

Высокая теплопроводность — следствие встречного потока двух жидкостей, так что теплопередача действительно происходит под влиянием процесса конвекции, как и предвидел Капица.

Теория Ландау имела большой успех и представляла собой блестящий вклад в развитие нашего понимания сверхтекучести. Но многие вопросы оставались открытыми. Почему спектр возбуждения имеет предложенный вид? Что происходит при высоких температурах, когда картина независимых возбуждений должна нарушаться? Устойчивый сверхтекучий поток может быть лишь метастабильным, каково же его конечное время жизни? Какова в действительности природа упорядоченного состояния в "гелии-II"? Происходит ли там бозе-конденсация в какой-либо форме? Как конкретно это упорядочение связано со сверхтекучестью?

Существенный вклад в понимание формы спектра возбуждения был сделан Фейнманом в 1950-х годах. Развитие его идей, как и идей других ученых, к настоящему времени привело практически к полной ясности в этом вопросе. Свидетельства о том, что форма бозе-конденсата, в котором лишь около 10% атомов входят в конденсат даже при нулевой температуре, были получены как теоретически, так и из экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов. Было развито описание сверхтекучести, связывающее сверхтекучий поток с градиентами фазы "волновой функции конденсата" (ВФК); при этом стало ясно, что эта функция и есть подходящий параметр порядка в системе. Устойчивый сверхтекучий поток играет роль метастабильного состояния локального равновесия, в котором на фазу ВФК наложена связь (вследствие макроскопического положения конденсата); точно также наложение связей на параметр порядка в других системах может привести к метастабильным состояниям с нарушенной симметрией. Однако одного существования конденсата мало для того, чтобы обеспечить сверхтекучесть. Идеальный Бозе-газ не является сверхтекучим. Необходимо взаимодействие между частицами. Связующим звеном с теорией Ландау и формой спектров возбуждения стало понимание (сначала Боголюбовым), что взятые вместе взаимодействия конденсата и частиц приведут к тому, что низкоэнергетические возбуждения — это фононы. Интересно, кстати говоря, что соображения Фейнмана по поводу формы спектра возбуждения не содержат явных ссылок на присутствие конденсата.

Тот факт, что сверхтекучий поток связан с градиентами фазы ВФК в совокупности с требованием однозначности ВФК приводит к квантованию циркуляции в единицах h/m_4 , где m_4 — масса атома гелия. Это макроскопический квантовый эффект, в котором бозе-конденсация эффективно налагает условие равенства квантованных угловых моментов у всех атомов. Подобные же аргументы приводят к требованию, что сверхтекучая компонента может вращаться только при наличии свободных квантованных вихревых линий. Эти идеи теоретически были разработаны Онсагером и независимо Фейнманом; приятно напомнить, что их первоначальное теоретическое подтверждение было получено в Мондовской лаборатории в Кембридже, которую основал Капица. С открытием квантованных вихревых линий у нас заполнились основные пробелы в понимании механизма сверхтекучего ^4He , хотя многое еще предстоит сделать, чтобы понять все детали.

Квантованные вихревые линии также полезны для анализа метастабильности сверхтекучего потока. В принципе, устойчивый сверхтекучий поток в любой момент может измениться при прохождении через него одной или нескольких вихревых линий (приводя к явлению, которое Фил Андерсон назвал сбросом (проскальзыванием) фазы параметра порядка). Однако, как легко видеть, этому процессу противостоит энергетический барьер, лишь после преодоления которого (либо из-за конечности температуры, либо путем квантового туннелирования) может произойти распад. Оба эти варианта были объектом теоретических исследований и оба наблюдались экспериментально при специально подобранных условиях. Большая часть этой работы была проведена совсем недавно.

В докладе хватило времени лишь на упоминание большинства важнейших исследований, проведенных в последние тридцать или сорок лет с жидким ^4He : тщательный анализ возбуждений в сверхтекучем гелии и их взаимодействия; исследование фазового перехода в сверхтекучее состояние, сыгравшее важную роль в развитии наших понятий о подобном рода фазовых переходах; поведение сверхтекучего гелия в замкнутых геометриях, таких, как тонкие пленки. Примерами интересных исследований, которые проводятся в настоящее время, могут быть изучение небольших скоплений атомов гелия (насколько велико должно быть такое скопление, чтобы обнаружить сверхтекучие свойства?) и образование вихревых линий при переходе λ -линии посредством уменьшения давления (которое должно быть аналогично образованию космических струн в ранней Вселенной). Хотя во многих отношениях ^4He хорошо изучен, он все же остается предметом интересного и важного с фундаментальной точки зрения исследования.

Перевел В.А. Субботин

Научное консультирование по переводу В.В. Дмитриев

PACS numbers: 67.57.Fg

Поток и текстуры в сверхтекучем $^3\text{He-A}$

Г.Е. Холл

Тот факт, что сверхтекучий поток в A -фазе ^3He взаимодействует с жидкими кристаллическими текстурами — одно из качественно новых явлений, обусловленное богатой структурой параметра порядка в сверхтекучем ^3He ; я уверен, что оно оказало бы воздействие на неугасающий интерес Капицы к новым и необычным эффектам.

Все началось с доклада Дэвида Мермина "Игры с $^3\text{He-A}$ " [1], в котором он показал, что односвязный объем $^3\text{He-A}$ должен иметь хотя бы одну текстурную сингулярность на своей поверхности, вокруг которой существуют два кванта циркуляции. Мермин назвал эту сингулярность "буджум" по причинам, которые станут ясными из дальнейшего.

Орбитальная часть параметра порядка A -фазы — это векторная триада, причем как поток, так и текстуры представляются в виде вращений этой триады; взаимо-

действие же возникает потому, что трехмерные конечные вращения не коммутируют. Направление анизотропии жидкого кристалла $\hat{\mathbf{i}}$ — направление орбитального углового момента куперовских пар, так что пространственное распределение $\hat{\mathbf{i}}$ дает нам текстуру жидкого кристалла. Но вращения вокруг $\hat{\mathbf{i}}$ приводят к изменению фазы, поэтому градиенты таких вращений соответствуют сверхтекучему потоку. При этом граничное условие нормальности вектора $\hat{\mathbf{i}}$ стенке приводит к тому, что поверхностные сингулярности необходимы топологически. Взаимосвязь между потоком и текстурами наиболее явно выражается в терминах модифицированной теоремы о циркуляции для $^3\text{He-A}$:

$$\oint_C v_S dr = \frac{\hbar}{2m} [2\pi n + A(D)].$$

В этом уравнении неквантованный член $A(D)$ получается с помощью следующего построения. Для каждой точки контура C , вдоль которого происходит интегрирование циркуляции, отметим текущее направление $\hat{\mathbf{i}}$ точкой на поверхности единичной сферы. Это даст отображение замкнутой кривой C в замкнутую кривую D на поверхности единичной сферы; $A(D)$ — области на сфере, ограниченной кривой D слева по направлению движения, соответствующему направлению интегрирования вдоль C . Величина $A(D)$ может таким образом плавно меняться от нуля до 4π . Изменение текстуры со временем, которое связано с таким движением, приведет к изменению циркуляции по заданному пути на две единицы. Мермин показал, что подходящий выбор движения буджума может вынудить сверхтекучий ток "мягко и внезапно исчезнуть вдаль" — отсюда и название "буджум"¹. С другой стороны, в статической текстуре циркуляция может плавно меняться от одного пути к другому; это делает возможным существование несингулярных вихревых структур.

На текстуру $\hat{\mathbf{i}}$ можно влиять магнитным полем из-за ее дипольного взаимодействия с вектором $\hat{\mathbf{d}}$, который перпендикулярен спине куперовских пар. Группа Уитли [2] обнаружила, что после определенной последовательности изменений магнитного поля образец $^3\text{He-A}$ может оказаться в состоянии, в котором поглощение проходящего через него ультразвука осциллирует со временем. При этом осцилляции практически не затухают, что указывает на периодические движения оси анизотропии $\hat{\mathbf{i}}$ (рис. 1). Изменение периода осцилляций при нагревании и охлаждении образца указывает на то, что движение не бездиссипативно и обусловлено сверхтекучим потоком. Этот поток возникает из-за противотока нормальной и сверхтекучей компонент, который в свою очередь возникает из-за притока тепла извне. Таким образом, этот теплоприток, в конечном счете, и является источником движения. Этот эффект может быть описан полуколичественно с использованием численного интегрирования уравнения орбитального движения для модельной текстуры. Главный результат состоит в том, что сам сверхтекучий поток вызывает такую прецессию текстуры, которая приведет к диссипации. Если поток не поддерживается внешним источником, диссипация приведет к распаду потока, и мы будем иметь предсказанное Мермином разрушение устойчивого тока прецессией буджума.

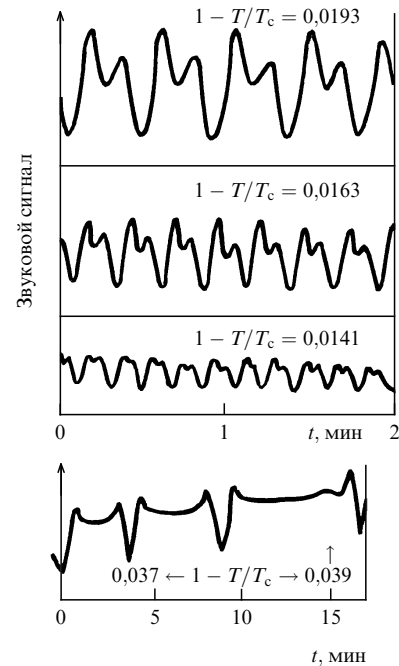


Рис. 1. Ультразвуковой сигнал, свидетельствующий о текстурных осцилляциях в $^3\text{He-A}$ ($P = 33,9$ бар, $f = 25$ МГц) [2]

Нелинейная диссипация потока, связанного с движением текстур, была далее изучена в первых экспериментах с торсионным осциллятором в Манчестере [3]. Одним из наиболее впечатляющих результатов наблюдений была зависимость от предыстории: при данных условиях диссипация была максимальна, если в эксперименте проводилось охлаждение ниже T_c , в то время как амплитуда осцилляций была велика. Была построена довольно успешная модель усредненной динамики текстур, в которой зависящие от предыстории эффекты моделировались при помощи переменной плотности поверхностных сингулярностей.

Позднее в серии экспериментов по вращению ^3He в Хельсинки была изучена еще одна черта взаимодействия между потоком и текстурами, статическими текстурами с завихренностью. Простейшей несингулярной завихренной текстурой является двухквантовый вихрь Андерсона–Тулуза, в которой направление вектора $\hat{\mathbf{i}}$ на больших радиусах меняется на противоположное. Ясно, что из таких вихрей легко складывается решетка. В большинстве экспериментов, однако, в качестве инструмента использовался ЯМР, и, стало быть, магнитное поле, параллельное оси вращения. При этом оно сильно наклоняло вектор $\hat{\mathbf{i}}$ в сторону перпендикуляра к оси, вращательная симметрия нарушалась, ствол вихря расщеплялся на две части (например, на круговую и гиперболическую текстуры), в каждой из которых был один квант циркуляции. Различные возможные вихревые структуры обладали характерными ЯМР-модами, так что главным инструментом при их изучении было определение сдвигов частот ЯМР. Свидетельством связи с вихрями был сигнал, пропорциональный угловой частоте Ω .

Однако даже более чем через двадцать лет с момента открытия это явление может преподнести сюрпризы. Совсем недавно [4] в Хельсинки было обнаружено, что после быстрой серии вращений сначала в одном направ-

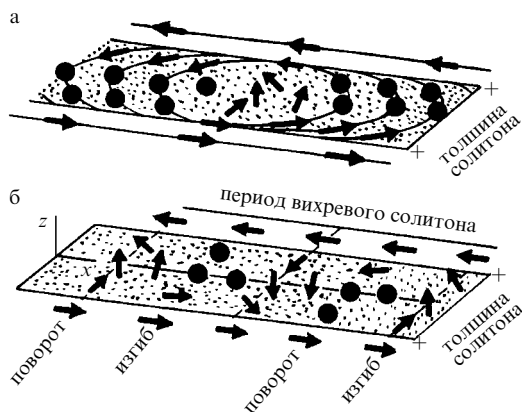


Рис. 2. Установление солитонной стенки с круговыми и гиперболическими вихрями при формировании вихревого листа. Стенка солитона находится в плоскости xz , вихри параллельны оси z , поле \mathbf{H} перпендикулярно оси x . Стрелками обозначен единичный вектор \hat{i}

лении, а затем в другом, может быть получено состояние с необычной ЯМР-частотой и сигналом, пропорциональным $\Omega^{2/3}$. Это состояние интерпретировалось как определенный тип вихревого листа. Считается, что первоначальная подготовительная процедура каким-то образом приводит к возникновению солитонной стенки параллельной оси вращения, на которой вектор \hat{i} меняет направление на 180° относительно \hat{d} . Как только такая стенка возникла, требуется совсем мало энергии, чтобы расположить в чередующейся последовательности одно-квантовые круговые и гиперболические вихри, образующие вихревой лист, структура которого показана на рис. 2. Площадь построенного вихревого листа определяется соотношением между поверхностной энергией и энергией встречного потока, и именно это соотношение является причиной найденной экспериментально зависимости $\propto \Omega^{2/3}$.

Список литературы

1. Mermin N D *Physica B – C* **90** 1 (1971)
2. Paulson D N, Krusius M, Wheatley J C *Phys. Rev. Lett.* **37** 599 (1976)
3. Gay R, Bagley M, Hook J R, Sandiford D J, Hall H E J. *Low Temp. Phys.* **51** 227 (1983)
4. Parts Ü, Thuneberg E V, Volovik G E et al. *Phys. Rev. Lett.* **72** 3839 (1994)
5. Mermin N D *Quantum Fluids and Solids* (Eds S B Trickey, E D Adams, J W Dufty) (New York–London: Plenum Press, 1977) p. 3 [Перевод на русский язык: *Квантовые жидкости и кристаллы* (Ред. А С Боровик-Романов) (Москва: "Мир", 1979) с. 9–30]

Перевел А.В. Субботин

Научное консультирование по переводу

В.В. Дмитриев, И.А. Фомин

PACS numbers: **01.65.** +g

Капица и Ланкастер

А.М. Гено

Конечно, название доклада — это шутка. Я не думаю, что Петр Капица когда-то гостил в Ланкастере. Но есть надежда, что его душа побывала там. Она основана на

деятельности в последние годы группы специалистов Ланкастера по сверхнизким температурам. Постоянными членами этой группы были Джордж Пикетт, я, Ян Миллер, Ян Бредли, Мартин Уорд, а также подключившийся вскоре Шон Фишер.

Двумя главными увлечениями Капицы были способы получения низких температур и сверхтекучесть. Позвольте мне кратко описать их по порядку.

1) Что касается способов получения низких температур, они получили дальнейшее развитие после Капицы — в основном благодаря доступности изотопа ^3He и изобретению рефрижератора растворения, с помощью которых стабильное удержание температур от 2 до 5 мК стало сравнительно несложной задачей. Стартовал с этой площадки и используя адиабатическое размагничивание ядер Cu , теперь мы можем охлаждать жидкий ^3He до состояния сверхтекучести при температурах порядка 100 мК. При охлаждении решетки атомов металлов, как таковой, нами недавно была достигнута температура 7 мК [1]. Эта температура была зафиксирована платиновым ЯМР-термометром в виде набора проволочек, находящихся в тепловом контакте с медной ступенью ядерного размагничивания. Размагничивание началось с магнитного поля 6 Тл после предварительного охлаждения до температуры около 5 мК. Этот эксперимент проводился с целью прояснения механизма спин-решеточной релаксации в меди, причем измеряемой была температура решетки меди.

Имя Капицы хорошо известно физикам, работающим с низкими температурами в связи с понятием "граничного сопротивления Капицы" на границе жидкого гелия и твердого тела. Издавна использование теплообменников из спеченного порошка было черной магией искусства охлаждения. Как раз сейчас мы заканчиваем серию измерений, которые нацелены на прояснение механизма теплового сопротивления между образцами с нанесенным на них слоем спеченного серебряного порошка и насыщенного раствора $^3\text{He} - ^4\text{He}$ в рефрижераторе растворения. При этом использовался обычный субмикронный порошок серебра, имеющийся в продаже и широко используемый в производстве теплообменников. Хотя этому и не было теоретического обоснования, издавна считалось, что температурная зависимость эффективной граничной проводимости в растворе есть $\propto T^{-2}$. Наши же последние измерения свидетельствуют о переходе от медленной зависимости (грубо $T^{-1.5}$) при высоких температурах к $\propto T^{-3}$ при низких, как это и должно следовать из любой реалистичной теории, основанной на фоновом механизме. В зависимости от толщины слоя порошка переход происходит в области от 30 до 10 мК. Высокотемпературное поведение объясняется тем, что проводимость имеет место лишь в гелии в порах спеченного порошка. Этот результат очень важен для оптимального конструирования теплообменников в рефрижераторе растворения. Он показывает, что тонкие слои более пригодны при высоких температурах, а при 5 мК необходимо брать очень толстые (скажем, 4 мм). Он также весьма обескуражит тех, кто пытается найти сверхтекучесть ^3He в растворах $^3\text{He} - ^4\text{He}$, так как $\propto T^{-3}$ — это хуже, чем $\propto T^{-2}$.

2) Несколько слов о сверхтекучем ^3He . В этой области влияние Капицы на группу Ланкастера оказалось особенно сильным благодаря идеям и советам ученых из Института Капицы в Москве. В полностью изотропной B -фазе