

(В. В. Синюков, Н. И. Быстрова, Т. В. Богатова, О. Н. Зефирова, Е. А. Зайцева) за организацию этого мероприятия, а всех участников конференции — за плодотворную работу, подчеркнув при этом важность проведения подобных конференций и в будущем.

Д. А. БАЮК

## ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ 2001 г.

### Герои

10 декабря 2001 г. в Стокгольме были вручены очередные Нобелевские премии. Лауреатами по физике стали трое ученых, работающих в США: Эрик Корнелл (Eric A. Cornell), Вольфганг Кеттерле (Wolfgang Ketterle) и Карл Вимен (Carl E. Wieman). Повод для самой престижной научной премии на этот раз — достижение действительно экстраординарное: экспериментально получено новое состояние материи, так называемый конденсат Бозе—Эйнштейна. С тех пор, как увенчался успехом первый опыт, его смогли повторить в других научных институтах мира, и стали очевидны богатые перспективы применения конденсата в точных технологиях и для дальнейшего развития физики.

Премия этого года была присуждена всего через шесть лет после открытия, сделанного в июне 1995 г. исследовательской группой Объединенного института лабораторной астрофизики (JILA), которой руководят Корнелл и Вимен в городе Боулдер штата Колорадо. Собранный в коническую воронку сильно разреженный газ, содержащий примерно 2000 атомов рубидия, был охлажден до температуры, лишь на 20 миллиардных градуса отличающейся от абсолютного нуля. Конденсат, образование которого зафиксировала видеокамера, просуществовал 15 секунд. Через четыре месяца аналогичный опыт был независимо проведен в лаборатории Вольфганга Кеттерле Массачусетского технологического института (MIT) и тоже закончился успехом. По правилам Нобелевского комитета оба открытия были сочтены одновременными.

Карьера Эрика Корнелла выдает в нем вундеркинда: закончив с отличием в 1985 г. Стэнфордский университет, а затем и аспирантуру MIT, он в 1990 г. защитил свою диссертацию и стал профессором. В 1992 Карл Вимен пригласил его к себе в JILA стажером, однако очень скоро Корнелл стал соруководителем проекта. Его научные успехи быстро получили признание коллег. В 1996 г. ему была присуждена премия Фритца Лондона, в 1997, практически одновременно еще три премии: Рэбби, Кинга Файзела и Алана Уотермана; год спустя он получил медаль Лоренца от Нидерландской королевской академии наук и искусств и еще год спустя — медаль Бенджамена Франклина\*.

Карл Вимен (ему 52 года) проделал схожий путь, но в другое время и в иной последовательности: окончив в 1973 г. MIT, он защитил диссертацию в Стэнфордском университете в 1977; работать в JILA начал в 1985, а совмещать исследовательскую работу с преподаванием физики в университете штата Колорадо — с 1987 г.\*\* Наконец, третий лауреат, немец по происхождению, Вольфганг Кеттерле (44 года), в 1982 г. окончил Технической университет Мюнхена, защитил в 1986 г. диссертацию в университете

\* Подробности биографии Корнелла см. на его персональной странице <http://www.colorado.edu/NewsServices/nobel/cornell.html>

\*\* См. <http://www.colorado.edu/newsservices/nobel/wieman.html>

имени Людвиг-Максимилиана в том же городе, потом проработал четыре года в Институте квантовой оптики Общества Макса Планка (академия наук объединенной Германии) в Гаршинге, в полчаса езды от своей alma mater. Но настоящий успех ждал его за океаном, куда молодой физик перебрался в 1990 г. Он оказался в том же MIT, где уже готовился к защите Эрик Корнелл, и тут его послужной список значительно удлинился за счет аналогичных премий и наград, полученных за исследования в области низких температур, включивших также премию Рэбби (1997) и медаль Бенджамина Франклина (2000)\*.

### Евангелие от Планка

У физиков есть шутка: «В начале было слово, и слово было у Планка, и слово было квант». Практически все Нобелевские премии по физике, начиная с самой первой, врученной Вильгельму Рентгену 10 декабря 1901 г., спустя всего несколько месяцев после того, как Планк впервые произнес это магическое слово, так или иначе были связаны с ним. Не стала исключением и эта. Одно из главных следствий квантовых свойств материи заключается в том, что температура любого тела не может достичь абсолютного нуля, поскольку атомы не могут находиться в абсолютном покое\*\*. При приближении к нему теплоемкость тела возрастает, и для понижения температуры требуется отводить от него все больше и больше тепла. В каком-то смысле оно аналогично движению со световой скоростью. Для массивных частиц при приближении их скорости к световой им требуется все больше и больше энергии для одного и того же ускорения. Только при замораживании тела существенной оказывается не только скорость частиц, составляющих его, но и то, что называется их статистикой, т. е. то, с какой вероятностью эти частицы имеют ту или иную скорость.

Частицы идеального газа, изучавшегося физиками XIX в., представляли собой идеально упругие шарики, которые подчиняются законам Ньютоновой механики и не взаимодействуют друг с другом иначе как при столкновениях. Дж. Максвелл тогда показал, что после того, как достигается состояние равновесия, распределение компонент скоростей подчиняется закону Гаусса. Однако при понижении температуры частицы перестают подчиняться законам Ньютона, точнее, их нельзя считать не взаимодействующими, даже если никаких сил притяжения или отталкивания между ними нет. Но при низких температурах частицы становятся неразличимы. При этом существует две возможности: либо никакие две частицы не могут находиться в одном и том же состоянии, т. е. они не могут иметь одинаковые скорости (импульсы), либо, наоборот, частица с большей вероятностью имеет импульс, который имеет какая-то другая частица. Такого рода взаимодействие называется статистическим, и в первом случае оно отталкивает частицы, а во втором — притягивает их.

Индийский физик Шатъендрат Бозе, так, увы, никогда и не получивший Нобелевской премии, в 1924 г. предложил представить свет как идеальный газ, состоящий из частиц, которые движутся по законам квантовой и релятивистской механики. Он заметил, что кванты света, фотоны, относятся ко второму роду, и в его честь такие частицы получили название бозонов. Свою статью на эту тему он послал Эйнштейну, который сразу почувствовал, что имеет дело с одной из великих догадок. Именно статья Бозе подтолкнула

\* [http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/group\\_info/CV%20WK.pdf](http://cua.mit.edu/ketterle_group/group_info/CV%20WK.pdf)

\*\* Принцип относительности Гейзенберга запрещает одновременное измерение скорости и положение с произвольной точностью. Полный покой, т. е. нулевая скорость, означает, что скорость известна точно, и принцип Гейзенберга может быть удовлетворен, если только частица полностью делокализована. О ней, однако, известно, что она находится вблизи некоторого места в пространстве эта локализация и приводит к известной неопределенности в импульсе.

нула Эйнштейна к выводу, что статистическое притяжение бозонов может привести к явлению, схожему с конденсацией реального газа (такого, в котором между частицами действуют какие-то силы притяжения) в жидкость. Только конденсат образуется не в координатном пространстве, а в импульсном: жидкость конденсируется в какой-то ограниченной области резервуара, содержащего газ, тогда как бозевский газ конденсируется вблизи нулевой скорости, оставаясь равномерно распределенным в пространстве. Все частицы такого конденсата находятся в одном и том же состоянии — *практически неподвижны*. Они ведут себя как один большой квант, т. е. одна большая волна, в которой невозможно обнаружить внутреннюю структуру\*.

В теории свойства бозе-эйнштейновского конденсата изучены довольно хорошо. Более того, он был даже неоднократно получен и в эксперименте. В частности, именно он определяет необычные свойства сверхтекучей жидкости или сверхпроводника. Только тут конденсируются не сами атомы, а так называемые *квазичастицы*, образуемые, например, элементарными возбуждениями кристаллической решетки металла. Охлаждать же сами атомы до температур, при которых они способны «выпасть в осадок», долго не удавалось, хотя от такого состояния материи ожидалось самые непрогнозируемые свойства. Неслучайно его называли «священным Граалем».

### Поход за «священным Граалем»

Хотя образование бозе-эйнштейновского конденсата во многом похоже на превращение пара в воду или воды в лед, для его получения на практике необходимо соблюдение многих технических требований. Например, концентрация должна поддерживаться очень низкой, чтобы атомы не образовывали конденсата в обычном смысле слова. Но самой большой проблемой оставалось достижение температур, лишь на миллиардные доли градуса отличающихся от абсолютного нуля. Для того, чтобы сделать подходящий «холодильник», была предложена неожиданная идея: искусственно останавливать атомы, и тогда температура газа в целом будет падать. Как это ни странно, оказалось, что для этого можно воспользоваться лучом лазера, который, как известно, обычно применяется там, где нужно что-то нагреть. Первые успешные опыты по охлаждению газа в оптических ловушках были проведены в Москве в 1980 г. В. И. Балыкиным и В. С. Летоховым, а также Уильямом Филлипсом в США, за что в конце концов Филлипс, Стивен Чу и француз Клод Коэн-Таннуджи получили в 1997 г. Нобелевскую премию.

Идея этого метода проста: если лазер настроен на частоту, немного меньшую резонансной частоты атомов, то поглощать свет будут только те из них, которые движутся навстречу лучу. Из-за эффекта Доплера частота излучения будет казаться атомам немного более высокой, и поглощение вызовет своего рода отдачу в направлении, противоположном движению. Карл Вимен начал применять оптические ловушки в своей лаборатории в 1992 г., освещая газ с разных сторон множеством лазерных лучей. Только вместо обычно используемых дорогих лазеров он стал применять довольно обычные и дешевые — вроде тех, что используются в лазерных проигрывателях. Это позволило приобрести много таких лазеров и освещать образец с большого количества направлений: «У нас получилось что-то вроде ливня с градом, — объяснил Вимен на пресс-конференции, проведенной в университете штата Колорадо 9 октября 2001 г., в день присуждения им с Кор-

\* При понижении температуры растет дебройлевская длина волны. Когда она сравнивается с межатомными расстояниями, квантовый ансамбль можно описывать не статистической матрицей, а одной волновой функцией. Это означает, что волновые свойства, присущие всякому квантовому объекту, проявляются или даже определяют поведение конденсата на уровне не отдельных атомов, а всей системы в целом.

неллом премии. — В какую сторону ни беги, все равно град бьет в лицо. Приходится остановиться»\*.

Для избежания паразитной конденсации в обычном смысле слова нужно было выбрать «правильные» атомы, чтобы они слабо взаимодействовали друг с другом — такими оказались изотопы рубидия. Один из «неудачников», профессор Халет (Hulet) из университета имени Райса штата Техас (Rice University), выбрал литий и, начав раньше, добрался до «святого грааля» лишь к 1997 г., на два года отстав от конкурентов. Очень помогла группе Вимена и идея Корнелла «выдувать» наиболее быстрые атомы магнитным полем. Оставшиеся атомы при этом остывают, как остывает молоко в кружке, когда сдуваешь пар. Важно, однако, то, что нынешние нобелевские лауреаты не придумали каких-то существенно новых методов понижения температуры, а просто аккуратно и удачно скомбинировали уже известные.

### И встал свет

С новым состоянием вещества уже связаны первые шумные открытия в физике. В феврале 1999 г. группа физиков Гарвардского университета, руководимая Леной Вестергард Хау, объявила, что с помощью конденсата им удалось значительно затормозить свет: вместо обычных 300 тысяч километров в секунду в вакууме, в их опыте в конденсате свет распространялся со скоростью всего в 60 километров в час\*\*. В январе 2001 г. им и одновременно их конкурентам из Смитсоновского астрофизического центра в том же Бостоне под руководством Рональда Уолсуорта и Михаила Лукина и вовсе удалось довести свет до полной остановки, как они говорят. Разумеется, это всего лишь некоторая метафора: ни затормозить свет, ни остановить его невозможно. Превратившись в одну большую волну, рубидиевый пар смог взаимодействовать с другой большой волной, а именно лучом света так, как этом обычно делают волны — например, два луча лазера или просто волны на поверхности воды. Возникает известное в физике явление интерференции. Суммарная волна может гаснуть, в пучке может снижаться скорость переноса энергии, возможно и такое, что энергия и вовсе не будет переноситься — волна будет стоячей. В экспериментах русско-голландско-американских физиков, наблюдалось следующее: конденсированный рубидиевый пар освещался двумя лучами лазера, расположенными под углом друг к другу. Когда один лазер погасили, постепенно стал слабеть и другой луч, хотя источник продолжал освещать конденсат, и в конце концов тоже погас полностью. Но когда первый источник снова включился, свет от второго опять стал беспрепятственно проходить сквозь конденсат.

Среди многочисленных возможных приложений самым многообещающим представляется то, что получило название «атомного лазера». Бозе-эйнштейновский конденсат здесь вытягивается в длинную нитку, подобную лучу. Впрочем, она и есть луч, поскольку сам конденсат «забывает» о том, что он был отдельными атомами и превращается в одну большую волну. Создание атомного лазера — одно из главных направлений деятельности группы Кеттерле в MIT. Коллега Кеттерле по университету имени Людвига-Максимилиана Иммануил Блох пытается использовать атомный лазер для «атомного микроскопа»\*\*\*. По своим свойствам и разрешающей способности он должен быть близок электронному, но электронный луч слишком горяч и часто неприме-

\* Стенограмму пресс-конференции см. [http://www.nist.gov/public\\_affairs/releases/transcript.htm](http://www.nist.gov/public_affairs/releases/transcript.htm)

\*\* Полный текст статьи Лены Вестергард Хау «Frozen Light», опубликованной в 2001 г. в *Scientific American*, доступен в Интернете <http://www.sciam.com/2001/0701issue/0701hau.html>

\*\*\* Более подробную информацию о работах группы Блоха см. [http://www.mpg.de/~hansch/bec/html/body\\_home\\_page.html](http://www.mpg.de/~hansch/bec/html/body_home_page.html)

---

ним для исследования деликатных тканей. Атомный — гораздо мягче, и, как ожидают, сможет проникать даже внутрь живой ткани, не разрушая ее.

Впрочем, бозе-эйнштейновский конденсат может быть микроскопом не только в прямом, но и в переносном смысле: «Это замечательная система для основательного изучения тех чудных законов квантовой физики, которые обычно определяют поведение системы на субмикроскопическом уровне, — объясняет Вимен. — А мы довели их до почти человеческого масштаба. Мы можем пойти и потыкать, поворошить эту штуку так, как никому до нас не удавалось. Мы добрались до фундамента квантовой физики». Корнелл добавляет: «Бозе-эйнштейновский конденсат, который мы получили, — как квантовое увеличительное стекло: эффекты квантовой механики здесь так увеличиваются, что просто лезут в глаза».