

Н. В. ЗАВАРИЦКИЙ

С ВЕРХНИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

ФИЗИКА
И
ХИМИЯ

24

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЗНАНИЕ

1959

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Кандидат физико-математических наук
Н. В. ЗАВАРИЦКИЙ

СВЕРХНИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1959

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Вместо введения	3
Кванты и квазичастицы	7
Сверхтекучесть и энергетический спектр квазичастиц	10
Сверхпроводимость	14
Получение низких температур	19

Автор
Николай Владимирович Заварицкий

Редактор **И. Б. Файнбойм**
Техн. редактор **Е. В. Савченко**
Корректоры **Н. Н. Огородникова**
и **А. А. Пузакова**
Обложка художника **Г. Э. Вильфарга**

A09766. Подписано к печати 10/XII 1959 г. Тираж 38 000 экз. Изд. № 164.
Бумага 60×92¹/₁₆—0,75 бум. л. = 1,5 печ. л. Уч.-изд. 1,46 л. Зак. № 2937.

Типография издательства «Знание». Новая пл., д. 3/4

ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ

Для исследовательской практики последних лет характерно все более интенсивное развитие физики низких температур. В научно-исследовательских институтах, лабораториях, на некоторых фабриках и заводах создаются установки для получения глубокого холода; причем число их и мощность постоянно увеличиваются. В последние годы создано более сотни новых лабораторий, в которых при низких температурах исследуются свойства металлов, полупроводников, магнитные свойства тел, ядерные явления. Что же привлекает исследователей и практиков столь широкого круга специальностей к этим температурам?

Чтобы ответить на этот вопрос, в первую очередь вспомним, что мы связываем с понятием температуры тела. Хорошо известно, что атомы и молекулы, из которых состоят тела, находятся в беспорядочном хаотическом движении. Кинетическая энергия этого движения и определяется температурой тела. Чем выше температура тела, тем больше энергия. Понижая температуру тела, мы уменьшаем хаотическое движение частиц, переходим в область малых энергий теплового движения.

Однако нельзя беспредельно уменьшать внутреннюю энергию тела. Существует состояние тела, соответствующее минимальной внутренней энергии, или, что то же самое, предельно низкой температуре, до которой тело может быть охлаждено. Дальнейшее уменьшение температуры тела (его внутренней энергии) невозможно. Находится этот предел при $-273,16^{\circ}\text{C}$. Этот предел температур называют абсолютным нулем, как и температуру, отсчитанную от абсолютного нуля, называют «абсолютной»; ее обозначают $^{\circ}\text{K}$ (градус Кельвина). Температуры, лежащие в непосредственной близости от абсолютного нуля, называют низкими.

Таким образом, в области низких температур мы встречаемся с состоянием вещества, в котором кинетическая энергия беспорядочного движения значительно уменьшена. Это уменьшение энергии способствует проявлению новых, подчас неожиданных свойств тела. Дело в том, что между частицами, из которых состоят окружающие нас тела, действуют самые

разнообразные по своей природе силы взаимодействия. При высоких температурах, пока энергия теплового движения много больше энергии взаимодействия, их наличие незаметно, как, например, мы обычно не замечаем сил притяжения между молекулами воздуха.

Однако, понижая температуру, можно достигнуть такого состояния, когда уменьшившееся беспорядочное движение уже не сможет препятствовать проявлению сил взаимодействия, не сможет разорвать связи между отдельными частицами. Возникнет новое состояние вещества, например, при 80°K (-193°C) произойдет сжижение воздуха. Возможность получить вещество в новом состоянии, возможность исследовать и использовать возникающие при этом новые свойства тел и привлекает исследователей к области низких температур. При этом чем слабее взаимодействие, вызвавшее появление нового свойства вещества, тем при более низких температурах это свойство лучше может быть обнаружено, исследовано и наконец использовано.

Обратимся для примера к магнитным силам взаимодействия. Атомы некоторых металлов (железа, никеля, кобальта, марганца, хрома и т. п.), в силу особого строения электронной оболочки атома, обладают магнитным моментом; они являются как бы маленькими магнетиками. Между этими магнетиками в веществе тоже действуют силы взаимодействия. Эти силы стремятся установить порядок, регулярность в расположении магнетиков. Однако при высоких температурах беспорядочное тепловое движение разрушает этот порядок и магнетики располагаются хаотически (рис. 1). Вещество с таким расположением магнетиков называют парамагнетиком.

Иначе обстоит дело при низких температурах. Как только при понижении температуры энергия теплового движения настолько уменьшится, что станет меньше энергии взаимодействия, в расположении магнетиков установится порядок (регулярность). При этом ближайшие магнетики повернутся либо в одну сторону, либо в противоположные стороны. В первом случае в веществе возникнет суммарный магнитный момент— эти вещества называют ферромагнетиками. Во втором, хотя все магнетики и располагаются регулярным образом, — суммарный магнитный момент не появится; такие вещества называют антиферромагнетиками. Температура, при которой происходит этот переход в упорядоченное состояние, находится в прямой зависимости от сил взаимодействия между этими магнетиками. Чем больше силы взаимодействия, тем она выше.

Температура перехода изменяется в очень широких пределах: от тысячи градусов до нескольких тысячных долей градуса Кельвина. Это вызвано зависимостью величины силы от расстояния между магнетиками, от величины самих магни-

тиков. Чем расстояние больше, тем взаимодействие слабее. Поэтому температура перехода в упорядоченное состояние у веществ, состоящих только из магнитных атомов, например у железа, кобальта, никеля, в сотни, тысячи раз выше, чем температура перехода у сложных веществ, состоящих как из магнитных, так и немагнитных атомов. При этом чем больше в составе вещества немагнитных атомов, тем температура перехода ниже.

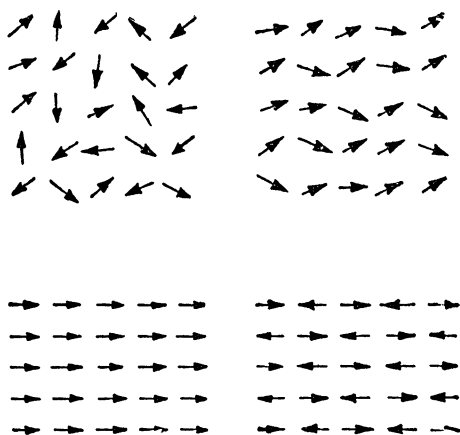


Рис. 1. Различное расположение магнитиков в веществе.

Магнитным моментом могут обладать не только атомы, но и их ядра. Момент ядер очень мал (в тысячи раз меньше момента атомов). Соответственно очень слабы и силы взаимодействия между ними — более чем в миллион раз слабее сил взаимодействия моментов атомов. Поэтому упорядочение ядерных магнитных моментов — ядерный ферро- или антиферромагнетизм должен наступать лишь при очень низких температурах порядка 10^{-50} К. Эти явления до настоящего времени еще не изучены; это одна из задач завтрашнего дня.

Было бы ошибкой полагать, что силы взаимодействия однозначно определяются величиной элементарных магнитиков, расстоянием между ними. Дело в том, что элементарные магнитики нельзя рассматривать независимо от свойств вещества, в которое они входят. Так, во взаимодействии магнитиков в сложном веществе очень большую роль играют немагнитные атомы, через которые как бы «передается» взаимодействие магнитиков; в явлениях, связанных с ядерным магнетизмом, в случае металлов велика роль электронов проводимости и т. д. Из-за этого взаимодействия магнитиков в реальных веществах оказываются существенно более слож-

ными, чем это кажется на первый взгляд. Их удается понять только путем привлечения квантовых законов.

Уменьшение в области низких температур энергии беспорядочного теплового движения облегчает задачу изменения внешним воздействием расположения движения частиц тела, его свойств. Для примера обратимся вновь к магнитным веществам. Все мы неоднократно наблюдали, как магнитная стрелка поворачивается по направлению магнитного поля Земли. Так же и магнетики парамагнитного вещества стремятся установиться по направлению внешнего магнитного поля. Однако тепловое движение препятствует такому расположению, стремится установить магнетики беспорядочным образом. Результатом борьбы этих двух процессов и определится окончательное распределение магнетиков.

Если энергия магнетиков в поле больше тепловой энергии, то большинство магнетиков будет располагаться по направлению поля; при большей тепловой энергии в расположении магнетиков будет преобладать хаотическое распределение. Какое же магнитное поле необходимо для того, чтобы преодолеть тепловую энергию и, следовательно, повернуть большинство магнетиков в одну сторону? Расчет показывает, что при комнатных температурах эти поля должны достигать миллиона эрстед. Такие поля в настоящее время удается получить лишь в рекордных установках в течение нескольких микросекунд.

Обычно исследователи располагают существенно меньшими полями в десятки килоэрстед. Эти же поля при комнатных температурах могут вызвать лишь ничтожное упорядочение магнетиков. Однако если мы путем понижения температуры до нескольких градусов Кельвина уменьшим энергию теплового движения в сотни раз, то эти поля уже вызовут практически полное упорядочение расположения магнетиков атомов.

Упорядочение расположения магнитных моментов представляет интерес, например, для области физики, изучающей ядерные процессы. Дело в том, что многие процессы в ядрах зависят от их магнитного момента. Успешно исследовать связанные с этим эффекты можно лишь после упорядочения расположения моментов. Магнитный момент ядра в тысячи раз меньше, чем момент атома. Поэтому, если бы мы попытались расположить их регулярным образом при помощи магнитного поля в десяток килоэрстед, нам необходимо было бы охладить вещество в поле до тысячных долей градуса Кельвина. Это очень сложно осуществить практически. Поэтому для решения поставленной задачи используют обходные пути. Между магнитными моментами ядра и атома действуют громадные силы взаимодействия. По величине эти силы соответствуют полям в сотни и тысячи килоэрстед. В магнитных полях

такой величины момент ядра устанавливается по полю, если вещество охладить всего лишь до десятых-сотых долей градуса Кельвина. При этих температурах взаимосвязь между моментами ядра и атома уже не может быть разрушена беспорядочным тепловым движением. Момент ядра послушно следует за поворотами момента атома, в который это ядро входит. Это чрезвычайно облегчает задачу ориентации магнитных моментов ядер. Вместо того чтобы устанавливать полем очень маленький момент ядра, оказывается достаточно упорядочить расположение больших моментов атомов. В частности, для этого могут быть использованы и силы взаимодействия между моментами атомов, о которых шла речь выше.

Опыты, проведенные с ориентированными таким способом ядрами, позволили установить ряд новых явлений. Например, при распаде ядер обнаружена асимметрия в вылете квантов, электронов. Исследования этих эффектов подтвердили появившиеся в последнее время указания о необходимости ревизии некоторых представлений о свойствах элементарных частиц.

КВАНТЫ И КВАЗИЧАСТИЦЫ

Пример с ядерной физикой показателен. Аналогичные явления происходят и в других областях науки. Продвижение в область низких температур приводило к открытию новых явлений в окружающей нас природе, требовало пересмотра многих ранее установившихся представлений, например представлений о характере изменения энергии вблизи абсолютного нуля.

До тех пор, пока исследователи сталкивались лишь со свойствами тел при комнатных или более высоких температурах, их вполне удовлетворяли законы классической физики. Согласно этим законам, энергия теплового движения в теле могла изменяться непрерывным образом, могла изменяться любыми сколь угодно малыми порциями. Согласно этим представлениям, по мере понижения температуры энергия движения частиц тела должна была бы все более и более уменьшаться. Наконец, при абсолютном нуле следовало ожидать некоего гипотетического состояния, в котором энергия движения становилась равной нулю, в котором полностью прекращалось движение частиц.

Первые же исследования, проведенные при низких температурах, показали ошибочность этих представлений. Пришлось подвергнуть ревизии как представления о состоянии тела при абсолютном нуле, так и о характере изменения энергии тела. Оказалось, что v частиц тела нельзя отнять всей энергии их движения. Всегда, даже при абсолютном нуле, у частиц тела остается некоторая энергия, называемая «нулевой энергией». Всегда, даже при абсолютном нуле, частицы

тела сохраняют некоторое движение. В природе не существует состояния, в котором бы полностью прекратилось движение. Абсолютный нуль в значительной степени потерял свое выделенное положение. Это новое представление о состоянии вещества при абсолютном нуле возникло лишь после привлечения к рассмотрению явлений при низких температурах квантовой физики.

Проявление нулевой энергии обнаруживается в самых разнообразных свойствах вещества. Так, связанное с ней движение вызывает дополнительное расширение линий рентгенограмм кристаллической решетки, снятых в области низких температур; уменьшает теплоту испарения газов, кипящих вблизи абсолютного нуля (водород, гелий); проявляется в спектрах двухатомных молекул и т. д. Значение нулевой энергии в свойствах веществ, находящихся в области низких температур, очень велико, — ведь это преобладающая энергия вблизи абсолютного нуля. Так, у жидкого гелия нулевая энергия при $4,2^\circ \text{K}$ составляет около 80% от полной энергии.

Не менее существенные изменения претерпели и представления о характере изменения тепловой энергии. Оказалось, что ее изменение происходит в действительности лишь дискретными порциями — квантами. В области высоких температур эта прерывность энергии незаметна — уж очень это маленькие порции энергии в твердом теле. Так, например, наибольший квант у кристаллической решетки свинца соответствует тепловой энергии, приходящейся на одну степень свободы при 100°K . Это равно около 10^{-14} эрг.

Кванты тепловой энергии в твердом теле можно представить себе следующим образом. Хаотическое тепловое движение частиц тела является как бы совокупностью громадного числа колебаний атомов его решетки. Эти колебания могут быть самыми разнообразными. В одних из них происходят относительные колебания двух соседних атомов, другие соответствуют длинноволновым звуковым колебаниям, распространяющимся в твердом теле. Энергия каждого из этих типов колебаний и изменяется дискретным образом, определенными порциями — квантами.

Чем короче звуковая волна, тем больше соответствующие этому типу колебаний кванты. Так, наибольшие кванты имеют звуковые колебания, длина волны которых совпадает с расстоянием между атомами.

Прерывность энергии неощутима до тех пор, пока на каждый тип колебаний приходится несколько квантов энергии. В этом случае, при охлаждении тела, происходит уменьшение энергии всех типов колебаний. Однако такое изменение энергии будет происходить лишь пока тепловая энергия, приходящаяся на какой-нибудь тип колебаний, не сравняется с величиной соответствующего кванта. Дальнейшее

уменьшение энергии прекращается; у рассматриваемого типа колебаний остается лишь нулевая энергия. Так, по мере понижения температуры, прекращает изменяться энергия **старых и новых колебаний**.

Подобный характер изменения с температурой энергии **твердого тела** наиболее отчетливо проявляется в его теплоемкости, которая прямо пропорциональна изменению энергии **на градус**. В области высоких температур, пока изменяется энергия всех типов колебаний, теплоемкость не зависит от температуры и одинакова для всех твердых тел, если ее отнести к равному числу частиц тела. До появления квантовых представлений и исследований в области низких температур повсеместно было распространено мнение, что подобный закон должен иметь место до самого абсолютного нуля. Этот закон даже имел свое имя: закон Дюлонга и Пти.

Однако дальнейшие опыты показали, что закон Дюлонга и Пти в действительности справедлив лишь при высоких температурах. При понижении же температуры теплоемкость тел, вместо того чтобы оставаться постоянной, начинает резко уменьшаться. Температура, с которой начинается это уменьшение теплоемкости, определяется величиной самого большого кванта в твердом теле.

Квантовый характер изменения энергии тел потребовал использования совершенно новых представлений для описания свойств тел вблизи абсолютного нуля. Как уже отмечалось, при абсолютном нуле в теле остается лишь нулевая энергия. Это как бы фон, определяющий основные свойства тел вблизи этой температуры. Если мы, исследуя тело, каким-то образом воздействуем на него, то это, в конечном итоге, приведет к увеличению энергии тела, к появлению квантов энергии у какого-нибудь типа движения. Эта энергия будет, конечно, передаваться по телу, переходить от одного типа движения к другому. Законами появления квантов энергии, их перемещения по телу, перехода от одного типа движения к другому и будут определяться все свойства тела.

Этими законами и интересуются в первую очередь исследователи. Очень часто кванты энергии называют «квазичастицами». Нужно сразу отметить, что в отличие от обычных частиц квазичастицы неотделимы от среды, в которой они появляются и распространяются. Законы, по которым происходит рождение квазичастиц, законы, по которым происходит их движение, точнее связь между их энергией и импульсом — «энергетический спектр квазичастиц», как обычно говорят, определяется силами взаимодействия в теле. Эти законы очень своеобразны и часто совершенно непохожи на привычные нам по классической физике.

С некоторыми из квазичастиц мы уже встречались. Таковыми квазичастицами являются, например, кванты колебаний

кристаллической решетки твердого тела. Называют их фонами. Энергетический спектр у фона — связь его энергии и импульса — резко отличается от спектра обычных частиц. Как известно, у обычных частиц энергия пропорциональна квадрату импульса (скорости) частицы. У фона же имеет место прямая пропорциональность между импульсом и энергией.

СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР КВАЗИЧАСТИЦ

Своеобразие связи энергии и импульса у квазичастиц приводит к появлению самых неожиданных явлений в области низких температур, наиболее необычными из которых, по-видимому, являются явления сверхтекучести гелия и сверхпроводимости металлов.

Известны два стабильных изотопа гелия: тяжелый изотоп — гелий-4 и легкий изотоп — гелий-3. Гелий-4 переходит в жидкое состояние при атмосферном давлении лишь при температуре $4,2^{\circ}\text{K}$. Уже в точке перехода его тепловая энергия составляет лишь небольшую долю по сравнению с нулевой энергией. Поэтому, в свойствах гелия наиболее отчетливо проявляются квантовые эффекты. В этом смысле о гелии можно говорить как о «квантовой жидкости». С этим, в частности, связан тот факт, что гелий не затвердевает до самого абсолютного нуля. Для того чтобы перевести его в твердое состояние, необходимо давление больше 25 атмосфер.

Однако самые удивительные свойства гелий приобретает ниже $2,18^{\circ}\text{K}$. Это изменение свойств происходит скачком, легко наблюдаемым визуально. Так, если выше $2,18^{\circ}\text{K}$ гелий кипит по всему объему, весь заполнен маленькими пузырьками, то ниже $2,18^{\circ}\text{K}$ жидкость стоит в сосуде, как мертвая. Изменение характера кипения жидкости сопровождается изменением величины теплопроводности и вязкости гелия. Изучение этих эффектов, проводившееся академиком П. Л. Капицей, привело к открытию у гелия целого ряда «таинственных» свойств. Первый сюрприз ожидал исследователя уже при сопоставлении характера изменения вязкости и теплопроводности.

Между явлением теплопроводности и вязкости жидкости имеется много общего. Оба явления фактически сводятся к передаче вдоль жидкости в первом случае энергии, во втором — импульса. Поэтому обычно если в жидкости происходит уменьшение теплопроводности, то одновременно уменьшается и ее вязкость. В гелии же ниже $2,18^{\circ}\text{K}$ наблюдалась противоположная этому картина. Происходило одновременно колоссальное увеличение теплопроводности и уменьшение вязкости жидкости. Как показали измерения, проведенные в тонких слоях гелия, вязкость уменьшается более чем в не-

сколько тысяч раз. Этот результат необъясним с точки зрения обычной теории вязкости и теплопроводности жидкости.

Единственным выходом из создавшегося положения являлось предположение, что передача энергии осуществляется каким-то иным механизмом, например путем переноса энергии потоками жидкости. Если такие потоки действительно существуют, их можно было бы попытаться обнаружить. Для этого П. Л. Капица создал специальный прибор. В гелий помещалась маленькая стеклянная бульбочка с тонким носиком. Внутри бульбочки находился нагреватель. К носику бульбочки подводилось крылышко, подвешенное на тонкой нити.

Если из бульбочки вырывается поток гелия, переносящий тепло, то он должен вызывать отклонение крылышка. Действительно, стоило включить нагреватель, как крылышко заметно отклонялось. Поток жидкости, вырвавшийся из бульбочки, можно было отчетливо наблюдать. Здесь, однако, вновь начались «чудеса». Хотя при помощи крылышка удавалось проследить струю, выходящую из носика, количество гелия в бульбочке не уменьшалось. Создавалось впечатление, что гелий каким-то образом проникал обратно в бульбочку, хотя обратного потока нельзя было обнаружить самыми хитроумными способами.

Наиболее наглядно это необычное свойство гелия П. Л. Капица продемонстрировал в опыте с так называемым «паучком». В сосуде с гелием на острой иголке располагался стеклянный паучок (рис. 2). Внутренняя поверхность паучка была зачернена, что позволяло, включая свет, подогреть находящийся в нем гелий. Как только включалось это освещение, паучок приходил в быстрое вращение.

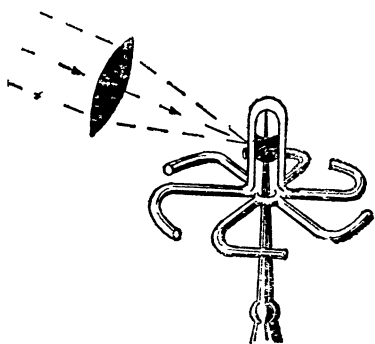


Рис. 2. «Паучок»
П. Л. Капицы.

С точки зрения привычных, классических представлений, результаты всех этих опытов были необъяснимы. Гелий обладал совершенно новым свойством, которое было названо сверхтекучестью. Открытие этого явления произошло около 20 лет тому назад. В то время понятия о квазичастицах, их энергетическом спектре лишь начинали входить в жизнь.

Академик Л. Д. Ландау предложил для объяснения всех этих загадочных свойств гелия определенный вид энергетического спектра у квазичастиц жидкости. Отличительной особенностью этого спектра является пропорциональность между

энергией и импульсом квазичастицы в начальной части спектра. Оказывается, что при подобном спектре течение жидкости происходит без трения, — жидкость обладает сверхтекучестью. Это свойство у жидкости, однако, имеет место лишь пока скорость ее течения невелика. Начиная с некоторой критической скорости, явление сверхтекучести пропадает. Свойством сверхтекучести жидкость обладает лишь в низшем нулевом состоянии. Квазичастицам это свойство уже не присуще.

С точки зрения новых представлений, таким образом истолковываясь, например, результат опыта со струей гелия из бульбочки. При включении нагревателя в бульбочке за счет выделяемой мощности происходило рождение квазичастиц. Их плотность внутри бульбочки становилась больше, чем в окружающем гелии. Так же как из сосуда, в котором повышено давление, квазичастицы начинали вырываться из бульбочки, из носика начинал «дуть» ветер. Давление этого ветра квазичастиц и обнаруживалось по отклонению крылышка.

Теория сверхтекучести не только объяснила опытные факты, известные к моменту ее создания. Она предсказала также ряд новых, ранее неизвестных свойств гелия, например наличие в гелии особого звука, связанного с колебаниями плотности квазичастиц. В теории был предложен также ряд способов обнаружения квазичастиц, исследования зависимости их плотности от температуры и т. д. Все опыты, приведенные в дальнейшем с целью проверки этих предсказаний, полностью подтвердили выводы теории.

Таким образом, представления о квазичастицах с определенным энергетическим спектром позволили не только объяснить известные экспериментальные факты, но и предсказать ряд новых явлений. Представляло большой интерес непосредственно измерить спектр квазичастиц, прямо проверить предположение теории. Успешные опыты в этом направлении удалось провести лишь в последние годы. Идея этих опытов такова. Предположим, что на жидкий гелий, находящийся при температуре, близкой к абсолютному нулю, падают лучок частиц. При столкновении с гелием частицы будут передавать ему энергию, вызывать рождение квазичастиц. В каждом акте столкновения имеет место закон сохранения энергии и закон сохранения импульса. Это позволяет, измерив энергию и импульс падающей частицы до столкновения и после него, рассчитать энергию и импульс квазичастицы, появившейся во время этого акта. Так, например, энергия квазичастицы равна изменению энергии частицы в результате столкновения.

Простой в принципе опыт требовал для своего осуществления преодоления целого ряда трудностей. Столкновение частиц с гелием происходит очень редко, поэтому, чтобы получить достаточное количество рассеянных частиц, надо было

создать интенсивнейший пучок падающих частиц. В этом пучке необходимо было как-то отметить частицы с определенным импульсом, определенной энергией, за изменением энергии которых в ходе опыта и будет проводиться наблюдение. Помимо этого, в ходе опыта требовалось точно знать направление падающих и отраженных частиц. Наконец, необходимо было иметь прибор, позволяющий точно измерять энергию, импульс частицы.

Уже одно перечисление всех этих трудностей показывает, почему с момента возникновения идеи об определенной связи между энергией и импульсом у квазичастиц гелия до их экспериментального измерения прошло почти 20 лет. Осуществить эти измерения удалось лишь после развития физики ядра. В этом опыте оказалось наиболее целесообразным использовать пучок нейтронов из атомного реактора. На пути пучка был помещен кусок бериллия. Проходя через него, нейтроны отражались от атомных плоскостей его кристаллической решетки. Это отражение было особенно велико для нейтронов, импульс которых был больше некоторой критической величины, определяющейся постоянными кристаллической решетки бериллия. В распределении нейтронов по импульсам как бы отмечается эта критическая величина.

За изменением импульса и энергии нейтронов, имевших до столкновения «отмеченную» величину импульса, и производилось наблюдение.

Геометрические размеры пучка нейтронов как до, так и после рассеяния ограничивались системой экранов. Эти экраны выбирают из пучка нейтронов те, у которых при столкновении направление скорости импульса изменяется на строго определенный угол. После экранов пучок попадает на анализатор импульсов, который позволяет определить, насколько изменился импульс у нейтронов в результате их столкновения.

Проведя измерение углов между пучком падающих и рассеянных нейтронов и измерив изменение в результате столкновения скоростей нейтронов, удается рассчитать энергию и импульс квазичастицы, родившейся в ходе этого столкновения. Проводя подобные измерения при различных углах между потоками нейтронов, падающих на гелий и рассеянных, можно полностью определить весь энергетический спектр квазичастиц в сверхтекучем гелии. Полученный этим способом энергетический спектр оказался в очень хорошем согласии с теоретически предсказанным. Теория Л. Д. Ландау получила прямое экспериментальное подтверждение.

Совершенно очевидно, что метод, использованный для изучения энергетического спектра гелия, может быть применен и к другим объектам, например к изучению энергетического спектра фононов в твердом теле. Можно полагать, что подобные работы получат в ближайшее время самое широкое

развитие, так как энергетический спектр квазичастиц является основной характеристикой свойств тел при низких температурах.

Как уже отмечалось, в природе существует два стабильных изотопа гелия. У легкого изотопа He^3 , хотя его уже исследовали при температуре до $0,05^\circ \text{K}$, явления сверхтекучести не обнаружено¹. И вновь это связано с особенностью квазичастиц жидкости. По характеру появления (рождения) квазичастицы можно разделить на два основных типа. Первый из них характеризуется тем, что квазичастицы появляются по одиночке. Так, появляются фононы в твердом теле, квазичастицы в He^4 , наконец кванты электромагнитного поля — фотоны. Во втором — квазичастицы появляются всегда парами. При столкновении эти пары могут взаимно уничтожиться (аннигилировать), конечно, при наличии такой третьей частицы, которой передадутся освободившиеся при этом энергия и импульс. К этому типу принадлежит, например, квазичастица в He^3 (электроны в металлах). Жидкость, в которой квазичастицы появляются парами, не обладает свойством сверхтекучести.

Каким образом происходит рождение квазичастиц? Это зависит в значительной степени от сил взаимодействия в твердом теле. Наиболее наглядным примером этого является явление сверхпроводимости ряда металлов.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Открытие явления сверхпроводимости произошло на заре физики низких температур. В 1908 году в Лейдене (Голландия) Каммерлинг-Оннесу удалось впервые получить некоторое количество жидкого гелия, бесцветной жидкости последнего, не ожиженного до тех пор газа. Тем самым перед исследователем открылась новая область температур, лежащая в непосредственной близости от абсолютного нуля.

Одной из проблем, которой занимался Каммерлинг-Оннес, было исследование сопротивления металлов. В то время этот вопрос был совершенно неясен, так как на основании имевшихся данных можно было предположить любой характер его изменения вблизи 0°K . Первые опыты, проведенные с платиной и золотом, как будто показали, что в области гелиевых температур ничего особенного не происходит. Сопротивление от $4,2$ до 2°K вообще не менялось с температурой. Эта не меняющаяся с температурой часть сопротивления, так называемое остаточное сопротивление, зависела от загрязнений

¹ Интересно отметить, что He^3 и He^4 смешиваются друг с другом только при температурах выше $0,8^\circ \text{K}$. При более низких температурах наблюдается видимое расслоение жидкости. В верхней части сосуда собирается смесь, богатая He^3 , в нижней — He^4 .

образца. Чем больше в образце было примесей, тем больше становилось и его сопротивление. Казалось, что интересные результаты если и можно было получить, то только исследуя металл предельной чистоты. В то время лучше всего умели очищать ртуть. И вот началось исследование этого металла.

Первый же опыт привел к неожиданным результатам. При охлаждении образца ниже $4,2^{\circ}\text{K}$ его сопротивление внезапно исчезло. Однако исчезновение сопротивления наблюдалось у всех, даже загрязненных примесями образцов. Стало ясно, что это было совершенно новое состояние металла, которое Каммерлинг-Оннес назвал сверхпроводящим.

Сверхпроводимость — свойство не одной ртути. Вслед за ртутью это явление было обнаружено у свинца, олова, таллия и ряда других металлов.

В настоящее время известны 24 чистых металла, способных переходить в это состояние. При этом у двух — висмута и бериллия — сверхпроводимость наблюдается лишь в кристаллической модификации, неустойчивой при комнатной температуре. У остальных металлов (их около 50) сверхпроводимость до сих пор не обнаружена. Помимо чистых металлов, сверхпроводимость наблюдается у многих сплавов и химических соединений. При этом у химических соединений часто ни одна из компонентов не является сверхпроводящей, например CuS , CoSi_2 .

Каждый из сверхпроводников переходит в сверхпроводящее состояние при своей строго определенной, так называемой критической, температуре. Это не очень высокие температуры, порядка нескольких градусов Кельвина. Максимально высокая температура в настоящее время обнаружена у сплавов V_3Si , NbSn_3 , но и она составляет всего лишь $17\text{--}18^{\circ}\text{K}$.

Явление полного исчезновения сопротивления кажется настолько удивительным и противоречащим всем известным представлениям, что еще долгое время после этого открытия делались попытки обнаружить хотя бы следы сопротивления у сверхпроводников. Для этого были использованы всевозможные методы, наиболее точный из которых так называемый метод сверхпроводящего кольца. Идея этого метода такова. Если изменить магнитный поток, пронизывающий металлическое кольцо, то по законам электромагнитной индукции в нем возбудится ток. В обычных металлах из-за наличия сопротивления этот наведенный ток со временем быстро затухает. Например, в колечке диаметром около 1 см из тонкой медной проволоки, охлажденном до гелиевых температур, ток уменьшается в десятки раз за какие-то доли секунды. Когда же подобный опыт был проведен с колечком из сверхпроводника, то исследователи не смогли заметить какого-нибудь уменьшения величины тока, хотя некоторые наблюдения

продолжались днями. Пока образец оставался охлажденным до температуры ниже критической, ток в кольце не затухал. Исследователям не удавалось заметить следов сопротивления. Ток тек по сверхпроводнику без выделения тепла.

Отсутствие сопротивления току открывало, как казалось на первый взгляд, заманчивые перспективы применения сверхпроводников. Например, кабель из сверхпроводника, казалось бы, можно использовать для передачи сколь угодно большого по величине тока без потери мощности; свернув из такого кабеля катушку, можно было надеяться получать колоссальные магнитные поля. Однако работы, предпринятые в этом направлении, показали беспочвенность подобных проектов. Оказалось, что сопротивление сверхпроводника равно нулю лишь пока ток, текущий по образцу, не слишком велик или

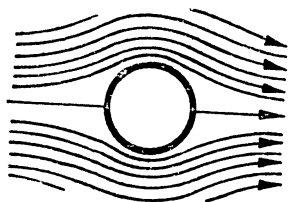


Рис. 3. Магнитные силовые линии обтекают образец.

пока магнитное поле, в котором находится образец, меньше некоторой критической величины. Начиная с этой величины тока или магнитного поля, в образце появляется сопротивление, сверхпроводимость исчезает. Исчезновение сверхпроводимости происходит в магнитных полях, обычно меньше тысячи эрстед. Если же сверхпроводник находится в поле, меньшем критического, то поле не проникает в толщу металла, маг-

нитные силовые линии, как бы обтекают образец (рис. 3).

Все эти свойства были установлены уже на первом этапе исследования сверхпроводимости. Однако они не привели тогда к появлению теории, способной объяснить это явление. Рождение теории произошло спустя много лет, когда экспериментальное исследование сверхпроводимости было в основном завершено. Так, было обнаружено, что в сверхпроводнике лишь часть электронов движется по металлу без сопротивления. Количество этих электронов — «сверхпроводящих электронов» изменяется с температурой. Если вблизи абсолютного нуля это практически все электроны, то по мере приближения к критической температуре их становится все меньше и меньше. Остальные электроны — «нормальные электроны» испытывают сопротивление при движении в металле; движение их по решетке сопровождается выделением тепла. Наличие «нормальных электронов», конечно, не проявляется во время измерения сопротивления образцов при помощи постоянного тока.

В ходе этих измерений действие на них электрического поля полностью экранируется электронами, движущимися без сопротивления. Однако их присутствие проявляется, если проводить измерения при помощи тока столь высокой частоты,

что движение электронов будет определяться не только их столкновениями с искажениями решетки, но и их инерцией. В этом случае вместо скачкообразного исчезновения сопротивления при критической температуре наблюдается его постепенное уменьшение по мере понижения температуры. Уменьшение тем более плавное, чем выше частота, на которой проводится измерение сопротивления.

Можно явлениями сверхпроводимости электронов и сверхтекучести гелия можно подметить много общего. Как сверхтекучий гелий течет без трения, так и сверхпроводящие электроны движутся через решетку без сопротивления, не обмениваясь с ней энергией. Как появляющиеся в гелии квазичастицы не обладают сверхтекучестью, так и нормальные электроны не обладают сверхпроводимостью. Все это позволяет говорить о сверхпроводимости как о сверхтекучести электронной жидкости, не забывая, конечно, при этом, что эта жидкость «налита» в кристаллической решетке. Естественно ожидать, что и энергетический спектр квазичастиц в сверхпроводнике¹ и в сверхтекучем гелии примерно одинаков. Это, однако, не укладывалось в привычные представления. Дело в том, что по характеру появления возбуждения коллектив электронов в металле должен был бы скорее быть сходным с жидкостью из легкого изотопа гелия He³, не обладающего сверхтекучестью, чем с сверхтекучей жидкостью из тяжелого изотопа гелия He⁴. Для объяснения сверхпроводимости необходимо было предположить наличие какого-то кардинального изменения всех свойств коллектива электронов.

Что это за изменения, почему они имеют место лишь у некоторых металлов — сверхпроводников, какие взаимодействия вызывают эти изменения, — вот основные вопросы, волновавшие исследователей. Уж очень казалось удивительным, что, кроме явлений, непосредственно связанных с наличием «сверхпроводящих электронов», с металлом не происходит решительно никаких изменений. Картина дифракции рентгеновых лучей имела один и тот же вид как выше, так и ниже критической температуры, что указывало на неизменность кристаллической решетки при переходе. Не изменились при переходе поглощение медленных и быстрых электронов, рассеяние нейтронов, фотоэлектрические свойства.

При опытах пытались приготовить из сверхпроводника столь тонкую пленку, чтобы она, сохраняя еще металлический характер проводимости, потеряла бы способность переходить в сверхпроводящее состояние. Но оказалось, что такая пленка, даже если она состоит всего лишь из 3—4 атомных слоев, переходит в сверхпроводящее состояние. Правда, было замечено, что критическая температура и критическое магнит-

¹ В сверхпроводнике с квазичастицами отождествляются нормальные электроны.

ное поле несколько изменяется при сильном сдавливании сверхпроводников. Но все эти опыты не давали ответа на основной вопрос: достаточно ли для объяснения сверхпроводимости рассматривать взаимодействие электронов друг с другом или в этом явлении существенно взаимодействие электронов с решеткой. В каких же опытах следовало искать ответа на этот вопрос?

Изменение кристаллической модификаций — это слишком уж сильное изменение свойств решетки. Можно было еще попытаться сопоставить свойства сверхпроводников, в которых атомы решетки отличаются друг от друга своим весом. Такие измерения были проведены и показали, что критические температуры этих образцов различны. Более того, было обнаружено, что у всех исследованных металлов связь между критической температурой и изотопическим весом образца одинакова. Открытие этого эффекта уже определенно показывало, что решить проблему сверхпроводимости можно только с учетом взаимодействия электронов с решеткой.

Хотя влияние изотопического состава на критическую температуру было обнаружено еще в 1950 году, достаточно законченная теория явления появилась лишь спустя 7 лет. Трудность проблемы заключалась прежде всего в том, что необходимо было объяснить изменение энергии электронных состояний на величину порядка нескольких градусов, тогда как сама эта энергия у электронов соответствует тысячам градусов. Кроме того, требовалось понять, каким образом у частиц, которыми являются электроны, может появиться спектр возбуждений, сходный со спектром He^4 . Ведь только при этом типе спектра жидкость может обладать сверхтекучестью или сверхпроводимостью.

Теоретическое решение проблемы сверхпроводимости было найдено советским ученым Н. Н. Боголюбовым с сотрудниками и американскими физиками Дж. Бардиным, Л. Купером и Дж. Р. Шриффером. В основу теории были положены идеи о необходимости учета взаимодействия электронов, возникающего через колебания решетки. Это взаимодействие типично квантового характера и не имеет какого-нибудь аналога в классической физике. В результате этого на электроны металла, помимо кулоновских сил отталкивания, действуют также силы притяжения.

Если силы притяжения преобладают, то электроны, лежащие вблизи граничной энергии, образуют связанные пары. Конечно, этот эффект неразделим со всем «коллективом» электронов и двум отдельно взятым электронам несвойственен, так же как квазичастицы неотделимы от среды, в которой они возникают. Тем самым в этом случае мы имеем дело как бы с совокупностью электронных пар — «коллективом» таких же «частиц», как He^4 . Такой коллектив, как уже отме-

чалось, может обладать свойством сверхтекучести или сверхпроводимости. Тем самым, согласно этим представлениям, сверхпроводимость имеет место у металлов, у которых притяжение преобладает над эффектом кулоновского отталкивания. Энергия притяжения между электронами не велика — много меньше энергии, соответствующей наибольшему кванту колебаний кристаллической решетки. С этим связана столь низкая критическая температура сверхпроводников.

Таким образом оказалось, что коллектив из одних и тех же частиц — электронов, в зависимости от величины сил взаимодействия может обладать как свойствами жидкости сверхтекучего He^4 , так и несверхтекучей жидкости из легкого изотопа — гелия He^3 .

После решения основной проблемы о причинах появления сверхпроводимости не представляло особых затруднений и рассмотрение их различных свойств. По теоретической модели были рассчитаны тепловые, высокочастотные, магнитные и другие свойства сверхпроводников. Результаты этого расчета оказывались всегда в удовлетворительном качественном согласии с данными экспериментальных исследований. Полного количественного соответствия здесь было трудно ожидать, так как в теории рассматривалась модель некоторого идеального сверхпроводника, от которой реальные металлы существенно отличаются.

Сверхпроводимость электронов является наглядным примером, как иногда наличие слабых взаимодействий приводит к коренному изменению всех свойств «коллектива» частиц. Важность решения этой проблемы, конечно, не ограничивается объяснением явления сверхпроводимости. Так, высказываются соображения, что структура ядерной материи в какой-то степени подобна электронной структуре сверхпроводящего металла. И возможно, что решение проблемы сверхпроводимости приведет к разрешению проблем строения атомного ядра.

ПОЛУЧЕНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Всем хорошо известно, что для того чтобы повысить температуру, к телу достаточно подвести энергию, которая затем уже сама по себе переходит в энергию теплового движения частиц тела. Каким же образом можно понизить температуру тела, как уменьшить энергию беспорядочного, хаотического движения его частиц? Это не просто. Законы, определяющие поведение частиц, из которых состоит тела, очень своеобразны. Так, с точки зрения закона сохранения энергии безразлично, распределены ли молекулы газа равномерно по всему объему, ему предоставленному, или находятся в одной его половине. Однако ни у кого не возникает сомнения в том, что

в одной половине объема молекулы сами по себе никогда не соберутся. Точно так же, хотя с точки зрения закона сохранения энергии безразлично — находятся ли соприкасающиеся тела при различных температурах или при некоторой средней, мы все прекрасно знаем, что температуры соприкасающихся тел всегда со временем сравниваются.

Все эти примеры показывают, что, кроме закона сохранения энергии, в мире частиц господствует еще закон, определяющий направление основных процессов в природе, подавляющее большинство которых происходит так, что система переходит в состояние, позволяющее частицам разместиться наибольшим числом различных способов в состоянии, в котором частицы находятся как бы в наибольшем беспорядке, где упорядоченность движения, расположения частиц минимальна.

Стремление многих частиц к такому распределению является одним из основных законов природы. Поэтому для определения степени порядка в физике введена особая величина — энтропия. В наиболее упорядоченном состоянии тела — при абсолютном нуле — беспорядок в расположении, движении частиц минимален. Энтропия в этом случае равна нулю. С повышением температуры увеличивается беспорядочное тепловое движение — энтропия возрастает. Изменение энтропии может происходить, конечно, и при постоянной температуре тела, например при переходе вещества из жидкой в газообразную фазу, здесь она изменяется скачком.

Если газ при постоянной температуре расширяется в больший объем, упорядоченность в расположении его частиц уменьшается. Энтропия возрастает. Когда кинетическая энергия молота переходит в энергию беспорядочного движения частиц молота и наковальни, энтропия возрастает. Подобных примеров можно привести множество, подавляющее большинство процессов происходит с увеличением энтропии.

Естественно, что охлаждение тела, сопровождающееся уменьшением энтропии, само по себе произойти не может. Для получения низких температур приходится создавать особые машины, которые «отбирают» энергию от охлаждаемого тела и «перекачивают» тепло от низкой к более высокой температуре. В этих машинах используется возможность изменять внешним воздействием упорядоченность энтропии вещества. Например, как уже отмечалось, энтропия газа зависит не только от температуры, но и объема, им занимаемого. Чем больший объем предоставлен газу, тем больше и его энтропия. Это свойство газа используют для его охлаждения. Осуществляется это следующим образом. В первую очередь, сжимая газ, ограничивают беспорядочное, хаотическое движение его частиц. При этом, конечно, приходится совершать некоторую работу против давления газа. Энергия, кото-

рая при этом подводится к газу, идет, в частности, на увеличение беспорядочного, хаотического движения его частиц, повышает его температуру.

Осуществив, однако, теплообмен газа с окружающей средой, можно его вновь охладить до начальной температуры. Таким образом, посредством последовательного сжатия и теплообмена удается получить состояние, в котором частицы газа, обладая той же тепловой энергией, могут беспорядочно двигаться лишь в меньшем объеме, обладают меньшей энтропией. Уменьшение энтропии произошло в результате того, что внешним давлением мы как бы «сдерживаем» движение частиц. Если мы теперь начнем уменьшать это «сдерживающее» давление, газ начнет расширяться. При этом за счет избытка давления он даже может совершать работу, например, двигать поршень, вращать турбину. От сжатого газа можно получить некоторую энергию. Однако совершать работу, отдавать энергию, газ может только за счет изменения своей внутренней энергии, за счет уменьшения беспорядочного движения частиц, за счет охлаждения. Для того чтобы не произошло нагревания газа после охлаждения из-за теплообмена, газ при расширении теплоизолируют от окружающей среды.

Как же изменялась энтропия в этом цикле? В полной энтропии газа удобно выделить две части: часть энтропии, которая изменяется с температурой, — «температурная часть» и часть, изменяющуюся с объемом, — «объемную часть». Эти две части взаимосвязаны между собой. В начале цикла, при сжатии газа, за счет уменьшения объемной части произошло возрастание температурной части — газ нагрелся. Затем при теплообмене температурная часть вновь уменьшилась до прежнего значения. Наконец, при расширении газа, производимом при неизменной полной энтропии (адиабатически), за счет возрастания объемной части произошло уменьшение температурной части — охлаждение газа. Характер цикла, используемого для охлаждения газа, является общим для всех холодильных установок. Эти машины могут различаться как своим назначением, так и конструктивным оформлением, но принцип их работы одинаков. Во всех машинах — и в комнатных холодильниках, и в промышленных установках для производства тысяч литров жидкого воздуха или водорода — используется возможность изменять внешним воздействием упорядоченность, энтропию какого-нибудь вещества — «рабочего вещества», как обычно говорят. И во всех установках с этим рабочим веществом совершают цикл, подобный только что описанному.

Какие же предельно низкие температуры можно получить в холодильных установках, с чем этот предел связан? Оказывается, что в значительной мере этот предел определяется выбором рабочего вещества.

У каждого рабочего вещества есть предел температур, ниже которого оно становится непригодно. Связан этот предел с проявлением сил взаимодействия между частицами тела. Если в результате действия этих сил установился порядок в расположении, движении частиц, его в дальнейшем становится очень трудно изменить внешним воздействием. С веществом не удается провести основной цикл. Из-за этого, например, методом адиабатического расширения газа удается достичь лишь температуры его сжижения. Для воздуха это 80°K , для водорода $20,4^{\circ}\text{K}$ и, наконец, для гелия $4,2^{\circ}\text{K}$. Правда, понижая давление над жидкостью, можно еще несколько приблизиться к абсолютному нулю, но таким способом существенного понижения температуры достигнуть не удастся. Например, используя He^4 , можно опуститься лишь до $0,72^{\circ}\text{K}$. Это не удивительно, так как давление паров гелия составляет при этой температуре всего лишь $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Для дальнейшего продвижения к абсолютному нулю необходимы машины с иным рабочим веществом.

В первую очередь для этой цели могут быть использованы парамагнитные вещества, с которых и началось наше знакомство с низкими температурами. Энтропию магнитного вещества, так же как и газа, можно разбить на две части: связанную с тепловыми колебаниями решетки и с расположением элементарных магнетиков. Первая часть энтропии, изменяясь с температурой, резко уменьшается по мере ее понижения. Вторая, до тех пор пока не сказываются силы взаимодействия между магнетиками, остается постоянной. В результате этого при температуре в 1—2 градуса уже практически вся энтропия парамагнитной соли определяется расположением входящих в ее состав магнетиков. Но расположение магнетиков, как мы уже видели, может быть легко изменено магнитным полем. Поле в десятки килоэрстед практически нацело их ориентирует при температуре в 1°K , уменьшая магнитную энтропию до нуля¹. Вот этот эффект и используется в холодильных установках, работающих ниже 1°K .

Предельно низкие температуры, которые позволяет получать метод адиабатического размагничивания, так же как и в методе адиабатического расширения газа, определяются силами взаимодействия между частицами рабочего вещества, в данном случае — элементарными магнетиками. Как только температура тела будет настолько понижена, что под дейст-

¹ Установление магнетиков по направлению внешнего поля происходит в конечный для магнетиков ядер даже относительно большой промежуток времени. Это позволяет перевести систему магнетиков в совершенно необычное состояние. Представим себе, что после ориентации магнетиков направление поля мгновенно изменено на обратное. В этом случае в первое мгновение все магнетики будут повернуты в одном направлении, однако против направления поля. Энтропия не будет очень малой, в то время как магнитная энергия очень большой — большей, чем при хао-

вием сил взаимодействия возникнет упорядочение расположения магнитиков, метод адиабатического размагничивания перестанет действовать. Однако у магнитных веществ эта предельная температура, как мы видели выше, может быть самой разнообразной, так как взаимодействие магнитиков зависит от расстояния между ними, от их величины. Поэтому обычно удается выбрать вещество с подходящей предельной температурой. Так, например, для работы в области температур до $0,03^\circ \text{K}$ обычно используют хромокалиевые или железо-аммониевые квасцы, у которых на один магнитный ион хрома или железа приходится 60 немагнитных атомов. Если же и этого оказывается недостаточно, то используют вещества с еще более слабым взаимодействием, еще более удаляя магнетики друг от друга. При этом, выигрывая в предельной температуре, до которой может быть использовано рабочее вещество, мы проигрываем в его удельной холодопроизводительности. Используя такие «разведенные» парамагнитные соли, в настоящее время относительно просто удается достигнуть температуры, отстоящей от абсолютного нуля всего лишь на $0,001^\circ \text{K}$.

Другой путь в продвижении к абсолютному нулю лежит через использование ядерного магнетизма. В этом случае силы взаимодействия будут проявляться лишь при 10^{-5}°K и до этих температур метод может быть с успехом применен. Однако здесь на пути исследователя возникают те же трудности, что и в прямом методе получения упорядоченного расположения ядер. Ведь в первую очередь для адиабатического размагничивания необходимо изменять внешним полем энтропию — упорядочить расположение моментов ядер. На этом пути уже достигнуты существенные успехи. Так, проведены первые опыты по ядерному размагничиванию системы ядерных моментов металлической меди. Бесспорно, что работы в этом направлении будут интенсивно продолжаться.

* * *

Наше знакомство с областью низких температур заканчивается. Здесь, вблизи абсолютного нуля, мы встретились с миром, где квантовые законы повсеместно проявляются в

тическом расположении. Затем постепенно магнетики будут поворачиваться по полю. Их магнитная энергия будет все время уменьшаться, а энтропия вначале возрастать до максимального значения (при хаотическом расположении) и лишь затем падать вновь к нулю. Таким образом, система магнитиков в поле может быть получена в состоянии, когда при минимальной энтропии энергия ее велика, когда увеличение энтропии сопровождается уменьшением энергии. Это особое состояние, характерное лишь для этой системы, часто называют областью «отрицательных температур».

свойствах тел, где может происходить «коллективное» движение частиц, где появление дополнительной энергии у тел отождествляется с рождением квазичастиц. Эти законы носят, конечно, общий характер. Они определяют свойство ядерной материи, движение электронов в атоме и т. д. Примеров их проявления можно привести бесчисленное множество.

Открытие в области низких температур новых явлений, новых свойств веществ создает колоссальные возможности при решении чисто практических задач. Так, явление сверхпроводимости используется для создания счетных устройств, различных радиотехнических схем высокой стабильности, тепловых ключей в холодильных установках. Используя ряд свойств полупроводников, удается создать сверхвысокочувствительные приемные устройства, миниатюрнейшие элементы счетного устройства, размеры которых столь малы, что в одном кубическом сантиметре их умещается десятки тысяч.

Низкие температуры используются, конечно, и в крупных промышленных установках. Например, всем известно, насколько важным является интенсификация металлургических процессов путем использования кислородного дутья. Оказывается, что проблема выделения кислорода из воздуха, как и вообще разделение газов, наиболее экономично может быть решена методами низких температур. Подобных примеров можно было бы привести очень много. Низкие температуры все более и более входят в технику. Это очень большая и серьезная тема, далеко выходящая за рамки настоящей брошюры.

Все эти новые возможности, новые пути в исследовании свойств природы, в решении технических задач и привлекают исследователей к области низких температур. Можно быть уверенным, что работы в этом направлении приведут к решению еще многих задач первостепенной важности.

ТОВАРИЩИ!

В 1960 году издательство «Знание» будет выпускать 12 серий брошюр-лекций (средний объем брошюр всех серий — 2,5 печатных листа).

С е р и и	Количество брошюр в год	Подписная цена	
		на год	на полгода
Первая серия — историческая	36	21—60	10—80
Вторая серия — философская	36	21—60	10—80
Третья серия — экономическая	36	21—60	10—80
Четвертая серия — научно-техническая	36	27—00	13—50
Пятая серия — сельскохозяйственная	24	15—60	7—80
Шестая серия — по вопросам литературы и искусства	24	15—60	7—80
Седьмая серия — международная	24	14—40	7—20
Восьмая серия — по вопросам биологии и медицины	24	18—00	9—00
Девятая серия — по вопросам физики и химии	24	18—00	9—00
Десятая серия — молодежная	12	7—20	3—60
Одиннадцатая серия — педагогическая	24	14—40	7—20
Двадцатая серия — «Библиотека сельского лектора»	24	15—60	7—80

Начиная с 1960 года, в каждую брошюру будут включаться краткие методические материалы в помощь лекторам, а также материалы в помощь занимающимся самообразованием (рекомендательные списки литературы, словарики, цифры и факты и пр.).

Подписывайтесь на брошюры-лекции издательства «Знание»!

Подписка принимается с 1 октября 1959 года городскими и районными отделениями «Союзпечать», конторами, отделениями и агентствами связи, почталюдами, а также общественными уполномоченными по подписке на фабриках, заводах, в совхозах и колхозах, в учреждениях и учебных заведениях.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний