

По случаю столетия со дня рождения Капицы мы с благодарностью чествуем его память.

Перевод части II доклада — *А.В. Субботин*
Консультирование по переводу — *П.Е. Рубинин*

PACS numbers: 72.15.G

Магниторезистивный эффект — наследие Капицы

А.Б. Пипшард

Исследования Капицы магниторезистивного эффекта в металлах опубликованы в двух больших статьях, вышедших по завершению его работы с сильными магнитными полями. В них была поставлена задача, почти не исследованная ранее в силу того, что ни у кого не было условий, обеспечивающих и генерацию сильных магнитных полей, и поддержание низких температур. На самом деле и работа Капицы была серьезно осложнена тем, что у него не было возможности охладить образцы ниже температуры жидкого воздуха, так что из всех имеющихся металлов лишь у висмута наблюдался большой эффект — увеличение сопротивления примерно в 50 раз при 300 кГс (30 Тл). Это было в 1928 г., за два года до открытия осцилляций Шубникова–де Гааза, которые Капица вряд ли мог наблюдать в силу их слабости при температурах порядка температуры жидкого воздуха.

Наблюдаемое изменение сопротивления в висмуте, по мнению Капицы, вначале вело себя как H^2 , а затем, с увеличением поля H , переходило в линейный рост. Все последующие интерпретации этого эффекта на других металлах были инициированы этим открытием, так что линейную форму зависимости стали называть законом Капицы. Он не выдержал испытания временем, но есть много примеров линейного магниторезистивного эффекта, которые дают основание сделать его центральным предметом настоящего обсуждения.

Сначала мы спросим себя, не обманывался ли Капица относительно поведения висмута. Очевидно, что опубликованные им кривые вполне убедительны, и для окончательной проверки достаточно лишь нескольких измерений. Теоретически, скорее всего следовало бы ожидать квадратичного роста сопротивления с ростом поля H , однако эта догадка не подтверждается. При температурах порядка температуры жидкого водорода Герритсен и др. обнаружили нелинейное поведение, определенно менее сильное, чем квадратичное, хотя один из образцов при 14 К хорошо соответствовал закону Капицы. Позднее, работая с температурами порядка температуры жидкого гелия, Алерс и Уэббер наблюдали наложение осцилляций Шубникова–де Гааза на близкое к линейному изменение сопротивления. Поэтому, хотя и не существует адекватного объяснения такого поведения, нет поводов усомниться в результатах Капицы.

Говоря о других материалах, мы видим, что Капица измерял магниторезистивный эффект в поперечном поле на поликристаллических проволоках всех металлов, которые он смог найти и достать. При температурах жидкого воздуха эффект был слаб, например 45%-ный рост сопротивления при 300 кГс для меди в жидком азоте.

Нужно помнить, что в силу наличия в модели свободных электронов металл не должен изменять сопротивление в магнитном поле, и что эффект в меди есть следствие контактов поверхности Ферми с зонной границей (эта мысль не могла быть принята во внимание Капицей, работавшим во времена, когда квантовая теория Блоха об электронах в металлах была еще молода и оценена очень немногими). Интересно, что квадратичная зависимость в меди уступает место линейной, когда $\omega_c\tau$ все еще лишь около 1/3, и поле порядка 100 кГс способно продвинуть электроны между столкновениями примерно на 1/20 расстояния по поверхности Ферми. Для объяснения достаточно предположить, что по крайней мере в некоторых областях поверхности Ферми существуют довольно резкие изменения направления; действительно, электроны, проходящие через шейку поверхности Ферми, резко изменяют направления, что и может рассматриваться как выражение магниторезистивного эффекта. Поверхности Ферми очень многих металлов имеют достаточно острые участки, так что неудивительно, что в слабых полях квадратичное поведение теряется, а значение $\omega_c\tau$ все еще мало.

Можно лишь удивляться, сколь точно Капице удалось подогнать эксперимент под свою (квадратичный + линейный закон) модель. В какой-то степени это можно объяснить весьма ограниченным диапазоном изменения сопротивления — и можно лишь благодарить Капицу за то, что ему удалось получить надежные результаты, используя импульсное поле, способное легко исказить картину, индуцируя перепады напряжений на контактах. Однако более поздние исследования, при работе с более низкими температурами, и, следовательно, с гораздо большими $\omega_c\tau$, обычно не подтверждали его интерпретации. Поведение в сильных полях прекрасно согласуется с теорией Лифшица и др.: удельное сопротивление либо должно расти квадратично, либо выходить на насыщение. Условия каждого варианта поведения, вообще говоря, достаточно сложны, и мы не будем их рассматривать. Нам сейчас интересен тот факт, что в этой теории нет места линейному изменению удельного сопротивления, которое обычно наблюдается. Отметим несколько случаев:

1) **Алюминий**. Удельное сопротивление проявляет явно выраженную тенденцию к переходу в насыщение, однако при сильных полях остается небольшой дрейф вверх, более заметный при 20 К, чем при 4 К.

2) **Медь** (и, возможно, золото). В поликристаллических проволоках после области квадратичной зависимости устанавливается режим, в котором удельное сопротивление почти пропорционально напряженности поля.

3) **Калий**. На первый взгляд, в этом почти идеальном металле, имеющем почти сферическую поверхность Ферми, не должен проявляться магниторезистивный эффект. На самом деле, в нем наблюдается линейный рост, невозпроизводимый при переходе от одного образца к другому. Последние измерения с помощью более изощренных методов окончательно запутали дело.

Обсудим вкратце эти три случая (в [1] можно найти более детальное обсуждение). С самого начала стоит отметить главное: электрический ток более эффективно отклоняется газовыми включениями и другими объемными дефектами в сильных полях, что может приводить к линейному росту сопротивления, однако маловероятно, что в большинстве образцов количество полос-

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 фононное 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 держась 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 В *Magnetoresistance in metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989)

Перевел А.В. Субботин

Научное консультирование по переводу Ю.П. Гайдукон

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