

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

538.11(09)

## К ИСТОРИИ ЭФФЕКТА ЭЙНШТЕЙНА — ДЕ ГААЗА

В. Я. Френкель

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение . . . . .	545
2. Первые публикации Эйнштейна по молекулярным токам . . . . .	546
3. Вторая работа Эйнштейна . . . . .	549
4. Эйнштейн о своих работах по токам Ампера . . . . .	550
5. Предыстория работ Эйнштейна . . . . .	551
6. Дальнейшие исследования . . . . .	554
7. Спин электрона. Заключительные замечания . . . . .	555
Цитированная литература . . . . .	556

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работы по доказательству существования молекулярных токов Ампера, разбор которых составляет предмет настоящей статьи, являются самым крупным, но отнюдь не единственным свидетельством занятий Эйнштейна экспериментальными исследованиями. Бытующее среди многих физиков мнение о том, что сам Эйнштейн никогда «не работал руками», а перепоручал проведение соответствующих опытов своим соавторам или помощникам, является ошибочным и не имеющим под собой реальных оснований, — и мы подтвердим это суждение прямыми цитатами из его работ. Примечательна в этом плане концовка к его ранней (1902) статье, посвященной термодинамической теории разности потенциалов между металлами и растворами их солей и развитому на этой основе электрическому методу исследования молекулярных сил. Эйнштейн пишет: «В заключение я хотел бы извиниться за то, что предлагаю здесь лишь общий план трудоемких исследований и сам не занимаюсь экспериментом. Но эта работа все же достигнет своей цели, если после знакомства с ней кто-нибудь займется экспериментальным исследованием молекулярных сил»<sup>1</sup>.

Стоит напомнить далее, что, предложив в 1908 г. новый принцип измерения малых количеств электричества<sup>2</sup>, Эйнштейн принимал участие в работах по созданию соответствующего прибора, описанного в статье братьев П. и К. Габихтов, его швейцарских друзей. Об участии Эйнштейна в работах по конструированию и испытанию этого прибора они специально упоминают в своей публикации<sup>3</sup>. В 1921 г. Эйнштейн много времени уделял экспериментам с каналовыми лучами; соответствующие опыты проводились им совместно с Г. Гейгером<sup>4</sup>. Тремя годами позже Эйнштейн вместе с Эренфестом «ежедневно по многу часов (углублялись) в одну экспериментальную работу» (как писал Эренфест А. Ф. Иоффе<sup>5</sup>), пытаясь установить существование некоего предсказанного Эйнштейном эффекта.

Имеется статья Эйнштейна-экспериментатора, написанная им совместно с его другом врачом Г. Мюзамом. Это небольшое и изящное исследование

дование, посвященное методу определения размера каналов в фильтрах<sup>6</sup> и представляющее описание идеи прибора для измерения наибольшего размера частиц, способных пройти через данный фильтр, и проверке этой идеи на опыте.

## 2. ПЕРВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ЭЙНШТЕЙНА ПО МОЛЕКУЛЯРНЫМ ТОКАМ

Ограничившись этими беглыми замечаниями, перейдем теперь к рассмотрению серии работ Эйнштейна 1915—1916 гг. о токах Ампера. Эти работы, написанные частично в соавторстве с В. де Гаазом (1878—1960), посвящены теоретическому исследованию и экспериментальному доказательству существования хорошо ныне известного явления, получившего название эффекта Эйнштейна — де Гааза. По целому ряду причин они заслуживают, с нашей точки зрения, специального рассмотрения. Во-первых, они играли большую роль в исследованиях магнитных свойств веществ и атомов практически вплоть до открытия методов ЭПР и ферромагнитного резонанса. Во-вторых, именно в этих работах Эйнштейн в первый раз выступает как автор экспериментальных исследований. В-третьих, их рассмотрение помогает понять тот живой интерес, с которым Эйнштейн отнесся к открытию спина электрона и принял участие в дискуссиях, связанных с работой Уленбека и Гаудсмита. И наконец, в-четвертых, они имеют интересную и довольно далекую предысторию. Парадоксальным — на фоне указанной значимости этих исследований — является тот факт, что их результат содержал экспериментальную ошибку и что трактовка этих работ претерпела через несколько лет после их опубликования существенное изменение. Ниже этому вопросу будет уделено специальное внимание.

О рассматриваемом цикле работ Эйнштейн и де Гааз доложили 19 февраля 1915 г. в Берлине на заседании Немецкого физического общества, проходившем под председательством Г. Рубенса. Первая публикация из этого цикла подписана только Эйнштейном. Она была напечатана в майском номере журнала «Naturwissenschaften» за 1915 г. и называлась «Экспериментальное доказательство молекулярных токов Ампера»<sup>7</sup>. Главное ее содержание составляет необыкновенно наглядное и простое *теоретическое* рассмотрение вопроса; описание принципиальной схемы для его экспериментального исследования является небольшим приложением к основной части статьи. Эйнштейн, отправляясь от работ по магнетизму П. Кюри, Ланжевена и Вейсса, напоминает о гипотезе Ампера, сформулированной французским ученым в 1820 г., непосредственно вслед за тем, как Эрстед доказал, что вокруг проводника с током возникает магнитное поле. После опытов Эрстеда стало ясно, что магнитное поле проявляется не только как некоторое внутреннее свойство определенного класса твердых тел, делавшее их постоянными магнитами, но возникает еще и под влиянием электрического тока. «Это положение вещей, — писал Эйнштейн, — для физиков, стремящихся к единому пониманию природы, должно было выглядеть неудовлетворительным»). Именно поэтому Ампер и предположил, что магнитное поле, окружающее магнитные тела, определяется токами, текущими в молекулах, — молекулярными токами.

Другое замечание общего характера, сделанное Эйнштейном в его статье<sup>7</sup>, также не может не привлечь внимания. В подстрочном примечании к тексту своей публикации он указывает: «Теория Ампера в ее совре-

\*) Аналогичный аргумент, как известно, с особой силой Эйнштейн выдвигал в связи с экспериментально обнаруженным Этвешом равенством гравитационной и инертной масс.

менной, электронной форме сталкивается также с той трудностью, что, согласно электромагнитным уравнениям Максвелла, электроны, совершающие круговое движение, должны терять энергию вследствие излучения, так что молекулы или атомы со временем должны терять или уже потеряли свой магнитный момент, чего на самом деле, конечно, не происходит». Удивительно, что здесь Эйнштейн не упоминает Бора: классическая работа «О строении атомов и молекул»<sup>8</sup> как раз и начинается общими соображениями о «недостаточности классической электродинамики» и содержит постулат об отсутствии потерь на излучение при вращении электрона по стационарной орбите вокруг ядра, разрешающий эту «недостаточность».

Совместная статья Эйнштейна и де Гааза<sup>9</sup> также содержала довольно развернутую теоретическую часть, частично повторяющую<sup>7</sup>. Отметим некоторые новые любопытные соображения, высказанные в ней и свидетельствующие «против» гипотезы Ампера. Авторы подчеркивают, что представление о токах, текущих без сопротивления, вызывало сомнения в правильности гипотезы молекулярных токов еще в домаксвелловские времена. Теория Максвелла добавила к этому новую трудность: электрон, движущийся по круговой орбите, должен был бы непрерывно излучать. Наконец, усложнение, возникшее уже в XX веке: существование магнитного момента молекулы при  $T \rightarrow 0$  означает, что «энергия кругового движения должна быть так называемой нулевой энергией — представление, которое у многих физиков вызывает вполне понятное сопротивление»<sup>9</sup>. Отсюда и фундаментальная важность формулы (1) (см. ниже) и связанных с ней представлений. Авторы указывают также, что предлагаемый ими опыт дает возможность точного определения отношения заряда электрона к его массе \*).

В заключение теоретической части указывается, что и вращение магнитного тела приводит к изменению его магнитного состояния, а это в принципе также может быть использовано для проверки гипотезы Ампера (хотя, как указывается, такая проверка более сложна с экспериментальной точки зрения). И еще одно замечание — на этот раз «геомагнитного» характера: соответствующий эффект может быть положен в основу объяснения явления земного магнетизма: не даром ось вращения Земли и магнитная ось приблизительно совпадают.

Перед тем, как перейти к изложению существа работы, Эйнштейн пишет: «В последние три месяца вместе с де Гаазом — Лоренцем я проделал (курсив наш. — В. Ф.) в Имперском физико-техническом институте опыты, которые надежно установили существование молекулярных токов Ампера».

В основе постановки опытов лежит следующее простое «рассуждение», как его назвал автор. Равномерное движение электрона по окружности радиуса  $r$  совершается со скоростью  $v = 2\pi n r$ , где  $n$  — число оборотов в секунду. Значит, момент количества движения в этом случае составляет  $M_{\text{мех}} = mvr = 2\pi n r^2 m$  ( $m$  — масса электрона). С другой стороны, по Амперу, магнитный момент  $M_{\text{магн}}$  витка с током  $i = en$ , где  $e$  — заряд электрона, равен  $M_{\text{магн}} = en\pi r^2$ . Отсюда, переходя к векторной записи, получаем

$$M_{\text{мех}} = \frac{2m}{e} M_{\text{магн}} = \lambda M_{\text{магн}} = -1,13 \cdot 10^{-7} M_{\text{магн}} \quad (1)$$

\*) Указанное замечание очень характерно для Эйнштейна: в двух работах 1905 г. — по квантовой теории излучения и по методам определения размеров молекул (броуновскому движению) — он подчеркивал важность того обстоятельства, что развитая им теория дает новый метод определения постоянной Авогадро.

Эйнштейн полагал очевидным, что магнитный момент определяется вращением электрона, так что векторы  $M_{\text{мех}}$  и  $M_{\text{магн}}$  направлены в противоположные стороны. Формула (1) обобщается на случай ансамбля «витков» с током — при этом в левой части будет стоять суммарный момент количества движения тела, а в правой — суммарный магнитный момент. Эйнштейн делает простое замечание о том, что в отсутствие внешних вращательных моментов полный момент количества движения тела должен оставаться постоянным. Поэтому изменение намагниченности тела, влекущее за собой изменение соответствующей «электронной» части его момента количества движения, должно быть скомпенсировано. Такая компенсация осуществляется за счет передачи момента количества движения электронов твердому телу (стерженьку) как целому: при изменении намагниченности оно должно начать вращаться.

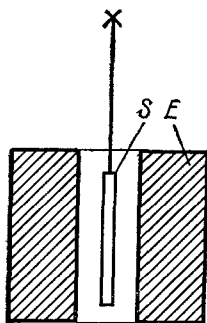


Рис. 1.

На рис. 1 воспроизведена схема предложенного Эйнштейном эксперимента. Железный стержень  $S$  подвешен на тонкой нити внутри питаемого током соленоида, коаксиально этому соленоиду. Изменение направления тока вызывает изменение намагниченности стержня и, как следствие, его вращение. Установив на стержне

маленькое зеркальце, можно по отклоненному от него на шкалу пучку света зафиксировать изучаемое вращение.

Статья завершается описанием важной детали эксперимента: обмотка соленоида питалась переменным током, частота которого совпадала с собственной частотой крутильных колебаний стержня, а также утверждением о том, что применение этого резонансного метода позволило преодолеть экспериментальные трудности и количественно подтвердить приведенное выше соотношение (1).

Статья<sup>9</sup>, содержащая подробное описание эксперимента и отправленная в «Verhandlungen» 19 апреля 1915 г., была подписана Эйнштейном и де Гаазом. Отсюда видно, что первая публикация была призвана подчеркнуть, что идея всей работы в целом и соответствующих экспериментов принадлежала Эйнштейну, тогда как в разработке установки для их проведения и самих опытах принимали участие оба автора. Указанное обстоятельство, помимо приведенной выше цитаты из<sup>7</sup>, подтверждается двумя фактами. Во-первых, в работе<sup>10</sup>, опубликованной одним де Гаазом и посвященной тому же вопросу, что и<sup>9</sup>, соответствующий эффект назван «эффектом Эйнштейна» — такое название удерживалось за ним некоторое время в немецкой литературе (прежде чем он получил свое современное название «эффекта Эйнштейна — де Гааза»). Во-вторых, в 1916 г. Эйнштейн выступил с самостоятельной статьей, речь в которой шла только об экспериментальной стороне разбираемого вопроса (см. ниже).

В работе Эйнштейна и де Гааза подробно описываются и обсуждаются особенности их экспериментальной установки (рис. 2), явившейся реализацией предложенной в<sup>7</sup> модели рис. 1, а также анализируются источники возможных ошибок и пути их преодоления.

Авторы записывают и решают уравнение крутильных колебаний испытываемого стержня из мягкого железа  $S$  и связывают между собой доступные измерению величины с константой  $\lambda = 2m/e$ , которую полагают искомой или, точнее, подлежащей проверке, поскольку удельный заряд электрона был к тому времени измерен с достаточной точностью. Под влиянием перемагничивания стержня он начинает совершать крутильные колебания. В опытах измерялась амплитуда угловых колебаний  $\alpha$  (фиксируемых по отклонению светового луча, направленного на зеркальце,

укрепленное на стержне  $S$ , и отраженного этим зеркальцем на расположенную на расстоянии 145 см шкалу) — в функции от частоты  $\omega$  тока, питающего обмотки катушки, внутри которых располагался стержень. Амплитуда достигает своего максимума  $\alpha_{\max}$  в точке резонанса, при совпадении  $\omega$  с собственной частотой крутильных колебаний  $\omega_{\text{res}}$ . В итоге оказывается, что

$$\lambda = \frac{2m}{e} = \pi^2 \frac{Q}{J} \alpha_{\max} \Delta\omega \sqrt{\frac{b^2}{1-b^2}}, \quad (2)$$

где  $b = \alpha/\alpha_{\max}$ ,  $\Delta\omega = \omega_{\text{res}} - \omega$ ,  $Q$  — момент инерции стержня, а  $J$  — его полная намагниченность. Мы видим, таким образом, что если снята резонансная кривая и измерены значения  $Q$  и  $J$ , то отсюда определяется значение  $\lambda$ . По измерениям Эйнштейна и де Гааза оно оказалось равным  $1,11 \cdot 10^{-7}$ , «в хорошем согласии с теоретическим значением  $1,13 \cdot 10^{-7}$ . Правда, — добавляют авторы, — такое совпадение может быть случайным, так как нашим измерениям надо приписывать точность около 10%; тем не менее доказано, что описанный в начале статьи результат кругового движения электронов подтверждается опытом количественно, по крайней мере приближенно»<sup>9</sup>.

### 3. ВТОРАЯ РАБОТА ЭЙНШТЕЙНА

Почти ровно через год после первого сообщения об экспериментах, связанных с токами Ампера, 25 февраля 1916 г. на заседании того же Немецкого физического общества Эйнштейн выступил — на этот раз только от своего имени — с докладом, который был назван так: «Простой эксперимент для доказательства молекулярных токов Ампера». Указанный опыт, по мысли Эйнштейна, мог бы служить лекционной демонстрацией рассматриваемого явления: всегда впечатляет зримое доказательство микроскопических свойств материи!

Трудность предшествующих опытов заключалась в том, чтобы выделить сравнительно слабый гиромангнитный эффект на фоне чисто магнитных сил, действующих на испытуемый стержень (см. рис. 1 и 2). Для того чтобы обойти эту трудность, в предложенном Эйнштейном варианте опыта магнитное поле катушки действует на железный стержень (длиной 10 и диаметром 0,14 см) в течение очень короткого времени, порядка миллисекунды. Это достигается с помощью простого разрядного контура, в котором к катушкам подключается конденсатор и гасящее сопротивление. Существенной частью установки, как обычно, является устройство, компенсирующее магнитное поле Земли. Как показали исследования, для успешного проведения лекционной демонстрации необходимо было тщательно отцентрировать испытуемый стерженек. Примечательны в устах великого теоретика современности следующие комментарии относительно точки подвеса кварцевой нити, на которой этот стерженек крепился: «Достаточно точное подвешивание стерженька по центру (точка подвеса должна находиться на главной оси его инерции. — В. Ф.) сталкивалось с большими трудностями, в преодолении которых мне любезно оказал помощь г-н Егер. В конце концов к цели привел следующий прямо-таки забавный метод. Стерженек зажимается вертикально (не жестко!) на штативе так, что

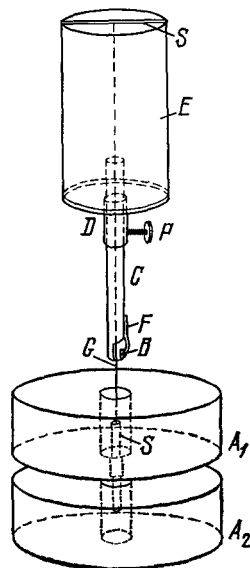


Рис. 2.

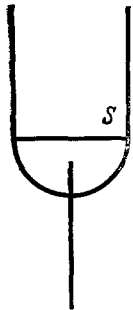


Рис. 3.

конец, за который он подвешивается, перевернут вниз. Вертикально под ним, также в перевернутом положении, прикрепляется к штативу соответственно пробка с медной булавкой и кварцевая нить, причем высота тщательно подбирается так, чтобы поднятая (увлажненным пальцем) вверх по прямой линии кварцевая нить уже не касалась плоского торца стерженька (см. рис 3.— В. Ф.). С помощью газовой горелки, сделанной из вытянутой стеклянной трубки, небольшим пламенем нагревается конец  $S$ , пока к нему не прилипнет подносимый снизу на пальце кусочек канифоли. Канифоль плавится и под действием капиллярных сил образует совершенно симметричную каплю. Если теперь внести в нее снизу кварцевую нить, она смачивается канифолью и втягивается капиллярными силами в глубь капли до предела и, значит, автоматически центрируется. Теперь стоит только охладить стерженек, и подвес готов»<sup>11</sup>.

Стоит указать в заключение, что Эйнштейн отмечает в конце статьи совпадение *порядка* величины эффекта с теоретически предсказуемым, а также и его правильный знак (см. формулу (1)).

#### 4. ЭЙНШТЕЙН О СВОИХ РАБОТАХ ПО ТОКАМ АМПЕРА

Прежде чем перейти к дальнейшему, уместно проследить, какова была оценка Эйнштейном рассматриваемых работ по молекулярным токам. Весьма примечательно, что эти работы велись им одновременно с интенсивными исследованиями по общей теории относительности. Быть может, обсуждая и выполняя эти «земные» эксперименты, Эйнштейн отдыхал от напряженных размышлений, связанных с теорией тяготения. Рассказывая своему другу, Мишелю Бессо, о ведущихся работах, Эйнштейн в письме от 12 февраля 1915 г., т. е. за неделю до доклада в Немецком физическом обществе в Берлине, выделяет, наряду с общей теорией относительности, «экспериментальное подтверждение гипотезы молекулярных токов... Если подвешенный стерженек перемагнитить, то он будет испытывать на себе действие осевого вращательного момента, существование которого была доказано экспериментально мною совместно с г-ном де Гаазом (зятком Лоренца) в Имперском институте. Эксперименты вскоре будут закончены. Тем самым в одном случае доказывается существование «нулевой энергии». Чудеснейший эксперимент, жаль, что ты не сможешь его увидеть. А как усердно природа скрывает свои тайны, когда хотят их вывести с помощью опыта! У меня на старости лет появляется еще и страсть к экспериментированию»<sup>12</sup>. В некотором противоречии с этими строчками (впрочем, весьма характерном для такого рода общих высказываний Эйнштейна) находится приведенный К. Зелигом отрывок из письма Эйнштейна (от 31 мая 1915 г.), адресованного молодому студенту. Эйнштейн пишет своему корреспонденту \*) о том, что «работу о магнетизме мог бы сделать любой мальчишка. Но общая теория относительности — совсем другое дело»<sup>13</sup>.

Несправедливость последней оценки явствует из предыстории работ по молекулярным токам и из их дальнейшего развития. Дело в том, что в числе «мальчишек», которые не могли выполнить (т. е. довести до экспериментального результата) эту работу, были и Максвелл, и Ричардсон. А об ее важности свидетельствуют последующие публикации.

Первым откликом на статьи<sup>7,9</sup> было письмо американского физика С. Д. Барнетта, сообщившего редактору «Naturwissenschaften», другу Берлинеру, что им уже довольно давно были опубликованы статьи,

\*) К. Зелиг почему-то не называет его имени и фамилии.

относящиеся к магнетомеханическим эффектам. Берлинер проинформировал об этом Эйнштейна и де Гааза, которые отправили в его журнал краткую заметку<sup>14</sup>. Сообщая читателям, что, как им стало известно из письма Барнетта, начало исследований по гиромagnetизму восходит еще к Максвеллу, Эйнштейн и де Гааз указывали также, что Барнетт начал свои опыты в этом направлении (по намагничиванию вращением) «уже шесть лет тому назад и теперь сообщает, что они привели к положительному результату».

Обращение к статьям Барнетта из «Science»<sup>15</sup> (опубликованным в номерах от 30 июля и 1 октября 1915 г., т. е. после выхода в свет статей<sup>7, 9</sup>), а также к другим его работам<sup>16, 17</sup>, включая и напечатанную в 1948 г., т. е. более чем через 30 лет после описываемых событий<sup>18</sup>, позволяет восстановить хронологическую последовательность работ в рассматриваемой области физики.

### 5. ПРЕДЫСТОРИЯ РАБОТ ЭЙНШТЕЙНА

Исходным звеном этой цепочки исследований, как подчеркивается в ряде статей Барнетта и др., является трактат Максвелла «Электричество и магнетизм», второй его том, глава 6: «Динамическая теория электромагнетизма»<sup>19</sup>. В десяти коротеньких параграфах этой главы читатель,

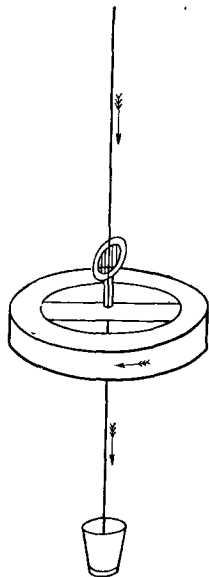


Рис. 4.

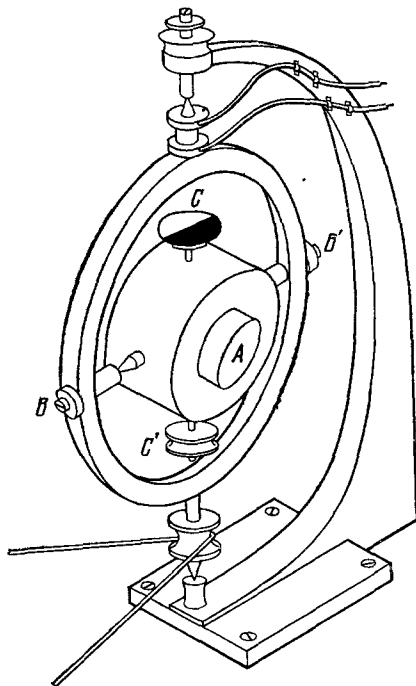


Рис. 5.

прежде всего, находит описание идеи знаменитого опыта Стюарта и Толмеша (1916). Максвелл пишет о том, что если внезапно привести во вращение катушку с навитой на ней проволокой (рис. 4), то в проволоке возникает э. д. с. и потечет ток; э. д. с. обратится в нуль, когда вращение станет равномерным, и изменит знак при резкой остановке вращающейся катушки (§§ 574 и 577 максвелловского трактата). Там же говорится и об обратном эффекте. Еще более впечатляет теоретическое предсказание

Максвеллом эффекта Эйнштейна — де Гааза (§ 575). Здесь Максвелл приводит даже рисунок соответствующего прибора, сконструированного им в 1861 г. и призванного доказать существование указанного эффекта (этот прибор в 20-х гг. обнаружил в шкафах Кавендишской лаборатории П. Л. Капица<sup>20</sup>; рис. 5). Вследствие большой тонкости предсказанных эффектов, попытки Максвелла их зафиксировать успеха не имели.

Необходимо, впрочем, подчеркнуть, что предсказание названных выше и родственных им (обратных) эффектов было сделано Максвеллом на основе соображений, никакого отношения к токам Ампера не имевшим. Максвелл, как это характерно для всей его знаменитой книги, и в данном случае обращается к работам Фарадея, выделяя следующее высказывание своего гениального предшественника, относящееся к природе электрического тока: «первое, что приходит в голову, это то, что циркуляция электричества в проволоке характеризуется неким импульсом или инерцией», — в полном соответствии с движением воды по трубам под действием насоса (19, § 547). Не конкретизируя, естественно, природы носителей электрического заряда, Максвелл говорит о том, что все явления, связанные с прохождением тока, определяются «некоторой движущейся системой», которую можно охарактеризовать кинетической энергией и к которой он считает возможным применить общие принципы механики Лагранжа (гл. V 2-го тома «Трактата» как раз и посвящена сжато изложению «Аналитической механики» французского ученого и выводу уравнений движения Гамильтона).

Весьма символично, что предшественником рассматриваемых работ Эйнштейна был Максвелл, ученый, гений которого Эйнштейн ставил превыше всего. В цитированных выше автобиографических заметках Эйнштейн пишет: «Самым увлекательным предметом во время моего учения была теория Максвелла». Имеются прямые указания о том, что Эйнштейн штудировал «Трактат»<sup>21</sup>. Однако вряд ли он обратил внимание на обсуждавшуюся выше часть книги Максвелла, интересуясь не приложениями, а более общими и фундаментальными вопросами.

Несколько слов о «промежуточных» между Максвеллом и Эйнштейном — де Гаазом работах. Наиболее существенными в их ряду были, несомненно, исследования Барнетта, относящиеся к эффекту, обратному эйнштейндегаазовскому и получившему имя американского физика. В первой коротенькой заметке на эту тему<sup>22</sup>, опубликованной в Science, Барнетт, размышляя о причинах возникновения магнитного поля Земли, оперирует представлениями об «отрицательных (или положительных) частицах, вращающихся вокруг положительных (или отрицательных) центров» и говорит о том, что вращение цилиндра, вещество которого содержит такие частицы, сопровождается возникновением вокруг него магнитного поля. Появление такого поля (но не измерение его величины) в случае цилиндра, начальный результирующий магнитный момент которого равнялся нулю, и было зафиксировано в опытах Барнетта в июле 1909 г.

Попытка установить факт вращения железного цилиндрика при его переманчивании (и соответствующие расчет и теория) была предпринята в 1907 г. английским физиком О. Ричардсоном в бытность его в Пальмерстонской лаборатории в США<sup>23</sup>. В ряду других лиц, которые указывали на существование и занимались исследованием магнетомеханических эффектов, надо назвать Д. Перри (1890), П. Н. Лебедева (1911) и А. Шустера (1912), работы которых были связаны с изысканиями причин возникновения магнетизма Земли и других космических объектов.

Следует подчеркнуть, что к 1915 г. Эйнштейн уже обладал мировой славой. Каждая его статья встречалась с большим интересом; соответственно приобретала особое звучание и ее тематика, даже если она и не



относилась к проблемам теории относительности \*). Известность Эйнштейна могла — помимо, конечно, его воли — затмить имена других физиков, занимавшихся теми же, что и он, вопросами. Именно этим объясняется то обстоятельство, что во всех статьях Барнетта (1915—1952) столько внимания уделяется приоритетным вопросам. О том, в какой степени остро он к ним относился, можно судить по следующей цитате из его статьи 1925 г.: « В 1918 г. я нашел, что Джон Перри выступил с тою же фундаментальной идеей (о причине возникновения магнитного поля Солнца и Земли, — В. Ф.), что и я, еще в октябре 1890 г. в подстрочном примечании на стр. 112 своей книги. Возможно, я прочел это примечание Перри, но давно его забыл»<sup>17</sup> (давно по отношению к 1909 г., когда было опубликовано первое сообщение Барнетта<sup>22</sup>).

Упомянутая Барнеттом книга (переработанный вариант популярной лекции, прочитанной Д. Перри в сентябре 1890 г.) несколько раз, в том числе в 1901 и 1910 гг., издавалась в США и была в начале века широко известна. На стр. 65 ее русского издания имеется примечание, о котором говорит Барнетт. Звучит оно так: «Если большой кусок железа заставить быстро вращаться сначала в одну, а потом в другую сторону вблизи свободно подвешенной магнитной стрелки, которая хорошо защищена от действия воздушных течений, то, я думаю, должны произойти явления, представляющие величайший интерес для теории магнетизма. До сих пор мне не удалось при этих исследованиях обнаружить какой-либо след магнитного действия, но я приписываю этот неуспех относительной медленности вращения, которое я применял, а также недостаточной чувствительности магнетометра»<sup>25</sup>.

Думается, что Эйнштейн, со своей стороны, справедливо полагал, что заметкой<sup>14</sup> вполне определил свое отношение к приоритетным вопросам: известно, что он был более чем равнодушен к такого рода спорам. Что касается Барнетта, то он всю жизнь оставался верен магнетомеханическим исследованиям, которые последние годы жизни проводились им в Калифорнийском университете. В работе 1952 г.<sup>26</sup>, выполненной совместно с Л. Джиамбоми («Новый гиромангнитный эффект в пермаллоиде и железе») Барнетт снова говорит о плодотворных дискуссиях с Эйнштейном, в ходе которых Эйнштейн обратил внимание на следующий специфический эффект. Стержень закрепляется в сильном магнитном поле, параллельном его оси. На это поле накладывается слабое переменное поле, колеблющееся в направлении, перпендикулярном оси стержня. В результате этого в неподвижном стержне возникает — за счет возмущения прецессионного движения элементарных магнетиков вокруг его оси — поперечная намагниченность (в невозмущенном случае ее средние значения в направлении осей, перпендикулярных оси стержня, равнялись нулю). Этот

\*) В отечественной литературе первым откликом на рассмотренные работы по магнетомеханическим явлениям был обзор, опубликованный П. Л. Капицей на страницах «Вопросов физики» — приложения к «Журналу Русского физико-химического общества». Статья Капицы называлась «Инерция электронов в амперных молекулярных токах»<sup>29</sup> и содержала подробный и ясный анализ работ Эйнштейна — де Гааза<sup>7, 9</sup> и Барнетта<sup>15</sup>. Оценивая численные данные измерений  $\lambda$ , полученные в работах<sup>7, 9</sup> и<sup>15</sup>, П. Л. Капица отдает предпочтение результатам Эйнштейна и де Гааза. Та же оценка (в пользу Эйнштейна и де Гааза) содержится в увидевшей свет в 1916 г. книге «Электронная теория материи» О. Ричардсона.

Укажем, что в 1919—1920 гг. П. Л. Капица задумал и начал готовить эксперимент, идея которого состояла в том, чтобы вызвать размагничивание ферромагнитного стерженька нагревом его до температуры, превышающей точку Кюри. Потеря элементарными магнетиками — молекулярными токами Ампера — ориентации должна была компенсироваться вращением стерженька в целом. Это вращение и предполагалось зафиксировать. Однако в трудных условиях того времени эксперимент не удалось довести до конца до отъезда П. Л. Капицы в Кембридж.

эффект был экспериментально обнаружен и исследован в работе <sup>26</sup>. Я. Г. Дорфман в своей монографии <sup>27</sup> предлагает назвать его «эффектом Барнетта — Эйнштейна». Измерения поперечной намагниченности открывают еще одну возможность определения  $g$ -фактора, реализованную в <sup>26</sup>.

## 6. ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из последующих работ европейских <sup>28</sup>, <sup>29</sup> и американских <sup>30</sup> физиков (назовем здесь хронологически первую работу Стюарта <sup>30</sup>, не говоря об исследованиях Барнетта, только часть которых указана выше), в большинстве своем использовавших предложенную Эйнштейном и де Гаазом резонансную методику измерения крутильных колебаний испытуемых образцов, однозначно вытекало, что величина  $\lambda$  равнялась  $0,57 \cdot 10^{-7}$ , т. е. была в два раза меньше найденного Эйнштейном и де Гаазом значения ( $1,11 \cdot 10^{-7}$ ), соответствовавшего развитой ими простой и казавшейся безусловно правильной теории. Это могло означать, что в исходной работе <sup>9</sup>, а также работе де Гааза <sup>10</sup>, опубликованной позднее, имела место экспериментальная ошибка.

Здесь следует отметить, что Эйнштейн и де Гааз уделяли специальное внимание анализу источников возможных ошибок и методам их устранения. Видимо, когда вычисленное ими из данных опыта значение  $\lambda$  приблизилось к ожидаемому по формуле (1), они сочли свою работу завершенной \*). А Зоммерфельд <sup>32</sup> указывает, что повторные опыты де Гааза и других исследователей «давали в дальнейшем со все большей достоверностью половинное значение» величины  $2m/e$ , которую он называет «классической». Зоммерфельд при этом ссылается на статью де Гааза, представляющую собой перевод работы <sup>10</sup> на английский язык. В обеих этих работах расхождение между расчетным и измеренным значением составляло 14%, т. е. последующие исследования де Гааза существенно новых экспериментальных результатов не содержали.

Подведем итог. Имелись веские основания считать, что экспериментальные результаты работ <sup>16</sup>, <sup>23–30</sup> правильны \*\*). Вместе с тем не подвергалась сомнению и формула (1). Отсюда следовало, что удельный заряд электрона в два раза превосходит свое известное из твердо установленных данных значение. Возникшее противоречие получило среди физиков в то богатое «аномалиями», «парадоксами» и «катастрофами» предквантовомеханическое время название «гиромангнитной аномалии» \*\*\*).

Заметим, что из статей Бека <sup>28</sup> и Барнетта <sup>17</sup>, <sup>26</sup> видно, что они (в разное время) обсуждали с Эйнштейном результаты своих работ. Однако

\*) Этой работой живо интересовался Лоренц. В письме к Эйнштейну он отметил содержащуюся в тексте <sup>9</sup> неточность. После этого в английский вариант статьи <sup>9</sup>, опубликованный в Голландии, была внесена поправка, а необходимое пояснение опубликовано в немецком журнале <sup>31</sup>.

\*\*) Сразу после появления работ <sup>9</sup>, <sup>16</sup> предпочтение отдавалось результатам Эйнштейна (см., например, цитированную работу <sup>24</sup>). Интересно отметить, что и в некоторых современных учебниках утверждается, что в работе Эйнштейна и де Гааза было получено аномальное (с точки зрения взглядов, существовавших в середине 10-х годов) значение  $\lambda = 2m/e = 0,57 \cdot 10^{-7}$ , хотя в действительности определенная ими величина  $\lambda$  соответствовала ожидавшимся («нормальным») результатам.

\*\*) Мы здесь не останавливаемся на том обстоятельстве, что в случае рассматриваемых эффектов необходимо учитывать влияние кристаллической решетки на орбитальное движение электронов и, тем самым, на магнитные свойства атомов. Это влияние может приводить к частичному или полному «замораживанию» орбитального момента количества движения, так что величина  $g$ -фактора может отличаться от 2. В случае ферромагнитных материалов, на которых проводились опыты в <sup>9</sup>, <sup>16</sup> и других работах, доминирующую роль играет, впрочем, спиновая составляющая магнитного момента см., например, <sup>33</sup>).

в печати Эйнштейн не подверг анализу причину выявленных расхождений. Можно думать, что для него существенным был сам факт экспериментального подтверждения наличия связи между магнитными и механическими свойствами атомов, т. е. существования реальных токов Ампера.

Гиромагнитная аномалия и в еще большей степени аномальный эффект Зеэмана стимулировали соответствующие теоретические исследования и привели в 1922 г. А. Ланде к формуле для  $g$ -фактора (множителя Ланде), входящего в современное выражение отношения магнитного момента к механическому,  $g \frac{e}{2m}$ . Величина  $g$ -фактора определяется комбинацией квантовых чисел. Квантовая механика позволила полностью интерпретировать классификацию Ланде, причем выражение для атомного  $g$ -фактора было получено чисто теоретическим путем. При этом было установлено, что для случая, когда магнитный момент атома определяется только орбитальным движением электронов,  $g=1$ . Согласующееся же с результатами измерений эффектов Эйнштейна — де Гааза и Барнетта значение  $ge/2m$  оказалось возможным понять в терминах спина электрона. Случай  $g=2$  реализуется как раз тогда, когда магнитный момент атома определяется спином. Именно с введением в физику понятия спина гиромагнитная аномалия была разрешена.

Таким образом, парадоксальная ситуация заключается в том, что эксперименты по эффекту Эйнштейна — де Гааза продемонстрировали отсутствие вклада в этот эффект орбитального движения электронов. Поэтому формально эти эксперименты нельзя считать «доказательством существования молекулярных токов Ампера»!

## 7. СПИН ЭЛЕКТРОНА. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как видно из вышеизложенного, у Эйнштейна были специальные причины с особенным интересом отнестись к работе Уленбека и Гаудсмита (учеников его друга П. Эренфеста), в которой выдвигалось предположение о спине электрона. Об идеях молодых голландских физиков Эренфест рассказал Эйнштейну в декабре 1925 г. в Лейдене. Как отмечает в своих воспоминаниях об этом времени Уленбек, Эйнштейн в ходе дискуссии с ним и Гаудсмитом дал необычайно простое и наглядное объяснение возникновения дублетного расщепления спектральных линий. Нильс Бор по этому поводу писал в марте 1926 г. Р. Кронигу: «Когда я приехал в Лейден на торжества, посвященные Лоренцу (декабрь 1925 г.), Эйнштейн спросил меня сразу, как только я его увидел, что я думаю о вращающемся электро-не. На мой вопрос о причине взаимодействия направления спина с орбитальным движением он ответил, что это взаимодействие является непосредственным следствием теории относительности \*). Его замечание было полным откровением для меня, и с тех пор я никогда не сомневался, что нашим трудностям пришел конец»<sup>34</sup>.

Классическим опытом, подтвердившим наличие у электрона спина, считается опыт Штерна — Герлаха. На самом деле, как видно из предыдущего, этот вывод можно было сделать — разумеется, тоже *a posteriori* — на основе более ранних экспериментов Эйнштейна — де Гааза (и Барнетта). Блестящий опыт Штерна и Герлаха продемонстрировал поразивший воображение современников факт квантования момента количества движения (магнитного момента).

\*) Эйнштейн предложил для рассмотрения спин-орбитального взаимодействия перейти в систему координат, в которой «магнитный» электрон покоится, и использовать преобразование Лоренца для определения того, каким образом при этом трансформируется кулоновское поле ядра. (Прим. автора статьи.)

Этим не исчерпывается определенная связь, имеющаяся между исследованиями Эйнштейна, с одной стороны, и Штерна — Герлаха — с другой. Так, первая публикация, из которой следовала возможность наблюдения расщепления атомного пучка в неоднородном магнитном поле и которая содержала описание схемы опыта, принадлежала Штерну (1921), а результаты совместно с Герлахом проведенных опытов были изложены в двух последующих статьях обоих авторов (1922), в полном соответствии с последовательностью публикаций<sup>7, 9</sup>. Можно, кроме того, напомнить, что, как отмечается в<sup>35</sup>, в процессе теоретического обоснования опыта Штерна — Герлаха была допущена ошибка, которая, правда, как это иногда случается, только способствовала успешному проведению эксперимента.

Эйнштейн высоко ценил работу Штерна и Герлаха. 24 мая 1924г. он писал М. Бессо: «Из экспериментальных результатов последнего времени значительны только опыты Штерна и Герлаха»<sup>36</sup>. Однако более прямым свидетельством, по существу, может служить рассмотрение статьи Эйнштейна и Эренфеста, озаглавленной «Квантово-теоретические замечания к опыту Штерна — Герлаха»<sup>37</sup>. В статье проводится анализ поведения пучка атомных «магнетиков» в поле электромагнита и обсуждается вопрос о том, каким образом происходит их ориентация в этом поле. При этом авторы показали, что такого рода процесс должен сопровождаться испусканием и поглощением радиочастотного излучения. Генетическая связь этой идеи с современными методами исследования (ферромагнитный резонанс, ЭПР) очевидна, и это особенно примечательно ввиду того, что именно эти методы можно считать преемниками магнетомеханических.

\* \* \*

Подобно тому, как выдающиеся спутники великого человека невольно оказываются в тени, отбрасываемой его монументальной фигурой (или сияют в ее отраженном свете), рассмотренные в настоящей статье работы Эйнштейна в какой-то мере теряются на фоне его сделавших эпоху трудов. Следует, однако, помнить, что, будучи эпизодом (хотя и важным!) в его научной биографии, они оставили глубокий след в физике первой четверти нашего века и оказали существенное влияние на формирование наших представлений о строении вещества и на развитие методов его исследования.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. III. — М.: Наука, 1966 (в дальнейшем — Труды, III). — С. 18.
2. Эйнштейн А. — Труды, III, с. 152.
3. N a b i c h t C., N a b i c h t P. — Phys. Zs., 1910, Bd. 11, S. 532.
4. Из переписки Зоммерфельда с Эйнштейном. — в кн.: З о м м е р ф е л ь д А. Пути познания в физике. М.: Наука, 1973. — С. 226, 228.
5. Эренфест — Иоффе: Научная переписка. — Л.: Наука, 1973. — С. 181.
6. Эйнштейн А., Мюзам Г. — Труды, III, с. 447.
7. Эйнштейн А. — Труды, III, с. 359.
8. Бор Н. Избранные труды. Т. 1. — М.: Наука, 1970. — С. 84.
9. Эйнштейн А., де Гааз В. — Труды, III, с. 363.
10. De Haas W., — Verhandl. Deutsch. Phys. Ges., 1916, Bd. 18, S. 452.
11. Эйнштейн А. — Труды, III, с. 15.
12. Einstein — Besso: Correspondance. — Paris: 1972. — P. 57, 58.
13. Зелиг К. Альберт Эйнштейн. — М.: Атомиздат, 1966. — С. 132.
14. Эйнштейн А., де Гааз В. — Труды, III, с. 381.
15. Barnett S. — Science, 1915, v. 42, p. 163, 459.
16. Barnett S. — Phys. Rev., 1915, v. 6, p. 239.

17. Barnett S., Barnett L.—Proc. Am. Acad. Arts and Sci., 1925, v. 60, p. 125.
18. Barnett S.—Am. J. Phys., 1948, v. 16, p. 140.
19. Maxwell J. K. A Treatise on Electricity and Magnetism. V. 2.—Oxford, 1904.
20. Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика.—М.: Наука, 1977.—С. 72.
21. Frank Ph. Einstein. His Life and Times.—London: 1949. p. 31.
22. Barnett S.—Science, 1909, v. 30, p. 413.
23. Richardson O.—Phys. Rev., 1908, v. 26, p. 248.
24. Капица П. Л.—ЖРФХО. Ч. физ., 1916, 48, с. 297.
25. Перри Дж. Вращающийся волчок.—М.: ОНТИ, 1935.—с. 65.
26. Barnett S., Giamboini A.—Phys. Rev., 1952, v. 88, p. 28.
27. Дорфман Я. Г. Магнитные свойства и строение вещества.—М.: Гостехиздат, 1955.
28. Beck E.—Ann. d. Phys., 1919, Bd. 60, S. 109.
29. Avidsson G.—Phys. Zs. 1920, Bd. 21, S. 88.
30. Stewart J. Q.—Phys. Rev., 1918, v. 40, p. 100.
31. Эйнштейн А.—Труды, III, с. 380.
32. Зоммерфельд А. Строение атомов и спектры. Т. 1.—М.: 1956.—С. 455.
33. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.—М.: Наука, 1978.
34. Ван дер Верден Б. Принцип запрета и спин.—В кн. Теоретическая физика 20 века.—М.: ИЛ, 1962.—С. 248.
35. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике.—М.: Мир, 1974.—С. 112.
36. См.<sup>18</sup>, а также: Эйнштейн — Бессо. Переписка.—В кн. Эйнштейновский сборник 1975—1976.—М.: Наука, 1978.—С. 8.
37. Эйнштейн А., Эренфест П.—Труды, III, с. 442.