

Развитие методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света

PACS numbers: 32.80.-t, 32.80.Pj, 42.65.-k

Шведская Королевская академия наук решила присудить Нобелевскую премию 1997 г. по физике совместно проф. Стивену Чу (Steven Chu), Станфордский университет, Станфорд, США, проф. Клоду Коэну-Тануджи (Claude Cohen-Tannoudji), Коллеж де Франс и Эколь нормаль суперьер, Париж, Франция и д-у Уильяму Д. Филипсу (William D. Phillips), Национальный институт стандартов и технологии, Гейзерсбург, Мэриленд, США, *за развитие методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света.*

Стивен Чу родился в 1948 г. в Сент-Луисе, Миссури, США. Гражданин США. Докторская степень по физике присвоена в 1976 г. в Калифорнийском университете в Беркли. Профессор гуманитарных и точных наук в Станфордском университете с 1990 г. (Theodore and Frances Geballe Professor). Среди других наград Чу получил в 1990 г. Международную премию короля Фейсала по науке (физика) за развитие метода лазерного охлаждения и пленения атомов.

Клод Коэн-Тануджи родился в 1933 г. в Константине, Алжир. Гражданин Франции. Докторская степень по физике присвоена в 1962 г. в Эколь нормаль суперьер в Париже. Профессор коллеж де Франс с 1973 г. Член Академии наук (Париж) и других научных объединений. Среди многих наград и отличий Коэн-Тануджи получил в 1996 г. Премию по квантовой электронике Европейского физического общества за пионерские эксперименты по лазерному охлаждению и пленению атомов и за другие работы.

Уильям Д. Филипс родился в 1948 г. в Уилкс-Барре, Пенсильвания, США. Гражданин США. Докторская степень по физике присвоена в 1976 г. в Массачусетском технологическом институте, Кембридж. Среди других наград Филипс получил в 1996 г. медаль Альберта А. Майкельсона от Института Франклина за экспериментальные демонстрации лазерного охлаждения и пленения.

Атомы, плавающие в оптической палочке

При комнатной температуре атомы и молекулы, из которых состоит воздух, двигаются в различных направлениях со скоростью около 4000 км/час. Такие атомы и молекулы трудно изучать, потому что они слишком быстро исчезают из области наблюдения. Понижая температуру, можно уменьшить скорость, однако проблема состоит в том, что при охлаждении газы обычно вначале конденсируются в жидкость, а затем вымораживаются в твердое состояние. В жидкостях и в твердых телах исследование становится более трудным, так как одиночные атомы и молекулы оказываются слишком близко друг к другу. Если, однако, процесс происходит в вакууме, плотность может поддерживаться достаточно низкой, чтобы избежать конденсации и вымораживания. Но даже температура -270°C соответствует скоростям порядка 400 км/час. Только приближение к абсолютному нулю (-273°C) приводит к значительному уменьшению скоростей. Когда температура составляет одну миллионную градуса относительно этой точки, т.е. 1 мкК, свободные атомы водорода, например, движутся со скоростями менее 1 км/час ($= 25$ см/с).

Стивен Чу, Клод Коэн-Тануджи и Уильям Д. Филипс развили методы, позволяющие с помощью лазерного света охлаждать газы до температур порядка микрокельвина и удерживать холодные атомы, плавающие или захваченные в различного рода "атомных ловушках". Лазерный свет действует как вязкая жидкость, так называемая оптическая палочка, в которой атомы замедляются. Так можно с очень высокой точностью изучать отдельные атомы и определять их внутреннюю структуру. По мере того, как в одном и том же объеме захватывается все больше и больше атомов, образуется разреженный газ, и его свойства могут быть детально изучены. Новые методы исследования, развитые нобелевскими лауреатами, вносят большой вклад в наши знания о взаимодействиях между излучением и веществом. В частности, они открыли путь к более глубокому пониманию квантово-физического поведения газов при низких температурах. Эти методы могут привести к созданию более точных атомных часов, которые используются, например, в космической навигации и для точного определения местоположения. Эти исследования также положили начало созданию атомных интерферометров, с помощью которых, например, могут быть выполнены очень точные измерения гравитационных сил, и созданию атомных лазеров, которые могут использоваться в будущем при изготовлении очень малых электронных компонентов.

Замедление атомов фотонами

Свет можно описать как поток частиц — фотонов. У фотонов нет массы в обычном понимании, но подобно хоккейной шайбе, скользящей по льду, они обладают определенным импульсом. Шайба, сталкиваясь с другой шайбой, может передать ей весь свой импульс (масса, умноженная на скорость) и остановиться. Аналогично, фотон, который сталкивается с атомом, может передать этому атому весь свой импульс. Чтобы это произошло, фотон должен иметь подходящую энергию, или, что то же самое, свет должен иметь "правильную" частоту, т.е. цвет. Это можно объяснить так: энергия фотона пропорциональна частоте света, которая, в свою очередь, определяет его цвет. Так, красный свет состоит из фотонов с меньшей энергией, чем те, из которых состоит синий.

Энергия, обладая которой фотон может воздействовать на атом, определяется внутренней структурой (энергетическими уровнями) атома. Если атом движется, условия изменяются из-за так называемого эффекта Доплера — это тот самый эффект, который делает гудок поезда выше, когда поезд приближается, чем, когда поезд стоит. Если атом движется навстречу свету, то, чтобы быть "услышанным" атомом, свет должен иметь более низкую частоту, чем в случае неподвижного атома. Допустим, что атом движется со значительной скоростью навстречу свету и испытывает удары потока фотонов. Если фотоны имеют "правильную" энергию, атом может поглотить один из них и забрать его энергию и импульс. Тогда атом несколько замедлится. Через очень непродолжительное время, обычно около стомиллионной доли секунды, замедленный атом излучит фотон. Теперь он может немедленно поглотить новый фотон из встречного потока. Излученный фотон также имеет импульс, который придает атому некоторую небольшую скорость отдачи. Однако направление отдачи меняется хаотически, так что после многих поглощений и излучений скорость атома значительно уменьшается. Чтобы замедлить атом, нужен интенсивный пучок лазерного света. При правильно подобранных условиях воздействие на атомы оказывается настолько мощным, что его можно сравнить с силой, действующей на мяч, подброшенный вверх от поверхности планеты, где сила тяжести в сто тысяч раз больше, чем на Земле.

Доплеровское охлаждение и оптическая патока

Эффект замедления, описанный выше, дает основу для мощного метода охлаждения атомов лазерным светом. Этот метод был разработан около 1985 г. **Стивеном Чу** и его сотрудниками в Bell Labs в Холмделе, Нью Джерси. Они использовали шесть лазерных пучков, разбитых на пары встречных пучков и расположенных в трех направлениях, перпендикулярных друг другу. Атомы натрия из пучка в вакууме были вначале остановлены встречным лазерным пучком и затем введены в область пересечения шести охлаждающих лазерных пучков. Свет всех шести лазерных пучков был слегка отстроен в красную сторону по сравнению с характеристическим светом, поглощаемым неподвижными атомами натрия. Это привело к тому, что в каком бы направлении ни двигались атомы натрия, их встречали фотоны с правильной энергией и толкали обратно в область, где пересекались шесть лазерных пучков. В этой области формировалось видимое невооруженным глазом ярко светящееся облако размером с горошину, содержащее около миллиона холодных атомов. Такой способ охлаждения был назван доплеровским охлаждением.

В области пересечения лазерных пучков атомы двигаются, как в вязкой жидкости, и эту область назвали оптической патокой. Чтобы определить температуру атомов, охлажденных в оптической патоке, лазеры выключались. Было установлено, что температура составляет около 240 мК. Это соответствует скорости атомов натрия около 30 см/с и хорошо согласуется с теоретически вычисленной температурой — доплеровским пределом, который тогда рассматривался, как наименьшая температура, достижимая при доплеровском охлаждении.

В описанном эксперименте атомы охлаждались, но не пленялись. Сила тяжести заставляла их выпадать из оптической патоки приблизительно за одну секунду. Чтобы действительно пленить атомы, нужна очень эффективная ловушка, и такая ловушка была сконструирована в 1987 г. Ее назвали магнитооптической ловушкой (МОЛ). В ней используется шесть лазерных пучков, расположенных так же, как в эксперименте, описанном выше, и, кроме того, две магнитные катушки, которые создают плавно меняющееся магнитное поле, имеющее минимум в области пересечения пучков. Поскольку магнитное поле влияет на энергетические уровни атома (эффект Зеемана), возникает сила, которая превышает силу тяжести и поэтому затягивает атомы в середину ловушки. Теперь атомы действительно пойманы и их можно изучать или использовать для экспериментов.

Доплеровский предел преодолен

Магнитные поля применялись уже в начале 1980-х годов **Уильямом Д. Филиппсом** и его сотрудниками в методе замедления и полной остановки атомов в медленных атомных пучках. Филипс разработал так называемый зеемановский замедлитель — катушку с меняющимся магнитным полем, вдоль оси которой атомы могли тормозиться встречным лазерным пучком. С помощью этого устройства Филипс в 1985 г. остановил и захватил атомы натрия в чисто магнитную ловушку. Однако силы удержания в такой ловушке относительно малы, поэтому атомы в ней должны быть чрезвычайно холодными, чтобы оставаться внутри. Когда Чу сумел охладить атомы в оптической патоке, Филипс придумал похожий эксперимент и начал систематическое исследование температуры атомов в патоке. Он разработал несколько новых методов измерения температуры, включая метод, в котором атомы получают возможность падать под действием силы тяжести, и траектория их падения определяется с помощью измерительного лазера.

В 1988 г. Филипс обнаружил, что можно достичь температуры в 40 мК. Эта величина в шесть раз ниже, чем теоретически вычисленный доплеровский предел! Оказалось, что доплеровский предел вычислялся в упрощенной модели атома, которая до тех пор рассматривалась, как достаточно реалистичная. Однако **Клод Коэн-Тануджи** и его сотрудники в Ecole Normale Supérieure в Париже уже проводили теоретические исследования более сложных схем охлаждения. Объяснение результатов Филипса заключается в структуре самого нижнего энергетического уровня

атома натрия. То, что происходит, напоминает миф о Сизифе, который без конца вкатывал камень в гору, с той разницей, что в данном случае, добравшись до вершины, он обнаружил бы за ней новый подъем. Из-за этого сходства процесс был назван сизифовым охлаждением.

Скорость отдачи, которую атом получает, излучая один фотон, соответствует температуре, называемой пределом отдачи. Для атома натрия предел отдачи равен 2,4 мкК, а для несколько более тяжелого атома цезия он составляет около 0,2 мкК. Совместно с Коэном-Тануджи и его парижскими коллегами Филипс показал, что атомы цезия могут быть охлаждены в оптической палочке до температуры, примерно в десять раз превышающей предел отдачи, т.е. приблизительно до 2 мкК. Сначала казалось, что в оптической палочке в общем случае можно достичь температур примерно в десять раз выше предела отдачи. В более поздних работах и Филипс, и парижская группа показали, что при соответствующей настройке лазера можно пленять атомы так, что они группируются регулярным образом в определенных точках пространства, образующих так называемую оптическую решетку. Атомы, группирующиеся в оптической решетке, оказываются удаленными друг от друга на расстояние, равное длине волны света. В оптической решетке атомы, как было показано, могут быть охлаждены до температуры, превышающей предел отдачи в пять раз.

Предел отдачи также преодолен

Причина, по которой скорость отдачи, получаемая атомом при излучении одного фотона, устанавливает предел и для доплеровского, и для сизифова охлаждения, заключается в том, что даже самый медленный атом постоянно вынужден поглощать и излучать фотоны. В этих процессах атому сообщается небольшая, но не пренебрежимая скорость, и поэтому газ атомов имеет конечную температуру. Если бы наиболее медленные атомы не взаимодействовали с фотонами в оптической палочке, возможно, удалось бы достичь более низких температур. Один механизм, благодаря которому неподвижный атом может быть переведен в "темное" состояние, в котором он не поглощает фотоны, был известен. Но совместить этот метод с лазерным охлаждением было трудно.

Клод Коэн-Тануджи и его группа между 1988 и 1995 гг. разработали метод, основанный на использовании эффекта Доплера, переводящий наиболее медленные атомы в темное состояние. Он и его коллеги показали, что метод применим в одномерном, двухмерном и в трехмерном вариантах. Во всех экспериментах они использовали атомы гелия, для которых предел отдачи составляет 4 мкК. В первом эксперименте использовалось два встречных пучка и было достигнуто одномерное распределение по скоростям, которое соответствовало температуре, равной половине предела отдачи. С четырьмя лазерными пучками было реализовано двумерное распределение по скоростям, соответствующее температуре 0,25 мкК, в шестнадцать раз ниже предела отдачи. Наконец, с шестью лазерными пучками было достигнуто состояние, в котором полное распределение по скоростям соответствовало температуре 0,18 мкК. В этих условиях атомы гелия медленно передвигались со скоростью всего около 2 см/с!

Практические применения уже на пороге

Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов находится в стадии интенсивного развития. Помимо других достижений, Чу сконструировал атомные фонтанные часы, в которых охлажденные лазером атомы выбрасываются из ловушки вверх, как струя воды. Когда атомы оказываются в верхней точке своей траектории и начинают падать, они почти неподвижны. Затем они подвергаются воздействию микроволновых импульсов, прощупывающих их внутреннюю структуру. Ожидается, что эта методика позволит создать атомные часы, точность которых будет в сотни раз выше, чем у существующих. Методы, отмеченные в этом году премией, создали также основу для открытия бозе-эйнштейновской конденсации в атомных газах — явления, привлекающего большой интерес.

Для дополнительного чтения

1. *Additional background material on the Nobel Prize in Physics 1997* (The Royal Swedish Academy of Sciences)
2. Phillips W D, Metcalf H J "Cooling and Trapping Atoms" *Scientific American*, March 1987, p. 36
3. Cohen-Tannoudji C N, Phillips W D "New Mechanisms for Laser Cooling" *Physics Today*, October 1990, p. 33
4. Chu S "Laser Trapping of Neutral Particles" *Scientific American*, February 1992, p. 71
5. Lubkin G B "Experimenters Cool Helium below Single-Photon Recoil Limit in Three Dimensions" *Physics Today*, January 1996, p. 22

Информация Нобелевского комитета