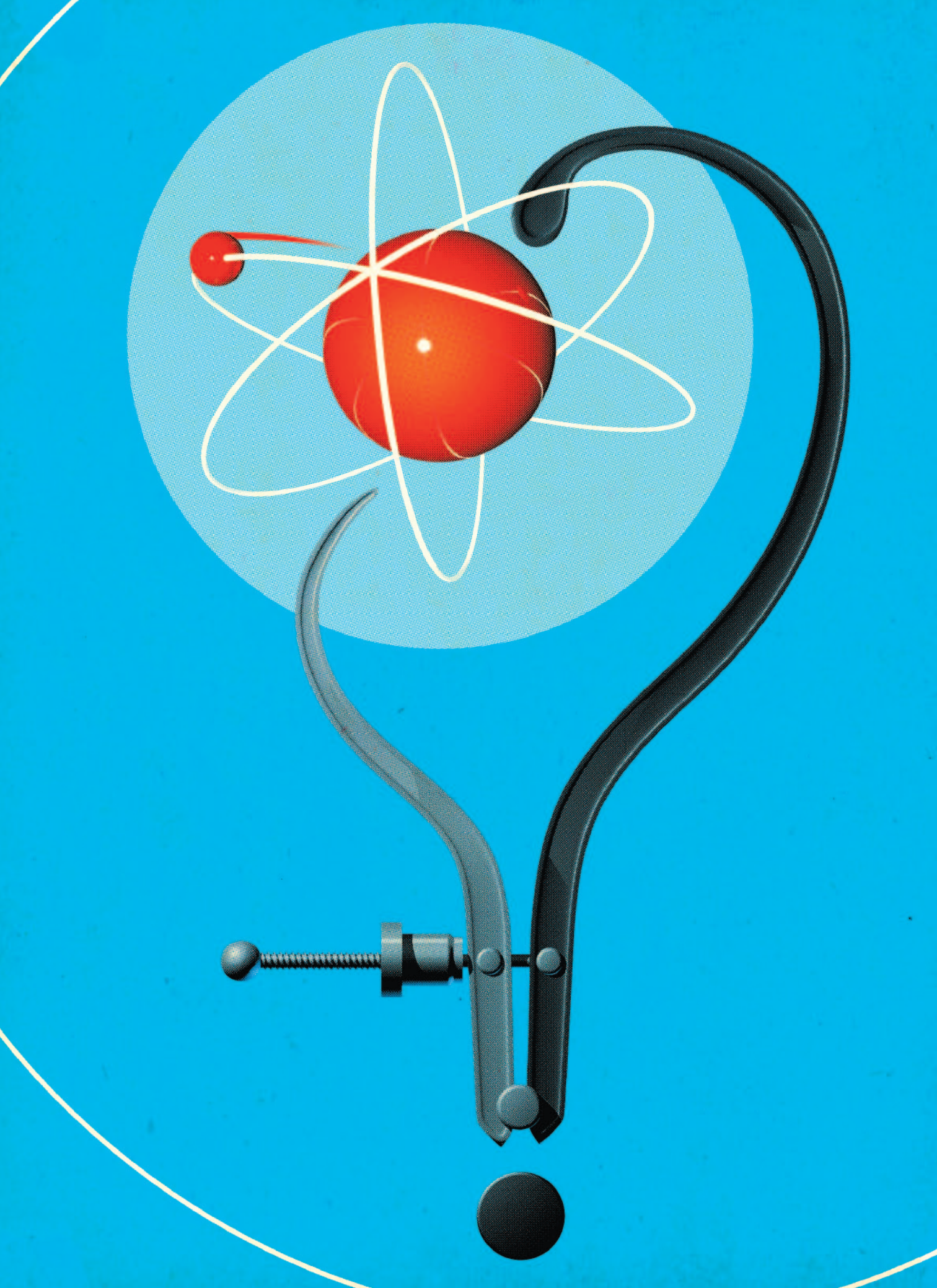


# П радиуса протона

Ян Бернауэр и Рандольф Поль

б  
л  
е  
м  
а

Два эксперимента неожиданно показали два значения радиуса протона, существенно отличающихся друг от друга. В чем же дело?



## ОБ АВТОРАХ

**Ян Бернауэр** (Jan C. Bernauer) — научный сотрудник Лаборатории ядерной физики Массачусетского технологического института.



**Рандольф Поль** (Randolf Pohl) работает в области лазерной спектроскопии водорода и водородоподобных экзотических атомов в Институте квантовой оптики им. Макса Планка в Гархинге, Германия.



**П**ростительно предполагать, что мы знаем о протоне все. Ведь в конце концов он — основная составляющая наблюдаемой Вселенной, топливо жарких звездных горнов. Изучение протона (в атоме его положительный заряд определенным образом связан с отрицательно заряженным электроном) вызвало 100 лет назад революцию в физике, приведшую к рождению квантовой механики. Сегодня ученые организуют несметное число столкновений протонов высоких энергий, чтобы явить на свет божий такую экзотику, как бозон Хиггса.

Однако результаты недавних работ по изучению протона стали для нас настоящим сюрпризом. Авторы этой статьи с коллегами провели самые точные на сегодня измерения радиуса протона в рамках двух дополняющих друг друга экспериментов. Когда мы начинали свои изыскания, то предполагали, что результаты нашей работы помогут повысить точность измерения размера протона. Но мы ошибались. Данные наших измерений радиуса протона отстоят друг от друга, как небо от земли. Разница более чем в пять раз превышает точность и того и другого измерений, а это означает, что вероятность случайной ошибки в данном случае составляет менее одной миллионной.

Ясно, что здесь что-то не так. Либо мы не имеем полного представления о протоне, либо мы не понимаем физику явлений, используемых для точного измерения протона. Мы проникли глубоко вглубь материи и выудили оттуда аномалию. Следовательно, у нас появился отличный шанс узнать нечто новое.

## Недостаточный сдвиг

Наша история начинается на итальянском острове Сан-Серволо, в десяти минутах езды на быстроходном катере от площади Сан-Марко в Венеции. На острове до конца 1970-х гг. располагалась больница для душевнобольных. Тридцать лет спустя после ее закрытия несколько десятков физиков избрали этот остров, чтобы встречаться и обсуждать точные эксперименты по проверке самой хорошо проработанной теории физики, если не науки в целом: квантовой электродинамики (КЭД).

История КЭД прослеживается с конца 1928 г., когда Поль Дирак объединил квантовую механику и специальную теорию относительности в то, что теперь называется уравнением Дирака. Это наша лучшая теория электричества и магнетизма, поскольку она полностью описывает то, как свет взаимодействует с материей. Рассмотрим лишь один пример: КЭД объясняет структуру атомов, используя только законы физики и значения фундаментальных констант, таких как масса электрона. Поэтому физики используют простые атомы, такие как атом водорода, чтобы проверить справедливость квантовой электродинамики. Они могут предсказать результаты экспериментов с неопределенностью в 0.0000000001%. Точность экспериментов соответствующая.

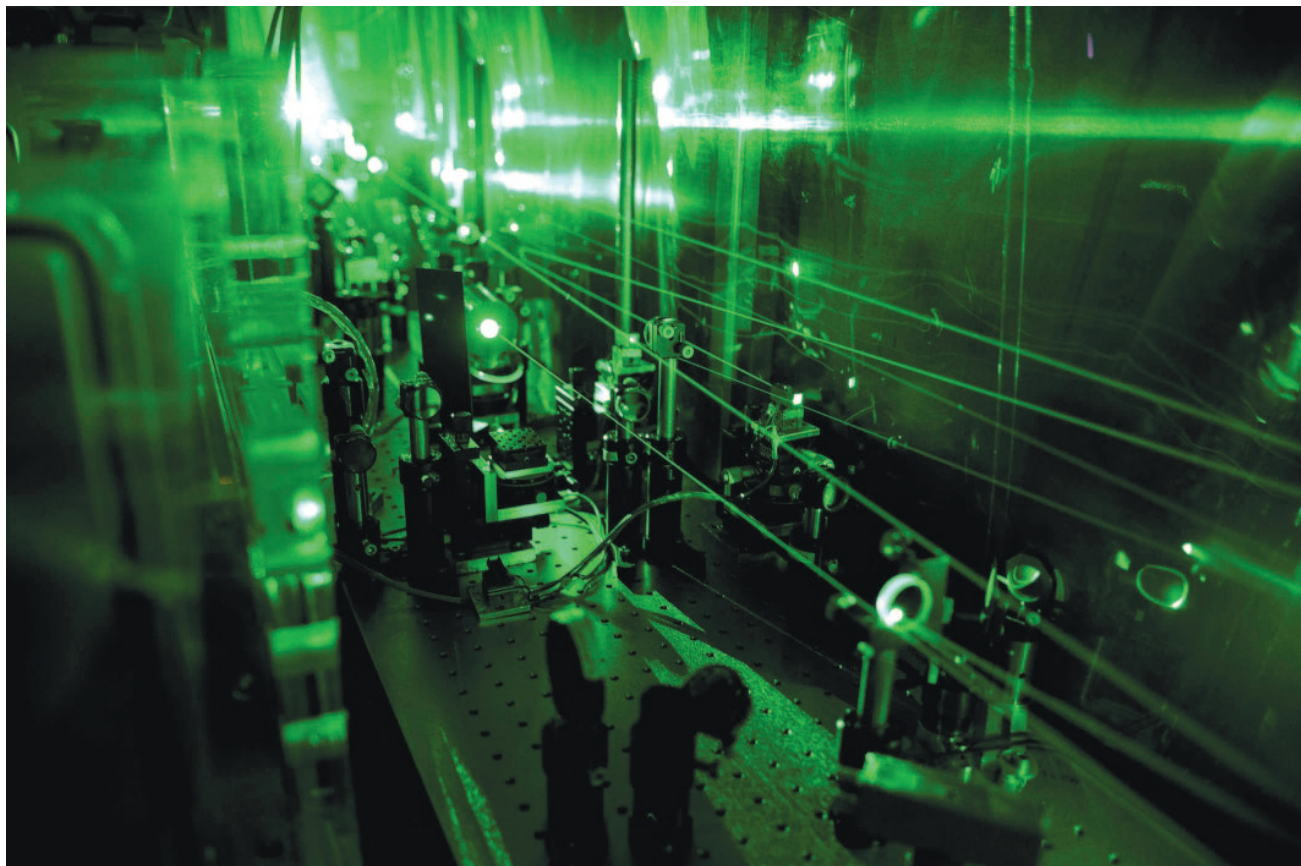
Впервые мы встретились друг с другом именно на Сан-Серволо. Мы начали измерения протона, которые должны были помочь уточнить наши знания КЭД. Целью эксперимента Яна Бернауэра было исследование внутренней структуры протона с помощью усовершенствованной версии методики, которая уже позволила провести самые точные на тот день измерения.

Группа Рандольфа Поля использовала новый подход. Они изучали очень слабые сдвиги в энергетических уровнях экзотической формы атома водорода, у которого электрон заменен на мюон — у них эти сдвиги гораздо сильнее зависят от размера протона. Сдвиги эти впервые были выявлены в обычном водороде еще в 1947 г. покойным Уиллисом Юджином Лэмбом (Willis E. Lamb). Несмотря на то что физики называют это явление лэмбовским сдвигом, они пришли к пониманию, что обусловлен он двумя различными причинами.

Во-первых, вклад в лэмбовский сдвиг дают так называемые виртуальные частицы, призраки, которые

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- В новом эксперименте по измерению радиуса протона обнаружено, что он гораздо меньше, чем предполагалось ранее.
- Эта разница дает основания предполагать, что физики не понимают нечто важное либо в самом протоне, либо в теории квантовой электродинамики — до настоящего времени самой хорошо проверенной и проработанной теории в науке.
- При удачном стечении обстоятельств эта аномалия, возможно, приведет к фундаментальному пересмотру законов физики.



**Протонный зонд:** один из способов измерения радиуса протона заключается в том, чтобы направить этот точно настроенный лазерный пучок на экспериментальный образец так называемого мюонного водорода — атомов, состоящих из одного протона и одного мюона, тяжелого родственника электрона

неожиданно возникают внутри атома и почти сразу же исчезают. Ученые могут воспользоваться квантовой электродинамикой, чтобы с поразительной точностью вычислить, как эти виртуальные частицы влияют на энергетические уровни атома. Однако в последние годы неопределенности, связанные с вкладом в лэмбовский сдвиг другого явления, стали ограничивающим фактором в точности предсказаний ученых. Эта вторая причина, должно быть, имеет отношение к радиусу протона и причудливой квантово-механической природе электрона.

В квантовой механике электрон принимает форму похожей на облако волновой функции, которая распределена внутри объема, занимаемого атомом. Волновая функция (вернее, ее квадрат) описывает вероятность обнаружить электрон в данной области и может принимать только определенные дискретные формы, которые мы называем состояниями атома.

Часть этих атомных состояний, названных по ряду исторических причин *S*-состояниями, имеет волновую функцию, которая принимает максимальное значение у атомного ядра; т.е. существует ненулевая вероятность найти электрон внутри самого протона — и вероятность эта тем больше, чем больше радиус протона. Когда электрон находится внутри протона, он не «чувствует» в полной мере положительный электрический

заряд протона, что уменьшает величину силы суммарного притяжения между протоном и электроном.

Это уменьшение прочности связи вызывает изменение лэмбовского сдвига самого нижнего энергетического состояния — состояния *1S* — на 0,02%. Такая доля может показаться несущественной. Но разность энергий между основным, *1S*, и первым возбужденным, *2S*, состоянием была измерена с невероятной точностью — несколько  $10^{-15}$  долей. Следовательно, если требуется сравнить данные, полученные с помощью КЭД, с результатами прецизионных экспериментов, необходимо учитывать даже такой слабый эффект, который связан с величиной радиуса протона.

Группа Поля в течение восьми лет пыталась определить точное значение радиуса протона. Однако ко времени той первой конференции на Сан-Серволо оказалось, что их эксперимент не работает, и для всех это стало большой загадкой.

Тем временем группа Бернауэра собиралась начать собственный эксперимент по определению радиуса протона. Их подход не был связан с энергетическими уровнями водорода. Вместо этого они собирались использовать рассеяние электронов на мишени — атомах водорода, чтобы на основании этого сделать вывод о том, насколько велики протоны.

## Частица-мишень

Газообразный водород — это главным образом рой протонов. Если вы выстрелите в мишень из атомов водорода пучком электронов, часть отрицательно заряженных электронов отклонится под действием положительного заряженного протона и «рассеется» в сторону от первоначального направления пучка. Более того, это рассеяние в очень большой степени зависит от внутренней структуры протона. (Протоны, в отличие от электронов, состоят из еще более элементарных компонентов).

Давайте пристально рассмотрим, как взаимодействуют протон и электрон, когда один рассеивается на другом. Когда электрон рассеивается на протоне, он передает тому часть своего импульса. В КЭД физики описывают это взаимодействие как обмен виртуальным фотоном между электроном и протоном. Если электрон рассеивается лишь на незначительный угол — при скользящем ударе, — он передает протону только небольшую часть своего импульса. Если электрон рассеивается на угол, близкий к 180°, мы представляем это как попадание электрона в самый центр протона, при этом он передает протону существенную часть своего импульса. В КЭД большая величина импульса означает, что виртуальные фотоны имеют более короткую длину волны.

Так же как и в оптическом микроскопе, если мы хотим увидеть самые мелкие детали, мы используем самые короткие из возможных длины волны. Часть работы Бернауэра состояла в том, чтобы использовать короткие волны для исследования распределения заряда внутри протона.

Однако во время встречи на Сан-Серволо физики попросили Бернауэра расширить рамки его эксперимента. Короткие длины волн хорошо подходят для изучения структур внутри протона, но если вы хотите исследовать протон как целое (а значит и его радиус), вам

потребуется волна бесконечной длины, которая позволит фотону «увидеть» весь протон. При таком крайнем значении никакого рассеяния вообще не будет.

С технической точки зрения это, конечно, невозможно: электрон должен отклониться по крайней мере на небольшой угол, чтобы можно было произвести измерение. Поэтому группа Бернауэра измеряла передачу минимально возможного импульса, которую можно было зарегистрировать с помощью их установки, а затем экстраполировать результат до нуля. Его группе удалось почти вдвое уменьшить разрыв между нулем и минимальным зарегистрированным импульсом, переданным протону, по сравнению с более ранними экспериментами, что позволило сделать экстраполяцию более надежной. Наконец, следует отметить, что в этом эксперименте было проведено почти в два раза больше измерений, чем во всех предыдущих вместе взятых. После окончания экспериментов, проводившихся в 2006–2007 гг., Бернауэру потребовалось три года, чтобы проанализировать все данные, — работа, за которую впоследствии он получит докторскую степень. Радиус протона, рассчитанный им, был равен примерно 0,879 фемтометра (примерно в десять миллиардов меньше размера капли воды в облаке тумана) и совпадал с результатами предыдущих измерений.

## Странный водород

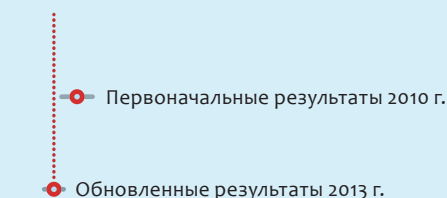
Тем временем Поль и члены его группы продолжили напряженную работу. В их эксперименте электрон в атоме водорода был заменен на его более массивного родственника — мюон. Мюоны почти во всем похожи на электроны за исключением того факта, что они примерно в 200 раз более массивны. Эта разница в массе — причина того, что мюон в мюонном атоме водорода расположен примерно в 200 раз ближе к протону, чем электрон.

### Результаты

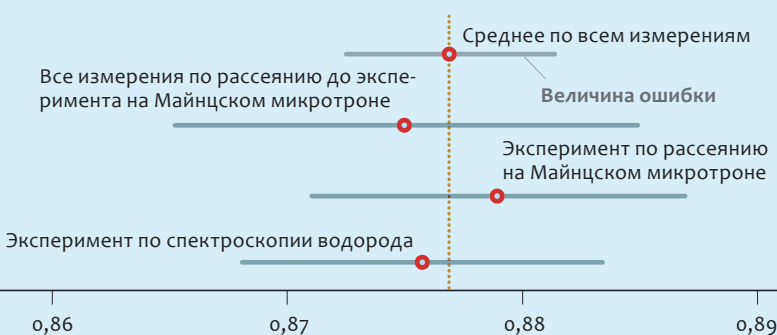
#### ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОТИВОРЕЧАЩИЕ ДРУГ ДРУГУ

Размер протона должен быть одним и тем же независимо от того, как было проведено измерение. Лаборатории рассчитывали радиус протона на основе экспериментов по рассеянию и путем измерения энергетических уровней атомов водорода в экспериментах по спектроскопии. Все эти результаты совпадают с точностью до погрешности эксперимента. Но в 2010 г. измерение энергетических уровней так называемого мюонного водорода показало значительно более низкое значение радиуса протона. Попытки объяснить аномалию до сих пор терпели неудачу.

**Радиус протона с использованием мюонного водорода**



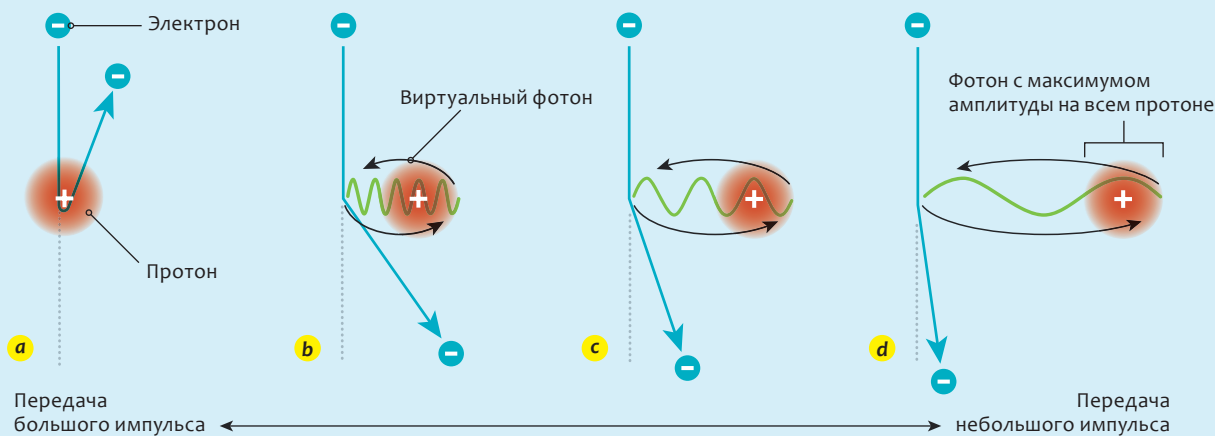
**Радиус протона, полученный в других экспериментах**



### ИЗМЕРЕНИЕ ПО СЛУЧАЙНОМУ РАССЕЯНИЮ НА ПРОТОНАХ

В экспериментах по рассеянию электронов пучок электронов направляли на сосуд, наполненный газообразным водородом (атом водорода в основном и есть протон), и измеряли, как они рассеивались. Квантовая электродинамика (КЭД) описывает это взаимодействие, используя обмен «виртуальными» фотонами. Электрон, который попадает в протон, обменивается с ним фотоном чрезвычайно короткой длины волны **a**. Чем короче длина волны, тем выше энергия, которая

меняет направление полета электрона. Электроны, проходящие дальше от протона, производят фотоны с большей длиной волны (от **b** до **d**) и отклоняются на меньший угол. Информация о радиусе протона содержится в фотонах самых длинных волн. Представьте, что взаимодействие между фотоном и протоном зависит от амплитуды фотона. Для регистрации всего протона длина волны должна быть столь большой, чтобы амплитуда не изменялась на всем размере протона **d**.



Но если мюон расположен в 200 раз ближе к протону, он должен проводить гораздо больше времени внутри протона. (Действительно, вероятность возрастает в  $200^3$ , или в 8 млн раз.) Это, в свою очередь, изменяет лэмбовский сдвиг у атома на 2% — довольно большая величина, которую легко будет зафиксировать.

В эксперименте Поля мюоны выстреливаются ускорителем швейцарского Института им. Пауля Шерера в сосуд, в котором находится газообразный водород. Время от времени мюон замещает электрон, разрушая молекулу водорода и образуя атом мюонного водорода в высоковозбужденном состоянии. В течение нескольких наносекунд мюонный водород будет падать в одно за другим состояния со все более низкой энергией. В эксперименте использовались только мюонные атомы водорода, которые находились в первом возбужденном состоянии (2S).

Когда каждый из мюонов влетал в сосуд с водородом, он давал сигнал на запуск лазерной системе, которая выстреливала импульс продолжительностью примерно в одну микросекунду. Если бы фотоны лазерного излучения имели в точности необходимую энергию, которая измеряется его длиной волны, лазерное излучение подняло бы атом из состояния 2S в состояние с большей энергией 2P. Форма состояния 2P такова, что мюон никогда нельзя найти внутри протона, поэтому, измеряя разницу энергий между состояниями 2S и 2P, мы смогли бы сделать вывод о том, сколько времени мюон проводит внутри протона, и таким образом получить радиус протона.

Здесь необходимо важное замечание: мы должны были настроить длину волны излучения лазера таким образом, чтобы энергия кванта в точности равнялась

необходимой величине. Атом перескочит в состояние с более высокой энергией, только если энергия кванта его излучения строго равна разнице энергий состояний 2S и 2P. Если бы длина волны даже чуть-чуть отличалась от требуемой, ничего бы не произошло. Как же мы узнали, перескочили ли атомы в более высокое состояние? Любой атом, перешедший в состояние 2P, быстро испустит фотон мягкого рентгеновского излучения. Если бы мы обнаружили эти фотоны, мы точно знали бы, что длина волны излучения подобрана правильно.

Несмотря на кажущуюся теоретическую простоту, хорошо известно, что эти эксперименты очень трудно провести. Аналогичные эксперименты впервые были предложены еще в 1960-х гг., когда КЭД была относительно новой наукой, в качестве прецизионного инструмента для ее проверки. Но подобный эксперимент был гораздо более трудным, чем дополняющие его опыты с водородом и другими атомами с электронными оболочками, поэтому интерес к нему затухал до 1990-х гг., когда точность других методов проверки уперлась в ограничения, связанные с неопределенностью в размерах протона.

Группа Поля предложила руководству Института им. Пауля Шерера провести эксперимент по измерению лэмбовского сдвига у мюонного водорода в 1997 г. В начале 1999 г. институт одобрил этот проект, и три года мы потратили на постройку лазерной системы, детекторов мягкого рентгеновского излучения и получение пучка мюонов низкой энергии.

После того как в 2002 г. мы подготовили все в Институте им. Пауля Шерера для проведения экспериментов, возникло несколько технических вопросов. К тому

времени, когда мы все наконец утрясли, у нас осталось лишь несколько часов, чтобы направить излучение лазеров на мюонные атомы водорода прежде, чем истечет все выделенное нам на ускорителе время. Кое-кто из нас был очень разочарован, потому что мы действительно считали, что нам удастся обнаружить сдвиг  $2S-2P$  в первой же серии экспериментов. Старшие члены нашей группы, однако, были настроены более реалистично в отношении перспектив получить готовые результаты после первого же прогона. Они были рады, что все работает и выявлено

лишь несколько небольших технических недочетов. Все их легко можно было устранить до начала серии «настоящих измерений», намеченных на 2003 г., когда мы наверняка увидим сигнал лэмбовского сдвига.

И вот после многомесячной подготовки три недели успешного сбора данных дали... Абсолютно ничего они нам не дали. Ни малейшего указания на присутствие сигнала. Несмотря на то что лазер отсканировал весь диапазон длин волн, который соответствовал известному экспериментальному значению радиуса протона. Ничего!

Второй эксперимент

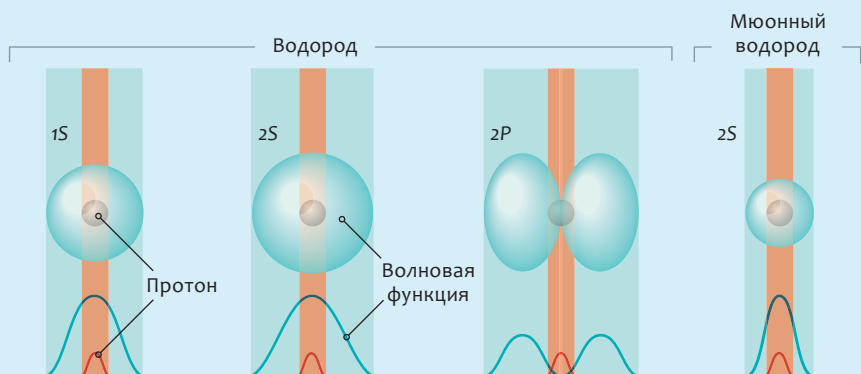
МЕТОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРАННОГО ВОДОРОДА

Электрон в атоме водорода принимает форму облака вероятности, называемого волновой функцией. Иногда волновая функция электрона охватывает протон; это предполагает, что протон находится внутри электронного облака. Такой перехлест изменяет энергию атома. Ученые могут измерить этот

лэмбовский сдвиг в энергии, чтобы вывести из него размер протона. Они также заменяют электрон мюоном, который имеет волновую функцию меньшего размера и поэтому больше времени проводит внутри протона, что усиливает сигнал.

Критический перехлест

Форма атома водорода зависит от его энергии. В состояниях с самой низкой энергией («S-состояниях») волновая функция электрона и протон перехлестываются. В состояниях с более высокой энергией («P-состояниях») — нет. Ученые измеряют разницу в энергии между S- и P-состояниями, чтобы обнаружить лэмбовский сдвиг, вызванный размером протона. В мюонном водороде перехлест протона и волновой функции мюона больше, что усиливает лэмбовский сдвиг.



Лазер (с точно заданной длиной волны, т.е. энергией фотона излучения)



Если энергия фотона лазерного излучения не равна строго разнице энергий между состояниями  $2S$  и  $2P$ , ничего не происходит

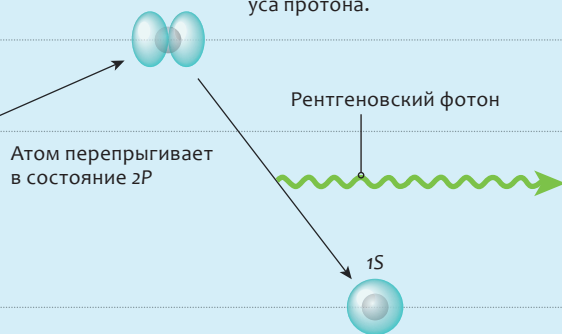
Если изменить длину волны лазера



Атом перепрыгивает в состояние  $2P$

Эксперимент

Мюонный водород получают, бомбардируя пучком мюонов атомы водорода в газообразном состоянии (не показано). Примерно 1% образующихся мюонных атомов будет в  $2S$ -состоянии. Затем их облучают пучком лазерного излучения строго определенной длины волны (слева). Но если длина волны лазерного излучения точно соответствует разнице в энергии между  $2S$ - и  $2P$ -состояниями (ниже), атом перепрыгнет в состояние с большей энергией, а затем возвратится в основное  $1S$ -состояние, испустив рентгеновский фотон в ходе этого процесса. Поскольку разница энергий между состояниями  $2S$  и  $2P$  зависит от лэмбовского сдвига, ученые используют такое измерение для определения радиуса протона.



Энергия фотонов равна разнице энергий состояний  $2P$  и  $2S$

**Нам выделили всего лишь одну дополнительную неделю для проведения измерений. Если бы они не дали результатов, ведущийся десять лет эксперимент был бы окончательно завершен как неудачный**

Мы предположили очевидное: должно быть, что-то не так в нашей установке. Соответственно, выводом, который мы тогда сделали, было следующее: нам надо усовершенствовать лазерную систему. Мы занялись ее глубокой перекомпоновкой, которая была завершена в конце 2006 г. В течение еще трех недель в 2007 г. мы снова собирали данные — и опять ничего не увидели. К счастью, нам дали последний шанс в первой половине 2009 г. Потребовалось несколько месяцев, чтобы заставить работать сложное оборудование. И опять после недели сбора данных мы не обнаружили никаких признаков сигнала.

Нам выделили еще одну неделю для проведения эксперимента. Мы боялись, что если и на этот раз нас постигнет неудача, кто-нибудь в администрации придет к выводу, что задача нам не по плечу, и этот ведущийся уже десять лет эксперимент будет окончательно прикрыт как неудачный.

И тут мы начали размышлять, а не связано ли это с более глубокими причинами. Что если мы ищем радиус протона не там, где следует? Мы решили расширить область поисков. Сообща группа приняла решение вести поиски большего радиуса протона. Однако однажды поздно вечером коллега Поля, Альдо Антоньини (Aldo Antognini), зашел в зал управления и сказал, что у него есть хорошее предчувствие, что искать нужно протон меньшего радиуса. Хотя время поджимало, Поль и Антоньини перенаправили поиски на радиус протона даже меньший, чем кто-либо смел предположить. Почти сразу же мы заметили признаки сигнала. Но на следующий день ускоритель был остановлен на четыре долгих дня для проведения очередных профилактических работ. Мы вынуждены были томиться в ожидании.

И вот вечером 4 июля 2009 г., спустя 12 лет после начала нашей работы, был получен не вызывающий никаких сомнений сигнал, который показал нам, что протон, измеренный в мюонном атоме водорода, значительно меньше, чем все считали до сих пор. Группа потратила еще несколько недель, проведя дополнительные измерения и калибровки, еще несколько месяцев занял анализ данных. Конечный результат, который мы впоследствии подтвердили с помощью дополнительных измерений, таков: радиус заряда протона составляет

0,8409 фемтометра плюс-минус 0,0004. Это значение в десять раз точнее полученного в ходе всех других предыдущих измерений и отличается от него на 4% — огромное расхождение!

В 2010 г. обе наши группы представили свои результаты на одной и той же конференции «Прецизионная физика простых атомов» на горнолыжном курорте Лез-Уш во французских Альпах. Поль впервые представил научному сообществу результаты измерений мюонного водорода. Во второй половине того же дня были представлены данные эксперимента Бернауэра. Поль и его коллеги ожидали, что анализ Бернауэра подкрепит его результаты, говорящие о меньшем размере протона. Однако, к их удивлению, результаты американской группы были почти идентичны старому радиусу: 0,877 фемтометра.

**Новые идеи**

Все это вызвало необычайный ажиотаж среди физиков. Такого рода расхождения полезны, поскольку они стимулируют новые направления мысли, что ведет к новым идеям и лучшему пониманию природы.

Сначала большинство ученых решили, что это, должно быть, просто ошибка. Возможно, в эксперименте что-то пошло не так, или неверны были теоретические построения, использовавшиеся для вычисления радиуса протона. Вскоре после конференции независимые ученые выдвинули множество предположений о возможных причинах ошибок.

Например, до эксперимента Поля лишь три человека выполнили сложные вычисления, необходимые для перевода данных экспериментальных измерений длины волны лазера в радиус протона. Многие физики допускали возможность наличия в этих вычислениях ошибок или неучтенных факторов. В дальнейшем большое число теоретиков повторили вычисления и расширили модель, но ошибок так и не нашли.

Другие перепроверили методику, с помощью которой Бернауэр получил радиус из данных по рассеянию. Может быть, их исходные данные можно было согласовать с меньшим радиусом протона, полученным из исследований мюонного водорода? Но, похоже, такое решение проблемы также было исключено.

И с каждым новым неудачным предположением значение этого расхождения становилась все весомее. Спустя четыре года после того как родилась загадка радиуса протона, физики исчерпали все лежащие на поверхности объяснения вроде ошибок в измерениях или в вычислениях. Теперь мы начали мечтать о более захватывающих дух возможностях.

Например, понимаем ли мы в действительности, как протон реагирует на то, что к нему притягивается мюон? Электростатическая сила мюона деформирует протон так же, как гравитационные силы Луны вызывают приливы на Земле. Деформированный протон слегка изменяет 2S-состояние в атоме мюонного водорода. Большинство физиков полагают, что мы понимаем этот эффект, но протон — такая сложная система, что, возможно, мы что-то упускаем из виду.



Самая потрясающая перспектива заключается в том, что, вероятно, измерения эти — не что иное, как знак, указывающий на новую физику, выходящую за пределы так называемой Стандартной модели физики элементарных частиц. Возможно, во Вселенной есть не обнаруженные пока еще частицы, которые каким-то образом заставляют мюоны вести себя не так, как электроны.

Ученые исследовали и такую возможность, но, как выяснилось, построить модель новой частицы, не привносящей с собой наблюдаемых последствий, которые находились бы в противоречии с результатами других экспериментов, оказалось задачей чрезвычайно трудной.

С другой стороны, у физиков есть еще одна нерешенная загадка мюона. Фундаментальные частицы, такие как мюон и электрон, обладают «магнитным моментом» — магнитным полем, которое во многом похоже на поле стержневого магнита. Что характерно, магнитный момент мюона не соответствует значению, полученному на основе вычислений КЭД. Возможно, новые физические явления объяснят как результаты измерения радиуса протона, так и аномальный магнитный момент мюона.

**Спустя четыре года после того, как родилась эта загадка, физики исчерпали все лежащие на поверхности объяснения. Мы начали мечтать о более захватывающих возможностях**

Чтобы раз и навсегда покончить со всеми этими предположениями, было предложено несколько новых экспериментов. По крайней мере два эксперимента по рассеянию — один в Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона в городе Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния, и другой на Майнцском микротроне, ускорителе Майнцкого университета им. Иоганна Гутенберга в Германии, где Бернауэр и провел свой первоначальный эксперимент, — имеют целью повысить точность предыдущих экспериментов по рассеянию. Эти измерения позволят провести независимую верификацию и проверить некоторые из предложенных объяснений.

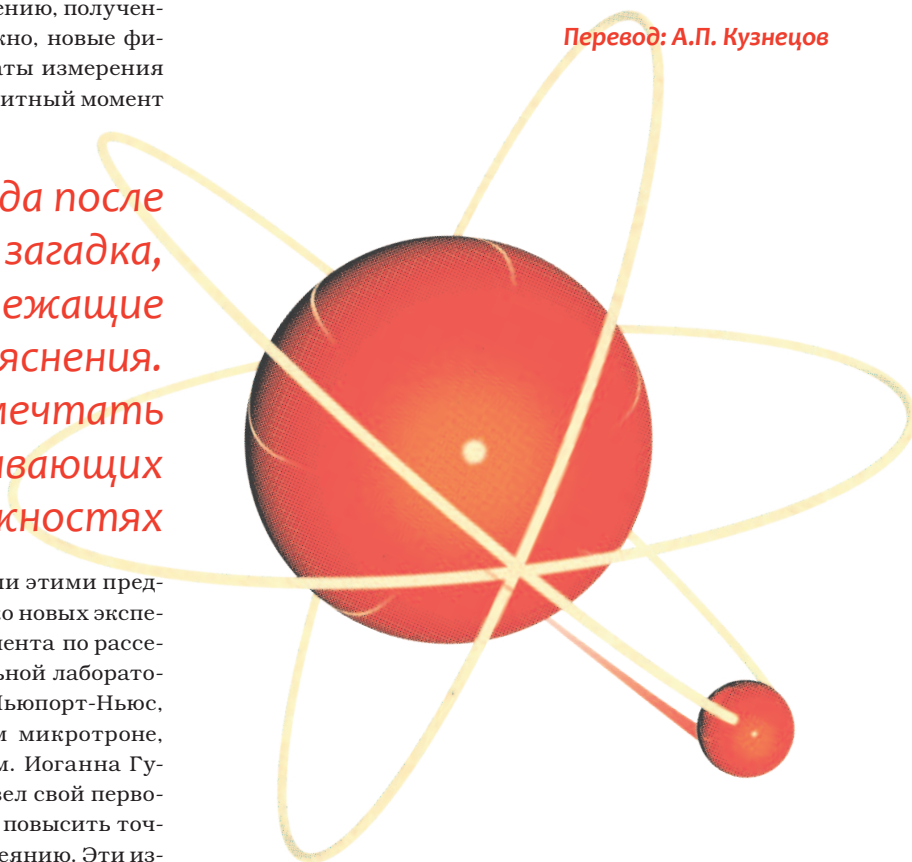
И группа Поля, и майнская группа рассчитывают измерить радиус дейтерия — ядра, образованного одним протоном и одним нейтроном, — чтобы посмотреть, проявится ли эта разница и здесь. Поль собирается также провести с большей точностью повторное измерение обычного атома водорода — с электронной оболочкой.

Кроме того, многие физики отметили, что ученые осуществили резонансные измерения атомов с оболочкой как из мюонов, так и из электронов, но эксперименты

по рассеянию были выполнены лишь с обычным водородом. Комбинация мюонных атомов и рассеяния пока не проверена. Бернауэр участвует в проекте, цель которого — восполнить этот пробел. На базе одного из мюонных пучков ускорителя Института им. Пауля Шерера, того же самого института, в котором группа Поля проводила свою работу, для непосредственного сравнения в «Эксперименте по мюон-протонному рассеянию» (*MUSE*) будет выполнено рассеяние на протонах как электронов, так и мюонов. В этом же эксперименте можно будет проверить некоторые из самых правдоподобных объяснений, предложенных физиками.

Время покажет, получит ли загадка радиуса протона свое решение как странная ошибка или же как ключ к более глубокому пониманию Вселенной. Не исключено также, что она станет путеводной нитью, которая приведет нас к следующей главе в Книге Природы. Это трудное путешествие, но мы намерены его преодолеть. ■

**Перевод: А.П. Кузнецов**



## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- The Size of the Proton. Randolph Pohl et al. in *Nature*, Vol. 466, pages 213–216; July 8, 2010.
- High-Precision Determination of the Electric and Magnetic Form Factors of the Proton. J. C. Bernauer et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 105, No. 24, Article No. 242001; December 10, 2010.
- Muonic Hydrogen and the Proton Radius Puzzle. Randolph Pohl et al. in *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, Vol. 63, pages 175–204; October 2013.