

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ *

П. Л. Капица, Кембридж

Введение

Хорошо известно, что напряжение магнитного поля, получаемого с помощью электромагнитов, ограничивается насыщением сердечника последних. В настоящее время наивысшим намагничением при насыщении обладает сплав „феррокобальт“, открытый проф. Вейсом, но даже при помощи этого сплава максимальное значение поля, которое можно создать в объеме достаточном для экспериментальных исследований, не достигает и 100 гаусс. Пока не открыты сплавы с более высоким намагничением при насыщении, увеличение магнитного поля может идти только за счет увеличения размеров электромагнита. Однако с увеличением размеров (объема) магнитное поле растет пропорционально логарифму объема.

Сомнительно, чтобы можно было идти далеко в этом направлении, после того как во Франции был построен гигантский электромагнит проф. Коттоном. Также хорошо известно, что сильные магнитные поля можно получать в катушке, если она достаточно хорошо охлаждается например сильной струей воды. Этим методом могут быть получены поля около 60—70 килогаусс. Это вероятно является практическим пределом, так как существует по-

* Доклад, прочитанный на Сольвейском конгрессе в Брюсселе в октябре 1930 г.

видимому предел для того количества охлаждающего вещества, которое можно привести в соприкосновение с единицей поверхности катушки. Этот способ не получил практического применения, является более сложным, чем метод электромагнита, и не открывает больших возможностей. Можно достигнуть значительного увеличения магнитного поля, если свести время его существования до малых долей секунды. Эта жертва временем представляет конечно некоторые затруднения при проведении исследований по магнетизму, но так как очевидно это единственная надежда в настоящее время получить сильные магнитные поля, мы и пошли этим путем.

Несомненно некоторые явления, требующие известного времени для своего установления, как например рост кристаллов, не могут быть изучены таким способом. Остается однако очень много явлений, вероятно наиболее интересных которые могут быть изучены этим методом. Мы главным образом интересуемся атомными явлениями и так как сильное магнитное поле является единственным наиболее плодотворным средством для искажения движения электронов в атомах, молекулах и кристаллах, то эксперименты в этой области представляют большой интерес для современной физики. Основная трудность, которая встречается при осуществлении этого метода, заключается в следующем: во-первых, само получение поля в короткий промежуток времени, во-вторых, метод измерения явления. В этой статье я хочу подробно остановиться на второй части вопроса, так как первая часть была подробно описана ранее. *

О ПИСАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В КОРОТКИЕ ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ

Очевидно, что наиболее важный пункт в получении сильных магнитных полей в короткие промежутки времени состоит в предохранении катушки от перегрева и такой постановке эксперимента, чтобы все выделяемое тепло по-

* Proceedings of the Roy. Soc. A. 105, 691, 1924, см. также Я. Г. Дорфман, Сильные магнитные поля и работы Капицы, „Успехи физич. наук“, т. X.

глощалось самой катушкой вследствие ее теплоемкости. Если магнитное поле создается в катушке радиуса a и обмоткой из материала с удельным сопротивлением ρ (учитывая и объем занимаемой изоляцией обмотки) и приложенная мощность равна W квт, то напряжение будет иметь значение

$$H = k \sqrt{\frac{w}{a\rho}}.$$

В этой формуле, которая была дана в столь удобном виде Ф а б р и, * k — коэффициент, зависящий от формы катушки, и в обычных катушках не может превышать 0,179. Из этой формулы ясно видно, например, что для получения поля в 1 млн. гаусс в катушке с диаметром сечения в 1 см надо приложить 40 тыс. квт, а практически даже еще значительно больше. При такой мощности катушка обычных размеров должна будет нагреваться более чем на 10 000° в секунду. Уменьшив же время до 0,01 сек., мы будем иметь повышение температуры лишь на 100°, а это уже допустимо. С этой точки зрения выгодность получения поля в короткие промежутки времени очевидна. При осуществлении этого способа встречаются значительные трудности. Первое — это получение больших мощностей. Очевидно, что применение станции в несколько тысяч киловатт в течение 0,01 сек. не только является чрезвычайно невыгодным, но практически невозможным для физической лаборатории, и очевидно необходимо выработать специальный источник энергии. Решение этой проблемы напрашивается само собой. Для этой цели годна любая электрическая установка, могущая накапливать энергию, а затем в течение долей секунды отдавать запасенную ею энергию. Мы можем представить себе 4 основных типа установок, в зависимости от способа накопления в них энергии.

Первый способ — электростатический, второй — магнитный, третий — химический и четвертый — механический.

Первый способ осуществляется большой конденсаторной батареей, которую медленно разряжают через катушку. Это

* Journ. de Phys., сер. 4, IX, 129, 1910.

решение вполне возможно, но имеет большие практические недостатки. Необходимо помнить, что требуется не только большая мощность, а также должна быть накоплена некоторая энергия, достаточная для получения поля и для его поддержания в течение времени, не слишком короткого для производства эксперимента. Практически наиболее удобными оказалось время между 0,02 и 0,01 сек. Можно показать, что конденсаторная батарея, способная дать нужную энергию, обладает практически неудобно большими размерами и вызывает необходимость зарядки до очень высоких потенциалов, что весьма затрудняет вопрос об изоляции катушки. Опыты по этой линии были проделаны доктором Уоллом,* результаты которого подтверждают наши общие соображения.

Второй способ накопления энергии — магнитная энергия обычно накапливается в железном сердечнике индукционной катушки. Действительно, сначала мы делали опыты со специально построенной индукционной катушкой, вторичная обмотка которой состояла из очень небольшого числа витков и была присоединена к катушке. Теоретически этот способ должен быть приемлем и практичнее, чем метод конденсаторной батареи, но тут мы встречаемся с большими трудностями при практическом осуществлении. Основное затруднение заключается в том, что во вторичной обмотке, не имеющей почти никакой емкости и присоединенной к цепи с большой самоиндукцией (соленоид) при размыкании первичного тока образуются колоссальные перенапряжения и, грубо говоря, может случиться, что энергия, вместо того чтобы пойти в катушку, рассеется выключателем. Вычисления показали, что выключение первичного тока есть весьма трудная и практически невозможная задача, а потому этот метод был оставлен.

Первый метод, который позволил удовлетворительно накапливать энергию, — это химический.** Для этой цели

* Wall, Journal of the Institution of Electric Engineers, XIV, 745, 1926.

** Подробное описание этого метода можно найти в Proc. Roy. Soc., loc. cit., 1924.

была построена специальная аккумуляторная батарея, имеющая очень маленькую емкость, обуславливающуюся тонкостью активного слоя. Аккумуляторы были устроены очень прочными и помещались близко друг от друга, вроде volta столба. Эти аккумуляторы могли заряжаться в течение нескольких секунд и обычно полностью разряжались в течение долей секунды. Этой аккумуляторной батареей можно было получать мощность около 1 тыс. и 2 тыс. квт и первоначальные опыты в кратковременно действующих магнитных полях были проведены в короткие промежутки времени. Таким образом опыты над эффектом Зеемана были сделаны с полями примерно до 125 тыс. гаусс; * и эти же поля были применены для получения отклонения траектории α -лучей в камере Вильсона. ** Эти опыты дали возможность определить изменение скорости гелиевых частичек при прохождении их сквозь такие газы, как воздух или водород.

Некоторое увеличение значения магнитного поля можно получать путем увеличения размеров аккумуляторной батареи, что вызывает значительные трудности. По прошествии 1-2 лет элементы постепенно увеличивали свою емкость и тем самым уменьшали отдаваемую мощность, разрушались.

Однако затруднение заключается в выключении постоянного тока в несколько тысяч ампер в достаточно короткое время по сравнению с 0,01 сек. Это приводит в конце концов к последней возможности накопления энергии, а именно механическим путем, применяя принцип маховика. *** Это может быть осуществлено применением генератора переменного тока — типа турбогенератора, который обладает массивным ротором, делающим большое число оборотов и следовательно обладающим большой кинетической энергией. Из инженерной практики хорошо известно, что при коротком замыкании можно получать большие мощности от такого рода генератора в момент включения.

Генераторы переменного тока, которые строятся для не-

* Kapitza and Skinner, Proc. Roy. Soc. 109, 224, 1925.

** Kapitza, Proc. Roy. Soc. 106, 602, 1924.

*** Proc. Roy. Soc. 175, 658, 1927.

прерывного пользования, рассчитываются таким образом, чтобы ток короткого замыкания не смог дать большой мощности, так как это увеличивает опасность работы. При конструкции нашего генератора мы исходили из противоположного принципа, и действительно, машина, построенная нами, могла давать при коротком замыкании около 200 000 квт (70 тыс. ампер и 3 тыс. вольт), тогда как размеры ее соответствовали машине для непрерывной эксплуатации на 1500 квт. Это изменение конструкции приводит к весьма интересному изучению механических напряжений в электрической машине. В обычных машинах это не имеет существенного значения, но в нашем случае механические напряжения играют такую существенную роль, что вопрос о них является наиболее важным в проектировке, и приходится вводить много особенностей в отличие от обычной практики, для того чтобы сделать машину прочной. Применение машины переменного тока представляет большую выгоду еще потому, что сильно облегчает проблему прерывания тока. Так как используется только полволны, то необходимо было сконструировать такое синхронное приспособление, которое могло прерывать ток в тот момент, когда значение тока становится равным нулю.

В таком случае проблема прерывания тока сводится к проблеме конструкции быстро действующего синхронного выключателя. Отсылаем читателя к более детальному описанию устройства выключателя, который представляет собой интересную механическую проблему и действует по принципу кулачкового вала.

На первый взгляд кажется, что применение переменного тока создает затруднение в получении постоянного магнитного поля в течение даже 0,01 сек., но можно соответствующим изменением возбуждения поля создать волну, имеющую плоскую вершину. На рис. 1 мы имеем осциллограмму обыкновенной волны, а на рис. 2 — волну с плоской вершиной. Сама машина показана на рис. 3. Основная трудность в этом способе получения магнитного поля, ставящая предел силе получаемого поля, заключается в самой катушке. Большая плотность тока, достигающая 100 тыс. амп.

на 1 см^2 в сильном магнитном поле, неизбежно создает большие натяжения в теле самой катушки. Эти натяжения

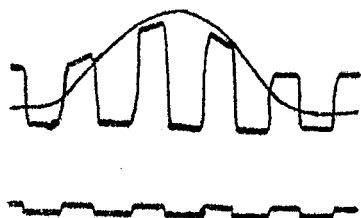


Рис. 1.

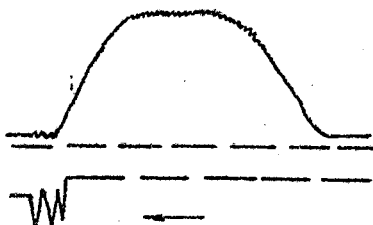


Рис. 2.

сплющивают катушку вдоль оси и уменьшают диаметр обыкновенная катушка, сделанная из меди, разрушалась с большим взрывом, когда в ней создавалось поле напря-

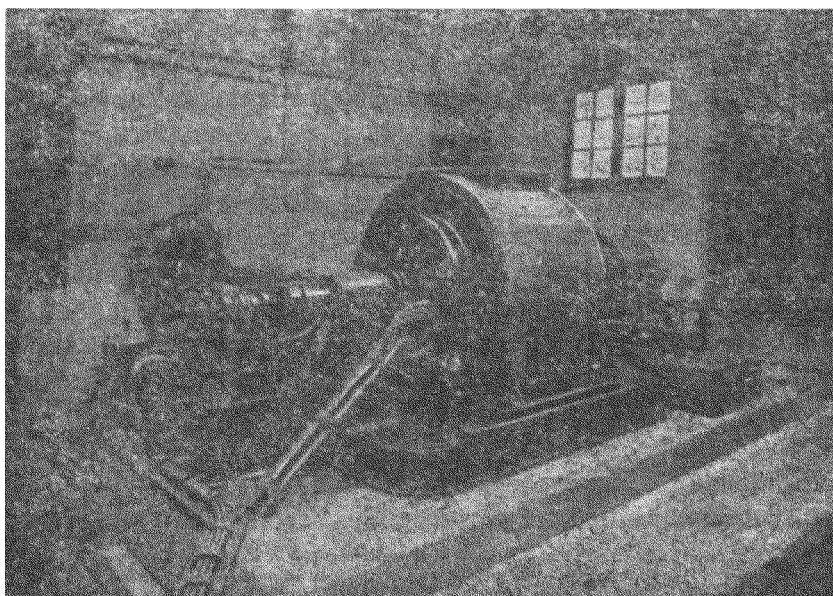


Рис. 3.

жением в 200 000 гаусс. Этот вопрос требовал тщательного изучения сил, возникающих в катушке, и после разработки методов вычисления этих напряжений д-ром Кок-

рофт* оказалось возможным выяснить, что если катушка сжата массивным стальным бандажем, то силы реакции со стороны бандажа вместе с электромеханическими силами, стремящимися разнести катушку, создают условия аналогичные всестороннему гидростатическому давлению. Катушка строилась из специального сплава кадмия с медью, который обладал большей прочностью, чем медь, и хорошей проводимостью. Посредством катушки с диаметром полости в 1 см было получено 320 килогаусс внутри нее, и можно надеяться, что в конце концов с дальнейшим улучшением конструкции катушки можно будет получать в объеме 1-2 см³ поле около полумиллиона гаусс, если же не будет изобретен специальный сплав с хорошей электропроводностью и прочностью, приближающейся к стали, то вопрос о получении полей свыше 1 млн. гаусс весьма сомнителен. Гидростатическое давление в катушке в нашем случае достигает нескольких тысяч килограмм на 1 см², и очень удивительно, что до настоящего времени мы не имеем случая разрушения изоляции. Но в этом случае нам помогает природа, а именно дуга, образующаяся после пробоя даже тонкой изоляции, тушится магнитным полем и ток продолжает циркулировать обычным образом. Мы имеем несколько случаев, в которых изоляция была явно не подходящей, но при этом дуга не образовалась. Когда катушка разрушается вследствие напряжения, происходит очень большой взрыв и разлетаются осколки катушки. Прежде чем мы научились строить катушки, способные сопротивляться такого рода силам, 4 или 5 катушек взорвались.

Дальнейший прогресс в увеличении силы поля может быть достигнут весьма осторожно и постепенно.

Экспериментальные методы

Методами измерения в сильных магнитных полях руководит следующая основная мысль. Мы вынуждены производить эксперимент в течение 0,01 сек., что является весьма малым интервалом для техники эксперимента, но достаточно

* O'Scristoft, Phil. Trans. A. 227, 317-343, 1928.

длинным для того, чтобы явление, которое мы изучаем смогло уже установиться. На самом деле, так как магнитное поле по силе своей значительно превышает обычное явления в нем настолько увеличиваются, что могут быть изучены даже в такое короткое время.

Что теряется во времени, то выигрывается
в величине

В большинстве случаев метод кратковременно действующих полей не может охватить области ниже 30 килогаусс и приходится ставить дополнительные работы с обычными электромагнитами, если это представляет интерес.

Первый вопрос, который мы будем рассматривать, это измерение самого поля. Оно сводится только к измерению тока в катушке при помощи осциллографа. Осциллограф, которым мы пользовались, имеет очень малый собственный период и малую чувствительность, но так как ток в катушке может достигнуть 20 тысяч ампер, мы можем всегда сберечь 1-2 ампера, чтобы пропустить через осциллограф, и в течение короткого времени самого эксперимента осциллограф не успеет нагреться. Для того чтобы определить величину магнитного поля тока, надо знать постоянную катушки. Это делается несколько видоизмененным баллистическим методом.

Маленькая катушечка была помещена в центре другой большей катушки. Эта малая катушка была замкнута накоротко до тех пор, пока ток в главной катушке (соленоиде) не достигал своего максимального значения, тогда катушка автоматически выключалась и присоединялась к баллистическому гальванометру, по отклонению которого можно было обычным путем определить силу поля. Мы нашли, что поле в главной катушке (соленоиде) пропорционально току, а поле порядка 4 тыс. гаусс, создаваемое стальным бандажем катушки, не давало заметного отклонения от пропорциональности. Различные манипуляции, которые необходимы для проведения эксперимента в 0,01 долю секунды, вызвали необходимость прodelьывать целый ряд выключений совершенно синхронно. Весь эксперимент в настоящее время прodelьвается нажатием кнопки и все прodelьвается авто-

матически в продолжение 0,01 сек., в течение которой длится эксперимент.

Изменение сопротивления металлов в сильных магнитных полях

Очевидно, что для каждого явления, которое должно быть исследовано в этих сильных полях в течение такого короткого времени, необходимо выработать специальный метод исследований. А priori нет принципиальных трудностей и изобретению таких методов для всех родов исследований, которые делаются в обычных полях. Первый вопрос, который мы изучали, был вопрос о том, как магнитное поле, полученное от динамо, меняет сопротивление металлов.*

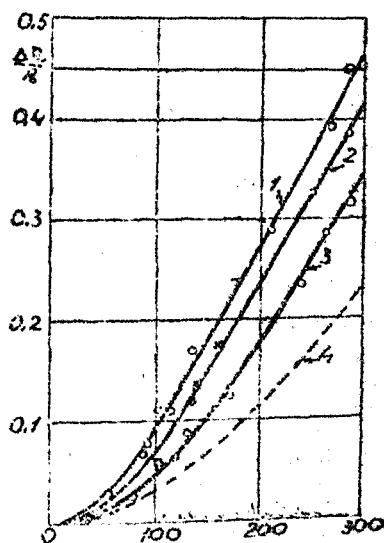
Основная идея экспериментальной установки сводится к следующему. Образец исследуемого металла, преимущественно бывший в виде проволоки, бифилярно наматывался на маленькую катушку и имел 2 потенциальных отвода и 2 токовых, которые располагались на концах обычным путем. Отводы присоединялись также бифилярно к измерительному прибору. Потенциальные концы присоединялись к чувствительному осциллографу, и если ток, идущий через таковые подводки, постоянен, то отбросы осциллографа должны быть пропорциональны сопротивлению исследуемой проволоки.

В нашем случае мы имели большое преимущество в том смысле, что могли пускать по проволоке токи, значительно больше обычных, ибо опасаться нагрева в течение 0,01 сек. не приходится. Возникает только одна трудность — определение электродвижущей силы индукции, возникающей благодаря изменению поля в соленоиде. Но эта последняя может быть исключена тем, что ток пускается по проволоке отдельными импульсами, как показано на кривой 1 рис. 1. Продолжительность импульса была в 3-4 раза меньше, нежели продолжительность тока в соленоиде (кривая *H*), и очевидно ток в осциллографе, измеряющем разность потенциалов (кривая *P*), обусловленный изменением магнитного

* Proc. Roy. Soc. A. 119, 358—443, 1928; 123, 292—372, 1929.

поля, будет таким же, но ток, обусловленный разностью потенциалов, зависящий от сопротивления проволоки, будет налагаться на его максимум, и амплитуда при каждом выключении или приключении тока в проволоке будет пропорциональна сопротивлению проволоки.

Таким путем были исследованы 35 различных металлов, некоторые из них при низких температурах, так как в этом случае изменение сопротивления значительнее, нежели при комнатной температуре. Было найдено, что за исключением ферромагнитных металлов изменение сопротивления в большинстве металлов следует квадратичному закону в слабых полях, как это было установлено давно Петтерсоном* и др., но в сильных полях этот закон переходит в линейный. В качестве примера на рис. 4 приведены кривые для трех медных проволок. Второе интересное явление, которое мы нашли, заключается в том, что физические свойства проволоки оказывают существенное влияние на форму кривой. Таким образом у наиболее чистой и лучше всего



Поле (миллигаусс)

Рис. 4.

отожженной проволоки квадратичная часть — наиболее короткая и раньше начинается линейная часть (рис. 4). Это было найдено у всех без исключения образцов. Это привело автора к предположению об аналогичности увеличения сопротивления под влиянием химических и физических примесей вещества с увеличением сопротивления под влиянием возмущающего действия магнитного поля. Полагая, что внутреннее возмущение производит то же действие, как некоторое гипотетическое поле H_0 , ориентированное произвольно

* Patterson, Phil. Mag. 3, 642, 1902.

по всем направлениям, и что истинное изменение сопротивления пропорционально результирующему вектору внутреннего магнитного поля, можно легко получить формулу для изменения сопротивления; именно относительное увеличение сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R} = \beta \frac{H^2}{H_k^2} \quad H < H_k$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \beta \left(H - H_k + \frac{H_k^2}{34} \right) \quad H > H_k$$

где β — постоянная для данного материала.

Из этой гипотезы вытекает, что в идеальном, совершенном кристалле рассеивающий фактор может быть очень малым и линейный закон должен иметь место почти с самого начала и может быть наблюден в обычных магнитных полях. Кристаллы кадмия, цинка и олова были изучены К. Д. Синельниковым и мной лично, и действительно было найдено, что в случае изготовления достаточно совершенного кристалла линейный закон начинался при полях ниже 2 тыс. гаусс, вместо 30 тыс. и 60 тыс. гаусс в случае проволоки. На самом деле совсем не так просто получить хороший кристалл. Действительно оказалось, что нельзя например брать кристалл в руки, так как ничтожное давление, оказываемое при этом, полностью портит кристалл. Удавалось получить совершенный кристалл, который давал линейный закон при самых низких полях; для этого исследуемый кристаллический стержень растился вместе с отрезками к нему, которые были сделаны из того же металла, и вносился в магнитное поле без малейших деформаций. Способ выращивания кристаллов аналогичен описанному автором для кристаллов висмута: * металл просто выращивался свободно на кварцевой пластинке, так что не приходилось разбивать стеклянной трубки при вынимании кристалла. Каждый такой кристалл после охлаждения его жидким воздухом в течение нескольких часов увеличивал свое со-

* Kapitza, Proc. Roy. Soc. A. 119, 363, 1928.

противление, и линейный закон начинался при более высоких полях, нежели до охлаждения.

Такие кристаллы обладали также и меньшим сопротивлением в жидком воздухе, нежели кристаллы тех же металлов, исследованных ранее (несовершенные кристаллы). Например, в случае наилучшего кристалла Cd отношение его сопротивления при комнатной температуре к сопротивлению при температуре жидкого воздуха было 0,75, вместо 0,25, полученного для кристалла того же металла Мейснером.* Но после многократных охлаждений кристалл постепенно приобретает более высокое сопротивление 0,21. Рентгенографический анализ не показал разницы между испорченным кристаллом и совершенным, это показывает, что искажения, произведенные нагревом и охлаждением кристалла, весьма малы, но тем не менее они достаточны для заметного изменения проводящих свойств. Эти исследования дали много интересных результатов, которые подкрепляют высказанную нами гипотезу и в настоящее время готовятся к печати.

Второй пункт, вытекающий из нашей гипотезы, заключается в том, что сопротивление, обусловленное возмущающим фактором, может быть легко получено из кривой изменения сопротивления в сильных магнитных полях, если провести касательную к кривой. Можно доказать, что отрезок от начала координат, где эта касательная пересекает ось абсцисс, равен дополнительному сопротивлению, обусловленному возмущениями. Естественно положить, что это дополнительное сопротивление не должно зависеть от температуры и должно равняться остаточному сопротивлению при абсолютном нуле.

Это дает возможность проверить нашу гипотезу, и для этой цели мы измерили достаточное сопротивление образцов, над которыми мы экспериментировали. Это еще не может дать окончательного ответа, для этого потребовалась бы температура ниже температуры жидкого водорода, что пока не осуществимо в нашей лаборатории. Результаты

* Meissner, Z. Physik 26, 708, 1928.

этих исследований показали, что в пределах точности 30—40% остаточное сопротивление, измеренное при температурах жидкого водорода, и дополнительное сопротивление, измеренное в магнитном поле, сходятся. В нижеприведенной таблице приведены некоторые численные результаты исследований.

Таблица 1

Металл	Остаточное сопротивл. при 14 К относительно сопротивления при комнатной темпера- туре	Дополнительное сопротивл., выделенное посредством магнитных измерений	
Медь, жестко про- катанная	0,047	0,031	кубиче- ские металлы
Медь, такая же	0,036	0,027	
Медь, отожженная	0,028	0,017	
Золото	0,017	0,015	
	0,035	0,024	
	0,048	0,05	
	0,082	0,062	
	0,007	0,011	не кубич. металлы
	< 0,0075	0,0615	
	< 0,0034	0,031	
	0,056	0,003	

Можно видеть, что во всех металлах с кубической решеткой совпадение имеет место с точностью, не выходящей за пределы ошибок и приближенности теоретического предположения, и это, я думаю, несомненно не есть случайность. В случае не кубической решетки металлов, кадмия, цинка и галлия, безнадежно искать какого-нибудь совпадения. Это может быть легко объяснено недостаточностью основного допущения, что дополнительное сопротивление не зависит от температуры. В некубических кристаллах это едва ли имеет место, так в этом легко убедиться, если посмотреть данные для наилучшего кристалла кадмия, который вырастил Синельников и мы сами.

При температуре жидкого воздуха сопротивление его составляло 0,175 сопротивления при комнатной температуре, тогда как то же отношение для кристалла Мейснера равнялось 0,254. Мы можем таким образом ожидать, что остаточное сопротивление кристалла Мейснера не будет

превышать $0,254 - 0,175 = 0,079$. Измерения при температуре жидкого гелия показали, что остаточное сопротивление кристалла Мейснера равно 0,00047 или слишком в 100 раз меньше.

Это означает, что дополнительное сопротивление должно зависеть от температуры. Возможно, что в случае, когда мы имели совокупность маленьких кристалликов не кубической системы, тепловое расширение было различным по разным осям кристалла, и при охлаждении или нагревании такого стержня, образовывались натяжения. Действие этих натяжений и являлось причиной изменения добавочного сопротивления. Благодаря легкости, с которой чистый кристалл может деформироваться, нельзя ожидать даже в случае чистого вещества очень хорошего совпадения между разными остаточными сопротивлениями, если не предпринять особых экспериментальных предосторожностей, и это вероятно является причиной неполного совпадения остаточного и добавочного сопротивлений кристаллов золота, как наблюдали Мейснер и Шефферс. * В настоящее время исследования изменения сопротивления металлов в сильных магнитных полях открывают новые возможности нахождения идеального сопротивления металлов и вероятно указывают, что ход изменения сопротивления с температурой, в особенности при низких температурах, должен быть несколько более быстрым, нежели думали ранее. Для окончательного выяснения этого вопроса необходимо проделать еще много экспериментальных исследований и принять большие предосторожности в отношении совершенства и чистоты исследуемых образцов.

Магнитная восприимчивость

Ближайшие направления, в котором пойдут исследования с сильными магнитными полями, обнимут собой магнитную восприимчивость и магнитострикцию. Снова, как и в предыдущем случае, напряжение магнитного поля позволяет

* Meissner und Scheffers, Z. Physik 30, 827—836, 1929.
Kapitza, Proc. Roy. Soc. (A) 126, 683, 1930.

проделать эти исследования только в течение малой доли секунды, и масштаб явления сильно увеличивается. Например, если взять грамм какого-нибудь слабо магнитного вещества, с магнитной восприимчивостью χ порядка 10^{-8} и поместить его в поле в 300 тыс. гаусс с неоднородностью в 10% на 1 см, мы будем иметь $\frac{dH}{dx} = 30$ тыс. Сила, испытываемая веществом

$$F = \chi H \frac{dH}{dx} \text{ на грамм.}$$

как нетрудно видеть, будет порядка 10 на грамм.

Вопрос упирается в конструкцию весов с апериодическим затуханием и собственной частотой около 100 колебаний в секунду и с чувствительностью, достаточной для обнаружения силы в 10 г. Можно легко показать, что подходящие весы с собственной частотой в 1000 кол/сек, имеющие массу в 1-2 г, сместятся под влиянием силы в 10 г только на $10^{-5} - 10^{-4}$ см; пока, значит, для наблюдения такого смещения мы должны уметь его увеличить примерно в 10^5 раз. После целого ряда попыток был изобретен следующий гидравлический способ увеличения, который оказался очень удачным. Схематический чертеж приведен на рис. 5. Прибор состоит из гибкой диафрагмы 1, к которой привешивается исследуемый образец. Диафрагма закрыта небольшой камерой 3 с маленьким отверстием 4. Все пространство над камерой и диафрагмой было заполнено маслом, при чем было предусмотрено, чтобы туда не попал воздух. Когда диафрагма смещалась под влиянием силы, действующей на образец, масло проходило через отверстие 4 со скоростью большей, нежели скорость смещения диафрагмы. Таким образом, мы получили увеличение в 50 раз. Для регистрации движения масла через отверстие перед последним было свободно подвешено маленькое зеркальце сечением в $0,5 \text{ см}^2$. Движущееся масло отклоняло зеркальце, что давало отклонение зайчика от пучка света 6 на движущейся фотографической пластинке. Этот оптический рычаг дал еще 2000-кратное увеличение, которое таким образом до-

стигло 100 тыс. Подходящим выбором толщины диафрагмы и вязкости масла можно установить весы на требуемую чувствительность и одновременно сделать так, чтобы они имели аperiодическое затухание. Было найдено, что в течение короткого времени эксперимента маленькое зеркальце в точности следовало движению масла без всякого отставания, но медленные движения масла, обусловленные температурными расширениями прибора и т. п., не давали никакого смещения зеркальца, которое удерживалось в покое своей силой тяжести. При помощи этих весов, которые только недавно были установлены, мы изучали магнитную восприимчивость аморфного висмута при обычных температурах, но никакого отклонения от линейного закона намагничивания до полей 300 тыс. гаусс не было найдено. Можно надеяться, что эти весы позволят нам исследовать при низких температурах насыщение парамагнитных тел и определить таким образом значение элементарного магнитного момента. Нужно отметить, что наш метод измерения магнитной восприимчивости отличается от обычно применяемого в постоянном поле. В нашем случае мы имеем дело не с изотермическим намагничиванием, но с адиабатическим, так как в течение короткого опыта образец не успеет притти в равновесие (тепловое) с окружающей средой. Это изменение температуры образца при намагничивании, которое впервые было рассчитано Ланжевеном,* может быть заметно до самых низких температур. В таких веществах как висмут, диамагнетизм которых возрастает с понижением температуры, можно намагничиванием получить более низкие температуры.

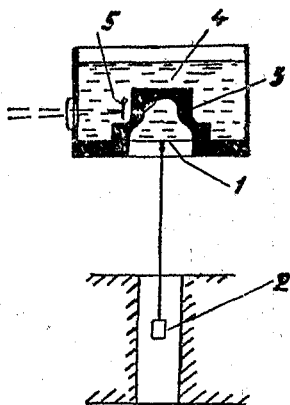


Рис. 5.

* Langevin, Ann. de Phys, VIII, 5, 123. 1905.

Магнитострикция

Если вещество поместить в магнитное поле, его форма может изменяться под влиянием многих причин. Один из первых эффектов, который мы можем назвать классической магнитострикцией, обусловлен напряжениями, образованными магнитными силами, с которыми действуют друг на друга оба полюса намагниченного тела. Этот эффект для диамагнитных тел, как например висмут, в полях в 300 килогаусс имеет весьма малую величину, достигает порядка 10^{-6} и не представляет особого интереса для изучения магнитных свойств тела, ибо он может быть вычислен из упругих и магнитных констант данного тела. С другой стороны, мы можем ожидать, что должны быть имеют место еще и другие явления, обусловленные искажением электродинамического строения атомов металла, которые могут сказаться на изменении формы тела. Так как величина этого явления еще теоретически не вычислена, мы могли только придумать метод для измерения магнитострикции и посмотреть, не окажется ли она случайно больше, нежели классическая магнитострикция.

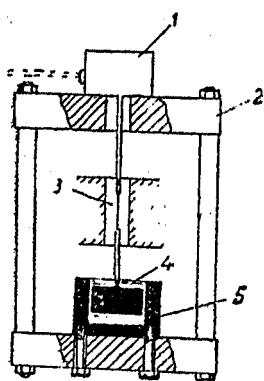


Рис. 6.

Установка, примененная для магнитострикции, очень похожа на ту, при помощи которой мы изучали магнитную восприимчивость и которая описана выше. Устройство схематически изображено на рис. 6. Весы 1 укреплены на очень массивном остова 2, и стержень 3 из исследуемого вещества прикреплен к поршню 4 значительной массы, который может двигаться в небольшом зазоре в цилиндре 5, хорошо укрепленном на остова 2. Пространство под и над поршнем 4 заполнено маслом. Соленоид окружает стержень. Очевидно, что если стержень изменит свою длину в течение 0,01 сек., поршень не сможет за это время переместиться вследствие своей большой инерции и вязкости масла, и

все движение передается пластинке, и весы увеличат изменение длины в 100 000 раз. С другой стороны, всякие медленные изменения длины стержня или связанных с ним частей, происходящие под влиянием температуры, передадутся поршню, и таким образом, можно исключить все искажения, обусловливаемые температурой, которые при обычных способах измерения причиняют многочисленные неудобства. Если увеличение, даваемое весами 10^{-5} и длина образца несколько сантиметров, то на этой установке можно заметить изменение длины Δl порядка 10^{-7} . Первым веществом, которое мы исследовали, был протянутый висмутовый стержень, который показал маленькое сокращение, которое было несколько больше, нежели ожидаемое по классической магнитострикции. Когда висмутовый стержень выращивался в виде кристалла, наблюдался более значительный эффект, который мог быть объяснен только магнитострикцией, обусловленной влиянием магнитного поля на связи в решетке.

Более детальное исследование показало, что если тригональная ось параллельна полю, стержень удлиняется; когда же эта ось перпендикулярна к полю, стержень сокращается. Сокращение и удлинение в одном и том же поле оказалось практически одинаковым, так что в мелкокристаллическом стержне одно компенсировало другое, чем и объясняется отсутствие эффекта в нем. Опыты показали, что изменение длины в кристалле висмута пропорционально квадрату магнитного поля и значительно возрастает с понижением температуры. При температуре жидкого азота магнитострикция во много раз больше, нежели при комнатной, и относительное изменение длины $\frac{\Delta l}{l}$ в поле 300 тыс. гаусс достигает значения $5 \cdot 10^{-5}$, что превышает значения, найденные раньше для некоторых ферромагнитных тел. Эти результаты объясняют также, почему прежние попытки обнаружить магнитострикцию в висмуте оказались неудачными. * В этих опытах максимальное поле достигало только

* E. van Aubert, Phys. Rev. 16, 60, 1903.

3 тыс. гаусс, так что даже в монокристалле висмута магнитострикция могла составлять только $5 \cdot 10^{-8}$, а так как на самом деле опыт производился над поликристаллическим стержнем, то эффект мог быть порядка 10^{-10} , что слишком мало для измерения.

Мы имеем также возможность обнаружить магнитострикцию и в других кристаллах некубической системы, вроде олова, кадмия и графита, но здесь эффект значительно меньше и в настоящее время еще исследуется.

Общая картина явления рисуется примерно следующим образом. Элементарная ячейка кристалла висмута весьма похожа на куб, слегка вытянутый вдоль одной из его диагоналей, которая совпадает по направлению с тригональной осью. В магнитном поле очевидно такой куб становится еще более вытянутым в том же направлении.

Из общей теории магнитострикции мы должны ожидать, что такая деформация решетки, если она может быть обусловлена внешними напряжениями, должна привести к увеличению диамагнитной восприимчивости в перпендикулярном направлении к оси кристалла и уменьшению вдоль нее. Мы также сделали несколько исследований магнитострикции Ni и нашли, что в Ni после приложения поля в несколько тысяч гаусс не замечено дальнейшего изменения длины вплоть до полей в 100 тыс. гаусс. Из изучения всех этих явлений очевидно, что главнейший интерес в исследовании магнитных свойств твердого тела представляют кристаллы и крайне важно иметь возможно совершенный кристалл. Три основных фактора искажают решетку кристалла: первое — это загрязнения, второе — фактор напряжения и третий — температура. И главное будущее магнитных исследований вероятно лежит в изучении очень чисто и хорошо выращенных кристаллов в очень низких температурах. Сильные магнитные поля наиболее продуктивно устраняют действия искажения в кристалле наиболее правильным путем и позволяют найти магнитные свойства в этих простых условиях.

Есть еще и другие области для исследования, как дей-

ствие магнитного поля на поглощение, испускание и рассеяние света (эффект Зеемана, эффект Фарадея и др.). Наши работы уже показали, что это также может быть проделано в кратковременно действующих полях, так как например расщепление лишь при эффекте Зеемана настолько велико, что можно применить установку [большой светосилы, а применение сильного источника света позволяет уменьшить время экспозиции до 0,01 сек. Другая область магнитных исследований, как отклонение α - и β -лучей, также представляет значительный интерес, и замечательно, что этот метод можно значительно легче применить для целого ряда физических исследований, чем это кажется на первый взгляд. ¹