



Рис. 2. Схема прибора для измерения взаимного трения вихрей в ^3He : 1 — возбуждающие и регистрирующие электроды, 2 — капилляр заполнения, 3 — колеблющаяся диафрагма, 4 — квантованные вихревые линии

щими токами в ^3He . В его диссертации [1] подробно обсуждаются принцип работы и конструкционные особенности этого прибора. Колебания относительно оси x_1 дают стандартный способ измерения доли сверхтекучей компоненты. Сильно вырожденные моды колебаний вокруг осей x_2 и x_3 были использованы для определения незатухающего углового момента вдоль оси x_1 , который возникал благодаря гироскопической связи между этими модами. Вращение криостата вокруг оси x_1 использовалось для возбуждения незатухающих токов и для калибровки системы при помощи кориолисовой силы. Эти эксперименты показали, что незатухающие токи влияют на текстурную релаксацию, связанную с колебаниями вокруг x_1 . Регистрация этого эффекта оказалась наиболее точным способом обнаружения незатухающих токов в A -фазе, которые существенно меньше, чем в B -фазе.

За последние несколько лет Тим Беван разработал в Манчестере уникальный механический прибор для исследования взаимного трения вихрей во вращающемся ^3He . В ^4He для этих целей используется второй звук, однако малая энтропия и большая вязкость ^3He приводят к сильному затуханию этой моды. Вместо этого мы использовали большую вязкость для того, чтобы заключить нормальную компоненту в область между двумя дисками с расстоянием между ними порядка 100 мкм, разделенную гибкой диафрагмой из каптона. Когда диафрагма колеблется в моде, показанной на рис. 2, сверхтекучая компонента вынуждена двигаться вдоль дисков. Это приводит к движению вихрей относительно нормальной компоненты и, следовательно, к взаимному трению. Действительная компонента этой силы может быть получена из величины уменьшения добротности диафрагмы. Но так как в этой системе существуют две вырожденные моды с ортогональными линиями узлов, то силу реакции, перпендикулярную $v_s - v_n$ можно найти, измеряя взаимодействие между этими модами. В принципе, измерение силы реакции является ни чем иным, как

регистрацией незатухающих токов при помощи гироскопа на переменных токах. К настоящему моменту мы получили высококачественные данные для обеих компонент силы взаимного трения в B -фазе [2]. Наблюдение этого эффекта в A -фазе до сих пор было существенно менее воспроизводимым. Мы предполагаем, что это происходит из-за непостоянной текстуры, которой мы пока не можем управлять.

Список литературы

1. Gammel P L *Ph. D. Thesis* (Cornell, 1987)
2. Bevan T DC, Manninen A J, Cook J B, Armstrong A J, Hook J R, Hall H E *submitted to Phys. Rev. Lett.*

Перевел С.Р. Закасов

PACS numbers: 67.40.Hf

Проскальзывание фазы в сверхтекучести

Э.Ж.-А. Вароко

Введение

В данном докладе описываются современные эксперименты со сверхтекучим течением в субмикронной щели, где имеют место в сверхтекучем ^3He эффект аналогичный стационарному эффекту Джозефсона и диссипативное проскальзывание фазы в ^4He . Современные обзоры на эту тему можно найти в [1].

Первые шаги в исследовании поведения сверхтекучих жидкостей при течении через каналы микронных размеров были сделаны П.Л. Капицей в 1937 г. [2] в серии широко известных экспериментов, в которых он показал, что если ^4He и обладает вязкостью, то эта вязкость заведомо меньше 10^{-9} П, т.е. на четыре порядка меньше вязкости жидкого водорода, вещества с наименьшей известной на тот момент вязкостью. Для описания этого замечательного свойства он ввел слово "сверхтекучесть". Его открытие привело к поиску механизма, который может ограничить скорость течения сверхтекучей жидкости, при превышении которой появляется диссипация.

С этих пор данная проблема долгое время приковывала внимание многих физиков. Впервые она была решена Ландау, который нашел предел для скорости. Затем Фейнман пришел к пониманию, что вихри играют основную роль в появлении диссипации при движении жидкости через тонкий канал. Он привел интуитивные соображения, из которых установил скорость \dot{n} формирования вихрей в трубке диаметром d . Требуя, чтобы энергия, необходимая для образования вихревого кольца, по размерам сравнимого с размерами трубки, была бы меньше кинетической энергии текущей жидкости, он получил оценку для критической скорости. Эта оценка дает зависимость критической скорости от размеров трубки, но не от давления и температуры, если не рассматривать очень малый вклад от длины когерентности a_0 . Эта зависимость хорошо описывает широкий класс экспериментов с критической скоростью. Но в последнее время появились новые, не укладывающиеся в приведенную схему. Они будут рассмотрены ниже.

Надо заметить, что у Фейнмана вывод количества образованных вихрей у конца трубки в единицу времени есть ни что иное, как формула эффекта Джозефсона для переменного тока:

$$\hbar \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\mu,$$

где ϕ — фаза волновой функции и μ — химический потенциал. При течении через трубку с шириной порядка длины когерентности можно ожидать, что джозефсоновское соотношение, связывающее ток J с разностью фаз между концами, должно быть верным.

В идеальном случае чисто квантового эффекта оно имеет вид

$$J = J_c \sin \delta \phi,$$

где J_c — максимальный ток, который может течь без диссипации через тонкое соединение. В неидеальном случае, таком, как сверхпроводимость или тонкая щель, для сверхтекучей жидкости синусоидальный закон не является столь обязательным, но в сдвиге фаз сохраняется периодичность с периодом 2π . Это следует (на эвристическом уровне) из того факта, что волновая функция определяется по модулю как 2π .

Описание эксперимента

В 1965 г. были предприняты эксперименты с целью подтвердить существование в сверхтекучем ^4He эффектов типа Джозефсона, так как они важны для понимания критической скорости в сверхтекучей жидкости и, вообще, сверхтекучести в целом. Ридчардс и Андерсон первыми сообщили о наблюдении явления смещения частоты, которые они отнесли к нестационарному эффекту Джозефсона. Ряд проведенных экспериментов для подтверждения сделанного вывода не дал однозначных результатов. Был сделан вывод, что эффект типа Джозефсона в сверхтекучести замаскирован хаотически расположенными взаимодействующими между собой вихрями.

Открытие в 1972 г. Ошеровым, Ричардсоном и Ли сверхтекучего ^3He вновь возбудило интерес к этим вопросам, так как длина когерентности куперовской пары в ^3He на два порядка больше, чем в ^4He , где она атомных масштабов. Таким образом, это давало возможность проведения экспериментов, в которых микроканал был бы действительно слабой связью между двумя объемами со сверхтекучей жидкостью, что в действительности могло привести к наблюдаемому эффекту Джозефсона.

Подобные эксперименты были поставлены Оливером Авенелом и автором в ряде лабораторий, включая Национальный научно-исследовательский центр и комиссариат по атомной энергии в Орсе и Сакле. Микроканал в форме щели размером $0,3 \times 5 \text{ мкм}^2$ был прорезан при помощи сфокусированного пучка ионов галлия в никелевой фольге толщиной $0,2 \text{ мкм}$. Эта фольга была вмонтирована в резонатор Гельмгольца с гибкой мембраной. Мембрана, возбуждаемая электростатически, использовалась для впуска и выпуска жидкости из ячейки. Ее движение контролировалось электродинамическим способом, для чего использовался обычный высокочастотный СКВИД как усилитель для достижения очень высокого разрешения. Резонансная частота

лежала в интервале $1\text{--}30 \text{ Гц}$. Для обработки данных и фильтрации применялась высокопрецизионная цифровая техника. Разрешение прибора позволяло определять перемещение мембраны $5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ за 20 мс . Второй канал, параллельный микроканалу, позволял быстрее выравнять давления и температуры. Но это также давало возможность существовать постоянному току в кольце двух объемов и этих двух каналов. Описанная установка является прямым гидродинамическим аналогом сверхпроводящего СКВИДа, и ее работа может быть очень хорошо промоделирована на компьютере.

Эффект типа джозефсоновского в сверхтекучем ^3He

После некоторых ранних результатов, полученных на ^4He , в частности после наблюдения ступенчатого распределения амплитуды при динамическом воздействии резонатора, что является характерным для высокочастотного СКВИДа, в ячейку поместили ^3He и охладили до температуры порядка мК. В ^3He наблюдалась ступенчатая зависимость, аналогичная зависимости в ^4He , что является свидетельством нелинейного поведения, которое возникает в случае слабой связи. При этом, как и ожидалось, связь тока и фазы оказалась близкой к синусоидальному закону при нулевом давлении и для температур $T > 0,8T_c$. Таким образом, наблюдался почти идеальный стационарный эффект Джозефсона. Отличия от чистой синусоиды были целиком обусловлены гидродинамическими эффектами течения идеальной жидкости при втекании и вытекании из тонкой щели. Ниже $0,7T_c$ или при более высоких давлениях длина когерентности становится меньше размеров щели, и связь тока и фазы становится более сложной и даже зависит от времени, что говорит о возможности возникновения сложных текстур. Интересный результат состоит в том, что слабая связь проявляется независимо от того, фаза A или B превалирует в объеме. Это говорит о том, что на параметр порядка в случае слабой связи оказывает большое влияние близость стенок. Его тонкая структура и влияние на него текстуры в объеме остаются интересными проблемами, требующими дальнейшего изучения.

Обсуждение экспериментов с ^4He

Как говорилось выше, ^4He , несмотря на многочисленные эксперименты и даже современные, проведенные в университетах Беркли и Миннесоты, далек от полного понимания, но уже преподнес ряд сюрпризов. Хотя кажется достаточно ясным, что проскальзывание фазы соответствует скачку разности фаз вдоль щели на 2π , порог, при котором это проскальзывание происходит, меняется с температурой как $1 - T/T_0$ ($T_0 \sim 2,45 \text{ К}$) примерно от $1,9 \text{ К}$ до $\sim 0,15 \text{ К}$. Ниже этой температуры характер поведения резко меняется, и оно становится не зависящим от температуры. Однако все еще наблюдается слабая зависимость порога от давления: он уменьшается на 12% при изменении давления от 0 до 24 бар , а также очень интересная зависимость от малой концентрации примеси ^3He (порядка 10^{-9}): ниже температуры, которая, как найдено, зависит логарифмически от концентрации примеси, порог резко падает. Эти результаты окончательно показывают, что процесс, при помощи которого новые вихри высвобождаются из щели, — зародышеобразование и т.д. — имеют очень малую энергию: порядка нескольких кельвинов. Более того,

температурная зависимость свидетельствует о том, что этот процесс подвержен влиянию температуры при $T > 0,15$ К. Кроме того, тем же самым путем можно выявить флуктуации и их температурную зависимость. Плато ниже $0,15$ К существует благодаря квантовому туннелированию, когда нулевые колебания различных мод фононов начинают преобладать над тепловыми возбуждениями при существенно низких температурах.

Эти наблюдения могут быть объяснены, если предположить, что очень малые полукольца образуются в определенных местах, где скорость сверхтекучего потока максимальна, на шероховатостях непосредственно вблизи резких изгибов стенок щели. Эта точка зрения поддерживается в работах Воловика (1972 г.), Сонина (1982 г.) и Мюрхеда–Винена Доннели (1984 г.). Проблема может быть решена приближенно, и энергетический барьер рождения $E_a(v_s)$ можно оценить как функцию скорости сверхтекучей жидкости v_s . Скорость рождения частиц согласно результату, полученному впервые Гольданским (1959 г.) и затем независимо Аффлекком (1981 г.), позволяет связать частоту попыток $\omega_0/2\pi$ с температурой перехода T_q между температурным и квантовым режимами:

$$\hbar\omega_0 = 2\pi k_B T_q.$$

Скорость рождения и, следовательно, другие наблюдаемые величины в данной задаче можно оценить, если оценить еще один параметр, который прямо не определен, а именно, параметр кора a_0 малого вихря, лежащего вблизи стенки. Сравнение результатов вычислений и эксперимента дает значение $a_0 \approx 5\text{Å}$.

Влияние ^3He на критическую скорость проскальзывания фазы также представляется интересным для оценки величины скорости сверхтекучей жидкости в местах зародышеобразования, что нельзя измерить напрямую. Детальные измерения критической скорости как функции температуры низкотемпературного конца квантового плато для концентраций примеси в диапазоне от $0,9 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-7} приводят к величине локальной скорости сверхтекучей жидкости в местах зародышеобразования в нашей щели равной 22 м/с, что согласуется с величиной, получаемой из расчетов при $a_0 = 5\text{Å}$.

Таким образом, картина механизма проскальзывания фазы на 2π следующая: 1) зародышеобразование имеет место, когда создаются соответствующие условия, 2) только что созданный микроскопический вихрь движется в сверхтекучей жидкости по законам гидродинамики идеальной жидкости по крайней мере до тех пор, пока можно пренебречь трением нормальной компоненты сверхтекучей жидкости. Он растет в расходящемся потоке, преобразуя кинетическую энергию потенциального течения в энергию вихрей. Таким образом, квантовомеханическая фаза испытывает изменение на 2π на всех возможных путях при переходе от одной стороны щели к другой, приводя в целом к уменьшению на $2\pi n$, где n — число поворотов фазы вдоль щели.

Этот сценарий принимает во внимание свойства проскальзывания фазы, температурную зависимость (выше $0,15$ мК) и независимость критической скорости от размеров конца щели. Другие явления, включая проскальзывания фазы, кратные 2π , при скоростях, которые могут быть меньше критической скорости зародышеобразования для проскальзывания фазы на

2π , наблюдались также для больших размеров устья и для высоких частот резонатора Гельмгольца. Эти явления исследуются в настоящее время, но они не описываются данным механизмом и могут представлять переход от зародышеобразовательного режима к более общему с критической скоростью фейнмановского типа.

Список литературы

1. Avenel O, Varoquaux E J-A *Physica B* **197** 306 (1994)
2. Kapitza P L *Nature*, Jan. 8 (1938)

Перевел Д.В. Ефремов

PACS numbers: 67.57.-z; 67.57.Lm

Спиновые токи в сверхтекучей и нормальной ферми-жидкостях

И.А. Фомин

Явление сверхтекучести гелия, открытое П.Л.Капицей в 1937 г. вновь стало центром внимания в физике конденсированного состояния с начала 70-х годов. Произошло это в связи с открытием сверхтекучих фаз более легкого изотопа гелия — гелия-3. В отличие от гелия-4 атомы гелия-3 — фермионы, поэтому сверхтекучесть здесь возникает, как в сверхпроводниках, в результате куперовского спаривания. Происходит это при гораздо более низких, чем в гелии-4, температурах — порядка 1 мК.

Существенно новым по сравнению с обычными сверхпроводниками является то обстоятельство, что в гелии-3 куперовские пары имеют спин, равный 1 . Это отличие приводит к целому ряду нетривиальных свойств, в частности к тому, что конденсат таких пар может переносить спиновый ток, не связанный с потоком массы.

При спаривании со спином нарушается симметрия ферми-жидкости по отношению к поворотам всех спинов на произвольный угол. В результате основное состояние оказывается вырожденным по отношению к трем непрерывным параметрам (например, углам Эйлера), определяющим такой поворот. Точное вырождение имеет место, когда эти углы постоянны в пространстве. Существуют, однако, состояния жидкости, близкие к основному, в которых углы поворота медленно изменяются в пространстве. В таких состояниях текут токи, переносящие компоненты спина, сопряженные соответствующим углам. Эти токи стремятся восстановить однородность конденсата, а не термодинамическое равновесие, их вклад в перенос спина обратим и их обычно называют сверхтекучими спиновыми токами, чтобы отличить от переноса спина квазичастицами, который возможен и в нормальной фазе. В Институте физических проблем им. П.Л. Капицы А.С. Боровиком-Романовым, Ю.М. Буньковым, В.В. Дмитриевым и Ю.М. Мухарским были поставлены эксперименты, в которых обнаружены и исследованы явления, обусловленные спиновыми токами. В первой части доклада был дан обзор этих работ вместе с теоретическими представлениями, которые развивались параллельно автором доклада.

Характерным проявлением сверхтекучести в гелии-4 является термомеханический эффект, т.е. аномально