

вописью, пишет пейзажи и психологические портреты. Некоторые из повестей Г. Ф. Кнорре были напечатаны в дни его молодости.

Г. Ф. Кнорре всегда отдавал много сил и времени общественной работе. В 1934—1937 гг. он — депутат одного из районных Советов Ленинграда. До конца своей жизни он был членом экспертной комиссии ВАК, членом научно-технических советов ряда министерств, выступал по поручению НТО энергетиков с лекциями и докладами в Москве и Ленинграде, Одессе и Алма-Ате.

Самоотверженная и плодотворная деятельность Г. Ф. Кнорре была высоко оценена Родиной. В 1957 году ему присвоено почетное звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, он был награжден орденами Ленина и «Знак Почета», медалями.

Литература

1. Кнорре Г. Ф. Контроль и испытание котельных установок. Л., Кубуч, 1934.
2. Кнорре Г. Ф. Курс топочных процессов. Ч. I, М.—Л., 1933.
3. Кнорре Г. Ф. Курс топочных процессов. Ч. II, 1937.
4. Кнорре Г. Ф., Семенов-Девятков И. Д. Курс паровых котлов. Ч. I, М.—Л., 1934.
5. Кнорре Г. Ф., Стырикович М. А., Шутов В. И. Курс паровых котлов. Ч. 2, М.—Л., 1939.
6. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы, 1-е изд. М.—Л., 1951, 2-е изд., перераб. и доп. М.—Л., 1959.
7. Кнорре Г. Ф., Арефьев К. М., Блох А. Г. и др. Теория топочных процессов. Под ред. Г. Ф. Кнорре и И. И. Палеева. М.—Л., 1966.
8. Кнорре Г. Ф. Тепловые расчеты по газовому анализу. 1-е изд. Л., 1927.
9. Исследование процессов горения натурального топлива. Под общей ред. проф. Г. Ф. Кнорре. М.—Л., 1948.
10. Циклонные топки. Под общей редакцией Г. Ф. Кнорре и М. А. Наджарова, М.—Л., 1958.

ДОКТОРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ А. ЭЙНШТЕЙНА

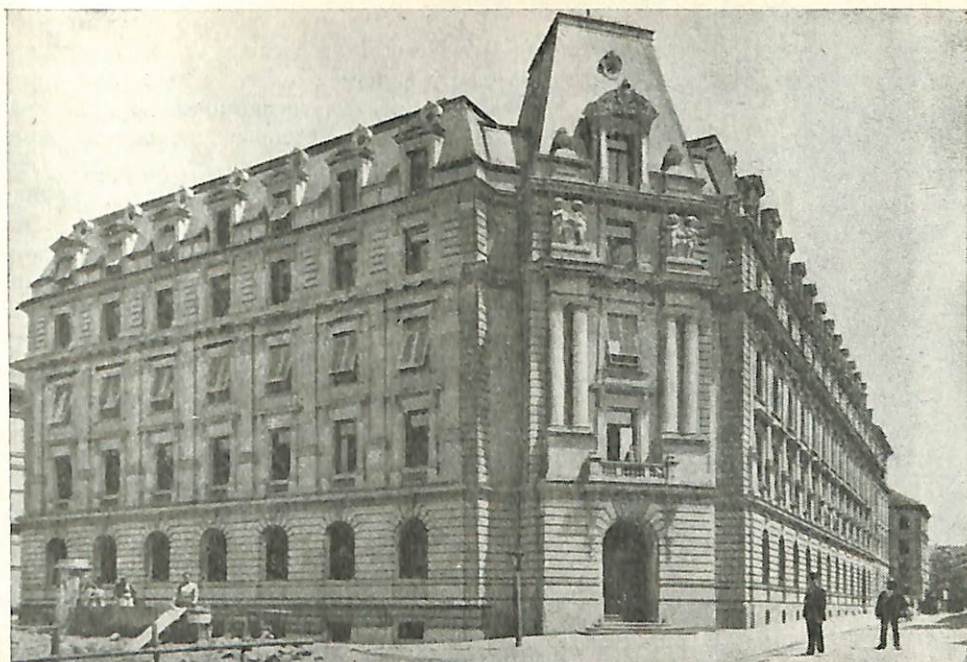
В. Я. ФРЕНКЕЛЬ (Ленинград)

В научной биографии Эйнштейна до сих пор «белым пятном» остается вопрос о мотивах выбора темы его докторской диссертации. В самом деле, в 1905 г. вышли в свет его статьи по световым квантам [1] (17 марта), теории относительности [2] (30 июня), броуновскому движению [3] (11 мая). На этом блестящем фоне исследование «Новое определение размеров молекул» [4] (30 апреля) выглядит более скромным¹. Однако именно эту свою работу Эйнштейн решил представить Цюрихскому университету в качестве докторской диссертации.

Уместно, прежде чем перейти к дальнейшему, напомнить, что примерно четырьмя годами ранее, 18 декабря 1901 г., в официальном заявлении о приеме на работу, поданном на имя директора Бернского бюро патентов Ф. Галлера, Эйнштейн упоминал о докторской диссертации [5]. По его словам, он собирался эту работу, посвященную кинетической теории газов, в течение самого ближайшего времени представить на философский факультет Цюрихского университета. Несомненно, именно эту работу Эйнштейн имеет в виду, когда пишет (14 апреля 1902 г.) своему другу М. Гроссману о «нескольких прекрасных идеях» [5, с. 51], пришедших ему в голову и относящихся к молекулярной физике, которые он, при удачном стечении обстоятельств, использует для докторской диссертации.

Причины, по которым Эйнштейн решил повременить с защитой, не ясны. Быть может, поступив (23 июня 1902 г.) в Бюро, в котором ему так понравилось и так хорошо работалось, он просто не считал необходимым «подкрепить» свое положение

¹ Указанные даты — время отсылки статей Эйнштейна из Берна в Лейпциг, где издавался журнал «Annalen der Physik», или получения ее в Лейпциге; иногда в конце статьи проставлены обе даты, из которых видно, что путешествие письма из Швейцарии в Германию занимало один день.



Здание Бернского бюро патентов, в котором с 23 июня 1902 г. начал работать Эйнштейн (бюро располагалось на третьем этаже левого крыла здания)

докторским дипломом. А о переходе в какой-либо университет он в 1902 г. еще не помышлял.

Следует сказать, что с докторской диссертацией Эйнштейна связано много вопросов, пока что не получивших однозначных ответов. В их числе естественный вопрос: почему он выбрал в качестве диссертационной работы «Новое определение размеров молекул»? Вряд ли такой выбор определялся временем ее окончания и желанием автора поскорее «отделаться» от диссертации. Как видно из приведенной выше хронологии, этой работе предшествует статья по квантам света [1], а от «броуновской» [3] и «релятивистской» [2] она отделена соответственно 10 днями и двумя месяцами. Да и в известном письме К. Габихту (к сожалению, не датированном) Эйнштейн упоминает все четыре перечисленные свои статьи [6, с. 72].

Нечего говорить о том, что сам Эйнштейн не считал свою «диссертационную» статью наиболее сильной! Может быть, напротив, он полагал, что для возможных оппонентов и их коллег из Цюрихского университета понимание сути других его работ 1905 г. будет слишком трудным? По воспоминаниям сестры Эйнштейна, он получил на это прямое указание, послав статью по теории относительности в Цюрих, где эту статью как диссертационную отвергли, «усмотрев в его работе крайне неуважительное отношение к авторитетам» [6, с. 66]. Документально это не подтверждается, однако есть другие свидетельства, относящиеся к этой работе. Когда рассматривался вопрос о приват-доцентуре на кафедре теоретической физики Бернского университета (1907 г.), Эйнштейн в качестве конкурсной работы, которую необходимо было представить для занятия этой должности, выбрал основополагающую статью по теории относительности [2], которая была поначалу отвергнута на заседании совета философского факультета (история утверждения Эйнштейна приват-доцентом Бернского университета, подкрепленная документами, подробно изложена в книге М. Флюккигера [5, с. 111—121]).

Возвращаясь к работе «Новое определение размеров молекул», вспомним, что и ее сочли трудной — мы увидим это из отзывов оппонентов, причем, разумеется, они не придирались к сонскателю².

² Достаточно сказать, что диссертационная статья, как и все работы Эйнштейна по броуновскому движению, была тщательно прокомментирована и разъяснена известным физиком Р. Фюртом, когда эти работы, объединенные под названием «Исследования



Альберт Эйнштейн
(конец 900-х годов)

Эту работу Эйнштейн показал профессору физики Цюрихского университета А. Клейнеру, принимавшему участие в его судьбе. По словам Ф. Франка, Клейнер, воспитанный в духе классической физики и механики, не мог до конца понять работ Эйнштейна, но отдавал себе полный отчет в экстраординарном таланте скромного служащего Бернского бюро патентов. Эйнштейн вспоминал позднее, что единственное замечание, сделанное Клейнером по рассмотрении диссертации, сводилось к тому, что уж очень она короткая: в ней было всего 21 страница текста! К пожеланию профессора Эйнштейн отнесся вполне формально, добавив в свою работу всего одну фразу. После этого Клейнер рекомендовал ее к защите и в соответствующем представлении отметил: «Приведенные рассуждения и расчеты принадлежат к самым трудным в гидродинамике, и взяться за них мог только человек, обладающий большим опытом и познаниями в математике и физике». Клейнер считал поэтому желательным, чтобы к оценке работы Эйнштейна был привлечен наряду с ним самим оппонент, являющийся

специалистом в данной области. Таким специалистом он считал профессора Г. Буркхарда, который также высоко отзывался о способностях диссертанта и полученных им результатах.

После этого диссертация и была отпечатана в бернской типографии К. Висса. Помимо названия на ее титульном листе указывалось: «Диссертация на соискание ученой степени доктора философии, представленная на естественно-математическое отделение философского факультета Цюрихского университета». Далее сообщалось: «Прорецензирована господами проф. д-ром А. Клейнером и проф. д-ром Г. Буркхардом». Но в диссертации имелась еще одна надпись, которая носила менее официальный характер. Она гласила: «Моему другу, господину доктору Марселю Гроссману посвящается» и выражала, видимо, не только дружеские чувства, но и признательность товарищу по Цюрихскому политехникуму и его семье, которым Эйнштейн был обязан устройством на работу в Бюро патентов. А ведь именно эта работа, как он не один раз подчеркивал, обеспечила возможность выполнения всех исследований середины 900-х годов, в частности и тех, которые были включены в диссертацию.

Прежде чем перейти к диссертационной работе Эйнштейна, укажем на еще один непонятный вопрос, с нею связанный. Почему он не сразу же направил ее в «Annalen der Physik», а сделал это только более чем полугодом позже (добавив к ней всего несколько абзацев), только в январе 1906 г.? Таким образом, она не попала в знаменитый благодаря работам [1—3] 17-й том журнала³, а увидела свет в 19-м его томе [8]. В литературе об Эйнштейне нам не удалось найти ответа на этот вопрос. Не известна и точная дата защиты диссертации. Галлер в рапорте о переводе Эйнштейна на должность эксперта II класса Бернского бюро патентов, отправленной в бундесрат 10 марта 1906 г., упоминает, что Эйнштейн защитил диссертацию в Цюрихе «этой зимой» [5, с. 68]; Х. Мельхер указывает, что диплом о присуждении степени доктора помечен 15 января 1906 г. [9].

Как отмечалось, свою диссертацию (и статью) Эйнштейн назвал «Новое определение размеров молекул». Слово «новое» было выбрано им не только потому, что в результате было найдено новое значение числа Авогадро, но главным образом потому,

ния по теории броуновского движения», были изданы в 1922 г. в остальдовской серии классиков точных наук. «Броуновский цикл» Эйнштейна и работы на эту же тему М. Смолуховского были опубликованы (с дополнительными статьями известных советских теоретиков Б. И. Давыдова и Ю. А. Круткова) в нашей стране в сборнике [7].

³ 17-й том «Annalen der Physik» в конце 60-х годов оценивался коллекционерами редких книг более чем в 2400 фунтов стерлингов.

что стандартный метод определения размеров молекул был разработан для газов. Идея Эйнштейна сводилась к тому, чтобы получить интересующие его размеры по данным экспериментов с жидкостями. Это оказалось возможным, несмотря на отсутствовавшую в то время молекулярно-кинетическую теорию жидкого состояния, благодаря смелому предположению Эйнштейна о допустимости трактовки молекулы растворенного в жидкости вещества (сахара) как некоего твердого шарика, движение которого определяется уравнениями гидродинамики, не учитывающими молекулярное строение жидкостей.

Сначала, следуя методике, изложенной в «Лекциях по механике» Г. Кирхгоффа, Эйнштейн учитывает влияние, оказываемое на вязкость жидкостей (растворителей) взвешенными в них маленькими твердыми шариками одинакового размера, причем критерием малости этих размеров является условие $\frac{V_1}{V} \ll 1$, где V_1 суммарный объем шариков, а V объем жидкости, в которую они помещены. Вязкость жидкости η^* при этом возрастает в сравнении с ее значением η в отсутствие шариков на величину, пропорциональную относительному объему V_1/V .

После этого Эйнштейн делает важное предположение о том, что такими твердыми шариками можно считать молекулы сахара, растворенного в воде. Обозначая через ϕ объем n молекул сахара в единице объема раствора, имеем $\phi = \frac{4}{3} \pi R^3 n$, где R — радиус молекулы; $n = \frac{m}{M} N$, где m — масса растворенного в единице объема вещества, а M — его молекулярный вес; N — число Авогадро. Выведенная Эйнштейном формула для вязкости η^* записывается им в следующем виде

$$\eta^*/\eta = 1 + 2,5 \phi. \quad (1)$$

Пользуясь данными о вязкости раствора сахара в воде, приведенными в известных таблицах Ландольта — Бернштейна (сведения о растворе сахара представлены в них наиболее полно), Эйнштейн показывает, что растворенная молекула сахара с точки зрения гидродинамики ведет себя подобно шару с объемом $0,98 M/N \text{ см}^3$ ($M=342$).

Важным следствием из этого вывода оказывается возможность использования для оценки коэффициента вязкости хорошо известной формулы Стокса, связывающей эту вязкость со скоростью v движения в жидкости сферы радиуса R и действующей на эту сферу силой F : $F = 6\pi\eta v R$. Определяя F через осмотическое давление растворенного вещества, Эйнштейн приходит к формуле, связывающей коэффициент диффузии D с вязкостью η и температурой T :

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta} \frac{1}{NP}, \quad (2)$$

где R — газовая постоянная.

Имея теперь формулы (1) и (2), в которые входят N и R (помимо доступных напрямую измерению величин D , T , η , M и m), Эйнштейн получает возможность определить как постоянную Авогадро, так и радиус молекулы сахара. В «Дополнении» к статье и в соответствии с экспериментальными данными, помещенными в новом издании таблиц Ландольта — Бернштейна (новыми в сравнении с теми, которые были использованы в диссертации), ее автор приводит следующие значения искомых величин:

$$N = 6,56 \cdot 10^{23},$$

$$R = 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$$

Обе величины находились в очень хорошем соответствии с значениями, полученными для них другими авторами и другими методами⁴.

Соотношение (2) между D и η явилось существенным для вывода величины λ — квадратного корня из среднего значения квадрата перемещения частички, совершающей броуновское движение, вдоль некоторого произвольного направления. Эта величина оказалась связанной простой формулой с временем наблюдения за движением

⁴ Напомним, что величина N , определенная Эйнштейном в том же 1905 г. в [1] по данным, относящимся к излучению, была равна $6,17 \cdot 10^{23}$.

$$\lambda = \sqrt{2Dt}. \quad (3)$$

Формула (3) была получена в классической работе по броуновскому движению [3]. Подставив в формулу (3) выражение из (2), Эйнштейн дал в руки экспериментаторов прямой метод определения числа Авогадро N . Его статья [3] заканчивалась характерным обращением к экспериментаторам⁵: «Если бы какому-нибудь исследователю удалось вскоре разрешить поднятые здесь важные для теории теплоты вопросы!» [8, с. 75].

На этот призыв откликнулся йенский физик Зидентоф, сообщивший Эйнштейну о ряде работ по броуновскому движению; одним из первых печатных выступлений была статья другого немецкого физика, Р. Зеддига (1908 г.). Полное подтверждение теории Эйнштейна нашла в работах Ж. Перрена, итогом которых было провозглашение, если воспользоваться выражением Перрена, «принципа молекулярной реальности», или, иначе, переход от атомной гипотезы к атомной теории⁶.

Диссертационная работа Эйнштейна примечательна тем, что именно в ней впервые выведена формула, связывающая между собой коэффициенты диффузии и вязкости. Если учесть, что входящие в выражение (2) величины N и R дают в комбинации постоянную Больцмана $k: R/N = k$, а кроме того, ввести подвижность q , равную в случае закона Стокса $q = \frac{1}{6\pi\eta R}$, то формула (2) примет следующий хорошо знакомый вид:

$$D = kTq, \quad (4)$$

который и называют соотношением Эйнштейна. Это соотношение, следующее из приведенных выше формул, полученных в частном случае, когда движение взвешенных в жидкости частиц подчиняется закону Стокса, имеет общий характер. Оно справедливо для любых частиц, растворенных в жидкости или взвешенных в ней (или в газе) и подверженных действию различных сил, в том числе и действию электрического поля, когда эти частицы заряжены.

Именно в последнем случае формула, следующая из (2), пожалуй, получила наиболее широкое распространение. Заметим, что для заряженных частиц, движущихся в электрическом поле, подвижностью называют коэффициент пропорциональности μ между скоростью v и напряженностью поля E : $v = \mu E$, тогда как в рассмотренном выше случае подвижность определялась как коэффициент пропорциональности q между скоростью v и действующей на частицу силой F . Отсюда $q = \mu/e$, и мы приходим к соотношению, известному под названием формулы Эйнштейна

$$\mu/D_0 = e/kT.$$

Именно в таком виде оно приведено, например, в [12, с. 435]. В формуле (5) D_0 коэффициент диффузии иона в растворе электролита или в газе, а e — заряд электрона. Подчеркнем, что в диссертации Эйнштейна, равно как и в других его работах, эта формула отсутствует.

Формулы (1) и (2) были перенесены Эйнштейном в его «броуновские» статьи и как раз с ними обычно и связываются. Они получили необычайно широкое распространение. Укажем в качестве одного из примеров, что рассмотренная Эйнштейном модель молекулы сахара как маленькой сферы, движение которой подчиняется закону Стокса, была в 1926 г. развита в работе Я. И. Френкеля [13] (см. также [14, с. 121]), пред-

⁵ Сходным образом заканчивается и первая написанная в Берне работа Эйнштейна «О термодинамической теории разности потенциалов между металлами и полностью диссоциированными растворами их солей и об электрическом методе исследования молекулярных сил», опубликованная в 1902 г. [10]. Эйнштейн пишет в ней: «В заключение я хотел бы извиниться за то, что предлагаю здесь лишь общий план трудоемкого исследования и сам не занимаюсь экспериментом; для этого у меня нет возможностей. Но эта работа все же достигнет своей цели, если после знакомства с ней кто-нибудь займется экспериментальным исследованием проблемы молекулярных сил» [10, с. 33].

⁶ Ж. Перрен, удостоенный в 1926 г. Нобелевской премии по физике «за исследования структуры вещества...», т. е. в основном за работы по броуновскому движению, в 1909 г. охарактеризовал результаты, полученные Эйнштейном, как «блестящие» [11].

положившего возможность такого подхода к атомам (молекулам) самой жидкости (понимая под R их радиус, а под η — вязкость жидкостей).

Диссертация Эйнштейна и связанные с нею работы по броуновскому движению легли в основу физики коллоидов и дисперсных систем, к числу основоположников которой справедливо относят Эйнштейна. Однако роль его докторской диссертации при этом обычно оказывается приуменьшенной. В связи с 75-летием со дня ее написания нам и представлялось важным подчеркнуть, что она имеет большое самостоятельное значение.

В заключение мне хотелось бы выразить признательность Б. Е. Явелову за полезные обсуждения.

Литература

1. *Эйнштейн А.* Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света.— В кн.: Собрание научных трудов (СНТ). Т. 3. М.: Наука, 1966.
2. *Эйнштейн А.* К электродинамике движущихся тел.— В кн.: СНТ, т. 1. М.: Наука, 1965.
3. *Эйнштейн А.* О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты.— В кн.: СНТ, т. 3, М.: Наука, 1966.
4. *Einstein A.* Eine neue Bestimmung der Molekuldimensionen. Bern, 1905.
5. *Flückiger M.* Albert Einstein in Bern. Bern: Verlag Paul Haupt, 1974.
6. *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн. М.: Атомиздат, 1966.
7. *Эйнштейн А., Смолуховский М.* Броуновское движение. Сборник статей. М.: ОНТИ, 1934.
8. *Эйнштейн А.* Новое определение размеров молекул.— В кн.: СНТ, т. 3, М.: Наука, 1966.
9. *Melcher H.* Albert Einstein wider Vorurteile und Denkgewohnheiten. Berlin: Akademie-Verlag, 1979.
10. *Эйнштейн А.* О термодинамической теории разности потенциалов между металлами и полностью диссоциированными растворами солей и об электрическом методе исследования молекулярных сил.— В кн.: СНТ, т. 3. М.: Наука, 1966.
11. *Перрен Ж.*— В сб.: Проблемы современной физики. Вып. 1, СПб., 1909.
12. Физический Энциклопедический Словарь. Т. 5. М.: Сов. энциклопедия, 1966.
13. *Френкель Я. И.* О тепловом движении в твердых и жидких телах.— В кн.: Френкель Я. И. Собрание избранных трудов. Т. 2. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958.
14. *Френкель В. Я.* Яков Ильич Френкель. М.-Л.: Наука, 1966.