

В бозе-эйнштейновском конденсате создали звуковую черную дыру

30.07.09 | [Физика](#), [Юрий Ерин](#)

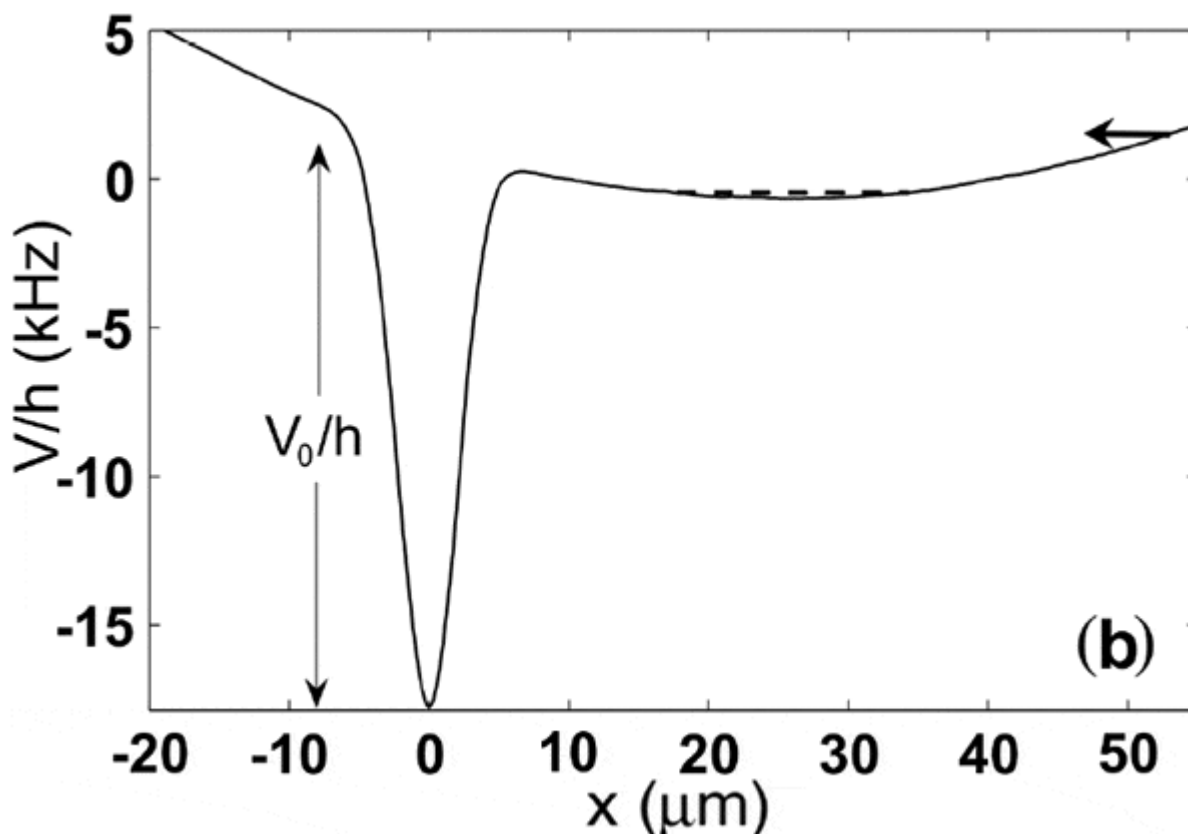


Рис. 1. Схематический рисунок механизма инверсии плотности конденсата. Бозе-эйнштейновский конденсат атомов рубидия течет в направлении, указанном стрелкой, с некоторой скоростью, которая меньше скорости звука в данном веществе. Попадая в энергетический провал, конденсат разгоняется до сверхзвуковой скорости, проходит дно ямы и выходит из нее с дозвуковой скоростью, далее двигаясь со скоростью, которую имел конденсат до того как «провалился» в яму. Согласно закону сохранения массы, плотность конденсата на верхнем энергетическом уровне больше плотности конденсата в яме. Глубина ямы V измеряется в единицах отношения энергии и постоянной Планка \hbar , то есть в единицах частоты. Рис. из обсуждаемой статьи в Архиве

Израильским ученым из Технологического института Хайфы впервые удалось в бозе-эйнштейновском конденсате атомов рубидия создать аналог гравитационной черной дыры — акустическую черную дыру. У этой дыры, также как и у настоящей черной дыры, существует горизонт событий, в пределах которого звуковые колебания не могут ее покинуть. По мнению ученых, создавая звуковые колебания вблизи горизонта событий такого объекта, можно будет зарегистрировать звуковое излучение со своим тепловым спектром, аналогичное излучению Хокинга гравитационной черной дыры. Если ученым в будущем удастся экспериментально зафиксировать такое акустическое излучение от конденсата, то это будет косвенным доказательством реальности существования излучения Хокинга.

Что такое бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК)?

Явление бозе-эйнштейновской конденсации возникает, когда [длина волны де Бройля](#) (отношение постоянной Планка к импульсу частицы) бозонов, то есть частиц с целым значением спина, и

характерное расстояние между ними становятся приблизительно одного порядка. Достигается это при определенной температуре, которую называют критической и которая зависит от концентрации газа и массы образующих его атомов. По достижении критической температуры бозоны резко «падают» или, как еще говорят, конденсируются в состояние с самым низким из допустимых квантовой механикой значением энергии (см. Java-приложение [“Bose-Einstein condensation”](#)), при этом критическая температура конденсации атомарного газа очень близка к абсолютному нулю. Например, в эксперименте [Эрика Корнелла](#) и [Карла Вимана](#) 1995 года (в 2001 году за эти исследования ученым была присуждена Нобелевская премия), когда впервые был получен бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК) из атомов рубидия ^{87}Rb , температура составляла около 170 нанокельвинов (нК).

БЭК как мини-лаборатория для изучения астрофизических явлений на Земле

Среди многообразия последовавших за открытием бозе-эйнштейновской конденсации экспериментальных и теоретических работ стоит упомянуть о ряде публикаций, в которых утверждалось, что благодаря своим необычным свойствам БЭК может оказаться прекрасной лабораторной моделью для изучения некоторых актуальных и неясных до сих пор астрофизических явлений, таких как вспышки сверхновых звезд или испарение черных дыр. Конечно же, здесь речь идет не о создании с помощью БЭК точной копии черной дыры или вспышки сверхновой в микромасштабе, а лишь о параллели между этими двумя явлениями. Важно то, что с математической точки зрения подходы к описанию данных явлений оказываются очень похожими. А раз теория почти одинаковая, то и экспериментальные результаты должны быть качественно близкими. И то, что астрономы пытаются увидеть в глубинах космоса, — излучение черной дыры, вспышку сверхновой звезды — можно рассмотреть на Земле с помощью БЭК.

Так, в 2001 году в журнале *Nature* была опубликована статья американских ученых [“Dynamics of collapsing and exploding Bose-Einstein condensates”](#) о сжатии и последующем взрыве БЭК-атомов рубидия ^{85}Rb (см. также новость [Коллапс и взрыв бозе-эйнштейновского конденсата](#)). Впоследствии такое явление получило название бозе-нова — по зрительной аналогии со сверхновыми звездами. А летом прошлого года в Архиве препринтов появилась любопытная статья ученых из ЦЕРНа [“There is no explosion risk associated with superfluid Helium in the LHC cooling system”](#), которая опровергала утверждения о возможности «вспышки» бозе-новы в сверхтекучем гелии, используемом в криогенной системе Большого адронного коллайдера.

Как же используется аналогия между черными дырами в космосе и черными дырами в БЭК? Как известно, черная дыра — это область пространства с настолько сильной гравитацией, что ее пределов не может покинуть даже свет. Она «изолирована» от остального пространства воображаемой границей, которую называют горизонтом событий. То, что находится внутри горизонта событий, покинуть дыру уже не может. В 70-е годы Хокинг показал, что представление о черных дырах, как об объектах, которые только поглощают и ничего не выпускают, не совсем верно. Такие астрономические объекты могут излучать, и это излучение приводит к их испарению, то есть к уменьшению массы. Механизм явления таков: у горизонта событий черной дыры флуктуации вакуума порождают пару частиц — одна с отрицательной, другая с положительной энергией (например, два фотона), — которая из-за сильной гравитации не успеет аннигилировать. Частица с отрицательной энергией может оказаться немного ниже горизонта событий, и поэтому поглотится черной дырой, а частица с положительной энергией, которая находится над горизонтом событий, может улететь прочь.

Поглощая античастицу с отрицательной энергией, черная дыра уменьшает свою энергию, а следовательно, и массу тоже. Выходит, что дыра испаряется, а улетевшие частицы несут информацию об этом в виде излучения, которое получило название излучение Хокинга. Теория говорит о том, что этому излучению можно сопоставить температуру, а значит, и зарегистрировать его. Однако дальнейшие расчеты показали, что температура излучения Хокинга меньше — а для некоторых очень массивных черных дыр намного меньше — температуры [реликтового фона](#) Вселенной, составляющей приблизительно 2,7 К, поэтому «увидеть» излучение Хокинга — задача очень непростая (если, конечно, оно существует).

Воспроизвести колоссальную гравитацию черной дыры в «домашних», земных, условиях не представляется возможным, поэтому ученые прибегают к БЭК как к лабораторной модели черной дыры, пытаясь обнаружить излучение из конденсата, **механизм образования которого схож с процессом возникновения излучения Хокинга**. В качестве модели излучения Хокинга физики-теоретики предложили использовать акустическое излучение, которое можно создать в БЭК.

Основная идея заключается в следующем: конденсат — это вещество, в котором, как и в любом другом материале, распространение звука идет с определенной скоростью. Предположим, что некая область БЭК разгоняется и начинает двигаться со скоростью, превышающей скорость звука в данной среде, при этом остальная часть продолжает свое течение со скоростью, меньшей скорости звука. Область, которая течет со скоростью больше, чем скорость звука, условно пока что назовем черной дырой, а границу перехода, где скорость движения конденсата в точности равна скорости звука (происходит переход от дозвуковой скорости к сверхзвуковой), так же условно будем считать горизонтом событий. На этом горизонте событий создается пара фононов — квантов звуковых колебаний, — которые, естественно, движутся со скоростью звука в БЭК. Импульс одного из фононов может быть противоположно направлен движению конденсата, поэтому будет захвачен им и не сможет более из него вырваться, поскольку скорость фонона меньше скорости конденсата. А второй фонон, в соответствии с законом сохранения импульса, движется в противоположном направлении, улетая от конденсата. Этот улетающий фонон образует в итоге фононное, или акустическое, излучение, которое тоже имеет определенный тепловой спектр или температуру.

Аналогия с истинной черной дырой очевидна: участок БЭК, который движется со сверхзвуковой скоростью и не выпускает фононы, соответствует гравитационной черной дыре, которая не выпускает фотоны; рождающиеся фононы в области БЭК, где скорость его течения равна скорости звука в нём, — это фотоны, образующиеся на горизонте событий настоящей черной дыры. Таким образом, в конденсате может образоваться пусть и не настоящая черная дыра, но ее звуковой аналог — акустическая черная дыра, которая не выпускает звук (фононы) в пределах своего горизонта событий.

Экспериментальная реализация в БЭК акустической черной дыры

Израильские ученые из Технологического института Хайфы сделали первый шаг к практической реализации в БЭК вышеописанных акустических черных дыр. Препринт статьи [“A sonic black hole in a density-inverted Bose-Einstein condensate”](#) доступен в Архиве. Основные трудности, которые успешно преодолели израильские исследователи, состояли в том, чтобы не только разогнать конденсат атомов рубидия до скорости, которая превышает звуковую в данной среде, но и сделать его протекание бездиссипативным (без трения), а скорость движения неоднородной.

Всё это израильским ученым удалось осуществить с помощью механизма, который они назвали **инверсия плотности**. В слабо изменяющемся во времени магнитном поле (магнитной ловушке) генерируется течение конденсата из 100 тыс. атомов ^{87}Rb . В магнитной ловушке с помощью лазера создается глубокая энергетическая яма (рис. 1). Часть конденсата, которая движется вначале с дозвуковой скоростью, как бы проваливается в эту яму, разгоняется и достигает сверхзвуковой скорости. Область конденсата, в которой скорость его движения равна скорости звука в нём, — это воображаемый горизонт событий. Поскольку конденсат находится не в наинизшем состоянии, которое соответствует здесь дну энергетической ямы, то из-за квантовомеханических законов он не может остаться «жить» на ее дне. БЭК «выталкивается» из нее и продолжает течение со скоростью, которая была до его попадания в яму.

Ну а теперь перейдем к результатам, которые получили авторы исследования.

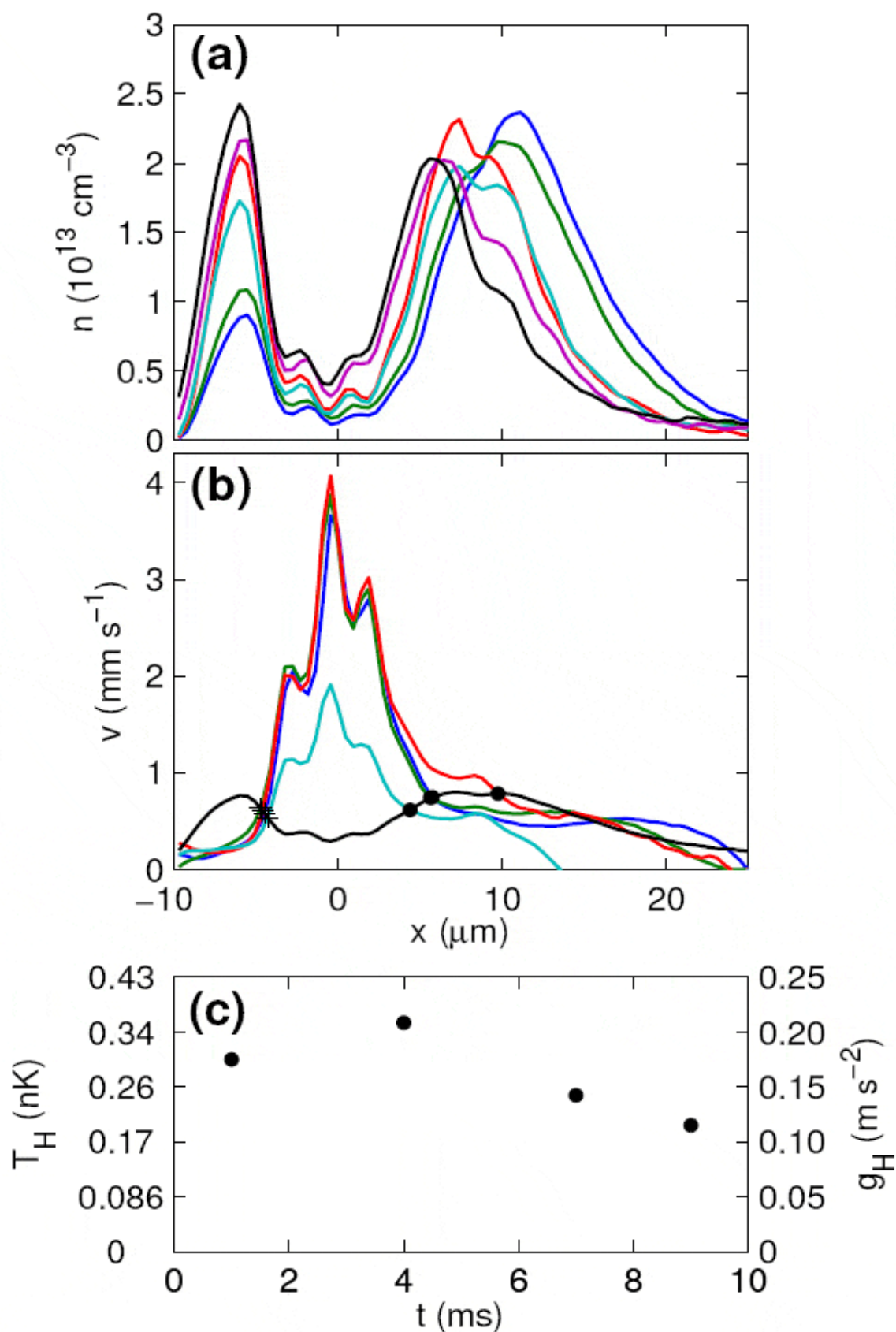


Рис. 2. Временные зависимости протекающего в отрицательном направлении оси x конденсата. (а) Профиль распределения концентрации (плотности) конденсата в разные моменты времени. Синяя, зеленая, красная, голубая и лиловая кривые соответствуют моменту времени 0 мс, 2 мс, 4 мс, 6 мс, 8 мс и 10 мс. (б) Распределение скорости течения конденсата в разные моменты времени. Синяя, зеленая, красная и голубая кривые показывают скорость течения в 1-ю, 4-ю, 7-ю и 9-ю мс соответственно. Черная кривая показывает распределение скорости звука вдоль течения конденсата. Черные кружки на графике означают горизонт событий акустической черной дыры (см. пояснения в тексте). (с) Эволюция температуры акустического излучения Хокинга. Слева по оси ординат откладывается воображаемое ускорение свободного падения, которое создается на горизонте событий акустической черной дыры. Эта величина авторами определяется как произведение скорости звука на разность градиентов скоростей конденсата и созданных фононов, при этом оба значения взяты на горизонте событий черной дыры. Рис. из обсуждаемой статьи в Архиве

На рисунке 2а приведены графики распределения концентрации (или плотности, что в данном контексте одно и то же) БЭК при его протекании через энергетическую яму в разные моменты времени. Время отсчитывается с момента, когда концентрация атомов имела вид, показанный синей кривой. Начало координат здесь соответствует минимуму (дну) энергетической ямы. Конденсат движется в отрицательном направлении оси x . Как и ожидалось, в окрестности нулевой координаты (дно энергетической ямы) наблюдается минимум плотности конденсата.

Скорость движения каждого участка конденсата в разные моменты времени показана на рисунке 2b. Максимум скорости течения БЭК находится на дне энергетической ямы (координата $x = 0$). Черная кривая — это скорость звука в текущем БЭК. Она непостоянна, так как скорость звука зависит от плотности вещества, а концентрация, как мы уже увидели из графиков на рисунке 2а, не является постоянной величиной. Точки пересечения черной кривой с остальными кривыми (показаны черными кружками) являются горизонтами событий черной дыры. В этот момент и в этом месте конденсата скорость его течения равна скорости звука в нём. С экспериментальной точки зрения в этом месте конденсата и в этот момент времени нужно возбуждать пару фононов, чтобы зарегистрировать акустическое излучение, аналогичное излучению Хокинга.

К сожалению, израильские ученые не занимались возбуждением фононов на горизонте событий акустической черной дыры, а поэтому, естественно, никакого акустического излучения от БЭК не наблюдали. Они лишь рассчитали ожидаемую температуру фононного излучения в разные моменты времени движения БЭК. Оказалось, что температура излучения должна находиться в окрестности 0,2–0,3 нК (рис. 2с). В принципе, на данный момент столь низкие температуры технически достижимы, но получить их очень сложно. В 2000 году группе финских ученых, занимающихся исследованиями магнетизма и сверхпроводимости в родии, удалось создать температуру 0,1 нК, затратив на ее достижение 20 лет исследований (см. [пресс-релиз](#) лаборатории низких температур Технологического университета Хельсинки). В настоящее время это самая низкая температура, созданная на Земле.

По мнению авторов, увеличение на порядок скоростей звука в БЭК и скорости его движения позволит увеличить на порядок температуру фононного излучения Хокинга, переведя ее в диапазон 2–7 нК, что существенно облегчит задачу экспериментаторов по обнаружению данного явления.

Источник: O. Lahav, A. Itah, A. Blumkin, C. Gordon, J. Steinhauer. [A sonic black hole in a density-inverted Bose-Einstein condensate](#) // arXiv:0906.1337 (7 Jun 2009).

Юрий Ерин