

КВАНТОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ – СПОСОБЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

QUANTUM TURBULENCE IN SUPERFLUID HELIUM – METHODS OF ITS DETECTION

В.Б.Ефимов, (ORCID: 0000-0002-9195-2458) / victor_efimov@yahoo.co.uk

V.V.Efimov, (ORCID: 0000-0002-9195-2458)

Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Московская обл.

Для генерации возбуждений в виде квантовых вихрей в физический вакуум в последнее время активно используются высокочастотные осцилляторы, по режиму которых можно определять количество рожденных вихрей, а также использовать их в качестве детектора таких вихрей.

High-Q oscillators have recently been actively used for generation of excitations in the form of quantum vortices into a physical vacuum. A change of the response of the oscillator on an external excitation allows to determine the number of produced vortices and also to use them as a detector of such vortices.

Ключевые слова: квантовый вихрь, осциллятор, детектор.

Keywords: quantum vortex, oscillator, detector.

ВИХРИ В ФИЗИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ

Сверхтекучий гелий при низких температурах является идеальной модельной средой, позволяющей изучать различные физические процессы в том числе и физический вакуум. Можно определить технический вакуум, который понимают как среду с резко уменьшенным количеством молекул по сравнению количеством, соответствующим атмосферному давлению. Технический вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа λ и характерным размером сосуда d . При этом высокий вакуум отвечает условию $\lambda \gg d$, что для характерных размеров сосуда в несколько см составляет плотность молекул газа 10^{11} на см^3 однако для микропор условие $\lambda \gg d$ выполняется при существенно более высоких давлениях. Так для пор с размерами в десятки нанометров атмосферное давление удовлетворяет этому условию, т.к. λ молекул воздуха при комнатной температуре составит ~ 60 нм.

Наряду с техническим вакуумом можно определить физический вакуум (вакуумное состояние), под которым в квантовой физике понимают низшее (основное) энергетическое состояние квантованного поля, обладающее нулевым импульсом, моментом импульса и другими квантовыми числами. Сверхтекучий гелий при температурах ниже 0.1 К отвечает такому определению, т.к. количество возбуждений при таких температурах становится пренебрежимо малым: количество квантовых возбуждений (ротон) вымерзает экспоненциально с понижением температуры, а количество фононов – пропорционально T^3 .

Жидкий гелий при низких температурах является модельной средой для изучения процессов формирования и распада турбулентности. Особенностью вихревого движения в сверхтекучем гелии является простота описания момента движения сверхтекучей компоненты. В односвязной области $\text{rot } V_s = 0$, для многосвязного объема циркуляция сверхтекучей компоненты квантуется

$$\Gamma = \oint_C V_s \cdot dl = n\kappa,$$

где интегрирование проводится по замкнутой линии C . Многосвязность объема циркуляции может осуществляться наличием в объеме сверхтекучего гелия области с нарушенной сверхтекучестью – сердцевинной или кором вихря (*core*) с размерами $r_c \sim$ нескольких ангстрем для ^4He ($r_c \approx 1,28 \pm 0,13 \text{ \AA}$ при $T=0,28 \text{ K}$) и для $^3\text{He-B}$ $\geq 100 \text{ \AA}$. Квант циркуляции определяется как $\kappa = h/m_{4\text{He}} = 9,998 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, h – постоянная Планка, $m_{4\text{He}}$ – масса атома гелия. Такие квантовые вихри в сверхтекучем гелии являются возбуждениями, вносимые в жидкость как в физический вакуум. Введение квантовых вихрей в среду может быть осуществлено противотоком нормальной и сверхтекучей компонент при тепловыделении в жидком гелии, однако такой метод осуществляется при температурах выше 1 К, где концентрация нормальной компоненты достаточно велика, где свойства гелия определяются тепловыми возмущениями и описание турбулентных процессов сильно усложняется из-за возможности существования вихревой системы как в сверхтекучей компоненте, так и в нормальной и взаимодействием двух этих систем и передачей энергией между ними. При низких температурах источником вихрей могут быть разного типа осцилляторы, поведению таких источников квантовой турбулентности и количественным оценкам генерируемых вихрей посвящена данная статья.

ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕЙ И ИХ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

В экспериментах в сверхтекучем гелии для генерации и детектирования турбулентности при низких температурах за счет механического движения обычно применяют методы движения колеблющихся тел в резонансных условиях, измеряя при этом скорость их движения в зависимости от величины приложенных механических напряжений. В зависимости от геометрических размеров используемых резонаторов, материала из которого они изготовлены, способов их возбуждения меняется диапазон их резонансных частот, чувствительности и особенности генерации вихрей. В качестве таких резонансных систем используются колеблющиеся сетки, левитирующие шарики, сверхпроводящие проволочки, кварцевые камертоны. В последнее время в качестве малогабаритных резонаторов начали использовать микро- и нано-электро-механические системы (MEMS и NEMS).

При малых скоростях движения механического осциллятора колеблющегося с частотой $f = \omega/2\pi$ силы сопротивления описываются зависимостью, характерной для ламинарного обтекания, коэффициент сопротивления $C_D^L = c_L \frac{\sqrt{\omega\nu}}{v}$, где ν – кинематическая вязкость, c_L – геометрическая константа порядка единицы. Это соотношение справедливо и для сверхтекучего гелия, кинематическая вязкость которого определяется инерционным движением массы жидкости при колебаниях осциллятора. При превышении скорости движения осциллирующего тела критической величины начинается генерация вихрей. Процесс перехода осциллятора к генерированию квантовой турбулентности регистрируется по изменению зависимости коэффициента сопротивления от скорости движения тела. Формирование развитой квантовой турбулентности сопровождается зависимостью вида $F = \frac{1}{2} C_D \rho A_S V^2$, однако генерация вихрей начинается существенно раньше и происходит в два этапа, что подтверждают эксперименты по детектированию вихрей в сверхтекучем гелии при низких температурах (ниже 0,1 К).

Скорость движения вихревого кольца определяется его радиусом R_0 и чем больше радиус кольца, тем меньше его скорость [1] $V_0 = \frac{\kappa}{4\pi R_0} \left(\ln \frac{8R_0}{r_c} - 1/2 \right)$. При движении такого вихря при нулевой температуре радиус его не меняется, т.к. в сверхтекучем гелии при этих температурах отсутствуют тепловые возбуждения. При температурах выше 0,5 К радиус вихря будет уменьшаться по мере его движения и на расстоянии в $l_B = R_0/\alpha$ (где α – коэффициент взаимного трения между нормальной и сверхтекучей компонент

сверхтекучего гелия) вихрь исчезнет. Одну из задач при исследовании квантовой турбулентности можно сформулировать как изучение распространения вихрей при нулевой температуре. Если квантовые вихри исчезают и при нулевой температуре, то необходимо придумать диссипативный механизм потерь энергии вихревого кольца в таком физическом вакууме.

В качестве детектора для таких измерений используют высокодобротные резонансные системы аналогичные тем, что используются для генерации вихрей, но с амплитудой колебаний существенно меньше порога генерации вихрей. Присоединение вихрей на детектор приводит к изменению добротности такого резонатора и позволяет оценить количество дошедших до детектора вихрей.

РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕЙ

При проведении экспериментов по детектированию вихрей в качестве излучателя вихрей наиболее часто используются кварцевые камертоны. При низких температурах поведение таких излучателей разделяется на три области в зависимости от скорости движения ножек этих камертонов (рис. 1): при малых скоростях сила сопротивления движению ножек камертона возрастает пропорционально скорости их движения (ламинарное обтекание жидкости), при достаточно высоких скоростях, как было описано выше, сила сопротивления пропорциональна скорости в квадрате, что определяется переходом к развитой турбулентности. Однако между этими двумя предельными состояниями обтекания есть промежуточная область $V_{C1} < V < V_{C2}$, поведение вихрей в которой отличается от двух этих областей. По экспериментальным зависимостям видно, что превышение скорости движения выше V_{C1} сила сопротивления несколько возрастает, но остается примерно пропорциональна скорости движения ножек камертона, как при ламинарном движении. Стоит отметить, что подобное движение отмечалось и для других способов генерации вихрей, в том числе при противотоке нормальной и сверхтекучей компонент при постоянном тепловом потоке при температурах выше 1 К [2].

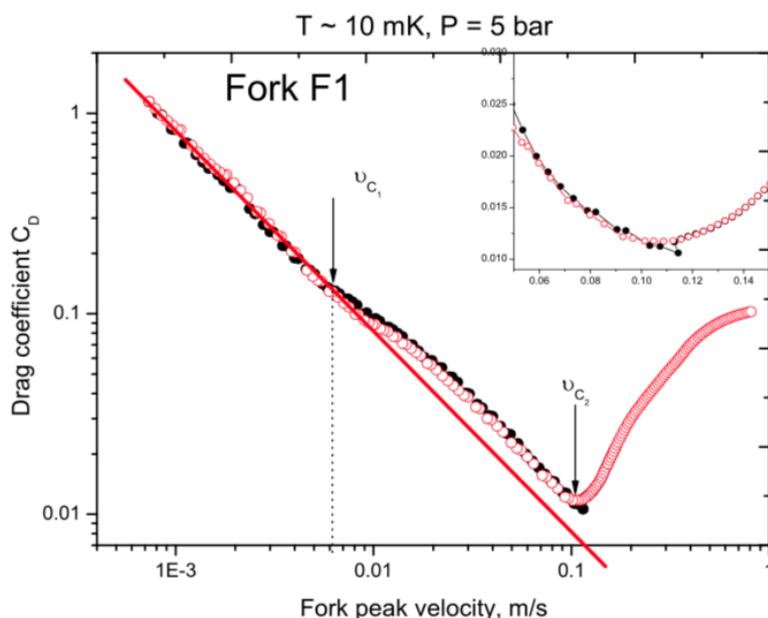


Рис. 1. Коэффициент сопротивления C_D как функция скорости движения кварцевого камертона. Черными точками показано поведение C_D , если величину накачки уменьшить до достижения V_{C2} .

Эксперименты по детектированию вихрей при нулевой температуре ($T < 100$ мК) проводились в нескольких лабораториях, в том числе в Университете Осаки, Япония (сверхпроводящие проволочные дуги в магнитном поле, диаметром проволочки 2-3 μm , диаметр дуги ~ 1 мм, резонансные частоты $f \sim 3$ кГц, детектирование на расстоянии ~ 1 мм) [3], в Университете Ланкастера, Англия (два кварцевых камертона – tuning forks, длина ножек $\sim 2-3$ мм, ширина ~ 0.6 мм, толщина ~ 0.4 мм, плоскости колебаний компланарны, $f \approx 32$ кГц, частота генератора и детектора различались на ≈ 0.5 кГц, что исключало механическое влияние друг на друга, детектирование на расстоянии ~ 10 мм) [4]. Аналогичные эксперименты были проделаны во Флоридском университете, США [5] и в Ланкастерском университете, Англия [6] с использованием в качестве излучателей вихрей кварцевых камертонов, а в качестве детекторов микро- и нано-механических систем (MEMS и NEMS), находившиеся на расстоянии в несколько мм от излучателя.

Обнаружено, что при включении генератора вихрей в режиме скоростей выше нижнего предела $V_{c1} \approx 1$ см/с, детектор начинает уменьшать свою добротность, что связано с пиннингованием вихрей на поверхности детектора (рис. 2 по результатам работы [4]). Интересно то, что вихри распространяются при такой генерации на расстояние в десяток мм, долетая до детектора.

Дальнейшее увеличение скорости движения ножек генератора приводило к дальнейшему уменьшению добротности детектора до достижения второй критической скорости $V_{c2} \approx 15$ см/с. Теперь, если превысить вторую критическую скорость, то добротность детектора начинает возрастать, что можно объяснить как уменьшение количество вихрей, достигающих детектор.

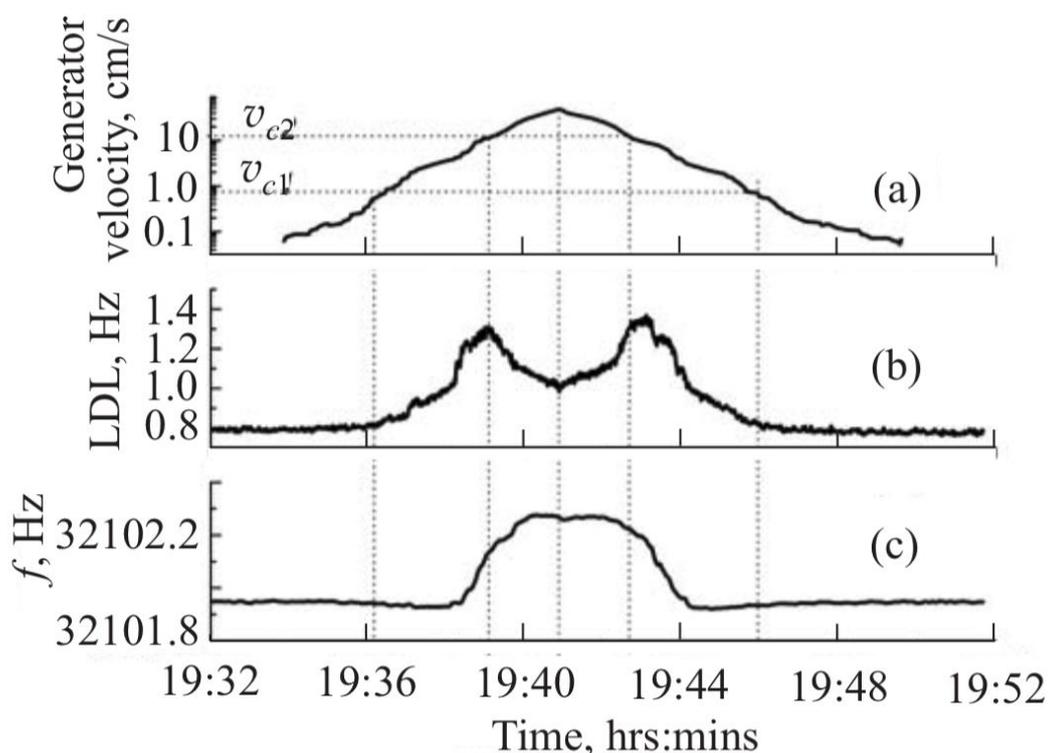


Рис. 2. Влияние скорости колебаний «генератора» в процессе увеличения и уменьшения сигнала внешней накачки (а) на ширину резонанса «детектора» (low-drive-linewidths – LDLs) (b) и его резонансную частоту (c) $V_D \sim 0.3$ мм/с, $T=10$ мК, $P=5$ Вар, особо чистый ^4He [4].

Уменьшение потока вихрей при больших скоростях движения источника вихрей наблюдалось в работах по генерации и детектированию с помощью сверхпроводящих

проволочных и MEMS резонаторов. Таким образом в настоящее время процесс излучения вихрей, как возбуждений в физический вакуум, можно представить следующим образом. При малых скоростях движения генератора вихрей обтекание сверхтекучей жидкости осциллятора ламинарное и определяется только присоединенной массой и излучением фононов (полная аналогия с музыкальным камертоном). Увеличение скорости движения осциллятора приводит к рождению одиночных вихрей. Физика этого процесса связана с увеличением длины вихрей, запинненгованных на осцилляторе, при движении осциллятора со скоростями выше V_{C1} , их самопересечением (реконнекцией) и пересечением с соседними вихрями. При реконнекции образуются свободные вихревые петли, двигающиеся в пространстве баллистически. О механизмах диссипации энергии таких вихрей при нулевой температуре нужно говорить отдельно. В принципе это различные механизмы релаксации возбуждений физического вакуума, аналогичные откачки технического вакуума. Дальнейшее увеличение скорости движения осциллятора выше V_{C2} приводит к лавинообразному рождению вихревых колец, высокая плотность которых в окрестностях места рождения приводит к их столкновениям, реконнекциям, аннигиляциям, что приводит к экранировке потока вихрей на детектор или к изотропному перераспределению потока вихревых петель в пространстве – режим развитой квантовой турбулентности. Отметим, что для генерации вихрей необходимо наличие остаточных вихрей, запинненгованных на осцилляторе. Стоит отметить, что переход генератора к режиму развитой турбулентности приводит, по-видимому, к увеличению количества запинненгованных вихрей на генераторе, что увеличивает коэффициент сопротивления при ламинарном обтекании жидкости. Как показали эксперименты на гладких поверхностях, к которым вихри не цепляются, скорости ламинарного движения могут быть в десятки раз выше, чем скорости V_{C1} и V_{C2} и при этом не наблюдается перехода к турбулентному рождению вихрей. Так для очень гладких NbTi сверхпроводящих проволочек даже при скоростях движения выше 1 м/с не происходил переход к турбулентному рождению вихрей [7].

Работа была выполнена в рамках ГосЗадания ИФТТ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Donnelly R J *Quantized Vortices in Helium II* (Cambridge University Press, Cambridge, 1991).
2. Tough T. in *Progress in Low Temperature Physics* Vol. VIII (North-Holland Publ. Co., 1982)
3. Nago Y et al. *Phys. Rev. B* 87 024511 (2013)
4. Deepak Garg et al. *ФНТ* 38 11 1300 (2012)
5. Barquist C S et al. *J. Low Temp. Phys.* 201 4 (2020)
6. Guthrie A et al. arXiv:2007.04482v1
7. Yano H et al. *J. of Low Temp. Phys.* 150 3 410 (2008)