

женном им эффекте – полном исчезновении электрического сопротивления ртути, охлажденной жидким гелием до температуры 4,15 кельвина. Хотя этого открытия никто не ожидал и оно противоречило существовавшей в те времена классической электронной теории металлов, тот факт, что первооткрывателем сверхпроводимости стал Камерлинг-Оннес, был не случаен. Дело в том, что именно ему первому удалось решить труднейшую научную и техническую задачу того времени – получить жидкий гелий (температура кипения 4,16 К), возможность работать с которым позволила заглянуть в неведомый мир температур, близких к абсолютному нулю. Он решил тут же применить появившееся средство исследования для выяснения низкотемпературного поведения сопротивления чистых металлов. В это время шла оживленная теоретическая дискуссия – обращается ли в ноль или остается конечным сопротивление чистого металла в абсолютном нуле температуры. Будучи сторонником первой точки зрения, Камерлинг-Оннес с удовлетворением воспринял полученный на ртути результат, однако вскоре осознал, что обращение сопротивления в ноль при конечной температуре является совсем иным эффектом.

Подчеркнем, что в сверхпроводящем состоянии сопротивление образца электрическому току равно нулю не приблизительно, а строго. Поэтому по сверхпроводящей замкнутой цепи ток может сколь угодно долго циркулировать не затухая. Самое длительное существование незатухающего сверхпроводящего тока – около двух лет – было зафиксировано впоследствии в Англии (этот ток циркулировал бы в кольце и поныне, если бы не перерыв в снабжении лаборатории жидким гелием, вызванный забастовкой транспортных рабочих). Даже спустя два года не было замечено никакого ослабления тока.

Вскоре после открытия сверхпроводимости обнаружили не только в ртути, но и в целом ряде других металлов. Перспективы практического применения открытого явления казались безграничными: линии передачи электроэнергии без потерь, сверхмощные магниты, элект-

ромоторы и трансформаторы новых типов и так далее. Однако два препятствия встали на пути реализации этих планов. Первое – это чрезвычайно низкие критические температуры, при которых явление сверхпроводимости наблюдалось во всех известных материалах. Для охлаждения сверхпроводников до столь низких температур приходилось пользоваться остродефицитным гелием (запасы его на Земле ограничены, и получение одного литра жидкого гелия даже сейчас обходится в несколько долларов). Это обстоятельство делало многие заманчивые проекты использования сверхпроводимости попросту нерентабельными. Второе препятствие – его вскоре обнаружил сам Камерлинг-Оннес – связано с тем, что сверхпроводимость оказалась весьма «капризной» по отношению к магнитному полю (а следовательно, и к предельной величине протекающего тока): в сильных полях она разрушалась.

Следующим фундаментальным свойством сверхпроводящего состояния, обнаруженным в 1933 году, оказался так называемый эффект Мейснера – Оксенфельда: полное «выталкивание» массивным сверхпроводником магнитного поля из своего объема.

Сущность феномена сверхпроводимости оставалась совершенно необъяснимой с точки зрения классической теории металлов, а квантовая теория в то время лишь начинала создаваться. Была предложена так называемая феноменологическая двухжидкостная модель, в которой принималось сосуществование в сверхпроводящем металле двух сортов электронов: обычных, взаимодействующих с решеткой, и особых, сверхпроводящих, с решеткой по каким-то причинам не взаимодействующих. Это позволило братьям Х. и Ф. Лондонам написать уравнения электродинамики сверхпроводника, описывающие эффект Мейснера – Оксенфельда и некоторые другие свойства, однако микроскопическая природа сверхпроводимости оставалась загадкой.

Открытие в 1938 году П.Л. Капицей явления сверхтекучести – протекания жидкого гелия без какой-либо вязкости через сколь угодно тонкие капилляры при температурах ниже 2,18 К – и последующее

объяснение этого явления Л.Д. Ландау породили надежды на скорое понимание феномена сверхпроводимости. Оказалось, что при низких температурах в системе атомов гелия, являющихся квантовыми частицами с целым спином, происходит их накапливание на самом низком энергетическом уровне. Ландау показал, что при этом в энергетическом спектре возбуждений появляется характерная щель, приводящая к возможности сверхтекучего состояния. Это чисто квантовое, однако проявляющееся в макроскопическом масштабе, явление позволило Ландау назвать жидкий гелий «окном в квантовый мир».

Механически перенести ту же идеологию на сверхпроводимость, т.е. трактовать ее как сверхтекучесть электронов в металле, не удалось. Дело в том, что поведение квантовой системы электронов (частиц с полуцелым спином – так называемых фермионов) кардинально отличается от поведения системы атомов гелия (частиц с целым спином – бозонов). Здесь и при нулевой температуре могут возникать возбуждения со сколь угодно малыми энергиями, а следовательно, не выполняется сформулированный Ландау критерий сверхтекучести. Естественное желание свести задачу к предыдущей наталкивало на мысль создать из двух электронов-фермионов один составной бозон с суммарным целым спином, после чего реализовать для сверхпроводимости схему сверхтекучести по Ландау. Однако этому, очевидно, мешало кулоновское отталкивание между двумя электронами, пусть даже и сильно экранированное в электронейтральном металле.

Прошло еще десять лет, и в 1950 году был открыт так называемый изотопический эффект, который впервые указал на связь явления сверхпроводимости с кристаллической решеткой металла. При измерении критической температуры свинца обнаружилось, что она зависит от массового числа исследуемого изотопа, т.е. сверхпроводимость перестала быть чисто электронным явлением. Чуть позже Х. Фрелих и Дж. Бардин независимо показали, что взаимодействие электронов с колебаниями решетки – фононами – может приводить к притяжению. Это притяжение в принципе может