

Эффект Померанчука

Р.К. Ричардсон

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 1996 г.)

PACS number: 67.57.-z

Содержание

1. Введение (1340)
2. Обсуждение предложения Померанчука (1340).
3. Компрессионное охлаждение на практике (1341).
4. Ячейки Померанчука в Корнелле (1342).
 - 4.1. Ячейка охлаждения Джима Сайтса.
 - 4.2. Ячейка охлаждения Корручини–Ошерова.
 - 4.3. Компрессионная ячейка Ошерова.
 - 4.4. Наконец настоящий фазовый переход в твердом ^3He .
5. Эффект Померанчука и кривая плавления в 1996 г. (1347).

Список литературы (1347).

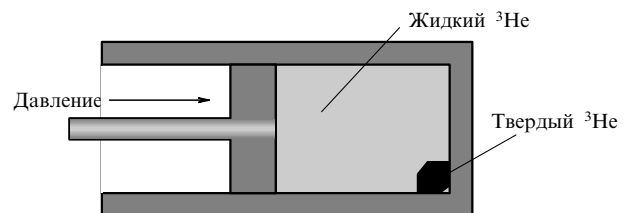
1. Введение

Центральное место в истории открытия сверхтекучести ^3He занимает эффект Померанчука — экспериментально используемый способ охлаждения. Хотя теперь он уже не является особенно полезным методом получения низких температур — это мой любимый пример демонстрации уравнения Клаузиуса–Клапейрона. О таком способе охлаждения очень приятно рассказывать студентам на занятиях по термодинамике.

В 1950 г. И. Померанчук, известный теоретик в области физики элементарных частиц, предположил, что тающий ^3He мог бы быть охлажден сжатием [1]. В то время ^3He был довольно редок и даже еще не был сжижен. Померанчук заметил, что при достаточно низких температурах термические явления в конденсированном ^3He будут определяться спиновыми, а не фоннными свойствами. Жидкий ^3He должен подчиняться статистике Ферми, и его энтропия должна быть пропорциональна температуре, подобно свободным электронам в хорошем металле. С другой стороны, энтропия твердого ^3He совпадает с энтропией неупорядоченной системы слабо взаимодействующих ядер со спином $1/2$. При температурах, больших, чем температура магнитного упорядочения спинов ядер, которую в то время полагали меньше 1 мК , молярная энтропия твердого ^3He должна быть $S = R \log_2 2$ независимо от темпера-

туры, пока не становятся важными высокотемпературные фоннные моды твердого тела. (Дебаевская температура твердого ^3He составляет приблизительно 30 К .)

Идея метода представлена на рис. 1. Энтропия твердого ^3He превосходит энтропию жидкого ^3He при температурах, меньших, чем $0,3\text{ К}$. Если смесь сжимается без подвода тепла, она охлаждается по мере того, как жидкость превращается в твердое тело.



$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1,3}{24} = 5\% \text{ (Изменение объема при полном превращении жидкого гелия в твердый)}$$

Рис. 1. Способ Померанчука для охлаждения тающего ^3He . Твердая фаза при низких температурах имеет энтропию большую, чем жидкая. При сжатии смеси жидкость — твердое тело от жидкой фазы отводится тепло по мере образования кристаллов твердой фазы. Для полного превращения жидкой фазы в твердую необходимо изменение объема приблизительно на 5% . В отличие от замерзающей воды, твердая фаза образуется в самой горячей части контейнера.

2. Обсуждение предложения Померанчука

Прошло пятнадцать лет, прежде чем кто-либо использовал предложенный способ охлаждения [2]. Этому было несколько причин. Наиболее важной из них был недостаток ^3He . Он получается при распаде трития. Тритий производился для нужд наиболее смертоносной части индустрии вооружений. К 1965 г. его запасы стали обильными. Физики, работавшие в области низких температур, воспользовались отходами гонки вооружений, ^3He , извлекаемым из газов, приготовленных для водородных бомб.

Второй причиной задержки попыток реализации этого способа был скептицизм экспериментаторов, обус-

ловленный практическими соображениями. Энтропии жидкой и твердой фаз изображены на рис. 2. Жидкий ${}^3\text{He}$ довольно хорошо описывается теорией ферми-жидкости Ландау [3, 4]. Для низких температур молярная энтропия жидкости при давлении плавления составляет приблизительно $S \approx 3RT$. Энтропии жидкой и твердой фаз сравниваются при 0,32 К. В области более низких температур будет работать способ охлаждения, предложенный Померанчуком. Адиабата охлаждения указана стрелкой **A** на вертикальной оси. В данном случае жидкость с начальной температурой 0,1 К и энтропией $0,2R$ при сжатии будет образовывать смесь жидкость–твердое тело, которая в конечном счете охладится до очень низких температур. Максимальное количество тепла, которое можно отвести, есть теплота перехода жидкость–твердое тело, соответствующая изотерма помечена **B**. Молярная теплота перехода при $T = 0,1$ К равна 0,42 Дж.

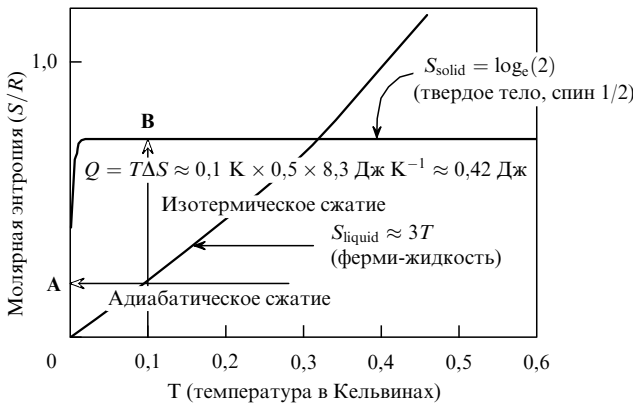


Рис. 2. Энтропии жидкого и твердого ${}^3\text{He}$. При $T < 0,32$ К жидкий ${}^3\text{He}$ имеет меньшую энтропию, чем твердая фаза. Пример на рисунке отвечает $T = 0,1$ К. Теплота перехода, связанная с затвердением 1 моля жидкого ${}^3\text{He}$, составляет 0,42 Дж, что означает существенный отвод тепла при столь низких температурах.

Эффективность охлаждения необходимо сравнить с возможными тепловыми потерями при данном процессе. В этом месте и возникает естественный скептицизм экспериментаторов. Количество работы, требуемой для сжатия, велико. Зависимость давления плавления от температуры ${}^3\text{He}$ изображена на рис. 3. Кривую плавления можно рассчитать, исходя из энтропий жидкой и твердой фаз, с помощью уравнения Клаузиуса–Клапейрона

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{\text{melting}} = \frac{S_{\text{liquid}} - S_{\text{solid}}}{V_{\text{liquid}} - V_{\text{solid}}}, \quad (1)$$

где $S(T)_{\text{liquid}}$ и $S(T)_{\text{solid}}$ — молярные энтропии при плавлении, V_{liquid} и V_{solid} молярные объемы двух фаз при плавлении. Разность $V_{\text{liquid}} - V_{\text{solid}}$ почти не зависит от температуры и имеет величину $1,3 \text{ см}^3 \text{ моль}^{-1}$. Мы возвратимся к уравнению (1) позже, когда я опишу наши эксперименты по измерению энтропии твердого ${}^3\text{He}$.

Работа, совершаемая при превращении жидкости в твердое тело, начиная с 0,1 К, определяется интегралом $\int P dV$ вдоль кривой плавления. Его величина составляет приблизительно 4,2 Дж. Так что требуется совершить работу, на порядок величины большую, чем количество

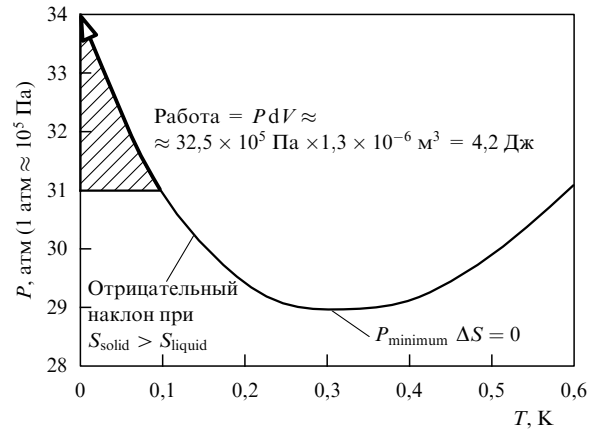


Рис. 3. Давление плавления ${}^3\text{He}$. Рисунок может быть получен из рис. 2 с помощью уравнения Клаузиуса–Клапейрона (см. текст). Молярный объем жидкого ${}^3\text{He}$ превышает объем твердого на $1,3 \text{ см}^3 \text{ моль}^{-1}$. Таким образом, наклон кривой плавления отрицателен для температур меньше 0,32 К. Работа сжатия для образования твердого тела составляет приблизительно 4,2 Дж, что на порядок величины больше отведенного тепла.

тепла, которое отводится при охлаждении. Отношение работы к извлеченному теплу W/Q находится вблизи минимума для рассмотренной температуры. Когда этот процесс стартует с более низких температур, W/Q становится больше 100. Таким образом, необходимость минимизировать тепловые потери, обусловленных трением, бросает вызов конструкторам экспериментальных установок.

3. Компрессионное охлаждение на практике

Весной 1966 г. Д. Ли предложил мне присоединиться к нему с тем, чтобы начать в Корнелле эксперименты по охлаждению твердого ${}^3\text{He}$, используя методику компрессионного охлаждения. Целью эксперимента являлось достижение температуры ядерного магнитного упорядочения в твердом ${}^3\text{He}$. Моя диссертация, над которой я работал в университете Дьюка с Хорстом Мейером [7], была посвящена ЯМР-измерениям величины обменного взаимодействия в твердом ${}^3\text{He}$. Из этих измерений мы знали, что магнитный фазовый переход в твердом ${}^3\text{He}$ должен происходить при температурах, более близких к 1 мК, чем 1 мК. Несмотря на мою уверенность в том, что охлаждение способом Померанчука обречено на неудачу, я пожелал присоединиться к Дэйву в поисках этого перехода. В качестве резервного варианта мы могли бы попытаться охлаждать твердый ${}^3\text{He}$ с помощью магнитного охлаждения [2]. Тогда еще не было опыта успешного применения последнего, но мы параллельно прилагали усилия по использованию ядерного размагничивания [8].

К тому времени, когда я переехал в Корнелл в октябре 1966 г., возможности метода компрессионного охлаждения были успешно продемонстрированы Ануфриевым в Москве [9]. Поперечное сечение прибора Ануфриева представлено на рис. 4. Объем, занимаемый жидким ${}^3\text{He}$, на рисунке преувеличен. Внутри объема, занимаемого ${}^3\text{He}$, находилось 30 см^2 металлической фольги для теплообмена и охлаждения стенки, ограничивающей камеру. Внешняя камера сперва заполнялась жидким

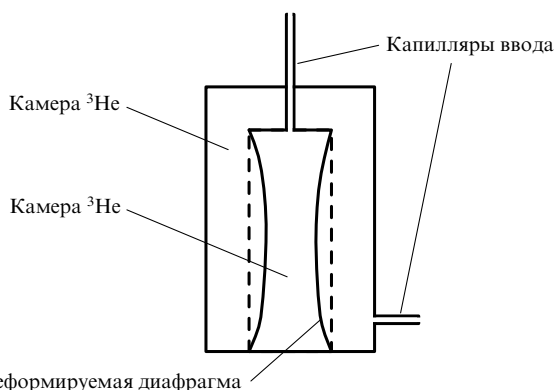


Рис. 4. Поперечное сечение компрессионной ячейки, использованной Ануфриевым. Как внутренняя, так и внешняя камера имеют прямоугольную форму. Тонкие нержавеющие диафрагмы смещаются внутрь при подаче ^3He при давлении плавления. Затем стенки диафрагмы выгибаются наружу, когда внутренняя камера наполняется ^4He , к которому прилагается давление.

^3He при давлении плавления и температурах, превышающих 0,32 К. Когда ячейка охлаждалась из-за размагничивания парамагнитной соли, внутри капилляра ввода образовывалась пробка, блокирующая определенное количество ^3He в ячейке. При низких температурах тщательно охлажденный ^4He подавался во внутреннюю камеру и действовал подобно гидравлической жидкости. При сжатии ^4He выдавливал стенки диафрагмы наружу и уменьшал объем, доступный тающему ^3He . Ячейка остывала до температур меньших 15 мК — наименьшей температуры, которая могла быть измерена термометрами, находящимися в контакте с внешней поверхностью ячейки.

Интересно отметить использование ^4He как гидравлической жидкости для изменения размеров ячейки с ^3He . При температурах меньше 0,3 К доля нормальной компоненты жидкого ^4He очень мала. Теплоемкостью и теплопроводностью жидкого ^4He можно пренебречь. В пионерском эксперименте Ануфриева этот способ охлаждения был испытан, была показана его работоспособность, а также было продемонстрировано использование ^4He как гидравлической жидкости при низких температурах. Опасения чрезмерного фрикционного нагрева, связанного с движением металлической диафрагмы, оказались беспочвенными. Мы теперь знаем, что практически все металлы обладают хорошей добротностью при температурах, меньших 4К. В последующие годы *каждый* аппарат, в основе которого лежал принцип сжатия посредством металлической диафрагмы либо сильфона, производил успешное охлаждение. Но жидкий ^4He нужно использовать с осторожностью. Давление плавления ^4He на 4 атм меньше, чем ^3He . Поэтому в конструкцию экспериментальной установки необходимо включить натяжные пружины или усилители давления, чтобы не допустить затвердения ^4He в процессе сжатия.

4. Ячейки Померанчука в Корнелле

4.1. Ячейка охлаждения Джима Сайтса

Наша первая попытка охлаждения методом Померанчука была связана с диссертацией Джима Сайтса. Целью его эксперимента было измерение магнитной восприим-

чивости тающего твердого ^3He при температурах, близких или меньших температуры ядерного магнитного фазового перехода. У нас были длительные дискуссии о конструкции установки. Я часто сожалел, что мы не последовали одному из первоначальных предложений Дэйва Ли об использовании груза для сжатия сильфона с тающим ^3He . Тяжелая масса, подвешенная на проволоке, медленно опускалась бы на сильфон контролируемым образом. Груз должен иметь большую плотность и минимальные магнитные свойства. Нам казалось, что только золото является по-настоящему подходящим металлом. Представьте наш доход, если бы мы купили 5 кг золота по цене 1967 г. \$30 за тройскую унцию¹!

Прежде чем мы завершили наши первые эксперименты в Корнелле, группа Уитли в Ла-Джолла сообщила о крайне удачном компрессионном охлаждении ^3He до температур, меньших 2 мК [10, 11]. Их конструкция использовала трубку с ^3He с эллипсоидальным поперечным сечением. Трубка была окружена сжатым ^4He . Вся эта сборка размещалась в камере смешения криостата растворения [2] и предварительно охлаждалась в течение нескольких дней до 24 мК.

Первая конструкция, использованная в Корнелле, была предложена нашим коллегой Джоном Реппи. Она изображена на рис. 5. Упрощенная схема прибора показана на рис. 6. Ячейка содержала два концентрических медно-бериллиевых сильфона и три гелиевых камеры [12, 13]. В самой внутренней камере, камере I, находился ^3He , в двух внешних камерах — ^4He . Пред-

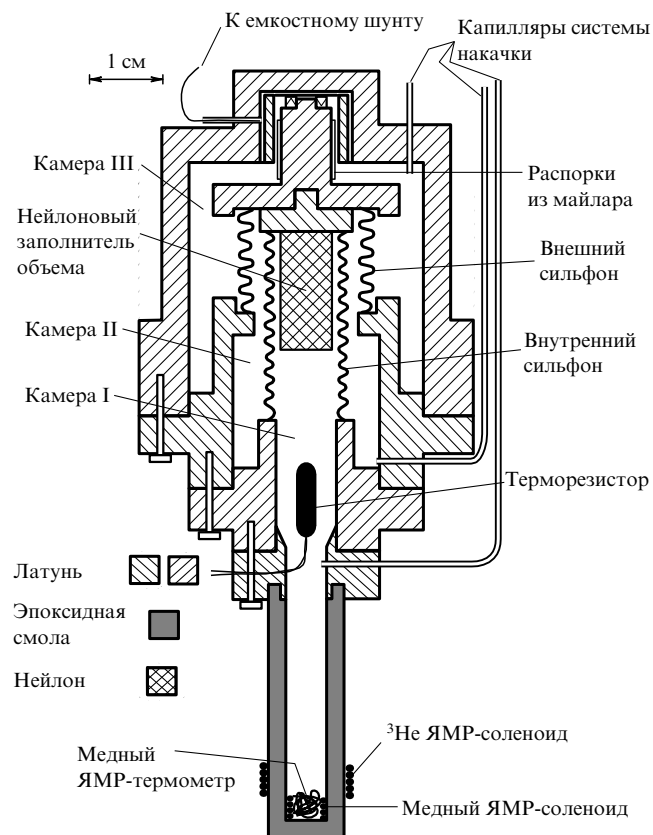


Рис. 5. Ячейка охлаждения Померанчука, использованная Джимом Сайтсом.

¹ 31, 1 г.

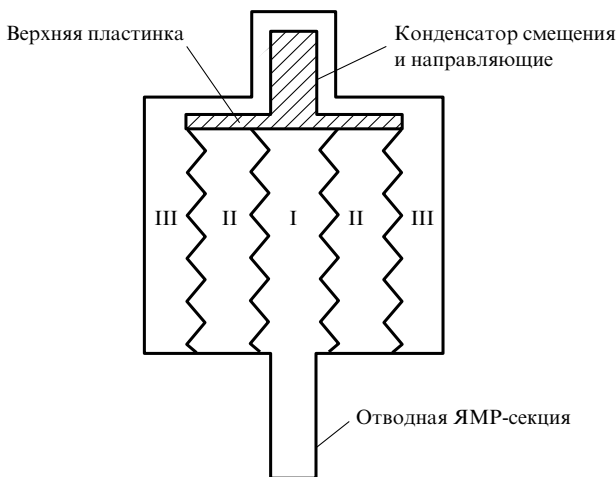


Рис. 6. Схематическое представление ячейки Джима Сайтса.

варительно давление во всех камерах доводилось приблизительно до давления плавления их содержимого, и ячейка охлаждалась с помощью криостата растворения до 25 мК. Сжатие ^3He достигалось посредством приложения давления к ^4He в камере II. Мы тогда полагали, что удаление жидкости из ячейки приведет к некоторым преимуществам. Положение сборки сильфонов контролировалось по изменению емкости короткого стержня, прикрепленного к "верхней пластинке" сборки. Минимальная температура, зафиксированная медным ЯМР-термометром, составляла 7 мК. Экстраполированная по величине магнитной восприимчивости твердого ^3He , средняя температура твердого ^3He иногда опускалась до 2 мК. Как и у группы Уитли, наше внимание было целиком сосредоточено на твердом ^3He . Жидкая компонента рассматривалась лишь как агент охлаждения!

У нашей первой ячейки Померанчука было несколько значительных недостатков. Наиболее существенный из них состоял в том, что спустя всего несколько часов она разогревалась, а изменение объема было много меньше 5%, необходимых для конверсии всей жидкости в твердое тело. Очевидно, твердый гелий застревал в витках сильфонов и ломался, когда сильфоны сжимались. Если иметь в виду наше желание измерить температурную зависимость магнитной восприимчивости твердого ^3He , у нашей ячейки были еще два конструкторских недостатка. Место, где возникал твердый ^3He , было непредсказуемым, а постоянная времени медного ЯМР-термометра была очень велика. К счастью, некоторые из зародышей твердой фазы образовывались на "крысином выводе" из медных проводов на дне отводной ЯМР-секции. Время тепловой релаксации ядерной намагниченности в металлах T_1 обратно пропорционально температуре. Для меди произведение $T_1 T$ приблизительно составляет 1 с К. Область минимальных температур около 2 мК была доступна для измерений лишь в течение 10 минут, и медный термометр никогда не успевал за изменениями температуры.

Наконец, концептуальная ошибка в конструкции нашей первой компрессионной ячейки охлаждения состояла в том, что не было предусмотрено измерение давления ^3He напрямую. Мы могли лишь следить за изменением объема, контролируя смещение сильфонов. Но ценная термодинамическая информация, предоста-

вляемая знанием давления плавления, была недоступна в той серии экспериментов.

4.2. Ячейка охлаждения Корручини – Ошерова

Наши следующие попытки охлаждения были предприняты с ячейкой, сконструированной для исследований необычных явлений спиновой диффузии, предсказанных Леггеттом и Райсом [14]. Эта ячейка изображена на рис. 7. Мы использовали холодный жидкий ^3He из ячейки Померанчука для охлаждения отдельной камеры либо с жидким ^3He , либо с разбавленным жидким раствором ^3He в ^4He [15, 16]. Даг разрабатывал технологию охлаждения в то время, как Линтон Корручини конструировал камеру для ЯМР-измерений. Учитывая наш опыт с ячейкой Джима Сайтса, Ошеров решил попытаться сжимать ^3He сильфоном, который расширяется. Идея состояла в том, чтобы избежать разрушения ^3He внутри сжимающегося сильфона. Компрессионная ячейка ^3He была наполнена жидкостью при давлении плавления, и давление прилагалось к ^4He в верхней камере. Разница в давлениях плавления двух изотопов учитывалась тем, что диаметр сильфона с ^4He был больше диаметра сильфона с ^3He в отношении 3,5:1. Можно было

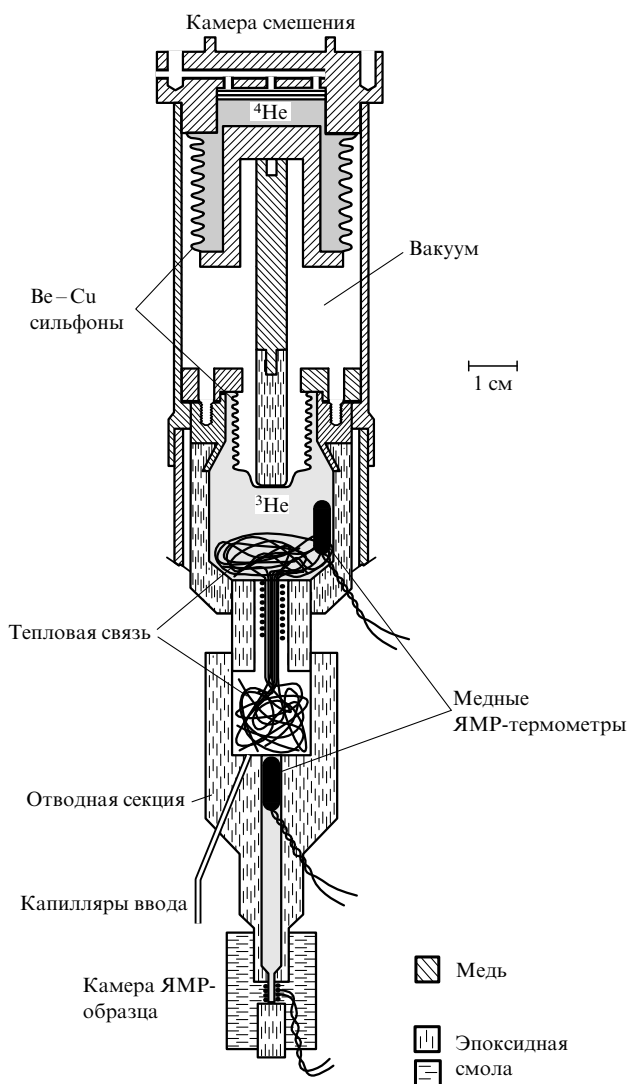


Рис. 7. Ячейка охлаждения Корручини – Ошерова.

полностью перевести ^3He в твердое состояние, не поднимая давления ^4He выше 10 бар.

Пучок маленьких медных проволочек осуществлял тепловой контакт между областью сжимаемого ^3He и областью образца для ЯМР-измерений. Температуры компрессионной области и области образца измерялись по ЯМР-сигналам меди.

Прибор работал великолепно, как и теория Леггетта–Райса. Эксперимент был легким. До сжатия ячейка предварительно охлаждалась до 25 мК криостатом растворения. Мы могли охлаждать область образца до 4 мК. Обычно мы сжимали жидкий ^3He от 8 до 12 часов для того, чтобы сохранить тепловое равновесие и увеличить эффективность охлаждения ячейки образца ячейкой охлаждения. Камера сохраняла минимальную температуру до 4 часов, затем медленно разогревалась до 10 мК в течение 5 часов. Дальнейший разогрев достигался частичной декомпрессией ячейки охлаждения. Наименьшая температура, зарегистрированная медным ЯМР-термометром в ячейке охлаждения, составляла 3 мК. Эта ячейка была предшественницей той, которая использовалась при открытии сверхтекучести ^3He . Поскольку она не предназначалась для изучения ^3He в ней самой, в компрессионной ячейке был минимум аппаратуры.

4.3. Компрессионная ячейка Ошерова

Компрессионная ячейка, использованная Ошеровым [17] в ходе его экспериментов по плавлению ^3He , была разновидностью той, которую мы использовали с Корручини при измерениях спиновой диффузии. Эпоксидное дно ячейки можно было без труда заменить, и в течение 6 месяцев мы использовали не менее 5 различных эпоксидных отводных секций. Ячейка, изображенная на рис. 8, была той версией, что была опубликована вместе с результатами, претендующими на измерение фазового перехода в твердом ^3He . У нее были два важных конструкторских отличия от предыдущих ячеек. Во-первых, мы заменили металлический ЯМР-термометр с медного на платиновый. Время теплового равновесия для ядра ^{195}Pt в 30 раз меньше, чем для меди. Платина значительно менее восприимчива к эффектам нагрева малыми вихревыми токами, чем медь. В конечном счете, термометр считывал температуры, значительно меньше 2 мК.

Второе изменение было, возможно, более важным: был подключен датчик для измерения давления гающего ^3He . Тонкая металлическая диафрагма на дне ячейки выгибалась в меру изменения давления. Изгиб измерялся емкостным способом. Одна обкладка прикреплялась к центру диафрагмы, а другая фиксировалась на выступе эпоксидной отводной секции. Эта конструкция была изобретена Стрэйти и Адамсом [18] и широко использовалась в Корнелле и в других экспериментах. Давление плавления есть однозначная функция температуры. При более высоких температурах давление пара газов ^3He и ^4He , находящихся в равновесии с жидким гелием, обычно используются для калибровки других термометров. Адамс ранее предположил, что давление плавления ^3He может быть использовано как стандарт температуры [19]. В конце ноября 1971 г., когда Даг Ошеров "практиковался" в использовании аппаратуры, измерения давления давали информацию об изменениях температуры прибора.

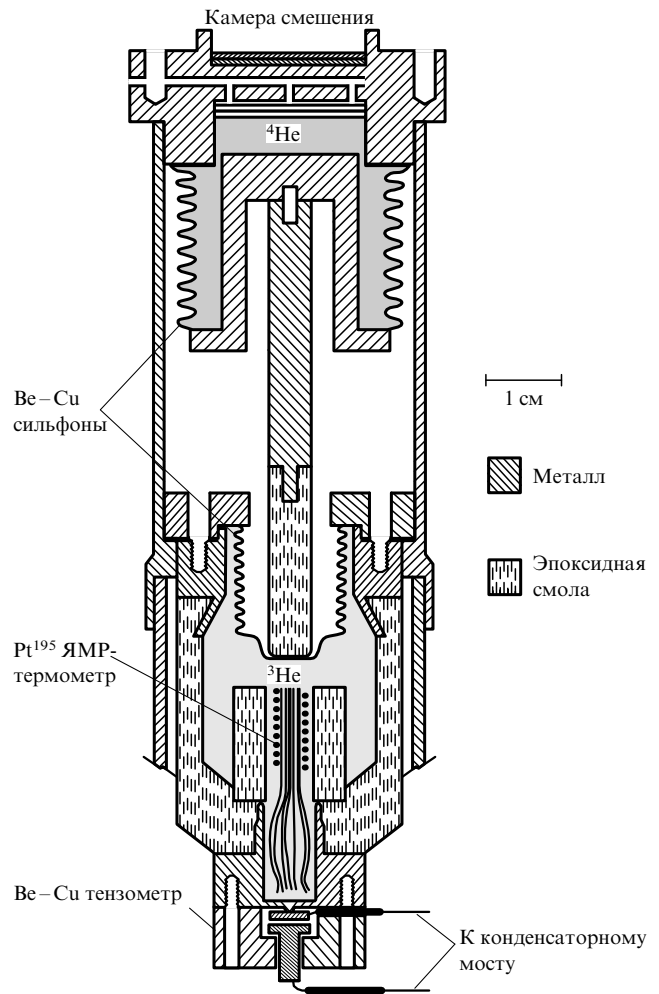


Рис. 8. Ячейка Померанчука, использованная Дагом Ошеровым.

Дэйв Ли и Даг Ошеров описали многие детали этих первоначальных измерений в своих Нобелевских лекциях. Хорошо известная кривая "давление–время" воспроизведена на рис. 9. Эксперимент проводился с

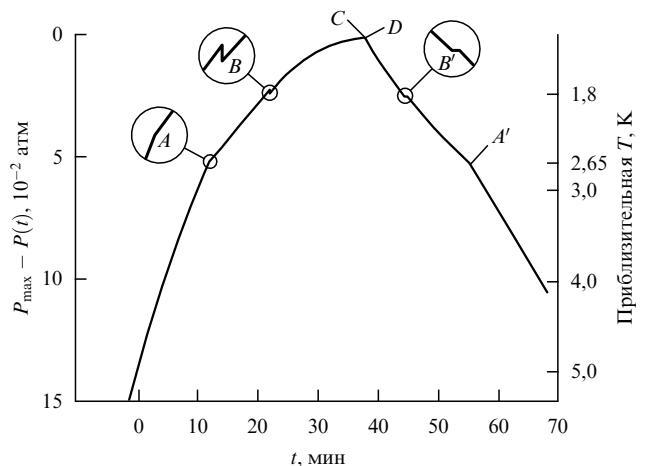


Рис. 9. Измерение изменения во времени давления плавления ^3He при постоянном отводе тепла в ячейке Померанчука, использованной Ошеровым.

постоянной скоростью сжатия сифлона с ^3He , т.е. с постоянной скоростью отвода тепла. Шкала давления может быть интерпретирована как измерение изменения температуры. Температурная шкала справа была нашей лучшей оценкой термодинамической температуры и была основана на измерениях магнитной восприимчивости Pt^{195} . Давление отсчитывается от максимального давления плавления ^3He .

Точки, обозначенные A и A' , соответствуют переходу жидкого ^3He из нормальной фазы в сверхтекучую и обратно. Скорость остывания или нагрева в этих точках изменяется из-за изменения теплоемкости жидкого ^3He . $dT = (1/C) dQ$, где T — температура, C — теплоемкость, Q — подвод тепла. Для постоянной скорости подвода тепла dQ/dt скорость изменения температуры есть $dT/dt = (1/C)(dQ/dt)$. Внезапное увеличение теплоемкости вызывает уменьшение скорости охлаждения в точке A . В то время мы ошибочно сопоставляли изменение теплоемкости с долгожданным ядерным магнитным переходом в твердой фазе. Точки B и B' связаны с другим термодинамическим явлением. В точке B должно происходить изменение теплоты перехода, поскольку имеется внезапное, но небольшое, уменьшение температуры ячейки. Давление, при котором происходило событие типа B , менялось и зависело от скорости охлаждения. Мы правильно интерпретировали это событие как переохлаждение. Точка B' — это равновесный переход, как мы теперь знаем, из сверхтекучей B -фазы в сверхтекучую A -фазу. Изменение температуры прекращается на некоторое время, поскольку B -фаза поглощает дополнительное тепло, чтобы произошел фазовый переход первого рода (подобно таянию льда или замерзанию жидкого ^3He). Точки C и D на рис. 9 соответствуют достижению максимального давления и началу медленной декомпрессии.

Представленные на рис. 9 измерения содержали обескураживающие противоречия. Поскольку ранее ничего не было известно о процессе ядерного упорядочения, мы предполагали, что точки B и B' характеризуют переход во вторую магнитную фазу. Однако общее изменение давления между точкой A и максимальным давлением плавления было удивительно большим. В единицах СИ разность давлений составляет 0,00527 МПа. В этой связи мы сделали следующее замечание: "Для того чтобы при изменении температуры от 2,7 мК до 0 мК, изменение давления, полученное интегрированием уравнения Клаузиуса – Клапейрона,

$$\Delta P = \int \frac{(S_{\text{solid}} - S_{\text{liquid}}) dT}{V_{\text{solid}} - V_{\text{liquid}}} \approx \int \frac{S_{\text{solid}}}{\Delta V} dT, \quad (2)$$

соответствовало полученной величине, необходимо считать энтропию твердого тела практически постоянной в широком температурном диапазоне ниже температуры перехода 2,7 мК. На это возможное поведение энтропии твердого тела также указывает почти постоянный наклон $P(t)$ между точками A и B на рис. 9. Мы не знаем ни одной физической системы с таким поведением энтропии [19]. Использование нашей "приблизительной" температурной шкалы потребовало бы, чтобы энтропия твердого тела сохраняла значение $R \log_2 2$ в температурном диапазоне между 2,7 мК и 1,5 мК!

Наши опасения в отношении интерпретации полученных данных были хорошо обоснованными. В нашей

последующей статье о ЯМР-свойствах ^3He в компрессионной ячейке мы, наконец, дали правильное объяснение [20, 21]. Изменение теплоемкости в точке A указывало на изменение свойств жидкого ^3He , а точка B (или B') характеризовала переход в жидкую фазу с еще более отличающимися свойствами.

Менее чем через год после нашего сообщения об A - и B -переходах в ^3He хельсинкская группа [22], используя охлаждение способом Померанчука для изучения сжатой жидкой фазы в ячейке, показала, что вязкость жидкого ^3He в новых фазах уменьшается в 1000 раз. Измерения вязкости производились с помощью колеблющейся струны, погруженной в жидкость.

4.4. Наконец, настоящий фазовый переход в твердом ^3He

После того, как группы Ануфриева, Джима Сайтса и Уитли продемонстрировали, что компрессионный метод охлаждения является эффективным способом охлаждения тающего гелия, мы решили начать вторую серию измерений, используя ячейку, конструкция которой была оптимизирована для изучения твердого ^3He [23]. Компрессионная ячейка, сконструированная Биллом Гальпериним, изображена на рис. 10. Замысел конструкции состоял в том, что если область компрессии будет иметь форму линзы, то будет минимален нагрев, связанный с разрушением ^3He при сжатии. Ячейка содержала как датчик давления ^3He , так и необходимый для измерения абсолютных изменений объема второй набор обкладок конденсатора, прикрепленных к движущейся диафрагме. Мы предусмотрели измерение изменений намагниченности ^3He . Принцип работы ячейки таков же, как и у ранее мною описанных. ^3He при давлении плавления был блокирован в нижней области, а верхняя была заполнена жидким ^4He . Сборка предварительно охлаждалась до 25 мК, компрессия достигалась сжатием ^4He в верхней области.

В последовательности измерений на этой ячейке мы измерили энтропию твердого ^3He вплоть до температур меньших температуры фазового перехода. Мы также смогли измерить теплоемкость жидкого ^3He в области сверхтекучего перехода, теплоту перехода между A - и B -фазами и определить "первопринципную" температурную шкалу [23–25]. Из опыта мы поняли, что времена теплового равновесия различны для жидкой и твердой

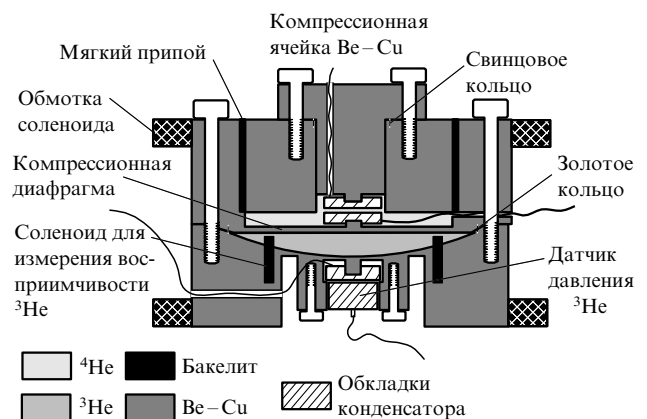


Рис. 10. Ячейка Померанчука, использованная Биллом Гальпериним.

фаз. В криостате имелся отдельный контейнер для жидкого ⁴He. Тепло, передаваемое ⁴He в этом сосуде, быстро изменяло объем ³He в компрессионной ячейке (рис. 11).

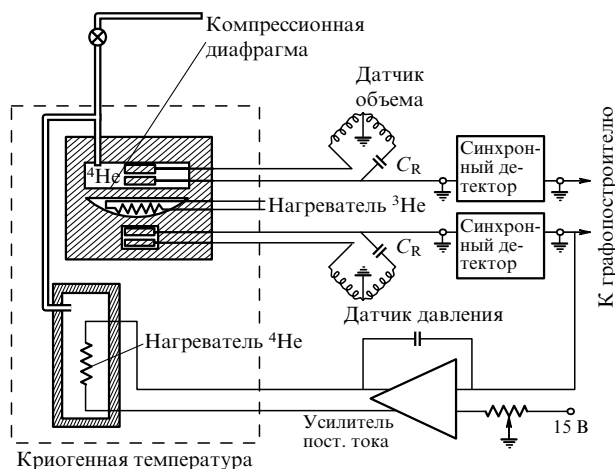


Рис. 11. Цепь слежения для контроля компрессии.

Импульсы нагрева и импульсы охлаждения можно было передавать посредством быстрой декомпрессии или компрессии диафрагмы. Тепло также передавалось при пропускании калиброванного тока через провод нагревателя в компрессионной ячейке с ³He. Давление плавления (и, следовательно, температуру) можно было поддерживать на постоянном уровне, посылая сигнал ошибки с датчика давления обратно на нагреватель ⁴He через усилитель постоянного тока. Пример такого измерения показан на рис. 12. С моста давления был послан сигнал поддержания постоянного давления ³He на нагре-

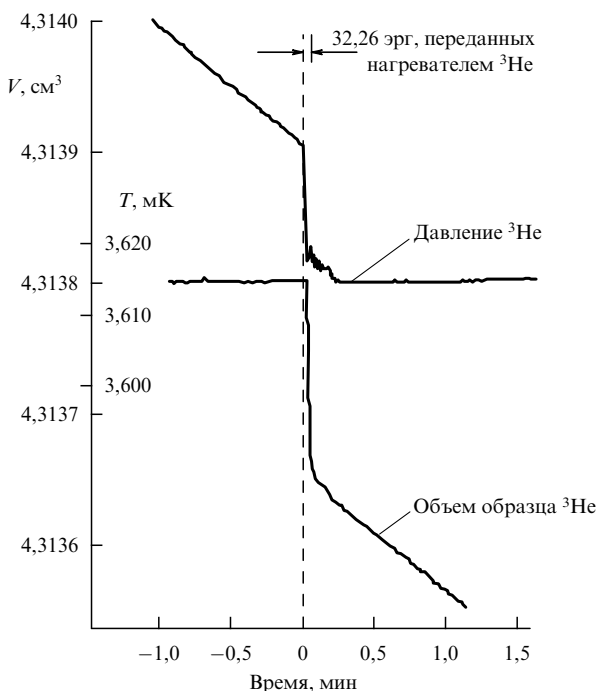


Рис. 12. Измерение изменения объема вследствие импульс нагрева. Компрессионная ячейка поддерживается при постоянном давлении.

ватель ⁴He. В момент $t = 0$ короткий импульс нагрева в 32,6 эрг был передан нагревателем ³He. В ответ цепь контроля на короткое время увеличивала скорость сжатия ³He. Так что импульс тепла сопровождался изменением объема на $2,56 \times 10^{-4} \text{ см}^3$, поскольку дополнительное количество жидкости внезапно переходило в твердый ³He. На рисунке также приведены показания датчика давления, давление выражено в температурных единицах. В ходе измерения максимальное изменение температуры ячейки не превосходило 5 мкК.

Вновь можно воспользоваться уравнением Клаузиуса–Клапейрона, применив его к данным, показанным на рис. 12. Если мы умножим обе стороны уравнения (1) на температуру T , то получим

$$T \left(\frac{dP}{dT} \right)_{\text{melting}} = \frac{T \Delta S}{\Delta V} = \frac{\Delta Q}{\Delta V}.$$

Величина справа есть отношение переданного тепла к изменению объема. Измерения проводились от температур вблизи 25 мК до температуры, соответствующей максимальному давлению плавления, так была получена зависимость $T(dP/dT)$ от P .

Имея в виду неуловимый фазовый переход твердого ³He, мы воспользовались измерениями типа тех, которые были проиллюстрированы на рис. 12, а также другими неравновесными измерениями, сопровождающимися скачкообразными изменениями объема, для получения данных, показанных на рис. 13 [24]. Для давления вблизи максимального давления плавления величина $T(dP/dT)$ быстро уменьшается, соответствующее уменьшение энтропии превосходит половину спиновой энтропии. В этом эксперименте впервые была качественно определена точка магнитного перехода.

Кривая зависимости энтропии от температуры, приведенная на вставке на рис. 13, была получена интегрированием зависимости P от $T(dP/dT)$. Соответствующая температурная шкала есть:

$$\frac{T}{T_{\text{solid}}} = \exp \int_{P_{\text{solid}}}^P \left[T \frac{dP'}{dT} \right]^{-1} dP'.$$

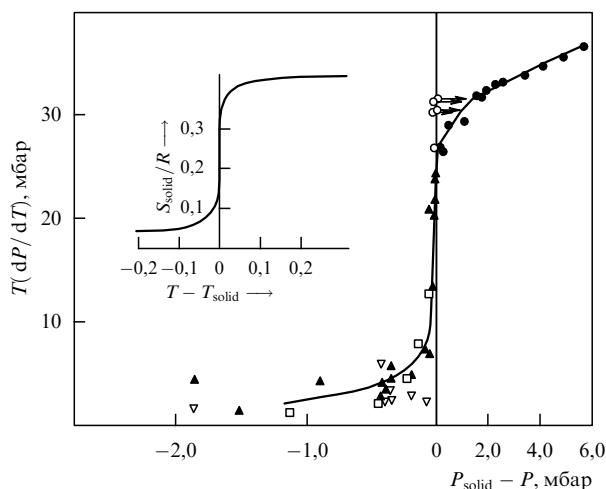


Рис. 13. Уменьшение энтропии при ядерном магнитном фазовом переходе твердого ³He. Зависимость энтропии от температуры была рассчитана, исходя из измерений $T(dP/dT)$ как функции давления.

Одной фиксированной температурной точки достаточно для получения всей низкотемпературной кривой плавления из имеющихся данных. В качестве фиксированной точки мы использовали высокотемпературную энтропию твердого тела, $S_{\text{solid}} \rightarrow R \log_e 2$. (Температура Дебая твердого гелия порядка 30 К, так что фононным вкладом при 30 мК можно пренебречь.)

5. Эффект Померанчука и кривая плавления в 1996 г.

Способ Померанчука более не является предпочитаемым методом охлаждения при изучении жидкого или твердого ^3He . Он слишком ограничен, так как позволяет производить измерения лишь при давлении плавления. Другая, еще более важная причина состоит в том, что метод ядерного размагничивания значительно более эффективен и позволяет охладить ^3He до температур порядка 10 мК [26].

Плавление ^3He играет в термометрии ту же роль, что и в те дни, когда мы открыли сверхтекучие переходы. На кривой плавления имеются четыре легкоизмеримые и воспроизводимые фиксированные точки: минимум давления плавления, сверхтекучий A -переход, сверхтекучий B -переход и переход магнитного упорядочения твердого ^3He . Термометры, использующие кривую плавления [27], стали стандартом температуры при работе в области очень низких температур. С того времени, когда Гальперин впервые проинтегрировал $T(dP/dT)$ вдоль кривой плавления, было много независимых измерений фиксированных точек кривой плавления [6, 28]. Самые последние из них [28] дают: $T_{\text{minimum}} = 0,31517$ мК; $T_A = 2,41$ мК; $T_B = 1,87$ мК и $T_{\text{solid}} = 0,88$ мК. Значения соответствующих давлений также известны с большой точностью, поэтому датчик давления также может быть прокалиброван по фиксированным точкам. Забавно осознавать, что многие современные физики, работающие в области низких температур, запросто воспроизводят данные рис. 9 как стандартную температурную калибровку их аппаратуры.

Список литературы

1. Померанчук И *ЖЭТФ* **20** 919 (1950)
2. Имеется несколько элегантных и систематических обсуждений компрессионной техники охлаждения. Некоторые особенно полезные обсуждения общих методов компрессионного охлаждения и криогеники содержатся в учебниках: Betts D S *Refrigeration and Thermometry Below 1 K* (London: Sussex University Press, 1974); Lounasmaa O V *Experimental Principles and Methods Below 1 K* (New York: Academic Press, 1974)
3. Ландау Л Д *ЖЭТФ* **30** 1058 (1956)
4. Мое первое знакомство с кривой плавления ^3He произошло благодаря упражнению 9 из замечательного учебника по термодинамике для студентов: Pippard A B *The Elements of Classical Thermodynamics* (London: Cambridge University Press, 1957) p. 161; во всей книге имеется лишь 14 задач!
5. Хорошим источником данных о жидком ^3He является обзор: Wheatley J C "Experimental Properties of Superfluid ^3He " *Rev. Mod. Phys.* **47** 415 (1975)
6. Greywall D S *Phys. Rev. B* **33** 7520 (1986)
7. Richardson R C, Hunt E R, Meyer H *Phys. Rev. A* **138** 1326 (1965)
8. Kurti N *Cryogenics* **1** 2 (1960)
9. Ануфриев Ю Д *Письма ЖЭТФ* **1** 155 (1965)
10. Johnson R T, Rosenbaum R, Symko O G, Wheatley J C *Phys. Rev. Lett.* **22** 449 (1969)
11. Johnson R T, Lounasmaa O V, Rosenbaum R, Symko O G, Wheatley J C *J. Low Temp. Phys.* **2** 403 (1970)
12. Sites J R "Magnetic Susceptibility of Solid Helium Three Cooled by Adiabatic Compression" Ph.D. Thesis (Cornell University, 1969) (unpublished)
13. Sites J R, Osheroff D D, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **23** 836 (1969) (unpublished)
14. Leggett A J, Rice M J *Phys. Rev. Lett.* **20** 586; **21** 506 (1968)
15. Corruccini L R "Spin Wave Phenomena in Liquid ^3He Systems" Ph.D. Thesis (Cornell University, 1972) (unpublished)
16. Corruccini L R, Osheroff D D, Lee D M, Richardson R C *J. Low Temp. Phys.* **8** 119 (1972)
17. Osheroff D D "Compressional Cooling and Ultralow Temperature Properties of ^3He " Ph.D. Thesis (Cornell University, 1972) (unpublished)
18. Straty G C, Adams E D *Rev. Sci. Instrum.* **40** 1393 (1969)
19. Scribner R A, Panzick M, Adams E D *Phys. Rev. Lett.* **21** 427 (1968)
20. Osheroff D D, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **14** 885 (1972)
21. Osheroff D D, Gully W J, Richardson R C, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **14** 920 (1972)
22. Anufriev Yu D, Alvesalo T A, Collan H K, Opheim N T, Wennerström P *Phys. Lett. A* **43** 175 (1973); Alvesalo T A, Anufriev Yu D, Collan H K, Lounasmaa O V, Wennerström P *Phys. Rev. Lett.* **30** 962 (1973)
23. Halperin W P "Melting Properties of ^3He : Specific Heat, Entropy, Latent Heat, and Temperature" Ph.D. Thesis (Cornell University, 1975) (unpublished)
24. Halperin W P, Archie C N, Rasmussen F B, Buhrman R A, Richardson R C *Phys. Rev. Lett.* **32** 927 (1974)
25. Halperin W P, Archie C N, Rasmussen F B, Richardson R C *Phys. Rev. Lett.* **34** 718 (1975)
26. Превосходный обзор ядерного магнитного охлаждения имеется в книге: Pobeil F *Matter and Methods at Low Temperatures* (New York: Springer-Verlag, 1992)
27. Souris J S, Tommila T T *Experimental Techniques in Condensed Matter Physics at Low Temperatures* (Eds R C Richardson, E N Smith) (New York: Addison-Wesley, 1988) p. 245
28. Schuster G, Hoffmann A, Hechtfisher D *Czech. J. Phys.* **46-S1** 481 (1996)