по квантовой теории естественно начать с достаточно подробного и систематического анализа его работы 1905 г., в которой он впервые выдвинул революционную идею квантования энергии излучения в форме гипотезы квантов света, что являлось основным в этой работе (а не объяснение законов фотоэффекта).

Уже в кратком введении к работе Эйнштейн очень четко противопоставляет волновой теории света, основанной на представлении о непрерывности электромагнитного поля и «прекрасно оправдавшейся при описании чисто оптических явлений», корпускулярную теорию света, согласно которой «энергия света распределяется по пространству дискретным образом» и которая, по мнению Эйнштейна, лучше объясняет «явления возникновения и превращения света». В конце введения Эйнштейн пишет: «Ниже я излагаю ход мыслей и факты, натолкнувшие меня на этот путь, в надежде, что предлагаемая здесь точка зрения, возможно, принесет пользу и другим исследователям в их изысканиях».

Из девяти параграфов работы, чрезвычайно оригинальной и богатой по содержанию, первые шесть посвящены подходу к корпускулярным представлениям об излучении и их обоснованию, а последние три — приложениям этих представлений о квантах света (фотонах по современной терминологии; Эйнштейн пользуется терминами «квант света» и «квант энергии») к процессам возникновения и превращения света.

В § 1, «Об одной трудности в теории «излучения черного тела», Эйнштейн рассматривает с классической точки зрения равновесие излучения и вещества, содержащего «электроны-резонаторы». Согласно кинетической теории газов средняя энергия колебательного движения электрона-резонатора на одну степень свободы должна равняться $(R/N) T$ (Эйнштейн не вводит постоянную Больцмана k и вместо нее пишет R/N). Применяя «условие динамического равновесия» (10), выведенное Планком, и полагая $\bar{E}_\nu = (R/N) T$, Эйнштейн получает соотношение (9), т. е. закон Рэлея—Джинса (он при этом ссылается на работу Планка «О необратимых процессах излучения», в которой Планк выводил закон излучения Вина, исходя из формулы (12) для энтропии), Эйнштейн сразу показывает, что в этом случае $\int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \infty$, и подчеркивает, что соотношение (9) «...не только противоречит опыту, но и утверждает, что в нашей картине (т. е. в классической картине. — М. Е.) не может быть и речи о каком-либо однозначном распределении энергии между эфиром и веществом». Таким образом, Эйнштейн не только независимо вывел закон Рэлея—Джинса, но и отчетливо представлял так называемую «ультрафиолетовую катастрофу».

Дальнейшее рассмотрение предельного классического случая малых ν/T содержится в § 2. Эйнштейн в этом небольшом параграфе приводит формулу Планка, как «согласующуюся со всеми проведенными до сих пор экспериментами», в виде (5) с численными значениями постоянных α и β .

Для малых ν/T Эйнштейн получает предельный вид формулы (5) $\rho_\nu = (\alpha/\beta) \nu^2 T$, и сравнение с найденной им в предыдущем параграфе формулой (9) (где $k = R/N$), позволяет ему определить значение числа Авогадро $N = 6,7 \cdot 10^{23}$ — «в точности то же значение, которое получил Планк».

Рассмотрение классического случая Эйнштейн заканчивает выводом: «...чем больше плотность энергии и длина волны излучения, тем лучше оправдываются наши теоретические предположения; однако для малых длин волн и малых плотностей они оказываются совершенно непригодными», Эйнштейн в дальнейшем рассматривает

именно предельный случай больших ν/T — чисто квантовый случай, когда справедлив закон излучения Вина (8). Он пишет: «В дальнейшем «излучение черного тела» будет рассматриваться в связи с опытом, а не на основе каких-либо представлений о возникновении и распространении излучения». На работы Планка он при этом не опирается и больше на них не ссылается. Подход Эйнштейна коренным образом отличался от подхода Планка. В то время как Планк выражает согласно (10) плотность излучения ρ_ν через *характеризующую свойства вещества* среднюю энергию резонатора \bar{E}_ν , которую находит как функцию средней энтропии резонатора S_ν , а для определения последней применяет соотношение Больцмана для вещества, Эйнштейн по плотности излучения находит его энтропию как функцию объема и, пользуясь тоже соотношением Больцмана, но уже *в применении к самому излучению*, выясняет физический смысл найденного выражения для энтропии; он приходит к фундаментальному выводу о наличии у излучения при больших ν/T корпускулярных свойств. Выполнению этой программы посвящены §§ 3—6 работы Эйнштейна; весьма поучительно проследить более детально за ходом его рассуждений.

Для излучения, занимающего объем V , Эйнштейн рассматривает спектральную плотность энтропии φ_ν как функцию от спектральной плотности энергии ρ_ν и частоты ν *. Следуя Вину, он определяет полную энтропию излучения S как интеграл $\int \varphi_\nu d\nu$ и находит максимум плотности энтропии при постоянной плотности энергии, что соответствует равновесному излучению («излучению черного тела»). Для такого излучения при учете соотношения $dS = dE/T$ между приращением энтропии dS и сообщенным теплом $dQ = dE$ для обратимого изохорического процесса получается соотношение:

$$\frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \rho_\nu} = \frac{1}{T}, \quad (14)$$

справедливое для всех значений частоты. О соотношении (14) Эйнштейн пишет: «Это и есть закон излуче-

* В этом и последующих параграфах Эйнштейн обозначает φ_ν и ρ_ν просто как φ и ρ ; в дальнейшем тексте мы сохраняем индекс ν для спектральных величин, чтобы отличать их от интегральных.

ния черного тела. Следовательно, по функции φ_ν можно определить закон излучения черного тела и, наоборот, интегрируя этот закон и учитывая, что $\varphi_\nu = 0$ при $\rho_\nu = 0$, можно получить функцию φ_ν . Именно нахождению энтропии равновесного излучения φ_ν , зная его энергию ρ_ν , и посвящен § 4. Эйнштейн исходит из закона излучения Вина (8), отмечая, что хотя данный закон «точно не выполняется», но «для больших значений отношения ν/T этот закон подтверждается экспериментом очень хорошо». Таким образом, Эйнштейн рассматривает закон Вина как экспериментальный закон и лишь много позже, в 1916 г. (ст. 44), он говорит о выводе Вином формулы (8).

Эйнштейн сперва определяет согласно закону (8) величину $1/T = -(1/\beta\nu) \ln(\rho_\nu / \alpha\nu^3)$; подставляя ее в соотношение (14) и интегрируя, он получает выражение для φ_ν , которое, умноженное на объем V и на $d\nu$, дает энтропию $S = V\varphi_\nu d\nu$ излучения в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, обладающего энергией $E = V\rho_\nu d\nu$. Для зависимости энтропии от объема Эйнштейн находит формулу:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (15)$$

где S_0 — энтропия излучения, занимающего объем V_0 . Данное выражение, показывающее, «что энтропия монохроматического излучения достаточно малой плотности зависит от объема так же, как энтропия идеального газа или разбавленного раствора», Эйнштейн интерпретирует в дальнейшем «на основе введенного в физику Больцманом принципа, согласно которому энтропия некоторой системы есть определенная функция вероятности состояния этой системы».

Следующий § 5 Эйнштейн начинает с важного общего замечания: «При вычислении энтропии методами молекулярной теории слово «вероятность» часто употребляется в смысле, не совпадающем с определенным, даваемым ему в теории вероятностей. Особенно часто предполагается «случай равной вероятности» там, где с теоретической стороны задача является достаточно определенной, чтобы не вводить гипотез и рассуждать по дедукции». Вопрос о том, какие состояния считать равновероятными, Эйнштейн рассмотрел в дальнейшем при анализе формулы излучения Планка, и это оказалось

весьма существенным для выявления квантовых закономерностей.

Далее Эйнштейн дает общую формулировку принципа Больцмана. Он получает основную формулу:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W, \quad (16)$$

где W — относительная вероятность состояния с энтропией S . Для частного случая n независимых частиц, например, идеального газа или разбавленного раствора, занимающих объем V_0 , вероятность сосредоточения всех n частиц в объеме V , составляющем часть общего объема V_0 , равна:

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (17)$$

и согласно формуле (16)

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \frac{V}{V_0}. \quad (18)$$

Эйнштейн подчеркивает, «что для вывода этого соотношения... не требуется делать никаких предположений о законе движения молекул».

Сравнению формулы (15) с формулами (16)—(18) и фундаментальным следствиям такого сравнения посвящен § 6. Именно этот параграф содержит гипотезу квантов света и является центральным в основополагающей работе Эйнштейна (ст. 7). При записи формулы (15) в виде

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\nu}}$$

и сравнении с общей формулой (16) получается, что

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\nu}}, \quad (19)$$

в полной аналогии с формулой (17). Соответственно Эйнштейн делает заключение: «Монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной $R \beta \nu / N$ (т. е. учитывая, что $R/N = k$, $\beta = h/k$ и $R \beta / N = h$, вели-

чиной $h\nu$; $NE/R\beta\nu = E/h\nu$ представляет число квантов света).

Эйнштейн также вычисляет среднюю энергию «квантов энергии «излучения черного тела», которая согласно закону Вина (8) равна $3(R/N)T$, т. е. $3kT$, и сравнивает ее со средней кинетической энергией движения центра тяжести молекулы $(3/2)RT/N$, т. е. $(3/2)kT$.

В конце § 6 Эйнштейн говорит: «Но если монохроматическое излучение (достаточно малой плотности) в смысле зависимости энтропии от объема ведет себя как дискретная среда, состоящая из квантов энергии величиной $R\beta\nu/N$, то напрашивается вопрос, не являются ли и законы возникновения и превращения света такими, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии». Законам возникновения и превращения света, вытекающим из гипотезы квантов света, и посвящены последние три параграфа работы (ст. 7). При этом Эйнштейн переходит от статистического рассмотрения законов равновесного излучения к рассмотрению элементарных процессов взаимодействия излучения с веществом, основанному на представлении о дискретности энергии излучения и соответственно самих процессов поглощения и испускания.

В § 7 Эйнштейн очень просто объясняет установленное Стоксом еще в 1852 г. соотношение для процесса фотолюминесценции — закон или правило Стокса, согласно которому длина волны испускаемого света λ_2 больше длины волны поглощаемого света λ_1 или равна ей, т. е. частота $\nu_2 = c/\lambda_2$ меньше частоты $\nu_1 = c/\lambda_1$ или равна ей. Если испускаемый квант света возникает только за счет поглощаемого кванта света, то в соответствии с законом сохранения энергии $h\nu_2 \leq h\nu_1$, т. е. $\nu_2 \leq \nu_1$. «Это и есть известное правило Стокса», — говорит Эйнштейн. Он специально подчеркивает, что «при слабом освещении количество возбуждаемого света при прочих равных условиях должно быть пропорционально интенсивности возбуждающего света», и указывает, что отклонения от правила Стокса возможны в двух случаях. Это, во-первых, при столь большой плотности квантов света, «что один квант возбуждаемого света может получить свою энергию от многих возбуждающих квантов», и во-вторых, при нарушении закона Вина, например, когда «свет испускается телом такой высокой температуры, что для рассматриваемой длины

волны закон Вина уже не выполняется». Первому случаю соответствует нелинейная зависимость интенсивности возбуждаемого света от интенсивности возбуждающего; такого рода процессы — многофотонные процессы — как известно, широко изучаются в настоящее время. Во втором случае уже не выполняется условие $h\nu \gg kT$; при этом величина испускаемого кванта может увеличиваться за счет тепловой энергии люминесцирующего тела (антистоксова фотолюминесценция). Мы имеем пример глубокого анализа Эйнштейном сущности элементарных процессов.

В § 8 Эйнштейн рассматривает фотоэффект на основе представления о том, «что возбуждающий свет состоит из квантов с энергией $(R/N)\beta\nu$ » (т. е. $h\nu$), предполагает, что «один световой квант отдает всю свою энергию одному электрону», и учитывает, «что каждый электрон, покидая тело, должен совершить некоторую работу P (характерную для данного тела)», т. е. вводит понятие о работе выхода. Приравнявая максимальную кинетическую энергию вырываемого электрона $R\beta\nu/N - P$ величине $\Pi\varepsilon$, где Π — величина задерживающего потенциала, а ε — заряд электрона, Эйнштейн получает свое знаменитое уравнение для фотоэффекта в виде $\Pi\varepsilon = R\beta\nu/N - P$, или в современной записи

$$eV = h\nu - P. \quad (20)$$

Он указывает: «Если выведенная формула правильна, то Π как функция частоты возбуждающего света изображается в декартовых координатах в виде прямой, наклон которой не зависит от природы исследуемого вещества». Как известно, этот линейный закон, из которого может быть определено отношение h/e , был впоследствии с большой точностью проверен Милликеном, Лукиреким и Прилежаевым и другими.

Эйнштейн отмечает, что об области применимости законов фотоэффекта «можно было бы сделать такие же замечания, какие были высказаны по поводу предполагаемых отклонений от правила Стокса». Он также указывает, что для катодной люминесценции — процесса, обратного фотоэффекту, — при больших ускоряющих напряжениях возможно возникновение большого числа квантов света за счет кинетической энергии одного электрона.

В последнем параграфе работы (§ 9) Эйнштейн рас-

сма­три­ва­ет на при­ме­ре ио­ни­за­ции от­дель­ных мо­ле­кул га­за кван­та­ми ульт­ра­фи­о­ле­то­во­го све­та во­про­с о чис­ле та­ких про­цес­сов. Если ка­ж­дый по­гло­щен­ный квант вы­зы­ва­ет ио­ни­за­цию од­ной мо­ле­ку­лы, то чис­ло ио­ни­зи­ро­ван­ных мо­ле­кул ра­вно про­сто чис­лу по­гло­щен­ных кван­тов. Это пред­став­ля­ет пер­во­на­чаль­ную фор­му за­ко­на фо­то­хи­ми­че­ско­го эк­ви­ва­лен­та, ко­то­рый Эйн­штейн сфор­му­ли­ро­вал в по­след­ствии в 1912 г. для фо­то­хи­ми­че­ских про­цес­сов (ст. 30).

Как сле­ду­ет из про­из­ве­ден­но­го ана­ли­за пер­вой ра­боты Эйн­штейна по кван­то­вой те­о­рии из­лу­че­ния, ее цен­траль­ной иде­ей бы­ла идея *кван­то­ва­ния энер­гии из­лу­че­ния*, ба­зи­ру­ю­щая­ся на ста­ти­сти­че­ском рас­смот­ре­нии теп­ло­во­го из­лу­че­ния в предель­ном слу­чае боль­ших зна­че­ний ν/T . Эйн­штейн смог обос­но­вать эту идею, ис­хо­дя из спра­вед­ли­во­го при та­ких зна­че­ниях ν/T за­ко­на Вина (8), име­ю­ще­го чисто кван­то­вую при­ро­ду, и ус­пеш­но при­мен­ил ее к рас­смот­ре­нию эле­мен­тар­ных про­цес­сов вза­им­о­дей­ствия из­лу­че­ния с ве­ще­ством, как име­ю­щих дис­кре­тный ха­рак­тер. Одна­ко еще не бы­ла вскры­та связь его под­хо­да с под­хо­дом План­ка, кван­то­ва­вшим энер­гию ве­ще­ства. Та­кая связь бы­ла вы­яв­ле­на Эйн­штейном в его ра­ботах 1906—1907 гг., суще­ствен­ным ре­зуль­та­том ко­то­рых яви­лось соз­да­ние Эйн­штейном ос­нов кван­то­вой те­о­рии теп­ло­ем­ко­стей.

В на­ча­ле пер­вой из этих ра­бот, не­боль­шой, но все­ма важ­ной ста­тьи (ст. 10), со­сто­я­щей все­го из двух па­ра­гра­фов, Эйн­штейн пи­шет о сво­ей ра­боте 1905 г. (ст. 7), в ко­то­рой он «при­шел к вы­во­ду, что свет с ча­сто­той ν мо­жет по­гло­щать­ся и испу­с­кать­ся толь­ко кван­та­ми энер­гии $(R/N)\beta\nu$ », сле­ду­ю­щее:

«Тогда мне по­ка­за­лось, что те­о­рия из­лу­че­ния План­ка (Эйн­штейн здесь, как и в ст. 7, ссы­ла­ет­ся на ста­тью План­ка «О за­ко­не рас­пре­де­ле­ния энер­гии в нор­маль­ном спек­тре». — М. Е.) в извест­ном смы­сле про­ти­во­сто­ит мое­й ра­боте. Одна­ко новые рас­суж­де­ния, ко­то­рые при­во­дят­ся в § 1 на­сто­я­щей ра­боты, убе­жда­ют, что те­о­ре­ти­че­ская ос­но­ва те­о­рии План­ка от­ли­ча­ет­ся от той, ко­то­рую мож­но бы­ло бы по­лу­чить из те­о­рии Мак­свел­ла и те­о­рии элек­тро­нов. Те­о­рия План­ка в дей­стви­тель­но­сти неяв­но ис­поль­зу­ет упо­мя­ну­тую вы­ше гипотезу све­то­вых кван­тов».

Эйн­штейн на­звал § 1 этой ра­боты «Те­о­рия из­лу­че­ния План­ка и све­то­вые кван­ты». В на­ча­ле это­го па­ра­

графа он выписывает формулу Рэлея—Джинса (9), «противоречащую опыту», и ставит вопрос о том, почему Планк получил не эту формулу, а формулу (5). Далее Эйнштейн приводит выведенное Планком соотношение (10) $\bar{E}_\nu = (c^3/8\pi\nu^2) \rho_\nu$. Он показывает, что если определить среднюю энергию резонатора с помощью выражения для энтропии, найденного в работе по статической термодинамике (ст. 4), то формула Планка (5) получается только в предположении о дискретности энергии резонаторов. Эйнштейн в результате приходит к заключению:

«Поэтому мы можем считать, что в основе теории Планка лежит следующее утверждение.

Энергия элементарного резонатора может принимать только целочисленные значения, кратные величине $(R/N) \beta \nu$; энергия резонатора при поглощении и испускании меняется скачком, а именно на целочисленное значение, кратное величине $(R/N) \beta \nu$.

Таким образом, Эйнштейн подчеркивает, что из квантования энергии резонатора следует дискретность процессов поглощения и испускания, которая была получена самим Эйнштейном в ст. 7 из предположения о дискретности энергии излучения.

Далее Эйнштейн делает второй важный вывод:

«Если энергия резонатора может меняться только скачкообразно, то для определения средней энергии резонатора, находящегося в поле излучения, нельзя применять обычную теорию электричества, ибо эта теория не знает никаких *выделенных* значений энергии. Следовательно, такое предположение заложено в основе теории Планка.

Хотя теория Максвелла неприменима к элементарным резонаторам, но *средняя* энергия элементарного резонатора, находящегося в поле излучения, равна энергии, вычисленной по максвелловской теории электричества».

При этом Эйнштейн отмечает, что в области применимости формулы излучения Вина (8) \bar{E}_ν — много меньше $\varepsilon = h\nu$, т. е. что лишь очень малое число резонаторов имеет энергию, отличную от нуля.

Окончательный вывод Эйнштейна следующий:

«Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не опровергают теорию излучения Планка; на-

против, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов».

Мы видим, что Эйнштейн подчеркивает как существенную черту теории Планка связь дискретности поглощения и испускания с предположением о выделенных — дискретных — значениях энергии резонаторов, т. е. о квантовании энергии вещества.

Дальнейшее развитие идея дискретности энергии вещества получила в работе Эйнштейна, опубликованной в начале 1907 г. (ст. 11).

Эйнштейн начинает эту статью со ссылки на свои работы, в которых он пришел «к новой точке зрения на явления поглощения и испускания света», и характеризует содержание данной работы так: «В настоящей работе будет доказано, что теория излучения — в особенности теория Планка — ведет к видоизменению молекулярно-кинетической теории, позволяющему устранить некоторые трудности, до сих пор стоявшие на пути этой теории (речь идет о теплоемкостях. — *M. E.*)».

Сначала Эйнштейн, используя результаты своей работы 1903 г. по статистической термодинамике (ст. 4), дает очень простой и принципиально важный «вывод формулы для средней энергии резонатора Планка, отчетливо выявляющий связь с молекулярной механикой». Он применяет в случае термодинамического равновесия общую формулу для вероятности dW того, что энергия E подсистемы, составляющей малую часть всей системы и описываемой независимыми переменными p_ν ($\nu=1, 2, \dots, m$), лежит в пределах от E до $E+dE$:

$$dW = \exp\left(-\frac{N}{RT}E\right) \omega(E) dE, \quad (21)$$

где

$$\omega(E) dE = \int_{dE} dp_1 \dots dp_n, \quad (22)$$

и «интеграл распространяется на все комбинации p_ν , соответствующие значениям энергии от E до $E+dE$ ». Таким образом, Эйнштейн рассматривает общий вид распределения Больцмана; от выбора функции $\omega(E)$, т. е. от того, какие состояния считаются равновероятными, будут зависеть конкретный вид функции распределения и средние значения физических величин. Для частицы, совершающей линейные гармонические коле-

бания, энергия $E = ax^2 + b\xi^2$, где x — мгновенное расстояние этой частицы от положения равновесия, а ξ — мгновенная скорость (a и b — постоянные). Из формулы (22) следует, что $\omega(E) = \text{const}$, и среднее значение энергии согласно (21) получается равным:

$$\bar{E} = RT/N. \quad (23)$$

Для «колеблющегося вдоль прямой линии иона» это приводит при учете соотношения (10) (Эйнштейн ссылается на работу Планка) к формуле (9), о которой Эйнштейн впервые говорит как о «формуле Рэлея». Он подчеркивает, что эта формула справедлива, как «известно, лишь в предельном случае больших значений T/ν ».

«Чтобы прийти к планковской теории излучения абсолютно черного тела», Эйнштейн (ссылаясь при этом на появившиеся в 1906 г. лекции Планка по теории теплового излучения) сохраняет соотношение (10), предполагая, «что максвелловская теория электричества правильно воспроизводит связь между плотностью излучения и \bar{E} », но отказывается от формулы (23), предполагая, «что применение молекулярно-кинетической теории приведет к противоречию с опытом». Он исходит из формулы (21) «общей молекулярной теории теплоты» и вместо $\omega = \text{const}$ полагает $\omega = 0$ для всех значений E , кроме значений от 0 до $0 + \alpha$, от $\epsilon + \alpha$, от 2ϵ до $2\epsilon + \alpha$ и т. д., где α бесконечно мало по сравнению с ϵ , а для этих интервалов приравнивает интегралы $\int \omega dE$ постоянной A , что «включает в себя предположение, что энергия рассматриваемого элементарного образования принимает только значения, бесконечно близкие к величинам 0, ϵ , 2ϵ и т. д.». Среднее значение энергии при $\epsilon = (R/N)\beta\nu = h\nu$ («согласно гипотезе квантов») получается равным

$$\bar{E} = \bar{E}_\nu = h\nu / (\exp \frac{h\nu}{kT} - 1) \quad (24)$$

и приводит согласно соотношению (10) к формуле Планка (5). Эйнштейн указывает, что формула (24) «дает зависимость средней энергии резонатора Планка от температуры». В то время как эта формула была получена Планком достаточно сложным путем, Эйнштейн в результате применения распределения Больцмана (21) к квантованным состояниям получил ее сразу.

Очень важным является общий вывод Эйнштейна: «...до сих пор считали, что движение молекул подчиняется таким же точно законам, каким подчиняется движение тел нашего повседневного опыта (с добавлением одного только постулата полной обратимости), теперь же приходится делать предположение, что для колеблющихся с определенной частотой ионов, участвующих в обмене энергией между веществом и излучением, множество состояний, которые могут принимать эти ионы, меньше, чем для тел нашего повседневного опыта». Здесь проявляется глубокое понимание Эйнштейном необходимости отказа от классической механики при описании движения микрочастиц.

Эйнштейн идет и дальше и ставит вопрос: «...если элементарные образования, существование которых предполагалось в теории обмена энергией между излучением и веществом, мы не можем понимать в смысле современной молекулярно-кинетической теории теплоты, то не следует ли нам тогда видоизменить теорию и для других периодически колеблющихся образований, рассматриваемых молекулярной теорией теплоты?». Эйнштейн положительно отвечает на этот вопрос и, предполагая, что энергия колебательного движения атомов в твердом теле около положений равновесия квантуется, развивает теорию теплоемкостей твердых тел. Для простейшей модели независимых колебаний отдельных атомов, приписывая каждому атому три колебательные степени свободы. Эйнштейн получает для средней энергии колебаний на атом утроенную величину (24), а для грамм-атома $\frac{1}{3}$ энергию

$$3R \frac{\beta v}{\exp \frac{\beta v}{T} - 1}, \quad (25)$$

дифференцирование которой по температуре T и суммирование «по всем видам колеблющихся элементарных образований, существующим в данном твердом теле», дает удельную теплоемкость как функцию температуры, причем при низких температурах эта теплоемкость стремится к нулю.

Мы не будем подробнее останавливаться на разработке Эйнштейном квантовой теории теплоемкости, развитие которой началось именно с данной работы и было продолжено впоследствии другими учеными, в част-

ности Дебаем и независимо Борном и Карманом. Отметим только, что Эйнштейн сперва предполагал, что в твердом теле колеблются ионы, и вычислил по теплоемкости частоты колебаний, которые должны проявляться в инфракрасных спектрах. В частности, для алмаза он предсказал максимум инфракрасного поглощения при $\lambda = 11$ мкм. Однако затем (ст. 12) он отказался от сделанного ранее предположения, что «носителями тепла в твердых телах (изоляторах), скорее всего, являются только положительные атомные ионы». Эйнштейн указывает: «весьма вероятно, что могут существовать незаряженные носители тепла, не участвующие в оптических явлениях». И делает вывод: «Итак, согласно теории следует ожидать, что либо алмаз имеет максимум поглощения при $\lambda = 11$ мкм, либо в алмазе вообще нет обнаруживаемой оптически инфракрасной собственной частоты». Мы видим, как Эйнштейн стремится возможно конкретно представить себе элементарные процессы, происходящие в твердом теле.

Дальнейшее развитие идей Эйнштейна о свойствах излучения содержится в двух замечательных работах, опубликованных им в 1909 г. в «*Physikalische Zeitschrift*» (ст. 17, 19). В них был впервые рассмотрен корпускулярно-волновой дуализм для излучения, что явилось очень важным этапом в развитии квантовых представлений вообще.

Мы рассмотрим главные положения данных работ Эйнштейна и весьма важные полученные в них результаты. Вместе с тем мы сможем лишь частично осветить связь этих работ с работами Эйнштейна по статистической термодинамике и теории флуктуаций, что требует специального анализа.

В начале ст. 17 о проблеме излучения Эйнштейн отмечает, что в последнее время Лоренц, Джинс и Ритц «выступили в этом журнале (речь идет о статьях, опубликованных в «*Physikalische Zeitschrift*» в 1908 г. — М. Е.) с изложением своих взглядов на эту чрезвычайно важную проблему, что облегчает критическое осмысление ее современного состояния». Эйнштейн излагает свои соображения по пунктам, «считая полезной дискуссию ученых, серьезно занимающихся этой проблемой, даже если она и не приведет к окончательному результату».

Сперва Эйнштейн разбирает вопрос о запаздываю-

щих потенциалах в электродинамике, уравнения для которых в противоположность Ритцу он рассматривает «только как вспомогательные математические формулы». Эйнштейн считает, что нельзя «утверждать о необратимости электромагнитных элементарных явлений». Отметим, что в том же 1909 г. Эйнштейн опубликовал совместно с Ритцем заметку, в которой они сформулировали различие в своих взглядах. В конце этой заметки указывалось, что «Ритц рассматривает ограничение в виде запаздывающих потенциалов как один из источников второго начала термодинамики, в то время как Эйнштейн считает, что необратимость покоится исключительно на вероятностных основах» (ст. 18).

Затем Эйнштейн пишет, что «мнению Джинса (статистическому рассмотрению собственных колебаний электромагнитного поля. — *M. E.*) можно противопоставить утверждение о том, что применять общие результаты статистической механики к полости, заполненной излучением, по-видимому, недопустимо». Ссылаясь на свою работу (ст. 7), Эйнштейн указывает, что закон (9) («закон, выведенный Джинсом») можно также получить из соотношения (10) между ρ_v и \bar{E}_v для «осциллирующего иона» и из вытекающего из «молекулярной теории теплоты с необходимостью» равенства $\bar{E}_v = RT/N$.

Далее Эйнштейн подчеркивает, что «...нельзя сомневаться в том, что наши современные представления с необходимостью приводят к закону, защищаемому Джинсом» (т. е. к закону (9)), и что «с не меньшей уверенностью можно утверждать» о противоречии этого закона опыту, и задает вопрос: «в каком отношении находится теория излучения Планка» к «теории, построенной на общепринятых в настоящее время теоретических основах?» (т. е. к классической теории). Эйнштейн указывает, что «ответ на этот вопрос, по-моему, затруднен тем, что Планк допускает в изложении своей теории некоторую логическую незавершенность» и, развивая мысли, высказанные ранее, Эйнштейн анализирует вопрос об определении вероятности W состояния при рассмотрении соотношения Больцмана $S = (R/N) \ln W + \text{const.}$

Как подчеркивает Эйнштейн, «ни Больцман, ни Планк не давали определения W » и лишь «полагали чисто формально, что W равно числу «комплекций» рас-

сма­три­вае­мо­го со­сто­я­ния». Эйнштейн показы­ва­ет, что если бы Планк вы­брал ком­плек­сы «так, чтобы они были рав­но­вероят­ны­ми в соз­дан­ной им те­о­ре­ти­че­ской кар­тине на ос­но­ве ста­ти­стиче­ско­го рас­пре­де­ле­ния», то он бы при­шел фор­му­ле Рэлея—Джинса (9). Эйнштейн за­ка­нчи­ва­ет этот очень важ­ный пункт сло­ва­ми: «Как бы ни ра­до­вал­ся каж­дый физик, что Планк, к сча­стью, от­бросил это тре­бо­ва­ние, все же не сле­ду­ет за­бы­вать, что фор­му­ла из­лу­че­ния Планка не­со­вмес­тима с те­о­ре­ти­че­скими ос­но­ва­ми, из ко­то­рых Планк ис­хо­дил». Мы ви­дим, как Эйнштейн с об­щей точки зре­ния ве­сь­ма г­лу­бо­ко ана­ли­зи­рует со­от­но­ше­ние Больцмана и фор­му­лу Планка.

Эйнштейн ука­зы­ва­ет, «каким обра­зом можно из­менить ос­но­вы те­о­рии Планка для то­го, чтобы фор­му­ла из­лу­че­ния Планка дей­стви­тель­но яв­ля­лась след­стви­ем те­о­ре­ти­че­ских ос­но­в». Для это­го нужно, во­пер­вых, при­дер­жи­вать­ся со­от­но­ше­ния (10), «вы­ве­ден­но­го Планком из те­о­рии Мак­свелла» (в важ­ном при­ме­ча­нии Эйнштейн го­во­рит, что едва ли можно сом­не­вать­ся, что «элек­тро­маг­нит­ная те­о­рия из­лу­че­ния да­ет по край­ней мере пра­виль­ные сред­ние по вре­мени зна­че­ния»), и, во­вторых, «ви­до­из­менить ста­ти­стиче­скую те­о­рию теп­лоты, вве­дя сле­ду­ю­щую ги­по­те­зу: элек­три­че­ски за­ря­жен­ная система, ко­то­рая спо­собна, со­вер­шая ко­ле­ба­ния с ча­стотой ν , пре­вра­щать энер­гию из­лу­че­ния в энер­гию ве­ще­ства и на­обо­рот, может на­хо­диться в ко­ле­ба­тель­ных со­сто­я­ни­ях не с произ­воль­ной энер­гией, а толь­ко с энер­гией, крат­ной $h\nu$; при этом h — по­сто­ян­ная, вве­ден­ная Планком в его фор­му­ле из­лу­че­ния». От­ме­тим, что, на­чи­ная с дан­ной ра­боты, Эйнштейн поль­зу­ется по­сто­ян­ной Планка и энер­гию кван­та за­пи­сы­ва­ет как $h\nu$.

Цен­тральное место в ст. 17 за­ни­ма­ет рас­смот­ре­ние ф­лу­к­ту­а­ций. Эйнштейн пи­шет: «Так как толь­ко что пред­ло­жен­ная мо­ди­фи­ка­ция ос­но­в те­о­рии Планка с не­об­хо­ди­мостью ве­дет к г­лу­бо­чай­шим из­ме­не­ни­ям на­ших физиче­ских те­о­рий, то край­не важ­но отыс­ки­вать по воз­мож­ности про­стые не­за­ви­си­мые ин­тер­пре­та­ции фор­му­лы Планка или за­ко­на из­лу­че­ния во­об­ще, пред­по­ла­гая его из­вест­ным. Ни­же при­во­дят­ся два под­хо­да к это­му во­про­су, от­ли­ча­ю­щие­ся своей про­сто­той». Дан­ные под­хо­ды — ана­лиз для из­лу­че­ния ф­лу­к­ту­а­ций энер­гии и ф­лу­к­ту­а­ций им­пуль­са — и из­ла­га­ю­тся в даль­ней­шем.

Эйнштейн ука­зы­ва­ет, что со­от­но­ше­ние Больцмана

$S = (R/N) \ln W$ «до сих пор применяли главным образом для того, чтобы, определив сначала на основе более или менее законченной теории величину W , затем вычислить энтропию. Но это соотношение можно использовать также для решения обратной задачи — для определения статистической вероятности отдельного состояния A , некоторой замкнутой системы по найденным из опыта значениям S ». Именно такой метод применял Эйнштейн в работе 1905 г., на что он и указывает; при этом Эйнштейн подчеркивает, что тогда он исходил из формулы излучения Вина, справедливой «только в пределе больших значений ν/T » (в оригинальном тексте Эйнштейна, а также в русском переводе (ст. 17) ошибочно написано «малых значений»). Теперь Эйнштейн исходит из формулы излучения Планка, что и позволяет ему получить фундаментальные новые результаты.

Эйнштейн рассматривает флуктуации энергии равновесного излучения, частоты которого заключены в интервале от ν до $\nu + d\nu$, в малом объеме v , сообщаемом с большим объемом V ($V \gg v$; объемы предполагаются ограниченными диффузно отражающими стенками). Значения энергии η будут отклоняться от ее среднего значения $\bar{\eta}$ (равного $\eta_0 = \nu \rho_\nu d\nu$) и флуктуация энергии $\varepsilon = \eta - \eta_0$. Применяя статистический закон, связывающий вероятность отклонений от среднего с энтропией, и разлагая энтропию σ в ряд по степеням ε , Эйнштейн выводит формулу:

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{N \left\{ \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} \right\}_0}, \quad (26)$$

в которую входит равновесное значение второй производной энтропии излучения (в объеме v) по его энергии ($d\varepsilon = d\eta$). По известной плотности энергии равновесного излучения ρ_ν можно найти $\overline{\varepsilon^2}$, и в результате такого вычисления Эйнштейн получает основную формулу для флуктуаций энергии равновесного излучения, которую можно записать в виде:

$$\overline{\varepsilon^2} = \left(h\nu \rho_\nu + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho_\nu^2 \right) v d\nu. \quad (27)$$

Эйнштейн показывает при помощи «простых рассуждений на основе анализа размерностей», что второй

член в правой части формулы (27) описывает флуктуации согласно волновой теории, обусловленные интерференцией «бесконечно большого числа лучей, составляющих излучение объема τ ». Первый же член «дает такие флуктуации энергии излучения, как будто излучение состоит из движущихся независимо точечных квантов с энергией $h\nu$ ». Этот член описывает флуктуации согласно корпускулярной теории. Эйнштейн специально отмечает, что величина относительной флуктуации, обусловленной первым членом, не зависит от величины объема, в котором находится излучение.

Затем Эйнштейн рассматривает флуктуации импульса равновесного излучения. Он вычисляет их для зеркала площади f , свободно движущегося в направлении нормали к f под действием флуктуаций светового давления, обусловленных этими флуктуациями импульса. Для импульса Δ , передаваемого за время τ вследствие случайных флуктуаций светового давления зеркалу, идеально отражающему в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ и прозрачному для излучения всех других частот, Эйнштейн получает формулу:

$$\frac{\overline{\Delta^2}}{\tau} = \frac{1}{c} \left(h\nu \rho_\nu + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho_\nu^2 \right) f d\nu, \quad (28)$$

совершенно аналогичную формуле (27). Как подчеркивает Эйнштейн, «и в этом случае формула говорит, что согласно формуле Планка, обе названные причины флуктуаций выглядят взаимно независимыми (аддитивность членов, составляющих квадрат флуктуаций)».

Эйнштейн делает следующий общий вывод: «Из обоих последних рассуждений (о флуктуациях энергии и о флуктуациях импульса излучения. — *М. Е.*), по-моему, неопровержимо вытекает, что излучение должно иметь другую структуру, чем мы теперь думаем». Далее он пишет: «Отклонение наблюдаемых на опыте значений от теоретических (согласно классической теории. — *М. Е.*) проявляется тем сильнее, чем больше ν и меньше ρ_ν », и специально подчеркивает, что «согласно сказанному выше недостаточно предполагать, что излучение может *испускаться* и *поглощаться* только в виде квантов этой величины и что, следовательно, дело сводится к свойству испускающего и поглощающего вещества (как думали Планк и большинство физиков в тот период и в последующее время вплоть до середины 20-х гг. —

М. Е.); рассуждения... показывают, что флуктуации пространственного распределения излучения, равно как и флуктуации светового давления, происходят так, как если бы излучение состояло из квантов указанной величины».

Таким образом, Эйнштейн в полученных результатах видит подтверждение своей идеи квантов света. Он пишет, что «экспериментальное изучение следствий теории квантов света является, на мой взгляд, одной из важнейших задач, которые предстоит решить современной экспериментальной физике», и подразделяет «полученные до настоящего времени следствия» на три группы: а) определение «энергии элементарных процессов, связанных с поглощением и, соответственно, испусканием излучения определенной частоты» (закон Стокса, фотоэффект, катодная люминесценция), б) равенство числа элементарных актов при поглощении квантов света величине $E/h\nu$, где E — полная поглощенная энергия, а ν — частота поглощенного света, в) «модификация кинетической теории теплоемкостей» (здесь Эйнштейн ссылается на свою работу (ст. II) и «определенные связи между оптическими и тепловыми свойствами тел».

Очень интересен последний раздел рассматриваемой работы. Эйнштейн пишет: «По-видимому, трудно построить теорию, полностью объясняющую световые кванты так, как наша современная молекулярная механика в соединении с теорией Максвелла—Лоренца объясняет формулу излучения Джинса. Тот факт, что речь идет лишь о *модификации* наших современных теорий, а не о полном *отказе* от них, вытекает уже из того, что закон Джинса в пределе (для малых ν/T), видимо, выполняется».

Как известно, мысль о связи между классической и квантовой теориями и о предельном переходе от квантовой теории к классической получила впоследствии развитие в принципе соответствия Бора. Далее Эйнштейн говорит о том, что «указание на то, каким образом можно осуществить эту модификацию, дает чрезвычайно важный, на мой взгляд, анализ размерностей, проведенный Джинсом несколько лет назад», «коротко воспроизводит» анализ Джинса («измененный в нескольких пунктах») и приходит к соотношению $h = e^2/c$ между постоянной Планка и величиной элементарного электрического заряда. «Самое важное в этом выводе, —

пишет Эйнштейн, — что он сводит квантовую постоянную света h к элементарному кванту электричества e . Эйнштейн выражает мнение, «что та модификация теории, которая дает как следствие элементарный квант e , будет также содержать в себе квантовую структуру излучения», и надежду на построение единой теории: «Однако многообразие возможностей, по-видимому, не настолько велико, чтобы отпугнуть от этой задачи». Оптимизм Эйнштейна не оправдался и, как известно, единая теория до сих пор не построена. Стремление найти самые общие подходы было характерно для Эйнштейна, и в данном случае оно ярко проявилось.

Заслуживает внимания небольшое добавление в конце ст. 17, в котором Эйнштейн подчеркивает по поводу критики Планка, что «соответствующие противопоставления в моей статье следует понимать не как возражения в собственном смысле слова против теории Планка, но только как попытку более отчетливо, чем это делалось ранее, осознать и применить принцип связи энтропии и вероятности».

Дальнейшее рассмотрение корпускулярно-волнового дуализма для излучения на основе полученных результатов (уравнения (27) и (28)), содержится в обобщающем докладе Эйнштейна в сентябре 1909 г. в Зальцбурге перед аудиторией ученых, среди которых были виднейшие физики того времени (ст. 19). Эйнштейн пишет, что «сегодня гипотезу эфира мы должны считать уже устаревшей» и что «существует обширная группа фактов в области излучения, показывающих, что свет обладает рядом фундаментальных свойств, которые можно понять с точки зрения теории истечения Ньютона намного лучше, чем с точки зрения волновой теории. Поэтому я считаю, что следующая фаза развития теоретической физики дает нам теорию света, которая будет в каком-то смысле слиянием волновой теории света с теорией истечения. Цель последующих рассуждений состоит в том, чтобы обосновать такое мнение и показать неизбежность глубокого изменения наших взглядов на сущность и структуру света».

Эйнштейн рассматривает, как происходили поиски законов, описывающих влияние гипотетической среды — эфира, на оптические и электромагнитные явления, характеризует теорию Лоренца и излагает основные положения теории относительности. Он приходит к выво-

ду, что «теория относительности изменяет наши взгляды на природу света в том отношении, что свет выступает в ней как нечто существующее самостоятельно, подобное веществу». Далее он перечисляет те «фундаментальные свойства световых явлений», которые волновая теория света не может объяснить, и видит источник ее трудностей в отсутствии в ней обратимости. Он сопоставляет обратимость каждого элементарного процесса в молекулярно-кинетической теории с отсутствием такой обратимости «в рамках волновой теории для элементарных процессов излучения». Эйнштейн указывает, что «осциллирующий нон согласно известной нам теории создает расходящуюся сферическую волну. Обратный процесс как элементарный процесс не существует», и высказывает мнение, что вывод об отсутствии обратимости элементарного процесса испускания света, к которому приводит волновая теория, не соответствует действительности.

Анализируя законы возникновения вторичных электронов под действием рентгеновского излучения, Эйнштейн делает фундаментальное заключение о том, что «элементарный процесс излучения является, по-видимому, направленным». Затем он рассматривает, следуя Планку, теорию равновесного теплового излучения, как давшую «важные исходные идеи» о структуре излучения, и приходит к выводу, что принять теорию Планка означает отвергнуть самые основы классической теории излучения. Именно это Эйнштейн и считает необходимым сделать, как он «уже пытался показать ранее». В дальнейшем Эйнштейн разбирает из двух подходов, предложенных им в ст. 17, только один, который «благодаря своей наглядности» ему кажется наиболее убедительным, а именно второй подход, приводящий к формуле (28) для флуктуаций импульса излучения. Он подчеркивает, что для этих флуктуаций «как будто существует две независимые разные причины», и на основе анализа формулы (28) делает вывод о существовании неравномерностей в распределении импульса излучения, «которые при малой плотности энергии излучения намного превосходят» пространственные неравномерности, вытекающие из волновой теории.

В заключение работы Эйнштейн пишет, что, насколько ему известно, «еще не удалось построить математическую теорию излучения, описывающую как волновую

структуру, так и структуру, следующую из первого члена нашей формулы (квантовую структуру)». Высказывая как «пока наиболее естественное», предположение о том, «что появление электромагнитных полей света должно быть связано с особыми точками», Эйнштейн вместе с тем говорит, «что до тех пор, пока такая картина не приведет к точной теории, ей не следует придавать особого значения», и что он «хотел только показать с ее помощью, что нельзя считать несовместимыми обе структуры (волновую и квантовую), которыми одновременно должно обладать излучение в соответствии с формулой Планка».

Обоснование Эйнштейном в работах 1909 г. (ст. 17, 19), исходя из рассмотрения флуктуаций энергии и флуктуаций импульса, идеи корпускулярно-волнового дуализма для излучения, наличия у излучения одновременно двух структур, волновой и корпускулярной, явилось весьма важным этапом развития квантовых представлений. Как правильно указывает Хунд в книге, посвященной истории квантовой теории, «своими статьями о статистических флуктуациях излучения Эйнштейн ввел корпускулярно-волновой дуализм для света». Вместе с тем очень существенно, что рассмотрение квантовых флуктуаций импульса излучения привело к представлению о направленности процессов излучения, которое в дальнейшем оказалось весьма существенным для понимания характера связи волновых и корпускулярных свойств излучения.

В период с 1910 по 1915 г. Эйнштейн опубликовал ряд работ, посвященных дальнейшему развитию квантовых представлений, однако главное внимание он уделял созданию общей теории относительности. Так, в октябре 1912 г. он писал Зоммерфельду, который, как и многие другие, ждал от него решающих вкладов в квантовую теорию: «Ваше дружеское письмецо поставило меня в затруднительное положение. Но уверяю Вас, что в вопросе о квантах я не могу сказать ничего нового, что могло бы вызвать интерес... Теперь я занимаюсь исключительно проблемой гравитации...»

В 1916 г., после того как Эйнштейн добился исключительных успехов в создании общей теории относительности, он вновь направил свое внимание на фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом, опираясь как на результаты своих преж-

них исследований, так и на работы Бора 1913 г. по теории атома [11]. Эйнштейну удалось в работах 43 и 44 найти новый подход к проблемам взаимодействия излучения с веществом и внести еще один чрезвычайно существенный вклад в развитие квантовых представлений. Вероятностное рассмотрение элементарных процессов взаимодействия излучения с веществом в этих работах легло в основу современной квантовой электроники.

В первой и более краткой ст. 43 Эйнштейн во введении характеризует путь, по которому шел Планк, когда «16 лет тому назад создал квантовую теорию, установив свою формулу излучения». Эйнштейн приводит соотношение Планка (10), указывая, что Планк «вычислил среднюю энергию резонатора \bar{E} как функцию температуры по новым, предложенным им основным правилам квантовой теории», и что вывод Планка «отличался беспримерной смелостью, но нашел блестящее подтверждение». «Однако ничего не удовлетворяло, — пишет Эйнштейн, — что рассмотрение на основе электродинамики и механики, приводящее к соотношению (10), противоречит основной идее квантовой теории...» На противоречивость рассмотрения Планка, как мы видели, Эйнштейн неоднократно указывал и ранее. И далее Эйнштейн ссылается на Бора (впервые в своих работах): С тех пор как предложенная Бором теория спектров добилась своих замечательных успехов, вряд ли можно сомневаться, что основная идея квантовой теории должна быть сохранена. Таким образом, единство теории, по-видимому, должно быть установлено так, чтобы рассмотрение с помощью электродинамики и механики, приведшее Планка к соотношению (10), заменить *квантотеоретическими соображениями о взаимодействии между веществом и излучением* (курсив мой. — М. Е.). Стремясь к этому, я пришел к следующему выводу, который говорит сам за себя благодаря своей простоте и общности». Этим Эйнштейн заканчивает краткое введение к статье. Затем он рассматривает поведение монохроматического резонатора, учитывая согласно классическим законам испускание и поглощение, причем наряду со спонтанным испусканием вводит и вынужденное («индуцированное излучение»). Далее Эйнштейн применяет уже квантовую теорию. Он рассматривает статистическое равновесие для перехо-

дов между состояниями с энергиями ϵ_m и ϵ_n ($\epsilon_m > \epsilon_n$), характеризуя спонтанное испускание, поглощение и вынужденное испускание коэффициентами A_{mn} , B_{nm} и B_{mn} (хорошо известными коэффициентами Эйнштейна A и B , определяющими вероятности соответствующих переходов), выписывает уравнение баланса $A_{mn} N_m + B_{mn} N_m \rho_\nu = B_{nm} N_n \rho_\nu$, где N_m и N_n — населенности уровней энергии ϵ_m и ϵ_n . Определяя отношение N_n/N_m согласно распределению Больцмана, а также учитывая, что $\rho_\nu \rightarrow \infty$ при $T \rightarrow \infty$ (это дает соотношение между B_{nm} и B_{mn}), Эйнштейн получает спектральную плотность излучения в виде:

$$\rho_\nu = \frac{a_{mn}}{\exp\left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_n}{kT}\right) - 1}, \quad (29)$$

где $a_{mn} = A_{mn}/B_{mn}$, т. е. «соотношение Планка между ρ_ν и T с неопределенными пока постоянными». Эйнштейн пишет здесь о том, что «постоянные A_{mn} и B_{mn} можно было бы вычислить непосредственно, если бы в нашем распоряжении имелись электродинамика и механика, видоизмененные в смысле гипотезы квантов», отлично понимая, что эти постоянные являются микроскопическими характеристиками молекул.

Такая задача смогла быть решена лишь в квантовой механике. Здесь же Эйнштейн, применяя формулу Вина (4), находит, что a_{mn} должно быть пропорционально ν^3 , а $\epsilon_m - \epsilon_n$ — первой степени ν , что дает $\epsilon_m - \epsilon_n = h\nu$, «где h означает постоянную» (т. е. дает «второй постулат теории спектров Бора»). Эйнштейн считает весьма вероятным, исходя из «простоты гипотез, общности и непринужденности рассмотрения», что данное рассмотрение «станет основой будущих теоретических представлений». Это предсказание действительно оправдалось.

В ст. 43 подчеркивается, что поглощение излучения согласно соотношению $\epsilon_m - \epsilon_n = h\nu$ может приводить к возбуждению промежуточного квантового состояния, которое затем распадается, и, таким образом, «поглощение света и химический процесс являются самостоятельными процессами».

Следует специально подчеркнуть, что существенно

новым и очень важным в этой работе было рассмотрение наряду с поглощением и спонтанным испусканием вынужденного испускания. В отношении спонтанного испускания Эйнштейн отмечает, «что принятый для спонтанного испускания статистический закон есть не что иное, как закон Резерфорда для радиоактивного распада».

Более развернутое изложение своего подхода Эйнштейн дает во второй работе (ст. 44). Очень интересным является введение к ней. Эйнштейн начинает это введение следующим образом: «Формальное сходство кривой распределения по длинам волн теплового излучения с законом распределения Максвелла слишком поразительно, чтобы оно долго могло оставаться нераскрытым». Он указывает, что Вин «пришел благодаря этому сходству к такому определению формулы излучения, которое сыграло в дальнейшем большую роль», и приводит формулу (8) (как мы подчеркивали, чисто квантовую), «которая и сейчас является правильной в качестве предельного закона для больших значений ν/T ».

Далее Эйнштейн пишет, что когда Планк вывел формулу (5), «из которой как быстрое следствие развивалась квантовая теория, рассуждение Вина, которое привело к уравнению (8), естественно, было забыто». Ссылаясь на свою предыдущую работу, Эйнштейн продолжает: «Недавно я нашел применение первоначальному рассмотрению Вина, основанное на главных положениях квантовой теории, к выводу формулы излучения Планка, в котором проявляется связь между максвелловской кривой и кривой распределения по длинам волн. Этот вывод заслуживает внимания не только благодаря своей простоте, но и в особенности потому, что он вносит некоторую ясность в непонятный еще нам процесс испускания и поглощения излучения веществом». Таким образом, рассмотрение вероятностей элементарных процессов испускания и поглощения веществом и свой вывод формулы Планка, получающийся «поразительно простым и общим способом», Эйнштейн считает «применением первоначального рассмотрения Вина», для которого характерно сочетание статистического подхода и учета характеристик элементарных процессов (подчиняющихся квантовым законам, чего, разумеется, Вин не знал и что Эйнштейн уже хорошо понимал).

Далее Эйнштейн подчеркивает, что «...если принятые

гипотезы о взаимодействии излучения и вещества верны, то они должны давать больше, чем правильное статистическое распределение *внутренней* энергии молекул. При поглощении и испускании имеет место также передача молекулам *импульса*. В результате устанавливается распределение молекул по скоростям, которое должно совпадать с распределением Максвелла, а средняя кинетическая энергия молекулы (на одну степень свободы) должна быть равна $kT/2$ «независимо от природы рассматриваемых молекул и от частот излучений, которые они поглощают и испускают». В данной работе Эйнштейн показывает, что это важное требование действительно выполняется.

При рассмотрении обмена импульсом возникает вопрос: «Испытывает ли молекула отдачу при поглощении и испускании энергии ϵ ?» Отдача будет иметь место согласно классической электродинамике для направленного спонтанного испускания, а для сферических волн «вообще нет никакой отдачи». И Эйнштейн заканчивает введение ответом на поставленный вопрос: «*Оказывается, что к непротиворечивой теории мы придем только в том случае, если все элементарные процессы будем считать полностью направленными*. В этом состоит основной результат последующих рассуждений».

В основном тексте ст. 44 сперва рассматривается распределение Больцмана $W_n = p_n \exp(-\epsilon_n/kT)$, где p_n — статистический вес как «наиболее широкое обобщение максвелловского закона распределения скоростей».

Затем Эйнштейн вводит, как в ст. 43, коэффициенты A_{mn} , B_{nm} и B_{mn} , причем дополнительно рассматривает вопрос о передаче импульса при процессах излучения. При поглощении молекула получает импульс $(\epsilon_m - \epsilon_n)/c$ в направлении облучения, а при вынужденном испускании — в противоположном направлении. Таким образом, вынужденное испускание (являющееся процессом, обратным поглощению) имеет направление. Далее Эйнштейн указывает, что «при потере энергии в результате спонтанного испускания в случае резонатора Планка последний в целом не получает никакого импульса, так как, согласно классической теории, спонтанное испускание имеет вид сферической волны», и что, как «уже отмечалось», «мы можем прийти к непротиворечивой квантовой теории лишь в том случае, если мы предпо-

ложим, что процесс спонтанного испускания также является направленным». И это приводит к тому, что молекуле «в каждом элементарном процессе спонтанного испускания» передается импульс, равный $(\epsilon_m - \epsilon_n)/c$.

Значительная часть статьи посвящена передаче импульса и его флуктуациям.

Сначала Эйнштейн выводит формулу для флуктуаций Δ импульса молекулы за время τ ,

$$\frac{\overline{\Delta^2}}{\tau} = 2 R k T, \quad (30)$$

где R — постоянная, входящая в выражение Rv для силы, действующей на молекулы со стороны излучения. В параграфах 5 и 6 Эйнштейн находит выражения для R и $\overline{\Delta^2}$ через плотность излучения $\rho\nu$. «Если затем выразить $\rho\nu$ как функцию от ν и T в соответствии с формулой Планка (5) и подставить полученный результат в (30), то последнее соотношение должно выполняться тождественно». Довольно сложное вычисление R Эйнштейн производит, описывая излучение в системе координат, которая покоится относительно рассматриваемой молекулы, и пользуясь формулами преобразования для частоты согласно теории относительности. Все элементарные процессы излучения считаются направленными. Учитывается передача импульса молекул при элементарных процессах поглощения и вынужденного испускания (для спонтанного испускания среднее значение передаваемого импульса равно нулю). Получающееся выражение для R пропорционально коэффициенту B_{nm} , пропорционально $\exp(-\epsilon_n/kT)$ и является функцией от $\rho\nu$. Вычисление $\overline{\Delta^2}$, которое проще, дает для $\overline{\Delta^2}/\tau$ выражение, также пропорциональное B_{nm} и $\exp(-\epsilon_n/kT)$ и являющееся функцией от $\rho\nu$.

В заключительном параграфе статьи Эйнштейн, используя найденные выражения для R и $\overline{\Delta^2}/\tau$, показывает, что соотношение (30) для равновесного излучения, спектральная плотность энергии которого ρ определяется формулой Планка (5), *тождественно выполняется*. Таким образом доказывается, что получаемый молекулами от излучения импульс не нарушает (в предположении полной направленности элементарных процессов излучения) статистического равновесия в соответствии со сделанными во введении утверждениями.

Эйнштейн отмечает, подводя итоги исследования, что получается «хорошее подтверждение принятым в § 2 гипотезам о взаимодействии между веществом и излучением через процессы поглощения и испускания, соответственно через спонтанное и индуцированное излучения».

Однако самым важным Эйнштейн считает «вывод, касающийся импульса, который передается молекуле при спонтанном и вынужденном излучениях». Он рассматривает как надежно доказанное, что при испускании или поглощении энергии $h\nu$ молекула всегда получает и импульс $h\nu/c$, при поглощении в направлении пучка лучей, при вынужденном испускании — в противоположном направлении. Далее Эйнштейн особо подчеркивает, что в случае спонтанного испускания «процесс также является *направленным*. Спонтанного испускания в виде сферических волн не существует. В элементарном процессе спонтанного испускания молекула получает импульс отдачи, величина которого равна $h\nu/c$, а направление определяется согласно современным представлениям лишь «случайностью». И Эйнштейн указывает, что «эти свойства элементарного процесса, требуемые соотношением (30), делают почти неизбежным создание подлинно квантовой теории излучения. Слабость теории заключается, с одной стороны, в том, что она не приводит нас к более точному объединению с волновой теорией, и, с другой стороны, в том, что время и направление элементарного процесса представляются «случаю»; впрочем, я вполне уверен в надежности выбранного пути».

Таким образом, Эйнштейн приходит к вероятностному истолкованию связи между корпускулярными и волновыми свойствами излучения — к вероятностной интерпретации корпускулярно-волнового дуализма.

После 1916 г. Эйнштейн, продолжая интересоваться вопросами квантовой теории, опубликовал ряд работ, посвященных данным вопросам и развивавших отдельные его идеи.

Совместно с Эренфестом, с которым Эйнштейна связывала тесная дружба и общность научных интересов, были выполнены две работы, посвященные весьма актуальным вопросам квантовой теории.

В первой из них (ст. 52) обсуждался знаменитый опыт Штерна и Герлаха по отклонению пучка атомов,

обладающих магнитным моментом, при прохождении через неоднородное магнитное поле. Был рассмотрен вопрос о пространственном квантовании и о том, могут ли осуществляться «состояния, не удовлетворяющие квантовым правилам ориентации», т. е. такие состояния, в которых атомы «квантуются *не полностью*».

Во второй работе (ст. 55) был рассмотрен статистический закон, предложенный Паули для вероятности возможных элементарных актов рассеяния излучения на свободно движущихся электронах. Была решена на основе «статистических элементарных законов для поглощения и испускания света атомом Бора» более общая задача об элементарных процессах рассеяния на движущихся микрочастицах и было показано, что из найденного общего уравнения для свободно движущихся электронов получается формула Паули.

В статье общего характера (ст. 58), написанной в связи с открытием эффекта Комптона, констатируется, что «теперь мы имеем две теории света, обе необходимые и — как приходится признать сегодня — существующие без логической взаимосвязи, несмотря на двадцать лет колоссальных усилий физиков-теоретиков». В самом конце статьи Эйнштейн пишет: «Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул, не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи импульса». Таким образом, Эйнштейн еще раз подчеркивает важность рассмотрения передачи импульса.

Наиболее существенный вклад Эйнштейна в развитие квантовых идей за рассматриваемый период представляют статьи по квантовой теории идеального газа (ст. 62—64) — хорошо известные работы по квантовой статистике, получившей название статистики Бозе—Эйнштейна.

В 1924 г. Бозе прислал Эйнштейну из Индии статью, которая содержала вывод формулы Планка (5) на основе подсчета числа возможных распределений световых квантов по ячейкам фазового пространства. Эйнштейн перевел эту статью с английского языка на немецкий и снабдил следующим примечанием: «Вывод формулы Планка, предложенный Бозе, является, по моему мнению, большим достижением. Используемый им метод дает также квантовую теорию идеального га-

за, которую я изложу в другом месте». Такая теория была изложена в двух его работах 1924—1925 гг.

Эйнштейн пишет: «Квантовой теории одноатомного идеального газа, свободной от произвольных предположений, до сих пор не существует. Этот пробел заполняется ниже на основе нового метода, предложенного Бозе и примененного им для исключительно интересного вывода формулы излучения Планка». Эйнштейн сжато и чрезвычайно четко характеризует этот метод: «Фазовое пространство некоторого элементарного объекта (в рассматриваемом случае — одноатомной молекулы), отнесенное к заданному (трехмерному) объему, делится на «ячейки» объемом h^3 . Если имеется большое число элементарных образований, то их микроскопическое распределение, рассматриваемое в термодинамике, характеризуется тем, как размещаются по этим ячейкам элементарные образования. «Вероятность» некоторого макроскопически определенного состояния (в смысле Планка) равна числу разных микроскопических состояний, которыми может реализоваться данное макроскопическое состояние. Энтропия макроскопического состояния, а также статистические и термодинамические свойства системы определяются затем по формуле Больцмана».

Мы не будем анализировать все содержание этих работ Эйнштейна и рассмотрим лишь вопросы, связанные с корпускулярно-волновым дуализмом для микрочастиц согласно идеям де Бройля.

Эйнштейн применяет к идеальному газу свой метод рассмотрения флуктуаций, который ранее был использован в теории равновесного излучения. «Этот закон флуктуаций, — говорит Эйнштейн о соответствующем законе для идеального газа, — оказывается совершенно аналогичным закону флуктуаций квазимонохроматического излучения Планка». Для флуктуаций Δ_y числа n_y одноатомных молекул, принадлежащих энергетической области ΔE , в объеме газа V , сообщающемся с бесконечно большим объемом того же газа, Эйнштейн записывает закон флуктуаций в виде:

$$\left(\frac{\Delta_y}{n_y} \right)^2 = \frac{1}{n_y} + \frac{1}{z_y}, \quad (31)$$

где z_y — число ячеек фазового пространства, принадлежащих бесконечно малой области энергий молекул

ΔE . Так же как формулы (27) и (28) для флуктуаций равновесного излучения, формула (33) содержит два члена — корпускулярный и волновой. Эйнштейн подчеркивает, что второй член в случае излучения соответствует интерференционным флуктуациям и что этому члену «можно придать соответствующий смысл и в газе, сопоставляя газу некоторый процесс излучения и вычисляя интерференционные флуктуации последнего». Эйнштейн при этом полагает, «что здесь идет речь не только о простой аналогии» (курсив мой. — М. Е.). И он ссылается на диссертацию Луи де Бройля (1924 г.) как работу, «заслуживающую всяческого внимания» (в ссылке на эту диссертацию Эйнштейн указывает, что в ней «имеется также очень интересная геометрическая интерпретация квантовых правил Бора—Зоммерфельда»), и пишет, что де Бройль показал, «каким образом материальной частице или системе частиц можно сопоставить (скалярное) волновое поле». Эйнштейн приводит соотношение де Бройля между фазовой скоростью волны V и скоростью материальной частицы v , $V = c^2/v$, указывая, что, «как показал де Бройль, v в то же время является и групповой скоростью этого волнового процесса». И Эйнштейн пишет:

«Теперь легко видеть, что таким способом можно сопоставить газу скалярное волновое поле; прямым вычислением я убедился в том, что $1/z$ есть средний квадрат флуктуаций этого волнового поля, что соответствует исследованной нами выше энергетической области ΔE ».

Далее Эйнштейн указывает, что при прохождении через отверстие пучок молекул должен испытывать дифракцию («аналогичную дифракции луча света»). Для этого длина волны $\lambda = h/mv$ должна быть сравнимой с размерами отверстия. Эйнштейн рассматривает возможность обнаружить такую дифракцию по температурной зависимости коэффициентов вязкости газообразного водорода и гелия при низких температурах, когда λ будет порядка диаметра молекул τ , что должно привести к дифракционным явлениям и увеличению коэффициента вязкости (считая, что происходит дифракция, аналогичная дифракции Фраунгофера на диске, и что молекулы при λ одного порядка с τ сильно отклоняются).

Мы видим, что Эйнштейн не только понял исключительно большое значение идей де Бройля (развивавшие-

го для микрочастиц идеи самого Эйнштейна о корпускулярно-волновом дуализме), но и сумел найти им применение в квантовой статистике. Следует отметить, что тогда как для флуктуаций равновесного излучения Эйнштейн обращал особое внимание на первый, *корпускулярный*, член, для флуктуаций идеального одноатомного газа такое внимание он обратил на второй, *волновой*, член. Очень существенным было и указание Эйнштейна на возможность дифракции микрочастиц.

Необходимо особо подчеркнуть, что поддержка Эйнштейном идей де Бройля сыграла большую роль в их распространении.

Вклад Эйнштейна в развитие квантовых представлений оказался весьма важным при становлении квантовой механики. Именно на идеях Эйнштейна о корпускулярно-волновом дуализме базировался один из двух подходов к квантовой механике, реализованный Шредингером в начале 1926 г. в виде волновой механики (другой подход реализовал Гейзенберг летом 1925 г. в виде матричной механики). Шредингер писал в марте 1926 г., что его «теория была стимулирована работой Л. де Бройля» (в которой последний, как мы уже подчеркивали выше, развивал для микрочастиц идеи Эйнштейна) и «краткими, но в высшей степени прозорливыми замечаниями Эйнштейна». Однако непосредственно в становлении квантовой механики Эйнштейн не участвовал и последним его крупным конкретным вкладом в развитие квантовых представлений остались работы по квантовой статистике. Когда в 1927 г. предметом обсуждения стали вопросы физической интерпретации квантовой механики на основе соотношений неопределенности Гейзенберга и принципа дополнительности Бора, началась знаменитая дискуссия Эйнштейна с Бором по поводу полноты квантовомеханического описания явлений микромира (о которой мы упоминали в самом начале статьи; этой дискуссии предшествовало расхождение в мнениях между Бором и Эйнштейном в период с 1923 по 1925 г. по принципиальным вопросам квантовой теории). Эта дискуссия продолжалась до самой смерти Эйнштейна в 1955 г. Эйнштейн оставался на своей точке зрения, что квантовомеханическое описание не является полным. Он стремился к построению единой физической картины мира, разрабатывая общую теорию поля, чему посвятил вторую половину своей

научной деятельности. Его не удовлетворяла физическая картина мира, основанная на концепции дополнителности и на вероятностной интерпретации квантовой механики. Одним из родоначальников такой интерпретации был сам Эйнштейн, пришедший еще в 1916 г. к вероятностному истолкованию корпускулярно-волнового дуализма. Однако он не считал ее окончательной и не соглашался с тем, что надо еще решительнее отказаться от классических представлений при изучении микромира, как полагали Бор и его последователи. Взгляды Эйнштейна по методологическим вопросам современной физики требуют специального рассмотрения, выходящего за рамки данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

Эйнштейн Альберт. Собрание научных трудов, т. III. М., «Наука», 1966 (ссылки в тексте на работы Эйнштейна указывают номера статей в этом томе, содержащем работы Эйнштейна по кинетической теории, теории излучения и квантовой механике).

Планк Макс. Избранные труды. М., «Наука», 1975 (статьи 1900—1901 гг.).

Бор Нильс. Избранные научные труды, т. I. М., «Наука», 1970 (статьи 1913—1915 гг.).

Шредингер Эрвин. Избранные труды по квантовой механике. М., «Наука», 1976 (статьи 1926 г.).

Паули Вольфганг. Труды по квантовой теории, т. I. М., 1975 (статья 1923 г.).

Михельсон В. А. Собрание сочинений. т. I. М., 1930 (статья 1887 г.).

Паули В. Физические очерки. Сб. статей. М., «Наука», 1975.

Борн М. Физика в жизни моего поколения. Сб. статей. М., Изд-во иностр. лит., 1965.

Борн М. Размышления и воспоминания физика. М., «Наука», 1977.

Клейн М. В кн.: Эйнштейновский сборник 1966. М., «Наука», 1966.

Клейн М. В кн.: Эйнштейновский сборник 1974. М., «Наука», 1976, с. 115, 156.

Ельяшевич М. А. Успехи физических наук, т. 122. 1977.

СОДЕРЖАНИЕ

И. Ю. КОБЗАРЕВ Эйнштейн и теоретическая физика первой трети XX века	3
Э. М. ЧУДИНОВ Рационализм Эйнштейна и современная физика	22
М. А. ЕЛЪЯШЕВИЧ Вклад Эйнштейна в развитие квантовых пред- ставлений	37

ЭЙНШТЕЙН И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Сборник статей

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *К. А. Кутузова*
Мл. редактор *Н. А. Львова*
Обложка художника *А. Григорьева*
Худож. редактор *Т. С. Егорова*
Техн. редактор *С. А. Птицына*
Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 2341

Т15551. Индекс заказа 94010. Сдано в набор 03.07.79. Подпи-
сано к печати 03.09.79. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага ти-
пографская № 3. Бум. л. 1,25. Печ. л. 2,5. Усл. печ. л. 4,20.
Уч.-изд. л. 4,22. Тираж 46 650 экз. Издательство «Знание».
161835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1295.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр,
Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

