

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК.О СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛОВ <sup>1)</sup>.*К. А. Кромелин.*

В 1913 году профессор Камерлинг-Оннес в Лейдене (Голландия) в своей криогенной лаборатории открыл, что существуют металлы, электрическое сопротивление которых при температуре жидкого гелия обращается в нуль. Это новое состояние, в которое может быть приведен металл, было названо состоянием сверхпроводимости. Прежде чем перейти к описанию опытов, поведших к этому замечательному открытию, сделаем краткий очерк старых исследований металлического сопротивления при низких температурах.

Нет ничего удивительного в том, что с тех пор, как в разных лабораториях научились сжимать газы, вопрос об измерении при низких температурах столь важной в теоретическом и практическом отношении величины, какой является электрическое сопротивление, становится предметом исследования. Уже в 1885 г. появляется довольно обстоятельная работа Кайете и Бути <sup>[1]</sup>, которые, впрочем не пошли ниже — 123°С, температуры, без особого труда получаемой при помощи жидкого этилена. Лишь, когда удалось получить жидкий кислород и жидкий воздух, можно было продолжить исследование. Гольборн, частью в работе совместной с В. Вином <sup>[2]</sup>, изучил зависимость сопротивления чистой платиновой проволоки от температуры в пределах от 0 до — 190°, при чем температура тщательно определялась по водородному термометру. Целью исследования было установить возможность точно определять низкие температуры при помощи измерения сопротивлений. Эта задача превосходно была разрешена Гольборном и позднейшими исследователями, так что в настоящее время термометр с платиновым сопротивлением следует признать наиболее подходящим в качестве вторичного термометра для низких температур. Хотя в том же направлении велись уже раньше исследования Вроблевского <sup>[3]</sup> и Ольшевского <sup>[4]</sup>, однако им не удалось достигнуть значительного успеха именно потому, что их темпе-

<sup>1)</sup> Перевод с немецкой рукописи автора.

ратурная баня была недостаточно постоянной, а измерения температуры — неточными. Термометр с платиновым сопротивлением стал прецизионным инструментом высокого значения только после вышеупомянутых измерений Гольборна и Винга, и позже Траверса и Гуйера [5], а особенно после исследований Камерлинг-Оннеса и его сотрудников Мейлинка [6], Глейя [7] и Гольста [8], производившихся в Лейденской криогенной лаборатории, и работ Геннинга [9] и Гольборна, выполненных в Государственном Физико-Техническом Бюро, в Шарлотенбурге.

Однако при этих изысканиях преследовались не только практические цели. От результатов их можно было много ждать и для электронной теории металлов. Неоднократно замечалось, что изменение сопротивления с температурой происходило совсем иначе при низких температурах, чем при высоких. Часто (например, для платины) температурный коэффициент сопротивления сильно убывает с температурой. Иногда на кривой, представляющей сопротивление как функцию температуры, обнаруживается точка перегиба. Естественно возникает вопрос, каким образом ведет себя сопротивление в непосредственной близости к абсолютному нулю. Лорд Кельвин [10] уже в 1902 г. пришел к заключению, что с точки зрения классической электронной теории металлов сопротивление при абсолютном нуле должно становиться бесконечно большим; свободные электроны, поскольку они еще остаются таковыми, должны нацело потерять свою подвижность. Камерлинг-Оннес говорил о конденсации или замерзании электронов. Между тем еще не удавалось экспериментально подтвердить эту теорию. Минимум, который можно было ожидать на кривой сопротивления, не получался даже при температуре жидкого водорода (температура кипения —  $253^\circ$ , тройная точка —  $259^\circ$ ).

10 июля 1908 г. Камерлинг-Оннесу удалось получить жидкий гелий, — и таким образом для исследования открылась совсем новая область температур, лежащая в непосредственной близости к абсолютному нулю.

Гелий кипит при атмосферном давлении при  $4^\circ, 22 K$ , а при давлении в  $1/50$  мм ртути можно достигнуть температуры от  $0^\circ, 8$  до  $0^\circ, 9 K^1$ ). Среди многочисленных измерений, которые производились в этом интервале с 1910 г. в Лейденской лаборатории, измерения сопротивления металлов занимают важное место. Первые измерения относились к проволоке из чистой платины, толщиной в  $0,1$  мм, сопротивлением которой было уже измерено в области „водородных“ температур и которую теперь желательно было исследовать дальше при температурах, достижимых с помощью гелия.

<sup>1</sup> В дальнейшем температура гелия дается по абсолютной шкале ( $K$  — шкала Кельвина).

Результаты этих первых определений были в высшей степени поразительными. Именно, было найдено, что сопротивление в гелиевой области остается вполне постоянным (см. рис. 1); не было обнаружено никаких следов минимума, которого следовало ожидать по Кельвину. Чтобы объяснить этот совершенно неожиданный результат, К.-Оннес предложил, что тянутые металлические проволоки никогда не бывают вполне чистыми и что наблюдаемое остаточное сопротивление могло быть следствием наличия чрезвычайно малых количеств каких-нибудь загрязнений. Совершенно чистый металл должен иметь при гелиевой температуре сопротивление, равное нулю, как это указывает пунктирная кривая на рис. 1.

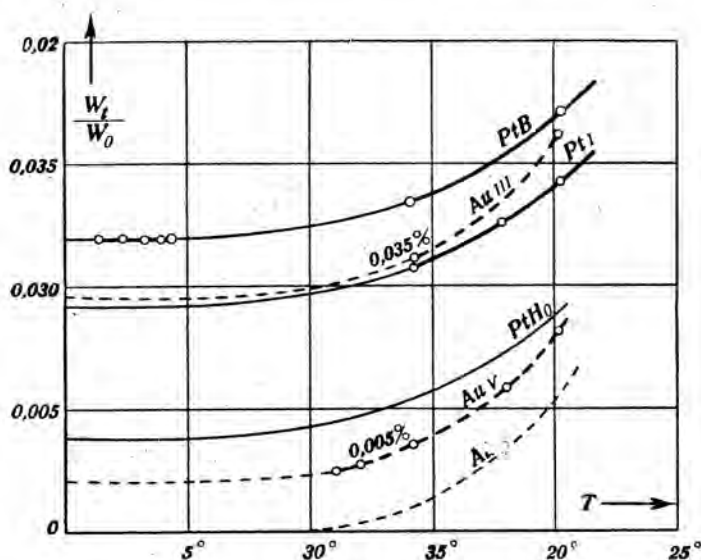


Рис. 1.

Хотя опыты имели лишь предварительный характер, однако из них делалось совершенно ясным, что необходимо отказаться от теории Кельвина, бывшей в течение ряда лет руководящей теорией в этой области. Не было найдено никаких следов ожидавшегося минимума. Конечно, было еще невозможно создать новую теорию металлической проводимости на основании этих опытов; для этого опытных данных было совершенно недостаточно. Тем не менее, уже в этой работе, посвященной описанию первых опытов, К.-Оннес опубликовал предварительную формулу, посредством которой ему удалось выразить результаты своих экспериментов с помощью Планковской теории квантов. Мы еще вернемся к этому теоретическому допущению. Дальнейшие исследования обнаружили, что гипотеза обращения в нуль сопротивления подтверждается экспериментально на вполне чистых металлах. Ртуть представляет

собой материал, который при помощи повторной перегонки в пустоте может быть получен в несравненно более чистом виде, чем какая-нибудь тянутая металлическая проволока. Однако изготовление подходящих ртутных сопротивлений представило значительные трудности. Ртуть, заключенная в зигзагообразный капилляр с сечением  $0,005 \text{ мм}^2$ , при замерзании неминуемо разорвалась бы (ибо ртуть сжимается при отвердевании), если бы не были приняты специальные меры. Эти меры заключались в том, что к верхней части зигзагообразно изогнутого капилляра припаивался небольшой резервуар со ртутью (см. рис. 2). При медленном и осторожном охлаждении ртутного столбика с нижнего конца, материал пополнялся из резервуара, и таким образом удалось в конце концов изготовить сопротивление подходящей величины (напр.,  $172 \text{ ом}$  при  $0^\circ \text{C}$ ).

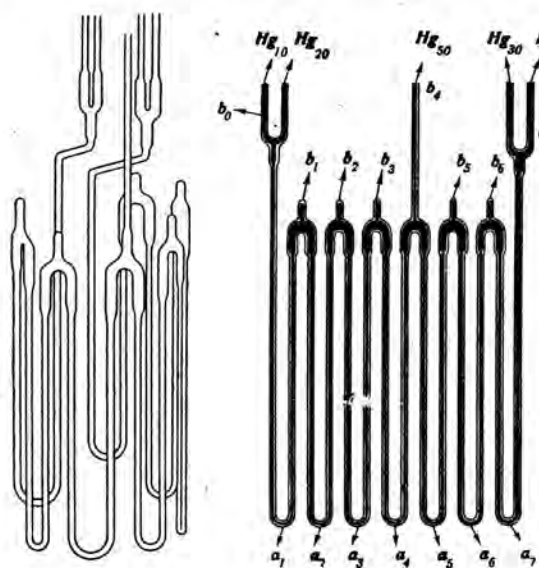


Рис. 2.

Вряд ли нужно добавлять, что этой удаче предшествовало много тщетных усилий.

На рис. 3 видно, каким образом это ртутное сопротивление, имеющее цилиндрическую форму, монтировано в гелиевом кристате.  $Hg_1$  означает сопротивление;  $Hg_2$  — трубки, наполненные ртутью и служащие для подводки тока (с тем, чтобы избежать термоэлектрических сил),  $Eak_3$  — эвакуированная двухстенная трубка, по которой притекает жидкий гелий из конденсационного аппарата; эта трубка при  $Eak_2$  запирается

маленькой, конически обрезанной, корковой пробкой. Два эвакуированные стакана, которые окружают трубку с гелием, заполняются жидким водородом и жидким воздухом.

Труды, потраченные на приготовление этих сопротивлений, были щедро вознаграждены. Было найдено, что при гелиевой температуре сопротивление ртути действительно равно нулю или по крайней мере становится неизмеримо малым. Но наиболее замечательным оказалось, что сопротивление при  $4^\circ, 2 \text{ K}$  скачком падает от измеримого значения до нуля. Температура, при которой наступает этот разрыв, была названа К.-Оннесом температурой скачка; а состояние, при котором сопротивление равно нулю, — состоянием сверхпроводимости.

Ртуть была, таким образом, первым веществом, для которого бы о открыто сверхпроводящее состояние. Позже К.-Оннес и шел (частью в совместной работе с доктором Туйком), что также олово, свинец (и его изотоп *RaG*), таллий и индий обнаруживают состояние сверхпроводимости. Температуры скачка для них значительно отличаются друг от друга, как показывает следующая таблица:

Вещество.	Температура скачка.
Hg . . . . .	4°, 4 K
Sn . . . . .	3°, 75 K
Pb( <i>RaG</i> ) . . . . .	7°, 2 K
Tl . . . . .	2°, 47 K
In . . . . .	3°, 4 K

Ср. также рис. 4. Чрезвычайно большому остаточному сопротивлению индия не следует придавать никакого веса. Возможно, что проволока из индия не была чиста и что чистый индий покажет более нормальное значение остаточного сопротивления. Эти исследования еще не закончены.

В высшей степени интересно знать, следует ли рассматривать сверхпроводимость, как общее свойство вещества, или оно выступает лишь в виде исключения. Чтобы ответить на этот вопрос, было исследовано на сверхпроводимость большое количество металлов; при этом оказалось, что явление следует до известной степени рассматривать, как исключение. Цинк, гадолиний, германий, алюминий, платина, золото, медь, железо, серебро, висмут, калий, натрий и литий — все обнаруживают постоянное сопротивление, совершенно так же, как это имеет место для платины (см. выше). Для кадмия положение еще не выяснилось; некоторые проволоки показывают постоянное сопротивление, другие — сверхпроводимость; но можно считать вероятным, что чистый кадмий не является сверхпроводником. Теоретические исследования также привели к закономерностям, которые ясно пока-

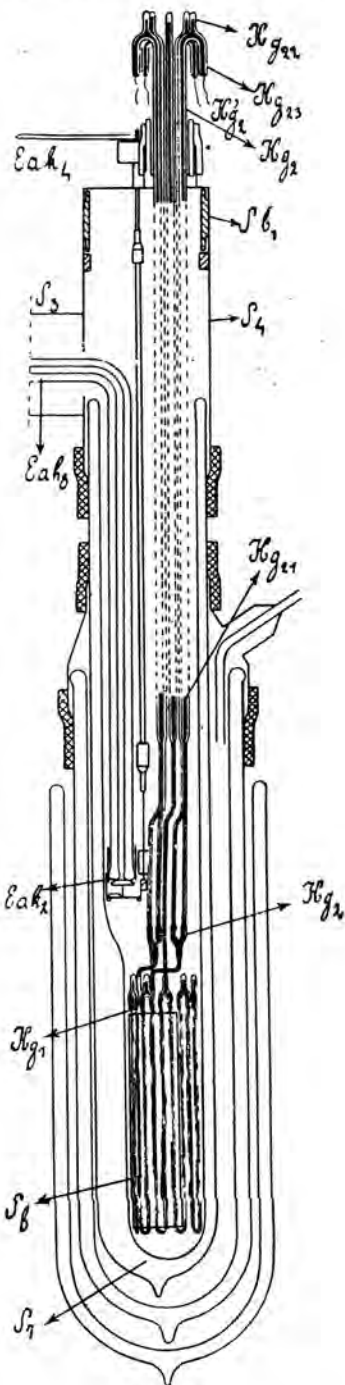


Рис. 3.

зывают, что сверхпроводимость не является общим свойством материи. К этому мы еще вернемся.

Следующим важным вопросом является вопрос о том, испытывают ли другие физические величины, кроме сопротивления, разрывность в точке температурного скачка. Чтобы ответить на этот вопрос, проделаны предварительные опыты над измерениями коэффициента упругости олова, удельной теплоты и теплопроводности ртути и кристаллической структуры свинца. Замечательно, что ни одна из этих величин не обнаруживает разрывности при температуре скачка.

Температура скачка не есть такая резко очерченная константа, как можно было бы заключить из рис. 4, на котором масштаб мал. На одной проволоке из олова удалось произвести измерения в области

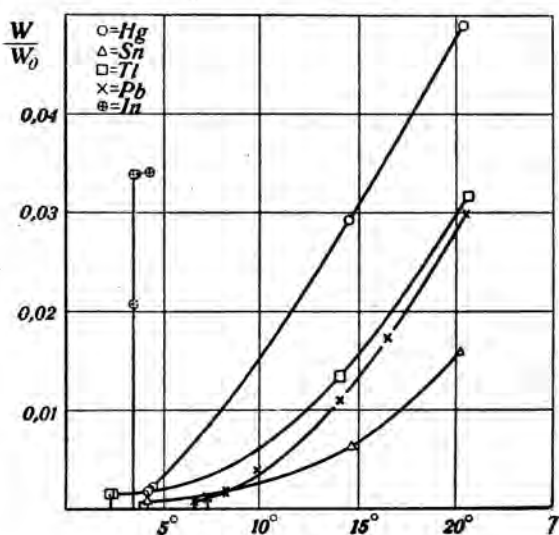


Рис. 4.

разрыва, как это показывает рис. 5. При большом масштабе видно, что эта область представлена настоящей кривой с точкой перегиба; следует только обратить внимание, что разность температур между областью измеримых сопротивлений и сопротивлений, равных нулю, чрезвычайно мала, чуть больше, чем  $0,04$ .

Состояние сверхпроводимости металла может быть разрушено разнообразными способами. Известно, что магнитное поле и при обыкновенной температуре влияет на сопротивление, при чем сопротивление становится больше, если металл помещается в магнитное поле. В сверхпроводящем состоянии происходит нечто подобное; при этом переход от сверхпроводящего к обычно проводящему состоянию при возрастающем магнитном поле происходит разрывно. Кривые „сопротивление — магнитное поле“ обнаруживают качественно совершенно такой же характер, как и кривые „сопротивление — температура“ (см. рис. 6, который изображает продольный и поперечный эффект на свинцовой проволоке). При этом эффекте можно, следовательно, говорить о рубажном значении (Schwellenwert) магнитного поля, т.е. значении, которое нельзя переходить без того, чтобы не разрушить сверхпроводящее состояние. Это рубажное значение есть функция температуры; при более низкой температуре требуется более сильное магнитное поле, для того, чтобы разрушить сверхпрово-

дящее состояние, чем при высокой температуре; но при постоянной температуре это значение есть, так же, как и температура скачка, не резко очерченная константа; точно так же и сила пропускаемого через проводник тока имеет некоторое, хотя и малое, влияние на рубежное значение. Сверхпроводящее состояние может быть разрушено, при чем также прерывно, и при помощи достаточно большого тока пропускаемого через проводник. Если бы сопротивление действительно точно равнялось нулю (что еще не известно с определенностью), то джаулево тепло также равнялось бы нулю, и можно было бы применять сколько угодно сильный ток, не вызывая нагревания проволоки, ведущего к установлению обычного сопротивления. Но в действительности это не имеет места. Хотя при благоприятных

обстоятельствах можно безнаказанно применять очень сильные токи (например, 1200 ампер на  $\text{мм}^2$ , в ртути), но и в этом отношении имеется рубежное значение силы тока, которое нельзя переходить. Можно было бы склониться к мысли, что проволока в конце концов нагревается вследствие наличия неизмеримо малого остаточного сопротивления и считать, может быть, существование этого остаточного сопротивления таким образом доказанным.

Однако нет ничего невозможного и в том, что магнитное поле, возникающее вследствие

наличия тока, есть причина увеличения сопротивления и уничтожения сверхпроводящего состояния. В этом и состоит гипотеза Сильзби [1] (1916), которую можно было бы формулировать следующим образом: рубежное значение силы тока равно значению, при котором возникающее под действием тока магнитное поле достигает магнитного рубежного значения.

Из наблюдений К.-Оннеса и Туйка можно заимствовать достаточно данных для более или менее точной проверки этой гипотезы; на основании этих данных можно считать, по всей видимости, установленным, что указанная гипотеза справедлива, хотя и нельзя рассматривать ее строго доказанной. Я бы хотел упомянуть здесь об одном красивом опыте. Если гипотеза справедлива, то можно

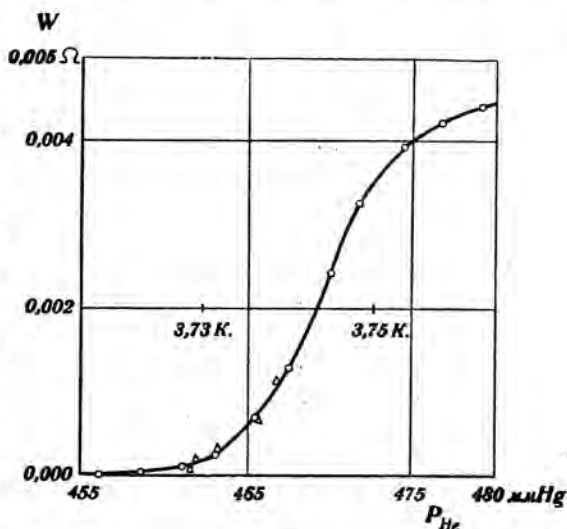


Рис. 5.

надеяться восстановить при помощи внешнего магнитного поля сверхпроводимость металла, разрушенную слишком сильным током; для этого нужно только придать внешнему магнитному полю направление прямо противоположное полю, создаваемому током. Это действительно удалось. Пустотелый оловянный цилиндр был охлажден до состояния сверхпроводимости и затем вновь приведен в состояние обычной проводимости путем пропускания тока, превосходящего рубежное значение. Затем, по медной проволоке, натянутой по оси цилиндра, был в противоположном направлении пропущен ток, магнитное поле которого ослабляло, следовательно, магнитное поле тока в цилиндре.

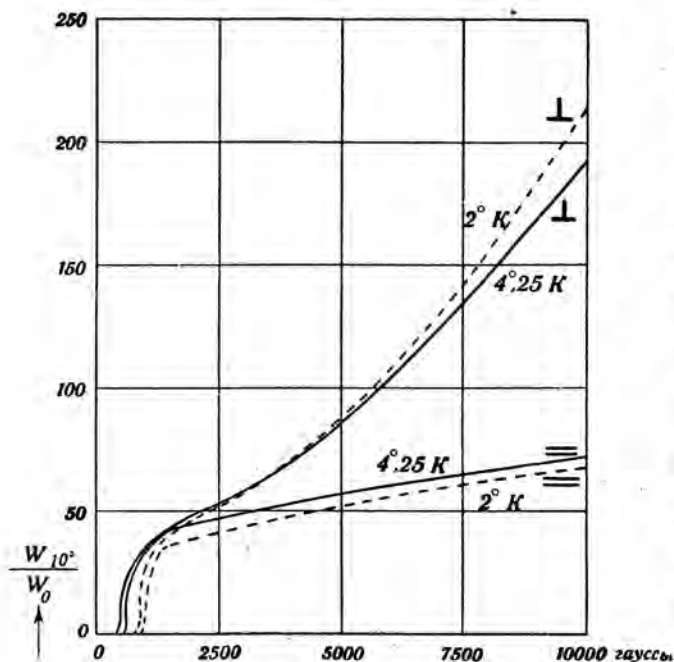


Рис. 6.

Таким путем удалось вновь восстановить сверхпроводящее состояние олова, не уменьшая при этом тока в оловянном цилиндре. Этот опыт следует считать важным подтверждением гипотезы Сильзби. Другое замечательное явление состоит в том, что для проволоки, натягиваемой с помощью маленького винта, температурный скачок соответствует более высокому значению температуры, чем для не натянутой проволоки. Натяжение является, следовательно, причиной, под действием которой проволока легче становится сверхпроводящей. Наблюдалось также и обратное явление; именно, проволока под давлением в 200 атм. обнаруживает более низкий скачок температуры, чем проволока при обычном давлении. Ниже мы вернемся еще к теоретическому толкованию этого явления.

Мы переходим теперь к описанию ряда чрезвычайно важных опытов К.-Оннеса, при помощи которых он демонстрировал устойчивость тока в сверхпроводнике и которые позже были применены для того, чтобы попытаться ответить на вопрос, обладает ли вообще сверхпроводник сопротивлением, или нет. Хотя эти опыты не открывают никаких новых явлений, тем не менее они до такой степени



поразительно, что до открытия сверхпроводников нельзя было бы и мечтать о возможности таких опытов. Поместим маленькую замкнутую катушку оловянной или свинцовой проволоки в криостат при комнатной температуре в магнитное поле, т.-е. между полюсами электромагнита (плоскости оборотов перпендикулярны к магнитным силовым линиям); охладим затем катушку до температуры ниже точки скачка и быстро выключим магнитное поле; при этом индуцируется ток, и этот индуцированный ток будет беспрерывно циркулировать по катушке, так как он не испытывает никакого сопротивления. Этот опыт был выполнен К.-Оннесом впервые в 1914 году, и по аналогии с представлением Амперовой теории магнетизма, эти круговые токи, циркулирующие без внешней электрической или электромагнитной силы, были названы Амперовыми токами.

В начале прошлого столетия Ампер, на основании открытий Эрстеда и своих собственных, выставил гипотезу, что поле вблизи намагниченного тела происходит от большого числа маленьких круговых токов, которые обтекают молекулы без сопротивления, а потому и без затухания; намагничивание состоит, следовательно, в поворачивании этих молекулярных токов параллельно друг другу.

Эта гипотеза позволяет привести свойства парамагнитных и ферромагнитных тел к действию электрических токов. Но уже во времена Ампера возникали сомнения в правильности такого представления, так как не было известно ни одного примера не затухающего кругового тока. Тем удивительнее кажется, что гипотеза молекулярных токов может быть теперь иллюстрирована на обыкновенной металлической проволоке.

Электромагнитное поле Амперова тока наблюдалось вначале с помощью магнитной стрелки, помещенной вне криостата, и уже при первых опытах можно было констатировать, что сила тока убывает во всяком случае менее, чем на 1% в час. Но так как степень неизменности силы тока имеет существенное значение для ответа на вопрос, обладает ли сверхпроводник вообще сопротивлением, или не обладает, то в последние годы был сконструирован остроумный аппарат, позволяющий очень точно измерить эту степень неизменности (см. рис. 8). В криостате находятся два свинцовых кольца, из которых наружное *B* закреплено неподвижно, а внутреннее *A* может вращаться около вертикальной оси. Поворот *A* можно оценивать при помощи

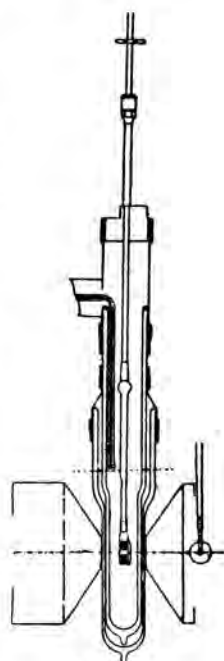


Рис. 7.

головки *K*, разделенной на градусы. Между кольцом и головкой помещается крутильная пружинка из фосфористой бронзы. Закручивание

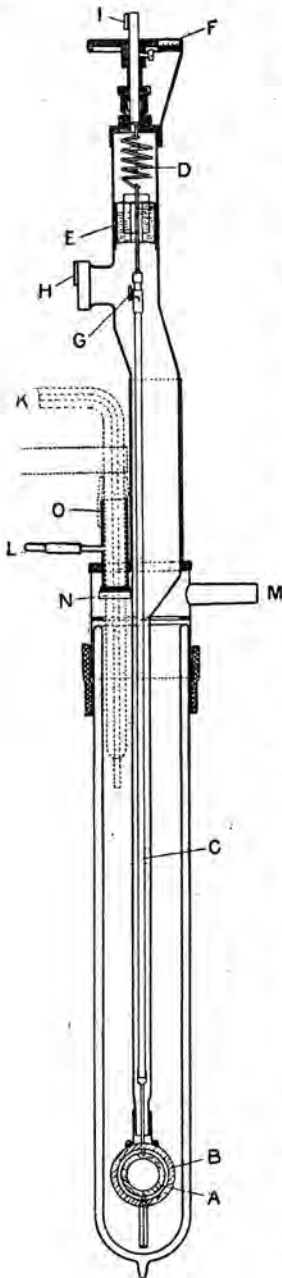


Рис. 8.

наблюдается через окошко *H* с помощью зеркала *G*, трубы и шкалы. Охладив свинцовые кольца в жидком гелии и приведя их таким образом в сверхпроводящее состояние, индуцируют в обоих кольцах токи одного направления, совершенно так же, как было описано выше. (Только в этих опытах вместо большого электромагнита пользовались проволочными катушками, работа с которыми гораздо удобнее, и магнитное поле которых совершенно достаточно для этих опытов). Тогда кольца притягиваются друг к другу. Если голова была закручена так, что кольца образовывали между собою угол в  $30^\circ$ , то при наличии токов придется повернуть головку несколько больше, и это добавочное вращение и есть мера взаимного притяжения колец. Когда наступает стационарное состояние, наблюдают зеркало *G* и оба контрольных зеркала *H* и *I*, чтобы исследовать, насколько постоянным остается притяжение между кольцами и, следовательно, сила тока. В общем и целом, в результате длинного ряда измерений оказалось, что Амперов ток изменяется наверное меньше, чем на  $1/80000$  за час, т.-е. оказывается гораздо более постоянным, чем было выведено раньше из предварительных измерений с магнитной стрелкой.

Я считаю нужным вкратце упомянуть, что было обнаружено совершенно такое же явление при опытах с незамкнутой катушкой (начальный и конечный концы проволоки которой не были соединены друг с другом) или со свинцовым кольцом, разрезанным в одном месте. Даже величина магнитного момента была приблизительно такой же самой, как и для замкнутого кольца. Однако эти в высшей степени предварительные опыты еще слишком новы и немногочисленны, и, так как пока нет никакого удовлетворительного теоретического объяснения их, то я не буду больше на них останавливаться.

Некоторые дальнейшие замечательные опыты будут упомянуты ниже в связи с изложением теоретических соображений.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением экспериментального материала. Теперь следует дать короткий обзор некоторых теоретических воззрений относительно сверхпроводящего состояния, именно теоретических предположений, высказанных в последнее время самим К.-Оннесом. Надо сознаться, что дальше предположений мы вообще не пошли, хотя многие исследователи брались за этот вопрос. И понятно, — ведь обыкновенная электронная теория металлов борется еще с весьма большими трудностями; как же можно было бы ожидать, что уже теперь создастся законченная теория такого сложного, характеризующегося прерывностью явления, каким оказывается сверхпроводимость.

Так как заранее было ясно, что классическая электронная теория металлов (Друде [12], Рикке [13], Лорентц [14]) не в состоянии дать даже качественного отчета об явлении, то многие исследователи пытались развить представления и установить формулы, покоящиеся на основах теории квантов. К. Оннес опубликовал одну такую формулу тотчас же после своего открытия; приблизительно одновременно и независимо от него то же сделал Нернст.

Я прохожу мимо этих работ, равно как и более давних работ Линдемана [16], Кэзома [17], В. Вина [18], Габера [19], Штарка [20], Бенедикса [21] и Бриджмэна [22] и остановлюсь подробнее на теории Дж. Дж. Томсона, покоящейся еще на классических основах, так как к этой теории примыкают более поздние представления Камерлинг-Оннеса и так как это единственная теория, которая дает отчет о температурном скачке. Томсон исходит из совсем иных представлений, чем основоположники старой электронной теории металлов. Он допускает существование в атоме электрических диполей. Если не действует электрическая сила, то оси этих диполей ориентированы в пространстве произвольно по всем направлениям. Но если внешняя электрическая сила действует в определенном направлении, то оси должны стремиться установиться по направлению поля, в то время как другие влияния, например тепловое движение, накладываются на первое и стремятся разрушить устанавливающуюся ориентировку, делая ее, таким образом, неполной. Чтобы фиксировать представление, мы можем считать, что часть осей ориентирована вполне, в то время как остальные вообще не ориентированы. Это состояние должно быть эквивалентно с имеющейся в действительности всеобщей, но неполной ориентировкой. Мы представляем далее, что ориентированные диполи выстраиваются в ряды и образуют цепи. По Томсону перенос электронов под действием внешней электрической силы происходит вдоль этих цепей. Развивая это представление, можно показать, что для всех не очень низких температур имеет силу закон Ома, и, сверх того, сопротивление линейно зависит от температуры, как это в действительности приближенно имеет место для чистых металлов. Эта теория была приложена Томсоном к сверхпроводящему состоянию, и ему уда-

лось показать, что для некоторых металлов должна существовать вполне определенная критическая температура, ниже которой металл будет сверхпроводником, а выше — не обнаруживает никаких особенных явлений. Соображения, при помощи которых он приходит к этому замечательному результату, не являются чрезмерно сложными, но все же их трудно было бы изложить здесь в полном объеме. Я ограничусь поэтому лишь указанием на оригинальную работу.

Однако следует заметить, что как ни проста кажется эта теория, все же она содержит трудности, разрешить которые не легко; поэтому и эту теорию ни в коем случае нельзя рассматривать, как вполне удовлетворительную.

К.-Оннес замечает, что, как бы ни представлять себе электрическую проводимость металлов, нужно признать, что сверхпроводники заставляют нас отказаться от мысли о прямолинейном свободном пути электрона. Действительно, если вычислять эти свободные пути для сверхпроводящего состояния, то найдем совершенно невозможные значения, превосходящие, например, в 10 000 раз диаметр применявшейся проволоки. К.-Оннес выставляет следующую гипотезу: в металлах существуют длинные атомные цепи (как и в теории Томсона), и электроны могут скользить вдоль этих цепей по поверхности атомов, не потребляя и не отдавая электрической энергии, т.-е. „адиабатическим“ образом. В таком случае нужно себе представить, что в сверхпроводящем состоянии эти цепи замерзают на своих местах и принимают почти неподвижное положение внутри металла. Понятие „среднего свободного пути“ при этом представлении надо толковать, как „путь, проходимый адиабатическим образом“.

По отношению к этому теоретическому воззрению следующие эксперименты представляют особую важность и интерес. Чтобы иметь возможность изложить их именно в этом месте, я умышленно избегал описания их в экспериментальной части обзора.

Прежде всего представление об атомных цепях дает повод думать, что место соприкосновения между двумя сверхпроводниками не позволит току без сопротивления переходить от одного металла к другому. Таково было также и мнение Эйнштейна [24], когда он писал свою статью в юбилейном сборнике, посвященном К.-Оннесу. Однако оказалось, что место контакта было вполне сверхпроводящим. Кольцо, спаянное из 24 секторов из олова и свинца попеременно, обнаружило совершенно такие же явления, как и простое свинцовое кольцо. Также и разрезанное кольцо из олова и свинца дало то же явление и тот же магнитный момент. Второй опыт состоял в следующем. В аппарате с двумя свинцовыми кольцами внутреннее вращающееся кольцо было заменено тонкой шарообразной свинцовой оболочкой. Когда в неподвижном кольце и во вращающемся шаре индуцируются обычным способом токи, то в шаре возникает распределение тока,

вычисление которого было произведено Лорентцом [25]. В случае обычного проводника при вращении шара не обнаружилось бы никакой притягивающей силы, действующей на неподвижное свинцовое кольцо. Напротив, в сверхпроводящем состоянии был найден совершенно такой же эффект, как в случае двух свинцовых колец, что доказывает, что пути токов внутри шара твердо закреплены в металле; этот опыт можно считать прекрасным подтверждением гипотезы твердых атомных цепей.

В 1924 г. К.-Оннес попытался привести явления сверхпроводимости в связь с атомной теорией Бора и вывести отсюда некоторые закономерности. Во-первых, рассмотрим вопрос, уже затронутый в экспериментальной части, а именно, является ли сверхпроводимость общим свойством материи, или ее следует рассматривать, как явление до известной степени исключительное. По всей видимости, имеет место второе, как это следует и из экспериментальных результатов. Но если рассмотреть места сверхпроводников в периодической системе Менделеева, то окажется, что сверхпроводники образуют замкнутую группу.

II	III	IV	V
30 Zn 65.37	33 Ga 69.9	32 Ge 72.5	33 As 74.96
38 Gr 87.63	39 Y 88.7	40 Zr 90.6	41 Nb 93.5
48 Gd 112.40	<u>49 In</u> 114.8	<u>50 Sn</u> 118.7	51 Sb 102.2
56 Ba 137.37	Редкие земли		73 Ta 181.5
<u>80 Hg</u> 200.6	<u>81 Tl</u> 204.0	<u>82 Pb</u> 207.20	83 Bi 209.02
88 Ra 226.0	89 Ac (226)	90 Th 232.15	91 Pa (230)

Пять сверхпроводников (подчеркнутых в таблице) образуют тесную группу, и даже металлы, находящиеся в непосредственной близости к этой группе (как например, Bi и Cd), не обнаруживают никаких следов сверхпроводимости.

Рассматривая известные кривые атомных объемов, как функции атомного номера, обнаружим в обоих местах, где находятся сверхпроводники, маленькие волны на поднимающихся кривых. То же самое видно на кривых, изображающих величины, обратные температурам плавления и сжатия.

Пытаясь применить теорию Бора, как это сделал К.-Оннес совместно с доктором Крамерсом из Копенгагена, получаем дальнейшую, чрезвычайно занимательную закономерность. Прежде всего из таблицы Бора и Костера следует, что для того, чтобы достичь сверхпроводников, надо подойти к элементам со вполне замещенными оболочками из 18 электронов, с главными квантовыми числами 4 и 5

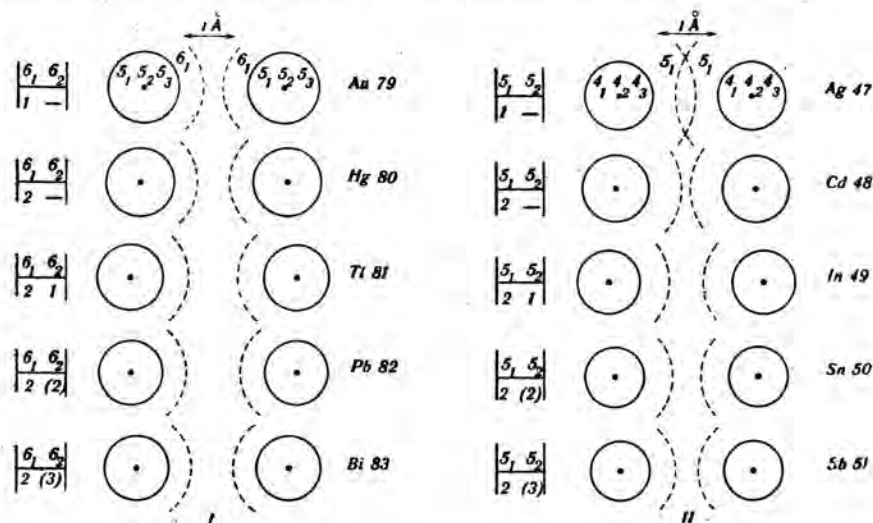


Рис. 9.

Рис. 10.

и обладающими двумя, тремя или четырьмя валентными электронами; одного валентного электрона (Au, Ag) — недостаточно, пяти (Sb, Bi) — слишком много.

Крамерс составил чертежи для ряда металлов, имеющие назначение передать количественно соотношение между расстоянием ядер в кристалле, с одной стороны, и расстоянием крайних электронных орбит от ядра, с другой, — с точностью, какую допускают современные наши знания о строении атомов. Некоторые из этих чертежей воспроизводятся здесь (рис. 9, 10 и 11). В этих чертежах сплошные круги означают вполне замещенные оболочки (18 электронов), пунктирные круги — оболочки с валентными электронами. Хотя можно было бы, пожалуй, ожидать, что малые взаимные расстояния внешних электронных орбит благоприятны для наступления сверхпроводимости, однако из чертежей видно, что имеет место как раз обратное. За исключением некоторых менее убедительных примеров

(Bi и Ga, с одной стороны, Sn — с другой), ясно видно, что сверхпроводникам соответствуют большие, не сверхпроводникам — меньшие взаимные расстояния внешних электронных орбит; на основании этих чертежей можно с достаточно большой уверенностью предсказать, что сомнительный до известной степени кадмий не окажется сверхпроводником.

Впрочем, толкование этих чертежей не легко и во всяком случае совершенно гипотетично. Можно было бы заметить, что при больших расстояниях электронных орбит увеличивается для электрона вероятность найти более длинный стационарный путь или что остающееся еще тепловое движение может быть сильнее и все же не разрушит атомные цепи, и т. д.; однако сказать относительно этого что-нибудь более определенное в настоящее время совершенно невозможно.

В заключение я хотел бы в связи с этими толкованиями еще раз указать на уже упоминавшийся опыт, из которого следует, что растянутая проволока легче (т.-е. при более высокой температуре) становится сверхпроводящей, чем не растянутая, и что на проволоках под давлением наблюдается как раз обратное. Эти результаты стоят в полном согласии с развиваемыми выше теоретическими представлениями.

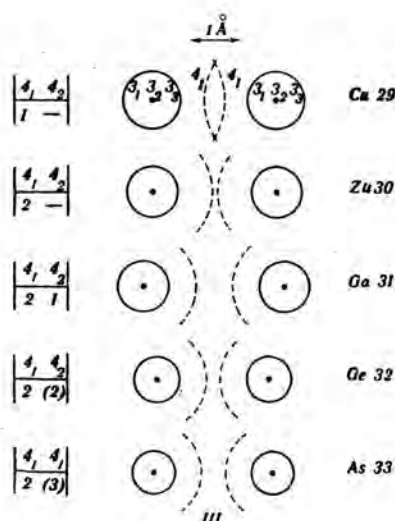


Рис. 11.

### ЛИТЕРАТУРА.

Литературные указания, за исключением тех, которые относятся к сверхпроводимости, не претендуют на полноту.

Comm. — Communications from the physical Laboratory of the University of Leiden.

Suppl. — Добавления (Supplements) к предыдущ.

### I. Измерение сопротивлений при низких температурах (за исключением гелиевых температур).

- 1) L. Cailletet and E. Bouty. Journ. de physique (2) 6 (1885) p. 29.
- 2) L. Holborn und Wien. Wied. Ann. 59 (1896) p. 211.
- 2) L. Holborn. Ann. d. Phys. 6 (1901) p. 242.
- 3) S. von Wroblewski. Wied. Ann. 26 (1885) p. 27.
- 4) K. Olszewski. Akad. Wiss. Krakau, Juni 1895.
- 5) M. W. Travers and A. G. C. Gwyer. Proc. Roy. Soc. 4 (1905) p. 74.
- 6) B. Meilink. Comm. Nos. 77, 93. Diss. Amsterdam 1904.

- 7) H. Kamerlingh-Onnes und J. Clay. Comm. Nos. 95d, 99c, 107c, 197 Suppl. № 17.  
 8) H. Kamerlingh-Onnes und G. Holst. Comm. № 141a, 142a.  
 9) F. Henning. Die Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperaturmessung, Braunschweig. 1915 (содержит обильные литературные ссылки).  
 10) Lord Kelvin. Phil. Mag. (6) 3 (1902) p. 257.

## II. Измерение сопротивлений при кригических температурах.

Невозможно было цитировать все эти работы в определенных местах статьи, в виду чего они и не нумерованы. Все важнейшие результаты их, однако, использованы.

H. Kamerlingh-Onnes. Comm. № 119, 120b, 122b, 124c, 133a, b, c, 133d 139f, 140b, c, 141b; Suppl. № 29, 34b, 35 (Нобелевская речь); 4-e Conseil de Physique Solvay 1924 — Suppl. № 50a.

H. Kamerlingh-Onnes und G. Holst. Comm. № 142a.

H. Kamerlingh-Onnes und W. Tuyn. Comm. № 160, 167a.

W. Tuyn. Doktordissertation Leiden. 1924.

## Обзоры.

C. A. Crommelin. Le Génie civil 64 (1914) p. 245. Chemisch Weekblad 16 (1919) p. 640, Phys. Zeitschrift 21 (1920) p. 274, 300, 331; Revue gén. d. Sc. 15 Jan. 1923, Chemisch Weekblad 18 (1921); Jahrb. d. Rad. u. El. 19 (1922) p. 38.

## III. Дальнейшая, главным образом теоретическая, литература.

- 11) F. B. Silsbee. Journ. Wash. Ac. of Sc. 6 (1916) p. 597; Sc. pap. of Bar. of Stand. 14 (1917) № 307.  
 12) P. Drude. Ann. de Phys. (4) 1 (1900) p. 566; 3 (1900) p. 369.  
 13) E. Riecke. Wied. Ann. 66 (1898) p. 353, 545, 1199.  
 14) H. A. Lorentz. Versl. Kon. Ak. Amsterdam, Dez. 1904, Jan. 1905.  
 15) W. Nernst. Sitz. Ber. Berlin 1911 p. 311.  
 16) F. A. Lindeman. Sitz. Ber. Berlin 1911 p. 316.  
 17) W. H. Keesom. Versl. Kon. Akad. Amsterdam, Mai 1913, Suppl. № 306; Phys. Zeitschr. 14 (1913) p. 670.  
 18) W. Wien. Sitz. Ber. Berlin 1913 p. 184.  
 19) E. Haber, Sitz. Ber. Berlin 1919 p. 506.  
 20) J. Stark. Jahrb. Rad. und El. 9 (1912) p. 188.  
 21) C. Benedicks. Jahrb. Rad. und El. 13 (1916) p. 351; 14 (1917) p. 471.  
 22) P. W. Bridgman. Proc. Nat. Ac. Am. 3 (1917) p. 10.  
 23) J. J. Thomson. Phil. Mag. (6) 30 (1915) p. 192.  
 24) A. Einstein. Het Natuurk. Lab. Leiden. Jubelband. H. K. Onnes. Leiden 1922, p. 429.  
 25) H. B. Lorentz. Suppl. 50b.  
 26) N. Bohr und D. Coster. Zeitschr. f. Physik. 12 (1923) p. 342.