



Когерентные волны материи

Нас окружают предметы определенных размеров; мы точно знаем, где кончается наше тело, и уверены, что на одном стуле комфортно сидеть только одному. Однако в мире очень маленьких вещей, или в микроквантовом мире, все не так прозаично: стул и стол, уменьшенные примерно в десять миллиардов раз, до размеров атомов, потеряют свои четкие границы и даже могут занять одно место в пространстве, ничуть не мешая друг другу. Причина в том, что объекты квантового мира больше похожи на волны, проникающие друг в друга, чем на ограниченные в пространстве предметы. Поэтому в микроквантовом мире можно сидеть на одном стуле и втроем, и вдесятером.

Вещи как волны

Чтобы волновые свойства можно было почувствовать экспериментально, объекты нужно сделать не только маленькими, но и очень холодными, то есть с сильно пониженной скоростью хаотического движения атомов. Так, атомы требуется охладить до миллиардной доли градуса Кельвина, а волновые свойства стола и стула из макромира должны быть заметны при немислимо маленьких температурах — холоднее, чем 10^{-40}K .

Примечательное свойство волн — их способность когерентно складываться. Когерентно — значит согласованно, упорядоченно во времени или в пространстве. Пример когерентных во времени звуковых волн — музыка. Каждый звук мелодии, его высота, продолжительность и сила находятся в строго определенном соответствии друг с другом.

Дирижер симфонического оркестра пристально следит за когерентностью звукового потока из сотен, а то и тысяч звуков. Ослабление когерентности мы воспримем как фальшивое звучание, а ее полную потерю — как шум. Собственно, когерентность и отличает мелодию от бессвязного набора звуков. Точно так же и в квантовом мире когерентность волновых свойств объектов способна придать им совершенно новые качества, которые не только очень необычны, но и важны для создания новых материалов, способных радикально изменить существующие технологии. Не случайно почти половина Нобелевских премий по физике, присужденных за последние десять лет, связана с когерентными явлениями: в лазерном излучении



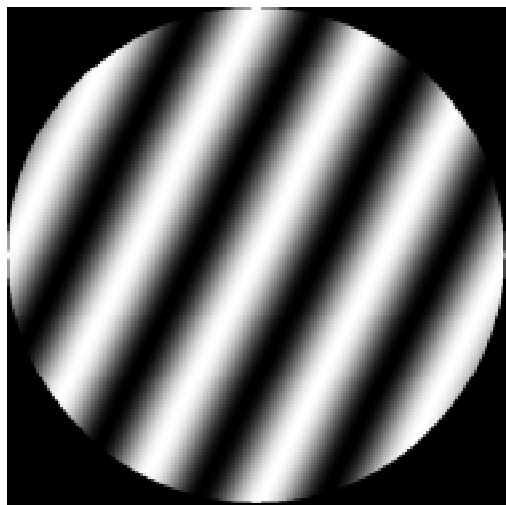
(2005), в холодных атомах (1997, 2001), в жидком гелии (1996) и в сверхпроводниках (2003).

Большинство отечественных нобелевских лауреатов по физике получило свои премии за когерентные явления: Петр Капица (1978), Лев Ландау (1962), Николай Басов и Александр Прохоров (1964), Алексей Абрикосов и Виталий Гинзбург (2003).

Когерентность света

Понятие когерентности сформировалось в начале XIX века после опытов английского ученого Томаса Юнга. В них две световые волны от разных источников падали на экран и складывались. Свет от двух обычных лампочек, которые дают некогерентное излучение, складывается просто: освещенность экрана равна сумме освещенностей от каждой лампы. Механизм тут такой. У световых волн от лампочек разность фаз хаотически меняется с течением времени. Если в одну точку экрана сейчас пришли два максимума волны, то в следующий момент от одной лампы может прийти минимум, а от другой — максимум. Результат сложения волн даст «рябь на воде» — неустойчивую интерференционную картину. Рябь световых волн столь быстра, что глаза не успевают за ней и видят равномерно освещенный экран. По аналогии из мира звуков — это шум.

Результат будет совсем другим, если на экране складываются две когерентные волны (рис. 1). Такие волны проще всего получить из одного лазерного пучка, расщепив его на две части, а потом их сложив. Тогда на экране возникнут полосы. Яркие — это области экрана, куда максимумы световых волн всегда приходят одновременно (в фазе). Замечательный оптический эффект состоит в том, что освещенность возрастет не в два раза,

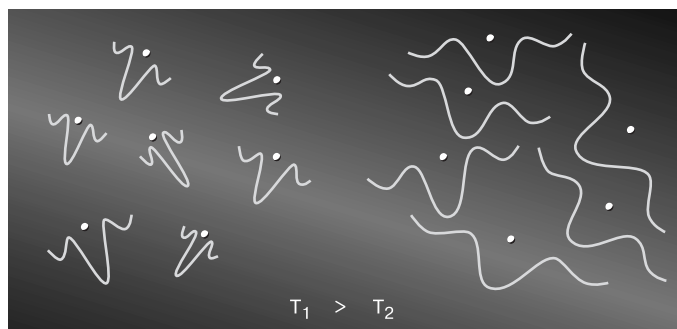


Интерферограма лаб. адаптивной оптики Шатурского отд. Московского государственного открытого университета

1
При освещении экрана двумя пучками лазера возникает интерференционная картина из чередующихся ярких и тусклых полос

как в случае некогерентных волн, а в четыре. Это происходит потому, что в яркой полосе все время складываются максимумы волн, то есть их амплитуды, а освещенность пропорциональна квадрату суммы амплитуд волн. В тусклых полосах когерентные волны от разных источников гасят друг друга.

Теперь представим себе много когерентных волн, проходящих в некоторую точку в фазе. Например, тысячу волн. Тогда освещенность яркой области вырастет в миллион раз! Когерентное излучение огромного, около 10^{22} , числа атомов дает луч лазера. Изобретение принципов его работы принесло в 1964 году Нобелевскую



2
Каждую частицу (атом, молекулу) можно представить в виде волны де Бройля — волнового пакета, центр которого соответствует центру частицы. По мере охлаждения, то есть снижения скорости хаотического движения частицы, длина волны растет и волновые пакеты частиц в конце концов перекрываются

премию по физике американцу Чарльзу Таунсу и двум советским физикам Николаю Басову и Александру Прохорову. За 40 лет лазер проник в нашу повседневную жизнь, с его помощью мы, например, сохраняем информацию на компактных дисках и передаем ее по оптическому волокну на огромные расстояния.

Когерентные волны материи

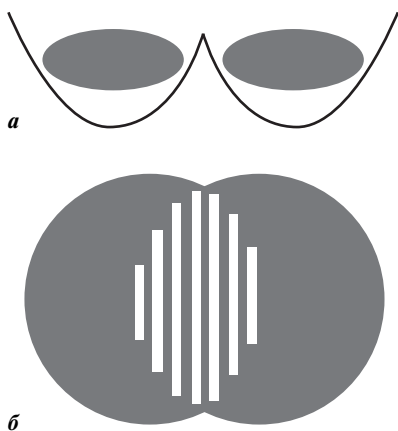
Наш мир устроен таким образом, что каждая частица вещества может проявлять свойства волны. Такие волны называют волнами материи, или волнами де Бройля. Замечательный французский физик Луи де Бройль в 1923 году предложил очень простую формулу, связывающую длину волны λ (расстояние между максимумами) с массой частицы m и ее скоростью v : $\lambda = h/mv$, где h — постоянная Планка.

Фундаментальное свойство волн любой природы — способность интерферировать. Однако чтобы в результате получить не равномерный шум, а, как и в случае со светом, яркую полосу, нужно обеспечить когерентность волн де Бройля. Этому мешает тепловое движение — атомы с разными скоростями различаются своими длинами волн. При охлаждении атомов, согласно формуле де Бройля, растет длина волны λ (рис. 2). И как только

ее значение превысит расстояние между частицами, волны де Бройля разных частиц дадут устойчивую интерференционную картину, так как максимумы волн, отвечающие положению частиц, будут перекрываться.

В оптический микроскоп интерференционную картину волн де Бройля можно увидеть, если их длины будут около 1 мкм. Для этого, как следует из формулы де Бройля, скорость атома должна быть примерно 1 см/с, что соответствует чрезвычайно низким температурам — менее одного микрокельвина. Такой охлажденный газ из атомов щелочных металлов удалось приготовить, и сегодня это интереснейший объект исследований. (Как охладить атомы до низких температур и сделать на их основе сверхточные часы, было рассказано в «Химии и жизни», 2001, № 10. — *Примеч. ред.*) Отметим, что советские физики из Института спектроскопии АН СССР во главе с Владиленом Летоховым в 1979 году выдвинули и реализовали ключевые идеи, на основе которых сейчас охлаждаются атомы до сверхнизких температур.

Что представляют собой интерферирующие частицы вещества? Мы привыкли, что вещество можно представить в виде твердых маленьких шариков, которые не проникают друг в друга. А волны, напротив, могут складываться и проникать друг в друга. По аналогии с интерференцией света мы должны получить «яркую точку на экране» — малую область в пространстве, где максимумы волн материи складываются в фазе. Неожиданно то, что когерентные волны многих и многих атомов могут занять одну область в пространстве, образуя как бы сверхатом — набор огромного числа волн де Бройля. На языке квантовой механики это означает, что вероятность обнаружить когерентные атомы в «яркой точке» максимальна. Это удивительное состояние вещества называют конденсатом Бозе—Эйнштейна. Альберт Эйнштейн предсказал его в 1925 году на основании работ индийского физика Шатъендраната Бозе. В конденсате все атомы находятся в одном квантовом состоянии и ведут себя как одна большая волна.



3
Иллюстрация интерференции двух атомных конденсатов: а — два конденсата в отдельных ловушках; б — после отключения ловушек конденсаты расширяются, перекрываясь друг с другом. В области их перекрытия возникает интерференционная картина

Экспериментально наблюдать бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК) удалось только спустя 70 лет: сообщение об этом в 1995 году опубликовали две группы американских ученых. В их экспериментах в конденсат выпадали атомы из облачка паров натрия или рубидия, запертого в магнитную ловушку. Эти пионерские работы были удостоены Нобелевской премии по физике 2001 года, присужденной Эрику Корнеллу, Вольфгангу Кеттерле и Карлу Вьеману. Яркое образное представление поведения сверххолодных атомов, выпадающих в БЭК, было показано на обложке декабрьского журнала «Science» за

1995 год: в центре марширует группа одинаковых синих киборгов — это атомы БЭК с нулевой температурой, а вокруг них хаотично двигаются киборги более теплых цветов — надкондесатные чуть-чуть разогретые атомы. Когерентность атомов, выпавших в БЭК, была продемонстрирована в блестящем эксперименте 1997 года В.Кеттерле с коллегами из Массачусетского технологического института. Для этого магнитную ловушку разделили на две части перегородкой из света (рис. 2а). Из облачков атомов натрия приготовили два конденсата, а затем ловушку и перегородку отключили: облачка стали расширяться и перекрываться. В месте их перекрытия возникала четкая интерференционная картина (рис. 2б), подобная интерференции когерентных лазерных пучков (см. рис. 1). Ее наблюдали по тени, отбрасываемой облачком атомов на экран, — «зебра» на рис. 2б и есть тень интерферирующих волн материи; темные области соответствуют максимумам волн атомов. Удивительно, что когда мы складываем атомы из разных конденсатов, то их сумма может дать ноль — «вещество исчезает» в области, отвечающей светлой полосе «зебры». Разумеется, на самом деле атомы не исчезают — они просто концентрируются в областях, отбрасывающих тень.

Можно ли наблюдать проявление волновых свойств для более массивных объектов, чем атомы? Оказывается, можно. Группе Антона Цайлингера из Вены в 2003 году удалось наблюдать интерференцию фуллеренов и биомолекул, содержащих около ста атомов. Для скольких больших частиц вещества удастся наблюдать волновые свойства — вопрос на сегодня открытый.

Атомный лазер

С точки зрения квантовой физики атомы и фотоны похожи тем, что большое число этих частиц может одновременно находиться в одном квантовом состоянии, то есть быть когерентными. Например, в лазерном излучении все фотоны когерентны: у них одинаковый цвет, направление распространения и поляризация. Поэтому возможно получить мощные когерентные лазерные пучки, состоящие из огромного числа фотонов в одном состоянии.

А как получить когерентные атомные пучки? Идея проста: надо аккуратно вывести запертые в ловушку когерентные атомы из БЭК, подобно тому, как излучение лазера выводится из его резонатора с помощью полупрозрачного зеркала. Такое устройство назвали атомным лазером. Первый атомный лазер в 1997 году создал все тот же В.Кеттерле. В таком лазере магнитная ловушка из двух катушек удерживает атомы натрия, образующие БЭК. Импульсы радиополя, прикладываемые с периодом 5 миллисекунд, разворачивают спины атомов, и они не могут больше удерживаться в ловушке. Сгусток освободившихся атомов — излучение атомного лазера — свободно падает под действием гравитации, что визуализируют с помощью приемов театра теней, описанных выше. Сегодня мощность атомных лазеров невелика: они излучают 10^6 атомов в секунду, что несравненно меньше мощности оптических лазеров. Так, например, обычный лазер-указка излучает за одну секунду примерно в 10^9 раз больше фотонов.

В отличие от невесомых фотонов, атомы обладают массой покоя. А значит, тяготение гораздо сильнее действует на них — интерференция когерентных волн материи будет сильно зависеть от гравитационного поля, отклоняющего пучки атомов. Пусть два когерентных атомных пучка интерферируют в области их пересечения аналогично лазерным пучкам (см. рис. 1). Предположим, что



гравитационное поле на пути одного из атомных пучков изменилось. Тогда длина пути этого пучка до встречи с другим пучком также изменится. В результате максимумы волн материи двух атомных пучков встретятся в другом месте, что приведет к смещению интерференционной картины. Измеряя такое смещение, можно определить изменение гравитационного поля. На основе этой идеи уже созданы датчики гравитационного поля, способные обнаружить разницу в величине ускорения свободного падения менее $10^{-6}\%$. Они могут пригодиться как для фундаментальных исследований (проверка физических теорий, измерение констант), так и для важных прикладных разработок в навигации (создание прецизионных гироскопов), геологии (зондированием полезных ископаемых) и для других наук. У писателей-фантастов, например, можно найти сюжет, когда с помощью прибора для измерения малейших изменений силы тяжести археологи читают надписи, выбитые на погребенных в толще земли обелисках.

Когерентное вещество

Особенно интересные эффекты возникают, когда свойства когерентных волн материи удается наблюдать как макроскопические свойства конденсированного вещества, то есть твердого тела или жидкости. Один из ярких примеров таких свойств — сверхтекучесть в жидком гелии при охлаждении ниже 2,2К. Советские физики выполнили пионерские исследования сверхтекучести: это явление открыл Петр Капица в 1938 году, а объяснил Лев Ландау. Сверхтекучий гелий может вытекать через маленькие отверстия с огромной скоростью: по крайней мере, в 108 раз быстрее воды. Если бы нам удалось наполнить обычную ванну сверхтекучим гелием, то он вытек бы из нее менее чем за одну секунду через дырочку размером с крохотное игольное ушко. В 2004 году американцы Юн Сён Ким и Мозес Чан сообщили об обнаружении сверхтекучести в твердом гелии. Их тонкий эксперимент состоял в следующем: твердый охлажденный гелий, находящийся под давлением при температуре около 0,2К, помещали на крутильный маятник. Если часть гелия переходит в сверхтекучее состояние, то частота крутильных колебаний должна вырастать, так как сверхтекучая компонента остается неподвижной, облегчая колебания маятника. По данным Кима и Чана, в сверхтекучее состояние переходило около 1% твердого гелия. Эти эксперименты демонстрируют, что атомы могут свободно перемещаться по сверхтекучему твердому телу, следовательно, оно способно пропускать массу вещества сквозь себя беспрепятственно: перспектива проходить сквозь стены в таком мире кажется вполне реальной!

Это удивительное явление могут объяснить волновые свойства атомов. Волны, в отличие от частиц, обходят препятствия на своем пути. Поясним это на примере интерференции двух пучков света на экране. Вырежем в

экране отверстия в области светлых полос «зебры» (интерференционной картины). Такое препятствие когерентный свет не почувствует: экран ведь сохранился только в неосвещенных частях «зебры». Если же пучки не когерентны, то равномерно освещенный экран с отверстиями неизбежно задержит часть света. Отсюда можно уяснить, как когерентные волны материи преодолевают препятствия без потерь.

Еще одно необычное макроскопическое квантовое явление, аналогичное сверхтекучести, — сверхпроводимость, открытая голландцем Хейке Камерлинг-Оннесом в 1911 году в ртути при ее охлаждении до температуры жидкого гелия (Нобелевская премия 1913 года). Сверхпроводящие электроны двигаются без сопротивления, обходя препятствия, в роли которых выступает тепловое движение атомов. Например, ток в кольце из сверхпроводника может течь неограниченно долго, поскольку ему ничто не мешает. Можно сказать, что сверхпроводимость есть сверхтекучесть электронной жидкости. Для такой сверхтекучести нужно, чтобы большое число зарядов находилось в одном квантовом состоянии, как, например, фотоны в лазерном пучке. Это требование наталкивается на ограничение, установленное выдающимся швейцарским физиком Вольфгангом Паули в 1924 году: если спиновое число частицы равно 1/2, как у электрона, то в одном квантовом состоянии может находиться лишь одна частица. Такие частицы называют фермионами. При целом значении спина в одном квантовом состоянии можно сконденсировать сколь угодно большое число частиц. Такие частицы называют бозонами. Поэтому для сверхпроводящего тока нужны частицы электрического заряда с целым спином. Если бы пара электронов (фермионов) смогла сформировать составную частицу, то спин пары оказался бы целым числом. И тогда составные частицы станут бозонами, способными образовать БЭК и дать сверхпроводящий ток.

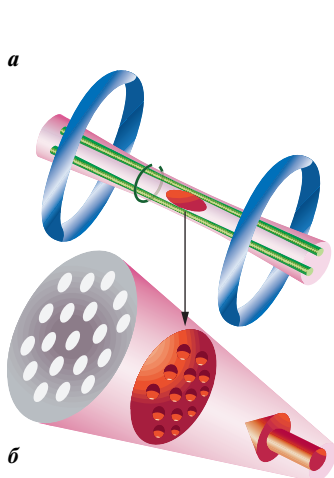
Однако связанные пары электронов действительно могут возникать в проводниках, несмотря на то что кулоновские силы отталкивают электроны друг от друга — эта идея легла в основу теории, объясняющей сверхпроводимость в простых металлах (Джон Бардин, Леон Купер, Джон Шриффер, Нобелевская премия по физике за 1972 год).

Сверхтекучесть БЭК

Итак, во второй половине XX века физики пришли к пониманию, что БЭК может обладать свойствами сверхтекучести. Естественно, что после получения газового БЭК ученых захватила идея об эксперименте, демонстрирующем в нем сверхтекучесть. В 2005 году группа В.Кеттерле представила окончательное доказательство сверхтекучести газового БЭК. Идея эксперимента основана на том, что сверхтекучая жидкость ведет себя при вращении необычно. Если бы нам удалось размешать сверхтекучую жидкость ложкой, будто кофе в чашке, то она



стала бы вращаться не целиком, а распалась бы на множество маленьких вихрей. Более того, они расположились бы в строгом порядке, образуя так называемую решетку вихрей Абрикосова. Схема этого филигранного эксперимента следующая (рис. 4). Газовый конденсат, захваченный лазерным пучком и магнитным полем, начинали вращать дополнительными лазерными пучками; они раскручивали конденсат, как ложечка — кофе. Затем ловушку, то есть пучки и катушку, отключали, и конденсат был предоставлен сам себе. Он расширился и давал тень, которая напоминала швейцарский сыр (рис. 4б). «Дырочки в сыре» отвечают сверхтекучим вихрям. Важнейшая особенность этих экспериментов состоит в том, что они проделаны не только в газе бозонов (атомов натрия), но и в газе фермионов (атомов лития). Сверхтекучесть в литиевом газе наблюдали только тогда, когда атомы лития образовывали молекулы или слабые пары. Это было первое наблюдение сверхтекучести



4
Наблюдение сверхтекучести в бозе-эйнштейновском атомном конденсате; а — конденсат (красный) захвачен лазерным пучком (розовый) и магнитными катушками (синие кольца). Два дополнительных лазерных пучка (зеленые), проходящие по краям конденсата, вращаются вокруг оси системы, увлекая конденсат за собой; б — после выключения ловушки конденсат расширяется, отбрасывая тень при освещении (красная стрелка)

газа фермионов. Оно подвело прочный экспериментальный фундамент под теорию сверхпроводимости, основанную на идее конденсации Бозе-Эйнштейна.

Спаривать атомы лития физикам удастся с помощью так называемого резонанса Фешбаха, который возникает в ловушке при одновременном действии полей магнитных катушек и лазерных пучков. Магнитное поле подстраивают в области резонанса Фешбаха так, что оно сильно изменяет силы взаимодействия между атомами газа. Можно заставить атомы притягиваться друг к другу или — отталкиваться. Физики придумали и другие способы управления свойствами сверххолодного атомного газа. Один из самых изящных — поместить атомы в интерферирующее поле лазерных пучков — своеобразную оптическую решетку. В ней каждый атом окажется в центре одной из полос интерференционной картины (см. рис. 1), так что волны света будут удерживать волны вещества, подобно форме для хранения яиц. Атомы в оптической

решетке служат отличной моделью кристалла, где с помощью параметров лазерных пучков меняют расстояние между атомами, а с помощью резонанса Фешбаха — регулируют взаимодействие между ними. В результате физики реализовали давнюю мечту — получать образец вещества с управляемыми параметрами. Ученые полагают, что сверххолодный газ — модель не только кристалла, но и более экзотических форм материи, таких, как нейтронные звезды и кварк-глюонная плазма ранней Вселенной. Поэтому некоторые исследователи не без основания полагают, что сверххолодный газ поможет понять ранние этапы эволюции Вселенной.

Когерентное будущее

Явления сверхтекучести и сверхпроводимости показывают, что когерентность волн де Бройля большого числа частиц дает неожиданные и важные свойства. Эти явления не были предсказаны, более того, на объяснение сверхпроводимости в простых металлах потребовалось почти 50 лет. А явление высокотемпературной сверхпроводимости, обнаруженное в 1986 году в металло-оксидных керамиках при 35 градусах Кельвина немцем Йоханесом Беднорцем и швейцарцем Карлом Мюллером (Нобелевская премия 1987 года), до сих пор не получило общепринятого объяснения, несмотря на огромные усилия физиков во всем мире.

Еще одна область исследований, в которой без когерентных квантовых состояний не обойтись, — квантовые компьютеры: только в таком состоянии есть возможность проводить высокопроизводительные квантовые вычисления, недоступные самым современным суперкомпьютерам.

Итак, когерентность означает сохранение разности фаз между складывающимися волнами. Сами волны могут быть различной природы: и световыми, и волнами де Бройля. На примере газового БЭК мы видим, что когерентное вещество фактически представляет собой новую форму материи, ранее недоступную человеку. Возникает вопрос: всегда ли наблюдение когерентных квантовых процессов в веществе требует очень низких температур? Не всегда. По крайней мере, есть один очень удачный пример — лазер. Окружающая температура для работы лазера обычно не существенна, так как лазер работает в условиях, далеких от теплового равновесия. Лазер — сильно неравновесная система, поскольку к нему подводится поток энергии.

По-видимому, мы находимся еще в самом начале исследований когерентных квантовых процессов с участием огромного числа частиц. Один из волнующих вопросов, на который пока нет определенного ответа, — встречаются ли макроскопические когерентные квантовые процессы в живой природе? Может быть, саму жизнь можно характеризовать как особое состояние вещества с повышенной когерентностью.

