

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН (1879—1955)

Э. В. Шпольский

«Он дал нам картину мира, превосходящую свою целостностью и гармонией самые смелые мечты прошлого».

Н. Бор.

18 апреля с. г. скончался Альберт Эйнштейн. Ушёл из жизни великий учёный, чья поразительная деятельность в разнообразнейших областях физики повлекла за собой не только крупный шаг в познании природы, но и подлинный переворот в наших основных представлениях; закончил свой земной путь гениальный мыслитель, которого В. И. Ленин назвал «одним из великих преобразователей естествознания».

Жизненный путь Эйнштейна очень прост. Он родился 14-го марта 1879 г. в г. Ульме в Вюртемберге (на Дунае); детство и школьные годы до 14 лет провёл в Мюнхене, но окончил среднюю школу в г. Аарау в Швейцарии. По окончании гимназии Эйнштейн поступил в Цюрихский политехнический институт, который окончил в 1900 г., получив права учителя математики и физики. В последующие два года Эйнштейн — преподаватель средней школы в г. Шафгаузене (немецкая Швейцария), но в 1902 г. он поступает в Федеральное патентное бюро в Берне в качестве инженера, где и работает до 1909 г. Любопытно, что именно в этой скромной должности он провёл как раз те годы, когда были сделаны его работы по молекулярной физике, теории квантов и теории относительности, которые создали ему всемирную славу, как одному из самых выдающихся физиков его времени. В 1909 г. Эйнштейн избирается экстраординарным профессором Цюрихского университета, где, однако, остаётся только в течение одного академического года, после чего в быстрой последовательности занимает кафедры в Праге (1911—1912 гг.), затем в Цюрихском политехникуме (1912—1914 гг.). В 1913 г., по инициативе Планка

и других берлинских физиков, Эйнштейн избирается на освободившуюся за смертью Вант-Гоффа вакансию члена Прусской Академии наук, а в 1914 г. становится директором Физического института императора Вильгельма и профессором Берлинского университета. В 1933 г., когда его положение, как «неарийца», в нацистской Германии стало невыносимым, — он принял профессию в Институте высших исследований (Institute for Advanced Studies) в Принстоне, США. Эту профессию, не связанную с необходимостью преподавания, он сохранял до своей отставки по возрасту в 1945 г. Последующие годы до смерти он также провёл в Принстоне. В 1921 г. Эйнштейн получил Нобелевскую премию за работы по молекулярной физике и теории квантов, а в последующие годы — множество других отличий.

В личной жизни Эйнштейн был мягким, простым и доброжелательным человеком. Он никогда не замыкался в кабинетной работе учёного и горячо откликался на все явления общественной жизни, волнующие передовое человечество; он был страстным противником войны и особенно резко возражал против применения атомного оружия.

Наиболее продуктивный период научного творчества Эйнштейна охватывает короткий промежуток времени между 1900 и 1906 гг. Начало XX столетия, когда Эйнштейн закончил своё образование, характеризуется увлечением феноменологической термодинамикой. Энергетика Оствальда и Гельма, отрицание реальности атомов Оствальдом и Махом имели известный успех среди физиков и химиков. Напротив, статистическая механика Больцмана встречала скептическое отношение. Выражалось сомнение по поводу того, каким образом в системе упругих, гладких молекул, подчиняющихся строго обратимым во времени законам ньютоновой механики, может возникнуть термодинамическая необратимость. Вероятностная интерпретация 2-го начала термодинамики, развитая Больцманом, считалась остроумной, но неубедительной. Ощущалась необходимость в отыскании таких явлений, где бы на самом деле в доступном наблюдению масштабе можно было установить нарушение законов феноменологической термодинамики, т. е. «антиэнтропийный» ход событий. Такой «*experimentum crucis*» в пользу атомистики стал возможным благодаря двум небольшим работам, опубликованным Эйнштейном. В первой из этих работ, напечатанной в 1905 г., вслед за ранее опубликованными работами, посвящёнными обоснованию статистической механики, Эйнштейн показал, что согласно молекулярно-кинетической теории частицы, взвешенные в покоящейся жидкости, должны совершать беспорядочные движения таким образом, что пропорциональным времени будет не самое смещение, но квадрат его среднего значения. В то время Эйнштейн, как он сам признаёт, ещё не имел достаточно определённых сведений

о броуновском движении. В начале работы он замечает, что если требуемое теорией беспорядочное движение и устанавливаемые для этого движения закономерности действительно будут наблюдаться, то «классическая термодинамика уже для микроскопических областей, не может считаться вполне действительной», а в конце работы, — подсчитав согласно своей теории численную величину ожидаемого среднего смещения, — обращается с призывом к экспериментаторам попытаться проверить эти результаты. Следующая работа, значительно развивающая результаты предыдущей, уже носит название «К теории броуновского движения», так как после опубликования первой работы проф. Зидентопф частным образом сообщил Эйнштейну, что движение, законы которого он исследовал в предыдущей работе, очевидно, и есть давно открытое, но количественно не исследованное броуновское движение.

Призыв обратить внимание на экспериментальную проверку законов этого движения быстро нашёл отклик. Установленный Эйнштейном закон пропорциональности между средним квадратом смещения и временем впервые был подтверждён В. А. Анри, производившим микрокинематографические съёмки броуновского движения каучуковых шариков. Затем последовали широко известные блестящие работы Ж. Перрена и его учеников, которые дали полное подтверждение теории Эйнштейна и привели к новому определению постоянной Авогадро. Эти и многочисленные другие работы знаменовали столь полное торжество атомистики, что даже сам Оствальд открыто заявил о своём поражении и о признании реальности атомов.

Мы позволили себе несколько дольше остановиться на этих первых работах Эйнштейна, так как даже в широких кругах физиков гораздо больше знают Эйнштейна — создателя теории относительности, нежели Эйнштейна, как одного из основоположников современной атомистики.

Как ни велико значение этих работ Эйнштейна, более характерной для его творчества является опубликованная им в том же 1905 г. теория световых квантов. Тогда как основатель теории квантов, М. Планк, несколько боязливо пытался примирить неизбежные выводы из его же собственных работ с классическими представлениями о природе света и ограничивал область применимости квантовых представлений взаимодействием между осцилляторами и излучением, Эйнштейн сразу понял универсальность квантовых законов и не побоялся дойти до логического конца. С удивительной смелостью он разрубил узел противоречий, накопившихся в учении о свете, заменив фиктивные осцилляторы Планка реальными световыми квантами, фотонами, $h\nu$. Тем самым дискретность из механизма взаимодействия между веществом и полем была перенесена в самую природу света. Сформулированное на основе этих представлений знаменитое «фотоэлектрическое уравнение Эйнштейна» дало простое объяснение экспериментально установленным, парадок-

ксяльным с точки зрения волновой теории, законам фотоэффекта. Вместе с тем получило объяснение «стоксовское смещение» в спектре флуоресценции и, как неизбежное следствие квантового характера поглощения, был сформулирован так называемый фотохимический закон эквивалентности.

Экспериментальная проверка фотоэлектрического уравнения Эйнштейна не только полностью его подтвердила, но и позволила П. И. Лукирскому и С. С. Прилежаеву точнее образом определить постоянную Планка h . А фотохимический закон эквивалентности сыграл огромную роль в новейшем развитии фотохимии. В сущности именно этот закон и позволил подойти к пониманию механизма фотохимических реакций, к установлению природы элементарных процессов химического действия света и последующих темновых реакций.

Чрезвычайно интересны теоретические соображения, развиваемые Эйнштейном в двух работах, посвященных квантовой теории света. В первой работе Эйнштейн рассматривает зеркало, способное отражать излучение только в интервале частот $\nu, \nu + d\nu$, а весь остальной спектр — свободно пропускать. Такое зеркало, будучи помещено в пространство, заполненное излучением, вследствие флуктуаций плотности излучения, должно совершать своего рода броуновское движение со средней энергией $\frac{1}{2} kT$.

Пользуясь своей теорией броуновского движения, Эйнштейн вычисляет средний квадрат смещения $\overline{\Delta^2}$ в направлении нормали к плоскости зеркала. Во второй работе он применяет общие законы статистики к самому излучению и вычисляет среднюю квадратичную флуктуацию плотности энергии $\overline{\epsilon^2}$ в поле излучения. Если теперь воспользоваться формулой Планка для плотности равновесного излучения, входящей в выражения и для $\overline{\Delta^2}$, и для $\overline{\epsilon^2}$, то в обоих случаях получаются формулы, состоящие из двух членов. Только один из них соответствует волновой картине природы излучения, в которой флуктуации плотности энергии обусловлены беспорядочными интерференциями потоков волн. Другой же член естественным образом интерпретируется по аналогии с флуктуациями числа молекул газа в единице объема. При такой интерпретации излучение необходимо рассматривать, как совокупность пространственно-ограниченных «атомов излучения», фотонов $h\nu$.

Таким образом, отчетливо выявляется тот поразительный факт, что в свойствах света каким-то загадочным образом комбинируются обе эти по существу взаимно исключающие картины. В той же работе, однако, Эйнштейн указал в качестве «эвристической точки зрения» на то, что объединение волновой и корпускулярной картин может быть достигнуто статистическим путем — точка зрения, полностью воспринятая современной квантовой механикой.

Несколько позднее Эйнштейн показал, что квантовые представления позволяют устранить противоречия также и в совсем другой области — в учении о теплоёмкости твёрдых тел. Достаточно было заменить классическое выражение для средней энергии одной степени свободы квантовым, чтобы получить формулу для теплоёмкости, позволившую понять причину зависимости теплоёмкости от температуры и объяснить отступления от закона Дюлонга и Пти. Хотя эта формула давала не вполне точный количественный ход зависимости теплоёмкости от температуры, её принципиальное значение было очень велико: по существу работой Эйнштейна положено начало современной теории твёрдого тела.

К квантовой теории излучения Эйнштейн вновь вернулся значительно позднее. В 1917 г. он опубликовал свой вывод формулы Планка, полученный путём рассмотрения равновесия элементарных процессов испускания и поглощения на основе самых общих квантовых постулатов. Чрезвычайно привлекательной стороной этого вывода является сочетание безупречной логической строгости с простотой и наглядностью. Однако этими дидактическими преимуществами далеко не исчерпывается значение этой небольшой работы. Именно в этой работе впервые получила отчётливое выражение статистическая трактовка квантовых переходов в излучающих и поглощающих системах. Особенно важно было различие спонтанных и вынужденных переходов; в частности, рассмотрение вынужденных переходов с излучением (отрицательная абсорбция), вначале показавшееся искусственным приёмом, очень быстро приобрело глубокий физический смысл, так как уже вскоре после появления работы Эйнштейна, Ладенбургу удалось показать существование наряду с отрицательной абсорбцией также и отрицательной дисперсии. Наконец, введение знаменитых «эйнштейновских коэффициентов» A_{ik} , B_{ik} , B_{ki} позволило Крамерсу и Гейзенбергу количественно применить к испусканию и поглощению принцип соответствия и построить квантовую теорию дисперсии, углубление и уточнение которой привело Гейзенберга к формулировке матричной формы квантовой механики.

Завершением этих работ была работа, посвящённая статистике бесспиновых частиц, известной под названием статистики Бозе — Эйнштейна.

При всём огромном значении работ Эйнштейна в области молекулярной физики и квантовой теории, главным деянием его жизни, увековечившим его имя на все будущие времена, была и остаётся теория относительности. В 1905 г., почти одновременно с появлением работ по теории броуновского движения и по теории световых квантов, под скромным названием «К электродинамике движущихся тел» появилась статья Эйнштейна, содержащая совершенно законченное изложение специальной теории относительности. Ровно пятьдесят лет прошло со времени появления этой работы и тем не менее в ней нельзя сейчас изменить ни одного слова. Когда

перечитываешь теперь эту замечательную работу, не знаешь, чему удивляться больше: уверенной ясности изложения, благодаря которой эта статья и в настоящее время может служить учебным руководством для изучения теории относительности, глубине в постановке и разрешении труднейших проблем или необычайной смелости, с которой молодой 26-летний, мало известный сотрудник швейцарского патентного бюро, порывает со многими общепринятыми положениями, казавшимися «незыблемыми» и во всяком случае полностью оправданными так называемым «здравым смыслом». Было бы неуместно напоминать в этом журнале о мучительных противоречиях, к которым привели в конце XIX столетия многочисленные эксперименты в области электродинамики и оптики движущихся систем: вся ситуация, сложившаяся здесь к началу XX века, слишком хорошо известна каждому физическому. Однако следует вспомнить, что в то время, как предшественники Эйнштейна искали выхода из создавшихся противоречий, строя специальные гипотезы (такова, например, знаменитая «гипотеза сокращения» Фицджеральда — Лорентца), Эйнштейн с необычайной ясностью и глубиной показал, что корень всех затруднений лежит не в тех или иных специальных свойствах вещества и поля, а в самых общих свойствах физического пространства и времени, — в недостаточной отчётливости тех кажущихся очевидными суждений о пространстве и времени, которые заимствованы из обыденной жизни и которые на самом деле вовсе не являются ни очевидными, ни обязательными.

Необычная форма этой работы Эйнштейна и многочисленные высказываемые в ней суждения и выводы, в корне противоречившие «символу веры» физиков того времени, представлялись дерзкими и шокирующими. Все физики тогда свято верили в «мировой эфир», а некоторые даже считали его чуть ли не единственной реальностью; все физики в не меньшей степени верили в незыблемость и в неограниченную применимость ньютоновой механики, в полную очевидность того, что мы называем «временем», «одновременностью», «системой координат» и другими основными понятиями. Но вот появляется молодой физик, который позволяет себе на первых страницах своей работы высказывать такие «еретические» суждения, как, например: «введение „светоносного эфира“ окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится ни „абсолютно покоящееся пространство“, и т. д.»; или «Пусть имеется координатная система, в которой действительны механические уравнения Ньютона», к этому примечание: «Имеется в виду „действительны в первом приближении“»; или, наконец, весь первый параграф этой работы «Определение одновременности», который в наши дни кажется таким понятным, но пятьдесят лет назад производил впечатление разорвавшейся бомбы. И тем не менее этому дерзкому

молодому человеку удалось найти выход из противоречий, которого тщетно искали такие гениальные его предшественники, как Г. А. Лорентц и А. Пуанкаре. Оба были близки к тому синтезу, который удался Эйнштейну, но ни тот, ни другой не сделали необходимого для этого решительного шага, хотя, конечно, без их глубокого анализа и Эйнштейн не смог бы завершить свой синтез. С мужеством большого учёного и большого человека Г. А. Лорентц в примечании 1912 г. к своей знаменитой работе, опубликованной в 1904 г. *), т. е. непосредственно перед появлением работы Эйнштейна, писал: «Можно заметить, что в этой статье мне не удалось в полной мере получить формулы преобразования теории относительности Эйнштейна... С этим обстоятельством связана беспомощность в некоторых дальнейших рассуждениях в этой работе. Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего строго и точно действующего закона».

В блестящей статье, посвящённой Пуанкаре по поводу столетия со дня его рождения, Л. де Бройль **) дал интересное объяснение причины того, почему Пуанкаре, который владел уже многими частными положениями теории относительности (вплоть до теоремы сложения скоростей), не смог тем не менее сделать необходимый решительный шаг. По мнению де Бройля, причина лежала в неправильной теоретико-познавательной позиции Пуанкаре. Согласно точке зрения Пуанкаре, обычно называемой конвенционализмом (де Бройль почему-то называет её номинализмом, вспоминая старых схоластиков), «существует вообще бесконечное количество различных точек зрения, различных картин, которые все логически эквивалентны и выбор между которыми учёный делает только на основании соображений удобства. Этот „номинализм“ Пуанкаре иногда препятствовал ему признавать тот факт, что между логически возможными теориями существуют такие, которые ближе к физической реальности». «Именно поэтому, — добавляет Л. де Бройль, — Эйнштейн, которому было всего 25 лет и математические знания которого были незначительны по сравнению со знаниями глубокого и гениального французского учёного, раньше его пришёл к обобщению, которое, используя и оправдывая частные достижения предшественников, одним ударом разрешает все затруднения, — да, но ударом мэтра: мощного ума, руководимого глубокой интуицией физической реальности!» (подчёркнуто мною. — Э. Ш.).

*) Electromagnetic Phenomena in a System moving with any Velocity smaller than that of Light». — Proc. Acad. Sci. Amsterdam 6, 809, 1904. Цитирую по переводу в сборнике «Принцип относительности». ОНТИ, Гостехиздат, стр. 22—23.

**) L. De Broglie, Henri Poincaré et les Théories de la Physique. Bull. de la Société Astronomique de France, июнь 1954, стр. 217.

Выведенные Эйнштейном на основе глубокого анализа понятий пространства и времени и двух основных постулатов (постулат относительности и постулат постоянства скорости света) преобразования Лорентца вскрыли неразрывную связь между пространством и временем и привели к ряду неожиданных выводов, как, например, выводу о зависимости хода часов от состояния движения.

Этот вывод уже в сравнительно недавнее время получил полное подтверждение в блестящих опытах Айвса с так называемым поперечным доплер-эффектом в канальных лучах, основанном на замедлении хода «атомных часов» (излучающий атом), и в определении времени жизни μ -мезонов.

Ещё раньше получила полное экспериментальное подтверждение формула Лорентца — Эйнштейна для зависимости массы от скорости, отличающаяся от формулы Абрагама, выведенной на основе предположения о несжимаемом электро́не.

Наконец, наиболее важным следствием специальной теории относительности является, конечно, соотношение между массой и энергией $E = mc^2$, получившее безупречное экспериментальное подтверждение в опытах с ядерными реакциями. Вместе с формулой для зависимости массы от скорости этот знаменитый закон лежит в основе современной ядерной энергетики, т. е. имеет важнейшее техническое значение. В наши дни это техническое значение теории относительности всё возрастает по мере перехода ко всё большим скоростям, достигаемым в ускорителях элементарных частиц.

В 1911—1916 гг. Эйнштейн сосредоточил огромные усилия на создании теории тяготения. Результатом этих усилий было развитие общей теории относительности и теории тягстения. Вполне сохраняя классический характер ньютоновой теории тяготения, теория Эйнштейна освободила физику от мистического действия на расстоянии. Вместе с тем она поставила и решила ещё более глубокие физические, математические и философские проблемы, нежели специальная теория относительности. Она установила неожиданную связь между тяготением и геометрией мира; в частности, она показала, что евклидова геометрия имеет лишь приближённое значение и что истинной геометрией мира является неевклидова (риманова) геометрия, в иной форме открытая великим русским математиком Н. И. Лобачевским.

Как известно, общая теория относительности привела к ряду следствий, доступных проверке точными астрономическими методами. Число таких доступных проверке следствий общей теории относительности очень ограничено. Их всего три: движение перигелия Меркурия, красное смещение спектральных линий в поле тяготения и отклонение светового луча в поле тяготения. Все эти эффекты очень малы. Поворот орбиты Меркурия составляет всего $574''$ в столетие, из которых $532''$ объясняются возмущающим влиянием других планет и только $42''$ не укладываются в рамки

Ньютоновой механики (теория Эйнштейна даёт 43"). Отклонение светового луча, проходящего у края солнца, по Эйнштейну должно составлять 1,74". При этом половина отклонения должна быть обусловлена наличием инертной «массы света», а вторая половина — обязана неевклидовым свойствам пространства. Предсказанная теорией Эйнштейна величина отклонения светового луча в поле тяготения солнца хотя и мала, однако вполне доступна наблюдению и измерению точными методами, находящимися в распоряжении астрономов. Самое предсказание такого удивительного эффекта, как тяжесть света, и особенно возможность путём обнаружения и измерения величины этого эффекта экспериментального решения глубочайшей проблемы об истинной геометрии мира — всё это вместе представляло выдающийся интерес. Поэтому, когда во время солнечного затмения 29 мая 1919 г. две экспедиции английских астрономов на самом деле обнаружили существование ожидаемого отклонения светового луча и показали, что оно имеет величину, предсказанную теорией Эйнштейна, то это вызвало небывалый в истории науки взрыв интереса к теории относительности. Интерес этот вышел далеко за пределы научных кругов физиков и астрономов; от малодоступной для популярного изложения общей теории относительности интерес вернулся к специальной теории с её замечательной стройностью, логической последовательностью и необычностью выводов. Появилась огромная научно-популярная литература; статьи печатались решительно во всех газетах и журналах, независимо от специальности последних. Вместе с тем вокруг теории относительности в невиданном масштабе разгорелись страстные споры, нередко далеко выходившие за пределы научных и философских проблем. Своеобразные следствия теории относительности и в особенности требуемый ею отказ от некоторых прочно укоренившихся предрассудков, оправдываемых ссылкой на «здравый смысл», — всё это вызывало энтузиазм у одних и раздражение у других. Интересно привести по этому поводу авторитетное свидетельство А. Зоммерфельда, напечатавшего по просьбе редакции статью о теории относительности в медицинском (!) журнале *). «Ещё никогда в истории науки, — читаем мы в этой статье, — научное открытие не обсуждалось широкими кругами так, как это имеет место с принципом относительности... До 1919 года теория относительности тщательно изучается на специальных курсах: в Мюнхене, например, почти ежегодно читаются курсы, посвящённые этой теории. С 1919 года теория относительности преподносится широкой публике как призванными для этого специалистами, так и непризванными. При этом сама теория или превозносится, или смешивается с политической грязью вместе с выдающимся

*) A. S o m m e r f e l d, Münchener Medizinische Wochenschrift, 1920, № 44, стр. 1268.

автором теории (как это было в известных берлинских собраниях^{*)}). На Наугеймском съезде естествоиспытателей и врачей после того, как председатель в своей вводной речи резко порицал демагогический подход к принципу относительности, с большим трудом удалось удержать дискуссии на должной научной высоте». Сам Зоммерфельд характеризовал уже в то время, т. е. 35 лет назад, это главное деяние Эйнштейна следующими яркими словами: «С глубокомыслием и последовательностью философского мышления, не встречавшихся никогда до сих пор в умах естествоиспытателей, с математической силой, которая напоминает Гаусса и Римана, Эйнштейн возвёл в течение десяти лет здание, перед которым мы, следившие из года в год за его работой с напряжённым вниманием, стоим, чувствуя изумление и головокружение».

После завершения работы по теории тяготения Эйнштейн сосредоточил свои усилия главным образом на создании единой теории поля, охватывающей как гравитационное, так и электромагнитное поле. Однако эти усилия при его жизни не привели к желаемому результату. Это и неудивительно: задача была ещё более грандиозна нежели задача создания теории тяготения, а сделанное им раньше так велико, что оно должно было исчерпать запас творческих сил даже такого гениального учёного, как Эйнштейн. Резюмируя, можно только сказать кратко, что едва ли в современной физике найдётся такое направление, которое своими истоками не восходило бы к Альберту Эйнштейну.

*) Имеются в виду реакционные выступления под флагом критики теории относительности, «низбодиешие научные собрания до уровня антисемитских массовых митингов» (из воспоминаний того же Зоммерфельда к 70-летию Эйнштейна, помещённых в книге Albert Einstein Philosopher — Scientist, Evanston, 1949, стр. 103). Э. Ш.

В 1910 г. М. Планк назвал Э.

Копенгаген 20^{го} сентября