

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

538.12

**СИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ\*)***Г. Ко́льм, А. Фри́ман*

Время от времени та или иная экспериментальная проблема одновременно привлекает к себе внимание ученых, работающих в различных областях науки. Такой проблемой может оказаться какая-то помеха на пути дальнейших исследований, с которой столкнулись в процессе работы. Или же это может быть необходимость применения новой техники, новых приборов, разработка которых обещает открыть широкий простор для дальнейших исследований.

В любом случае это обычно приводит к возникновению нового раздела в науке, который координирует цели и средства заинтересованных сторон. После короткого, но бурного периода исследований первоначальная проблема оказывается разрешенной. При этом возникающая новая научная ветвь теряет свое право на существование. Она вновь растворяется в тех отраслях науки, которые дали ей жизнь. Одним из примеров такого рода может служить криогенная физика (физика низких температур). В настоящий момент ее развитие достигает своего конечного этапа. В то же время имеются примеры другого рода, когда новая отрасль науки еще только входит в основную стадию своего развития. К ним относится изучение поведения различных веществ под действием сильных магнитных полей и связанные с этим проблемы создания таких полей.

Потребность в применении сильных магнитных полей ощущается почти во всех основных областях физики: в физике высоких энергий, в физике твердого тела, в геофизике и даже в биофизике. Во многих отношениях она напоминает необходимость использования все больших телескопов в астрономии, поскольку в обоих случаях при этом удается «увеличить разрешающую способность», т. е. лучше различить более мелкие детали. Хотя первые шаги к получению сильных магнитных полей были предприняты еще 30 лет назад, однако только теперь эта задача привлекла к себе такое же пристальное внимание и широкую поддержку, которые явились залогом успеха в других отраслях науки, например при создании телескопов, ускорителей частиц, ядерных реакторов и больших счетных машин. Первая попытка сопоставимого размаха в области получения сильных магнитных полей была предпринята в 1963 г., когда была основана Национальная лаборатория при Массачусетском технологическом институте. Эта новая лаборатория является объединенным исследователь-

\*) Н. Ко́льм, А. Фри́ман, Intense Magnetic Fields, Scientific American 212 (4), 66 (1965). Перевод В. Игнатовича.

В оригинале — резюме: «В национальной магнитной лаборатории получены поля напряженностью 250 000 га. Это в 500 000 раз превышает магнитное поле Земли».

ским центром. Сейчас создание подобных институтов планируется также во Франции, Англии и СССР. Наступает золотой век исследований с сильными магнитными полями. Важно подчеркнуть, что даже на этой довольно ранней стадии в области создания мощных магнитных полей мы скорее, чем где-либо еще, сможем превзойти природу.

#### ЧЕТЫРЕ ОСНОВНЫХ МАГНИТНЫХ ЭФФЕКТА

Магнитное поле можно лучше всего понять, если описать четыре основных эффекта, посредством которых можно обнаружить это поле: 1) Постоянное однородное магнитное поле заставляет поворачиваться магнитный диполь; говорят, что на диполь действует вращающий момент. 2) Однородное постоянное магнитное поле искривляет траекторию движения электрического заряда. 3) Если поле неоднородно, т. е. каким-то

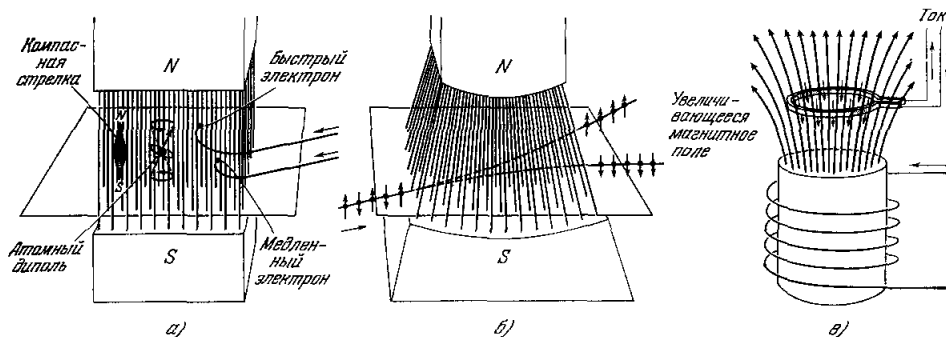


Рис. 1. На примерах показаны четыре основных эффекта магнитного поля.

а) Однородное стационарное магнитное поле создает вращающий момент, действующий на два типа магнитных диполей: компасную стрелку и атомный диполь. Атомный диполь прецессирует, или вращается, вокруг линий магнитного поля с некоторой характеристической частотой. Кроме того, однородное стационарное поле искривляет траектории движущихся электрических зарядов: на рисунке а) показано, как два электрона за одинаковый промежуток времени проходят разные круговые орбиты. б) В неоднородном поле на пучок магнитных диполей действует сила: пучок разделяется на два отдельных пучка, в которых направления магнитных диполей противоположны. в) Нарастающее поле действует с некоторой силой на покоящиеся электрические заряды: заряды движутся в таком направлении, чтобы противодействовать изменению магнитного поля. Индуцированный ток называется вихревым.

образом меняется в пространстве, то оно заставляет магнитный диполь двигаться. 4) Если поле непостоянно во времени, то оно заставляет двигаться электрический заряд (рис. 1).

Наиболее известным примером магнитного диполя является магнитная стрелка. Следя за ее поведением в магнитном поле Земли, Уильям Гильберт еще в 1600 г. сделал вывод о том, что Земля — тоже магнитный диполь, только гигантских размеров. Много позднее стало известно, что и замкнутый виток тока ведет себя как магнитный диполь, а магнетизм стрелки компаса обусловлен тем, что большое число атомных диполей, каждый из которых есть крошечный виток с током, устанавливается более или менее параллельно. Более того, вообще все наблюдавшиеся до сих пор магнитные поля являются дипольными по своей природе. Их можно приписать электрическим зарядам, движущимся по окружности. Теоретически в природе должны существовать отдельные магнитные полюсы — монополи, но экспериментально они еще не обнаружены.

Ток атомного диполя обусловлен спиновым и орбитальным вращением заряженных частиц (протонов или электронов). А так как вращающиеся заряженные частицы обладают массой и, следовательно, моментом количества движения, атомный диполь ведет себя во внешних полях как гироскоп. Он не устанавливается строго параллельно приложенному

магнитному полю, а прецессирует, или поворачивается, вокруг силовой линии поля с характеристической частотой. Синхронная прецессия большого числа атомных диполей в твердом теле проявляется в виде макроскопического эффекта, известного как «магнитный резонанс». Этот эффект состоит в том, что тело поглощает электромагнитные волны на так называемой «резонансной частоте». Эта частота пропорциональна напряженности приложенного магнитного поля. В полях, получаемых на обычных лабораторных магнитах, резонансная частота лежит в микроволновой области электромагнитного спектра; более сильные поля могут поднять

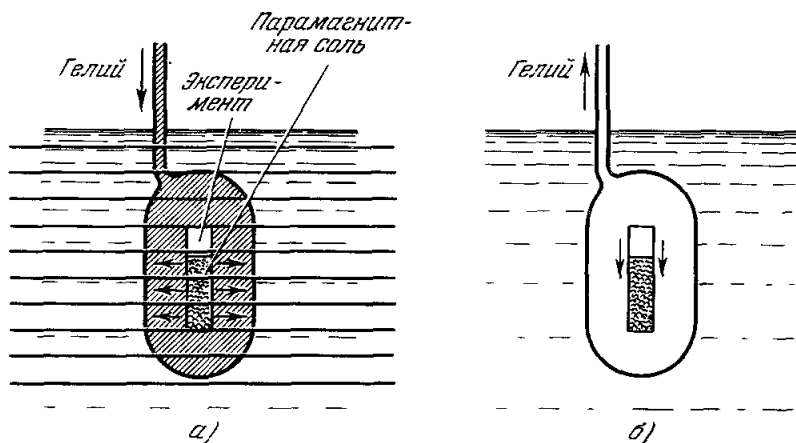


Рис. 2. Адиабатическое размагничивание — метод получения очень низких температур с помощью магнитного поля.

а) Ампула с экспериментальным объемом и какой-нибудь парамагнитной солью помещается в вакуумную камеру, которая в свою очередь погружается в сосуд с жидким гелием при  $4^\circ \text{K}$ . В вакуумную камеру вводится газообразный гелий. Включается сильное магнитное поле, которое заставляет хаотически колеблющиеся атомные диполи соли выстроиться параллельно. При этом освобождается энергия в виде тепла. б) После охлаждения соли вновь до  $4^\circ \text{K}$  газообразный гелий откачивается из вакуумной камеры, тем самым ампула изолируется от жидкого гелия. После этого магнитное поле выключается. Диполи снова занимают случайное положение, отбрав энергию от других видов теплового движения. Таким путем соль может быть охлаждена до малых долей градуса по Кельвину. Чем сильнее приложенное поле, тем ниже конечная температура.

эту частоту до инфракрасной области. В кристаллических телах резонансная частота зависит от сложного взаимодействия атомных диполей. Большая часть наших знаний об атомных диполях и их взаимодействиях получена благодаря явлению магнитного резонанса.

Другое важное применение сильного магнитного поля основано на его способности выстраивать параллельно атомные диполи. Это позволяет получать очень низкие температуры с помощью адиабатического, или теплоизолированного, размагничивания (рис. 2). В ряде веществ, например в некоторых солях, взаимодействия вращающихся электронов так слабы, что соседние атомные диполи не устанавливаются параллельно, как, например, диполи в компасной стрелке, а ведут себя независимо друг от друга. Такие вещества называются парамагнитными.

Энергия случайных колебаний магнитных диполей в парамагнитной соли составляет часть ее тепловой энергии. Когда приложенное магнитное поле достаточно сильно, чтобы заставить часть диполей в такой соли выстроиться параллельно, связанная с ними доля тепловой энергии переходит к другим видам движения. При этом соль нагревается. В присутствии магнитного поля у нее можно отнять всю тепловую энергию и охладить соль до самой низкой температуры, какая только достижима

с помощью самых эффективных известных средств, например таких, как метод откачки паров из сосуда с жидким гелием. После охлаждения соли до  $1^\circ \text{K}$  ее изолируют от жидкого гелия, создавая вакуум в окружающем пространстве. Затем выключают магнитное поле. Ориентации магнитных диполей опять становятся хаотическими. На это расходуется энергия других видов теплового движения. Таким способом соль охлаждается до малых долей градуса по Кельвину, причем чем сильнее было приложенное магнитное поле, тем ниже будет конечная температура. В процессе адиабатического размагничивания отчетливо проявляются определенные законы статистической физики. Согласно этим законам случайность проявляет себя даже ценой энергии, и для установления порядка

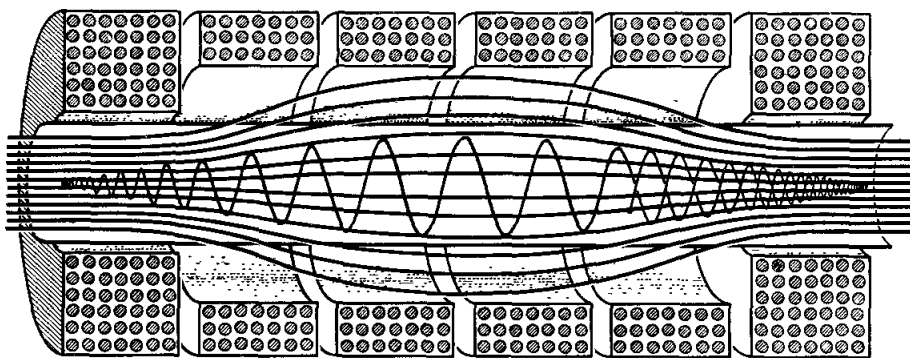


Рис. 3. Магнитная бутылка, предназначенная для удержания плазмы (высоко-ионизованного газа) при высокой температуре.

Поле должно быть достаточно сильным и обладать определенной конфигурацией. Магнитная бутылка должна удерживать внутри все частицы плазмы так, чтобы плазма могла быть нагрета до чрезвычайно высоких температур, необходимых для термоядерной реакции. Любой материальный сосуд мгновенно испарился бы при таких температурах. На рисунке показано, как одна из частиц плазмы отражается от конца катушки, где поле более сильное.

в системе требуется затрата энергии. Способность магнитного поля создавать порядок в системе является одним из полезнейших его свойств.

Второй эффект, с помощью которого проявляется действие магнитного поля, а именно искривление траектории движущегося электрического заряда, замечателен тем, что сила, с которой магнитное поле действует на заряд, направлена всегда под прямым углом к направлению его движения. Именно это свойство магнитного поля позволяет управлять заряженными частицами. Например, магнитные поля используются в телевизионных трубках и электронных микроскопах для отклонения и фокусировки электронных пучков; в детекторах частиц и масс-спектрографах — для того чтобы разделить и распознать частицы с разными зарядами или моментами; в ускорителях — для того чтобы удерживать частицы на круговых орбитах.

Во всех этих примерах магнитное поле используется для управления заряженными частицами, которые движутся более или менее когерентно в одном пучке. Однако существуют два важных случая, когда магнитное поле управляет некогерентным движением заряженных частиц. Первый случай — это удержание плазмы, или сильно разреженного ионизованного газа. При высокой температуре плазму удерживают в достаточно сильном магнитном поле специальной формы (рис. 3).

Теоретически магнитная бутылка должна удерживать плазменные частицы без утечки энергии, так что их можно нагреть до темпе-

ратуры, необходимой для термоядерной реакции. Сосуд, сделанный из любого вещества, при такой высокой температуре мгновенно испарился бы, так как он поглощал бы слишком много тепла из плазмы.

Магнитное поле может также управлять заряженными частицами, движущимися хаотически внутри проводника. Под действием приложенного магнитного поля частицы, продолжая двигаться поступательно в разных направлениях с разными скоростями, будут также вращаться по круговым орбитам, как в циклотроне. Частота вращения зависит от отношения заряда к массе. Поэтому, если это отношение одинаково для всех частиц, то у них будет одинакова и частота вращения, только более быстрые частицы будут вращаться по широким орбитам, а менее быстрые — по орбитам меньшего радиуса. Таким образом, в случайном движении устанавливается некоторая гармония. Эта гармония (если только частицы сталкиваются друг с другом не настолько часто, чтобы разрушить ее) проявляется в виде макроскопического эффекта (так называемого «циклотронного резонанса»). Это явление можно обнаружить даже в немагнитных веществах, если только число носителей заряда в них не настолько велико, что время свободного пробега этих носителей меньше их периода вращения. Для некоторых веществ, например для полупроводников с большим количеством примесей, требуются сильные магнитные поля, чтобы соответствующие периоды вращения были малы по сравнению с временем свободного пробега. Поэтому циклотронная частота у таких веществ очень высока.

Большая часть наших знаний о носителях заряда в полупроводниках получена именно путем наблюдения циклотронного резонанса в микроволновом диапазоне частот. Недавно, после того как стали доступны еще более сильные магнитные поля, были получены сведения о металлах на инфракрасных частотах.

Третий эффект магнитного поля, заключающийся в том, что на магнитный диполь в неоднородном поле действует сила, проявляется, например, в притяжении или отталкивании двух прямых магнитов или двух кусков магнитной руды. Именно благодаря этому эффекту человек впервые обратил внимание на явление магнетизма. Этот эффект используется в современных исследованиях главным образом для разделения ядер, атомов или молекул, отличающихся друг от друга дипольным моментом. Когда пучок атомов проходит через неоднородное магнитное поле, атомы с большим магнитным моментом отклоняются больше, нежели атомы с меньшим моментом. В сущности этому эффекту мы обязаны большим количеством информации об атомах и молекулах. Благодаря ему было также открыто, что электрон вращается и что нейтрон, не имеющий никакого электрического заряда, тем не менее обладает магнитным моментом.

Четвертый и последний эффект магнитного поля, заключающийся в том, что на стационарный электрический заряд в переменном во времени поле действует сила, есть просто явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем в 1831 г. Это явление служит краеугольным камнем для производства электроэнергии. Благодаря взаимодействию переменного магнитного поля с электрическим возможно распространение энергии в виде электромагнитных волн. Кроме того, явление электромагнитной индукции ответственно за поддержание температуры на нашей планете.

Переменное во времени магнитное поле заставляет электрические заряды двигаться в таком направлении, чтобы препятствовать изменению магнитного поля. Такое движение зарядов называется вихревым током, и этот ток достигает огромной величины, когда магнитное поле изменяется очень быстро. Вихревые токи препятствуют проникновению переменного

магнитного поля в металлы. Это явление используется для концентрации переменного поля и для «холодной обработки» металлов. Благодаря вихревым токам металл можно сжимать и таким образом сращивать детали, избегая целой серии последовательных соединений (рис. 4). Другое применение вихревых токов — нагревание плазмы магнитным сжатием для получения контролируемой термоядерной реакции. Сильные магнитные поля служат, таким образом, как для получения самых низких, так и самых высоких температур. Такова, в конечном счете, полная картина того, как магнитное поле проявляет себя в рамках классической физики

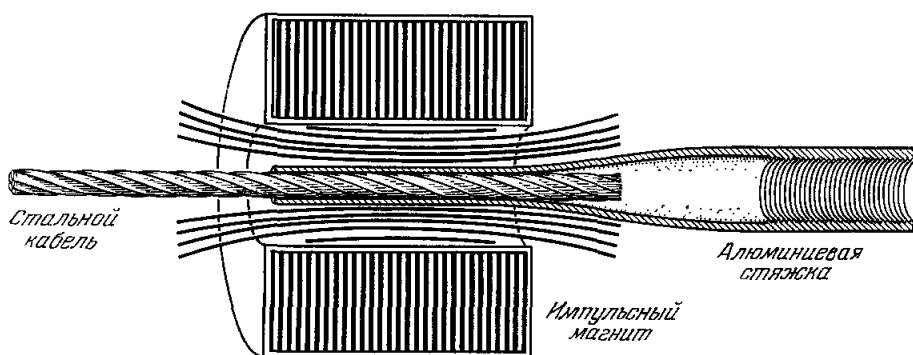


Рис. 4. Металлы можно подвергать «холодной обработке» с помощью процесса, основанного на образовании вихревых токов в металле при быстром изменении окружающего магнитного поля.

Вихревые токи не пропускают импульсное поле внутрь алюминиевой стяжки и сжимают ее, заставляя обогатить кабель с неровной поверхностью гораздо плотнее, чем это возможно сделать с помощью механического обжатия.

и какой вклад в наши знания дают его четыре основных эффекта. Прежде чем обсуждать некоторые важные субмикроскопические проявления этих эффектов в рамках квантовой механики, мы рассмотрим, как в природе и в лаборатории создаются магнитные поля.

### ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Как мы уже говорили, все наблюдаемые магнитные поля являются дипольными, иными словами, их силовые линии образуют замкнутые петли. Следовательно, можно приписать все наблюдаемые магнитные поля циркуляции электрических зарядов (рис. 5), хотя во многих случаях наличие электрического заряда скорее постулируется, чем наблюдается. Ярким примером подобной ситуации является нейтрон. Другой пример — Земля. Ее магнитное поле объясняется довольно хорошо разработанной гипотезой самогенерируемых (self-generating) токов\*), которые никогда прямо не наблюдались. Кстати, величина земного магнитного поля равна приблизительно половине гаусса. Магнитное поле Земли занимает, следовательно, среднее положение между галактическими полями, которые охватывают огромные области, но величина их составляет только несколько тысячных гаусса, и полями в окрестности атомных ядер, имеющих в крошечном объеме пространства величину свыше миллиона гаусс. Магнитные поля, полученные в лаборатории, превзошли атомные поля и по интенсивности; и по занимаемому ими объему.

\*) Имеются в виду токи, вызванные конвективным движением в ядре Земли. (Прим. ред.)

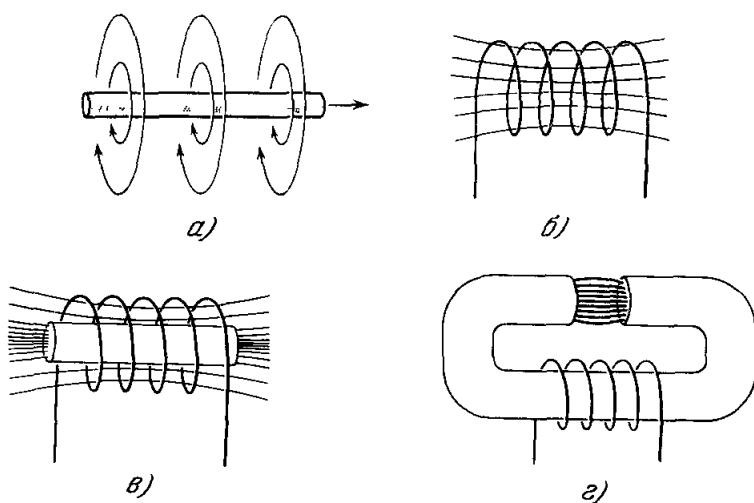


Рис. 5. Магнитные поля в лаборатории могут быть получены четырьмя изображенными здесь способами:

а) Самый простой способ — пропускание тока через провод. б) Силовые линии поля можно «уплотнить», если намотать проволоку в виде соленоида, т. е. спиральной катушки. в) Железный стержень, помещенный в ту же самую катушку, увеличивает напряженность поля в тысячи раз, потому что атомные диполи в железе устанавливаются параллельно полю катушки. В постоянных магнитах часть диполей сохраняет параллельное направление и после того, как катушка с током удалена. г) Железный сердечник может быть топологически деформирован так, чтобы пропустить все магнитные силовые линии через воздушный зазор, как в электромагните на рис. 6.

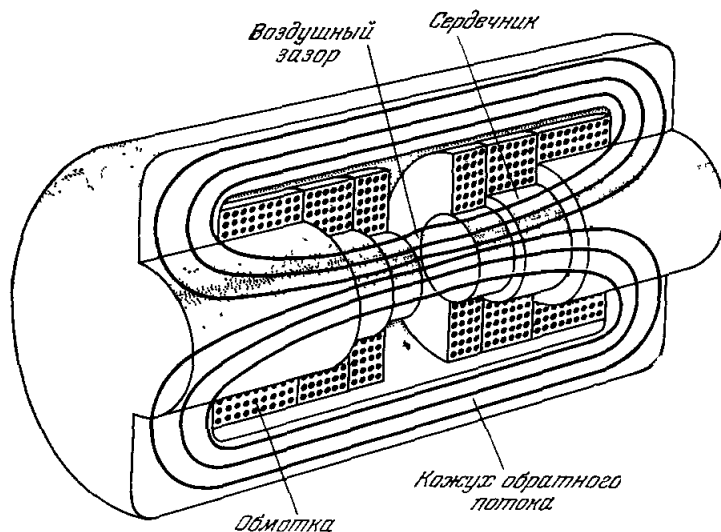


Рис. 6. С помощью электромагнита (железного магнита, намагниченность которого поддерживается электрической катушкой) можно легко получить поле до 30 000 гс.

При этом поле все атомные диполи в железе выстраиваются параллельно и железо становится магнитонасыщенным. Поля с напряженностью, большей чем 30 000 гс, выгоднее создавать внутри катушки без железа.

Некоторые вещества (например, железо, никель, кобальт) являются ферромагнитными. Это означает, что их атомные диполи взаимодействуют настолько сильно, что выстраиваются параллельно друг другу в макроскопических областях, называемых доменами. Когда прикладывается внешнее поле, сами домены ориентируются параллельно полю. Это приводит к появлению дополнительного намагничивания, которое может быть в несколько тысяч раз больше приложенного магнитного поля. Вещества,

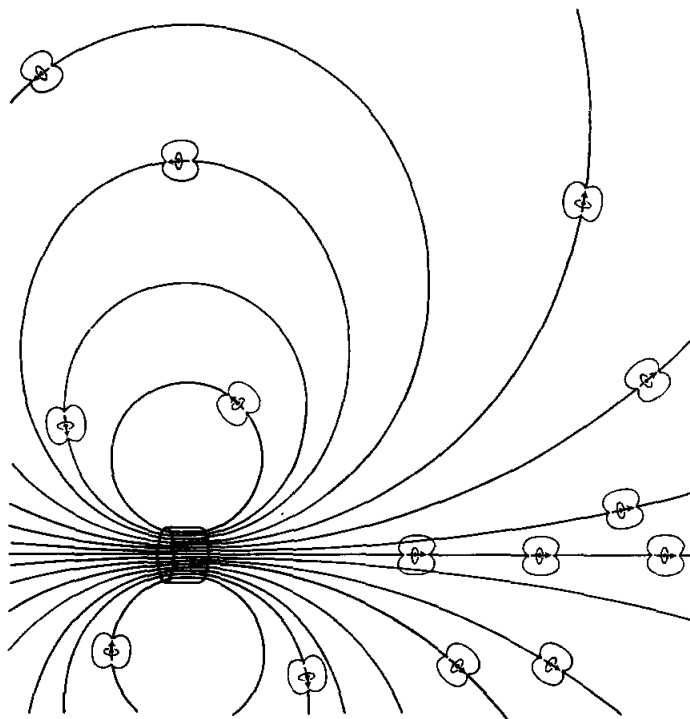


Рис. 7. Теоретически можно создать бесконечно сильное магнитное поле, если окружить воздушный зазор бесконечной толщей магнитонасыщенного железа, намагниченного соответственно в разных направлениях.

По мере того как добавляются последовательные слои железа, поле, создаваемое каждым диполем, падает, как куб расстояния от воздушного зазора, но при этом оказывается что заполняемый железом объем увеличивается тоже как куб расстояния от воздушного зазора.

у которых намагничивание остается после того, как внешнее поле выключено, называются магнитно-«жесткими»; в противном случае они называются «мягкими».

Магнитное поле, которое создает магнитный железняк или другие природные магнитные руды, — порядка нескольких сотен гаусс, а постоянные магниты, сделанные из современных сплавов, могут давать до 10 000 гс. Электромагниты, т. е. железные магниты, намагниченность которых поддерживается с помощью намотанной на них электрической катушки (рис. 6), можно достаточно легко сделать на 30 000 гс. При этой величине поля все атомные диполи полностью выстраиваются параллельно и возрастание тока в катушке не приводит к увеличению намагничивания железа. В этом случае говорят, что железо достигло магнитного насыщения.

В принципе можно создать бесконечно сильные поля, если окружить воздушный зазор в магните железом, достигшим магнитного насыщения, намагниченным соответственно в разных направлениях (рис. 7).



Вклад в магнитное поле от каждого добавочного атомного диполя будет уменьшаться обратно пропорционально кубу расстояния диполя от зазора, но при этом и объем, заполняемый железом, увеличивается в точности пропорционально кубу расстояния от промежутка. Несколько гигантских электромагнитов было построено уже во время первой мировой войны. Одним из них был 110-тонный магнит, построенный в Бельвю во Франции; он давал 70 000 гс. Как и следовало ожидать, количество железа и затраты электрической энергии, необходимой для того, чтобы поддерживать такой магнит намагниченным, оказываются настолько большими, что практически разумным пределом, которого можно достичь намагничиванием железа, следует признать 30 000 гс. Поля свыше 30 000 гс выгоднее создавать внутри соленоида (катушки) без железного сердечника. Но именно благодаря трудностям, возникающим в этом случае, и существует логическая граница между «обычными» и «сильными» магнитными полями. Перешагнуть эту границу удалось только совсем недавно.

При создании сильных магнитных полей возникают две трудности. Обе они связаны с той огромной плотностью тока, которая необходима, если отказаться от применения железа. Хотя магнитное поле обладает запасом энергии подобно сжатой пружине, оно в принципе не требует постоянной затраты работы, чтобы поддерживать поле на заданном уровне. Примером тому служит любой постоянный магнит. Тем не менее создание сильного магнитного поля — это единственный, осуществляемый на практике процесс, коэффициент полезного действия которого равен нулю; вся рассеянная катушкой магнита энергия должна быть отведена в виде тепла, причем вопросы, связанные с теплоотводом, стоят обычно значительно острее, чем проблема снабжения магнита энергией. Таким образом, первой проблемой при создании сильных магнитных полей является проблема охлаждения магнитных катушек.

Вторая трудность связана с механической силой, которая действует на ток, обтекающий магнитное поле. Эта сила представляет собой давление магнитного поля. При 250 000 гс давление достигает предела прочности меди, в результате чего обычная медная катушка, независимо от того, как она укреплена снаружи, начинает растекаться, словно жидкость. При поле в 1 млн. гс плотность энергии магнитного поля эквивалентна плотности энергии тринитротолуола. Поэтому удержать в данном объеме поле в 1 млн. гс не менее трудно, чем удержать химический взрыв. Решение обеих проблем требует массивных сооружений. Но в случае магнитного поля это сооружение должно выдерживать очень большие электрические токи и иметь достаточное количество охлаждающих каналов для отвода огромного количества тепла, создаваемого токами. Практически конструкция не может быть выполнена из материала более прочного, чем медь, так как все более прочные материалы имеют большее электрическое сопротивление и поэтому выделяют такое количество тепла при том же токе, для отвода которого требуется существенно увеличивать число охлаждающих каналов. При этом снижение прочности сооружения оказывается большим, нежели выигрыш, достигнутый за счет применения более прочного материала.

Магнитное давление и количество потребляемой энергии возрастают с увеличением поля внутри данного соленоида пропорционально квадрату напряженности. Для полей свыше 250 000 гс приходится делать очень массивные катушки, в которых ток распределен в большем объеме, для того чтобы давление около центра катушки не превышало допустимого. Но такое распределение тока является менее рациональным, поэтому у электромагнитов более чем на 250 000 гс потребляемая мощность

возрастает быстрее, нежели квадрат напряженности поля. Это в свою очередь приводит к необходимости еще более интенсивного охлаждения. При поле, несколько большем 250 000 гс, потребляемая мощность возрастает до абсурдных даже по астрономическим масштабам значений. Таким образом, практический диапазон сильных постоянных магнитных полей ограничен магнитным насыщением железа при 30 000 гс и механическим пределом прочности меди при 250 000 гс.

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ

К решению тесно связанных между собой проблем мощности и охлаждения, возникающих при создании сильных магнитных полей, можно приблизиться двумя путями: во-первых, используя в конструкции магнитов сверхпроводящие материалы и, во-вторых, создавая не постоянные, а импульсные поля. Еще в 1911 г. было известно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, некоторые вещества не оказывают никакого сопротивления электрическому току. Однако это полезное свойство исчезало в магнитном поле даже средней интенсивности. Затем в 1960 г. было открыто, что некоторые металлические сплавы, такие, как ниобий — олово, остаются сверхпроводящими и в сильных магнитных полях. Новые, сверхпроводящие, сплавы были с тех пор усовершенствованы. Это позволило создавать, без потерь на электрическое сопротивление, магнитные поля до 100 000 гс. За этим пределом проводимость всех лучших известных сплавов падает так быстро, что маловероятно, чтобы в ближайшем будущем техника продвинулась за 170 000 гс.

Сверхпроводящие магниты сослужили хорошую службу. Они сделали нижний диапазон сильных магнитных полей доступным при вполне разумной затрате средств. В конечном счете сверхпроводники внесут свой вклад и в более высокий диапазон магнитных полей, если их использовать во внешней обмотке медных магнитов.

Вклад в поле внутри магнита от внешних витков невелик, однако они непроизводительно потребляют значительную долю всей подводимой электроэнергии, так как их размеры велики. В настоящее время сверхпроводящие сплавы, призванные уменьшить эти потери, стоят еще так же дорого, как и электрические генераторы, которые они должны заменить. Однако работа над сверхпроводящими магнитами продолжается, несмотря на высокую стоимость сплавов, так как эти магниты обещают быть очень полезными в некоторых технических приложениях, а именно там, где требуются умеренно сильные поля в больших объемах (например, в термоядерном реакторе для удержания плазмы и в магнитогидродинамическом генераторе для прямого перевода тепла в электроэнергию).

Сверхпроводящие магниты можно использовать и на спутниках: во-первых, вместо электрических батарей, так как сверхпроводящие катушки сами способны сохранять электроэнергию как угодно долго, и, во-вторых, для защиты космонавтов от быстрых заряженных частиц (вместо тяжелого свинцового покрытия), так как эти частицы отклоняются магнитным полем. Кроме того, сверхпроводники могут найти себе применение и в навигационных приборах, например в бесфрикционном гироскопе на магнитной подставке, который выгодно использовать в системе инерционного управления кораблем.

Когда-нибудь широкое применение сверхпроводников совершит революционный переворот в энергетической промышленности, так как с их помощью можно производить, преобразовывать и передавать электроэнергию без потерь. Однако реальность всех этих технических приложе-

ний зависит от успеха дальнейших исследований. А для исследовательских работ требуются сильные магнитные поля. Поэтому использование явления сверхпроводимости не только не уменьшило, а, наоборот, увеличило спрос на сильные магниты, сделанные из обычных проводников.

### ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТЫ

К решению проблем мощности и охлаждения в мощных магнитах можно подойти и с другой стороны, а именно можно создавать поля такими короткими импульсами, за время прохождения которых магнит не успевает значительно нагреться. При этом тепловая инерция предохраняет катушку от испарения, а механическая инерция спасает ее от взрывных магнитных сил. Еще в 1924 г. советский физик П. Капица, работая в те времена в Кембриджском университете, сумел создать поле в 500 000 гс в течение нескольких тысячных долей секунды. Он использовал короткое замыкание большого генератора переменного тока на маленькую катушку, состоящую из толстого цилиндрического витка, причем замыкание длилось только в течение времени, равного одному полупериоду тока. Капице удалось провести множество физических измерений за этот короткий промежуток времени. Его оптические гальванометры были установлены достаточно далеко от генератора, так что они могли записывать результат эксперимента на свободно падающую фотопластинку прежде, чем до них доходили колебания Земли, вызванные взрывом от короткого замыкания. Однако никакая изобретательность не может компенсировать недостаток времени. Некоторые эксперименты требуют для их проведения большого времени, а аппаратура, примененная Капицей, не могла обеспечить этого.

Хотя импульсные поля никогда не ликвидируют полностью потребность в сильных постоянных полях, работа над их усовершенствованием продолжается. Совсем недавно были получены еще более сильные импульсные поля. Первый успех после работ Капицы пришел в 1956 г., когда Симон Фонер и один из нас (Кольм) получили импульсное поле в 750 000 гс в лаборатории Линкольна МТИ (Массачусетского технологического института). Использовался разряд батареи конденсаторов через соленоид. Соленоид был сделан из сплава меди и бериллия, который обладает большей прочностью, но и большим сопротивлением, чем чистая медь. Несмотря на довольно большое сопротивление соленоида, выделение тепла за время быстрого перехода электрической энергии конденсаторов в магнитную энергию катушки и обратно оказалось несущественным. Импульс магнитного поля длился всего только 120 миллионных долей секунды, но тем не менее нам удалось впервые наблюдать циклотронный резонанс в висмуте на инфракрасных частотах. Впоследствии с помощью той же самой методики были получены поля до 1 млн. гс. Правда, при такой интенсивности катушки редко оставались целыми.

Вскоре мы нашли, что величину импульсов можно значительно увеличить, если воспользоваться упомянутым ранее свойством быстрорастущего магнитного поля. Мы уже говорили, что быстрорастущее поле индуцирует вихревые токи, которые препятствуют проникновению поля в металл. Поэтому можно следующими тремя способами увеличивать плотность потока магнитных силовых линий на единицу площади поперечного сечения (это равносильно увеличению напряженности поля): во-первых, пропуская магнитный поток через металлическую воронку, расположенную внутри импульсной катушки; при этом воронка должна быть более прочной и массивной, чем сама катушка; во-вторых, быстро сжимая жидкое металлическое кольцо, внутри

которого проходит магнитный поток, и, в-третьих, сжимая аналогичным образом твердое металлическое кольцо (при этом сжатие кольца производится взрывом симметрично расположенной вокруг него взрывчатки). Применяя последний метод, З. Фаудер смог получить в Лос-Аламосской лаборатории поле напряженностью 15 млн. *гс* и длительностью импульса в 2 миллионные доли секунды. Можно надеяться, что в скором будущем в подобных условиях, но с использованием более совершенной аппаратуры удастся поставить некоторые эксперименты. Начиная с 1924 г. с помощью импульсной техники был изучен целый ряд явлений. Однако многие эксперименты не удастся провести в импульсных полях. Например, при использовании импульсных полей не удастся достичь сверхнизких температур адиабатическим размагничиванием, а также наблюдать атомные спектры в сильном магнитном поле. Под действием сильного поля некоторые спектральные линии расщепляются на две или более линии. Этот эффект назван именем открывшего его голландского физика Петера Зеемана. По мере того как квантовая механика объясняла атомные спектры, становилось все более важным проследить зеемановское расщепление во все более сильных полях. Но для этого необходимы сильные поля, которые были бы с хорошей степенью точности постоянными, так как для фотографирования слабых спектральных линий требуются экспозиции во многие часы.

#### МАГНИТ БИТТЕРА

Наступление на сильные постоянные магнитные поля начал Фрэнсис Биттер из МТИ. В 1936 г. он построил магнитный соленоид, способный

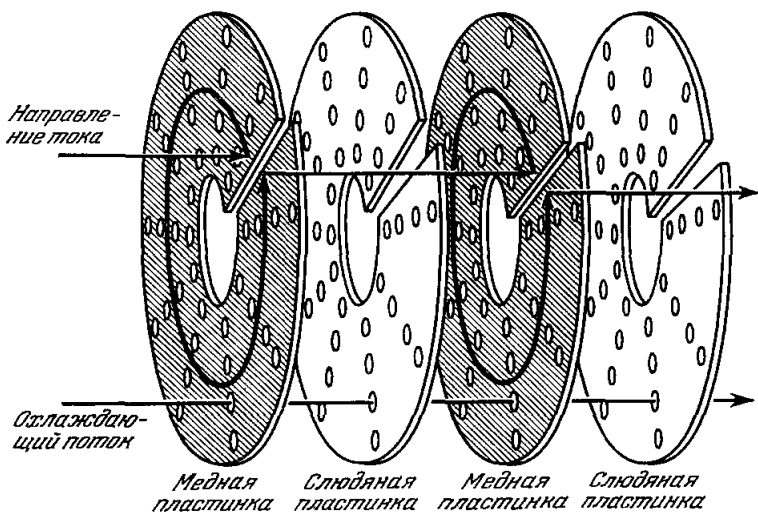


Рис. 8. Соленоид Биттера (изобретенный Фрэнсисом Биттером из Массачусетского технологического института в 1936 г.) является прототипом многих современных мощных магнитов, в том числе и магнита на 250 000 *гс*.

Прорезанные медные диски разделяются изолирующими слюдяными дисками и сжимаются таким образом, что образуется непрерывная проводящая спираль (жирные стрелки). Весь штабель снабжен более чем 600 маленькими отверстиями, через которые прокачивается более 800 галлонов охлаждающей воды в минуту. Магнит потребляет более 2 млн. *вт* электроэнергии и дает поле свыше 100 000 *гс*.

создавать постоянное поле в 100 000 *гс* в однодюймовом зазоре. Магнит Биттера был размером с автомобильное колесо; он состоял из медных

дисков, прорезанных вдоль радиуса и переложенных слюдяными дисками таким образом, что получался (рис. 8) проводящий медный соленоид. В сложенном штабеле пластинок было проделано почти 600 маленьких отверстий, каждое диаметром в одну восьмую дюйма (рис. 9). Через них насосом в направлении оси магнита прокачивалась охлаждающая вода. К соленоиду подводился ток общей мощностью 1,7 млн. *вт*, и расход воды на охлаждение составлял 800 галлонов в минуту. Как и во всех мощных магнитах, между водой и медью был прямой контакт, так как любая промежуточная изоляция представляла бы собой барьер для теплоотвода. Электролитическая проводимость через воду была ничтожна по сравнению с общим потреблением мощности.

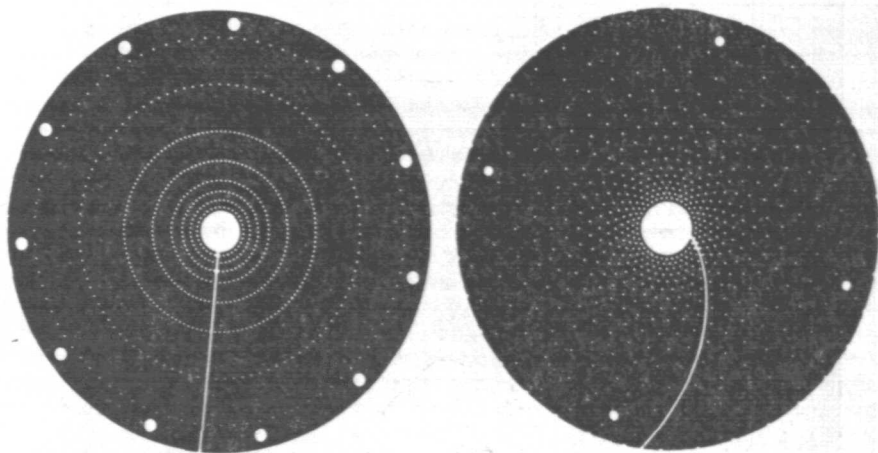


Рис. 9. Расположение каналов охлаждения в первоначальном (слева) и в усовершенствованном (справа) современном магните Биттера.

Применяемое в настоящий момент расположение каналов (справа) гарантирует лучшее охлаждение магнита.

Первый магнит Биттера продолжал непрерывно работать со времени пуска в 1936 г. до 1962 г. с коротким перерывом во время второй мировой войны, когда генераторы были временно переданы в Ок-Ридж манхэттенскому проекту для разделения урановых изотопов. В 1947 г. в Военно-морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне был построен точно такой же магнит, для того чтобы провести эксперименты, не проведенные из-за недостатка времени на первоначальном магните. Несколько подобных магнитов с тех пор было построено в различных лабораториях по всему миру. Однако цель всех более поздних проектов состояла в получении умеренно сильного постоянного поля, а не в том, чтобы совершенствоваться в создании все более сильных полей. Первоначальный соленоид Биттера оставался самым мощным магнитом с постоянным полем с 1936 по 1958 г. Именно в это время в МТИ вновь возник интерес к созданию более сильных полей.

Решающим толчком к созданию очень сильных постоянных магнитных полей послужили работы Бенжамена Лэкса и группы его сотрудников, занимающихся физикой твердого тела в лаборатории Линкольна. Эта группа в течение многих лет пыталась решить трудную задачу измерения резонансов с помощью импульсных полей. В конце концов Лэкс и его сотрудники объединили свои усилия с Биттером, чтобы исследовать возможность применения новых веществ и схем с целью поднять уровень теплоотвода более чем в 10 раз по сравнению с тем, который был макси-

мальным в 1936 г. Им удалось обнаружить замечательный факт, что теплоотдачу с единицы поверхности некоторых опытных образцов можно сделать больше солнечной. В результате этой совместной деятельности были найдены новые методы измерения поля и обработки опытных данных и построены новые биттеровские магниты, которые вскоре начали использоваться круглосуточно. В 1961 г. один из нас (Кольм) завершил разработку нового магнитного соленоида, имеющего цилиндрическую, а не спиральную форму (рис. 10). Новый магнит размером с грейпфрут был способен создавать максимальное поле от 100 000 до 126 000 гс при той

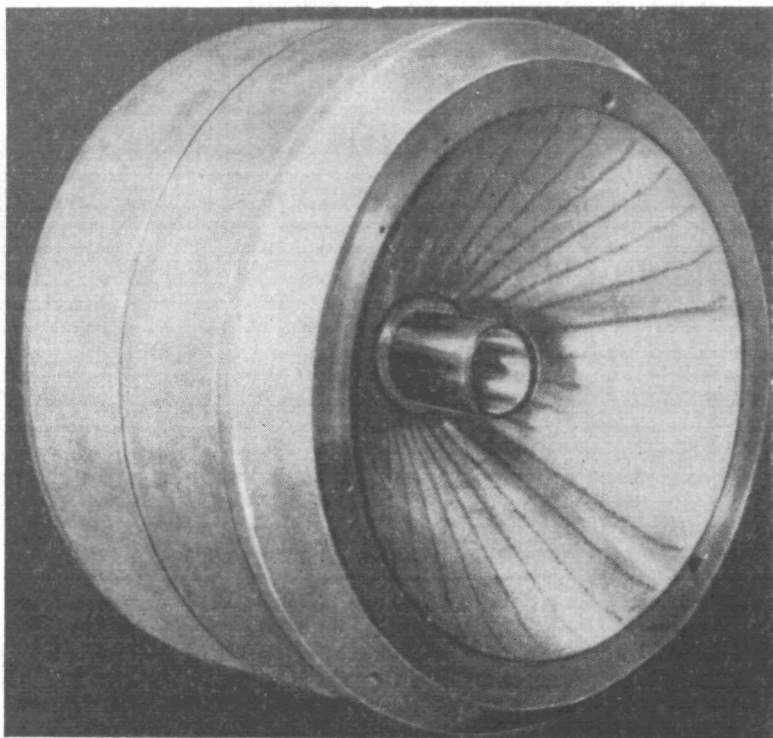


Рис. 10. Соленоид Кольма, изобретенный в 1961 г. одним из авторов статьи.

По форме он напоминает скорее ролик, чем спираль. Полоса меди длиной 140 футов и шириной 6 дюймов свернута вокруг трубки диаметром один дюйм. Охлаждающие каналы оформлены таким образом, что они образуют линии, напоминающие спицы в колесе (темные радиальные полосы). После того как медная полоса полностью свернута, цилиндр обрабатывается на концах. Получаются углубления в виде воронок. Это улучшает распределение токов. Магнит способен создавать поле в 120 000 гс.

же потребляемой мощности. Тем временем в Военно-морской исследовательской лаборатории оказалось возможным использовать большую мощность, и в 1962 г. было установлено, что в первоначальном биттеровском магните можно получить поля до 152 000 гс.

Вскоре стало очевидным, что для того, чтобы получить еще более сильные постоянные поля, необходимо создать лучшие условия для проведения исследований. Старая полуподвальная лаборатория в МТИ, загроможденная современными приборами и временными водяными и энергетическими системами, стала слишком тесна даже с точки зрения безопасности работы в ней, не говоря уже об эффективности или удобстве. Доступные мощности были уже недостаточны для создания более сильных

магнитных полей. Предел в 250 000 *гс* теперь казался осязаемым, но для этого необходимо было, грубо говоря, в 9 раз увеличить мощность генератора, чтобы достичь 15 млн. *вт*. Сооружение установок подобных размеров было бы оправдано, только если бы они могли эффективно использоваться многими исследователями. Это требовало гибкости конструкции, большого пространства и множества дополнительного оборудования. После долгого проектирования и рассмотрения различных комитетов, представляющих научную общественность, был одобрен детальный план. Через два года было получено одобрение министерства обороны и финансовая поддержка военно-воздушных сил. Новая Национальная магнитная лаборатория вступила в строй в 1963 г.

#### НАЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Новая лаборатория помещается в полностью перестроенном здании бывшей хлебопекарни на краю городка МТИ. Парк мощностей состоит из двух мотор-генераторов, каждый из которых имеет стартовый мотор

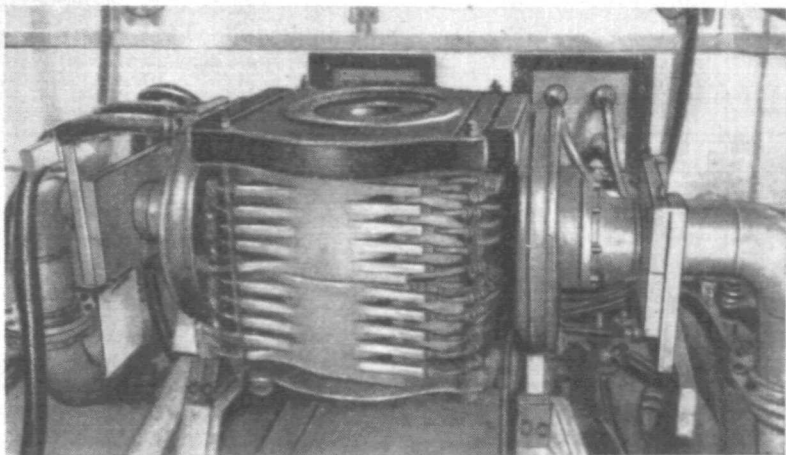


Рис. 11. Соленоидальный магнит на 250 000 *гс* из Национальной лаборатории.

Он способен создавать самое сильное постоянное магнитное поле, какое только можно получить в настоящее время. На фотографии видна наружная секция, состоящая из пустотелых квадратных витков. Магнит содержит 3 *т* меди и имеет внешний диаметр 36 дюймов. При работе на полной мощности он потребляет 16 млн. *вт* и 2000 галлонов воды в минуту. Диаметр зазора — 2 дюйма.

на 600 лошадиных сил, двигатель на 6000 лошадиных сил, 82-тонное стальное маховое колесо и два генератора постоянного тока. Каждый генератор способен давать ток 10 000 *а* при напряжении 250 *в*, т. е. мощность 2,5 млн. *вт*. В течение коротких промежутков времени они могут работать с четырехкратной перегрузкой. Таким образом, парк имеет полную постоянную мощность 10 млн. *вт*, мощность при пятиминутной перегрузке 16 млн. *вт* и мощность при двухсекундной перегрузке 32 млн. *вт* (при этом используется энергия махового колеса). Вся лаборатория состоит из 10 отделов, или магнитных лабораторий, и четыре генератора могут действовать независимо и отдавать 2,5 млн. *вт* в любые четыре отдела одновременно. Они также могут быть соединены последовательно или параллельно, или в любой последовательно параллельной комбинации, чтобы дать всю энергию в один отдел.



Замкнутая охлаждающая система способна перекачивать 4000 галлонов деионизированной и дегазированной воды через любую комбинацию магнитов и уносить все тепло, которое выделяется за счет работы генераторов, через серию теплообменников в воды реки Чарли. Все переключатели и вентили управляются из центральной контрольной комнаты, так что энергия и вода могут мгновенно передаваться из одного отдела в другой без помехи в проведении текущих экспериментов. Потребность в экспериментах с сильными полями стала так велика, что лаборатория работает на полную мощность по 14 часов в день. Распределение

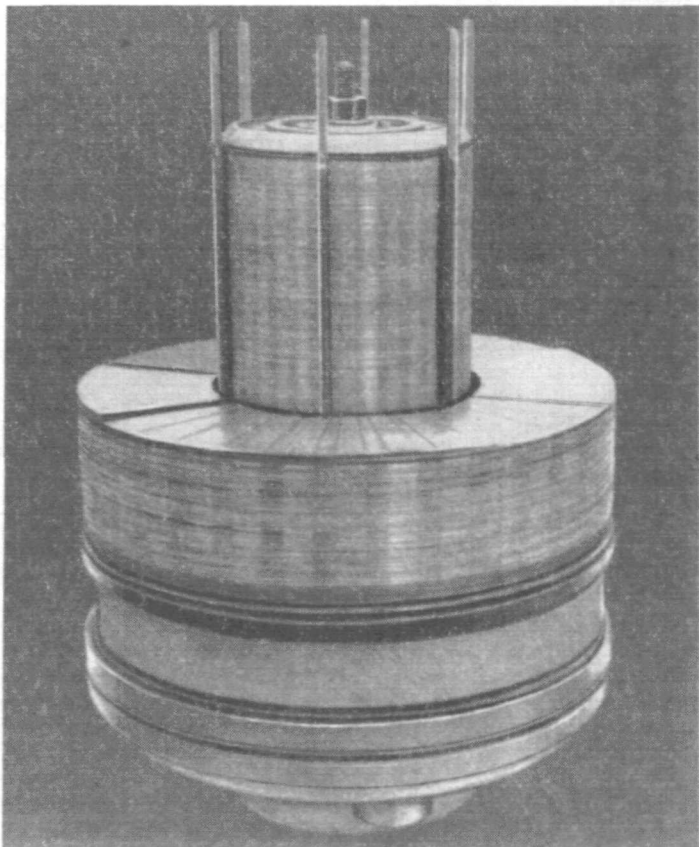


Рис. 12. Две внутренние секции магнита на 250 000 гс, сфотографированные во время сборки год тому назад.

В каждой секции медные и стальные пластинки переложены так, чтобы образовалась непрерывная медная спираль. Радиальные каналы пропускают охлаждающую воду. Самые внутренние пластинки могут выдерживать давление 60 000 фунтов на квадратный дюйм, т. е. в три раза больше, чем давление в самом глубоком месте океана. Магнит был сконструирован сотрудником лаборатории Д. Монтгомери.

времени осуществляется настолько эффективно, что четыре генератора способны давать энергию более чем 10 существующим отделам. Поэтому планируется открыть новые отделы. Число соленоидальных магнитов в лаборатории непрерывно растет. Сейчас их около 16. Они позволяют проводить эксперименты при любых доступных в настоящее время температурах. Здесь есть соленоиды, начиная от биттеровских магнитов, предназначенных генерировать около 100 000 гс с помощью



одного генератора, до гигантского трехэтажного соленоида, способного генерировать несколько больше 250 000 *гс* с помощью всех четырех генераторов (рис. 11, 12). Цель, состоящая в том, чтобы получить постоянное магнитное поле 250 000 *гс*, была достигнута в позапрошлом году, через полтора года после открытия лаборатории.

#### МАГНИТ НА 250 000 *гс*

Этот магнит, сконструированный Монтгомери, состоит из трех коаксиальных соленоидов, имеющих внутренний диаметр несколько больше 2 дюймов и наружный 36 дюймов. При работе на полную мощность он потребляет 16 млн. *вт* и 2000 галлонов воды в минуту. Наружная секция состоит из массивной обмотки — квадратных медных проводников, полых внутри. Эта часть обмотки потребляет четверть всей мощности и создает поле 50 000 *гс* в 14-дюймовом зазоре. Наружная секция окружает две внутренние спиральные, сделанные из плотно уложенных штабелей прорезанных медных дисков, снабженных химически протравленными охлаждающими каналами, которые расположены радиально, как спицы у колеса. Охлаждающая вода проталкивается через эти каналы с помощью целой разветвленной системы.

Самая внутренняя катушка имеет наружный диаметр 6 дюймов и потребляет столько мощности, сколько позволяет механическая прочность. Это составляет одну четверть полной потребляемой мощности. Промежуточный соленоид забирает оставшуюся часть, или половину всей мощности. Весь магнит содержит 3 *т* меди, и внутренние пластинки могут выдерживать давление 60 000 фунтов на квадратный дюйм, что в 3 раза превышает давление в самом глубоком месте океана.

Некоторые из соленоидальных магнитов предназначены для специальных целей (таких, как оптические эксперименты), требующих доступ к магнитному полю как в поперечном, так и в продольном направлениях. Один соленоид дает магнитное поле, которое однородно с точностью до одной миллионной в достаточно большом объеме и стабильно во времени до одной двухмиллионной доли. Его используют, чтобы достичь хорошего разрешения в экспериментах по ядерному магнитному резонансу. Другой, наоборот, создает неоднородное поле, которое служит магнитной бутылкой для удержания плазмы.

Проектируются новые магниты, обладающие одновременно преимуществами как соленоидов, охлаждаемых водой, так и сверхпроводников. Самый совершенный из проектируемых в лаборатории магнитов наверное будет построен еще не очень скоро. Ожидается, что он будет давать 400 000 *гс* в течение 2 *сек*, используя полную перегрузку генераторов и энергию, запасенную в маховом колесе. Он будет охлаждаться напором воды из аккумуляторных баков авиационной катапульты.

Не все исследования проводятся на соленоидальных магнитах высокой мощности. В лаборатории также есть некоторое число обычных железных электромагнитов, импульсных магнитов довольно больших размеров и несколько сверхпроводящих магнитов. Лаборатория не только предоставляет возможность проводить исследования с сильными магнитными полями или полями специальной конфигурации, но также служит центром совершенствования техники получения магнитных полей. Если раньше магниты служили лишь средством исследования и использовались физиками, чьи основные интересы касались совершенно других областей, то теперь искусство получения магнитных полей само стало целью, над которой трудится целая инженерная группа во главе с Монтгомери (рис. 13).

Научные исследования в лаборатории проводятся постоянным штатом теоретиков и экспериментаторов под руководством Лэкса (он является директором лаборатории с момента ее основания) и одного из нас (Фримана — заместителя директора). Кроме того, в лаборатории половина работы выполняется постоянно меняющимся штатом ученых из

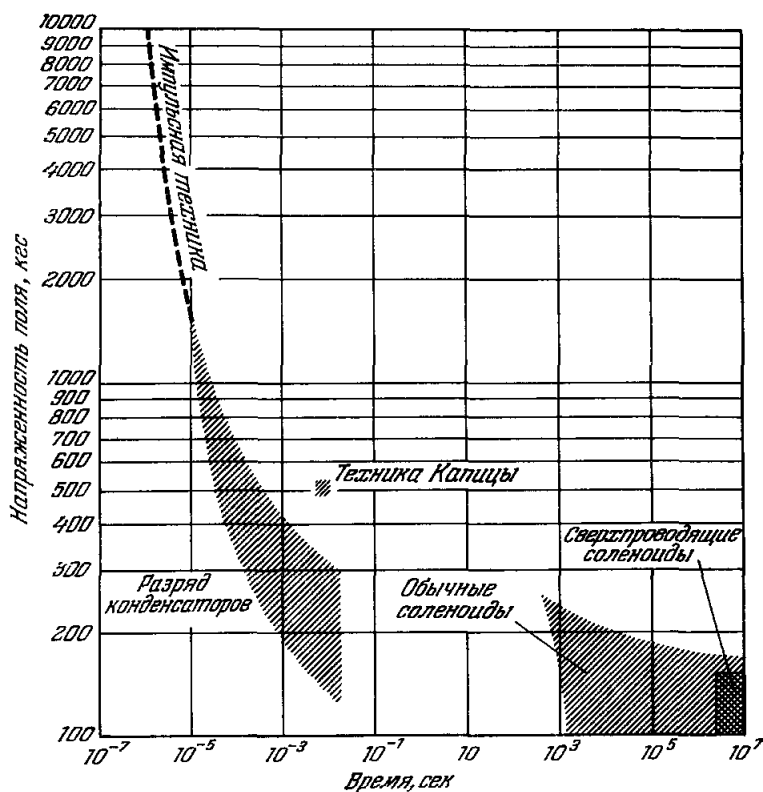


Рис. 13. На этом графике изображена современная ситуация, касающаяся создания сильных магнитных полей.

По оси ординат указана напряженность поля. Горизонтальная ось указывает время, в течение которого может поддерживаться созданное поле. Рабочие объемы на рисунке не показаны, но они увеличиваются от  $1 \text{ мм}^3$  слева до десятков кубических сантиметров справа.

академических, правительственных и промышленных лабораторий, которые работают либо самостоятельно, либо совместно с основным персоналом лаборатории.

Многие из изученных в настоящее время явлений удастся наблюдать только в сильных полях.

#### БУДУЩЕЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

Одним из самых значительных научных достижений нашего времени является открытие макроскопических квантовых состояний. Эти состояния возникают тогда, когда системы частиц, например электронов, в макроскопических масштабах описываются совокупностью когерентных волн, т. е. волн, имеющих одинаковую фазу. Так как магнитные поля способны селективно воздействовать на частицы материи и квантовые законы взаимодействия между ними, они уже начали играть важную роль в изу-

чении некоторых из этих увлекательных макроскопических квантовых эффектов.

Простой пример, который уже был рассмотрен чисто классически, — это охлаждение путем адиабатического размагничивания. Приложенное магнитное поле нарушает симметрию между ориентациями в пространстве: атом будет стремиться ориентироваться по полю, так как это энергетически выгодно. Говоря на языке квантовой механики, магнитное поле расщепило два состояния, которые раньше были вырождены (т. е. имели одинаковую энергию). Антипараллельное состояние теперь имеет энергию большую, чем параллельное. Разность энергии между двумя состояниями зависит от величины атомного магнитного момента и от интенсивности магнитного поля. Если эта разность велика по сравнению с тепловой энергией при данной температуре, то антипараллельное состояние окажется необитаемым. Иначе говоря, магнитное поле взвинтило его цену на энергетическом рынке. Мы видели раньше, как это обстоятельство приводит к макроскопическому эффекту, а именно к обратимому нагреванию и охлаждению при включении и выключении магнитного поля.

Разработкой различных приборов, основанных на адиабатическом размагничивании, заняты Эммануэль Максвелл — постоянный сотрудник лаборатории и Джордж Циммерман — из Бостонского университета. Благодаря имеющимся в настоящее время сильным магнитным полям можно будет усовершенствовать старые методы и получить более низкие температуры в гораздо больших рабочих объемах.

Ярким примером макроскопической когерентности могут служить мазер и лазер. Их действие основано на том, что атомы, обладающие когерентными волновыми свойствами, испускают когерентные волны в микроволновом или оптическом диапазонах. Это явление положило начало революционному перевороту в оптике во всем спектральном диапазоне. И магнитное поле находит себе здесь многочисленные применения. Оно способно изменять энергию квантовых уровней, а значит, и частоту испускаемого света и, кроме того, может существенно понижать порог генерации лазера.

В течение многих лет определяющим свойством сверхпроводников считалось исчезновение сопротивления ниже некоторой температуры. Эта концепция встретила с некоторыми небольшими, но принципиальными трудностями, которые привели в конце концов к правильному пониманию сверхпроводимости. Оказалось, что сверхпроводимость представляет собой такое состояние вещества, в котором большое число электронов находится в состоянии когерентного движения. Это когерентное движение может продолжаться бесконечно долго, что резко противоречит классическим законам, согласно которым ускоряемый электрон должен терять свою энергию в виде электромагнитного излучения. Если принять тот факт, что такое макроскопическое состояние так же стабильно, как и микроскопические атомные орбиты, то оказывается совсем неудивительным, что сверхпроводящий ток квантован (иначе говоря, квантован магнитный поток, охватываемый сверхпроводящим током). Роберт Мессервей, постоянный сотрудник лаборатории, в настоящее время пытается использовать этот факт для изучения того, каким образом магнитное поле проникает в сверхпроводник.

Для того чтобы сверхпроводники можно было использовать в сверхпроводящих магнитах и вообще в технике, они должны проводить токи большой плотности в присутствии сильного магнитного поля. Для многих новых сплавов критическая величина тока не была установлена, так как не удавалось поставить нужные эксперименты из-за отсутствия

достаточно сильного магнитного поля. Сотрудники лаборатории Монтомери и У. Сэмпсон из Брукхэйвенской национальной лаборатории только что провели первую серию экспериментов, в которых поле было достаточно сильным, чтобы разрушить сверхпроводимость в опытных катушках, сделанных из лучших имеющихся сплавов.

Эти эксперименты были проведены с полями до 205 000 гс. В полях сильнее 178 000 гс наблюдался важный эффект. Оказалось, что произведение приложенного магнитного поля на критический ток, которое до напряженности 178 000 гс оставалось постоянным, выше этой точки начало резко падать. Это обстоятельство указывает на то, как начинает разрушаться сверхпроводимость в сложных сплавах.

Магнитное поле оказывает сильное влияние и на проводимость нормальных материалов, о которой однажды в докладах Королевского общества было сказано, что она является самым устойчивым свойством материи. В действительности, уже в своих первых опытах с импульсным полем Капица обнаружил, что магнитное поле, искривляя траекторию движущихся зарядов, изменяет сопротивление некоторых материалов в несколько десятков раз. Эти эффекты Лео Нейрингер, сотрудник лаборатории, использует для изучения топологии поверхности Ферми — самой высокой энергетической конфигурации, занятой электронами, в так называемом импульсном пространстве.

Для изучения поверхности Ферми, от которой зависят самые важные свойства материи, в лаборатории применяются и менее привычные методы с использованием сильного магнитного поля (например, эффект де-Гааза — ван-Альфена, магнитоакустические эффекты, плазменные волны в твердых телах, магнитооптическое поглощение и отражение и циклотронный резонанс). Во всех экспериментах, где требуется высокое разрешение, постоянные поля незаменимы, так как по сравнению с импульсным полем (единственным другим источником сильного поля) они дают разрешение в 1000 раз большее.

Сильные магнитные поля, теперь уже достаточно легко создаваемые, находят все новые применения с такой быстротой, которая превосходит все ожидания. Сейчас трудно даже приблизительно представить себе все применения магнитного поля, и это само по себе показывает, как быстро в различных областях физики начинают применяться исследования в сильных магнитных полях. В некоторых случаях возникает совершенно новая отрасль исследований, которая раньше была невозможна.

Ярким примером тому может служить исследование стабильности шаровых молний, только что начатое в национальной магнитной лаборатории Паулем Зильбергом из компании «Рэйтсон».

Сильное магнитное поле часто делает возможным использование уже известных методов в ранее недоступных диапазонах частоты. Например, Раймонд Боуэрс со студентами из Корнельского университета проводит в сильных магнитных полях целую серию экспериментов, связанных с плазменными явлениями в металлах. А Яцек Фурдина ставит независимо от них эксперименты по плазменным явлениям в полупроводниках. Сотрудники лаборатории Нейрингер, а также Тед Хармен и Дж. Хонинг из лаборатории Линкольна и К. Тауер из U. S. Army Materials Research Agency (Агентство по исследованию военных материалов США) для изучения всей совокупности явлений переноса с участием электронов совершенствуют, применительно к более сильным полям, старые методы, которые берут свое начало еще от стрелочных гальванометров XVIII века. Мы уже приводили примеры из широкой области магнитооптических эффектов (теперь она называется спектроскопией

твёрдого тела). Лэкс с сотрудниками применяют сильные магнитные поля для проведения исследования в этой области.

Норман Блюм и один из нас (Фриман), оба из штата лаборатории, а также Ли Гродзинс из МТИ занимаются совершенно новыми применениями эффекта Мёссбауэра к исследованию твёрдого тела и ядерных явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. Bruce M o n t g o m e r y, Repts. Progr. Phys. 26, 69 (1963).
  2. High Magnetic Fields (ed. by Henry Kolm, Benjamin Lax, Francis Bitter and Robert Mills), The MIT Press and John Wiley and Sons, 1962.
  3. F. B i t t e r, The National Magnet Laboratory at the Massachusetts Institute of Technology, Br. J. Appl. Phys. 14 (11), 759 (1963).
-

