

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1996

Сверхтекучесть в ^3He : открытие и понимание

Д.Д. Ошеров

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 7 декабря 1996 г.)

PACS number: 67.57.-z

Открытие

Начиная работу над этой лекцией, я вспомнил то общее возбуждение, которое охватило область физики низких температур в 1971 г. Разрабатывались новые технологии охлаждения, и всем казалось, что интересная и важная новая физика просто ожидала, когда ее откроют в ультрахолодном мире, с тем, чтобы стать доступной для изучения с помощью этих технологий.

Я приехал в Корнелл для подготовки диссертации в области, которая называлась физикой твердого тела, но был быстро вовлечен в многообещающую область физики низких температур благодаря лекции Боба Ричардсона в конце 1967 г., в которой он рассказал, как работают криостаты растворения. В то время я работал ассистентом преподавателя вместе с Дэйвом Ли. Дэйв, похоже, считал меня достаточно способным и предложил присоединиться к его группе. К концу моего первого года в Корнелле Джим Сайтс, заканчивавший аспирантуру, и я соорудили криостат растворения, который впоследствии был использован при открытии сверхтекучести в ^3He .

Криостат растворения — это прибор, который использует ненулевую ($\sim 6\%$) растворимость жидкого ^3He в сверхтекучем ^4He при низких температурах, с тем, чтобы "выпарить" жидкий ^3He для достижения сколь угодно низких температур. Поскольку ^3He в милликельвиновой области температур является вырожденной ферми-жидкостью, энтропия которой пропорциональна температуре, эффективность теплоотвода, осуществляемого данным устройством, уменьшается, по крайней мере, пропорционально квадрату температуры. В те дни такие криостаты могли достигать лишь 15 мК.

Сайтс намеревался измерить магнитную восприимчивость твердого ^3He вплоть до температур настолько близких к температуре магнитного фазового перехода, насколько возможно; эта температура оценивалась в 2 мК. Эффективные спиновые взаимодействия в этой системе являются следствием атом-атомного обмена с

большой характерной частотой порядка 40 МГц. В противоположность этому, если рассчитать атом-атомный обмен в кремнии, то получится величина, меньшая единицы за возраст вселенной! Джим использовал криостат растворения лишь как первый шаг в новом процессе охлаждения. Вторая стадия должна была состоять в адиабатическом отвердении жидкого ^3He . Этот способ называется охлаждением Померанчука в честь русского теоретика, который предложил этот процесс [1] в 1950 г., до того как кто-либо получил жидкий ^3He ! Померанчук рассуждал, что благодаря полуполному спину жидкий ^3He при низких температурах должен становиться вырожденной ферми-жидкостью. Таким образом, при достаточно низких температурах, его энтропия должна быть пропорциональна температуре. А энтропия твердого ^3He при низких температурах должна определяться разупорядоченностью ядерных спинов, $S_{\text{solid}} \sim R \ln 2$. Следовательно при достаточно низких температурах энтропия жидкой фазы становится меньше энтропии твердой фазы. В этой уникальной ситуации теплота плавления становится отрицательной, и если часть жидкого образца отвердевает вследствие сжатия при постоянной энтропии, жидкость должна охладиться. Фактическая скорость охлаждения составляет приблизительно 1 мК на каждый процент превращения жидкой фазы в твердую. Померанчук утверждал, что этот процесс будет продолжаться до температуры, при которой происходит упорядочение спиновой системы твердой фазы, что делает его идеальным средством изучения ядерного упорядочения в твердой фазе [2].

Основная проблема с предложением Померанчука состояла в том, что работа, совершаемая над системой для отвердения жидкости $P_{\text{melt}}(V_{\text{solid}} - V_{\text{liquid}})$ при достижении температур, близких к температуре спинового упорядочения, превосходит теплоту перехода на два или три порядка величины. Насколько обратимым может быть процесс сжатия? Ануфриев в России в 1964 г. показал, что этот процесс работает [3], но он в своем эксперименте достиг лишь 20 мК. Никто не продемонстрировал, что с помощью этого процесса можно было достичь температур ниже, чем в криостате растворения, и приблизиться к существенно более низкотемпературной области спинового упорядочения. Но группа Джона Уитли в Ла-Джолла (Калифорнийский университет в

© The Nobel Foundation 1997

© Перевод на русский язык — Российская академия наук, "Успехи физических наук" 1997

Сан-Диего) и мы в Корнелле ставили на положительный результат. Несмотря на эти и другие осложнения, установка Сайтса работала [4] в течение моего второго года аспирантуры, и Джим защитился летом 1969 г., оставив свой криостат мне. Джим был единственным членом группы физики низких температур, который получил степень Ph.D. ровно за четыре года.

На третьем году аспирантуры я приступил к улучшению криостата растворения, который мы сделали с Джимом Сайтсом, а также изготовил новую ячейку Померанчука, конструкцию которой я разработал в предшествующем году, когда восстанавливался после операции на колене, последовавшей за неудачной лыжной прогулкой. Сайтс использовал довольно сложную конструкцию из трех камер, наполняемых гелием, и двух металлических сильфонов для уменьшения объема, занимаемого ^3He , что необходимо для сжатия и отверждения жидкости. В его ячейке изгибы сильфона, содержащего ^3He , смыкались при сжатии. Если внутри этих изгибов зарождалась твердая фаза, то могла произойти ее пластическая деформация и, следовательно, необратимый нагрев. Моя ячейка была проще, содержала две гелиевые камеры и сильфоны в форме гидравлического пресса, как показано на рис. 1. Сверхтекучий ^4He под давлением нагнетался в верхний сильфон, вынуждая центральный поршень двигаться вниз, и нижний сильфон углублялся в пространство, заполненное ^3He . Фотография верхнего сильфона, прикрепленного к криостату растворения, приведена на рис. 2.

К началу четвертого года аспирантуры новая установка двойного охлаждения была работоспособна; я также улучшил нашу систему ЯМР-термометрии. Чтобы использовать эту установку для физических исследований, в чем я еще не был достаточно искушен, я решил объединиться с Линтоном Корручини, аспирантом в нашей группе, который был на год старше меня. Линтон хотел проверить необычное предсказание Леггетта и Райса [5], являющееся следствием эффектов молекулярных полей в бесстолкновительном режиме, обусловленном ферми-жидкостным поведением ^3He . Согласно этому предсказанию коэффициент спиновой диффузии в жидкости должен зависеть от угла, на который отклоняются спины в эксперименте по импульсному ЯМР. Мы использовали ячейку Померанчука для непрямого охлаждения отдельного образца жидкого ^3He до 6 мК. Эксперимент удался [6], и мы сумели в первый раз оценить ферми-жидкостной параметр Ландау F_1^a , используя теорию Леггетта–Райса.

Вскоре должен был начаться пятый и, как предполагалось, последний год учебы в аспирантуре. Я женился на Филлис С.К. Лю в августе 1970 г., ровно через две недели после того, как она успешно защитила диссертацию; она занималась биохимией и работала постдоком, дожидаясь, когда я закончу диссертацию. Дэйв Ли хотел, чтобы я обнаружил спиновое упорядочение в твердом ^3He , используя свой прибор. Я точно не знал, как сделать это, но вскоре Дэйв показал мне препринт статьи [7] группы Джона Уитли из Калифорнийского университета в Сан-Диего, которая измеряла уменьшение давления плавления ^3He как функцию температуры при нескольких значениях магнитного поля. Это уменьшение должно было стать прямым измерением разницы в намагниченности ферми-жидкости и твердой фазы. Измерения группы показали аномально большую намаг-

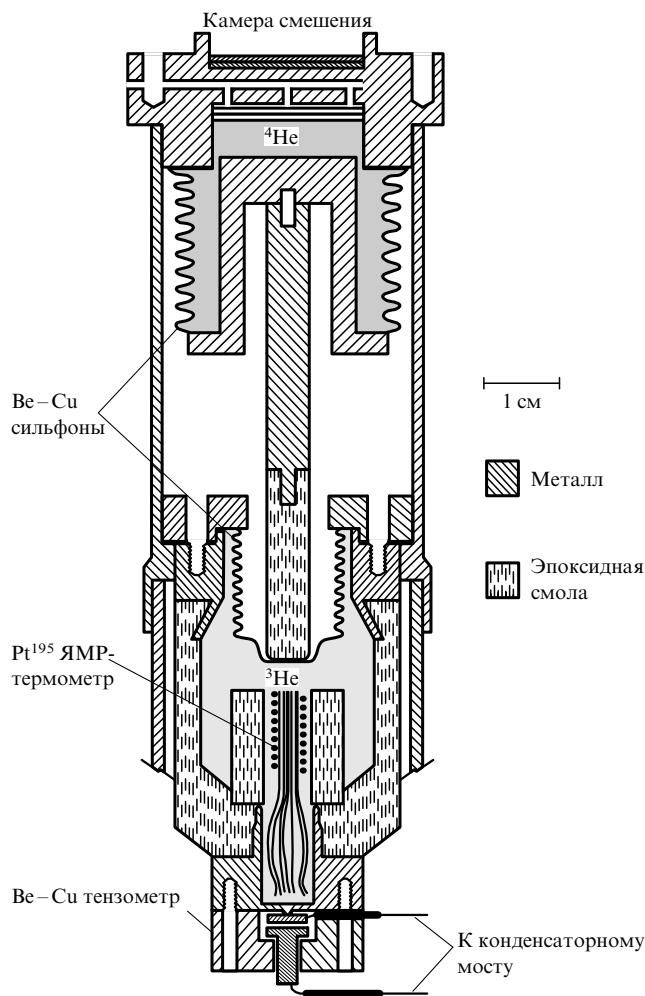


Рис. 1. Схема ячейки Померанчука, использованная при открытии сверхтекучести в ^3He . Жидкий ^4He нагнетается под давлением в верхний сильфон, при этом нижний сильфон вжимается в область, занятую ^3He . Емкостной датчик давления находится внизу. (Взят из [11].)

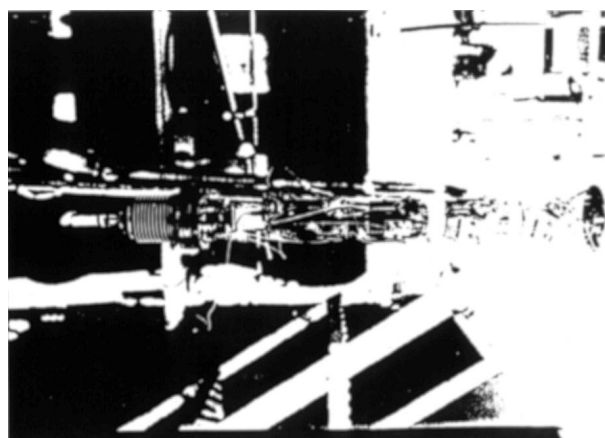


Рис. 2. Фотография нижней части криостата растворения, использованного при открытии. Показана колонна теплообмена, внизу расположены камера смешения с сильфоном ^4He и прикрепленный поршень для ячейки Померанчука.

ниченность в твердом теле в малых магнитных полях. Мы решили проверить этот неожиданный результат с помощью нашего прибора, в котором использовалась совершенно другая схема термометрии, чем в группе в Ла-Джолла.

К сожалению, оказалось, что эффект, о котором сообщила группа из Ла-Джолла, был артефактом ее термометрии, и подавление, которое я обнаружил, было крайне мало и трудноизмеримо [8]. Хотя этот эксперимент не походил на хороший эксперимент для защиты диссертации, я упрямо продолжал его. Наконец, Билл Томлинсон (постдок из нашей группы) и Джим Келли (еще один аспирант) начали говорить, что я слишком долго монополюно распоряжаюсь единственным ЯМР-магнитом лаборатории и что настала их очередь использовать его. Я с неохотой согласился отдать магнит, но держал свой прибор холодным на случай утечки в их аппаратуре, что часто происходило в те дни.

В ожидании окончания их эксперимента я решил узнать, насколько низкой температуры я могу достичь в моей ячейке Померанчука. Мы знали, что ниже 2,7 мК наш ЯМР-термометр из медной проволоки терял тепловой контакт с жидким ^3He в ячейке, но я чувствовал, что мы можем продолжить нашу термометрию в область меньших температур, используя ожидаемый наклон кривой плавления ^3He , которая уже была промерена в Ла-Джолла [9] и мною до температур, меньших 3 мК. Мой эксперимент состоял в образовании твердого ^3He со строго постоянной скоростью и построении зависимости давления от времени с помощью самописца. Здесь важно отметить, что я использовал емкостной датчик давления типа того, который был впервые сконструирован Стрэйти и Адамсом [10] во Флоридском университете. В этом приборе гидростатическое давление изгибает тонкую металлическую диафрагму, на которой закреплена одна из обкладок плоского конденсатора, изменяя таким образом зазор между обкладками, что измерялось с помощью конденсаторного моста переменного тока. У нашего датчика было значительно более высокое разрешение, чем у всех, существовавших ранее. Части моего датчика давления показаны на рис. 3.

Первый эксперимент был проведен 24 ноября 1971 г., накануне Дня благодарения. Я наблюдал, как равно-

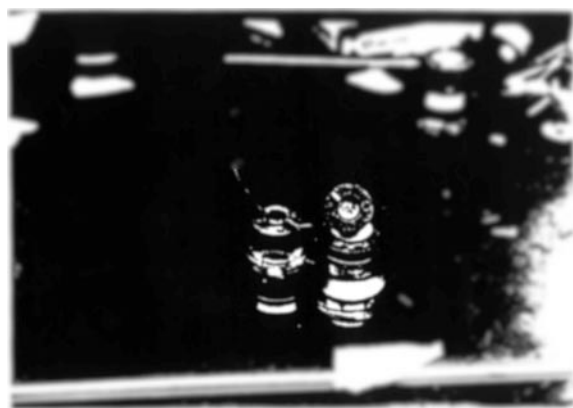


Рис. 3. Фотография емкостного датчика давления в ячейке ^3He во время сборки. Движущаяся обкладка, прикрепляемая к металлической диафрагме, находится слева, стационарная обкладка — справа.

мерно росло давление по мере охлаждения ячейки. Внезапно при температуре, которую я оценил в 2,6 мК, скорость охлаждения уменьшилась в два раза. Я подумал, что это уменьшение свидетельствовало о начале нагрева из-за пластических деформаций ^3He при движении сильфонов, и вскоре решил прекратить компрессию. Часть получившейся кривой сжатия, впервые содержавшей "излом", показана на рис. 4. Рукописные числа на рисунок были нанесены четыре дня спустя. Расплавив декомпрессией твердую фазу в ячейке, я решил предварительно охладить ячейку с помощью криостата растворения до минимальных достижимых на нем температур. Ячейка охлаждалась в течение всех четырех дней праздника, и я намеревался возобновить эксперимент в понедельник. Если бы я начинал компрессионное охлаждение с 15 мК, а не с 20 мК, в моей ячейке при 2,6 мК было бы на 30 % меньше твердой фазы, чем 24 ноября.

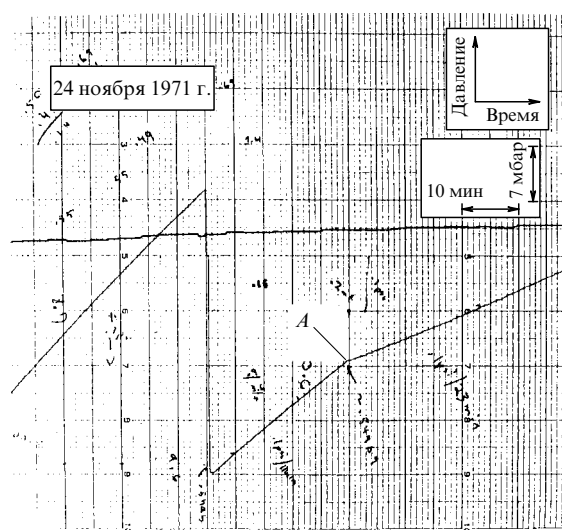


Рис. 4. Кривая сжатия, полученная 24 ноября 1971 г. и содержащая первое наблюдение А-перехода. Давление отложено по вертикальной оси, время — по горизонтальной. Резкие скачки кривой сжатия происходили при разбалансе конденсаторного моста. Прерывистая линия — температура криостата растворения.

В тот судьбоносный понедельник я пришел в лабораторию около полудня, быстро съел ленч, что было моей привычкой, и начал компрессию в 12:35. В 17:50 я приблизился к тому давлению, при котором в прошлый раз произошло внезапное уменьшение скорости охлаждения. Я не ожидал, что при том же самом давлении будет излом, и не думал, что он будет вообще. Тем не менее я вскоре снова увидел излом на кривой сжатия и мог заключить, что давление близко к тому, при котором он наблюдался в прошлый раз. Мое сердце сжалось. Затем я тщательно определил давления, при которых произошли "сбои", и обнаружил, что эти два давления отличались не более чем на $1/50\,000$!

В этот момент по моим венам растекался адреналин, так как я мгновенно понял, что вероятность пластической деформации при том же самом давлении в экспериментах с разными начальными условиями исчезающе мала. Более логичное объяснение — этот сбой указывал на хорошо воспроизводимый фазовый переход в моей ячейке. Но достиг ли я температуры ядерного магнит-

ного фазового перехода в твердом ^3He ? Температура казалась слишком высокой. Затем я несколько раз провел компрессию–декомпрессию в области сбоя, чтобы удостовериться в его повторяемости и более точно измерить давление. Первая кривая сжатия вместе со сбоем, полученная в тот день, приведена на рис. 5. Затем я нашел Боба Ричардсона, и мы стали обсуждать возможную природу обнаруженного мною фазового перехода. Мы согласились, что можно было бы понять изменение наклона кривой плавления, если предположить фазовый переход первого рода в твердой фазе, при котором спиновая система теряет около 30 % своей энтропии. Результатом этого обсуждения была возможная магнитная фазовая диаграмма спиновой системы твердой фазы, зарисованная в моем лабораторном журнале и воспроизведенная на рис. 6. В то время мы и не думали обсуждать какой бы то ни было фазовый переход в жидкости!

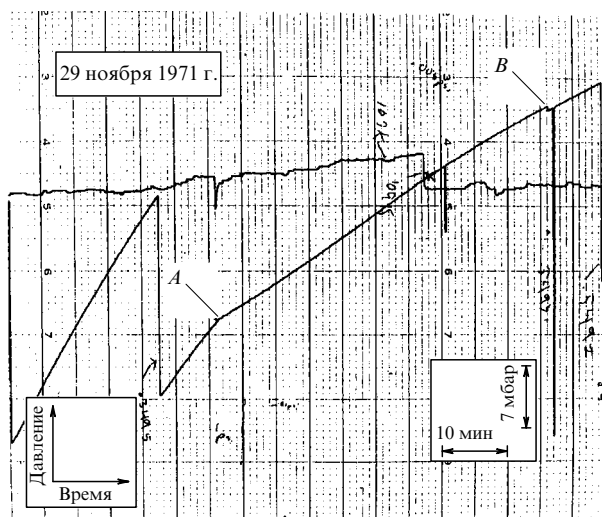


Рис. 5. Кривая сжатия, полученная 29 ноября 1971 г. и содержащая второе наблюдение A -перехода. Заметим, что он происходит при том же давлении, что и на рис. 4. Также обратим внимание на небольшое, но резкое падение напряжения, обозначенное B . Это было первое наблюдение B -перехода.

Заметим, что в правой части рис. 5 наблюдается небольшое, но резкое падение кривой зависимости давления от времени. Вскоре я понял, что эта особенность, которая наблюдалась всегда, но не при одном и том же давлении, также была фазовым переходом. Но данный переход имел склонность к переохлаждению. С этой маленькой ступенькой всегда было связано узкое плато на кривой декомпрессии при разогреве, и это плато наблюдалось при давлении, которое хорошо воспроизводилось. Казалось, что этот очевидный переход значительно труднее объяснить посредством нашей модели спиновой системы твердой фазы. Хотя мы первоначально называли более высокотемпературный переход "сбоем", а низкотемпературный — "сбоем-штрих", вскоре мы переименовали "сбой" в A -переход, а "сбой-штрих" — в B -переход. Эти обозначения сохранились до сегодняшнего дня и оказались воистину пророческими для микроскопической сущности этих двух сверхтекучих фаз.

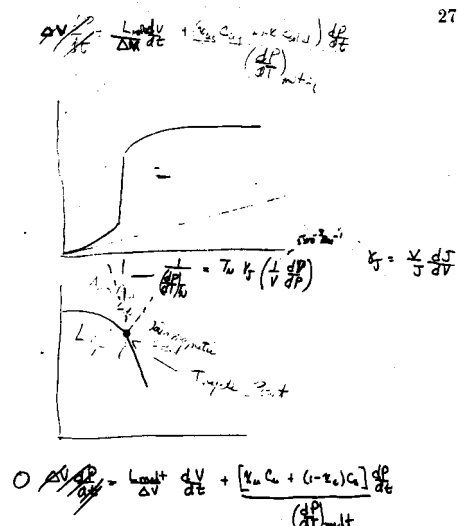


Рис. 6. В результате обсуждения 29 ноября я и Ричардсон предположили, что A - и B -особенности являются фазовыми переходами в твердом ^3He .

Вскоре мы обнаружили, что при продолжении сжатия после A - и B -переходов давление продолжает расти до максимальной величины, хотя и медленно, и полное изменение давления после A -перехода превышает допустимое значение, если A -переход является "ожидаемым" переходом спинового упорядочения. Даже если "ожидаемый" переход происходит при 2 мК, изменение давления чересчур велико. Похоже, твердая фаза сохраняла свою энтропию до слишком низких температур. Чтобы убить одним выстрелом сразу двух зайцев, мы предположили, что при A -переходе с твердой фазой происходит нечто, что препятствует дальнейшему фазовому упорядочению. Возможно, это кристаллографический фазовый переход.

Эти откровения совершенно изменили направленность моей диссертации. Вскоре Томлинсон и Келли успешно завершили свой эксперимент, и 2 декабря я снова завладел лабораторным ЯМР-магнитом. Мы намеревались изучить влияние магнитного поля на A - и B -переходы, которое, несомненно, должно было иметь место, если они были магнитными переходами в твердой фазе. Наверное, тогда еще более важным представлялось исключить с помощью зависимости от поля возможность того, что переходы, которые мы обнаружили, были артефактами емкостного датчика давления. Это удалось сделать, поскольку мы убедились, что давления обоих переходов уменьшаются на величины, пропорциональные квадрату приложенного магнитного поля. Однако, кроме того, мы нашли, что A -переход расщепляется на два перехода в сильном магнитном поле; это расщепление очень мало, линейно по полю и имеет ширину около 60 мК в поле 1 Тл. Мы также смогли показать, что температура в нашей ячейке, измеренная ЯМР-термометром, отражает изменение давления, имеющееся при A -переходе.

17 декабря 1971 г. я поднял температуру до 1 К и, изменяя давление в диапазоне, в котором мы наблюдали A -переход, но на сей раз вне кривой плавления, проверил, не мог ли A -переход, несмотря на измерения в магнитном поле, быть артефактом датчика давления. Результаты

были разубеждающими. Затем я повысил температуру криостата до комнатной, чтобы добавить новый платиновый ЯМР-термометр, который, как мы рассчитывали, будет находиться в тепловом контакте с жидкостью до более низких температур и давать более высокое разрешение. С этого начался трудный период нашего эксперимента, который продолжался три месяца.

Я охладил криостат 21 декабря. К 24 декабря я заставил работать новый платиновый термометр и провел несколько следующих дней, проверяя тепловой контакт с резервуаром ^3He и устойчивость к нагреву вихревыми радиочастотными токами. В канун Рождества я достиг A -перехода, но покинул лабораторию рано — в 10 вечера. Я надеялся использовать тот же самый ЯМР-соленоид для изучения ЯМР-сигнала ^3He , но сигнал был очень слаб. Наконец, я нашел ЯМР-линию ^3He в 1:55 в новогоднюю ночь. Она казалась довольно бесполезной. Я ушел из лаборатории в 3 часа ночи и, когда пришел на следующий день, то увидел в лабораторном журнале надпись: "С Новым годом, Даг!" Спустя два дня, мы обнаружили, что между платиновыми витками нашего ЯМР-термометра образовывалось очень мало твердого ^3He . Мы не могли использовать один и тот же термометр, чтобы измерять температуру и одновременно изучать ЯМР-сигнал ^3He !

5 января я улетел в Нью-Джерси на собеседование о приеме на работу в Белловские лаборатории, твердо веря, что A - и B -переходы происходили в ядерной спиновой системе твердой фазы. К счастью, никто не оспаривал эту идентификацию и через два месяца мне предложили постоянную работу с зачислением в технический штат. К тому времени мы решили написать о наших результатах, не подтверждая их интерпретацию ЯМР-измерениями, и послали в *Physical Review Letters* статью, озаглавленную "Свидетельство существования новой фазы в твердом ^3He ". Эта статья прошла процесс рецензирования нашими коллегами и была быстро опубликована [11].

21 января я снова повысил температуру, чтобы заменить ячейку ^3He ячейкой, в которой был отдельный ЯМР-соленоид для ^3He . Мы применили новую эпоксидную смолу для этой ячейки, но она треснула при охлаждении. Затем я сделал другую ячейку из более привычной смолы "Stycast 1266", а также заменил медно-бериллиевый датчик давления на изготовленный из нержавеющей стали "304". Мне хотелось в очередной раз удостовериться, что эффекты, которые мы заметили, не были артефактом датчика.

10 февраля я снова провел охлаждение, но начались проблемы с криостатом растворения. Позже стало ясно, что коррозия, вызванная применявшимся флюсом для припоя, привела почти к полной закупорке тонких капиллярных трубок, соединявших теплообменники. Также у меня были проблемы с ЯМР-электроникой. Наконец, 18 февраля (в день рождения моей жены) в 23:58 я записал в лабораторном журнале: "Получил ЯМР-линию ^3He — здорово!" (В те дни я не думал, что эти записи могут иметь историческое значение!) Эйфория, однако, оказалась короткоживущей; через два дня Корнелльский университет лишился электричества, как говорили, из-за белки, закоротившей высоковольтную линию электропередачи, и трубка накачки ^4He была заблокирована замерзшим воздухом. Мне пришлось поднять температуру до 77 К, чтобы удалить пробку, но

когда я снова переносил жидкий гелий в дьюар, криостат дал течь в главном вакуумном фланце, где линии откачки подходили к экспериментальному вакуумному пространству. Течь никак не удавалось устранить, и в конце февраля я начал изготавливать детали, необходимые для замены главного вакуумного фланца; эта операция была трудна и рискованна.

В это время Вилли Галли, аспирант второго года, которому Дэйв Ли поручил работать со мной, спросил, можно ли ему попытаться устранить течь? До тех пор я всячески оберегал мой драгоценный криостат от "нечистых" рук Вилли. (Этот прискорбный подход и сегодня сохраняется у моих старших аспирантов.) Поскольку я уже списал со счетов вакуумный фланец, то разрешил Вилли действовать. Сам я ранее использовал старый способ Уитли и наносил теплую смесь глицерина и мыла (хлопья цвета слоновой кости) на грешившее соединение, но Вилли применил другую смесь, а также вылил огромную мензурку теплого глицерина и мыла на весь вакуумный фланец, покрыв его, насколько я помню, слоем толщиной в 1 см. Когда мы произвели охлаждение 29 февраля, течь исчезла и больше не появлялась. С того дня Вилли стал полноправным участником проекта.

Я проводил ЯМР-измерения в течение первых двух недель марта, регистрируя пиковый сигнал ЯМР как функцию времени при нагреве и охлаждении в области A -перехода. В ячейке ^3He вклад жидкой фазы в ЯМР-сигнал был мал; предполагалось, что он не зависит от температуры, в то время как сигнал твердой фазы рос при охлаждении, как $1/T$. Датчик давления из нержавеющей стали приводил к довольно сильному градиенту магнитного поля. Тем не менее мы могли четко показать, что скорость роста ЯМР-пика ^3He каждый раз немного увеличивается при прохождении через A -переход, и, как мы предполагали, усиливается сигнал твердой фазы. Изменение было невелико, но присутствовало постоянно и хорошо коррелировало с изломом кривой сжатия. Много позже мы поняли, что это увеличение происходило потому, что ЯМР-частота жидкости сдвигалась при охлаждении через A -переход и накладывалась поверх ЯМР-сигнала твердой фазы.

Мы все более стали осознавать возможность того, что A -переход происходил в жидкости. Я рассматривал возможность изменения теплопроводности жидкости при A -переходе, которое приводит к изменению скорости образования твердой фазы в области ЯМР-соленоид, вследствие чего и происходит это небольшое увеличение роста. Чтобы исключить такую возможность, нам было нужно добиться пространственного разрешения. И я начал конструировать четвертую ячейку. В этой новой ячейке ЯМР-соленоид ^3He состоял из пяти отдельных катушек, каждая из которых была ориентирована вертикально, общей длиной в 2,5 см. Замысел состоял в том, чтобы следить за ростом твердой фазы в каждой из пяти катушек. Чтобы различить сигналы различных катушек, я положил мягкие железные шайбы между полюсами ЯМР-магнита так, чтобы (горизонтальное) ЯМР-поле было больше на дне ячейки, чем сверху. Тогда ЯМР-сигнал от каждой катушки будет характеризоваться своей частотой. Мы охладили эту ячейку 27 марта, и я увидел пять ожидаемых ЯМР-пиков 13 апреля, но затем снова поднял температуру, чтобы вставить усовершенствованную окончательную модификацию в ячейку ^3He . Читая

лабораторный журнал 25 лет спустя, я удивляюсь, как много тепловых циклов я желал учинить с этим хрупким оборудованием!

В то время я поговорил с Майклом Фишером об ожидаемом росте твердого ^3He в ячейке Померанчука. Почти все полагали, что зародыши твердой фазы, приводящие к снегопаду ^3He , спонтанно образуются в самых теплых местах ячейки (поскольку в них давление превосходит давление плавления). Майкл вежливо рассказал мне о поверхностной энергии, которая должна существовать на границе раздела жидкость–твердое тело, и о том, как она должна препятствовать спонтанному образованию зародышей твердой фазы. Он считал, что зародыши образуются только на поверхности и только в нескольких местах ячейки, и весь последующий рост твердой фазы происходит из этих семян. Чтобы воспользоваться этими особенностями роста, я снова изменил ЯМР-соленоид ^3He . Теперь это была одиночная вертикальная катушка диаметром приблизительно в 0,5 см и длиной в 2,5 см. В этой геометрии из-за градиента поля ЯМР-резонанс имел место только в узком горизонтальном слое, положение которого можно было непрерывным образом перемещать вверх или вниз, качая ЯМР-частоту, что давало нам возможность получить истинный одномерный профиль намагниченности в ЯМР-области.

7 апреля я снова начал собирать криостат. Но в полночь, когда я завинчивал крепежные болты, дьюар с жидким гелием неожиданно взорвался, окатив яму внизу дождем осколков. Единственный оставшийся запасной дьюар был слишком короток для длинного внутреннего вакуумного контейнера. К счастью, я заметил это прежде, чем разбил его! Изготовив прокладку, чтобы понизить положение гелиевого дьюара, я снова начал сборку, но тут возникли проблемы с датчиком давления.

В это время я по-настоящему начал ощущать давление со стороны. Как раз вышла наша статья в *Physical Review Letters*, и специалисты начали критиковать нашу интерпретацию фазового перехода первого рода в твердой фазе. К тому же Джон Гудкайнд и Виктор Введенский предположили, что изменение давления при A -переходе может отвечать БКШ (Бардин, Купер, Шриффер)-переходу в жидкости. Хотя эта интерпретация не могла объяснить высокие давления плавления, измеренные нами (которые свидетельствовали о большей энтропии твердого тела, чем можно было бы ожидать, предполагая фазовый переход при 2 мК), я чувствовал, что необходимо провести решающий ЯМР-тест нашей модели и, как можно, скорее!

Наконец, 10 апреля мне удалось собрать криостат, и 14 апреля я начал компрессию, с тем, чтобы проверить правильность идей Майкла Фишера о росте твердого тела. Я нервничал, когда начинался этот рост. С большим облегчением мы увидели, что Майкл был совершенно прав. Мы почти всегда обнаруживали лишь два или три места роста твердой фазы в ЯМР-области, а сигнал всей жидкости располагался между пиками твердой фазы.

Я изучал характеристики роста твердой фазы в середине апреля. К моему облегчению, увеличение роста высоты пиков твердой фазы при охлаждении ниже температуры A -перехода было в равной степени заметно на всех наших пространственно-разнесенных пиках. Однако, кроме того, имелось любопытное, хотя и неболь-

шое — на 2–3 %, падение высоты пиков твердой фазы, которое коррелировало со ступенькой в давлении при B -переходе. Проводя эти опыты, мы стремились уменьшить усиление нашего самописца, чтобы масштаб соответствовал растущим пикам твердой фазы, но ночью 20 апреля мое внимание привлек небольшой сигнал жидкости между пиками твердой фазы в данных, полученных 17 апреля и воспроизведенных на рис. 7.

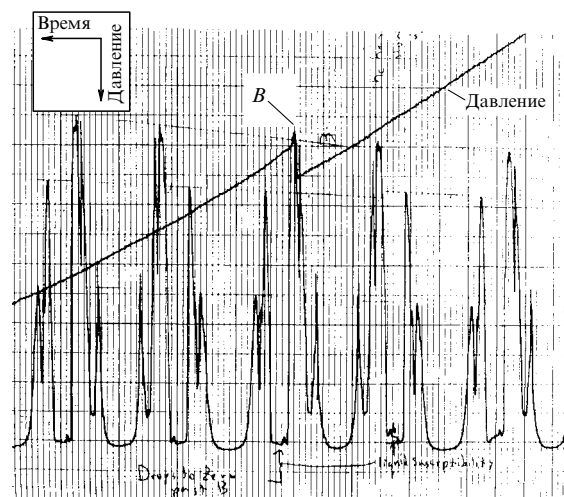


Рис. 7. Непрерывное качание ЯМР-частоты в ячейке, показывающее изменение отклика твердой фазы (пики) и жидкой фазы (область между двумя самыми высокими пиками) при B -переходе. Обратим внимание на едва различимое изменение сигнала жидкой фазы до и после B -перехода.

То, что происходило с жидкостью при B -переходе, поразило меня подобно удару молнии: в то время как ЯМР-сигналы твердой фазы реагировали на B -переход лишь изменением высоты пиков на несколько процентов, сигнал жидкости почти полностью исчезал в этой точке! На рисунке 8 показана запись, сделанная в моем лабораторном журнале той ночью: "2:40. Сегодня обнаружил БКШ-переход в жидком гелии. Эффекты давления, связанные с B и B' , сопровождаются изменениями восприимчивости ^3He как в самих пиках, так и вне их, на величину порядка всей восприимчивости жидкой фазы". Я проверил все данные, полученные мною, и захотел поделиться с кем-нибудь хорошими новостями. Но во всем здании никого не было. В 4 утра я решил позвонить Дэйву Ли и Бобу Ричардсону, что, наверное, было рискованным поступком для аспиранта. Оба согласились, что идентификация весьма надежна, и в 6 утра Дэйв позвонил мне, чтобы узнать дополнительные подробности.

Приближалась дата апрельского собрания Американского физического общества в Вашингтоне (округ Колумбия), и Дэйв с Бобом сумели организовать мой приглашенный доклад о нашей работе на этом собрании, хотя уже прошел крайний срок представления докладов. Мы продолжали считать, что A -переход происходит в твердой фазе, поэтому я сообщил, что мы обнаружили переходы как в твердом, так и в жидком ^3He . Когда я вернулся из Вашингтона, то с новым интересом стал изучать свойства переохлаждения при B -переходе и опять отдал ЯМР-магнит Джиму Келли. Между тем я

10
 18:24 $C_2 = .520\%$ $M_C \sim 83.5\text{K}$ I may have the
 high peak back - pretty small.
 19:13 $C_2 = .51\%$ $M_C = 89\text{K}$
 19:21 $C_2 = .5175\%$ $M_C = 90\text{K}$ increase P_T some
 20:31 $C_2 = .512\%$ $M_C = 96\text{K}$
 20:49 $C_2 = .5105\%$ $M_C \sim 97.5\text{K}$
 21:10 $C_2 = .509\%$ $M_C = 98\text{K}$
 21:41 $C_2 = .507\%$ $M_C = 98\text{K}$
 22:00 $C_2 = .50644\%$ $M_C = 98\text{K}$ n: t A + pass thru
 23:25 $C_2 = .5059\%$ $M_C = 97\text{K}$
 Apr 20 '72
 Decided to fool with sweep to try to "sit"
 in a peak.
 1:15 retraced, fill pot
 2:40 Have discovered the BCS transition in
 liquid ^3He tonight. The pressure phenomena
 associated with $B \rightarrow B'$ are accompanied
 by changes in the He^3 susceptibility both
 on & off the peaks approximately equal to the
 entire liquid susceptibility.
 10:45 $M_C = 5\text{K}$

Омберг

Рис. 8. Фотография из моего лабораторного журнала, воспроизводящая запись от 20 апреля 1972 г., когда я понял, что B -переход происходит в жидкости.

конструировал мультиплексор, который позволял бы мне регистрировать ЯМР-сигнал из двух разных мест в ячейке почти одновременно.

Когда в начале мая я получил обратно магнит, то обнаружил, используя мультиплексор, что B -переход сначала происходит на дне ячейки, и граница раздела A -и B -фаз движется вверх со скоростью много см с^{-1} . Мы также заметили очень странное магнитное явление при движении границы раздела в ЯМР-области: сначала ЯМР-сигнал поглощения поднимался выше уровня нормальной жидкости, а затем падал существенно ниже этого уровня. Казалось, что этот эффект крайне трудно понять, и в конечном счете мы попытались выманить наших теоретиков с пятого этажа, предлагая им пиво и попкорн и надеясь получить объяснение. Они пришли, съели попкорн, выпили пиво, покачали головами и удалились.

Начиная ощущать возможную значимость этих экспериментов, я решил снять в реальном времени фильм о данных, которые мы получали. Эти бобины с пленкой (большой частью непросмотренные) по-прежнему лежат в сундуке в кладовке у меня дома. Я также сфотографировал сам себя рядом с криостатом и воспроизвожу эту фотографию на рис. 9. Измученное выражение моего лица было неподдельным.

Последнее откровение в нашей Одиссее произошло где-то в начале июня. Любопытно, что в лабораторном журнале на этот счет нет никаких записей. Дэйв Ли побуждал меня убрать железные шайбы, находившиеся между полюсами ЯМР-магнита и устранить градиент



Рис. 9. Автофотография, сделанная в апреле 1972 г. Моя левая рука покоится на ЯМР-магните, с которым мы работали. Подвешенный криостат находится внутри стеклянного дьюара, который проникает в область магнитного поля.

магнитного поля. Он хотел измерить сдвиг ЯМР-частоты типа того, который имеется в магнитоупорядоченных системах. На самом деле, мы уже видели "искажения" профиля ЯМР-сигнала жидкой фазы ^3He при наличии градиента. И Дэйв, и Боб присутствовали, когда я прошел A -переход охлаждением. То, что мы увидели, даже трудно пересказать: при охлаждении ниже температуры A -перехода небольшая спутная линия смещалась в область все более высоких частот по сравнению с частотой большого пика твердой фазы. Она напоминала сигнал всей жидкости как формой, так и по площади. Затем, когда кривая сжатия указывала на B -переход, эта спутная линия исчезала! На рисунке 10 я привожу примерно каждый третий ЯМР-профиль как функцию времени; эксперимент был проведен 13 июня. Заключение было неизбежным: A -переход также происходил в жидкости.

Вилли Галли и я провели большую часть июня в лаборатории, исследуя этот беспрецедентный частотный сдвиг в жидкости. По предложению Боба Сильсби мы установили, что он удовлетворяет соотношению, которое Дэйв Ли называл "пифагоровым": разность $(v_{\text{liquid}})^2 - (v_{\text{larmor}})^2$, как оказалось, зависит только от температуры. Здесь v_{larmor} — частота прецессии спинов в нормальном состоянии. Эта разность увеличивается от нуля при A -переходе до 10^{10} Гц^2 при минимально достижимых температурах. Винэй Амбегаокар уверял нас, что такой сдвиг нельзя получить при любом обычном БКШ-переходе. Он был прав. 14 июля мы прекратили наши эксперименты, и я начал лихорадочно писать диссертацию, а Вилли Галли — модифицировать ячейку Померанчука, чтобы включить в нее измеритель вязкости в виде колеблющейся струны.

Мы осознавали важность нашего нового понимания A - и B -переходов, тем более если учесть наши предыдущие ошибочные интерпретации, так что мы быстро подготовили новую рукопись и послали ее в *Physical Review Letters* в начале июля. Научившись на собственном опыте и будучи не в состоянии объяснить обнаруженные сдвиги частот, мы сосредоточились на представлении полученных данных и не стали высказывать предположения о сверхтекучих переходах. По иронии

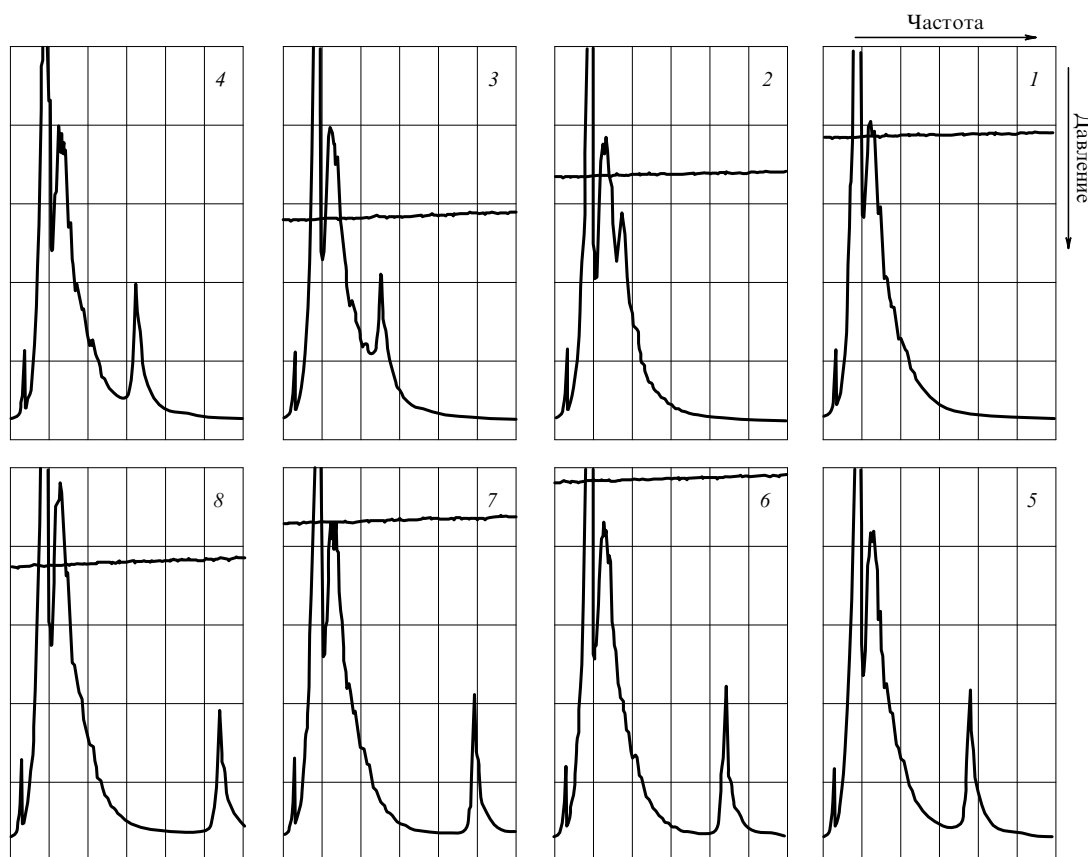


Рис. 10. Последовательность ЯМР-профилей в отсутствие градиента внешнего магнитного поля. Температура медленно уменьшается ниже A -перехода. При охлаждении жидкости сателлитная ЯМР-линия сдвигается в область все более высоких частот. Почти горизонтальная линия на профилях представляет давление в ячейке, которое медленно увеличивается от 1 к 8 профилю. Между профилями 3 и 4 конденсаторный мост был разбалансирован.

судьбы, первая рукопись прошла процесс рецензирования, а вторая, в которой мы представили значительно больше результатов и были крайне аккуратны, делая это, была отклонена. Как сформулировал рецензент: "Я внимательно прочел предыдущее письмо (*PRL* 28 885 (1972)) и сравнил его с содержанием настоящего письма. Хотя письмо написано очень ясно и, полагаю, сделало бы честь другим авторам, я думаю, что разница в результатах недостаточно велика, чтобы давать право на срочную публикацию, особенно если иметь в виду ваше правило недопущения серийных публикаций". Оба редактора одобрили заключение рецензента, но Джим Крумхансль, заместитель редактора *Physical Review Letters*, ходатайствовал за нас, и статья, в конечном счете, была опубликована [12].

В августе 1972 г. в Боулдере, Колорадо, была проведена 13-я Международная конференция по физике низких температур. Я участвовал в конференции до своего перехода в Белловские лаборатории. Дэвид Ли рассказал о наших результатах в пленарном приглашенном докладе. Джон Уитли, который настолько же быстро проверял наши результаты, насколько и мы его, также представил убедительные свидетельства. Но, на мой взгляд, самый эффектный доклад был подготовлен Тони Леггеттом и прочитан его коллегой Майком Ричардсом. Тони показал, как наши результаты по сдвигу ЯМР-частот получаются в случае r -волнового БКШ-состояния в жидкости. Мой собственный доклад

состоялся в последний день конференции, и мне даже пришлось переоформить билет на самолет, чтобы посетить заседание в пустующем зале! Но благодаря Тони Леггетту мы были на правильном пути к пониманию этих новых странных жидкостей.

Понимание

В последующие три года почти в каждой лаборатории, где можно было достичь достаточно низких температур, исследовались те или иные аспекты сверхтекучести в ^3He , но большую часть этого времени теоретики были впереди экспериментаторов. Был поднят ряд вопросов. Существуют ли на самом деле r -волновые БКШ-состояния, предсказанные Леггеттом? Каков механизм спаривания? Как могли существовать две отдельных сверхтекучих фазы? Каковы микроскопические сущности A - и B -фаз? На самом ли деле в этих БКШ-состояниях существовали незатухающие массовые токи? Насколько хорошо теплоемкость согласуется с предсказаниями БКШ? Что происходит с распространением звука в сверхтекучих фазах? Кроме того, Леггетт вскоре предсказал [13] совершенно новую "продольную" ЯМР-моду, которая не должна зависеть от величины приложенного магнитного поля, а Амбегаокар, де Жен и Райнер [14] предсказали, что у A -фазы могут быть текстуры, подобные жидкокристаллическим. Подтверждались ли эти и другие предсказания на опыте?

Прогресс ответов на эти вопросы был быстрым, главным образом потому, что имелся теоретический и экспериментальный задел. В 1960-х гг. Джон Уитли и другие подробно изучили свойства нормального состояния ^3He [15]. В 1961 г. Андерсон и Морел [16] обсудили многообразие р-волновых БКШ-состояний, у которых было любопытное свойство, состоящее в том, что угловые моменты куперовских пар были направлены одинаково во всем пространстве, а спины частиц, входящих в пару, были параллельны. А-фаза сверхтекучего ^3He была в конечном счете идентифицирована как данное состояние. В 1963 г. Бальян и Вертхаммер [17] показали, что в пределе слабой связи БКШ-состоянием с наименьшей энергией среди всех р-волновых состояний является такое, в котором куперовская пара обладает орбитальным угловым моментом $L = 1$, спиновым угловым моментом $S = 1$, но полным угловым моментом $J = 0$. Модификация этого состояния была в конечном счете сопоставлена с В-фазой сверхтекучего ^3He , а формализм, развитый Бальяном и Вертхаммером, был принят всеми, работающими в данной области. В 1965 г. Леггетт [18] исследовал магнитную восприимчивость ядер в этой фазе, учитывая ферми-жидкостные поправки. В 1971 г. Лэйзер и Фэй [19] показали, как ферромагнитные спиновые флуктуации в жидком ^3He могут приводить к притяжению между квазичастицами при спаривании с нечетным L , что, как они предсказали, приведет к сверхтекучести в р-волновом состоянии. В этой статье, как мы понимаем, был предложен правильный механизм спаривания для р-волновых сверхтекучих жидкостей.

На вопрос о том, как могут существовать две разные сверхтекучие фазы, дали элегантный ответ Андерсон и Бринкман [20]. Они предположили, что ферромагнитные спиновые флуктуации в жидкости приводят к притяжению частиц и образованию куперовских пар, но отметили, что в ^3He , но не в обычных сверхпроводниках, образование конденсатной волновой функции может изменить это спаривающее взаимодействие. Они пришли к выводу, что А-фаза должна быть состоянием Андерсона – Морела, которое получило название состояния Андерсона – Бринкмана – Морела или АБМ; В-фаза должна быть состоянием Бальяна – Вертхаммера или БВ.

В Белловских лабораториях мне выделили пустую комнату и достаточное количество денег, чтобы заполнить ее любым оборудованием, которое могло мне понадобиться для продолжения изучения новых фаз ^3He . Кроме того, мне разрешили нанять Вольфганга Шпренгера, замечательного техника, который работал с Робертом Полем в Корнелле. Однако выделенное мне лабораторное пространство было занято одним из сотрудников Бернда Маттиаса, который не хотел выезжать, пока не будет готова его новая лаборатория, и вместе с тем не торопился завершить ее проект. Влияние Маттиаса в Белловских лабораториях было настолько велико, что даже после его отъезда в Калифорнийский университет в Сан-Диего, я не мог ничего сделать и был вынужден ждать. Несмотря на все это, к июлю 1973 г. был установлен работоспособный криостат растворения (во многом благодаря усилиям Шпренгера). И в сентябре я наблюдал А-переход в новой ячейке Померанчука.

Мой главный интерес заключался в установлении микроскопической сущности А- и В-фаз. Андерсон и Бринкман предложили возможные идентификации состояний, но эти идентификации нуждались в экспери-

ментальной проверке. Я также хотел исследовать узкую область расщепления А-перехода в сильном магнитном поле, но для этого мне был нужен сверхпроводящий магнит с высокой однородностью. Пройдет полтора года, прежде чем этот магнит будет доставлен. Так что мне представлялись возможными два направления исследований: первое заключалось в точном измерении ЯМР-восприимчивости В-фазы и сравнении ее с предсказанием Леггетта, сделанным в 1965 г. Второе направление было связано с поиском продольного резонанса, предсказанного Леггеттом [13], и сравнением его с ЯМР-сдвигами в А-фазе, которые мы наблюдали в Корнелле.

Для понимания спиновой динамики р-волновых сверхтекучих жидкостей необходимо учесть, что образование куперовских пар приводит к тому, что полная ядерная диполь-дипольная энергия не усредняется в нуль из-за "спонтанно нарушенной спин-орбитальной симметрии" (термин Леггетта). Чтобы понять это, представим фиктивную куперовскую пару, в которой электроны на самом деле вращаются вокруг друг друга, как показано на рис. 11а. Диполь-дипольная энергия при усреднении за один период вращения будет минимизирована, когда проекция полного спина на направление орбитального углового момента равна нулю. Такой спиновой конфигурации ставят в соответствие вектор $\mathbf{d}$, который в равновесии должен быть параллелен орбитальному угловому моменту куперовской пары. В АБМ-состоянии угловые моменты куперовских пар локально ориентированы в одном и том же направлении, которое обозначим $\mathbf{l}$. Итак, можно ожидать, что в А-фазе в равновесии $\mathbf{d}$ будет параллелен $\mathbf{l}$. Поскольку проекция спина на направление $\mathbf{d}$ равна нулю, зеемановская энергия будет минимальна, если $\mathbf{d}$ будет перпендикулярен статическому магнитному полю $\mathbf{B}$. Это приводит к тому, что $\mathbf{d}$ и $\mathbf{l}$ ориентированы перпендикулярно $\mathbf{B}$ в глубине А-фазы [21].

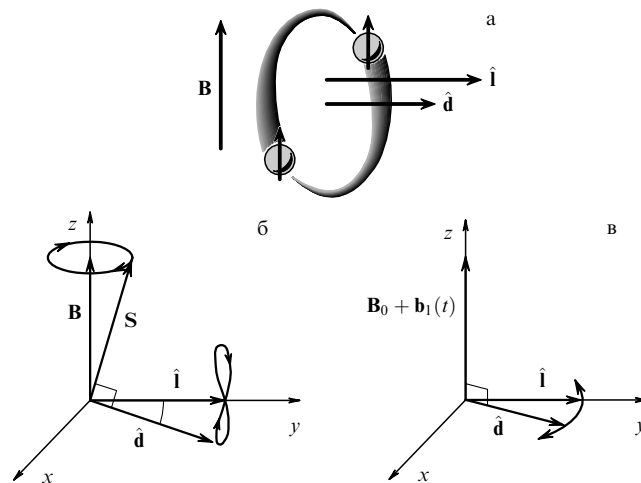


Рис. 11. Спиновая динамика в сверхтекучей А-фазе: (а) фиктивная куперовская пара. Дипольная энергия двух вращающихся ядер минимальна, когда проекция полного спина m_s на направление углового момента $\mathbf{l}$ равна нулю; (б) при поперечном резонансе намагниченность $\mathbf{S}$ прецессирует вокруг магнитного поля $\mathbf{B}$, приводя к тому, что $\mathbf{d}$ выписывает плоскую восьмерку в $\mathbf{B}$ – $\mathbf{l}$ –плоскости; (в) когда осциллирующее поле $\mathbf{b}_1(t)$ параллельно статическому полю, неравновесная намагниченность осциллирует вдоль z -оси, приводя к смещению $\mathbf{d}$ вперед – назад в xy -плоскости.

В ЯМР-эксперименте помимо статического магнитного поля **B** к системе приложено магнитное поле, осциллирующее с частотой прецессии ядерных спинов в поле **B**, приводя к смещению намагниченности от направления **B** и прецессии вокруг данного направления. Это смещение от положения равновесия возмущает спиновую систему, приводя к осцилляциям **d**, показанным на рис. 11б в случае малых магнитных полей. Для обычного или "поперечного" ЯМР, когда осциллирующее магнитное поле лежит в плоскости, нормальной к **B**, **d** осциллирует в плоскости, содержащей как **l**, так и **B**. Однако, если осциллирующее магнитное поле направлено вдоль **B**, то **d** вращается в плоскости, нормальной к **B**, как показано на рис. 11в. Это должно иметь место в случае продольного резонанса. При отклонении **d** от положения равновесия в случае поперечного резонанса возникает дополнительный вращающий момент, действующий на прецессирующую намагниченность и приводящий к сдвигу резонансной частоты. Осцилляция **d** при продольном резонансе приводит к осцилляции величины намагниченности, направленной вдоль **B**.

Ожидалось, что продольный резонанс будет трудно обнаружить, так как его частота не должна зависеть от приложенного внешнего магнитного поля. Поэтому его нельзя найти изменением величины поля. Кроме того, были сообщения, что этот резонанс может быть крайне узким. Если *A*-фаза является АБМ-состоянием, то $(\nu_{\text{longitudinal}})^2 = (\nu_{\text{liquid}})^2 - (\nu_{\text{larmor}})^2$, где ν_{liquid} — частота обычного или поперечного резонанса, которую мы измеряли в *A*-фазе. Отсюда получается величина от 0 до 100 кГц при самых низких температурах. Я долго и упорно искал продольную моду, но ничего не нашел. Наконец, я отказался от идеи об узости этой моды и предположил, что, напротив, она должна быть очень широкой. Однако нельзя детектировать ее, качая ЯМР-частоту, так как при этом будет происходить качание по широкой области резонанса колебательного контура ЯМР-цепи. Я решил фиксировать частоту и изменять температуру, таким образом проходя через область продольного резонанса моего образца. Данная стратегия успешно сработала, резонанс оказался очень широким. Эти результаты [22], похоже, подтверждали, что *A*-фаза была АБМ-состоянием, и вскоре группа в Корнелле [23] присоединилась к изучению этой новой резонансной моды.

Оказалось более трудным идентифицировать *B*-фазу как БВ-состояние (Бальяна – Вертхамера). *B*-фаза — это квазиизотропное состояние из куперовских пар с $J = 0$. Леггетт показал [21], что для минимизации ядерной диполь-дипольной энергии в этой фазе необходимо повернуть спиновую координатную систему, описывающую образованные пары, относительно орбитальной координатной системы на $\cos^{-1}(-1/4) \simeq 104^\circ$ вокруг произвольной оси **n**. В этом состоянии одна треть куперовских пар должна характеризоваться $m_s = 0$ по отношению к приложенному магнитному полю, и, пренебрегая взаимодействиями в ферми-жидкости, можно ожидать, что восприимчивость χ_B при $T = 0$ составляет 2/3 от восприимчивости нормальной жидкости. Ферми-жидкостные поправки, как рассчитал Леггетт [18] в 1965 г., уменьшают эту величину до приблизительно 1/3 восприимчивости нормальной фазы.

Я решил оглянуться назад и извлечь значения ЯМР-поглощения из своих старых данных, в результате чего

пришел к заключению, что χ_B близка к тому, что можно ожидать для БВ-состояния. Однако вскоре группа Уитли в Калифорнийском университете в Сан-Диего (Ладжолла) измерила статическую намагниченность *B*-фазы, используя радиочастотный СКВИД, и обнаружила, что падение намагниченности значительно превосходит ожидаемое падение для БВ-состояния [24]. Позже группа Лоунасмая в Хельсинки сообщила [25] о ЯМР-измерении χ_B , в котором также имело место падение, больше ожидаемого. Появились предположения, что *B*-фаза является смесью *p*- и *d*-волновых состояний.

Когда я стал всматриваться в ЯМР-восприимчивость *B*-фазы, то обнаружил очень странную вещь: если я производил измерения в слабом магнитном поле, ее величина оказывалась существенно меньше значения в нормальной фазе, но если измерения проходили в сильном магнитном поле, получалась величина, близкая к предсказанию Леггетта для БВ-фазы. Также я обнаружил высокочастотный хвост у ЯМР-линии *B*-фазы. Именно из-за этого эффекта пострадали первые хельсинкские измерения.

В это время я призвал на помощь Билла Бринкмана, чтобы понять мои странные наблюдения. По теории Леггетта ЯМР-частота в БВ-состоянии должна зависеть от того, как ось вращения **n** ориентирована по отношению к **B**. Должен существовать сдвиг, пропорциональный $\sin^2 \theta$, где θ — угол между **B** и **n**. В глубине образца **n** || **B**, для того чтобы минимизировать дипольную энергию, возникающую при распаривании спиновой компоненты с $m_s = 0$ вдоль магнитного поля [21]. Значит, БВ-состояние не должно обнаруживать сдвиг ЯМР-частоты в глубине образца. Но если вблизи поверхности предпочтительна другая ориентация, то в образце происходит ее изменение, в результате чего у ЯМР-профиля должен появиться широкий высокочастотный хвост с соответствующим уменьшением спектрального веса ларморовской частоты. Это могло бы объяснить мои измерения ЯМР в *B*-фазе. Мы также сумели найти нижнюю границу ЯМР-восприимчивости *B*-фазы, проводя измерения в больших полях (около 0,1 Тл), однако и этот предел оказался ближе к предсказанному значению для БВ-состояния, чем к значению, полученному в Ладжолла на основе статических магнитных измерений [22].

Впоследствии я и другие экспериментаторы проводили все более точные измерения ЯМР-восприимчивости *B*-фазы [26, 27]; то же происходило с измерениями статической намагниченности Уитли и др. [28]. Согласия не было по-прежнему. Хотя почти все полагают, что *B*-фаза представляет собой БВ-состояние и что ЯМР-измерения подтверждают это, по-видимому, при переходе *A* – *B* происходит изменение статической намагниченности, что так и не получило объяснения.

К 1974 г. Пьер де Жен [29] уже описал, как можно перенести идею градиентного разложения Гинзбурга – Ландау с жидких кристаллов на АБМ-состояние, чтобы описать текстуры, подобные жидкокристаллическим, в *A*-фазе. Бринкман, Смит и Блаунт [30] произвели подобное описание для БВ-состояния, чтобы попытаться понять мои ранние измерения ЯМР в *B*-фазе. Им удалось показать, что в цилиндрической геометрии моего эксперимента наблюдается согласие теории с опытом, если предположить, что равновесная ориентация **n** возле стенок цилиндра не параллельна магнитному

полно (которое направлено вдоль оси цилиндра). Для нас это было полным триумфом, поскольку те же идеи были применимы и к A -фазе, где эффекты ориентирования более сильны.

Последующие эксперименты в Белловских лабораториях и в Хельсинки продемонстрировали специфическое ориентирующее влияние поверхностей на текстуры в B -фазе [31, 32]. В Белловских лабораториях также мы наблюдали моды спиновых волн, запертые в текстуре B -фазы, которая была ограничена параллельными поверхностями [33], а хельсинкская группа обнаружила спиновые моды, связанные со спиновыми волнами, запертыми квантованными вихрями в A -фазе [34]. Сдвиги ЯМР-частот B -фазы между близко расположенными поверхностями, обусловленные поверхностной ориентацией $\mathbf{n}$, позволили рассчитать частоты продольного резонанса B -фазы; они хорошо согласовывались с прямыми измерениями частоты продольного резонанса B -фазы [35], которые в свою очередь хорошо согласовывались со значениями, полученными из частот продольного резонанса A -фазы с помощью соотношений Леггетта.

В течение большей части этого периода только группа в Хельсинки использовала для охлаждения адиабатическое ядерное размагничивание меди. Таким образом, она была единственной группой, которая могла наблюдать сверхтекучесть ^3He при нулевом давлении. Это было быстро сделано, и фазовая диаграмма, установленная группой из Ла-Джолла, была продолжена до нулевого давления. Температура сверхтекучего перехода уменьшалась с 2,5 мК при давлении плавления до 0,9 мК при нулевом давлении, в то время как температура B -перехода росла почти линейно с понижением давления, пока при 21 бар B -фаза не становилась единственной фазой, устойчивой в малых магнитных полях. Группы из Ла-Джолла и Хельсинки провели измерения теплоемкости жидкости в области сверхтекучего перехода и нашли, что при малых давлениях сверхтекучесть очень напоминает модель БКШ со слабой связью, а при больших давлениях эффекты сильной связи приводят к ускорению роста щели в A -фазе по сравнению со случаем малых давлений. Также группа из Хельсинки продолжила многие из моих измерений ЯМР вдоль кривой плавления в область меньших давлений [36].

В конце 1974 г. прибыл мой ЯМР-магнит с высокой однородностью, и я решил пристальней взглянуть в крошечную область, называемую A_1 -фазой, которая появлялась при расщеплении A -перехода в магнитном поле. Предполагалось, что в этой области происходит спаривание только одной из двух спиновых компонент, но не было известно какой. Когда я только планировал обустройство моей лаборатории, меня мучила мысль о том, что к началу работы *единственной* неисследованной фазой будет A_1 -фаза. Я хотел измерить наклон зависимости сдвига частоты как функцию температуры в этой фазе, $d(v_{\text{liquid}}^2 - v_{\text{lamor}}^2)/dT$, и сравнить с соответствующим наклоном при малых полях в A -фазе. Это оказалось грандиозной задачей, поскольку максимальный сдвиг в A_1 -фазе был всего около 3 Гц, независимо от величины магнитного поля. Как обычно, мне повезло. Я заметил, что благодаря медной фольге, которую я использовал, чтобы экранировать осциллирующее магнитное поле от твердого ^3He в моей ячейке, в ЯМР-линии наблюдалась крайне узкая часть, что позволяло мне измерять сдвиг частот до 0,1 Гц даже при ЯМР-частоте в 24 МГц.

Наконец, я нашел отношение наклонов, которое составляло 0,188, но не имел никакого понятия о том, что это число значило.

Я призвал на помощь Фила Андерсона, чтобы дать интерпретацию данных в A_1 -фазе. В один воскресный день он разработал теорию. Его теория не только показала, что это соотношение согласуется с идентификацией Андерсоном и Бринкманом A - и B -фаз как АБМ- и БВ-состояний, но и правильно предсказала форму экспериментальных кривых [37]. К несчастью, эта комбинация теории и эксперимента не указала на спиновую компоненту, претерпевающую спаривание в A_1 -фазе. И хотя сегодня есть некоторые свидетельства того, что эти спины параллельны магнитному полю, они не являются полностью убедительными [38, 39]. По иронии судьбы, наиболее важным вкладом этой ранней работы по A_1 -фазе оказались не детальные измерения, а просто сам факт наличия поперечного сдвига. В 1975 г. Дэвид Мермин [40] показал, что наиболее вероятный кандидат с $L = 3$ (f -волновое спаривание) на роль A_1 -фазы не должен иметь поперечного сдвига. Это, вероятно, до сих пор лучшее подтверждение того, что A - и B -фазы не могут быть f -волновыми состояниями.

К середине сентября 1974 г. по крайней мере четыре группы изучали новые фазы. Группы в Корнелле, Ла-Джолле и Аргонне нашли возможность возбуждения нормальных колебаний сверхтекучих параметров порядка посредством ультразвуковых волн. Эта техника стала еще одним проникающим зондом для исследования сверхтекучести. Корнелльская группа позже обнаружила очень интересный нелинейный отклик на звуковые волны, а группа в Ла-Джолле исследовала линейное и нелинейное "кружение" намагниченности в сверхтекучих фазах после того, как резко выключалось небольшое магнитное поле.

Летом 1974 г. Линтон Корручини, с которым я работал в Корнелле будучи аспирантом, приехал в Белловские лаборатории, и у нас было необыкновенно плодотворное лето. Там же был и Хенрик Смит из Копенгагена, который вместе с Бринкманом работал над теорией сверхтекучего ^3He . Корручини и я решили осуществить несколько новых экспериментов по импульсному ЯМР для изучения сверхтекучести. Было необходимо полностью экранировать твердый ^3He , получавшийся при компрессии, от осциллирующего магнитного поля, и мы придумали очень искусную конструкцию, чтобы добиться этого.

Вместе с Корручини я сначала измерил магнитную восприимчивость B -фазы с помощью импульсного ЯМР [27] и нашел очень хорошее согласие с моими предыдущими результатами по непрерывному ЯМР. Затем мы приступили к изучению спиновой динамики при больших отклонениях намагниченности от равновесия. Бринкман и Смит предсказали, как должен зависеть сдвиг частоты от угла отклонения в A -фазе, и мы обнаружили, что их предсказание описывает то, что мы видели, замечательно хорошо [41]. Однако они даже близко не смогли предсказать того, что мы увидели в B -фазе. При увеличении угла отклонения намагниченности от направления постоянного поля не было никакого сдвига частоты, пока мы не дошли до угла в $(104 \pm 1,5)^\circ$, после чего наблюдалось резкое увеличение сдвига частоты [42]. Этот угол был очень близок к тому, на который надо повернуть спиновую систему координат по отношению к орбиталь-

ной координатной системе, чтобы минимизировать дипольную энергию в БВ-состоянии, и Боб Ричардсон пребывал в приподнятом настроении от прямого измерения этого угла. Бринкман и Смит смогли определить, что происходит со спиновой системой в наших экспериментах, и вскоре стало ясно, что мы на самом деле произвели прямое измерение угла вращения. Но они не могли объяснить, почему спиновая система ведет себя таким образом. Объяснение, в конечном счете, было представлено российским теоретиком Игорем Фоминым [44]. Корручини и я также провели первые исследования продольной спиновой релаксации в обеих сверхтекучих фазах [45]. В общей сложности итогом этого лета стали семь публикаций, три из них — в *Physical Review Letters*.

В ходе наших экспериментов по импульсному ЯМР мы с Корручини наблюдали, что для достаточно больших углов отклонения время, когда намагниченность когерентно прецессирует, значительно больше возможного, если для оценки исходить из градиентов магнитного поля, имевшихся в образце. Мы назвали это поведение "спиновой волной с нулевым k ", но по-настоящему не понимали его, захоронив в трудах конференций [42, 46]. Годы спустя Буньков с сотрудниками в России открыли это явление заново [47], а Фомин объяснил его [48] на основе спиновых сверхтоков в B -фазе, которые увлекаются градиентами параметра порядка, так как намагниченность в области градиентов поля сворачивается в спираль. Эти спиновые сверхтоки эффективно увеличивают угол отклонения в областях с меньшим магнитным полем. Когда угол отклонения превосходит 104° , ЯМР-частота данного участка образца начинает расти. Когда частота сравняется с частотой в области больших магнитных полей, спиновые сверхтоки исчезнут, и весь образец будет прецессировать синфазно. Они назвали этот замечательно организованный танец "гомогенно прецессирующим доменом" и использовали его для изучения многих необычных явлений в B -фазе.

Для завершения этого сокращенного отчета об углублении нашего понимания этих замечательных жидкостей не хватает ни времени, ни места. Я советую читателю узнать побольше из превосходных обзорных статей, написанных в период открытий некоторыми из исследователей, внесших наибольший вклад [49]. В завершение я кратко упомяну о том, что происходило с поиском антиферромагнетизма в твердом ^3He ; ведь именно эту тему Дэйв Ли вверил мне для диссертационной работы.

В 1974 г. Билл Гальперин [50], один из аспирантов Боба Ричардсона, использовал охлаждение Померанчука для наблюдения падения спиновой энтропии. Это падение свидетельствовало о ядерном упорядочении в твердом ^3He , но не при 2 мК, как предсказывалось из измерений выше T_c , а при 1 мК. Кроме того этот переход был явно первого рода, а не второго, как предполагалось. Гальперин разработал искусную самосогласованную технику для продолжения измерений вдоль кривой плавления на область температур, меньших температуры упорядочения в твердом теле, в которой не использовался какой-либо вторичный термометр. Позже группа Дуайта Адамса из Флоридского университета [51] применила эту технику в сильных магнитных полях и обнаружила, что в полях, больших 0,4 Тл, имеется вторая магнитоупорядоченная фаза, намагниченность которой значительно больше, чем у фазы в слабых

полях. О природе этого магнитного перехода первыми догадались теоретики [52], но природа фазы в слабых полях оставалась загадкой.

Наконец, в 1979 г. я снова начал думать о твердой фазе, как и Дуайт Адамс из Флоридского университета. Заимствуя и модифицируя стратегию Билла Гальперина, а также используя ядерное размагничивание меди для охлаждения, я научился выращивать единичные кристаллы ^3He в магнитоупорядоченном состоянии прямо из сверхтекучей жидкости. Эксперименты по магнитному резонансу как во Флориде [53], так и в Белловских лабораториях [54] выявили богатый ЯМР-спектр в упорядоченной фазе в слабых полях, быстро показав, что структура подрешетки имела симметрию, меньшую кубической. Майк Кросс, Дэнисл Фишер и я сумели определить из наших ЯМР-спектров симметрию упорядоченного состояния и, в конечном счете, угадать точную структуру подрешетки. Мы нашли, что фаза в слабых полях состоит из ферромагнитных плоскостей спинов, перпендикулярных какому-либо из главных кристаллических направлений, а спиновая ориентация этих плоскостей меняется следующим образом: две плоскости вверх, две плоскости вниз [55]. Эта работа была сделана в то время, когда на экранах шел фильм "Звездные войны", и в честь робота R2D2 из этого фильма мы назвали упорядоченную фазу "U2D2", что означало "up 2, down 2".

В твердом ^3He энергия атом-атомного обмена, приводящая к спиновому упорядочению, почти на четыре порядка больше, чем прямая магнитная диполь-дипольная энергия ядер, и в четыре раза меньше, чем характерная решеточная энергия, т.е. энергия Дебая. Это сделало данные системы особенно удобными модельными системами при изучении кооперативного магнитного поведения [56]. Несомненно, нам очень повезло, что в области шириной в три тысячных градуса вблизи абсолютного нуля температуры существует пять прекрасно упорядоченных фаз твердого и жидкого ^3He , поведение которых продолжает бросать вызов нашему пониманию и предоставлять испытательную площадку для новых идей.

Список литературы

1. Померанчук И *ЖЭТФ* **20** 919 (1950)
2. См. Richardson R C *Les Prix Nobel*
3. Ануфриев Ю Д *Письма в ЖЭТФ* **1** 155 (1965)
4. Sites J R, Osheroff D D, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **23** 836 (1969)
5. Leggett A J, Rice M J *Phys. Rev. Lett.* **20** 586 (1968); **21** 506 (1968); Leggett A J *J. Phys. C* **3** 448 (1970)
6. Corruccini L R, Osheroff D D, Lee D M, Richardson R C *Phys. Rev. Lett.* **27** 650 (1971)
7. Johnson R T, Rapp R E, Wheatley J C *J. Low Temp. Phys.* **6** 445 (1971)
8. Osheroff D D Ph.D. Thesis (New York, Ithaca: Cornell University, 1973) (unpublished)
9. Johnson R T et al. *J. Low Temp. Phys.* **2** 403 (1970)
10. Straty G C, Adams E D *Rev. Sci. Instrum.* **40** 1393 (1969)
11. Osheroff D D, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **28** 885 (1972)
12. Osheroff D D, Gully W J, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **29** 920 (1972)
13. Leggett A J *Phys. Rev. Lett.* **31** 352 (1973)
14. Ambegaokar V, de Gennes P G, Rainer D *Phys. Rev. A* **9** 2676 (1974)

15. См., например, Wheatley J C, The London Prize Lecture, *Proc. 14th Int. Conf. Low Temp. Phys.* **5** 6 (1975) (Eds M Krusius, M Vuorio) (Amsterdam: North Holland) и ссылки к статье
16. Anderson P W, Morel P *Phys. Rev.* **123** 1911 (1961)
17. Balian R, Werthamer N R *Phys. Rev.* **131** 1553 (1963); это состояние было ранее рассмотрено Вдовиным Ю., однако его формализм не имел широкого применения, и его результаты не были хорошо известны на Западе: Вдовин Ю А в сб. *Применение методов квантовой теории поля к задачам многих тел* (Ред. А И Алексеева) (М.: Госатомиздат, 1963) с. 94
18. Leggett A J *Phys. Rev. Lett.* **14** 536 (1965)
19. Layzer A, Fay D *Int. J. Mag.* **1** 135 (1971)
20. Anderson P W, Brinkman W F *Phys. Rev. Lett.* **30** 1108 (1973); Brinkman W F, Serene J, Anderson P W *Phys. Rev. A* **10** 2386 (1974)
21. Leggett A J *Ann. Phys.* **85** 11 (1974)
22. Osheroff D D, Brinkman W F *Phys. Rev. Lett.* **32** 584 (1974)
23. Gully W J, Gould C, Richardson R C, Lee D M J. *Low Temp. Phys.* **24** 563 (1976)
24. Paulson D N, Johnson R T, Wheatley J C *Phys. Rev. Lett.* **31** 746 (1973)
25. Ahonen A I et al. *Phys. Lett. A* **51** 279 (1975)
26. Ahonen A I, Krusius M, Paalanen M A J. *Low Temp. Phys.* **25** 421 (1976)
27. Corruccini L R, Osheroff D D *Phys. Rev. Lett.* **34** 695 (1975)
28. Hahn I, Boyd S T P, Bozler H M, Gould C M J. *Low Temp. Phys.* **101** 781 (1995) и ссылки к статье
29. de Gennes P G *Phys. Lett. A* **44** 271 (1973)
30. Brinkman W F, Smith H, Osheroff D D, Blount E I *Phys. Rev. Lett.* **33** 624 (1974)
31. Osheroff D D, Engelsberg S, Brinkman W F, Corruccini L R *Phys. Rev. Lett.* **34** 190 (1975)
32. Ahonen A I et al. *J. Phys. C: Solid State Phys.* **8** L269 (1975)
33. Osheroff D D, van Roosbroeck W, Smith H, Brinkman W F *Phys. Rev. Lett.* **38** 134 (1977)
34. Hakonen P J, Ikkala O T, Islander S T *Phys. Rev. Lett.* **48** 1838 (1982)
35. Osheroff D D *Phys. Rev. Lett.* **33** 1009 (1974)
36. Взгляды 1975 г. изложены: Lounasmaa O V *Contemp. Phys.* **15** 353 (1974); Wheatley J C *Rev. Mod. Phys.* **47** 415 (1975); Leggett A J *Rev. Mod. Phys.* **47** 331 (1975); более современные взгляды на проблему изложены в: Vollhardt D, Wölfle P *The Superfluid Phases of Helium 3* (London: Taylor and Francis, 1990)
37. Osheroff D D, Anderson P W *Phys. Rev. Lett.* **33** 686 (1974)
38. Corruccini L R, Osheroff D D *Phys. Rev. Lett.* **45** 2029 (1980)
39. Ruel R, Kojima H *Phys. Rev. B* **28** 6582 (1983); Jiang Q, Kojima H J. *Low Temp. Phys.* **88** 317 (1992)
40. Mermin N D *Phys. Rev. Lett.* **34** 1651 (1975); Mermin N D *Phys. Rev. B* **13** 112 (1976)
41. Osheroff D D, Corruccini L R *Phys. Lett. A* **51** 447 (1975)
42. Osheroff D D, Corruccini L R, in *Proc. 14th Int. Conf. Low Temp. Phys.* Vol. I (Eds M Krusius, M Vuorio) (Amsterdam: North Holland, 1975) p. 100
43. Brinkman W F, Smith H *Phys. Lett. A* **53** 43 (1975)
44. Fomin I A J. *Low Temp. Phys.* **31** 509 (1978)
45. Corruccini L R, Osheroff D D *Phys. Rev. Lett.* **34** 564 (1975)
46. Osheroff D D *Quantum Fluids and Solids* (Eds S B Trickey, E D Adams, J W Duffy) (New York: Plenum Press, 1977) p. 161
47. Боровик-Романов А С, Буньков Ю М, Дмитриев В В, Михарский Ю М *Письма ЖЭТФ* **40** 1033 (1985)
48. Фомин И А *Письма ЖЭТФ* **40** 1037 (1985)
49. Leggett A J *Rev. Mod. Phys.* **47** 331 (1975); Wheatley J C *Rev. Mod. Phys.* **47** 415 (1975); Anderson P W, Brinkman W F *Physics of Liquid and Solid Helium Part II* (Eds K H Bennemann, J B Ketterson) (New York: John Wiley & Sons, 1978) 177; Lee D M, Richardson R C *Physics of Liquid and Solid Helium Part II* (Eds K H Bennemann, J B Ketterson) (New York: John Wiley & Sons, 1978) p. 287
50. Halperin W P et al. *Phys. Rev. Lett.* **32** 927 (1974)
51. Kummer R B et al. *Phys. Rev. Lett.* **34** 527 (1975)
52. Delrieu J M, Roger M, Hetherington J H J. *Phys. (Paris)* **41** C7-231 (1978)
53. Adams E D, Schubert E A, Haas G E, Bakalyar D M *Phys. Rev. Lett.* **44** 789 (1980)
54. Osheroff D D, Cross M C, Fisher D S *Phys. Rev. Lett.* **44** 792 (1980)
55. Относительно свежий обзор магнитных свойств твердого ^3He : Osheroff D D "Magnetic Properties of Solid Helium Three" *J. Low Temp. Phys.* **87** 297 (1992)
56. Feng Y P, Schiffer P, Osheroff D D *Phys. Rev. B* **49** 8790 (1994)