

6. Jim'enez M., Gimeno B., Miquel-Espanya C. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010) 395501 (7pp).
7. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // ПТЭ, 1992. №2. С.153.
8. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: изд. «Наука», 1969. – 408 с.
9. Брюнинг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. М.: Сов. Радио. 1958. 192 с.
10. Plyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V.26, No.3. P.332.

## Формирование и распад вихревой системы в сверхтекучем гелии

В.Б.Ефимов

Черноголовка, Московской обл., Институт физики твердого тела РАН  
efimov@issp.ac.ru

*Сверхтекучий гелий остается жидким до абсолютного нуля температуры. При этом при понижении температуры количество возбуждений в гелии вымерзает (экспоненциально для ротонов и степенным образом для фононов). Таким образом, гелий является модельной средой, имеющей свойства физического вакуума. В таком физическом вакууме возможно контролируемым образом вводить такие возбуждения, как квантовые вихри, изучать процессы формирования вихревой системы, условия ее существования и характеристики распада.*

**Formation and decay of vortex system in superfluid helium. V.B. Yefimov.** *Superfluid helium remains liquid up to absolute zero temperature. Cooling of helium leads to reduction of the amount of excitation, which freezes exponentially for rotons and in a power-law dependence for phonons. So, liquid helium is a model medium having the properties of physical vacuum. In such physical vacuum it is possible to introduce excitations such as quantum vortices in a controlled manner and to study the process of formation of a vortex system, the conditions of its existence, and the characteristics of decay of a vortex tangle.*

Под вакуумом традиционно понимается пространство свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного. При этом вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа  $\lambda$  характерным размером сосуда  $d$ . При этом различают низкий вакуум, когда  $\lambda \ll d$  и высокий вакуум  $\lambda \gg d$ . В микропорах высокий вакуум может достигнут при существенно более высокой остаточной концентрации молекул газа.

Важным свойством абсолютного вакуума является отсутствие сопротивления движению тел из-за отсутствия частиц, увеличивающих свой импульс и энергию при взаимодействии. Уменьшение количества частиц газа при высоком вакууме так же уменьшает теплоперенос через среду.

Под физическим вакуумом (вакуумное состояние) в квантовой физике понимают низшее (основное) энергетическое состояние квантованного поля, обладающее нулевым импульсом, моментом импульса и других квантовых чисел. При этом такое состояние не обязательно соответствует пустоте: поле в низшем состоянии может быть, например, полем квазичастиц в твердом теле. В этом смысле сверхтекучий гелий-4 является физическим вакуумом, в котором переход к сверхтекучести связан с образованием конденсата Бозе-Эйнштейна. При этом большое число атомов оказываются в своих минимально возможных

квантовых состояниях, и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне. Одно из наиболее ярких проявлений квантового поведения макроскопической системы является существование сверхтекучего гелия в жидком состоянии при нулевых температурах при давлении меньше 25 атм. При фазовом  $\lambda$ -переходе концентрация нормальной компоненты начинает уменьшаться и падает до нуля при нулевой температуре. При этом уменьшается количество тепловых возбуждений таких как фононы (вымерзают по степенному закону) и ротонны (концентрация падает экспоненциально). Таким образом сверхтекучий гелий при температуре близкой к 0 К представляет из себя среду со свойствами физического вакуума с малым количеством возбуждений.

Сверхтекучий гелий при низких температурах (ниже 0,1 К) так же как и вакуум не создает реального сопротивления движению тел с малыми скоростями. Так, например, затухание колебаний сетки, натянутой на круговую оправку и являющейся мембранным осциллятором, помещенной в сверхтекучий гелий определяется добротностью этой системы в вакууме. Такое поведение сверхтекучей жидкости наблюдается до тех пор пока скорость движения гелия не превысит критическую и тогда в идеальном физическом вакууме сверхтекучего гелия начнут рождаться возбуждения – квантовые вихри. Для движения тел в сверхтекучем гелии со скоростями выше критических (хотя бы локально) появится реальная вязкость. Возбуждения в виде квантовых вихрей появляются и при противотоке нормальной и сверхтекучей компонент, возникающем при протекании через гелий теплового потока. В этой ситуации в «сверхтеплопроводном» гелии появляется градиент температуры. В данной статье мы обсудим возможности формирования таких неравновесных возбуждений как квантовые вихри в сверхтекучем гелии, условиях их существования и динамики распада вихревой системы.

*Генерация вихрей в сверхтекучем гелии колеблющимися телами.*

Особенностью сверхтекучего гелия, объясненного Ландау в рамках двух жидкостной гидродинамики, является нарушение сверхтекучести при превышении скорости движения жидкости критической величины. При достаточно больших скоростях протекания жидкости по узким щелям или при обтекании препятствий рождаются вихри, скорость циркуляции сверхтекучей компоненты  $v_s$  в которых вокруг оси вихря подчиняется законам квантования:  $\oint_L^n v_s dl = n \frac{h}{m}$ , где скорость  $n$  – целое число,  $h$  – постоянная Планка,  $m$  – масса атома гелия. Скорости на границе кора – центральной оси вихря – достигает критических величин  $\sim 60$  м/с. При отсутствии диссипации сверхтекучей компоненты такие вихри должны существовать при низких температурах бесконечно долго. Начинаться они могут от стенок прибора, на границах раздела или замыкаться сами на себе, образуя вихревые кольца. Одной из проблем низкотемпературной физики, понимания особенностей поведения сверхтекучего гелия, являются вопросы рождения таких возбуждений, как квантовые вихри, условия их стационарного существования и физические причины их исчезновения. Рождение вихрей возможно при движении различных тел в сверхтекучем гелии. Такими телами являются сферы, сетки, кварцевые камертоны (“tuningfork”), колеблющиеся в резонансных условиях под действием внешних сил. При этом добротность такой системы в резонансе будет определяться, в том числе, и передачей энергии в вихревую систему – способностью генерировать квантовые и обычные вихри. Пример такого резонатора (металлической сетки, являющейся мембранным центральным электродом двойного конденсатора) приведен на рис. 1. Изменение переменного напряжения на одной из внешних обкладок конденсатора выступает в качестве внешней силы для создания вынужденных колебаний. При совпадении частоты вынуждающей силы с собственными резонансными частотами центральной мембраны, амплитуда колебаний последней начинает резко возрастать. При этом амплитуда и скорость колебаний сетки регистрируется через величину тока смещения на другой внешней обкладке конденсатора.

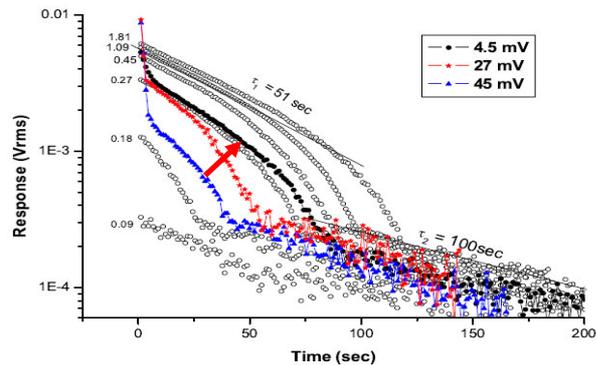
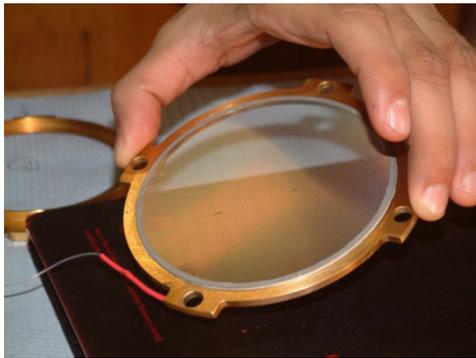


Рис. 1. Мембрана, использованная в резонансных экспериментах и временная зависимость амплитуды колебания при выключении накачки,  $T=44$  мК,  $P=5$  атм., особо чистый  $^4\text{He}$ .

На правой части рис.1 приведена временная зависимость затухания колебаний мембраны из сетки при выключении внешней накачки в зависимости от величины этой внешней накачки и, соответственно, от амплитуды (скорости) установившихся колебаний. Режим затухания колебаний можно разделить на три области. При большой амплитуде установившихся колебаний потеря энергии в первые несколько секунд происходит экспоненциально быстро. Этот режим характеризуется формированием каскада вихрей, образованием турбулентного клубка вблизи мембраны. Затем энергия, запасенная в колеблющейся мембране, начинает теряться значительно медленнее. Этот процесс характеризуется рождением одиночных вихрей. Время этого процесса может составлять от десятков до сотен секунд. На последней стадии (участок 3) скорости движения сеточной мембраны уже недостаточно для рождения вихрей и затухание определяется добротностью мембраны в вакууме, возбуждения в гелии уже не генерируются и гелий опять представляет собой физический вакуум.

В последнее время обычные кварцевые резонаторы (“tuningforks”) нашли широкое применение в физике низких температур. Оказалось, что часовые кварцевые камертоны со стандартной частотой  $f=2^{15}=32768$  Hz обладают высокой чувствительностью благодаря малой массе и высокой добротности, их параметры воспроизводимы после многократных термоциклирований, они удобны в монтаже и, кроме того, они дешевы. Одно из применений высокой добротности таких камертонов в физике гелия это их использование в качестве генератора и детектора квантовых вихрей. При приложении к камертону переменного тока на резонансной частоте скорость движения ножек камертона может достигать величины до 10 м/с, что вполне достаточно для генерации квантовых вихрей. Для определения параметров колебания камертона, как электрического резонатора применяют теорию электро-механического соответствия с вычислением электро-механической константы при колебании камертона в идеальных условиях, например, в вакууме при низких температурах. Вынуждающая сила  $F$  для колебаний ножек камертона будет пропорциональна приложенному напряжению  $U$ , а скорость движения ножек  $v$  – пропорционально току смещения  $J$ . Таким образом, измеряя отклик камертона, как гармонического резонатора, на внешний электрический сигнал, можно измерить зависимость скорости движения ножек камертона как функцию приложенной силы.

При малых амплитудах колебания камертонов движение жидкости, обтекающей ножки камертонов, ламинарно, и скорость движения ножек пропорциональна приложенному напряжению  $J \sim v \sim U \sim F$ . Увеличение скорости движения выше 10-15 см/с приводит к генерации каскада вихрей, при этом энергия внешнего источника расходуется на создание возбуждений в среде. В турбулентном режиме наблюдается зависимость  $J \sim v \sim U^2 \sim F^2$ .

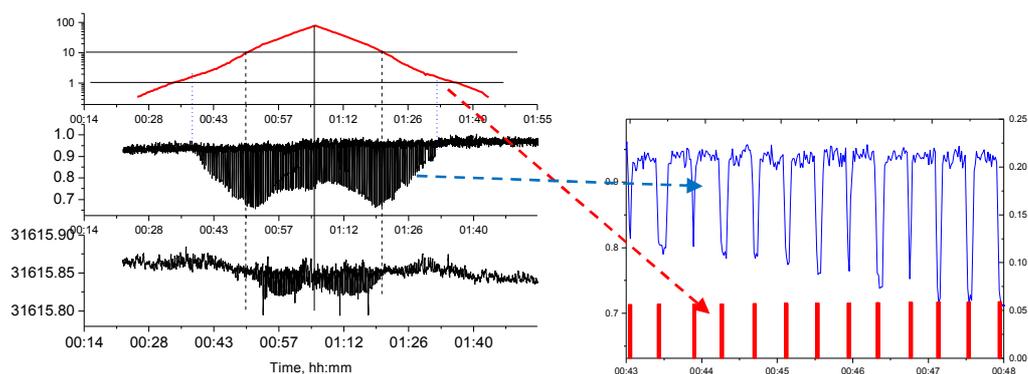


Рис. 2. Влияние амплитуды колебаний одного из камертонов, как генератора вихрей (верхняя кривая на левом графике, красные пики на правом), на добротность и резонансную частоту второго камертона, как детектора вихрей в системе (нижние пики слева и синие пики справа) при телеграфной подаче возбуждения на резонансной частоте на камертон-генератор.

Для определения возможности использовать кварцевые камертоны для детектирования квантовых возбуждений нами была создана измерительная ампула, в которой были помещены два камертона, имеющих резонансы на несколько отличных частотах (31 615 Hz и 32 102Hz) так что ни электрически, ни механически камертоны не влияли друг на друга. Размеры камертонов были: длина – 3.65 мм и 3.6 мм, ширина ножек камертона – 0.56 мм, их толщина – 0.202 мм. Камертоны располагались на расстоянии в 1 см друг от друга так, что плоскости колебаний ножек камертонов были параллельны, а их оси располагались под углом в  $120^\circ$ .

Эксперименты проводились при базовой температуре рефрижератора ( $T=10$  мК) и давлении сверхтекучего гелия  $P=5$  атм. На один из камертонов (детектор), подавался гармонический сигнал на резонансной частоте, вызывающий колебания с амплитудой, ниже первой критической скорости. На второй камертон на резонансной частоте этого камертона подавался сигнал с генератора, амплитуда которого плавно менялась. Оказалось, что камертон-детектор менял свою добротность при превышении камертоном-генератором скорости движения выше первой критической ( $\sim 1$  см/с, режим 2 в предыдущем эксперименте). Отклик детектора менялся еще раз при превышении генератором второй критической скорости ( $\sim 15$  см/с, режим 1). Это хорошо видно при «телеграфном» включении сигнала накачки на камертон-генератора, когда после 20 секундного ожидания гармонический сигнал включался на 2 секунды (рис.2). Хорошо видна корреляция изменения сигнала детектора при генерации вихрей вторым камертоном. Вторая критическая скорость соответствует генерации турбулентного клубка вихрей, что приводило к резкому уменьшению отклика детектора на возбуждения. Это свидетельствует об экранировке движения вихрей от камертона-генератора при их турбулентности, их взаимодействии друг с другом и реконекции. Таким образом, можно видеть, что как и для условий хорошего вакуума, длины пробегов возмущений (квантовые вихри) при низких температурах в сверхтекучем гелии могут составлять величину в сантиметры, что сравнимо с размерами сосуда.

#### *Генерация вихрей противотоком нормальной и сверхтекучей компонент.*

Для ответа на вопрос о времени установления и распада системы квантовых возбуждений в сверхтекучем гелии нами был поставлен эксперимент с пропусканием коротких одиночных тепловых импульсов, как детектора плотности вихрей. Создание вихревой системы осуществлялось пропусканием постоянного теплового потока по длинному кварцевому капилляру, нагреватель в котором занимал почти все сечение и мог быть установлен на любом расстоянии от болометра, регистрировавшем сигналы второго звука. Противоток нормальной и сверхтекучей компонент при пропускании стационарного теплового потока создавал равновесную плотность квантовых вихрей, рассеяние на которых уменьшало амплитуду и энергию пробных импульсов. Результаты записи таких импульсов через временные

промежутки от 1 до 300 сек после включения или выключения постоянного теплового потока, поддерживающего стационарную плотность вихрей в объеме, приведен на рис. 3.

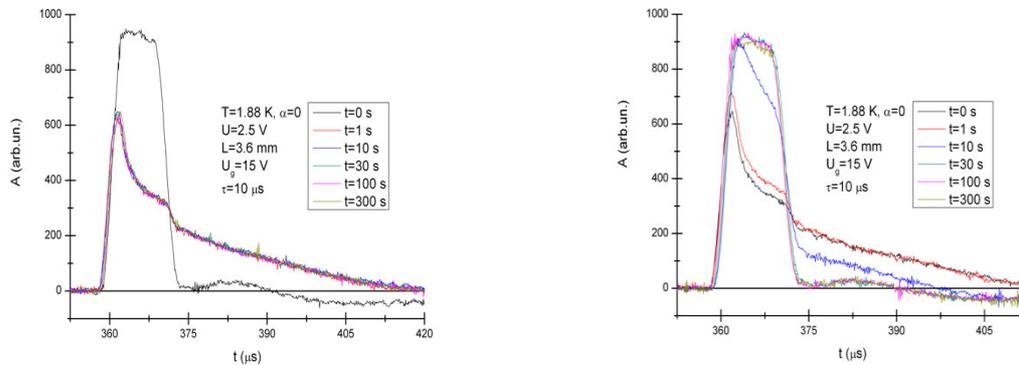


Рис. 3. Запись одиночного пробного импульса ( $U_G=15 V$ ,  $\tau=10 \mu s$ ) через 1-300 s после включения постоянного теплового потока (левый график) и его выключения (правый). Плотность вихрей, соответствующая стационарному тепловому потоку,  $N \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$

Как хорошо видно из графиков стационарная вихревая система устанавливается за времена  $t_F$  меньше 1 s, в то время как времена ее распад  $t_D$  больше десятка секунд.

Таким образом, экспериментально было показано, что при низких температурах  $T < 0.1 \text{ K}$  сверхтекучий гелий демонстрирует свойства физического вакуума, движения тел в котором происходит, как и в техническом вакууме, без сопротивления. Движущиеся в сверхтекучем гелии тела могут рождают квантовые возбуждения, длины пробега которых сравнимы с размером системы. Времена формирования стационарной концентрации квантовых вихрей при возбуждении вихрей противотоком нормальной и сверхтекучей компонент меньше секунды, в то время как распад вихревого клубка составляет величину в десятки секунд.

Автор благодарен соавторам приведенных в статье экспериментальных результатов Дераак Garg, P.V.E. McClintock, А. Орловой.

Работа была выполнена в рамках ГосЗадания ИФТТ РАН.