

3. Kapitza P L The Liquefaction of Helium by an Adiabatic Method *Proc. Roy. Soc. A* **147** 189 (1934)
4. Капица П Л и Данилов И Б Детандерная установка для ожижения гелия *ЖТФ* **31** 457 (1961)
5. Капица П Л Расчет гелиевого ожижительного цикла с каскадным включением детандеров *ЖТФ* **29** 427 (1959)
6. Капица П Л Турбодетандер для получения низких температур и его применение для ожижения воздуха *ЖТФ* **9** 99 (1939)
7. Курташин В Ф *частное сообщение*

Перевел В.А. Субботин

Научная консультация по переводу — В.М. Бродянский

PACS number: 67.40.

Жидкий гелий-4

В.Ф. Вайнен

В докладе дан краткий очерк истории открытия сверхтекучести в жидком ^4He и развития наших представлений об этом явлении, рассчитанный на широкую аудиторию.

Впервые гелий был оживлен и охлажден ниже 2 К Камерлинг-Оннесом в 1908 г., но только в 1930 г. стало ясно, что у этой жидкости есть две фазы: "гелий-I" при $T \gtrsim 2$ К и "гелий-II" при более низких температурах; переход из одной фазы в другую сопровождается резким скачком теплоемкости (λ -точка). К этому времени также стало ясно, что твердой фазы не существует ни при какой температуре, пока давление не превысит 25 атм.

Первое ясное указание на то, что "гелий-II" имеет аномальные свойства было сделано В.Х. Кеезом и А.П. Кеезом в 1936 г., отметившими очень высокое значение теплопроводности. Аллен, Пайерлс и Уддин показали, что такое высокое значение аномально по своей природе, причем, поскольку эффективная теплопроводность зависит от градиента температуры ∇T и размеров канала, оно эффективно стремится к бесконечности при $\nabla T \rightarrow 0$.

Именно в связи с этим в 1938 г. Капица сделал свое первое важное открытие. Он утверждал, что наблюдаемое высокое значение теплопроводности обусловлено определенного рода конвекцией, причем этот процесс весьма эффективен благодаря очень низкой вязкости. До этого вязкость уже была получена из результатов измерений затухания колебаний диска в жидкости; ее значение оказалось действительно скорее низким, однако не в такой, аномальной, степени. Капица предположил, что этот факт не противоречит реальному очень низкому значению величины вязкости, так как при проведении эксперимента число Рейнольдса могло быть очень большим и поток был турбулентным. Поэтому Капица решил измерить вязкость, наблюдая поток через две тонкие трубки, расположенные между двумя оптическими плоскостями. Он обнаружил, что вплоть до критических скоростей в несколько десятков см/с поток двигался без всякого видимого трения. Это было первым сообщением о сверхтекучести, хотя его публикация в *Nature* и сопровождалась заметкой о том же открытии, сделанном независимо Алленом и Майзнером. Следующие два года дали ряд различных связанных с этим явлений: термомеханический (фонтанный) эффект Аллена-Джонса, перетекание по пленке Роллина-Саймона и Даунта-Мендельсона, механо-калорический

эффект Даунта-Мендельсона. Важные, подробные, оказавшие большое влияние результаты экспериментальных исследований природы процесса теплопередачи в "гелии-II", механико-теплого и термомеханического эффектов были опубликованы самим Капицей в 1941 г.

Это странное явление бросало серьезный вызов теоретикам, и интересно, что явление сверхтекучести приковало внимание некоторых наиболее известных в мире физиков-теоретиков: братьев Лондонов, Ландау, Онсагера, Фейнмана и многих других.

В основе интереса к этому явлению частично лежало то, что гелий — квантовая жидкость, а сверхтекучесть — квантовый эффект. Важность квантовых эффектов в жидком гелии, вероятно, была впервые осознана в 1934 г. Саймоном, отметившим, что невозможность выделить твердый гелий при низких давлениях — следствие ненулевой энергии основного состояния атомов.

Из третьего закона термодинамики следует, что при нулевой температуре жидкий гелий должен быть упорядочен. Поведение теплоемкости в λ -точке — типичный признак перехода порядок-беспорядок, поэтому казалось естественным предположить, что сверхтекучесть является следствием процесса упорядочения. В 1938 г. Фриц Лондон предположил, что упорядочение сопровождается бозе-конденсацией, как это происходит в теоретической модели идеального бозе-газа, и что сверхтекучесть — следствие присутствия бозе-конденсата. В конце концов, стало понятно, что эта гипотеза действительно верна, хотя и не в той непосредственной форме, которую предсказывал Лондон.

Важная идея о том, что сложное и с виду непредсказуемое поведение "гелия-II" может быть феноменологически объяснено в рамках двухжидкостной модели (смеси проникающих друг через друга нормальной и сверхтекучей компонент, которые могут иметь различные поля скоростей), впервые была развита Лондоном и Тиссой, однако их надежды на то, что сверхтекучая компонента и есть бозе-конденсат, были беспочвенны. Первый удовлетворительный фундамент для двухжидкостной модели был предложен Ландау в его замечательной статье, за которую, в конечном счете, он получил Нобелевскую премию в 1962 г. (странно, но Капица, открывший сверхтекучесть, не был лауреатом Нобелевской премии до 1978 г.). Ландау предложил свое описание жидкого гелия при низких температурах в терминах основного состояния, в котором газ слабо возбужденных состояний, удовлетворяющих определенному дисперсионному соотношению, представляет собой смесь фононов с малыми импульсами и ротонов с большими импульсами. Непосредственное экспериментальное подтверждение их спектра было получено много позже из экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов. Ландау удалось показать, что такая картина возбуждений приводит, по крайней мере, к частичному объяснению успеха двухжидкостной модели и, что особенно важно, дает правильную температурную зависимость плотностей сверхтекучей и нормальной компонент. Вскоре, после непосредственного экспериментального измерения этих плотностей, выполненного Андроникашвили, предсказания нашли свое подтверждение. Двухжидкостная модель также позволила сделать предсказание о существовании второго звука, обнаружение и изучение которого Пешковым явилось еще одним подтверждением теории Ландау.

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 подобного 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 ^3He -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 ^3He -A" [1], в котором он показал, что односвязный объем ^3He -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-