

тей достаточно для того, чтобы принимать их во внимание.

1) Более близкая к линейной зависимость в алюминии при 20 К, чем при 4 К, подсказывает, что играет роль фоновое рассеяние. Так как 20 К гораздо меньше, чем температура Дебая, большинство фононов рассеиваются на малый угол, и потребуется много столкновений, чтобы провести электрон по сферической поверхности Ферми и разрушить память о его первоначальном направлении движения. Но если на поверхности Ферми есть области, в которых электрон пересекает зонную границу между различными типами орбит, рассеяние в эти области и из них очень эффективно для изменения направления. Вычисления показывают, что магниторезистивный эффект, обусловленный этой причиной, рано начинается и держится вплоть до очень сильных полей, ведя себя приблизительно линейно на промежуточном интервале.

2) Монокристаллы меди могут демонстрировать квадратичный рост сопротивления для некоторых направлений \mathbf{H} и насыщение для других направлений, часто меняя характер при изменении ориентации кристалла. Займан заметил, что, если вместо удельного сопротивления усреднить проводимость, можно получить линейную зависимость, но объяснить, почему именно это усреднение оправданно, удалось лишь Стаховяку. В сильном поле металл существенно лучше проводит вдоль направления \mathbf{H} по сравнению с проводимостью в плоскости, перпендикулярной \mathbf{H} . Если при этом электрическое поле постоянно, не имеет значения, что токи в соседних кристаллитах не совпадают: любая неравновесность, как, например, перетекание тока от одного кристаллита к другому, приводит к возникновению токов, непараллельных \mathbf{H} . Стаховяк еще шире развил эту мысль, и вдохновленный ею, я произвел расчет, который действительно показывает, что сопротивление должно расти почти пропорционально \mathbf{H} . Это один из тех редких случаев, когда закон Капицы выполнялся вполне удовлетворительно.

3) С образцами калия, имеющими традиционную форму прямоугольного параллелепипеда, трудно проводить контактные измерения, поэтому Дэйтарс и Лэсс независимо развили бесконтактную методику, в которой массивные образцы (предпочтительно сферические), вращались вокруг оси, перпендикулярной \mathbf{H} . Индуцированные токи вызывали вращающий момент, который можно измерить и связать с проводимостью. Лэсс обнаружил, что момент оставался практически постоянным по мере вращения сферического монокристалла, в то время как Холройд и Датарс получили ярко выраженную осциллирующую зависимость, плавно меняющую вид с изменением угла. Оверхаузер, убежденный в существовании волн зарядовой плотности, принял это как подтверждение своей правоты; но постоянный результат Ласса был, однако, досаден. Некоторые считали, что защищенные масляным слоем калиевые кристаллы приводили к осцилляциям, а незащищенные — нет, и поэтому в металле индуцировался фазовый переход, обусловленный напряжением из-за разности коэффициентов сжатия металла и масла. Это был аргумент в пользу объяснения Оверхаузера, однако Вильсон и де Подеста предположили, что все дело не в волнах зарядовой плотности, а в изменении симметрии кристалла. Остроумные аргументы Оверхаузера в пользу

своей теории оказались не вполне убедительными, и вопрос остается открытым.

Поздние измерения Коултера и Дэйтарса привели к еще большей путанице. При напряжениях, приближающихся к 8 Тл, гладкие осцилляции Холройда и Дэйтарса становились крайне интенсивными, испытывая множество практически случайных видоизменений за один оборот. Интерпретация Оверхаузера в рамках модели с множеством доменов различных ориентаций плотности заряда была подвергнута сомнению Эллиотом и др., заметившими, что эксперимент Колтера и Дэйтарса имел отличную от эксперимента Холройда и Дэйтарса схему установки. Использование более сильных полей побудило их выбрать вертикальное направление \mathbf{H} и вращать держащийся на осях образец вокруг горизонтальной оси, вместо того, чтобы вращать кристалл вокруг вертикальной оси в горизонтальном поле. Их устраивало малое трение в осях, однако Эллиот и др. заметили, что очень сильный эффект Холла в сильных полях рождает пару сил, которая могла бы быть не зафиксирована в этом эксперименте, но могла бы воздействовать на образец, пытаясь сбросить его с опоры. Поскольку этот эффект в 100 раз сильнее измеряемого, они предположили, что результирующее трение могло привести к неправильному поведению. Эта статья не вызвала ответного отклика Оверхаузера или Датарса и его группы, возможно, потому, что открытие высокотемпературной сверхпроводимости привело к смене их главного научного интереса. А значит, поведение калия остается задачей, у которой нет общепризнанного решения. Лично у меня нет оснований для изменения своей точки зрения, которую я изложил до того, как появились эти последние идеи.

В заключение можно сказать, что выпущенный Капицей заяц успел несколько раз полинять, но все еще жив и бежит. Только вот магниторезистивный эффект все еще не до конца понят.

Список литературы

Pippard A B *Magnetoresistance in metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989)

Перевел А.В. Субботин

Научное консультирование по переводу Ю.П. Гайдуков

PACS numbers: 71.28; 75.30.M; 74.70.T

Эксперименты в сильных магнитных полях и при высоких давлениях

Г.Г. Лонзарич

Работы Капицы и его коллеги Ландау привели к прояснению понятия элементарного возбуждения, понятия, которое сыграло ключевую роль в описании конденсированного состояния при низких температурах. Низколежащие возбужденные состояния взаимодействующих фермионов, например, соответствуют квантам, которые описываются как фермиевские квазичастицы и дырки, рожденные из вакуума с конечным импульсом на (или вблизи) поверхности Ферми. В отличие от представлений ранних одночастичных теорий эти квазичастицы не

полностью свободны и обнаруживают остаточное взаимодействие, существование которого существенно для последовательного описания. Когда взаимодействие этих квазичастиц близкодействующее и имеет характер отталкивания, оно неэффективно для переходов из состояний с различными импульсами на ферми-поверхности вблизи абсолютного нуля. В этом случае квазичастичные возбуждения имеют большое время жизни и соответствуют хорошо определенному соотношению между энергией и импульсом для нормальных мод. При низких температурах энтропия того же порядка, что и у ферми-газа, но в противоположность модели невзаимодействующих квазичастиц, тепловая энергия не равна сумме отдельных квазичастичных энергий [1]. Потеря аддитивности, которая может быть объяснена недифракционным характером процессов рассеяния (т.е. таких, которые учитывают процессы обмена, но не перенос импульса) — существенное свойство теории, приводящее к детальному описанию нормальных уровней жидкого ^3He и электронов в металлах.

Предположение, что рассеяние недифракционно, очевидно, неправильно, когда остаточное взаимодействие — притяжение. В этом случае квазичастицы могут образовывать связанные состояния и конденсироваться в сверхпроводящие или магнитно-упорядоченные состояния. Есть другая, более тонкая причина неправильности привычного описания. Подавление реальных процессов рассеяния по принципу Паули основывается на предположении, что взаимодействие носит характер отталкивания и не сингулярно для переходов на ферми-поверхности. Второе предположение меняет магнитную силу Лоренца между двигающимися зарядами, которая, в отличие от кулоновского потенциала, остается действующей даже в плазме. Такие же, но более важные компоненты остаточного взаимодействия могут возникать не из-за поперечных фотонов (как для силы Лоренца), а из-за сильных флуктуаций параметра порядка вблизи фазового перехода, т.е. вблизи порога магнитных или сверхпроводящих состояний. Ниже обсуждаются системы, в которых сингулярное взаимодействие может играть важную роль, такие как соединения с тяжелыми фермионами, содержащие $4f$ - и $5f$ -элементы, почти магнитные d -переходные металлы, и сверхпроводники с окисью меди.

Свойства низколежащих возбуждений заряженных ферми-систем могут быть исследованы с помощью техники, основанной на квантовании Ландау орбитального движения носителей заряда, созданной последователями Капицы в Мондовской лаборатории Д. Шёнбергом и А.Б. Пиппардом [2, 3]. Осцилляции магнитных и электронных свойств в магнитном поле дают бесценную информацию о природе не только простых металлов, где квазичастицы почти неотличимы от электронов, не обремененных взаимодействиями, но и в более сложных случаях, когда квазичастицы являются составными образованиями с массами, более чем в два раза превышающими по величине массу обычных электронов, и с остаточным взаимодействием, имеющим сложную форму.

Исследование осцилляционных эффектов, связанных с тяжелыми квазичастицами на наибольших листах ферми-поверхности, требует изготовления сложных материалов с длиной пробега носителей порядка $10^3 - 10^4$ Å, использования маломощнейшей техники, сильных

магнитных полей и сверхнизких температур. Новое экспериментальное оборудование для изучения этих материалов основано на сверхпроводящем комплексе, созданном в сотрудничестве с Oxford Instruments Ltd при поддержке SERC, который позволяет развить постоянное магнитное поле напряженностью до 18,4 Тл при глубине модуляции в месте расположения образца до 1 Тл/с. Комплекс также может создавать поле до 6,5 Тл над основным магнитом для адиабатического размагничивания меди до 1 мК, и протяженную область слабого поля для чувствительной электроники и в камере растворения рефрижератора [4]. Низкий уровень шума установки позволяет использовать СКВИД и другие сверхчувствительные низкотемпературные детекторы. Наиболее универсальный детектор, созданный С.Р. Джулианом, располагается между искусно изготовленными тороидальными трансформаторами и может при нормальных условиях обнаруживать сигналы ниже 10^{-12} В. СКВИД-детектор, созданный И.Р. Уолкером для исследований в сильных магнитных полях, увеличивает чувствительность до 10^{-13} или 10^{-14} В. Кроме того, имеются ячейки для измерений при гидростатических давлениях до 25 кбар и алмазные наковальни с сильфонным приводом, созданные Р.К. Хаселвимерром и С.В. Брауном, которые обеспечивают регулируемые давления вплоть до 150 кбар при низких температурах.

Измерения осцилляций сопротивления и магнитной восприимчивости при низких температурах и при высоких магнитных полях позволили нам построить детальную модель нормального тяжело-фермионного состояния для соединений урана и церия, таких как UPt_3 и CeRu_2Si_2 [5]. Ключевая находка, основанная на исследовании больших основных листов ферми-поверхности квазичастиц, состоит в том, что элементарные возбуждения могут рассматриваться как заряженные фермионы, свойства которых полностью определяют тепловые явления при низких температурах в основном состоянии. Массы этих квазичастиц на два порядка больше массы свободных электронов и являются наибольшими прямо измеренными массами для всех систем, исследованных к настоящему времени.

Эти результаты позволяют исключить предположение, что элементарные возбуждения состоят из нейтральных и заряженных фермионов. Почти локализованные электроны на f -уровнях урана и церия, соответствующие в этом описании нейтральным частицам, не могут, на самом деле, проявлять себя независимо. Слабо взаимодействуя с электронами проводимости они образуют единый класс составных заряженных возбуждений. Ферми-объем этих составных квазичастиц соответствует простому описанию, в котором f -уровни трактуются как полностью зонные. f -электроны (по крайней мере, в рассмотренных выше системах в нормальном состоянии) играют двойную роль: образуют как хорошо определенные локальные моменты, так и ферми-поверхность в когерентном квантовом состоянии.

Вблизи порога электронной неустойчивости при низких температурах описание в терминах хорошо определенных ферми-возбуждений (с температурно-независимыми свойствами) может не работать. Пример такого поведения можно найти при давлении, близком к критическому p_c , которое разделяет магнитно-упорядоченное состояние от неупорядоченного для кубического d -металла MnSi . При достижении критического давления

ρ_c сопротивление, пропорциональное квадрату температуры в режиме ферми-жидкости (когда электрон-фононное рассеяние несущественно), ведет себя так, как предписывает теория маргинальной ферми-жидкости [6]. Это новое состояние характеризуется законом $T \ln(T^*/T)$ в отличие от обычного линейного поведения теплоемкости при низких температурах. На языке квазичастиц, свойства "фермионов" должны иметь сильную температурную зависимость и их "массы", которые не ограничены, будут не определены на уровне Ферми при $T \rightarrow 0$. Неприменимость модели Ландау для этих случаев объясняется наличием дальнедействующей части эффективного квазичастичного взаимодействия вблизи фазового перехода при низких температурах. Аналогичное нарушение, но при температурах существенно ниже, должно наблюдаться из-за влияния дальнедействующей силы Лоренца, что было отмечено Холстейном в его теоретическом анализе явления магнитного взаимодействия Шёнберга и (косвенно) аномального скин-эффекта Пиппарда [7].

Другой проблемой, связанной с предыдущей, является переход из сверхпроводящей в нормальную фазу в зависимости от давления, состава или магнитного поля. Измерения последнего или температурной зависимости сверхпроводящего перехода показали, что поведение систем с низкой размерностью сильно отличается от предсказаний модели БКШ. Верхнее критическое поле, например в купратном сверхпроводнике $Tl_2Ba_2CuO_6$, резко растет с положительной кривизной при падении температуры без признаков насыщения при температурах порядка милликельвина [8]. Насыщение, ожидаемое в рамках стандартной модели ниже кроссовера при средних температурах (не намного ниже T_c , где длина корреляции Гинзбурга–Ландау становится меньше длины когерентности), не наблюдается. Правильная интерпретация температурной зависимости поля перехода и даже его точная связь с тем, что обычно определяется как верхнее критическое поле, остается нерешенной проблемой.

Описанные выше исследования, а также другие, связанные с ними, определяют ограничения, налагаемые на понятие элементарных возбуждений, которое являлось краеугольным камнем теории конденсированного состояния вещества в течение долгого времени. Эта концепция остается полезной даже тогда, когда квазичастицы сильно отличаются от свободных электронов. Но она может нарушаться при наличии дальнедействующих эффективных взаимодействий в вышеназванных веществах и даже в обычных металлах в основном состоянии при очень низких температурах. Описание таких систем в простых понятиях, видимо, требует введения новых теоретических подходов.

Список литературы

1. Landau L D *Collected Papers* (Gordon & Breach and Pergamon Press, 1965) Chs 90, 91
2. Shoenberg D *Magnetic Oscillations in Metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1984)
3. Pippard A B *Magnetoresistance in Metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989)
4. Julian S R, Brown S V, Walker I R and Lonzarich G G, *to be published*
5. Julian S R, Tautz F S, McMullan G J and Lonzarich G G *Physica B* **199–200** 63 (1994); for $CeRu_2Si_2$ see also Onuki Y, Albessard A K, Aoki H, Uji S (*ibid.*)

6. Pfeleiderer C, McMullan G J, Lonzarich G G *Physica B* **199–200** 634 (1994)
7. Holstein T, Norton R E, Pincus P *Phys. Rev. B* **8** 2647 (1973)
8. Mackenzie A P, Julian S R, Lonzarich G G et al., *Phys. Rev. Lett.* **71** 1238 (1993)

Перевел А. Наргизян

Научные консультации по переводу — А.Н. Васильев

PACS numbers: 07.20.M

Капица и криогенная технология

В.Ф. Кастл

Введение

Дается обзор научных достижений Капицы в области криогенной технологии (в особенности, ожижения гелия и воздуха, турбодетандеров) и обзор ее достижений после его деятельности. Вряд ли возможно, в таком коротком обзоре воздать должное работе Капицы в этой области, однако в нем освещены важность его пионерских работ и достижений, давших другим ориентир для исследований, который и привел криогенную технологию к ее сегодняшнему состоянию.

Сжижение гелия

Главный интерес Капицы к низкотемпературной физике был вызван необходимостью получения низких температур, в частности, в связи с его исследованиями в Кембридже в области сильных магнитных полей [1, 2]. Он решил использовать более эффективный способ ожижения гелия, чем только вентильное или адиабатическое расширение: способ, основанный на процессе, происходящем под действием внешних сил. Вероятно, он предпочел бы турбодетандер, однако его оценочный размер, если исходить из потребностей Капицы в жидком гелии, не оставлял надежды на практическую реализацию конструкции, поэтому была разработана поршневая машина. При низких температурах возникают сложности с выбором смазки для цилиндра, способной сохранять свои свойства при сильном охлаждении, поэтому Капица разработал поршневую турбодетандерную установку с газовой смазкой. В этой установке была тщательно выверена соосность поршня, точность конструкции цилиндра и притирка деталей, требуемая для предотвращения значительной утечки газа [3, 4]. В ожижителе использовалось сначала предохлаждение жидким азотом, а затем сжижение в детандерной установке. Производительность системы составляла 5 литров в час. Позднее для нужд небольших лабораторий в США было пущено в производство похожее устройство, известное под названием ожижающей установки Коллинза. Дальнейшим усовершенствованием Капицы явилось создание ожижающей установки производительностью 18 л/ч, в которой использовался каскад из двух детандерных устройств и не было предохлаждения жидким азотом или воздухом [5].

Еще позже были разработаны установки для ожижения гелия, пригодные для более широкого использования. Одной из них была установка, созданная в ВОС¹ для нужд Национального Института ядерных исследований

¹ British Oxygen Company.