

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.145

СТАБИЛИЗАЦИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА *)**А. Ф. Сильвера, Ю. Валравен**

В обычных условиях газ взрывоподобно рекомбинирует, образуя молекулярный водород. Новая методика, замедляющая эту реакцию, позволяет изучать некоторые свойства квантового газа.

В области очень малых величин все подчиняется законам квантовой механики. Но, тем не менее, квантовомеханические эффекты редко заметны в макроскопических масштабах, и вещество, в котором они проявляются, обладает свойствами, сильно отличающимися от свойств обыкновенной материи. До сих пор одним из самых поразительных квантовых веществ был гелий, превращающийся в квантовую жидкость при низких температурах. В фазе квантовой жидкости гелий не обладает вязкостью и проводит тепло во много раз лучше, чем самые хорошие металлические проводники тепла; более того, какой бы низкой ни была температура, гелий не замерзает при наличии давления. Теперь получено еще одно вещество с макроскопическими квантовыми свойствами: это газ из атомов водорода. Действительно, свойства атомарного водорода при низких температурах могут оказаться еще необычнее, чем свойства гелия. Например, он напоминает гелий тем, что не замерзает при низких температурах, но он также и не сжижается. Так как квантовая теория предсказывает, что атомарный водород останется в газообразном состоянии и при температуре абсолютного нуля, его называют квантовым газом.

Водород, конечно, является распространенным элементом, но не в атомарной форме; газ, образованный из отдельных атомов водорода, не стабилен в условиях, преобладающих на поверхности Земли. Водород обычно встречается крепко связанным с другими элементами, в виде химических соединений, таких, как вода, углеводороды и другие органические вещества. Два атома водорода могут также образовать стабильную двухатомную молекулу (H_2). Хотя газ двухатомного водорода и обнаруживает некоторые квантовые свойства, он все же сжижается, а затем замерзает при сильном охлаждении. Уже давно стало возможным расщепление молекул водорода в лабораторных условиях, но получаемые в результате атомы рекомбинируют менее чем через тысячную долю секунды, образуя новые молекулы.

В последние годы мы и наши коллеги из университета в Амстердаме создали способ замедления рекомбинации даже при относительно высокой

*) Silvera I. F., Walraven J. The Stabilization of Atomic Hydrogen.—Scientific American, January 1982, v. 246, pp. 56—64.—Перевод В. Г. Терзиева.

А. Ф. Сильвера, Ю. Валравен — физики-экспериментаторы, работающие в Амстердамском университете.

© Scientific American, Inc., 1982.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1983.

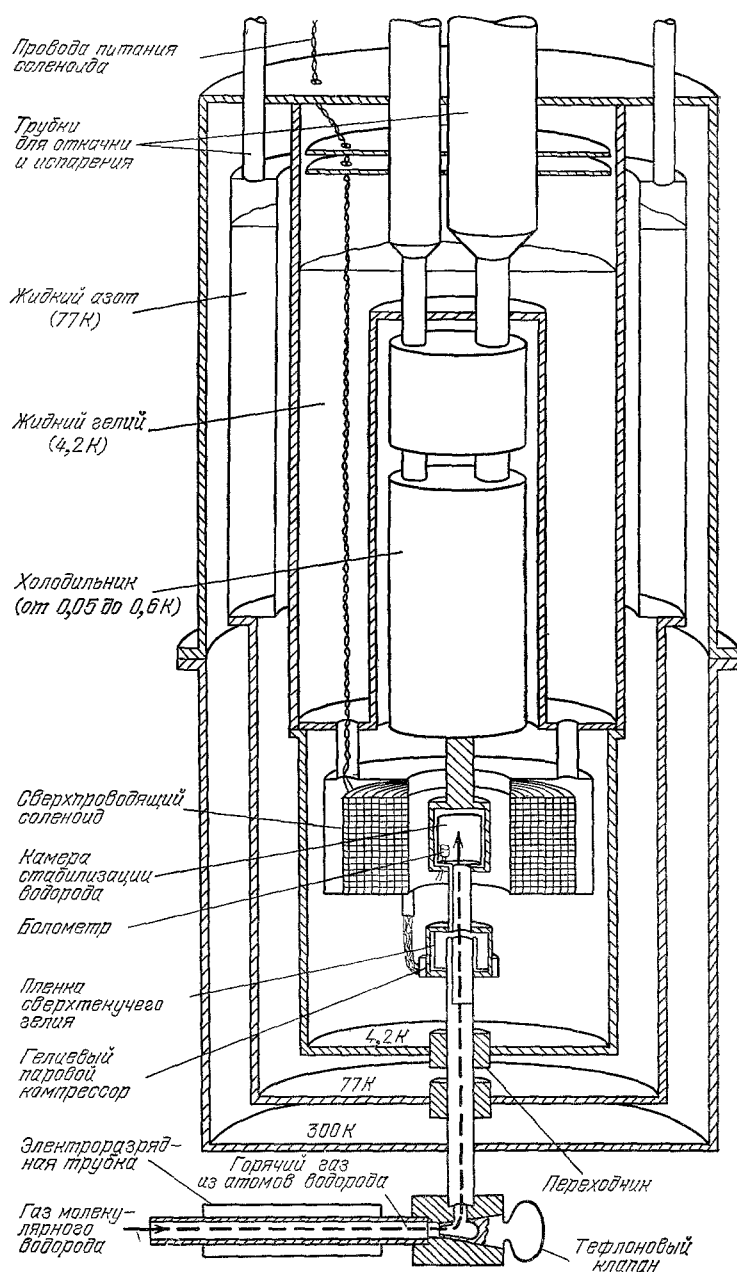


Рис. 1. В экспериментальной установке, разработанной авторами в университете Амстердама, газ из свободных атомов водорода получается при разрушении молекул водорода и затем стабилизируется при низкой температуре в сильном магнитном поле. Химическая связь, удерживающая вместе два атома водорода, может быть легко нарушена при бомбардировке молекулы высокоэнергетичными электронами, но в отсутствие охлаждения и сильного магнитного поля атомы рекомбинировали бы за время, меньшее $1/1000$ с. В установке используются несколько вставленных друг в друга охлаждающих устройств, каждое из которых поддерживается при более низкой температуре, чем предыдущее. Горячий атомарный водород, получаемый в электроразрядной трубке, проходит мимо ряда холодных поверхностей. После этого охлажденный водород попадает в магнитное поле, где он может быть удержан в течение нескольких часов. При температуре 0,3 K несколько минут удавалось поддерживать плотность равной 10^{23} атомов на кубический метр.

плотности атомарного водорода. Нам удалось сохранить газ в атомарном состоянии в течение нескольких часов при предельно низкой температуре в сильном магнитном поле. В таких условиях атомы водорода объединяются относительно медленно, и поэтому можно считать газ стабильным. Как следует из наших экспериментальных результатов, атомарный водород остается газообразным вплоть до $0,08\text{ K}$ — низшей температуры, при которой мы проводили исследования. Эти данные, по крайней мере предварительно, подтверждают предположение о том, что атомарный водород остается газообразным при абсолютном нуле, как и предсказывается квантовой теорией.

□

Стабильный газ атомарного водорода в лабораторных условиях получен недавно, но это не означает, что он не распространен во Вселенной. Межзвездное пространство заполнено сильно разреженным газом из атомов водорода. Хотя его плотность лишь один атом на кубический метр (по сравнению с $3 \cdot 10^{25}$ молекул на кубический метр в воздухе на уровне моря), межзвездный газ составляет большую часть всей материи во Вселенной. Атомарный водород в межзвездном пространстве стабилен из-за своей крайне малой плотности. Рекомбинация происходит при столкновениях атомов, которые столь редки, что время существования газа превосходит ожидаемое время жизни Вселенной. В лаборатории можно получить атомарный водород при температурах, много меньших, чем в космосе, и при плотности 10^{22} — 10^{23} атомов на кубический метр, что на много порядков превышает плотность межзвездного газа. Согласно теоретическим расчетам, эта плотность лишь на один или два порядка меньше той, при которой должны наблюдаться необычные квантовые эффекты, предсказанные для квантового газа, но до сих пор не наблюдавшиеся.

Интереснее всего было бы наблюдать проявление квантовых свойств, заключающееся во внезапном переходе большей части газа в состояние с минимальной энергией. Ожидается, что этот переход должен произойти при низкой температуре, зависящей только от плотности газа. Например, при плотности 10^{24} атомов на кубический метр критическая температура перехода равна $0,016\text{ K}$, а при плотности межзвездного водорода она составляет 10^{-18} K . Критическая температура конденсации пропорциональна плотности в степени $2/3$.

Мысль о том, что многие частицы в одноатомном газе могут одновременно перейти на свой низший энергетический уровень при температуре, отличной от нуля, была впервые высказана Альбертом Эйнштейном в 1923 г. Согласно классической, т. е. доквантовой термодинамике девятнадцатого века, лишь при абсолютном нуле температур заметная доля частиц газа (а точнее, все частицы) могут достичь своего низшего энергетического уровня. При температуре большей абсолютного нуля частицы такого классического газа разместятся на многих энергетических уровнях, причем ни на одном из них не будет большой доли всех частиц. Распределение по энергетическим состояниям при заданной температуре определяется статистикой Максвелла — Больцмана, названной так в честь физиков Джеймса Кларка Максвелла и Людвиг Больцмана. Статистика задает вероятность того, что атом обладает данной энергией.

Но в правильном, квантовомеханическом описании, статистическое распределение набора одинаковых частиц по энергетическим состояниям может быть совсем другим. Статистическая теория, описывающая свойства газа атомарного водорода, была впервые изучена индийским физиком С. Н. Бозе, и называется статистикой Бозе. Явление, предсказанное Эйнштейном, — это математическое следствие бозе-статистики, но оно

настолько противоречило интуитивным представлениям физиков в 20-х годах нашего века, что в то время его рассматривали как математический курьез, который никогда не будет обнаружен в реальных системах. Но сейчас считается, что этот эффект можно наблюдать в лабораторных условиях. Он называется конденсацией Бозе — Эйнштейна.

Газ атомарного водорода, сконденсированный по Бозе — Эйнштейну, состоит из двух групп частиц: из «сконденсированных» атомов, находящихся в основном состоянии, т. е. в состоянии с минимальной энергией, и из атомов в других энергетических состояниях. Такое распределение по энергетическим состояниям может показаться естественным, так как в любой системе, состоящей из большого числа атомов, энергетически выгодно, чтобы несколько из них находились в основном состоянии. Согласно статистике Бозе, при обычных температурах атомы распределены по многочисленным энергетическим состояниям, в каждом из которых находится лишь малая доля всех атомов. Однако в бозе-эйнштейновском конденсате большая часть атомов будет находиться в основном состоянии при экспериментально достижимой температуре, и почти все атомы «сконденсируются» при температуре, отличной от абсолютного нуля.

□

Согласно классической термодинамике считалось, что всякое движение атомов прекращается при температуре абсолютного нуля, — атомы должны покоиться, их кинетическая энергия равна нулю. В квантовой механике неподвижное состояние невозможно, потому что в этом случае нарушается принцип неопределенности, сформулированный впервые Вернером Гейзенбергом. Этот принцип утверждает, что импульс и положение атома не могут быть одновременно определены с неограниченной точностью. Если же атом полностью прекратил движение, то его положение можно точно определить. Импульс неподвижного атома также известен — так как он определяется как произведение массы на скорость, то для неподвижного атома он должен быть равен нулю. Из принципа неопределенности следует, что даже если бы можно было охладить вещество до абсолютного нуля температур, его атомы все же сохранили бы некоторую кинетическую энергию (энергию нулевого уровня) и, следовательно, оставались бы в движении (нулевые колебания). Но это движение качественно отличалось бы от хаотического движения, характерного для больших температур — все атомы имели бы одинаковую энергию, а значит, и одинаковый импульс. Ожидается, что именно такое когерентное движение сконденсированных атомов бозе-эйнштейновского конденсата вызовет появление необычных макроскопических свойств при температурах, значительно превышающих абсолютный нуль.

Атомы, составляющие примерно 50 процентов всех элементов, подчиняются статистике Бозе. Поэтому закономерен вопрос, почему бозе-эйнштейновская конденсация не является распространенным явлением, наблюдавшимся во многих веществах при низких температурах. Причина этого состоит в том, что конденсация проявляется в простейшей форме (а именно, в форме, описанной Эйнштейном) только в идеальном газе, состоящем из невзаимодействующих друг с другом атомов. Между атомами всех реальных газов существуют силы электромагнитного взаимодействия, стремящиеся связать их. Поэтому атомы большинства веществ оказываются жестко фиксированными в результате этих взаимодействий задолго до достижения температуры, при которой возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

Для того чтобы наблюдение бозе-эйнштейновской конденсации было в принципе возможным, нулевые колебания должны быть достаточно

интенсивными, чтобы преодолеть электромагнитное притяжение атомов. Интенсивность нулевых колебаний возрастает с уменьшением атомной массы или сил электромагнитного воздействия. Следовательно, химически инертные атомы легчайших элементов являются единственными подходящими объектами для наблюдения бозе-эйнштейновской конденсации. Гелий обладает интересными квантовыми свойствами, так как он и легок, и инертен, а поэтому силы межатомного взаимодействия слабы. Именно вследствие этого гелий не отвердевает при низких температурах.

Водород, конечно, еще легче, и нулевые колебания его атомов самые интенсивные; однако при обычных условиях силы межатомного взаимодействия для него столь велики, что атомы водорода образуют двухатомные молекулы. Но в некоторых условиях межатомные силы, действующие в молекуле водорода, оказываются слабее, чем силы взаимодействия между атомами любой другой системы. В таких условиях кинетическая энергия атомов даже в низшем энергетическом состоянии достаточна для предотвращения отвердевания или сжижения водорода. Получающееся в результате вещество, возможно, является ближайшим реально осуществимым приближением идеального квантового газа, который представлял себе Эйнштейн, и может оказаться лучшим объектом для наблюдения бозе-эйнштейновской конденсации.

Наилучшее представление о возможных свойствах стабильного атомарного водорода можно получить, исходя из сведений, накопленных за 70 лет изучения свойств гелия при низких температурах, в частности, его распространенного изотопа гелия-4. (Ядро атома гелия-4 составлено из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов. Другие изотопы отличаются количеством нейтронов в ядре.) Гелий-4 становится обыкновенной жидкостью при температуре 4,2 К. Если давление паров над поверхностью жидкого гелия уменьшить, откачивая их вакуумным насосом, то жидкость кипит более интенсивно и, следовательно, еще сильнее охлаждается. Образование пузырьков в кипящей жидкости вызвано относительно плохой теплопроводностью.

□

Но когда гелий охлаждают до 2,18 К, жидкость вдруг становится столь хорошим проводником тепла, что кипение полностью прекращается. Испарение и охлаждение продолжают на поверхности, а остающаяся тепловая энергия перераспределяется по объему благодаря только конвекционным потокам. Такие потоки могут обеспечить достаточный перенос тепла лишь в жидкости, которая движется без вязкости, т. е. без сопротивления течению.

Поэтому жидкий гелий-4 при температуре 2,18 К и ниже называется сверхтекучей жидкостью. Если такую жидкость заставить течь в замкнутой трубке, то она течет без трения и, в отличие от нормальной жидкости, никогда не остановится. Сверхтекучая жидкость просачивается в мельчайшие отверстия в сосуде, в котором она содержится, и обладает замечательной способностью протекать через плотно спрессованный порошок, как будто препятствия не существует. Сосуд с микроскопическими отверстиями, непроницаемый для обыкновенной жидкости, может оказаться дырявым, как решето, для сверхтекучей жидкости. Такие отверстия называются «сверхтечами».

Но даже при отсутствии сверхтечей открытый сосуд со сверхтекучей жидкостью полным будет оставаться недолго. Тонкий слой сверхтекучей жидкости толщиной около 200 Å начнет подниматься по внутренним стенкам сосуда, через край, и в конце концов сползет по внешней поверхности. Эта особенность является еще одним следствием отсутствия вязкости.

Все жидкости, смачивающие поверхность, стремятся «заползти» на нее из-за сил притяжения, действующих между атомами жидкости и атомами поверхности. В принципе, любая жидкость должна подниматься по стенкам сосуда и стремиться к уменьшению своей энергии, перетекая на более низкий уровень. Но в обычных жидкостях такому перетеканию препятствует вязкость. Жидкость, не обладающая вязкостью, такая, как сверхтекучий гелий, образует непрерывный слой на стенках сосуда, связывающий его внутреннюю часть с самым низким уровнем на внешней поверхности. Сверхтекучий гелий перетекает по этому слою, и сосуд опорожняется.

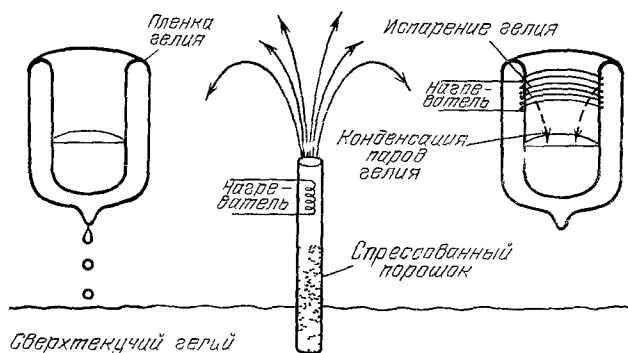


Рис. 2. Сверхтекучий гелий обладает рядом свойств, характерных для сверхтекучей жидкости.

Некоторые из них могут иметь аналоги в газе атомарного водорода, а некоторые использовались при получении этого газа. Если сверхтекучую жидкость поместить в открытый сосуд, то пленка жидкости начнет подниматься по внутренним стенкам, перельется через край и опустится снаружи. Сверхтекучая жидкость проникнет сквозь плотно спрессованный порошок, непроницаемый для обычной жидкости, и она будет двигаться по узким каналам в порошке со скоростью 50 см/с к источнику тепла. Если нагреть верхний конец вертикальной трубки, наполненной спрессованным порошком, то сверхтекучий гелий устремится вверх по трубке так быстро, что образует фонтан. Тепло также заставит пленку гелия заползать вверх по стенкам трубки, где он будет испаряться, а затем вернется к более холодной области непосредственно над жидкостью и там сконденсируется. Циркуляция паров гелия использовалась авторами для сжатия атомарного водорода.

Другие удивительные свойства сверхтекучей жидкости нельзя объяснить, исходя лишь из отсутствия вязкости. Одним из таких свойств является стремление к движению в сторону источника тепла. В тонком слое скорость такого перемещения может достигнуть 50 см/с. Если нагреть верхний конец тонкой трубки, нижний конец которой погружен в сверхтекучий гелий-4, то жидкость поднимается вверх по трубке и испаряется около нагревателя. Если нижний конец трубки забить мелким порошком (через который нормальная жидкость не смогла бы проникнуть даже под давлением), то сверхтекучий гелий протекает по трубке с такой скоростью, что фонтанирует из верхнего конца.

□

Вполне вероятно, что сверхтекучий гелий-4 является бозе-эйнштейновским конденсатом, хотя экспериментально это еще окончательно не доказано. Для подтверждения этого необходимо определить долю атомов, находящихся в основном состоянии, что до сих пор сделать однозначно не удавалось. Фриц Лондон из университета Дьюка впервые выдвинул эту гипотезу в 1938 г. Он показал, что некоторые из известных свойств сверхтекучего гелия можно объяснить, если предположить, что он является бозе-эйнштейновским конденсатом. Атомы гелия-4 подчиняются статистике Бозе. Исходя из этого, Лондон выдвинул идею о том, что сверхтекуче-

чая жидкость состоит из двух компонент: из сконденсированной, или сверхтекучей компоненты, которая может проникать сквозь малые отверстия, и из нормальной компоненты, которая этого делать не может.

Например, в эффекте фонтанирования лишь сверхтекучий конденсат может проникнуть сквозь порошок и достигнуть верхнего конца трубки. Там из-за нагрева атомы переходят на более высокие энергетические уровни и сверхтекучая компонента превращается в обыкновенную жидкость. Для поддержания однородного распределения сверхтекучей компоненты по объему жидкости сверхтекучий гелий втягивается в трубку.

Но наряду с успехами в объяснении экспериментальных результатов существуют серьезные трудности, связанные с моделью Лондона, теоретическое рассмотрение которых продолжается уже несколько десятилетий. В то время как предсказания Эйнштейна относились к газу из невзаимодействующих частиц, влияние межатомных сил в жидкости существенно, и им нельзя пренебречь. Атомы идеального газа, находящиеся в основном состоянии, обладают нулевым импульсом, и поэтому неопределенность их положения максимальна. Но в жидкости межатомные взаимодействия изменяют основное состояние таким образом, что немногие из атомов, находящихся в нем, имеют нулевой импульс. Таким образом, если бозе-эйнштейновская конденсация происходит в жидкости, то атомы конденсата должны находиться в более сложном основном состоянии, чем в газе. Более того, это сложное основное состояние атомов в жидкости трудно распознать экспериментально.

□

В сверхтекучем газе атомарного водорода многих из упомянутых трудностей можно избежать. В то время как плотность жидкости постоянна, плотность газа можно менять, изменяя давление в содержащем его сосуде.

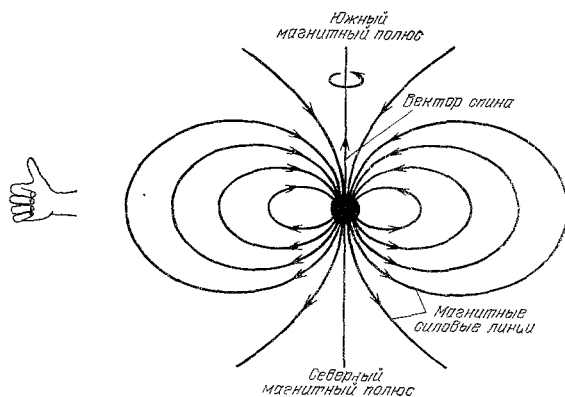


Рис. 3. Спин — это свойство частиц, составляющих атом водорода, которое можно использовать для того, чтобы не дать атомам рекомбинировать.

Спин является векторной величиной, т. е. он описывается как численным значением, так и направлением. Величину вектора можно рассматривать как угловой момент количества движения, в то время как его направление задается направлением вращения в соответствии с правилом правой руки. (Если пальцы правой руки загнуть в направлении вращения частицы, большой палец указывает направление вектора.) Частица, обладающая как массой, так и спином, создает магнитное поле, и поэтому на ее ориентацию можно оказывать воздействие, прилагая внешнее магнитное поле. Для отрицательно заряженной частицы, такой, как электрон, северный магнитный полюс направлен в противоположном направлении относительно вектора спина.

В разреженном газе межатомные взаимодействия намного слабее, чем в жидкости. Теоретические расчеты предсказывают, что почти 100% атомов конденсата в газе будут находиться в состоянии с нулевым импульсом.

Кроме того, магнитные и другие свойства атома водорода, отличающие его от атома гелия, должны привести к новым макроскопическим явлениям, которые можно будет наблюдать в сверхтекучей жидкости.

Получить атомарный водород легко, но для его стабилизации необходимо было преодолеть несколько серьезных экспериментальных трудностей в области, о которой было известно очень мало. Хотя цель наших экспериментов состоит в проверке некоторых предсказаний квантовой теории, конструкция установки основывается на других предсказаниях той же теории.

Одним из важнейших квантовых свойств атома или ядерной частицы является спин — собственный момент количества движения. Наличие спина у частицы подобно вращению шарика вокруг своего диаметра. Это вектор, т. е. он определяется как величиной, так и направлением. Величину вектора спина можно рассматривать как меру угловой скорости вращения; его направление определяет направление вращения в соответствии с правилом правой руки. Если пальцы правой руки загнуть в направлении вращения, то вытянутый большой палец будет показывать направление вектора спина.

В отличие от вращения шарика спин атома или ядерной частицы квантуется. Величина спина может принимать лишь целые или полуцелые значения (если собственный момент количества движения измерять в фундаментальных единицах), и вектор может иметь конечное число ориентаций. Например, величина спина у протона, нейтрона и электрона равняется $1/2$, и вектор спина может быть направлен «вверх» или «вниз». Частица, спин которой принимает полуцелые значения, такие, как $1/2$, $3/2$, $5/2$ и т. д., называется фермионом в честь Энрико Ферми.

□

Частица с целочисленным значением спина (0, 1, 2, 3, ...) называется бозоном по имени Бозе. Фотон — квант электромагнитного излучения — является бозоном, как и пин — основной носитель связующих сил

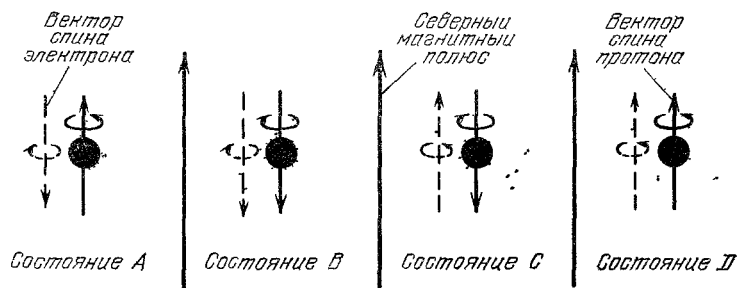


Рис. 4 Спин атома водорода складывается из спинов составляющих его протона и электрона.

Спины как протона, так и электрона квантуются — их величина равна $1/2$ (если измерять момент количества движения в фундаментальных единицах) и векторы могут быть направлены или вверх, или вниз. Атом водорода поэтому может иметь одну из четырех возможных спиновых конфигураций. Квантовомеханические спиновые состояния идентичны четырем конфигурациям в бесконечно сильном поле. Плотность электронного облака, окружающего каждое ядро, представляет относительную вероятность нахождения электрона в данной области.

в атомном ядре Бозон со спином, равным 0, естественно, соответствует бесспиновой частице, и поэтому вектор спина не нужен для описания его свойств. Для бозона со спином 1 вектор может иметь одну из трех возможных ориентаций.

Спин составного объекта, такого, как атом водорода, зависит от напряженности магнитного поля, действующего на него. В простейшем

для описания случаев напряженность магнитного поля бесконечно велика, а такое поле является достаточно хорошим приближением сильного поля. В бесконечно сильном поле спин атома водорода равняется векторной сумме векторов спина составляющих его частиц. В общем случае сумма зависит от ориентации спинов частиц, составляющих атом. Атом водорода, составленный из протона и электрона, может находиться в одном из четырех спиновых состояний. Векторы спина и протона, и электрона могут быть направлены вверх, так что спин атома равен 1 в направлении «вверх»,

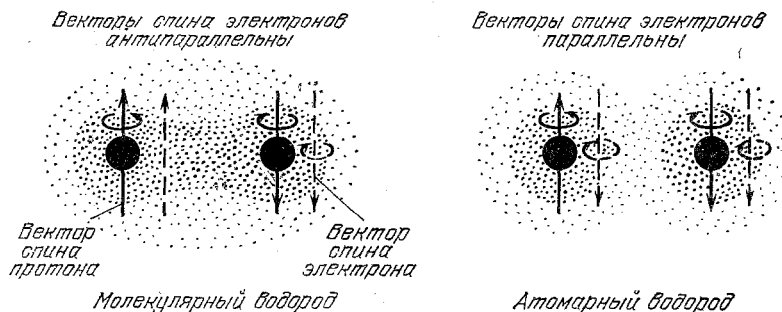


Рис. 5. Для стабилизации атомарного водорода необходимо, чтобы векторы спинов электронов в атомах были поляризованы, т. е. направлены в одну сторону.

Два атома с противоположно направленными векторами спина стремятся объединить свои электроны и образовать двухатомную молекулу. В отсутствие поляризующих сил векторы спина электронов направлены произвольно, и практически все атомы водорода быстро образуют пары. Но если векторы спина электронов параллельны, то атомы не могут объединить свои электроны и поэтому межатомные силы становятся слабыми и атомы водорода остаются в несвязанном состоянии. Для понимания процесса образования двухатомного водорода необходимо рассмотреть лишь относительную ориентацию векторов спина двух электронов (параллельны они или антипараллельны); их действительное направление и спины протонов имеют второстепенное значение. Поэтому на рисунке показаны только 2 из 16 возможных пар.

или оба спина могут быть направлены вниз, и при этом спин атома равен 1 в направлении «вниз». В остальных конфигурациях векторы спина протона и электрона направлены в противоположные стороны (спин протона «вверх», а спин электрона «вниз» или же наоборот), так что суммарный спин атома равен нулю. При всех возможных ориентациях очевидно, что атом водорода является бозоном.

Различие между фермионами и бозонами явилось ключом к методу, который сделал возможным стабилизацию атомарного водорода. Отличительной особенностью фермионов является то, что они подчиняются квантовомеханическому правилу запрета, сформулированному Вольфгангом Паули: если фермион находится в определенном состоянии, то ни один из других идентичных фермионов не может находиться в этом же состоянии. В квантовой механике состояние частицы полностью описывает ее природу и свойства, включая энергию, положение или импульс и спин. Например, если два электрона занимают перекрывающиеся области пространства и имеют одинаковые энергию и импульс, то они должны отличаться спинами. Бозоны, с другой стороны, не подчиняются правилу запрета — число бозонов, находящихся в одном и том же состоянии, неограниченно. Действительно, при конденсации Бозе — Эйнштейна все бозоны в макроскопическом объекте могут, в принципе, скопиться в одном и том же состоянии, а именно, в основном.

□

Хотя изолированный атом водорода можно рассматривать как составной бозон, два близко расположенных атома уже нельзя описывать таким образом. Например, при образовании двухатомной молекулы водорода

необходимо учитывать свойства составляющих ее двух электронов и двух протонов. При сближении атомов их внешние электронные облака начинают перекрываться. Два электрона с одинаково ориентированными векторами спина не могут одновременно находиться в одной и той же области пространства. Но если векторы спина электронов противоположно направлены, то ни один из принципов квантовой механики не запрещает им находиться в одном и том же месте в одно и то же время. (Электростатическое отталкивание стремится не дать электронам приблизиться друг к другу, но в данном случае это эффект второго порядка.)

Два близлежащих атома водорода стремятся принять конфигурацию, которой соответствует минимальная энергия. При этом составляющие

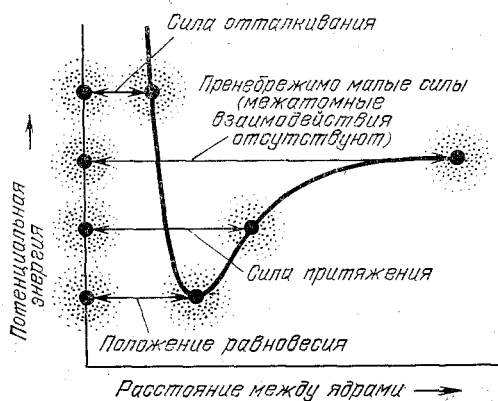


Рис. 6. Потенциальная энергия двух атомов водорода зависит от расстояния между ними.

При большом удалении атомов друг от друга потенциальная энергия условно принимается равной нулю. В каждой точке кривой, кроме минимума, между атомами действует результирующая сила, стремящаяся уменьшить их энергию. Точка с минимальной потенциальной энергией соответствует положению равновесия, т. е. состоянию покоя второго атома относительно первого. Если второй атом приблизить к первому, то между ними возникает результирующая сила отталкивания, которая стремится вернуть их в положение равновесия. Аналогично, если второй атом удалить от первого, то потенциальная энергия возрастает и возникающая сила притяжения стремится восстановить положение равновесия. Если атомы разнести достаточно далеко, то малое изменение расстояния между ними почти не изменяет потенциальную энергию системы: даже малая кинетическая энергия позволяет им свободно передвигаться, не испытывая значительного взаимодействия. В этой гипотетической функции потенциальной энергии не учитываются ограничения, накладываемые квантовой механикой на энергию атомов и их взаимодействие.

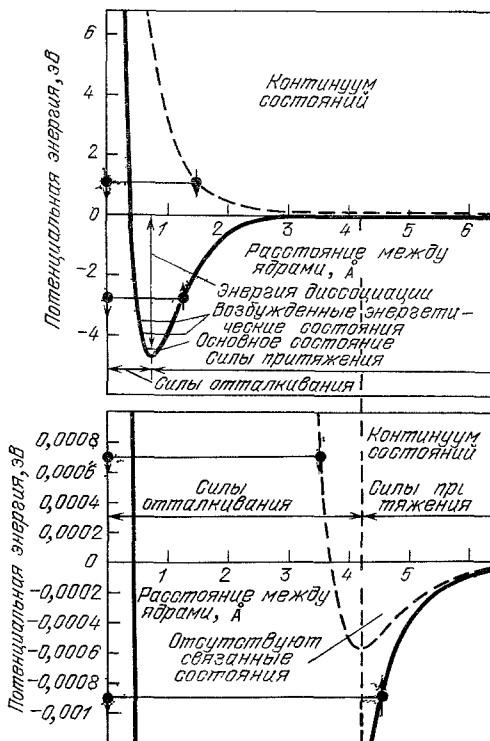
молекулу электроны и протоны атомов стремятся расположиться таким образом, чтобы силы отталкивания и притяжения, действующие между ними, были точно скомпенсированы. Для системы из двух атомов водорода конфигурация с минимальной энергией зависит, в основном, от состояний, в которых находятся электроны. Например, если векторы спинов двух электронов антипараллельны, то они могут находиться в пространстве между двумя положительно заряженными ядрами, и их отрицательные заряды приведут к частичному преодолению сил ядерного отталкивания. Суммарная энергия системы с такой электронной конфигурацией намного меньше, когда атомы расположены близко друг от друга, чем когда расстояние между ними велико. Электроны крепко связывают оба атома. При не слишком высоких температурах кинетическая энергия атомов недостаточна для преодоления этой связи; так образуется стабильная двухатомная молекула водорода. С другой стороны, если векторы спинов электронов параллельны, то электроны не могут локализоваться между ядрами, не нарушая принципа запрета. В этом случае между атомами действует сила отталкивания, и лишь при расстоянии между ядрами около 4 \AA между ними возникает незначительная сила притяжения. Но

эта сила столь мала, что для ее преодоления достаточно энергии нулевых колебаний, и поэтому образование молекулы за счет нее невозможно. Основная причина нестабильности газа атомарного водорода при обычных условиях заключается в том, что спины электронов ориентированы случайным образом. Практически всегда атом водорода может найти другой атом, с противоположно направленным вектором спина электрона, и соединиться с ним, образуя двухатомную молекулу.

Основа метода, используемого нами для создания стабильного атомарного водорода, состоит в том, что векторы спина электронов поляри-

Рис. 7 Вид квантовомеханической функции потенциальной энергии для пары атомов водорода с антипараллельными спинами электронов (сплошные линии) значительно отличается от вида функции для пары атомов с параллельными спинами (штриховые линии).

Атомы стремятся иметь конфигурацию с минимальной потенциальной энергией, но они не могут находиться в состоянии покоя в положении равновесия, потому что положение квантовомеханической частицы не может быть определено точно. Вместо этого, если атомы связаны, они должны находиться в одном из некоего набора дискретных состояний, низшее, или основное, состояние позволяет им находиться ближе всего к положению равновесия. Если атомы не связаны, то они могут находиться в любом состоянии с положительной энергией из некоторого континуума значений. Когда спины двух электронов антипараллельны, основное состояние находится вблизи дна глубокой потенциальной ямы, и энергия, необходимая для диссоциации атомов, велика. Поэтому атомы уменьшают свою суммарную энергию, образуя молекулу. Связь достаточно крепка для того, чтобы противостоять тепловому движению атомов при высоких температурах. Но когда спины параллельны, силы притяжения настолько слабы, что даже небольшие колебания атомов, существующие, согласно предсказаниям квантовой механики, при абсолютном нуле температур, не дадут атомам образовать молекулу. Поэтому не существует основного состояния. На нижнем рисунке вертикальная шкала сжата примерно в 5000 раз по сравнению с верхним.



зуются таким образом, что все они ориентированы одинаково. При полной поляризации атомы не могут рекомбинировать. Получающееся вещество называется спиново-поляризованным атомарным водородом.

Но как получить спиново-поляризованный водород из обычного атомарного водорода? У частицы, обладающей и спином, и массой, есть вектор магнитного момента, связанный с ее спином. Таким образом, спиновое состояние электрона можно фиксировать внешним магнитным полем точно так же, как магнитное поле Земли определяет ориентацию стрелки магнитного компаса. Степень поляризации группы электронов в атомах можно выразить отношением числа атомов со спином электрона, направленным вверх, к числу атомов, электроны которых имеют спин, направленный вниз. Конечная степень поляризации сильно зависит от напряженности магнитного поля и от температуры. В наших экспериментах соотношение спинов составляло примерно $1 : 10^{20}$. Это достигалось в магнитном поле напряженностью 10^5 Гс (в 200 тысяч раз сильнее, чем магнитное поле Земли) и при температуре 0,3 К.

В отличие от магнитной стрелки, направление которой можно как поддерживать неизменным, так и изменять магнитным полем, спиновое состояние электрона нельзя изменить при помощи однородного магнитного поля, сколь бы сильным оно ни было. Вместо этого для поляризации электронов мы использовали действие градиента сильного магнитного поля, т. е. поля, напряженность которого быстро меняется при переходе от одной точки пространства к другой. Поле с большим градиентом, так же как и однородное, не может изменить направление спина электрона, но градиент поля легко отделит атомы с направленными вверх спинами электронов, от атомов, спины электронов которых направлены вниз.

Атомы со спином, направленным вниз, втягиваются в области пространства с более сильным магнитным полем, где они сохраняются в поляризованном состоянии в течение нескольких часов. (В нашей установке

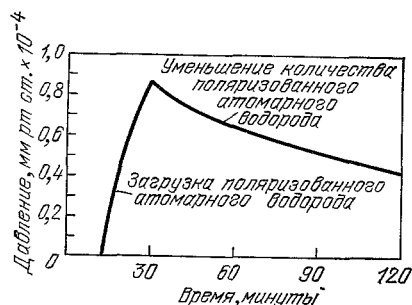


Рис. 8. Увеличение давления стабилизированного водородного газа при загрузке стабилизационной камеры переходит в постепенное уменьшение после окончания загрузки.

Уменьшение количества атомарного водорода вызвано медленной рекомбинацией атомов, образующих двухатомные молекулы. Согласно квантовой теории, в магнитном поле конечной напряженности некоторая часть поляризованных атомов водорода находится в «смешанном» состоянии, в котором существует малая вероятность того, что спин электрона направлен вверх, а не вниз. Наличие смешанного состояния открывает путь к рекомбинации.

область с наибольшей напряженностью магнитного поля совпадает с областью с минимальной температурой.) Атомы со спинами, направленными вверх, вытесняются в области более слабого поля и там сталкиваются со стенками установки. При этом они или переходят в состояние со спином вниз, и втягиваются затем в область сильного магнитного поля, или рекомбинируют и образуют двухатомные молекулы. Двухатомный водород остается на холодных стенках и в дальнейшем никакой роли не играет.

Атомы со спином, направленным вниз, попадают в холодную стабилизационную камеру, где градиент магнитного поля и низкая температура удерживают их. Во время движения в магнитном поле поляризованные атомы ускоряются. Если бы не потери кинетической энергии при столкновениях атомов со стенками стабилизационной камеры, то прироста кинетической энергии хватило бы атомам для преодоления градиента магнитного поля и, таким образом, они бы покинули пределы камеры. Но при столкновениях с холодными стенками камеры атомы обмениваются с ними энергией и поэтому как бы оказываются в магнитной ловушке.

□

После того как мы поняли, как можно разделить атомы водорода и сохранить их в поляризованном состоянии, основные усилия были сосредоточены на том, чтобы предотвратить прилипание атомов к стенкам установки, где они рекомбинируют в молекулы. В поляризованном водороде столкновение двух атомов может привести к обращению спина одного из них и к последующей молекулярной рекомбинации. Столкновение должно происходить с участием третьей частицы для того, чтобы общая энергия и импульс системы могли сохраняться. Если третья частица, уносящая освободившуюся при столкновении энергию, отсутствует, то обращение спина запрещено законами сохранения. Таким образом, для того чтобы произошла рекомбинация, по крайней мере три частицы

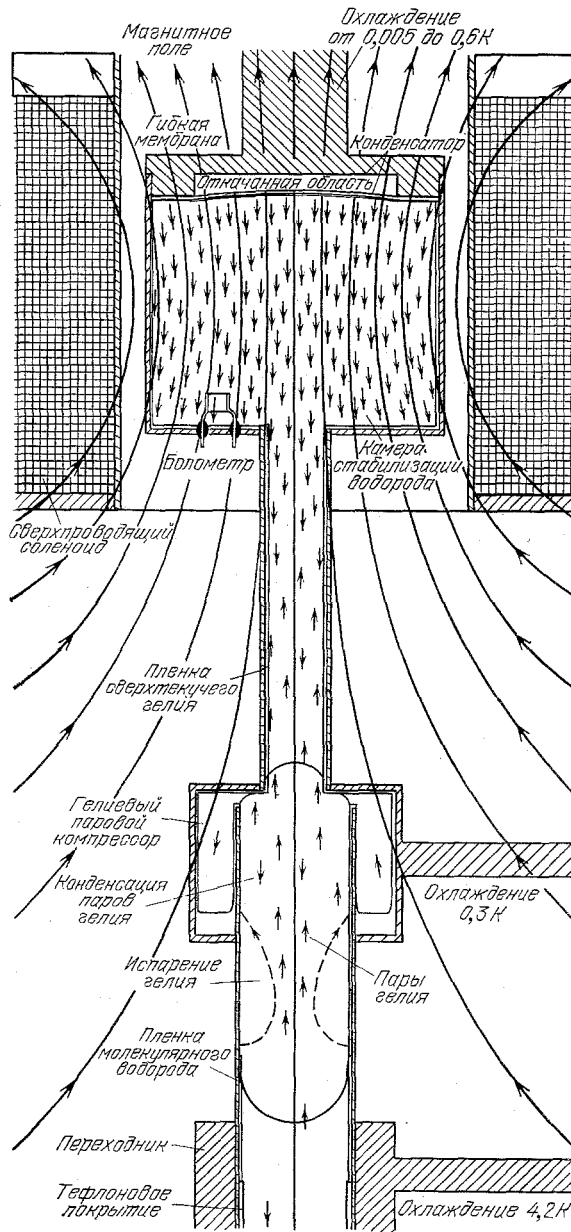


Рис. 9. Центральная часть экспериментальной установки пропускает охлажденный неполяризованный атомарный водород к стабилизационной камере, помещенной в сильное магнитное поле.

Изменение напряженности магнитного поля отталкивает попадающие в него атомы со спином вверх (стрелки, направленные вверх) и притягивает атомы со спином вниз (стрелки, направленные вниз). Одна из основных задач конструкции заключается в предотвращении прилипания атомов водорода к стенкам установки, где рекомбинация более вероятна. В нижней, более теплой, части установки атомы охлаждаются примерно до 4 К по мере того, как они соударяются со стенками, покрытыми молекулярным водородом. В более холодных верхних частях установки все поверхности покрыты тонким слоем сверхтекучего гелия, обладающего значительно меньшей, чем у слоя молекулярного водорода, способностью поглощать атомы водорода. Плотность газа атомарного водорода можно с большой точностью определить при помощи или емкостного датчика давления, или болометра — прибора, регистрирующего изменение температуры, через изменение электрического сопротивления.

должны столкнуться одновременно, а при малой плотности газа такое событие крайне маловероятно.

Но на поверхности любое столкновение двух атомов может привести к рекомбинации, потому что атомы поверхности могут сыграть роль третьего катализирующего тела. Задача значительно усложняется необходимостью поддерживать стенки установки при низкой температуре для охлаждения водорода. Если стенки не покрыты специальным веществом, то при низкой температуре силы электромагнитного взаимодействия между ними и атомами водорода становятся достаточно сильными для того, чтобы атомы осели на стенках. По мере увеличения плотности атомов около стенок возрастает скорость рекомбинации, она пропорциональна квадрату их поверхностной плотности. Рекомбинация на поверхности может происходить столь быстро, что даже полностью поляризованный газ атомарного водорода весь рекомбинирует быстрее, чем за тысячную долю секунды.

Для предотвращения рекомбинации на стенках необходимо было найти вещество, поверхность которого слабо притягивала бы атомы водорода. Идеальный материал для этого — сам атомарный водород, и если бы можно было создать такую поверхность, то прилипание атомарного водорода к стенкам уже не было бы проблемой. Мы обнаружили, что жидкий гелий слабо притягивает атомы водорода и может предотвратить скопление их у стенок. Поверхность из жидкого гелия представляет собой тонкую пленку, которая покрывает все стенки стабилизационной камеры. При низких температурах, необходимых в нашем эксперименте, гелий является сверхтекучей жидкостью. Для использования пленки из сверхтекучей жидкости и поддержания при этом низкой температуры в стабилизационной камере необходимо специальное поэтапное охлаждение.

□

Сначала атомарный водород получают в электрической разрядной трубке из молекулярного водорода. В трубке свободные электроны ускоряются электрическим полем и сталкиваются с двухатомными молекулами, вызывая диссоциацию. Из-за бомбардировки высокоэнергетическими электронами атомарный газ покидает разрядную трубку при температуре в несколько сот градусов Кельвина.

Горячий газ быстро движется к холодной внутренней части установки по трубке, покрытой изнутри полимером тефлон. Удивительно, что материал, используемый для покрытия сковородок, на которых еда не подгорает, также служит для предотвращения прилипания атомарного водорода к стенкам на первых этапах охлаждения. Продвигаясь по трубке, атомы водорода многократно сталкиваются с охлажденной тефлоновой стенкой, каждый раз отдавая часть своей кинетической энергии; таким образом газ охлаждается. Нескольких столкновений достаточно каждому атому для достижения температурного равновесия со стенкой. Если температура тефлона выше 20—30 К и газ проходит быстро, то рекомбинация атомов водорода незначительна.

Охлаждение от 20 до 1 К сложно из-за того, что тефлоновое покрытие уже не может предотвратить рекомбинацию. Поэтому на следующем этапе охлаждения необходима другая поверхность, с меньшей способностью захватывать атомы водорода. Гелий, покрывающий стенки более холодной части стабилизационной камеры, не подходит для этого переходного этапа. При температуре, до которой охлаждена эта часть установки, гелий образует пленку на поверхности только при довольно высоком давлении паров. Высокое же давление паров гелия недопустимо, так

как его атомы катализировали бы быструю рекомбинацию атомарного водорода.

Оказалось, что лучшее, после гелия, покрытие для стенок — это молекулярный водород, и он вполне может заменить гелий в переходной области температур. Стюарт Дж. Б. Крамптон с другими сотрудниками университета Уиллиамс показали, что атомы водорода слабо поглощаются сплошной поверхностью из молекулярного водорода при температуре, превышающей 4 К. В нашей установке сплошной слой молекулярного водорода образуется автоматически при рекомбинации атомарного водорода на поверхности металлической трубки — переходника, температура которой поддерживается равной 4,2 К. После первоначального введения атомарного водорода образование молекул замедляется, так как слой молекулярного водорода на стенках подавляет процесс рекомбинации.

Образование молекулярного водорода происходит наиболее интенсивно в части установки, находящейся при температуре от 10 до 1 К и зависит от времени, в течение которого атомарный водород находится в данной области. Поэтому мы пытались подобрать такую длину этого участка, при которой атомы водорода претерпели бы достаточно столкновений для того чтобы охладиться, но меньше, чем необходимо для рекомбинации. Атомарный водород, не рекомбинировавший на этом участке, наконец попадает в «безопасную» область, стенки которой покрыты гелием.

□

Именно на этом последнем этапе обработки холодного газа атомы сортируются градиентом магнитного поля в соответствии с направлением спина. Атомы со спином, направленным вниз, попадают в стабилизационную камеру, где измеряется окончательная плотность атомарного водорода. Стабилизационная камера поддерживается при температуре от 0,5 до 0,1 К и в ней создается магнитное поле с большим градиентом, которое удерживает атомарный газ.

До введения водорода в холодную стабилизационную камеру туда напускают газообразный гелий, который конденсируется на поверхности стенок в виде сверхтекучего гелия-4. Остаточное давление паров гелия при столь низкой температуре пренебрежимо мало, так что можно считать, что в камере вакуум. После образования слоя гелия-4 на стенках используются свойства сверхтекучей жидкости, проявляющиеся в том, что этот слой перетекает по стенкам из стабилизационной камеры в более теплую область в переходнике. Там гелий испаряется, и пары стремятся вернуться в камеру из-за меньшего давления в более холодной области. При охлаждении они снова конденсируются на стенках и становятся сверхтекучей жидкостью.

Конденсация паров гелия создает серьезную проблему при охлаждении. Если позволить гелию конденсироваться в стабилизационной камере, то тепло, полученное при испарении в более теплой области, выделится на стенках. Тепловая энергия может быть столь велика, что не позволит достигнуть низких температур, необходимых для стабилизации. Мы решили эту проблему, введя дополнительную стадию охлаждения между переходником и стабилизационной камерой. Установка сконструирована так, что возвращающиеся пары гелия конденсируются, не достигая стабилизационной камеры. Возвращающийся газообразный гелий также используется для удержания водорода в стабилизационной камере. Атомы водорода, траектория которых могла бы им позволить покинуть камеру, сталкиваются с более массивными движущимися вверх атомами гелия и возвращаются в камеру. Таким образом, эта часть установки действует как паровой компрессор для поляризованного водородного газа.

□

Для обнаружения стабилизированного атомарного водорода мы разработали простой и удивительно чувствительный метод. При рекомбинации двух атомов водорода освобождается большое количество тепловой энергии. Вызывая мгновенную рекомбинацию газа в стабилизационной камере, можно измерить увеличение температуры в ней, и, таким образом, определить плотность атомарного водорода до рекомбинации по известным энергии рекомбинации и объему камеры.

Для того чтобы вызвать мгновенную рекомбинацию и провести измерение, мы установили в стабилизационной камере квадратную углеродную пластинку со сторонами длиной примерно в миллиметр. Пластика была вырезана из резистора и подвешена в камере на тонких проволочках. Так как сопротивление углерода меняется с температурой, то пластинка действует как болометр, и изменение температуры можно определить по изменению ее сопротивления. Пока стабилизационная камера наполняется атомарным водородом, такие проволочки и углерод покрыты пленкой сверхтекучего гелия.

Когда необходимо измерить плотность газа, через болометр пропускают электрический ток, тем самым нагревая его. Сверхтекучий гелий испаряется с пластинки быстрее, чем он может притекать через слой на тонких проволочках, и поэтому атомарный водород приходит в контакт с углеродом. В течение примерно 20 мс атомы водорода сталкиваются с поверхностью пластинки и рекомбинируют, вызывая крошечный взрыв в камере и внезапное увеличение температуры, поддающееся измерению.

Хотя болометр и эффективный и дешевый детектор, он уничтожает образец газа. Емкостный датчик давления свободен от этого недостатка. Электрический заряд, который может накопиться на двух параллельных пластинах конденсатора, зависит от расстояния между ними. Если одной из пластин конденсатора является гибкая мембрана, то ее деформации, вызванные изменением давления, могут быть зарегистрированы в виде электрического сигнала.

Учитывая соотношение температуры и плотности, достигнутых на данный момент для атомарного водорода, каковы перспективы для достижения бозе-эйнштейновской конденсации? При попытках достичь более низких температур и больших плотностей мы столкнулись с проблемой, состоящей в том, что покрытие из гелия-4 на стенках стабилизационной камеры начинает поглощать атомы водорода. Достижимая плотность, таким образом, ограничена возрастающей скоростью рекомбинации. В идеальном случае необходимо найти поверхность с меньшей поглощающей способностью, чем у гелия-4. Одним из возможных покрытий является тонкая пленка изотопа гелия-3 поверх слоя гелия-4. Это покрытие имеет поглощающую способность примерно в три раза меньшую, чем у гелия-4. Хотя пленка из гелия-3 и позволяет увеличить плотность водорода, это возрастание все же недостаточно для конденсации Бозе — Эйнштейна.

□

В настоящий момент попытки достичь точки бозе-эйнштейновской конденсации принимают другое направление. Точный квантово-теоретический анализ показывает, что спин-поляризованный водородный газ составлен из атомов, находящихся в двух различных состояниях. В состоянии *B* спины и протона, и электрона направлены вниз. Состояние *A* сложнее. В нем спиновая конфигурация зависит от напряженности магнитного поля и при любом конечном ее значении это состояние представляет «смесь» двух конфигураций. Хотя спин электрона в состоянии *A* вероятнее всего направлен вниз, существует малая, но отличная от нуля

вероятность того, что он направлен вверх; вектор спина протона при этом направлен в сторону, противоположную направлению спина электрона.

Из-за различных возможных направлений для векторов спина атомов в А-состоянии существует некая вероятность рекомбинации даже среди атомов, поляризованных по спину. Но если суметь отделить атомы в В-состоянии от атомов в А-состоянии, то атомы в В-состоянии рекомбинировать не будут. Ричарду У. Клайну, Томасу Дж. Грейтаку и Дэниелю

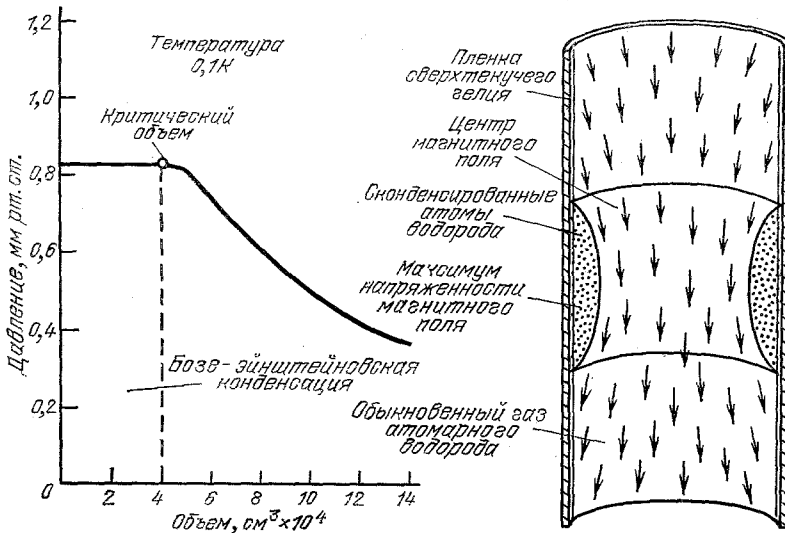


Рис. 10. Бозе-эйнштейновскую конденсацию, вероятно, можно обнаружить, наблюдая соотношение давления и объема газа при постоянной температуре.

В идеальном газе без межатомных взаимодействий давление обратно пропорционально объему, пока он значительно больше критического объема конденсации. При критическом объеме атомы начинают переходить в основное состояние и перестают давать вклад в давление газа. Поэтому давление не возрастает при дальнейшем сжатии газа. Составляющие газ атомы водорода обладают магнитным моментом и поэтому могут быть локализованы в пространстве при помощи градиента магнитного поля. Атомы в низшем энергетическом состоянии стремятся попасть в область с более сильным магнитным полем, так что атомы бозе-эйнштейновского конденсата должны скопиться в области максимальной напряженности поля. В соленоиде магнитное поле сильнее всего по бокам центрального сечения. Таким образом, если газ водорода поместить в цилиндрическую трубку в отверстия соленоида, атомы конденсата должны образовать плотное кольцо в центральной плоскости.

Клеппнеру из Массачусетского Технологического института недавно удалось получить чрезвычайно чистый образец спин-поляризованного атомарного водорода в В-состоянии. В газе, состоящем из таких атомов, должно быть возможным создание значительно больших концентраций атомарного водорода на поверхности до того, как скорость рекомбинации станет недопустимо большой. Тогда, возможно, удастся сжать газ до плотности, необходимой для бозе-эйнштейновской конденсации. Если это удастся осуществить, то перед научным сообществом предстанет состояние вещества, в котором проявятся новые и необычные квантовые свойства.

ЛИТЕРАТУРА

- Silvera I. F., Walraven J. T. M. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, p. 164.
Recent Developments in Condensed Matter Physics/Ed. J. T. De-Vreese. — N. Y.: Plenum Press, 1981.
Berlinsky A. J. — J. Appl. Phys., 1981, v. 52, p. 2309.