

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С393Г

Б-82

2271/2-73

Н.С.Борисов, Б.С.Неганов, Г.Феллер

18/vi-

P8 - 7008

ИЗМЕРЕНИЕ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАСТВОРА  $^3\text{He} - ^4\text{He}$

ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**1973**

**ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ**

P8 - 7008

Н.С.Борисов, Б.С.Неганов, Г.Феллер

ИЗМЕРЕНИЕ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАСТВОРА  $^3\text{He} - ^4\text{He}$   
ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Борисов Н.С., Неганов Б.С., Феллер Г.

P8 - 7008

Измерение теплопроводности раствора  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  при  
сверхнизких температурах

Измерена теплопроводность  $\kappa$  для 6,4%-го раствора  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  в области температур от  $0,008^\circ\text{K}$  до  $0,1^\circ\text{K}$ . Для области ниже  $0,01^\circ\text{K}$  получена зависимость  $\kappa T = 30,5$  эрг/сек.см. Диаметр измерительного капилляра 3,5 мм.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1973

Borisov N.S., Neganov B.S.,  
Feller G.

P8 - 7008

Measurement of Heat Conductivity of Solution  
of  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  at Superlow Temperature

Heat conductivity  $\kappa$  was measured for 6.4% solution of  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  in the temperature range from  $0,008^\circ\text{K}$  to  $0,1^\circ\text{K}$ . For the region lower than  $0,01^\circ\text{K}$  the dependence is obtained  $\kappa T = 30.5$  erg/s.cm. Measurement capillary diameter is 3.5 mm.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1973

## 1. Введение

Процесс теплопередачи в слабых растворах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  при низких температурах обусловлен рядом взаимодействий между квазичастицами  $^3\text{He}$  и фононами  $^4\text{He}$ . Общую теорию процессов диффузии и теплопроводности растворов  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  впервые создали Халатников и Жарков в 1957 г. /1/. При температуре ниже  $0,01^\circ\text{K}$  столкновения квазичастиц  $^3\text{He}$  друг с другом определяют ход теплопроводности в зависимости от температуры, пока длина свободного пробега этого процесса меньше характерного размера сосуда. Исходя из квазиклассических представлений, теплопроводность  $\kappa$  ферми-газа квазичастиц  $^3\text{He}$  можно выразить в приближенном виде:

$$\kappa = \frac{1}{3} n c_3 \lambda v_\phi, \quad /1/$$

где  $\lambda = \frac{1}{\pi n \sigma^2} \left( \frac{T_\phi}{T} \right)^2$  - длина свободного пробега,  $n$  - чис-

ло квазичастиц  $^3\text{He}$  в единице объема,  $v_\phi$ ,  $T_\phi$  - фермиевские скорость и температура,  $c_3 \sim T$  - теплоемкость на квазичастицу  $^3\text{He}$  и  $\sigma$  - эффективный диаметр квазичастицы. Таким образом, теплопроводность следует зависимости  $\kappa = \beta/T$ , где  $\beta$  зависит только от концентрации раствора. В области температур выше  $0,025^\circ\text{K}$  до  $\sim 0,5^\circ\text{K}$  теплопроводность разбавленного раствора определяется взаимодействием фононов  $^4\text{He}$  со стенками сосуда, их поглощением при столкновениях с квазичастицами  $^3\text{He}$  /процесс затухания первого звука, обусловленный вяз-

костью  $^3\text{He}$  / и упругим рассеянием на квазичастицах  $^3\text{He}$ . Для этих процессов Байм и Эбнер /2/ выполнили теоретический расчет и дали описание теплопроводности и длины свободного пробега. В этой области температур теория не дает такой простой температурной зависимости  $\kappa$  от  $T$ , как в области ниже  $0,01^\circ\text{K}$ . Теплопроводность медленно растет при повышении температуры пропорционально  $T$  в степени меньше единицы. Приблизительно от  $0,6^\circ\text{K}$  до  $1,2^\circ\text{K}$  теплопроводность определяется в основном взаимодействием квазичастиц  $^3\text{He}$  с ротонами  $^4\text{He}$ .

Измерения теплопроводности 1%- и 5%-ного растворов были сделаны Уитли и др. в областях температур от  $0,002^\circ\text{K}$  до  $0,03^\circ\text{K}$  /3/ и от  $0,035^\circ\text{K}$  до  $0,5^\circ\text{K}$  /4/. Экспериментальные данные Птухи /5/, полученные в области от  $0,6^\circ\text{K}$  до  $\lambda$ -точки, хорошо согласуются с теорией /1/.

В данной работе были выполнены измерения теплопроводности для раствора равновесной концентрации в области температур от  $0,008^\circ\text{K}$  до  $0,1^\circ\text{K}$  в капилляре диаметром 3,5 мм. Данный способ измерения теплопроводности раствора, имеющего равновесную концентрацию, в нашей работе был выбран потому, что наибольший практический интерес имеет знание теплопроводности раствора именно с равновесной концентрацией. Наши измерения были выполнены в стационарных условиях, в противоположность работе Уитли /3/, где замеры производились во время отогрева низкотемпературной части криостата с размагничиванием церий-магниевого нитрата /ЦМН/.

Длина свободного пробега фононных процессов превышает 2 мм при температурах ниже  $0,04^\circ\text{K}$  /2/. При  $0,1^\circ\text{K}$  она составляет уже несколько десятых миллиметра. Это значит, что в области выше  $0,015^\circ\text{K}$ , где фононы начинают определять теплопроводность, в нашем эксперименте столкновения фононов  $^4\text{He}$  со стенкой капилляра дополнительно ограничивают теплопроводность. Таким образом, нужно подчеркнуть, что наши данные по теплопроводности при температурах выше  $0,015^\circ\text{K}$  соответствуют только диаметру измерительного капилляра 3,5 мм, и при других его размерах должны быть соответствующим образом изменены /4/.

## 2. Методика измерения

На рис. 1 представлена ванна растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  для измерения теплопроводности. В ванне растворения находится небольшой дьюар, изготовленный из стекла, с вставленным внутри термометром и нагревателем из константановой проволоки, имеющим сопротивление около 100 ом. Этот дьюар сообщается с раствором посредством капилляра с внутренним диаметром 3,5 мм. Температура на верхнем конце капилляра измеряется вторым термометром из ЦМН. Эффективное отношение площади капилляра к его длине тщательно измерялось и составляет  $S/l = /2,53 \cdot 10^{-2} \pm 0,03 \cdot 10^{-2} /$  см. Определение электрической мощности константанового нагревателя производилось при помощи измерения тока и падения напряжения. Разность температуры на обоих концах капилляра приравнивалась разности в показаниях двух термометров из ЦМН.

Основная трудность замера состояла в том, что из-за плохой теплопроводности в капилляре нижний термометр очень долго не приходит в равновесие, а так как за время установления равновесия температура верхнего термометра может измениться под влиянием небольших нестабильностей в работе установки в пределах  $\pm 0,0001^\circ\text{K}$ , то замер  $\Delta T$  становится неточным. Эта трудность была обойдена следующим образом: был произведен эксперимент с таким же дьюаром, но без нагревателя и с капилляром,  $S/l$  которого приблизительно в 20 раз больше, т.е. была снята "нулевая" калибровка нижнего термометра. Оба поликристаллических цилиндра с длиной, равной диаметру, имели строго одинаковые размеры, одинаковыми были также коэффициенты взаимной индукции катушек. Для того, чтобы "нулевая" калибровка нижнего термометра не изменилась в других экспериментах, были намотаны специальные катушки с пропиткой эпоксидной смолой /чтобы коэффициенты взаимной индукции катушек не менялись произвольно от эксперимента к эксперименту/. После этого измерение  $\Delta T$  производилось гораздо проще, т.к. бралась разность между "нулевой" линией и равновесными значениями нижнего термометра,

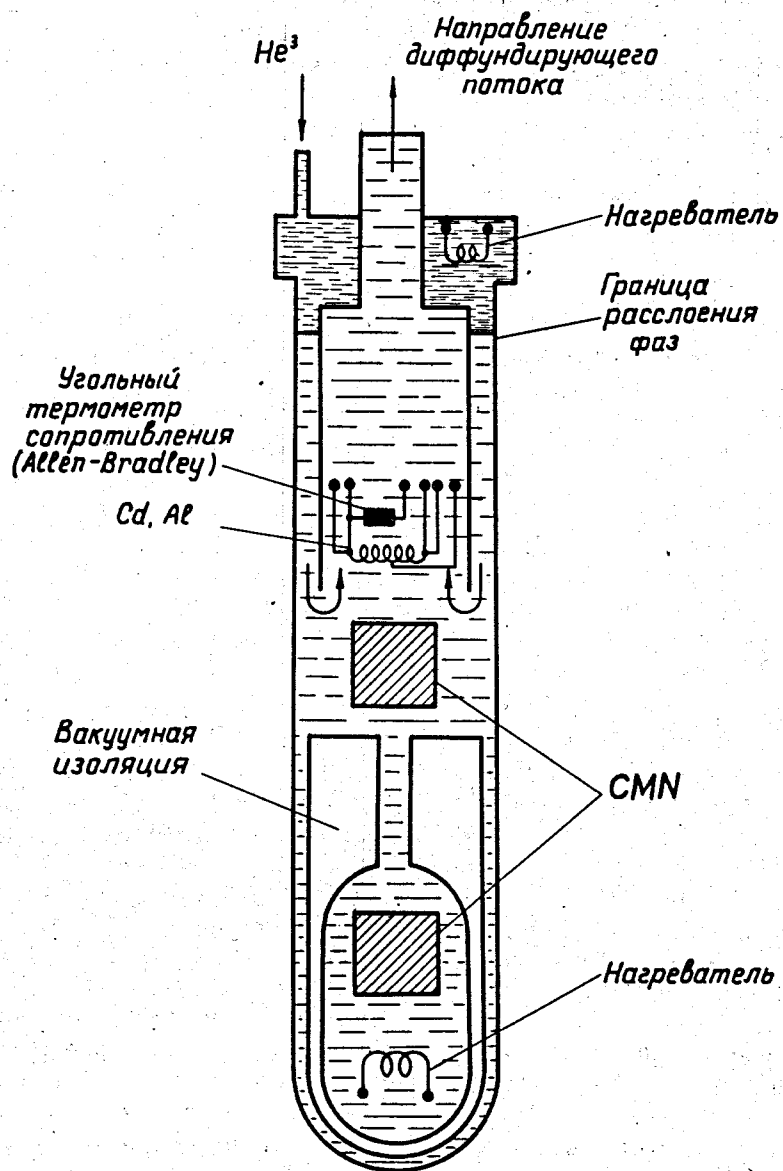


Рис. 1. Ванна растворения для измерения теплопроводности раствора.

на который нестабильности режима влияли уже в очень малой степени, так как период нестабильностей был на много меньше времени установления равновесия. Далее теплопроводность вычислялась по известному соотношению

$$\kappa = \frac{\dot{Q}_{\text{эл}}}{\Delta T (S/l)} \quad /3/$$

В нашей работе не вводились поправки, обусловленные теплопроводностью стенок капилляра, так как, по приближенным оценкам, максимальное искажение результатов измерений пренебрежимо мало из-за плохого теплового контакта на границе раствор-стекло и малой теплопроводности самого стекла. Ролью подводющих к нагревателю проводов также можно пренебречь, так как использовался луженый константан диаметром 0,06 мм, обладающий очень малой теплопроводностью и нулевым электрическим сопротивлением. Градиент температуры вдоль термометров был сведен выбором зазора между стенками и термометрами к такой величине, что максимальная ошибка в измерении температуры не могла превышать 1%. Основная ошибка измерений определяется главным образом неточностью калибровки в высокотемпературной области с помощью реперных точек /переходов в сверхпроводящее состояние кадмия и алюминия/, а также с помощью калиброванного в области 1-4°K угольного термометра типа Allen-Bradley. При очень низких температурах в термометрах из ЦМН возникал перегрев, обусловленный воздействием переменного поля при измерении восприимчивости с помощью моста переменного тока на частоте 50 гц. Для уменьшения нагрева ток первичных катушек выбирался очень малым, а для того чтобы чувствительность моста не падала, в схеме потенциометра Р-56 в цепь измерения вторичного тока включался катодный повторитель, увеличивающий чувствительность в несколько десятков раз. Суммируя вышесказанное, мы оценили погрешность результатов в 5-7%.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты измерения представлены на рис. 2. Наши данные лежат несколько выше данных работы Уитли<sup>/3,4/</sup>. В области температур ниже  $0,01^\circ\text{K}$  мы получаем  $\kappa T = 30,5$  эрг/сек.см для 6,4%-ного раствора, тогда как из линейной зависимости теплопроводности от концентрации принятые для 6,4%-ного раствора данные Уитли<sup>/7/</sup> дают  $\kappa T = 30$  эрг/сек.см. Это небольшое расхождение можно объяснить ошибками, указанными в работе<sup>/3/</sup> /около 10%/ , а также нашими ошибками при калибровке термометров /около 7%/ , и тем, что в работе<sup>/3/</sup> замеры делались в нестационарных условиях из-за отогрева большого блока из ЦМН, с помощью которого измерялась температура. Измерения теплопроводности /и других величин/ можно точно выполнить только в стационарных условиях. Заметим еще, что нет прямых теоретических данных для теплопроводности равновесного раствора /6,4%/ и что существует довольно большое расхождение между данными Уитли и др.<sup>/3/</sup> для 5%-ного раствора /  $\kappa T = 24$  эрг/сек.см/ и теоретическими результатами, полученными двумя методами в работе<sup>/7/</sup> /27 эрг/сек.см и 31,5 эрг/сек.см/.

Для области температур выше  $0,035^\circ\text{K}$  расхождение наших результатов с результатами второй работы Уитли<sup>/4/</sup> лежит в границах допустимых ошибок. Согласно работе<sup>/2/</sup> надо ожидать, что в области от  $0,035^\circ\text{K}$  до  $0,1^\circ\text{K}$  кривая для 6,4%-ного раствора должна лежать несколько ниже кривой для 5%-ного. Диаметр нашего измерительного капилляра в 1,75 раз больше того, который использовали авторы<sup>/4/</sup>. Эффект повышения теплопроводности для капилляра диаметром 3,5мм<sup>/4/</sup> за счет уменьшения влияния столкновения фононов<sup>4</sup> He со стенками капилляра превышает эффект описанного выше понижения теплопроводности при увеличении концентрации раствора. В данной области нет простого теоретического закона зависимости теплопроводности от температуры и концентрации и нет теоретических данных для равновесного раствора, что усложняет прямое сравнение с теорией.

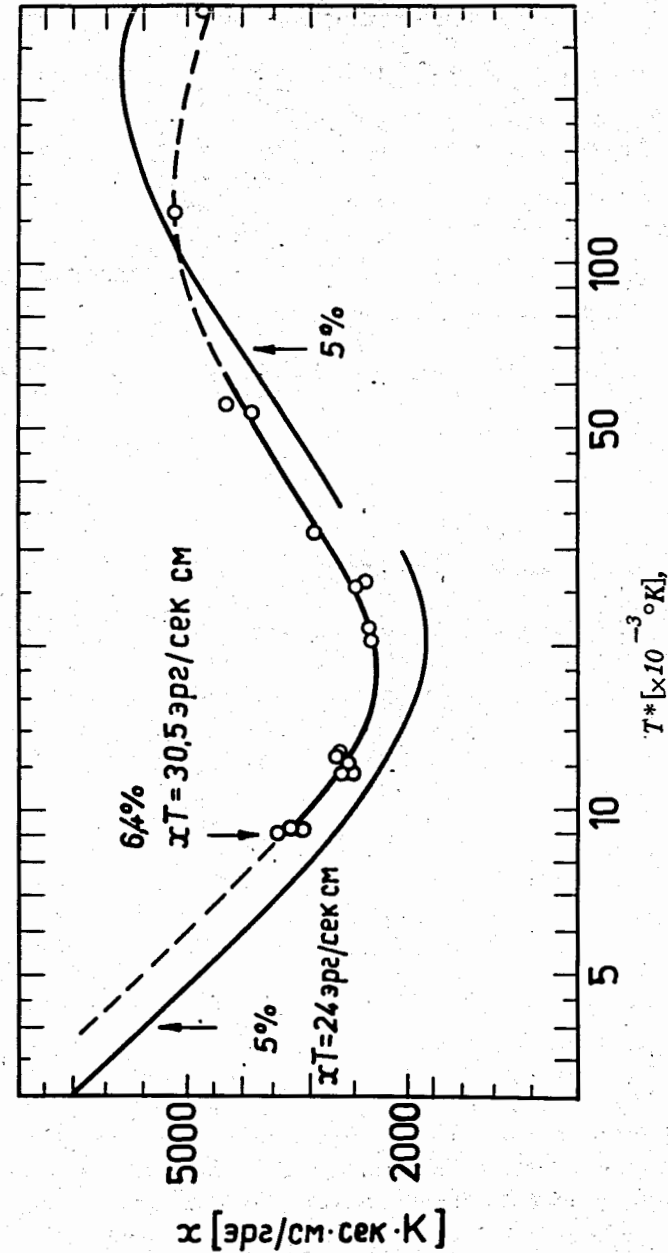


Рис. 2. Измеренная зависимость теплопроводности от температуры в капилляре  $\phi$  3,5 мм.

Литература

1. И.М.Халатников, В.Н.Жарков. ЖЭТФ, 32 /5/, 1108 /1957/.
2. G.Baum., C.Ebner. Phys.Rev., 164, 236 (1967).
3. W.R.Abel, R.T.Johnson, J.C.Wheatley. Phys.Rev.Lett., 18, 732 (1967).
4. W.R.Abel, J.C.Wheatley. Phys.Rev.Lett., 21, 1231 (1968).
5. Т.П.Пуха. ЖЭТФ, 40 /6/, 1583 /1961/.
6. Б.С.Неганов. Вестник Академии наук СССР, 12, 49-53 /1968/.
7. C.Ebner, D.O.Edwards. Phys.Reports, 2C (2), 77 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 марта 1973 года.