

## Сверхтекучий гелий как физический вакуум: возбуждения, их генерация и измерение

В.Б.Ефимов

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московской обл.  
e-mail: [efimov@issp.ac.ru](mailto:efimov@issp.ac.ru)

Сверхтекучий гелий является одним из наиболее привлекательных объектов для исследований и к настоящему времени является одним из наиболее изученных веществ в природе. Степень очистки гелия-4 от изотопических примесей достигает величин  $< 10^{-11}$  %, что определяется только чувствительностью измерительной аппаратуры и является рекордным по чистоте. Самой замечательной особенностью гелия является его способность оставаться в жидком состоянии до абсолютного нуля температуры, когда количество возбуждений вымерзает экспоненциально (для ротонов) и степенным образом (для фононов) при понижении температуры – что является интересной модельной средой имеющей свойства физического вакуума.

**Superfluid helium as physical vacuum: excitations, their generation and measurement.**  
*Efimov V.B. Superfluid helium is one of the most attractive objects for study and is now one of the best studied substances. The degree of He-4 cleaning from isotopic admixtures is about  $< 10^{-11}$  %, which is determined only by sensitivity of the measurement device. The most remarkable feature of helium is its ability to remain in liquid state to the absolute zero of temperature. It is a good model environment for physical vacuum simulation.*

Под вакуумом 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  $\lambda$  и характерным размером сосуда  $d$ . При этом различают низкий вакуум, когда  $\lambda \ll d$  и высокий вакуум  $\lambda \gg d$ , что для характерных размеров сосуда в несколько см составляет плотность молекул газа  $10^{16}$  молекул на  $\text{см}^3$  и  $10^{11}$  на  $\text{см}^3$ . Под физическим вакуумом (вакуумное состояние) в квантовой физике понимают низшее (основное) энергетическое состояние квантованного поля, обладающее нулевым импульсом, моментом импульса и другими квантовыми числами. При этом такое состояние не обязательно соответствует пустоте: поле в низшем состоянии может быть, например полем квазичастиц в твердом теле.

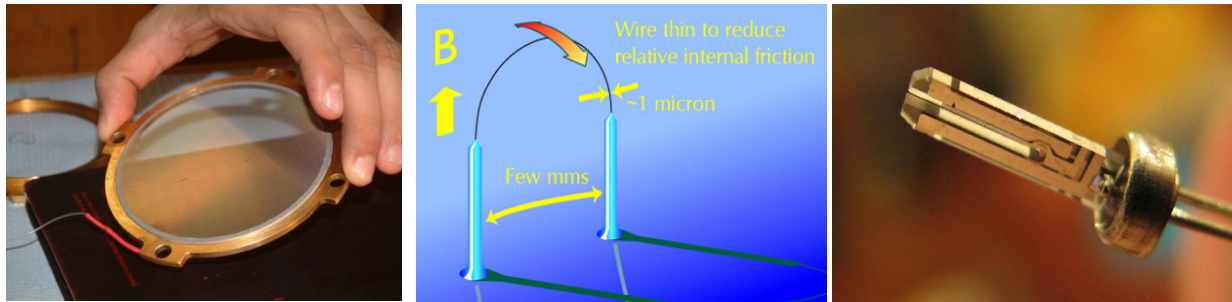
В этом смысле сверхтекучий гелий-4, в котором переход к сверхтекучести связан образованием конденсата Бозе-Энштейна, при котором большое число атомов оказываются в своих минимально возможных квантовых состояниях и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне. Одно из наиболее ярких проявлений из таких явлений является существование сверхтекучего гелия в жидком состоянии при нулевых температурах при давлении меньше 25 атм. Двухжидкостная гидродинамика сверхтекучего гелия основана на специфическом энергетическом спектре элементарных возбуждений квазичастиц с линейной зависимостью в начальной части спектра для импульса вблизи нуля и локального минимума для больших волновых чисел  $k$  ( $k_0 = 1.99 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ ,  $E_0 = 8.6 \text{ К}$ ). Возбуждения линейной части спектра принято называть фононами, а в области, близкой к  $k$  – ротонами.

При высокой температуре  $T > 1 \text{ К}$  свойства сверхтекучего гелия определяются в основном поведением ротоновых возбуждений, тогда как при охлаждении ниже 0.6 К фононы остаются доминирующим типом возбуждений. При этой температуре концентрация ротонов падает в  $5 \cdot 10^3$  раз по сравнению с  $T = 1.5 \text{ К}$  становясь бесконечно малой при температурах ниже 0.1 К. Возбуждения в фононной части спектра квантовых осцилляторов описывается соотношением Планка и с учетом того, что Дебаевскую температуру для сверхтекучего гелия можно оценить как  $\sim 13 \text{ К}$ , концентрация фононов при базовой температуре рефрижиратора растворения ( $\sim 10 \text{ мК}$ ) составит  $10^{13}$  фононов/ $\text{см}^3$ . Таким образом при низкотемпературных экспериментах в милликельвинной области температур можно считать физическим

вакуумом, возбуждения в котором можно рождать контролируемо, изучать динамику их движения, процессы их распада.

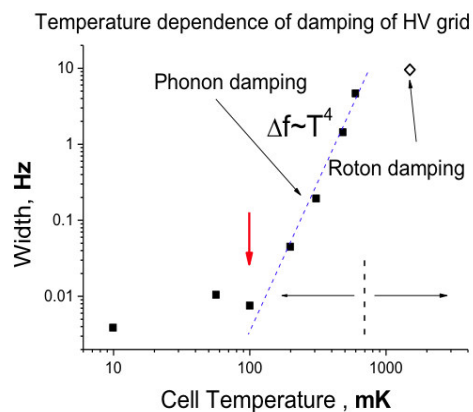
Процесс получения температур ниже 1 К связаны так же с гелием-3 и гелием-4. Это откачка паров жидкого гелия, адиабатическое растворение He-3 в He-4, охлаждение при росте давления вдоль кривой плавления He-3. Охлаждение достигается так же путем адиабатического размагничивания парамагнитных солей и спинов ядер металлов после предварительного охлаждения жидким гелием.

Одним из способов получения информации о степени возбуждения в жидком гелии используют колеблющиеся в жидкости твёрдые тела, добротность которых как осцилляторов будет определяться как степенью совершенства изготовления такого осциллятора, так и количеством возбуждений в сверхтекучем гелии. Пример таких осцилляторов приведен на рис. 1.



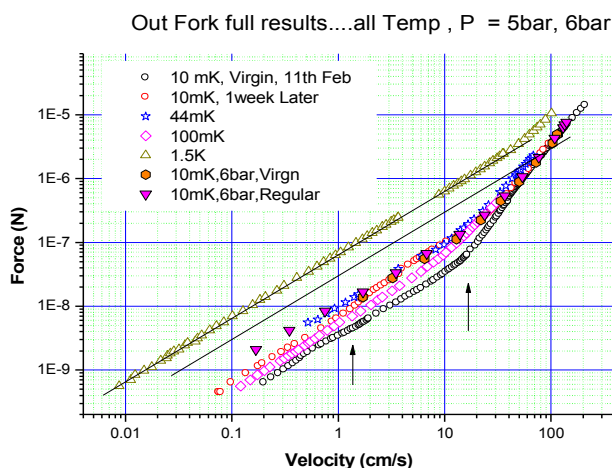
*Рис. 1. Примеры резонансных систем, используемых для изучения и генерации возбуждений в сверхтекучем гелии при низких температурах. Слева: сетчатая пластина, возбуждаемая электрическим полем в двустороннем конденсаторе. Сетка служит центральной пластиной конденсатора, одна внешняя пластина при приложении постоянного электрического поля порядка 1 кВ и небольшого переменного создает движущую силу, вторая пластина с другой стороны регистрирует амплитуду колебаний сетки в резонансных условиях. В центре: проволочный сверхпроводящий резонатор, колеблющийся при протекании переменного тока в магнитном поле. Справа: кварцевый камертон (“tuning fork”), применяемый в электронных наручных часах.*

Добротность таких осцилляторов при низких температурах может достигать нескольких сотен тысяч в вакууме, в жидком гелии эта величина несколько меньше, резонансные частоты в сверхтекучем гелии немного уменьшаются в силу дополнительной присоединённой массы жидкости. Существенное влияние на добротность колеблющегося в сверхтекучем гелии тела как резонансной системы и, соответственно, на ширину резонансного пика оказывают влияние тепловые возбуждения в системе (рис.2)



*Рис.2. Температурная зависимость ширины резонанса вибрирующей сетки в сверхтекучем гелии при малых амплитудах колебаний. При температурах выше 1 К поглощение энергии колебаний сетки на ротонах, ниже 100 мК – добротность определяется механическими потерями в самой сетке, в промежуточной области - рассеянием на тепловых фононах.*

Стоит отметить, что наряду с указанными выше тепловыми возбуждениями в сверхтекучем гелии существует особый вид возбуждений, который связан с квантовыми особенностями сверхтекучей компоненты – квантованием вихревого движения с моментом движения кратно кванту циркуляции  $\oint v_s \cdot dr = n \kappa$ , где  $\kappa = \frac{2\pi\hbar}{M}$  и  $M=4$  для  $^4\text{He}$  и  $M=6$  для  $^3\text{He}$  (спаривание двух фермионов для образования одного бозона). Радиус кора вихря составляет  $a_0 \approx 1 \text{ \AA}$  для  $^4\text{He}$  и  $a_0 \sim 800 \text{ \AA}$  для  $^3\text{He}$ . Квантовые вихри всегда существуют в сверхтекучем гелии, концентрация которых так же зависит от температуры. Квантовые вихри могут генерироваться любыми движущимися в гелии предметами при достижении ими критических скоростей. Для генерации одиночных вихревых колец после распада турбулентного состояния достаточно скоростей в  $1 \text{ cm/s}$  (первая критическая скорость). Переход в турбулентное состояние определяется изменением зависимости силы сопротивления движению от скорости с линейной ( $F \sim v$ ) к квадратичной ( $F \sim v^2$ ) (рис.3) и происходит при скоростях  $\sim 15 \text{ cm/s}$  (вторая критическая скорость). Стоит отметить, что наблюдать первую критическую скорость удается лишь при достаточной концентрации остаточных вихрей, что связано с их пинингом на осциллирующей системе. Температурой определяются и характерные времена распада неравновесной вихревой структуры.



*Рис. 3. Зависимость скорости движения кварцевого камертона от приложенной к нему силы в сверхтекучем гелии при разных температурах. Стрелками обозначены первая и вторая критическая скорости. Различие в генерации вихревой системы в зависимости от предыстории сверхтекучей турбулентности.*

Описанные выше резонансные системы оказались очень чувствительными не только к тепловым возбуждениям сверхтекучего гелия, но и к неравновесным вихревым возбуждениям, генерируемым контролируемым образом. Так при проведении экспериментов при базовой температуре рефрижератора ( $T=10 \text{ mK}$ ) генерируемые одним кварцевым камертоном (генератор, со скоростью движения выше  $15 \text{ cm/s}$ ) вихри регистрировались другим камертоном (детектор, с малой амплитудой колебаний, ниже первой критической скорости) на расстоянии в  $1 \text{ cm}$ . При этом генерация генератором турбулентного состояния приводило к резкому уменьшению отклика детектора на возбуждения, что свидетельствует об экранировке движения вихрей при турбулентности их взаимодействии и реконекции.

Таким образом экспериментальные исследования показали, что сверхтекучий гелий при нулевых температурах может служить примером физического вакуума, тепловые возбуждения в котором исчезающе малы. Неравновесные возбуждения в сверхтекучем гелии в виде квантовых вихрей можно генерировать и изучать с помощью механических осцилляторов, добротность которых (таких как кварцевые камертоны, колеблющиеся мембраны) могут достигать величин в несколько сотен тысяч.

Работа была поддержана грантом РФФ 14-22-00259.