

Евгений БЕРКОВИЧ

# СЛЕЗЫ ГЕЙЗЕНБЕРГА, ИЛИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПРИНЦИПА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Об одном эпизоде из истории  
квантовой механики

## На пути к новой теории

К середине 1920-х годов квантовая физика находилась в глубоком кризисе. В основе этого раздела науки об атомах и молекулах лежала гипотеза Макса Планка о квантах света, высказанная в 1900 году, планетарная модель атома, предложенная Эрнестом Резерфордом в 1911 году, и постулаты Нильса Бора, сформулированные в 1913 году. Поначалу новый подход успешно применялся к расчету простейших физических объектов, например атома водорода. Но попытки распространить его на более сложные системы оканчивались неудачей.

Постепенно ведущие физики планеты стали приходить к заключению, что первоначальная модель атома Бора—Зоммерфельда, с которой было связано столько надежд, не позволяет решать сложные задачи исследования микромира. Модели атомов с несколькими электронами давали результаты, не совпадающие с данными экспериментов. Попытки рассчитать орбиты электронов внутри атома сталкивались с огромными техническими трудностями, громоздкими математическими вычислениями и не приводили к желаемому результату. Сложно было объяснить, почему частота испускаемого света отличалась от частоты вращения электрона по своей орбите. Квантовая физика больше напоминала искусство, чем науку. Конкретные задачи ученые решали, делая те или иные допущения, опиравшиеся на собственную интуицию и на философский принцип соответствия Нильса Бора, а не на единый формализм теории, который еще не был построен.

---

Евгений Михайлович Беркович — публицист, историк науки и литературы, издатель. Окончил физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, кандидат физико-математических наук, доктор естественных наук (Германия). Создатель и главный редактор журнала «Семь искусств» и ряда других сетевых изданий. Автор книг «Заметки по еврейской истории» (М., 2000), «Банальность добра. Герои, праведники и другие люди в истории холокоста» (М., 2003), «Революция в физике и судьбы ее героев. Томас Манн и физики XX века» (М., 2017), «Революция в физике и судьбы ее героев. Альберт Эйнштейн в фокусе истории XX века» (М., 2018) и др. Публиковался в журналах «Нева», «Новый мир», «Знамя», «Иностранная литература», «Вопросы литературы», «Человек» и многих других изданиях.

Напряженность в среде физиков нарастала. Как часто бывает, когда многие недовольны сложившимся положением вещей, то тут, то там возникают предложения, где искать выход. И выход нашелся. Даже не один, а целых два.

В 1925 году Вернер Гейзенберг, молодой ассистент профессора Макса Борна из Гёттингенского университета, предложил совершенно новый подход к исследованию атомных явлений, который впоследствии после его совместных работ с Максом Борном и Паскуалем Йорданом стал называться квантовой (или матричной) механикой. Математический аппарат нового подхода опирался на непривычное для физиков матричное исчисление, поэтому большинством ученых был встречен настороженно. Только могучий математический талант Вольфганга Паули позволил ему рассчитать спектр атома водорода с помощью новой квантовой механики. Другие физики даже братья за подобные задачи опасались.

Второй выход был предложен в Цюрихе в начале 1926 года, буквально через несколько месяцев после первых работ по матричной механике. Профессор Цюрихского университета Эрвин Шредингер построил иной вариант теории, названный волновой механикой. Он предлагал решать привычные для большинства физиков дифференциальные уравнения, по виду очень похожие на уравнения классической физики и доступные для решения специалисту средней квалификации. Физический мир принял результаты Эрвина Шредингера не просто с облегчением, а с великой радостью.

К 1927 году в науке о микромире сложилась необычная ситуация. Всего полтора года назад у физиков не было строгой теории для расчета атомных явлений. Теперь же таких теорий оказалось сразу две — волновая и матричная механики. Несмотря на доказанную эквивалентность, они по форме сильно отличались. Формализм каждого подхода был основательно разработан. Но формализм, как не уставал повторять Вольфганг Паули, это еще не физическая теория. Необходимо было, по его словам, обнаружить «физическое ядро».

Чтобы формализм стал физической теорией и допускал проверку экспериментом, с ним должны быть связаны привычные понятия классической физики: положение, скорость, траектория, орбита и т. п., то есть те понятия, которыми оперирует экспериментатор. Проблема состояла в том, что формализм квантовой механики строился на отказе от понятий классической физики, используемых в экспериментах, так как эти величины на атомном уровне были ненаблюдаемыми. В новой науке эти понятия должны были иметь другое значение. Но вот какое? Над этим напряженно размышляли в Копенгагене Нильс Бор и его ассистент Вернер Гейзенберг.

### **«Неужели возможно, что природа так безумно запутана?»**

Гейзенберг вспоминал:

В последующие месяцы физическое истолкование квантовой механики составляло главную тему бесед между Бором и мной. Я жил тогда на верхнем этаже институтского здания, в маленьком уютном чердачном помещении с косыми стенами, откуда открывался вид на деревья у входа в Феллед-парк. Часто Бор даже поздним вечером еще раз заходил в мою комнату, и мы обсуждали всевозможные так называемые мысленные эксперименты, чтобы проверить, действительно ли мы полностью поняли свою теорию [Гейзенберг, 1989, с. 203].

Собеседники обсуждали мысленные и реальные эксперименты, рассматривали возражения и предложения Шредингера, Эйнштейна, Борна, пытались выделить то самое «физическое ядро» квантовой механики, о котором говорил Паули.

Вскоре выяснилось, что у каждого из участников обсуждения свой взгляд на то, как преодолеть трудности физической интерпретации квантовой теории. Бор склонялся к тому, чтобы волну и частицу — два противоречащие друг другу наглядные представления об объекте исследования — объявить равно справедливыми и имеющими право на существование. Более того, хотя эти представления взаимоисключают друг друга, вместе они позволяют полностью описать процессы в атоме.

Вернеру Гейзенбергу такой подход не нравился, он считал, что нельзя допускать двойной интерпретации физических явлений. Из квантовой теории должна логическим путем вытекать единственно верная интерпретация. Если она сейчас не очевидна, то ее можно будет обнаружить в процессе дальнейших исследований.

Их споры затягивались в боровском институте допоздна, нередко продолжаясь в квартире Бора за бокалом вина. После таких споров уставший Вернер шел домой через ночной парк, спрашивая себя: «*Неужели возможно, что природа так безумно запутана?*» [Hermann, 1977, с. 93].

Напряженные интеллектуальные поединки, казалось, не имеют конца. Гейзенберг вспоминал:

Поскольку наши беседы часто затягивались до глубокой ночи и, несмотря на месяцы непрерывного напряжения, не приводили к удовлетворительному результату, мы дошли до состояния истощения, которое, ввиду разной направленности мысли, вызывало иной раз натянутость отношений. Поэтому Бор в феврале 1927 г. решил взять отпуск, чтобы походить на лыжах по Норвегии, и я был тоже очень рад тому, что могу теперь в Копенгагене еще раз наедине с собой поразмыслить над этими безнадежно сложными проблемами [Гейзенберг, 1989, с. 204].

То, что Бор не пригласил Вернера, как обычно, вместе покататься на лыжах, вызывает раздражение и усталость датского профессора. Силы Гейзенберга тоже были на исходе. В письме отцу от 11 ноября 1926 года он жаловался:

Семестр здесь, вообще-то, слишком длинный, я жутко устал от постоянной занятости. <...> Каждую неделю мы ездим с Бором верхом, это очень изысканно и здорово помогает избавиться от обычной семестровой усталости [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 112—113].

Норвежский отпуск Нильса Бора продолжался целый месяц, только в середине марта он вернулся в Копенгаген. Отдых пошел ему на пользу, Нильс нашел, как ему казалось, выход из тупиковой ситуации, в которой оказалась ждущая своей интерпретации квантовая теория. Бор назвал этот выход «принципом дополнительности». Он ввел это новое логическое понятие в физику, чтобы подчеркнуть соотношения между двумя наборами представлений, которые исключают друг друга, но оба необходимы для описания физической реальности. Исходным пунктом для него был дуализм «волна — частица», который не давал покоя ни ему, ни Шредингеру, ни Гейзенбергу. Бор давно шел к этой мысли, с одной стороны, признавая дискретность материи, свойственную частицам, а с другой стороны, тяготея к волновой картине мира (вспомним его реплику на письмо Эйнштейна о радиоволнах, благодаря которым до него дойдет телеграмма об окончательном доказательстве световых квантов [Джеммер, 1985, с. 187]).

Дополнительность, по Бору, не ведет к логическим противоречиям, хотя дополнительные понятия противоречат одно другому. Сама возможность использовать противоречащие понятия появляется из-за нечеткости концепции «наблюдение». В классической физике объект наблюдения и средства наблюдения не связаны одно с другим.

В мире атома нельзя провести наблюдение, не изменив наблюдаемый объект. Если мы наблюдаем, например, электрон, мы должны осветить его, но падающий свет, то есть поток фотонов, сталкиваясь с электроном, меняет его положение и скорость. То есть мы видим уже не тот электрон, который хотели наблюдать вначале, а его новое состояние, в которое он пришел под действием нашего наблюдения. Принцип дополнительности, как считал Бор, решает проблему интерпретации квантовой механики:

Взяв атомную систему в сочетании с приборами, классическое описание которых различно, можно измерить дополнительные переменные, а выразив результаты этих измерений в классических терминах, можно описать атомную систему с помощью дополнительных классических образов [Джеммер, 1985, с. 337].

### «Взошла заря новой эры»

Нильс Бор был уверен, что его долгий спор с Гейзенбергом на этом должен закончиться. Но и ассистент не терял времени даром: к приезду шефа была готова рукопись статьи «О наглядном содержании квантовотеоретической кинематики и механики»<sup>1</sup>, содержащей знаменитый «принцип неопределенности» [Heisenberg, 1927] (русский перевод [Гейзенберг, 1977a]).

Ход рассуждений Вернера Гейзенберга был примерно следующим. В правильности формализма квантовой механики он не сомневался ни минуты. Проблема была не в нем, а в привносимых в квантовую механику интуитивных пространственно-временных представлениях классической физики. Именно эти представления — положение, скорость, энергия, время, траектория и т. п. — не всегда находили точное выражение в квантовомеханическом формализме. Но если без этих представлений не обойтись, то остается только наложить ограничения на их использование.

В феврале 1927 года, когда изнуряющие дискуссии с Бором из-за усталости обоих спорщиков на время потеряли свою остроту, Вернер Гейзенберг получил свободу заниматься интересующими его проблемами. В письме Паули от 5 февраля он сообщает:

Для собственного удовольствия я снова и снова занимаюсь трудностями, связанными с общей проблемой  $pq$ - $qp$ , <...> и мне постепенно становятся все яснее их зависимости [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 374].

С отъездом Бора в середине февраля его ассистент все свое время посвятил вопросу, когда-то поставленному перед ним Эйнштейном: «Каким образом в квантовой механике математически представить траекторию электрона в камере Вильсона?» [Гейзенберг, 1989, с. 204].

Как вспоминал впоследствии Гейзенберг, он пять вечеров мучился этой загадкой, пока не осознал, что сам вопрос поставлен неправильно. Ключом к так долго не отпирившейся двери послужили слова Эйнштейна, сказанные почти год назад в его берлинской квартире: «Только теория решает, что можно наблюдать». Возбуждение от этой мысли было столь же сильным, как и от озарения в июне 1925 года на Гельголанде. Как и тогда, спать Вернер не мог, он вышел в ночной Феллед-парк, чтобы еще раз проверить логику рассуждений. Вот к каким выводам он пришел:

<sup>1</sup> Немецкое название «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik» грамматически с одинаковым правом можно перевести как «О наглядном содержании квантовотеоретической кинематики и механики», так и «О наглядном содержании квантовотеоретических кинематики и механики». Традиционно в отечественной литературе используется первый вариант перевода, хотя по сути второй точнее: квантовотеоретическими здесь понимаются как кинематика, так и механика.

...мы всегда бездумно повторяли: траекторию электрона в камере Вильсона можно наблюдать. Однако реально наблюдалась, наверное, все-таки еще не она сама. Возможно, наблюдались некие дискретные следы неточно определенных положений электрона. Ведь фактически в камере Вильсона видны лишь отдельные капельки воды, которые заведомо намного протяженнее, чем электрон. Поэтому правильно поставленный вопрос должен гласить: можно ли в квантовой механике описать ситуацию, при которой электрон приблизительно — т. е. с известной неточностью — находится в данном месте и при этом приблизительно — т. е. опять-таки с известной неточностью — обладает заданной скоростью, и можно ли эти неточности сделать столь незначительными, чтобы не впасть в противоречие с экспериментом? [Гейзенберг, 1989, с. 205].

Оценивая статистические погрешности в определении сопряженных переменных, Гейзенберг показал, что их произведение не может быть меньше, чем планковский квант действия. Если одна погрешность стремится к нулю, то есть переменная измеряется все точнее и точнее, то вторая погрешность обязана стремиться к бесконечности, стало быть, соответствующая переменная становится все менее и менее определенной.

Полученные результаты поднимали настроение. Письмо родителям от 22 февраля звучит куда оптимистичней, чем январское:

В физике дела у меня идут значительно лучше. В последние четырнадцать дней навел довольно систематический порядок в мыслях о моих личных делах и теперь ясно вижу, на какую проблему я хочу нацелиться; но пока я слишком глуп, чтобы ее решить [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 119].

В интервью, данном спустя много лет Томасу Куну, Гейзенберг вспоминал о том времени:

Итак, я был один в Копенгагене, и через несколько дней понял, что соотношения неопределенностей было бы правильным ответом. Я попытался определить, что означают такие понятия, как пространство, скорость и т. д. Я просто попытался перевернуть вопрос, следуя примеру Эйнштейна. Вы знаете, Эйнштейн перевернул вопрос, сказав: «Мы не спрашиваем, как мы можем описать природу посредством математической схемы, но мы говорим, что природа устроена так, что математическая схема может быть к ней применена». Т. е. вы находите в природе только те состояния, которые можно описать преобразованиями Лоренца. Я просто предположил для себя: «Разве это не так, что я могу найти в природе только такие ситуации, которые описываются квантовой механикой?» Тогда я спросил себя: «Что же это за ситуации?» И очень скоро я обнаружил, что это такие ситуации, в которых справедливо соотношение неопределенностей между  $p$  и  $q$  [Heisenberg-VIII, 1963].

На следующий день после оптимистичного письма родителям в Мюнхен, 23 февраля 1927 года, Вернер отправил большое письмо на 14 страницах в Гамбург своему главному советчику и критику Вольфгангу Паули. В нем он изложил основные результаты, включая «соотношение неопределенностей». Гейзенбергу срочно нужна была оценка его работы со стороны Паули, желательна до возвращения Бора. Вернер чувствовал, что шефу снова не понравится его позиция, и хотел заручиться одобрением гамбургского друга, мнением которого Нильс Бор очень дорожил.

Реакция всегда критично настроенного Паули была неожиданной и очень обнадеживающей. Как вспоминал Гейзенберг, Паули написал ему что-то вроде «Взошла заря новой эры» и «Наступил великий день в квантовой теории» [Heisenberg-VIII, 1963].

### «В это трудно поверить»

Вот мы и подошли к теме настоящей статьи, предыдущие пояснения были лишь предисловием. О слезах Вернера Гейзенберга мы еще поговорим, а сейчас поясним, что понимается под неопределенностью принципа неопределенности. Этот принцип, вначале именовавшийся соотношением неопределенностей, является одним из краеугольных камней современной науки о микромире. Впервые соотношение неопределенностей появилось в статье Гейзенберга [Heisenberg, 1927], опубликованной в журнале «*Zeitschrift für Physik*» (русский перевод [Гейзенберг, 1977а]). Опубликованная в мае статья поступила в редакцию 23 марта 1927 года и содержала в окончательной редакции «Дополнение при корректуре», в котором, в частности, говорилось:

После того как данная работа была завершена, новые исследования, проведенные Бором, привели к точкам зрения, допускающим существенное углубление и уточнение анализа квантовомеханических соотношений, который я пытался произвести в моей статье [Heisenberg, 1927, с. 197].

Вот это «Дополнение при корректуре» и вносит в историю создания квантовой механики известную неопределенность. Дело в том, что среди историков науки и биографов Гейзенберга нет согласия по такому простому вопросу: когда Гейзенберг передал свою эпохальную статью о «соотношении неопределенностей» в редакцию журнала «*Zeitschrift für Physik*» — до того, как все противоречия между ним и Бором были улажены, или после? Даже сам автор статьи спустя десятилетия не мог точно на этот вопрос ответить, сославшись на плохую память.

Второстепенный на первый взгляд вопрос на самом деле важен для историка науки. Сам факт существования «Дополнения» говорит, что Нильс Бор не был согласен с содержанием статьи Гейзенберга и имел на поднятые в ней вопросы свое решение. Поэтому многие историки науки и биографы Нильса Бора и Вернера Гейзенберга считают, что статья была послана в журнал без согласования с Бором. Например, биограф Гейзенберга Дэвид Кэссиди считает, что Бор вернулся из отпуска как раз 23 марта, когда статья была уже отослана в редакцию, а «Дополнение при корректуре» поступило после того, как разногласия между физиками были сглажены [Cassidy, 1995, с. 300].

Того же мнения, хотя и с оговорками, придерживался и другой ассистент Бора Оскар Кляйн, особенно близкий к нему во время острых дискуссий с Гейзенбергом. В интервью американскому историку науки Джону Хейльброну и бельгийскому физика Леону Розенфельду, тоже сотрудничавшему с Бором на этапе формирования копенгагенской интерпретации квантовой механики (интервью состоялось 28 февраля 1963 года), Кляйн, в частности, сказал:

Я думаю, что он [Гейзенберг. — Е. Б.], возможно, послал статью до того, как Бор вернулся домой. Я не вполне уверен, но полагаю, что он сделал так» [Klein-IV, 1963].

О том же говорит ассистент и биограф Нильса Бора Йорген Калькар (Jørgen Kalckar), редактор шестого и седьмого томов собрания сочинений великого датчанина:

Бор вернулся в Копенгаген примерно 18 марта и обнаружил, что Гейзенберг уже отправил свою статью для публикации [Kalckar, 1985, S. 16].

Для такого заключения были основания: психологически подобный поступок молодого ассистента можно было бы понять. Слишком ярко запечатлелись в его памяти месяцы изматывающих дискуссий с шефом, слишком хорошо знал он манеру Нильса Бора цепляться за каждое предложение, за каждое слово. Поэтому нетерпеливый Гейзенберг мог отправить статью в редакцию, не дожидаясь, пока Бор переработает каждый ее параграф. Такое объяснение выглядит правдоподобно, однако следующие факты его опровергают.

В письме Паули от 14 марта 1927 года Гейзенберг упоминает, что «Бор должен (*dicitur*<sup>2</sup>) сегодня вечером вернуться» [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 388]. Уже 18 марта директор Копенгагенского института физики был на работе, о чем свидетельствует его письмо Кронигу [Mehra-Rechenberg-6, 2000, с. 181]. Так как в статье Гейзенберга указана дата ее поступления в редакцию — 23 марта, — то очевидно, что у Бора было достаточно времени, чтобы посмотреть статью перед отправкой. Зная приверженность Гейзенберга к строгой дисциплине в отношениях подчиненного с руководителем, будь то Макс Борн в Гёттингене или Нильс Бор в Копенгагене, естественно допустить, что Бор вначале одобрил статью и разрешил послать ее в редакцию. С этим согласуется и признание Вернера Гейзенберга, данное в интервью Томасу Куну:

Я совсем этого не помню, но когда я пишу «Дополнение при корректуре», то это выглядит так, будто статья была отправлена в печать до того, как мы об этом договорились. В это трудно поверить, потому что я никогда не отправлял статьи, пока Бор не даст согласие на это [Heisenberg-VIII, 1963].

Правда, потом он допускает, что приложение к статье было послано одновременно со статьей, что выглядит совсем уж неправдоподобно. Посланное вряд ли называлось бы «Дополнением при корректуре», если никакой корректуры не было.

Так что вероятнее всего допустить, что поначалу у Бора не было претензий к статье, и она была послана в редакцию с его позволения. Это подтверждает и его письмо Эйнштейну от 13 апреля, в котором Бор не выражает ни малейшего сомнения в качестве статьи Гейзенберга. Он пишет:

Перед его отъездом на каникулы в баварские горы Гейзенберг просил меня послать Вам экземпляр ожидаемой для него корректуры новой статьи в «*Zeitschrift für Physik*», так как он надеется, что она Вас могла бы заинтересовать. Эта статья, которую я Вам посылаю, означает весьма существенный вклад в обсуждение общих проблем квантовой теории [Bohr, 1985, с. 418].

В свете этой оценки, сделанной в начале апреля, нужно оценить как ложное предположение Дэвида Кэссиди, что Бор в письме Паули от 25 марта призывает его в Копенгаген, чтобы помочь переубедить непокорного Гейзенберга [Cassidy, 1995, с. 300]. Действительно, Бор писал Паули:

Я пишу Вам в спешке пару строк, чтобы спросить, есть ли у Вас желание в начале апреля на короткое время посетить Копенгаген? [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 388].

Но далее он четко говорит о цели такого визита: встретиться с зарубежными коллегами, которые съезжаются в Копенгаген в ближайшие дни. Уже на следующий день в столицу Дании должен был приехать английский физик Чарлз Гэлтон Дарвин (Char-

<sup>2</sup> *Dicitur* (лат.) — говорят.

les Galton Darwin), вскоре после него ожидался приезд Крамерса, а еще через несколько дней — голландца Гаудсмита и шведа Ивара Валлера (Ivar Waller). В письме Бора нет ни единого слова, выдающего его обеспокоенность ситуацией с Гейзенбергом.

Паули очень вежливо отказался в письме от 29 марта:

Я всегда очень рад Вас слушать и в последнее время очень часто думал о том, как у Вас дела и каково Ваше мнение о современном положении дел в физике. Поэтому я был бы очень рад иметь возможность поговорить с Вами обо всех этих делах, но думаю, к сожалению, что вряд ли смогу последовать Вашему приглашению приехать в Копенгаген. Во-первых, я уже договорился с Борном и Йорданом, что я 4 апреля примерно на два дня должен приехать в Геттинген, после чего у меня договоренность с моим другом провести 14 дней отпуска (в чем я очень нуждаюсь) [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 389].

Узнав, что Паули не приедет в Копенгаген, Гейзенберг пишет ему 4 апреля большое письмо, в котором упоминает о продолжающихся дискуссиях с Нильсом Бором:

С Бором я спорю о том, в чем кроется первопричина соотношения  $p_1 q_1 \sim \hbar$  — в волновой или корпускулярной части квантовой механики. Бор подчеркивает, что, например, в  $\gamma$ -лучевом микроскопе существенна дифракция волн, я настаиваю, что существенными являются теория квантов света и опыт Гейгера—Боте. Преувеличивая то одну, то другую сторону, можно много дискутировать, не сказав ничего нового [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 391].

Тем не менее Гейзенберг пока не говорит ничего о драматизме конфликта, те же аргументы обсуждались в Копенгагене и до отпуска Бора. О том, что спор Бора и Гейзенберга еще не перешел в острую фазу, свидетельствует и концовка письма:

Очень жаль, что Вы не приедете, Дарвин очень хотел познакомиться с Вашими расчетами [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 391].

То есть не Гейзенберг или Бор крайне нуждаются в приезде Паули, способного разрешить их противоречия, а гость Дарвин, который пробыл в Копенгагене с марта по июнь 1927 года.

И в следующие дни апреля обстановка в боровском институте оставалась спокойной, без видимых новых возмущений. Об этом можно судить по письму Гейзенберга Ральфу Кронигу 8 апреля 1927 года:

Последние несколько месяцев я работал над статьей о наглядном содержании (конечно, разрывной) квантовой механики, которая, на мой взгляд, окончательно превратилась в законченную систему, отвечающую на вопрос: кванты света или волны [Mehra—Rechenberg-6, 2000, с. 182].

После чего Вернер отправился в уже упомянутую долгожданную поездку в баварские горы. По пути из Копенгагена в Мюнхен он в Берлине встретился с Карлом Фридрихом фон Вайцзеккером, который вспоминал, что от его старшего друга исходило невероятное сияние только что сделанного открытия. Рассказывая в такси по пути на вокзал о еще не опубликованном соотношении неопределенностей, Гейзенберг добавил: «Мне кажется, я опроверг закон причинности» [Hermann, 1977, с. 94].

**«Часть вины, конечно, лежит на мне»**

Вернулся в Копенгаген Вернер в конце апреля. Попробуем по имеющимся письмам и воспоминаниям восстановить ход дальнейших событий. В письме Дираку, датированном 27 апреля, Гейзенберг отвечает на поставленные ранее вопросы о соотношении неопределенностей и демонстрирует, что они остаются верными и в случае измерения скорости частицы с помощью электронного микроскопа и эффекта Доплера. При этом автор спокойно добавляет: *«Профессор Бор говорит, что во всех этих примерах очевидно очень важная роль, которую в моей теории играет волновая теория, и конечно, он совершенно прав»* [Kalskar, 1985, с. 18].

Спустя две недели, 16 мая 1927 года, Гейзенберг так же без надрыва пишет Паули:

Со времени моего возвращения с пасхальных каникул — в этот раз особенно прекрасных — мы здесь много дискутируем о квантовой теории. Бор хочет написать работу о «понятийном построении» кв[антовой] т[еории] под девизом: «Существуют волны и частицы» — если кто с этого начинает, тот может все сделать без противоречий. В связи с этой работой Бор обратил мое внимание на то, что я пропустил еще один существенный пункт в моей статье (и Дирак меня потом об этом спрашивал) <...> Тем не менее я, как и раньше, придерживаюсь точки зрения, что скачки — это самое интересное в кв[антовой] т[еории] и их роль невозможно переоценить; поэтому я, как и раньше, очень доволен этой последней работой — несмотря на указанные ошибки; ведь все результаты работы верные и относительно них я и Бор едины; в остальном между Бором и мной наличествуют лишь существенные вкусовые различия в понимании слова «наглядный» [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 394—395].

В этом признании чувствуется некоторое изменение позиции Гейзенберга по сравнению с февральскими дискуссиями с Бором. Теперь Вернер допускает, что квантовую механику вполне возможно обсуждать с позиций волновой теории, хотя сам он остается приверженцем матричной механики, лучше выражающей роль скачков на атомном уровне.

После этого относительно спокойного фрагмента письма идет свидетельство обострения отношений, в чем не последнюю роль сыграл Оскар Кляйн:

К сожалению, дискуссии последнего времени привели к грубым личным недоразумениям между Бором—Кляйном и мной, часть вины, конечно, лежит на мне [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 395].

Еще через две недели, 31 мая 1927 года, снова в письме Паули Гейзенберг рассказывает о противостоянии с Бором более подробно. Он пишет о событиях, которые «волновали его в последние недели сильнее, чем что-либо иное за долгий срок»:

Как Вы знаете, я считал, что теория Дирака—Йордана лучше волновой механики (даже и в форме, отвечающей принципу дополнительности), так как теория Дирака—Й[ордана] менее наглядна и более обобщена и легче позволяет формулировать скачки. Так я пришел к борьбе за матрицы против волн; в азарте этой борьбы я часто критиковал возражения Бора против моей работы слишком остро, не понимая и не желая этого, лично ранив его самого. Когда я сейчас мысленно возвращаюсь к этой дискуссии, я могу хорошо понять, что Бора это раздражало. В эти личные взаимоотношения, возникшие по моей вине, вмешался Кляйн, и для меня положение ухудшилось. <...> Слава Богу, мы понимаем все теперь снова лучше и попробуем все старое по возможности забыть [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 397].

В конце мая острая фаза конфликта между Гейзенбергом и Бором—Кляйном, можно сказать, завершилась. В письме Паули от 3 июня 1927 года Вернер с облегчением пишет:

Слава Богу, я сегодня могу Вам снова писать о физике, а все другое забыть [Pauli-Briefe-I, 1979, с. 397].

Итак, Гейзенберг не отсылал в редакцию статью о соотношении неопределенностей без согласия шефа. Поначалу Бор с воодушевлением воспринял работу ассистента и рекомендовал ее Эйнштейну. Можно понять, что Нильс Бор, вернувшись в институт после длительного отпуска, не сразу вник в детали научной работы своих сотрудников. На директора института после долгого отсутствия всегда наваливается куча административных проблем. Но постепенно автор недавно изобретенного «принципа дополнительности» стал осознавать, что работа его ассистента тесно связана с его новым детищем. Более того, он стал рассматривать соотношение неопределенностей как следствие принципа дополнительности. Но в работе Гейзенберга, естественно, ничего об этом не было сказано. Это раздражало Бора, и он стал требовать забрать статью из журнала для радикальной переделки.

### **Вмешательство «хорошего друга»**

Что же не устраивало Нильса Бора в статье его ассистента? Прежде всего надо сказать, что Бор нашел ошибку в мысленном эксперименте, который Гейзенберг привел для иллюстрации своего соотношения неопределенностей. Стоит отметить, что задача о разрешающей способности микроскопа уже ставила Гейзенберга в неловкое положение — четыре года назад он не смог ответить на подобный вопрос, поставленный ему профессором Вином на устном экзамене при защите докторской диссертации.

В «Дополнении при корректуре» Вернер признается:

В этой связи Бор обратил мое внимание на то, что в некоторых рассуждениях, имеющихся в настоящей работе, я упустил существенные моменты. Прежде всего, неопределенность при наблюдениях не основана исключительно на существовании дискретностей, но непосредственно связана с требованием, чтобы одновременно удовлетворялись результаты различных опытов, описываемых корпускулярной теорией, с одной стороны, и волновой теорией, с другой. Например, при использовании в мысленных экспериментах  $\gamma$ -лучевого микроскопа следует учесть неизбежное расхождение пучка лучей; именно вследствие него при измерении положения электрона направление отдачи в эффекте Комптона может быть определено лишь с некоторой неточностью... [Heisenberg, 1927, с 197].

Здесь сформулировано основное расхождение недавних единомышленников. Бор считал, что полное понимание явлений атомной физики возможно только при учете как волновых свойств рассматриваемых объектов (электронов, фотонов и пр.), так и корпускулярных. Другими словами, нельзя забывать про корпускулярно-волновой дуализм. Недаром, подчеркивал Бор, в основных формулах квантовой механики, связывающих энергию частицы с частотой и ее импульс с длиной волны, фигурируют как характеристики частицы (энергия и импульс), так и волновые характеристики (частота и длина волны). Гейзенберг был противоположного мнения. Он считал, что раз квантовомеханический формализм, например в форме теории преобразований Дирака—Йордана, полностью описывает явления микромира, то необходимости в привлечении волновых представлений нет. Это просто альтернативный способ исследования квантовых явлений, а не обязательный атрибут, без которого описание микромира невозможно.

По Бору, соотношение неопределенностей, которым так гордился Гейзенберг, есть простое следствие принципа дополнительности, с которым директор копенгагенского Института физики вернулся из отпуска. Об этом в статье Гейзенберга не упоминалось, поэтому Бор требовал не допустить ее публикации и забрать рукопись из редакции журнала.

Это требование было для Вернера абсолютно неприемлемым. Он не считал ошибку в одном мысленном эксперименте, служащем иллюстрацией для главной концепции, достаточным основанием для отказа от публикации. «Соотношение неопределенностей», выведенное Гейзенбергом из общего формализма квантовой механики, было в его глазах слишком важным для интерпретации квантотеоретического формализма, чтобы так легко отказаться от его обнародования. Эта статья, одобренная, кстати, Паули, должна была подтвердить высочайшую квалификацию ее автора. Отказ от публикации, напротив, сводил авторитет Гейзенберга-физика к нулю.

Бор настаивал на своем, а Гейзенберг сопротивлялся, как мог. Такое противостояние тянулось до мая. В письме родителям от 16 мая Вернер пишет, что непонимание между ним и Бором лишь недавно смягчилось, и просит мать написать шефу дружеское письмо, чтобы разрядить обстановку:

Моя последняя работа родилась под несчастливой звездой, которая привела к тяжелым персональным расхождениям между мной и Бором. В конечном счете причина состоит в том, что работа играет в той же области, в которой намеревался работать сам Бор, после того, как он вернулся из Норвегии. Я, правда, знал это, но у Бора раньше не было никаких результатов, а я рассказал Бору о своих планах еще до его отъезда, так что я имел все права работать в той же области. К этому добавилась моя неосторожность: я сделал слишком острые дискуссионные замечания, а с другой стороны, очень мутное поведение одного «хорошего друга» Бора. Расхождения, в конечном счете, в основном сгладились за счет моей полной уступки; надолго ли продлится этот мир, покажет будущее [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 121].

На самом пике конфликта между Бором и Гейзенбергом в дискуссию вмешался тот самый «хороший друг Бора», которого упомянул Вернер в цитированном письме. Этим другом был шведский физик Оскар Кляйн, проходивший в Копенгагене стажировку. Кляйн сразу целиком стал на сторону Бора и подверг работу Гейзенберга уничтожающей критике, страшно его обидевшей.

Такая напряженная обстановка не могла продолжаться долго, нервы у Вернера уже были на пределе. И когда через несколько дней они снова встретились в Копенгагене и Бор опять попытался объяснить, почему Гейзенберг не прав и почему он не должен публиковать статью, то автор «соотношения неопределенностей» не выдержал и разрыдался:

Я помню, что это закончилось тем, что я разрыдался слезами, потому что больше не мог находиться под давлением Бора. Это было очень неприятно [Heisenberg—VIII, 1963].

Через несколько дней разногласия по поводу микроскопа сгладились, и постепенно обстановка снова пришла в норму. Произошло это в конце весны, о чем самокритичный Вернер писал родителям в письме от 30 мая:

Дружба с Бором, слава Богу, восстановлена, в конфликтах есть большая доля моей вины из-за острой критики или, точнее сказать, острой защиты моего собственно-

го физического мнения. Я никогда не думал, что этим могу Бора сильно ранить, и открыл это, когда было уже поздно [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 122].

И далее в этом письме идет фраза, подтверждающая высказанную выше мою мысль, что «Дополнение при корректуре» было послано после отправки самой статьи в редакцию:

Мою работу, кстати, я не отозвал, но по желанию Бора, точнее, господина Кляйна, написал дополнение, в котором я подчеркиваю, что Бор обратил мое внимание на существенные ошибки в работе и что в статье, которая скоро будет опубликована, он добился существенного продвижения. К сожалению, Бор пишет эту работу вместе с господином Кляйном, но тут ничего не поделаешь. Естественно, дружба с Бором важнее, чем физика [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 122].

Всему приходит конец. Срок для корректуры статьи заканчивался в двадцатых числах мая, так как третий номер сорок третьего тома журнала «Zeitschrift für Physik», содержащий статью о соотношении неопределенностей, отправлен в печать 29 мая 1927 года [Mehra—Rechenberg-6, 2000, с. 185]. К этому дню Гейзенберг уступил давлению Бора и Кляйна и согласился отправить в редакцию «Дополнение при корректуре».

Окончательное умиротворение в Копенгагене наступило в начале июня, когда долгожданный Вольфганг Паули наконец приехал в Институт Нильса Бора и смог сгладить все оставшиеся противоречия. О его приезде Бор сообщает английскому коллеге Фаулеру 10 июня 1927 года:

У нас в институте с недавних пор немного оживленное время с довольно большим числом посетителей. К присутствовавшему, как и Дирак, стипендиату Международного Совета по образованию Йордану добавились приехавшие в эти дни Паули и Вентцель [Mehra—Rechenberg-6, 2000, с. 185].

Будучи близким другом и Бора, и Гейзенберга, Паули смог найти нужные слова для каждого. Спустя месяц Бор признавался в письме от 15 июля 1927 года: «Вы даже не представляете, каким приятным и освежающим был Ваш визит для всех нас» [Mehra—Rechenberg-6, 2000, с. 184].

Так же был настроен и Вернер Гейзенберг, написавший Бору 18 июня того же года:

Я очень счастлив, что приехал Паули. Теперь я намного лучше понял, что это действительно важно — поставить понятия в том порядке старшинства, как Вы хотите, а не так, как я сделал это в своей статье; и я теперь очень хорошо вижу, что при этом она стала много лучше [Mehra—Rechenberg-6, 2000, с. 186].

Наученный горьким опытом Гейзенберг нашел утешение в новой работе, которую недавно начал. Родителей он поспешил успокоить, что она лежит в области, далекой от непосредственных интересов Бора, так что описанная драма не должна больше повториться. И чтобы не заканчивать на грустной ноте, заботливый сын меняет тему:

На следующей неделе я должен сопровождать одну русскую певицу на концерт в русском обществе. Это что-то особенное и, вероятно, очень приятное [Heisenberg—Eltern, 2003, с. 122].

### Литература

Bohr, Niels. Collected works, volume 6. Foundations of quantum physics I (1926–1932). Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo: North-Holland physics publishing, 1985.

Cassidy, David. Werner Heisenberg. Leben und Werk. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1995.

Heisenberg, Werner. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik, Band 43, S. 172–198. 1927.

Heisenberg—Eltern. Werner Heisenberg. Liebe Eltern! Briefe aus kritischer Zeit 1918 bis 1945. Hrsg. von A. M. Hirsch—Heisenberg. München : Langer-Müller Verlag, 2003.

Heisenberg-VIII. American Institute of Physics. Oral History Interviews. Werner Heisenberg — Session VIII Interviewed by Thomas S. Kuhn. [В Интернете] 25 February 1963 г. [Цитировано: 26 August 2018 г.] <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-8>.

Hermann, Armin. Die Jahrhundertwissenschaft. Werner Heisenberg und die Physik seiner Zeit. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1977.

Kalckar, Jørgen. Introduction. [авт. книги] Niels Bohr. Collected works, vol. 6. Foundations of quantum physics I (1926–1932), p. 7–53. Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo: North-Holland physics publishing, 1985.

Klein-IV. Oskar Klein — Session IV. Interviewed by J. L. Heilbron and L. Rosenfeld. Location: Carlsberg, Copenhagen, Denmark. Oral History Interviews. [В Интернете] 28 February 1963 г. [Цитировано: 20 October 2018 г.] <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4709-4>.

Mehra—Rechenberg-6. Mehra, Jagdish; Rechenberg, Helmut. The Historical Development of Quantum Theory. Vol. 6, Part 1. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.

Pauli-Briefe-I. Pauli, Wolfgang. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Band I: 1919–1929. Hrsg. v. Hermann Armin u. a. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag, 1979.

Гейзенберг Вернер. О наглядном содержании квантовомеханической кинематики и механики. Успехи физических наук, т. 122, с. 651–671. 1977.

Гейзенберг Вернер. Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1989.

Джеммер Макс. Эволюция понятий квантовой механики. Пер. с англ. В. Н. Покровского. Под ред. Л. И. Пономарева. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.