

УДК 539.2

Б. И. ВЕРКИН, С. А. ГРЕДЕСКУЛ, Л. А. ПАСТУР, Ю. А. ФРЕЙМАН

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭФФЕКТА ШУБНИКОВА — ДЕ ГААЗА

Наука вопреки мнению непосвященных редко развивается по прямому логическому пути. На самом деле каждый ее шаг вперед (а иногда и назад) — очень часто событие глубоко личное, в котором главную роль играют человеческие характеры и национальные традиции.

Дж. Д. Уотсон «Двойная спираль»

В 1930 г. в 207- и 210-м выпусках «Сообщений физической лаборатории Лейденского университета» был опубликован цикл работ В. Л. Шубникова и В. де Гааза [1–6], в которых сообщалось об обнаружении нового явления — осцилляций электросопротивления проводников в магнитном поле, впоследствии получившего название эффекта Шубникова—де Гааза, или осцилляций ШдГ. Эффект Шубникова — де Гааза явился первым макроскопическим квантовым осцилляционным эффектом. Его открытием, по существу, был заложен фундамент современной физики электронных свойств проводников — области исследований, которая впоследствии получила название «фермиология».

Побудительным мотивом написания данной статьи явилась несколько парадоксальная ситуация: хотя сам эффект сыграл и продолжает играть значительную роль в развитии физики твердого тела и тем самым занимает достойное место в истории науки, история открытия самого эффекта, по сути, не известна. В такой ситуации отдельные высказывания в обзорах и монографиях, если их трактовать как изложение истории вопроса, могут быть истолкованы превратно. Например, фраза из прекрасного обзора Н. Б. Брандта и С. М. Чудинова, посвященного эффекту Шубникова—де Гааза: «Эффект ШдГ оказался первым, наблюдаемым экспериментально, проявлением диамагнитного (ландауского) квантования энергии электронов в твердом теле...» [7] вполне может быть воспринята как утверждение, что эффект ШдГ был предсказан Ландау в известной работе о диамагнетизме металлов, опубликованной в том же 1930 г. [8].

Неудивительно поэтому, что многие физики, даже те, которые специализируются по исследованиям «фермиологии», историческую последовательность событий представляют в виде цепочки: предсказание Ландау — эффект де Гааза — ван Альфена — эффект ШдГ.

Между тем это не так, и приоритет принадлежит Шубникову и де Гаазу: работа де Гааза и ван Альфена [9], в которой были обнаружены осцилляции магнитной восприимчивости, впоследствии названные эффектом де Гааза — ван Альфена (дГвА), не являлась независимой от работ Л. В. Шубникова и В. де Гааза, а роль Л. В. Шубникова в открытии этого фундаментального физического явления весьма существенна и во многом определяющая.

История открытия эффекта ШдГ полна драматизма. На проблеме магнитосопротивления висмута пересеклись научные интересы и пристрастия двух наших крупнейших экспериментаторов — Льва Васильевича Шубникова и Петра Леонидовича Капицы. Более того, речь шла о различии подходов двух крупнейших физических школ — Лейдена и Кембриджа. Непростой была и судьба открытия после публикации соответ-

ствующих работ. На чисто научную сторону проблемы наложились неблагоприятные внешние обстоятельства и драматичность личных судеб авторов открытия.

Авторами открытия осцилляций электросопротивления проводников в магнитном поле стали Лев Васильевич Шубников — молодой исследователь из Советской России, работавший в Лейденской лаборатории как стипендиат Рокфеллеровского фонда, — и содиректор Лейденской лаборатории Вандер Иоганнес де Гааз. Совместные исследования связали двух людей, различающихся возрастом, характером, житейским и научным опытом и положением в научном мире.

Отметим одно весьма выразительное обстоятельство: во всех работах, посвященных открытию и изучению нового явления, первым в списке авторов указан не руководитель лаборатории В. де Гааз, а, в нарушение традиций, восходящих еще к Г. Камерлинг-Оннесу, и в нарушение алфавитного порядка, — Л. В. Шубников. Именно в таком сочетании имен авторов эффект вошел в литературу.

К моменту приезда в Лейден (1926 г.) Л. В. Шубникову исполнилось 25 лет. За плечами три года учебы в Петроградском университете и параллельно работа лаборантом в ГОИ, более чем годичные скитания в Германии, работа лаборантом в Физтехе, окончание учебы на физико-механическом факультете в Политехническом институте. Не совсем новичок он и в науке. Одновременно с учебой он увлеченно занимался исследовательской или близкой к ней технической работой — в университетских лабораториях, на кварцевом заводе во время вынужденного пребывания в Германии, в лаборатории И. В. Обреимова в Физтехе во время учебы в ЛПИ (подробные биографические сведения о Л. В. Шубникове см в [10]).

Уже в 1924 г. в журнале «Zeitschrift für Physik» вышла его первая научная работа, выполненная совместно с И. В. Обреимовым, в которой авторы, существенно модифицировав известный метод Тамманна, предложили простой и надежный способ выращивания крупных совершенных металлических монокристаллов заданной формы. Метод Обреимова — Шубникова получил широкое распространение и развитие; большинство исследований физических и механических свойств монокристаллов выполнено на образцах, выращенных этим методом. К сожалению, в отечественной литературе, по-видимому, под влиянием американских и английских публикаций данный метод называют методом Бриджмена — Стокбаргера, но в большинстве западноевропейских публикаций метод носит имена истинных первооткрывателей — Тамманна — Обреимова — Шубникова.

Вторая работа, также выполненная в соавторстве с И. В. Обреимовым и опубликованная в «Zeitschrift für Physik», содержала результаты дипломной работы Л. В. Шубникова. В этой работе, также получившей известность, был предложен оптический метод определения остаточных напряжений в кристаллах.

Уже в этих первых работах проявилась столь характерная для научного стиля Л. В. Шубникова скрупулезность в обосновании и проверке выводов работы. Так, в первой работе монокристалличность выращенных образцов проверялась тремя различными методами: по характеру скола, виду плоскостей скольжения и рентгеновским методом.

Таким образом, уже к окончанию ЛПИ Шубников имел репутацию талантливого молодого физика-экспериментатора, и неудивительно, что, когда руководитель Лейденской лаборатории В. де Гааз обратился к А. Ф. Иоффе с просьбой прислать специалиста по росту кристаллов для проведения низкотемпературных исследований висмута, выбор пал на Л. В. Шубникова. Осенью 1926 г. он выехал в Германию и после получения визы (в то время у СССР с Голландией не было дипломатических отношений) прибыл в Голландию для работы в лаборатории низких температур.

Лейденская лаборатория произвела на Л. В. Шубникова большое впечатление. В то время Лейден был одним из крупнейших центров ми-

ровой физики. В нем существовал первоклассный университет, в котором кафедру теоретической физики занимал Г. А. Лоренц, затем П. Эренфест. В Лейдене находилась первая в мире лаборатория физики низких температур, созданная Г. Камерлинг-Оннесом. Помимо наиболее широко известных достижений — охлаждения гелия в 1908 г. и открытия сверхпроводимости в 1911 г.— Г. Камерлинг-Оннес разработал и последовательно осуществил программу изучения электрических, тепловых и магнитных свойств веществ при низких температурах. Девизом лаборатории были слова, которые Камерлинг-Оннес вынес в заглавие своей инаугуральной речи,— «Door meten — tot weten» («Через измерение к знанию»), и не будет преувеличением сказать, что в лаборатории царил культ точных количественных измерений. По свидетельству О. Н. Трапезниковой (вдовы Л. В. Шубникова), эта особенность Лейденской лаборатории произвела на них особенно сильное впечатление: «Когда мы попали в Лейден и увидели, как они проводят измерения, мы были потрясены — мы ничего не умели мерить». Позже это первое впечатление переросло у Л. В. Шубникова в убеждение, что умеют мерить только в Лейдене.

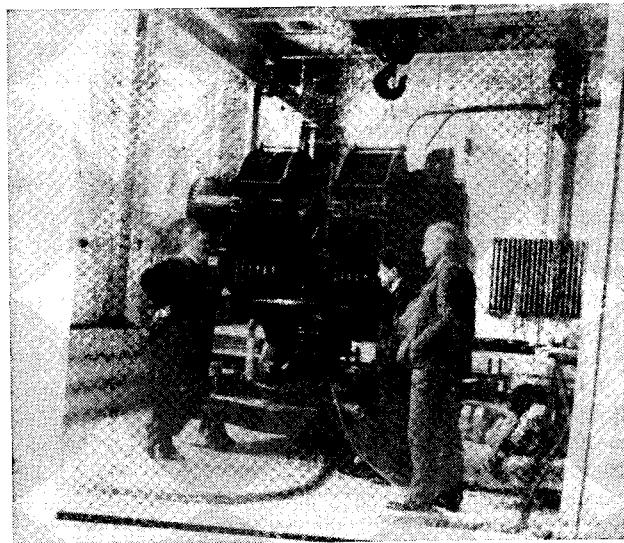
Следует подчеркнуть, что в то время такое отношение к точным количественным измерениям было далеко не общепринятым. Многие крупнейшие физики придерживались совершенно иной точки зрения на эту проблему. В частности, Д. Томсон, сын Дж. Дж. Томсона — директора Кавендишской лаборатории, ограждая принятую в Кембридже точку зрения, в книге «Дух науки», как будто прямо полемизируя с Лейденом, пишет: «Для многих людей наука — это измерения, выполняемые со скрупулезной точностью. Такие измерения играют важную роль в разработке открытия, но очень редко ведут к нему». Несколько дальше он снова возвращается к этой проблеме: «Было время, когда количественная сторона физики переоценивалась. Измерения и последующее использование математики — чрезвычайно мощные средства, но решающие эксперименты носят, по существу, качественный характер».

В 1924 г. после ухода Г. Камерлинг-Оннеса в отставку руководство Лейденской лаборатории перешло к его ученикам — В. Кеезому и В. де Гаазу. В отделении В. Кеезома проводились исследования по физике гелия, криогенных жидкостей и отвердевших газов, а в отделении В. де Гааза занимались изучением электрических и магнитных свойств веществ.

Во время работы над магнитосопротивлением висмута В. де Гааз отметил свое пятидесятилетие. Он являлся автором многочисленных работ по различным вопросам физики низких температур и находился в те годы, пожалуй, в зените своей научной карьеры. После окончания Лейденского университета с 1905 по 1911 гг. В. де Гааз работал ассистентом Г. Камерлинг-Оннеса. В 1912 г. де Гааз защитил диссертацию на тему «Измерения сжимаемости водорода и, в частности, паров ниже точки кипения», по замечанию Х. Казимира [11], типичное произведение стиля «Door meten — tot weten». После защиты диссертации и женитьбы на дочери Г. А. Лоренца Гертруде Луберте, одаренном теоретике, де Гааз переехал в Берлин, где работал сначала у профессора Дю Буа — специалиста по магнетизму, а затем в качестве научного сотрудника — в Берлинском физико-техническом институте, где совместно с А. Эйнштейном исследовал явление, впоследствии названное эффектом Эйнштейна — де Гааза. В 1917 г. он становится профессором в Дельфте, в 1922 г. переезжает в Гронинген, а в 1924 г. возвращается в Лейден.

Несмотря на лейденские традиции, систематические количественные измерения были не очень во вкусе де Гааза. Обладая замечательной интуицией, он интересовался прежде всего новыми яркими явлениями. Эксперименты, задумываемые де Гаазом, обычно были связаны с фундаментальными проблемами. Так, в начале 20-х годов его долгое время занимал вопрос, существует ли так называемый дефицит заряда: в точности ли равны заряды электрона и протона. Он поднял этот вопрос на третьем Соль-

веевском конгрессе в 1921 г. и позднее для решения этой проблемы предпринял специальные экспериментальные исследования. Как известно, результаты этих экспериментов, впоследствии повторенных другими исследователями с более высокой точностью, отрицательные. К кругу фундаментальных задач де Гааз относил и проблему магнитосопротивления висмута. О том, какую важность он придавал этой проблеме, свидетельствует тот факт, что именно задача об исследовании магнитосопротивления висмута должна была стать первым исследованием, проводимым на новом большом магните Лейденской криогенной лаборатории, позволившем получать постоянные магнитные поля до 30 кГс (рисунок).



В. И. де Гааз, П. С. Эренфест, К. Кроммелин у большого магнита Лейденской лаборатории.

Интерес де Гааза к висмуту не случаен. Несмотря на интенсивные исследования во многих лабораториях мира, поведение висмута оставалось загадочным, расхождение результатов различных авторов — интересующим. Висмут наряду с изоструктурной сурьмой относится к группе веществ, которые обнаруживают чрезвычайно сильное изменение сопротивления в магнитном поле и очень сильный диамagnetизм. Для них характерны отрицательный скачок объема и сопротивления при плавлении. Наиболее заметны все эти явления в висмуте. Известны и другие аномалии его свойств. Так, П. Кюри еще в 1895 г. наблюдал исчезновение диамагнитных свойств не при температуре плавления, как это обычно бывает, а несколько ниже ее. В этой же области П. Бриджмен обнаружил изменение знака температурного коэффициента сопротивления. Ряд авторов предполагал существование двух кристаллических модификаций висмута — значительно расходились данные разных авторов об удельном сопротивлении висмута при комнатных температурах.

К тому времени, когда В. де Гааз решил заняться исследованиями поведения висмута в магнитном поле, уже было известно, что его магнитосопротивление растет с полем гораздо сильнее, чем у других металлов, причем у монокристаллов это явление зависит от ориентации поля по отношению к кристаллографическим осям. Было известно также, что сопротивление висмута в магнитном поле быстро возрастает с понижением температуры. Еще в 1899 г. Дю Буа и Уиллс обнаружили, что в магнитном поле 37,5 кГс при 93 К сопротивление висмута по сравнению с нулевым полем возросло в 230 раз, в то время как при комнатных температурах

$R_{\text{в}}/R_0 \sim 2$. Де Гааз, проработавший несколько лет у Дю Буа и, по-видимому, в то время и познакомившийся с этой проблемой, хотел распространить исследования магнитосопротивления висмута до водородных и гелиевых температур. Возможно, стимулирующее влияние оказал и интерес П. Эренфеста, который посвятил проблеме диамагнетизма висмута ряд работ. Этую задачу В. де Гааз и поставил перед Л. В. Шубниковым.

Приступая к исследованиям, В. де Гааз и Л. В. Шубников вряд ли могли предполагать, что к задаче о магнитосопротивлении висмута большой интерес проявил и П. Л. Капица. Он приступил к этим исследованиям чуть позднее, в начале 1927 г., после завершения работы над установкой для создания сверхсильных магнитных полей. Эта установка являлась замечательным достижением техники физического эксперимента; она позволяла получать импульсные магнитные поля до 300 кГс. Это давало возможность П. Л. Капице провести измерения магнитосопротивления в рекордных магнитных полях. В качестве первого объекта Капица выбрал висмут.

В этой «висмутовой лихорадке» каждая из сторон имела свои преимущества: Лейден — низкие температуры, Кембридж — сильные магнитные поля. Лейден располагал на порядок более слабым магнитным полем, Кембридж — лишь азотным диапазоном температур. После завершения исследований стало ясно, что для данной задачи более важным были низкие температуры.

Через год П. Л. Капица завершил цикл исследований магнитосопротивления висмута и в конце апреля 1928 г. направил в печать три большие статьи под общим названием «Исследование удельного сопротивления кристаллов висмута в сильных магнитных полях, а также некоторые сопутствующие проблемы». Работа была представлена Э. Резерфордом и напечатана в журнале «Труды Королевского общества» [12]. В этой очень большой по объему работе (85 страниц журнального текста) Капица изложил результаты своих исследований и предпринял попытку дать объяснение всей совокупности аномалий свойств этого металла.

П. Л. Капица выдвинул остроумную гипотезу о непременном существовании в монокристаллах висмута своеобразных дефектов — крэков* (трещин), так что, в принципе, невозможно изготовить хороший кристалл висмута.

Согласно этой модели, невоспроизводимость результатов обусловлена различным количеством крэков в кристалле, которое зависит от условий его выращивания.

Чтобы объяснить причину возникновения крэков, П. Л. Капица выдвинул гипотезу, «заключающуюся в том, что существуют две кристаллические модификации висмута. Одна из них в настоящее время не известна, однако, видимо, является кубической и переходит в обычную ромбоэдрическую модификацию при температуре несколько ниже плавления. Этот переход сопровождается изменением формы, чем объясняется образование крэков» [12].

Модель крэков позволила качественно объяснить многие аномальные свойства висмута. Для проверки модели П. Л. Капицей были предприняты дополнительные исследования, и она их выдержала. Не выдержала модель крэков лишь проверки низкими температурами, проведенной в Лейдене, о чём подробнее речь пойдет ниже. Однако эти идеи

* Мы предпочитаем не использовать русский эквивалент («трещина»), поскольку при этом не имелось в виду наличие в кристалле реальных трещин — нарушенной сплошности образца. Модель крэков предполагала, что в кристаллической решётке атомы, расположенные в совершенных плоскостях спайности, смешены из своих равновесных положений и силы сцепления между соседними слоями ослаблены. В результате кристалл легко разрушается вдоль этих плоскостей. Если кристаллы подвергнуть нагрузке, то эти слои легко разрушаются, и в кристалле образуются реальные трещины.

можно рассматривать как одну из зачаточных форм дислокационной теории в физике прочности твердого тела, сформулированной в явной форме и превратившейся в стройную физическую картину уже в послевоенные годы.

Появление работы П. Л. Капицы явились для Л. В. Шубникова и В. де Гааза неприятным сюрпризом, поскольку уже к этому времени они имели собственные результаты, и эти результаты радикально расходились с данными Капицы. В отличие от относительно простой кривой магнитосопротивления, полученной в Кембридже и состоящей из параболического участка при малых полях, который переходит в линейный с ростом поля (закон Капицы), лейденские кривые выглядели намного сложнее с явно выраженными признаками немонотонности.

Расходились не только экспериментальные результаты, но и их трактовка. Вот как об этом писал впоследствии Л. В. Шубников [13]: «Когда появилась работа Капицы, мы имели уже много хороших кристаллов висмута и результаты измерений указывали нам на другую возможность объяснения явлений неповторяемости, чем данные Капицы». По свидетельству О. Н. Трапезниковой, работа П. Л. Капицы вызвала критику не только со стороны де Гааза и Л. В. Шубникова, непосредственно занятых этой проблемой, но и других ведущих сотрудников Лейденской лаборатории.

Наличие радикальных расхождений с результатами П. Л. Капицы привело Л. В. Шубникова к необходимости проведения дополнительных контрольных экспериментов. Фактически все исследования П. Л. Капицы были заново выполнены на кристаллах, выращенных в Лейдене. «Наши первые кристаллы мы употребили на то, чтобы проконтролировать, являются ли результаты Капицы, которые нам казались столь невероятными, также справедливыми и для наших кристаллов или нет» — писал Л. В. Шубников [13]. Реализация этой программы потребовала значительного времени и сильно отсрочила публикацию работ Л. В. Шубникова и де Гааза. Это обстоятельство оставило след и в тексте статей Шубникова и де Гааза: у современного читателя возникает ощущение даже некоторой избыточности аргументаций, вспомогательных исследований, проверок и т. д.

Перейдем к описанию исследований, выполненных в Лейдене. Уже первые эксперименты с монокристаллами висмута показали, что магнитосопротивление очень чувствительно к ориентации кристалла. Таким образом, стала ясна необходимость использования монокристаллов с заданной геометрией и ориентацией осей. Задача получения таких монокристаллов была решена способом, чрезвычайно удачно сочетающим достоинства методов Обреимова—Шубникова и Капицы. Однако основные усилия Шубникова и де Гааз направили на установление причин невоспроизводимости результатов и ряда других аномалий висмута.

Наиболее естественной причиной указанной невоспроизводимости следовало считать недостаточное совершенство образцов, наличие в них значительного количества примесей. Поэтому возникла задача количественной характеристики «загрязненности» образцов. Шубников и де Гааз решили использовать в качестве меры такой «загрязненности» остаточное сопротивление.

Сейчас хорошо известно, что измерение сопротивления при предельно низких температурах служит одним из самых чувствительных методов определения чистоты и совершенства металлов. Однако мало кто знает, что использование величины отношения сопротивлений при комнатной и гелиевой температурах в качестве критерия совершенства образца — меры степени чистоты и отсутствия напряжений — было впервые предложено в цикле работ Л. В. Шубникова и В. де Гааза. В настоящее время это стандартный безымянный (как истинно классические результаты) прием, используемый во всех лабораториях мира. В середине 50-х годов использование этой процедуры еще связывалось с именами авторов и предполагало наличие библиографических ссылок [14].

Проведенные Л. В. Шубниковым измерения остаточного сопротивления образцов «чистого» висмута, поставляемого различными фирмами, показали, что при азотной температуре все образцы вели себя примерно одинаково, однако при температуре кипения водорода висмут фирмы Хильгер, служивший исходным сырьем для изготовления лейденских образцов, обнаружил на порядок более низкое остаточное сопротивление, чем висмут фирмы Хартман—Браун, используемый в Кембридже. Но даже образцы, выращенные из лучшего хильгеровского висмута, обнаруживали значительные вариации величины остаточного сопротивления. Начались систематические исследования этого эффекта. Прежде всего кристаллы проходили обычную металлографическую проверку на монокристалличность. Образцы полировались, проправливались и изучались под микроскопом. Следов кристаллитов или двойников никогда не обнаруживалось. Затем кристаллы подвергались проверке рентгеновским методом. Эти исследования выполнил П. М. ван Альфен. Было установлено, что образцы по всей длине имели одинаковую ориентацию и характеризовались очень высокой степенью монокристалличности.

Как показали дальнейшие эксперименты, отжиг в течение нескольких дней при температуре, близкой к температуре плавления, не влияют на качество образцов. В то же время выяснилось, что термические условия выращивания существенно сказываются на свойствах кристаллов. Таким образом, был сделан вывод: хорошие или плохие кристаллы формируются во время роста, и дальнейшая обработка кристаллов уже не изменяет их качества. Каковы же могут быть причины, приводящие к разнице в качестве кристаллов? Как уже говорилось, одно предположение высказал П. Л. Капица — существование второй модификации висмута. Л. В. Шубников и В. де Гааз предположили, что решающее влияние на качество выращиваемых кристаллов оказывают примеси, вариации их распределения при различных режимах роста.

Как известно, примеси при кристаллизации концентрируются в расплаве. Это натолкнуло авторов на мысль использовать для очистки образцов многократную рекристаллизацию и при каждой последующей удалять наиболее загрязненные участки кристалла*. Очищенный многократной перекристаллизацией висмут исследовался повторно с целью выяснения различных температурных режимов. Проверка на чистоту, проведенная с помощью спектроскопического анализа П. М. ван Альфеном, показала, что уменьшение остаточного сопротивления при рекристаллизации однозначно связано с уменьшением интенсивности линий Ag и Pb, являющихся, таким образом, наиболее существенными примесями, остающимися после рекристаллизации. Для их удаления была применена химическая очистка, проводившаяся тремя различными методами.

В результате была отработана следующая процедура обработки материала для выращивания кристаллов: исходный висмут фирмы Хильгер подвергался сначала химической очистке, а затем многократной перекристаллизации. Полученные образцы проверяли, измеряли остаточное сопротивление при низких температурах. Для лучших из них величина R_T/R_{273} к составила $2,7 \cdot 10^{-3}$.

Эта методика впоследствии использовалась всеми исследователями, занимавшимися гальваномагнитными явлениями в металлах. Несколько высока степень совершенства монокристаллов, полученных с ее помощью, можно судить хотя бы по тому, что в одной из работ, выполненной в середине 50-х годов, авторы отмечали в качестве достижения, что им удалось превзойти степень чистоты, полученную Л. В. Шубниковым и В. де Гаазом [16].

* Отметим, что использованная Л. В. Шубниковым и В. де Гаазом процедура многократной рекристаллизации во многом предвосхитила основные черты широко применяемого в настоящее время метода зонной плавки, теория которого была впоследствии разработана И. М. Лифшицем [15].

На полученных совершенных образцах висмута была проведена еще одна проверка результатов П. Л. Капицы — исследование изменения удельного сопротивления при сжатии (опыты Борелиуса и Линдха) [17], выполненное по просьбе Л. В. Шубникова и В. де Гааза О. Н. Трапезниковой. В работе [18] Шубников подчеркивал принципиальный характер этих исследований: «Опыты Борелиуса и Линдха были повторены О. Трапезниковой [18], так как Капица нашел, что его кристаллы под влиянием одностороннего давления очень сильно (на 8 %) уменьшают свое удельное сопротивление. Эти опыты послужили Капице наиболее важным подтверждением теории крэков и двух модификаций висмута.

Результаты исследования наших кристаллов под давлением находятся в противоречии с результатами, полученными Капицей при подобном же методе исследования». Итогом всех этих скрупулезных проверок был следующий общий вывод: «Оснований признать существование второй модификации мы найти не могли. Что касается других многочисленных опытов с ростом кристаллов, то мы уверены, что интерпретация их, данная Капицей, не верна» [18]. П. Л. Капица, естественно, также уделял внимание влиянию примесей. В работе 1928 г. проблема примесей была решена относительно просто: «Висмут, использовавшийся в наших экспериментах, должен был быть очень чистым. Мы использовали висмут, полученный от Кольбаума и от Хартмана и Брауна... Обнаружилось, что висмут от Хартмана и Брауна имеет большую степень чистоты, чем висмут от Кольбаума, и поэтому является более подходящим для наших экспериментов» [12]. В следующей работе подход П. Л. Капицы несколько изменился: «Материал был тот же, что и в предыдущей работе, он был получен от Хартмана и Брауна. Мы все же провели у Хильгера спектральный анализ и оказалось, что этот висмут очень высокой чистоты, содержит только 10^{-4} серебра и практически не содержит свинца. Однако вполне возможно, что даже эти примеси могут повлиять на результаты» [12].

Таким образом, исследователи в Лейдене получили убедительные доказательства справедливости своей точки зрения, заключающейся в том, что основной причиной невоспроизводимости результатов различных авторов и других наблюдаемых аномалий является чрезвычайно сильная чувствительность свойств этого металла к наличию ничтожного (на уровне 10^{-6}) количества примесей. Этот важный сам по себе физический результат явился совершенно новым фактором в физическом эксперименте. В своих воспоминаниях Х. Казимир дает такую оценку этой стороны работы Шубникова и де Гааза: «Развитие полупроводниковой технологии после Второй Мировой войны познакомило нас с тем фактом, что незначительное количество примеси может радикально изменить физические свойства, и в результате искусство выращивания чистых кристаллов достигло высокого уровня совершенства. Результаты Шубникова в определенном смысле предваряли эти последние достижения» [11].

Убедившись в правильности своей «материаловедческой» позиции, авторы могли с гораздо большей уверенностью относиться к результатам измерений магнитосопротивления. Как уже говорилось, в отличие от простых зависимостей, наблюдавшихся П. Л. Капицей при комнатных и азотных температурах, измерения, проведенные в Лейдене на образцах из дважды перекристаллизованного висмута фирмы Хильгер, показали, что кривая зависимости сопротивления от магнитного поля уже при водородных температурах ведет себя намного сложнее, с явно заметными признаками немонотонности. Хорошая воспроизводимость результатов на полученных по описанной выше методике образцах при возрастании и убывании магнитного поля, а также то обстоятельство, что сложная зависимость от поля проявлялась на наиболее совершенных кристаллах с наиболее низким остаточным сопротивлением, позволили полагать, что в основе этой зависимости лежит реальный физический эффект. Авторы понимали, что имеют дело с принципиально новым явлением, и ни в одной из

работ цикла не пытались высказать предположение о его природе. Единственный след, указывающий на то, что такие попытки предпринимались,— это ссылка на предложение П. Эренфеста проанализировать полевые зависимости коэффициентов фурье-разложения угловых зависимостей. Такая процедура анализа результатов не получила дальнейшего развития в силу того, что для замкнутых ферми-поверхностей сложная угловая диаграмма является вторичным эффектом, отражающим осциллирующую зависимость магнитосопротивления при каждом направлении магнитного поля. Впоследствии изучение диаграмм вращения явилось мощным методом исследования топологии ферми-поверхностей металлов.

Изучение диаграмм вращения при водородных температурах было продолжено на более чистом и точнее ориентированном монокристалле. Результаты этой работы выглядят еще более впечатляющими.

Измерения, проведенные при азотных температурах, показали, что в этих условиях осцилляции магнитосопротивления отсутствуют. Неудивительно поэтому, что П. Л. Капица их не видел. Лишь при охлаждении до 64 К на кривой зависимости сопротивления от магнитного поля при $H = -15$ кГе появляется небольшой излом. Соответственно и диаграммы вращения при азотных температурах имеют простой вид. Таким образом, работа Л. В. Шубникова и В. де Гааза продемонстрировала, что данный эффект является низкотемпературным и с ростом температуры исчезает.

Исследование нового эффекта предполагалось продолжить в гелиевой области температур, однако измерения пришлось отложить из-за отъезда Л. В. Шубникова из Лейдена. Вскоре после возвращения в Советский Союз он принял предложение И. В. Обреимова о переходе в организованный в Харькове по инициативе А. Ф. Иоффе Украинский физико-технический институт (УФТИ). В 1931 г. Л. В. Шубников был назначен руководителем криогенной лаборатории УФТИ.

За пять лет, прошедших со времени отъезда в Лейден, обстановка в стране резко изменилась, и все попытки Л. В. Шубникова получить разрешение на поездку в Лейден для завершения работы оказываются безрезультатными. Прекрасно понимая важность результатов, полученных Л. В. Шубниковым в Лейдене, П. Эренфест предпринимает попытку помочь ему получить разрешение на поездку. В письме к академику А. Ф. Иоффе, пользовавшемуся влиянием в правительстве СССР, П. Эренфест писал: «Ты знаешь, что Шубников во время здешнего пребывания получил такие важные и просто прекрасные результаты по измерению сопротивления висмута при температуре жидкого водорода и что была достигнута договоренность о том, что эти измерения он должен будет продолжить при гелиевых температурах. И вот оказывается... что по каким-то причинам... приезд Шубникова в Лейден в ближайшее время маловероятен... Я знаю, что профессор де Гааз будет очень и очень сожалеть, что Шубников не сможет в ближайшее время приехать в Лейден на такой срок, который необходим для проведения измерения при температурах жидкого гелия. Тебе ведь хорошо известно, с какой охотой де Гааз всегда готов помочь Обреимову с развертыванием криогенных работ в Харькове. А я знаю, что после прекрасных успехов Шубникова по измерению при водородных температурах де Гааз очень бы хотел, чтобы Шубников сам завершил измерения в гелии. И вот, вдруг, оказывается, что это невозможно, и я абсолютно не знаю, почему. Я боюсь, что от этого пострадает не только данное важное исследование, но и вообще такое обнадеживающее сотрудничество между Лейденской лабораторией и русскими физиками, которое мне очень дорого, может оказаться под серьезной угрозой...» [19].

Однако приехать в Лейден Л. В. Шубникову так и не удалось. Когда стало окончательно ясно, что рассчитывать на приезд Л. В. Шубникова нельзя, В. де Гааз принял решение провести столь долго откладываемые измерения магнитосопротивления висмута при температуре жидкого гелия без него. Эти измерения были выполнены В. Бломом на образце, выра-

щенном Л. В. Шубниковым, а результаты опубликованы в совместной работе В. де Гааза, В. Блома и Л. В. Шубникова [20]. Кривые, полученные при гелиевых температурах, выглядят еще более впечатляющими, но уже не содержат качественно новых результатов.

Наблюдение осцилляций магнитосопротивления висмута стимулировало поиск осцилляций его магнитной восприимчивости. Такая зависимость была обнаружена в том же 1930 г. В. де Гаазом и П. М. ван Альфеном и получила название эффекта де Гааза — ван Альфена*. Открытие эффекта де Гааза — ван Альфена несомненно стало возможным лишь благодаря тем исследованиям, которые провел в Лейдене Л. В. Шубников, и было самым непосредственным образом связано с ними. Процитируем де Гааза и ван Альфена: «Наиболее подробно были исследованы кристаллы висмута, во-первых, потому, что в нашем распоряжении был очень чистый монокристалл висмута в связи с исследованиями Шубникова и де Гааза аномалий сопротивления на этих кристаллах. Ввиду очевидной корреляции диамагнитной восприимчивости с изменением сопротивления мы были склонны ожидать зависимости восприимчивости от поля, подобно найденной для сопротивления. Далее мы увидим, что наши ожидания оправдались... По указанным причинам Л. В. Шубников подготовил для нас небольшой монокристалл ($5 \times 5 \times 5$ мм³)... Материалом для этого кристалла послужил химически чистый висмут с последующей двенадцатикратной рекристаллизацией. Таким образом, был получен висмут чрезвычайно высокой чистоты» [9].

Долгое время обнаруженные особенности поведения магнитосопротивления и магнитной восприимчивости считались экзотической аномалией, присущей только висмуту**. В то же время Л. В. Шубников полагал, что обнаруженные в Лейдене эффекты являются общеметаллическим свойством, и планировал провести в криогенной лаборатории УФТИ исследования магнитосопротивления при низких температурах и других металлов. Эта тема была внесена Л. В. Шубниковым в список важнейших перспективных задач лаборатории [10]***.

Однако этим планам не суждено было сбыться. 6 августа 1937 г. в день своего возвращения из Крыма, где он и Л. Д. Ландау проводили отпуск, Л. В. Шубников был арестован вместе с В. С. Горским и Л. В. Розенкевичем по ложному обвинению. Через месяц он был переведен в Москву, в тюрьму на Лубянку, и 28 ноября 1937 г. осужден ОСО (Особым совещанием) на «десять лет без права переписки». Под приговором стоят подписи Ежова и Вышинского. В тот же день Л. В. Шубников был расстрелян.

* Впервые этот термин появился в 1936 г. в работе Шенберга и Аддина [21]. В то же время термин «эффект Шубникова — де Гааза» появился впервые лишь в 1949 г. в работе Веркина, Лазарева и Руденко [22]. По-видимому, дело здесь в том, что начиная с конца тридцатых годов в статьях, выходящих в Советском Союзе, даже упоминание фамилии репрессированного автора было невозможным, и в ссылках на работы лейденского цикла вместо фамилий авторов указывалось «де Гааз и сотрудники». В то же время в 1942 г. Лауз в работе [23], выполненной в гитлеровской Германии, сослался на статью двух советских физиков — Л. В. Шубникова и И. Е. Нахутина. Как же можно объяснить появление фамилии Шубникова в 1949 г.? Скорее всего, свою роль в восстановлении исторической справедливости, как это ни парадоксально, сыграла очередная зловещая политическая кампания — «борьба с космополитизмом и преклонением перед Западом», начало которой пришлось на 1947—1948 гг., а пик — на начало пятидесятых годов. В условиях тех лет наличие фамилии автора, хотя и с неблагополучной биографией, но свободного от клейма «космополита» могло несколько компенсировать обилие ссылок на статьи зарубежных авторов. В пользу такой версии говорит, например, тот факт, что в кратком сообщении тех же авторов [24] осцилляции магнитосопротивления называются просто «эффектом Шубникова».

** В научном фольклоре довоенных лет сохранилось воспоминание о том, что в конце тридцатых годов Я. Дорфман обдумывал идею написания книги под названием «Тысяча и одна тайна висмута».

*** Здесь уместно также вспомнить, что уже в 1933 г. Р. Пайерс [25] отметил, что эффект де Гааза — ван Альфена должен наблюдаваться во всех металлах и прежде всего с малым количеством носителей заряда.

Относительно последнего периода жизни де Гааза приведем выдержку из письма Т. Эренфест (жены П. С. Эренфеста) к О. Н. Трапезниковой, в котором идет речь об обстоятельствах жизни Лейденской лаборатории во время немецкой оккупации: «Вирсма умер от своей собственной болезни... Его смерть была для многих неожиданным горем, а также и большим ущербом для Лейденской лаборатории: Вирсма был единственным человеком, который умел отстаивать ее от хищения; после его смерти немцы обобрали все, что можно было увезти. Де Гааз, к сожалению, незадолго до его смерти переправился в Англию, а когда после нашего освобождения возвратился, то встретил большое негодование со всех сторон, которое привело к тому, что его «вычистили» — теперь во всех учреждениях и союзах заняты тем, чтобы выставлять ненадежных членов. По отношению к де Гаазу я нахожу это несправедливым и жестоким: он уже много лет производил впечатление неуравновешенного человека, и в то же время — по-своему — делал все возможное, чтобы оберегать и лабораторию, и работающих там. Злые языки говорят, что все было бы не хуже и без его помощи. Конечно, он не мог предвидеть, что Вирсма погибнет вскоре после его отъезда...»

В 1939 г., через два года после смерти Л. В. Шубникова, в Харькове в криогенной лаборатории УФТИ, организованной Л. В. Шубниковым и руководимой им с 1931 по 1937 гг., Б. Г. Лазарев, Н. М. Нахимович и Е. А. Парфенова обнаружили эффект Шубникова — де Гааза в монокристаллах цинка. Основываясь на тех же соображениях, которыми в свое время руководствовался де Гааз, В. Маркус в Йельском университете и Б. И. Веркин в УФТИ предприняли исследования магнитной восприимчивости этого металла и в 1947 г. обнаружили в цинке эффект де Гааза — ван Альфена. Исследования в Харькове велись на хильгеровском цинке, который Л. В. Шубников привез из Лейдена, по методике Шубникова — де Гааза: материал подвергался многократной перекристаллизации, а образцы для исследования выращивались методом Обреимова — Шубникова. Публикация Маркуса появилась в печати раньше, и результаты Б. И. Веркина так и не были опубликованы.

С этого времени систематический поиск осцилляционных эффектов у широкого круга металлов был предпринят в криогенной лаборатории УФТИ в Харькове, в Мондовской лаборатории в Кембридже и в физической лаборатории Йельского университета. В 1949 г. Е. С. Боровик в Харькове обнаружил эффект Шубникова — де Гааза [26], а Шенберг [27] в Кембридже и Лазарев, Веркин, Руденко [24] в Харькове — эффект де Гааза — ван Альфена в олове. На следующий год список металлов, обнаруживающих осцилляционные эффекты, пополнился кадмием, бериллием, магнием, индием [28]. Эти же авторы обнаружили в 1951 г. эффект де Гааза — ван Альфена в сурье [29]. В результате было установлено, что осцилляционные эффекты свойственны всем металлам, и проблема их наблюдения в конкретном веществе упирается в возможность создания достаточно сильных магнитных полей, а также получения свободных от примесей совершенных монокристаллов металлов.

Позднее оказалось, что не только проводимость и намагниченность, но и многие другие физические свойства металлов также осциллируют при изменении магнитного поля, например скорость и коэффициент поглощения звука, коэффициент отражения света, теплопроводность и целый ряд других термодинамических и кинетических характеристик металла.

Эффект Шубникова — де Гааза был использован для определения поверхностей Ферми практических всех металлов и полуметаллов, а также многих полупроводников. К настоящему времени с помощью эффектов ШдГ и дГвА, а также родственных им явлений получена обширная информация о сечениях ферми-поверхностей, циклотронных массах, g -факторах и температурах Дингла носителей заряда большого числа проводящих твердых тел.

Работы Л. В. Шубникова и В. де Гааза не были по достоинству оценены при их появлении. Несмотря на то, что работы Шубникова и де Гааза сразу попали в поле зрения исследователей и широко цитировались в литературе, основными результатами, на которые обратили внимание в начале 30-х годов, было обнаружение сильного влияния чрезвычайно малого количества примесей, а также предложенный метод очистки от примесей многократной рекристаллизацией вещества. Кривые сопротивления висмута, полученные Шубниковым и де Гаазом [4-6], принимались в литературе тех лет в качестве эталонных. В то же время обнаружение осцилляционных зависимостей сопротивления и магнитной восприимчивости от магнитного поля отклика в литературе не получило. Единственным исключением является работа П. Л. Капицы, опубликованная в 1931 г.

Радикальный пересмотр отношения к результатам Л. В. Шубникова и В. де Гааза произошел в 50-е годы, когда стало понятно, что этой работой было заложено фундаментальное направление исследований в физике твердого тела. Определенным отражением такой переоценки явилось включение работы Л. В. Шубникова и В. де Гааза о первом наблюдении аномалии магнитосопротивления в висмуте в число работ, воспроизведенных в 1967 г. в журнале «Успехи физических наук» как выдающихся достижений советской науки за ее полувековую историю.

Столь запоздалая реакция вполне естественна. Открытие эффекта ШдГ несомненно значительно опередило свое время. С известной долей уверенности можно высказать предположение, что эффект Шубникова — де Гааза, а вместе с ним и эффект де Гааза — ван Альфена «естественно» были бы открыты не ранее конца сороковых — начала пятидесятых годов — т. е. лет на двадцать пять позже — срок для современной науки огромный. Основанием для такого предположения служит сам характер открытия. Как свидетельствует история физики, тщательные измерения играют в ней значительную роль, но чаще следуют за открытием, поскольку, лишь поняв смысл явления, естественно стремиться построить его точную количественную картину. Открытие эффекта Шубникова — де Гааза не укладывается в эту схему, так как оно явилось результатом повышавшейся в течение нескольких десятилетий точности измерений и качества образцов.

Открытием этого эффекта, обязанного не только высокой культуре измерений, но и, пожалуй даже в большей степени, уникальной для того времени чистоте и качеству образцов, Лейден продемонстрировал, что сверхвысокая чистота и идеальность образцов являются, наряду с низкими температурами, высокими давлениями, сильными полями, основными парадигмами современной физики конденсированного состояния, ведущими к качественно новому кругу явлений.

Эта работа уже была подготовлена к печати, когда внезапно скончался Борис Иеремиевич Веркин, основатель и в течение почти 30 лет директор ФТИНТа, создатель и бессменный главный редактор журнала ФНТ. Борису Иеремиевичу принадлежит огромный вклад в дело возвращения выдающемуся ученому, человеку и гражданину Льву Васильевичу Шубникову его доброго имени. Еще в 1950 г. в работе Б. И. Веркина, Б. Г. Лазарева и Н. С. Руденко [22] эффект осцилляций магнитосопротивления был впервые назван эффектом Шубникова — де Гааза. Под руководством и при непосредственном активнейшем участии Б. И. Веркина сотрудниками института подготовлена вышедшая недавно книга «Л. В. Шубников. Избранные труды. Воспоминания» [10] и ряд статей [31-33]. После окончания работы над последней из них — настоящей — Б. И. Веркин намеревался приступить к работе над большой книгой о Л. В. Шубникове.

Все, кто знал Бориса Иеремиевича, прекрасно представляют себе впечатляющий масштаб его личности ученого и организатора науки. «Шубниковская» деятельность Б. И. Веркина может показаться несколько камерной по сравнению с таким, без преувеличения, подвигом, как создание

ФТИНТа и его прекрасных научных традиций. Однако, как неоднократно подчеркивал Борис Иеремиевич, сама идея организации такого института в значительной степени была навеяна деятельностью Л. В. Шубникова.

С. Г., Л. П., Ю. Ф.

1. Schubnikow L., de Haas W. J. Magnetische Widerstandsvergrösserung im Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen // Leiden Communs.— 1930.— N 207a.— S. 3—6.
2. Schubnikow L. Über die Herstellung von Wismuteinkristallen // Ibid.— N. 207 b.— S. 9—14.
3. Schubnikow L., de Haas W. J. Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Wismuteinkristallen von der Reinheit des Metalles // Ibid.— H 207 c.— S. 17—31.
4. Schubnikow L., de Haas W. J. Neue Erscheinungen bei der Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von Flüssigem Wasserstoff. I. // Ibid.— H 207 d.— S. 35—53.
5. Schubnikow L., de Haas W. J. Neue Erscheinungen bei der Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von Flüssigem Wassersstoff. II. // Ibid.— H 210 a.— S. 21—28.
6. Schubnikow L., de Haas W. J. Die Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von Flüssigem Stickstoff // Ibid.— H 210 b.— S. 21—28.
7. Брандт Н. Б., Чудинов С. М. Эффект Шубникова — де Гааза и его применение для исследования энергетического спектра металлов, полуметаллов и полупроводников // Успехи физ. наук.— 1982.— 137, № 3.— С. 479—499.
8. Ландау Л. Д. Диамагнетизм металлов // Л. Д. Ландау. Собрание трудов. Т. 1.— М.: Наука, 1969.— С. 47—55.
9. De Haas W. J., van Alphen P. M. Note on the dependence of the susceptibility of diamagnetic metals on the field // Leiden Communs.— 1930.— N 208 d.— Р. 31—33.
10. Шубников Л. В. Избранные труды. Воспоминания / Отв. ред. Б. И. Веркин.— Киев : Наук. думка, 1990.— 352 с.
11. Casimir H. B. G. Haphazard reality.— New York : Harper & Row, 1983.— 365 р.
12. Kapitza P. L. The study of the specific resistance of bismuth crystals and its change in strong magnetic fields and some allied problems. I—III // Proc. Roy. Soc. A.— 1928.— 119, N 782.— Р. 358—443.
13. Шубников Л. В., де Хаас В. И. / Изготовление и исследование кристаллов висмута// Журн. физ.-хим. общества. Чисто физ.— 1930.— 62, вып. 6.— С. 530—537.
14. Alers P. B., Webber R. T. // Phys. Rev.— 1951.— 84, N 4.— Р. 863—864.
15. Исследование механизма очистки металлов от примесей методом зонной перекристаллизации / Б. Н. Александров, Б. И. Веркин, И. М. Лишниц, Г. И. Степанов // ФММ.— 1956.— 2, № 1.— С. 105—119.
16. Brodie L. C. // Phys. Rev.— 1954.— 93, N 4.— Р. 935.
17. Borelius G., Ling // Ann. der Phys.— 1916.— 51.— S. 840.
18. Trapeznikowa O. // Proc. Roy. Acad. Amsterdam.— 1931.— 34 — Р. 840.
19. Эренфест П. С., Иоффе А. Ф. Научная переписка 1907—1933 гг.— Л. : Наука, 1973.— 235 с.
20. De Haas W. J., Blom J. W., Schubnikow L. Über die Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei tiefen Temperaturen // Physica.— 1930.— 2, N 9.— Р. 904—915.
21. Shoenberg D., Uddin M. Z. The magnetic properties of bismuth. I, II // Proc. Roy. Soc. A.— 1938.— 156, N 889.— Р. 687—720; ibid.— 1939.— 170, N 942.— Р. 341—364.
22. Веркин Б. И., Лазарев Б. Г., Руденко Н. С. Периодическая зависимость восприимчивости металлов от поля при низких температурах // ЖЭТФ.— 1950.— 20, вып. 1.— С. 93—97.
23. Laue M. V. Bemerkungen zur Supraleitung // Phys. Z.— 1942.— XLIII.— S. 274—284.
24. Веркин Б. И., Лазарев Б. Г., Руденко Н. С. // ДАН СССР.— 1949.— 69, № 6.— С. 773.
25. Peierls R. // Z. Phys.— 1933.— 81.— С. 186.
26. Боровик Е. С. // ДАН СССР.— 1949.— 69, N 6.— С. 767.
27. Shoenberg D. // Nature.— 1949.— 164, № 225.
28. Веркин Б. И., Лазарев Б. Г., Руденко Н. С. // ЖЭТФ.— 1950.— 20, вып. 11.— С. 995.
29. Веркин Б. И., Лазарев Б. Г., Руденко Н. С. // ЖЭТФ.— 1951.— 21, вып. 5.— С. 658.
30. Лев Васильевич Шубников / Б. И. Веркин, С. А. Гредескул, Л. А. Пастир и др. // Природа.— 1989.— № 1.— С. 29—97.
31. Л. В. Шубников и физика низких температур / Б. И. Веркин, С. А. Гредескул, Б. А. Пастир, Ю. А. Фрейман, Ю. А. Храмов // Знание. Сер. «Физика».— 1989.— 61 с.
32. Лідер. Интерв'ю з акад. Веркіним.— Веч. Харків.— 1989.— № 115.

Физико-технический ин-т
низких температур АН УССР,
г. Харьков

Получено 20.06.90