

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

537.312.62

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## УСПЕХИ В СОЗДАНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ\*)

*У. Сэмпсон, П. Крейг, М. Стронгин*

Пять лет назад сверхпроводящие магниты были новинкой в лабораториях. Из существовавшей уже к тому времени сверхпроводящей проволоки были сконструированы и успешно работали экспериментальные магниты, генерирующие поля порядка  $70\,000\text{ гс}^1$  (см. также <sup>3-5</sup>). Оставался, однако, целый ряд технических трудностей, и несмотря на общепризнанные огромные возможности, сверхпроводящие магниты считались в большинстве случаев экономически невыгодными по сравнению с обычными электромагнитами.

К настоящему времени ситуация резко изменилась. За последние несколько лет в конструкциях и технологии изготовления сверхпроводящих магнитов были достигнуты значительные успехи. В большом числе случаев сверхпроводящие магниты теперь удобнее и дешевле обычных магнитов. Более того, представляется вероятным, что в недалеком будущем растущие потребности в сильных и дешевых магнитных полях для многих областей науки и техники будут удовлетворены с помощью сверхпроводящих магнитов.

В Брукхэйвенской национальной лаборатории мы создаем и испытываем сверхпроводящие магниты в основном для работы в области физики высоких энергий и физики твердого тела. Недавно обсуждался также вопрос об использовании сверхпроводящих магнитов при космических исследованиях. Хотя эти исследования не являются вопросом ближайшего будущего \*\*), для них, по-видимому, не требуется значительного расширения уже существующих знаний.

С точки зрения конструктора сверхпроводящих магнитов наиболее важным свойством сверхпроводящих материалов является полное отсутствие у них электросопротивления вблизи абсолютного нуля<sup>6</sup>. Это свойство, открытое голландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 г., сделало в принципе возможным создание предельно сильного магнита, не требующего подвода мощности (постоянные железные магниты также создают магнитное поле без питания, но максимальная напряженность такого поля составляет  $10\,000\text{ гс}$ ). Огромная мощность, потребляемая обычными электромагнитами, создающими сильные поля, выделяется

---

\*) W. Sampson, P. P. Craig, M. Strongin, *Advances in Superconducting Magnets*, Scientific American 216 (3), 115 (1967). Перевод Н. И. Гинзбург. В оригинале имеется резюме: «За последние пять лет сверхпроводящие магниты прошли путь от лабораторной диковинки до самого практического источника сильных магнитных полей, используемых для растущего числа физических исследований».

\*\*) См., однако, <sup>7</sup>. (Прим. пер.).

в виде тепла в результате наличия электрического сопротивления токовой обмотки. Это выделяемое тепло не производит никакой полезной работы, и магнит должен охлаждаться каким-либо «хладоагентом», в качестве которого обычно используется вода. В Национальной магнитной лаборатории в Кембридже постоянные поля напряженностью 250 000 *гс*

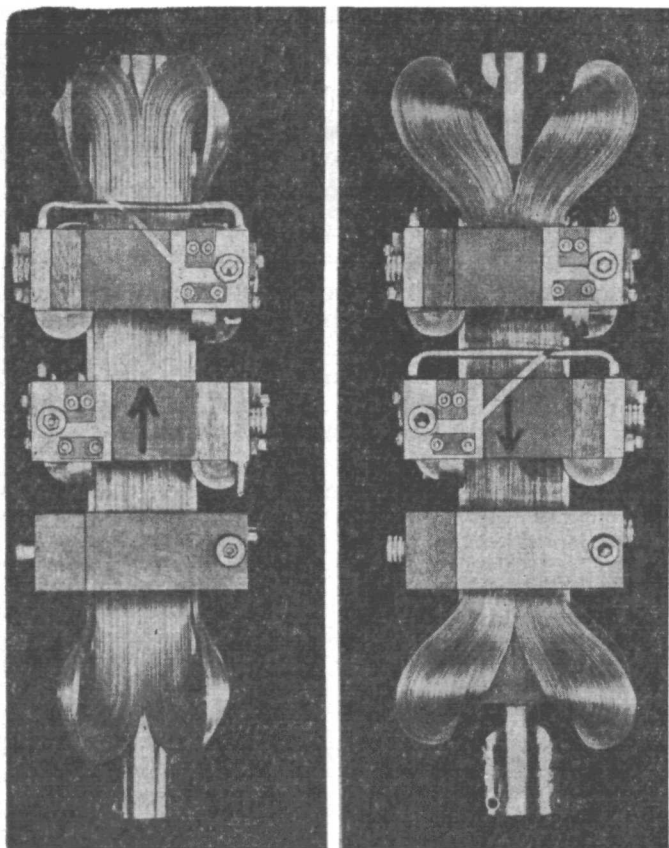


Рис. 1. Сверхпроводящий магнит, сконструированный одним из авторов (Сэмпсон) в качестве прототипа целого класса магнитов, которые будут применяться для фокусировки пучков протонов, выходящих из ускорителя с энергией 33 миллиарда электрон-вольт (Брукхейвенская национальная лаборатория).

Устройство, называемое прямоугольным квадрупольным магнитом, состоит из четырех взаимно перпендикулярных токовых пластин, выполненных из сверхпроводящей ниобиево-оловянной ленты, покрытой медной оболочкой. Направление тока (черная стрелка) для смежных пластин противоположно (на снимке изображены две пластины, расположенные друг против друга). Во время работы магнит находится в жидком гелии.

получают с помощью электромагнита, потребляющего около 16 млн. *вт* электроэнергии, что составляет примерно электроэнергию, необходимую для города с населением 15 000 человек <sup>2</sup>.

Поскольку токовая обмотка сверхпроводящего магнита не имеет электрического сопротивления, тепловые потери не возникают и сильные поля могут быть получены практически без потребления мощности. Подвод мощности извне требуется лишь для создания начального поля и охлаждения сверхпроводящих катушек. В результате этого эксплуатационные расходы сверхпроводящего магнита составляют лишь малую

долю соответствующих расходов в случае обычных систем. Кроме того, сверхпроводящие магниты обычно проще в эксплуатации. В силу своей компактности сверхпроводящие магниты могут создавать поля с большим градиентом, чем электромагниты, т. е. расстояние от области сильного поля до области слабого поля может быть сделано предельно малым. Это свойство особенно полезно при использовании вспомогательной аппаратуры, чувствительной к магнитному полю, или при исследовании быстро распадающихся элементарных частиц.

Второе фундаментальное свойство сверхпроводящего состояния, существенное при конструировании магнитов, было открыто в 1933 г. немецкими физиками В. Мейсснером и Р. Оксенфельдом. Они обнаружили, что внутри некоторых сверхпроводящих веществ магнитное поле строго равно нулю. Несколько лет спустя Ф. и Г. Лондоны развили макроскопическую теорию сверхпроводимости, из которой следует, что магнитное поле уменьшается очень быстро с углублением в толщу сверхпроводника и достигает одной трети своей поверхностной величины на расстоянии порядка  $10^{-5}$  см от поверхности. Это расстояние называется глубиной проникновения, и его точное значение несколько различно для различных сверхпроводников. Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер (Иллинойский университет) в 1957 г.

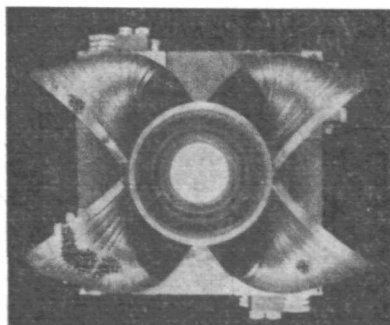


Рис. 2. Вид сзади на сверхпроводящий квадрупольный магнит (см. рис. 1).

На снимке видно перпендикулярное расположение токовых пластин вокруг внутреннего отверстия, диаметр которого слегка превышает 1 дюйм.

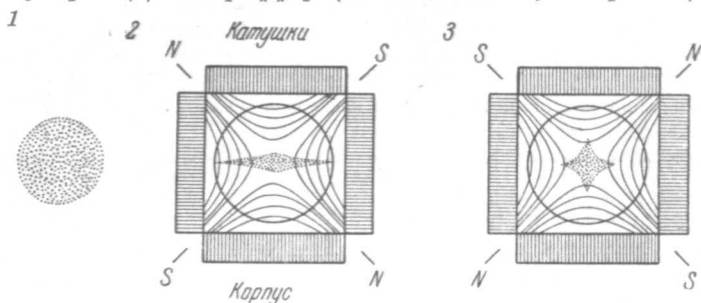


Рис. 3. Пучок протонов может быть сфокусирован двумя сверхпроводящими квадрупольными магнитами за два приема.

При выходе из ускорителя площадь сечения пучка имеет форму расходящегося круга (1). Затем пучок входит в отверстие первого магнита (2), где магнитное поле сжимает пучок протонов вдоль вертикальной плоскости и расширяет его вдоль горизонтальной плоскости. Второй магнит (3), повернутый на угол  $90^\circ$  по отношению к первому, завершает фокусировку пучка. Поле такого сверхпроводящего магнита в силу большой плотности тока имеет градиент в пять раз больший, чем градиент поля обычного магнита той же напряженности.

создали микроскопическую теорию сверхпроводящего состояния, в которой наблюдаемые сверхпроводящие свойства описываются в терминах когерентного макроскопического движения электронных пар.

Отсутствие магнитного поля в сверхпроводнике (эффект Мейсснера) явилось первым серьезным препятствием на пути создания сверхпроводящих магнитов. После достижения магнитным полем некоторого определенного значения оно стремится проникнуть в сверхпроводник и разрушает сверхпроводимость. Однако еще в 1930 г. голландские исследователи В. де Гааз и Дж. Воогд обнаружили, что некоторые сплавы свинца и

висмута сохраняют следы сверхпроводимости в магнитных полях, превышающих 20 000 гс. Это открытие привело к нескольким безуспешным попыткам создания сверхпроводящих магнитов в начале 30-х годов. Только в 1955 г. Б. Интема, работавший тогда в Иллинойском университете, сконструировал сверхпроводящий магнит, создающий поле 8000 гс. Магнит был изготовлен из ниобиевой проволоки, намотанной на железный сердечник. Вскоре после этого в Вестингаузской исследовательской лаборатории был создан первый сверхпроводящий магнит без сердечника. В 1960 г. С. А. Аутлер (Массачузетский технологический институт) сконструировал небольшой сверхпроводящий магнит, предназначенный для

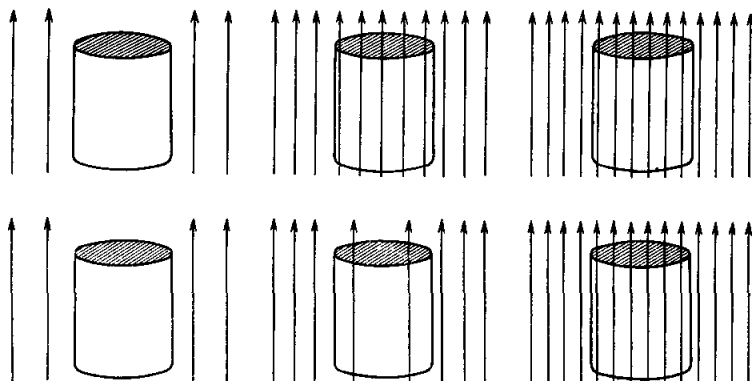


Рис. 4. Два типа сверхпроводников различаются своим поведением во внешнем магнитном поле (стрелки).

Сверхпроводники 1-го рода (верхний ряд) полностью вытесняют магнитное поле до тех пор, пока это поле не достигает определенного значения, называемого критическим полем, после чего образец сразу теряет все сверхпроводящие свойства, а поле полностью проникает в глубь образца (2-й рисунок верхнего ряда). Сверхпроводники 2-го рода (нижний ряд), существование которых было теоретически предсказано в 1957 г., вытесняют магнитное поле только до достижения полем некоторого нижнего критического значения, после чего оно частично проникает в образец (средний нижний рисунок). Выше второго — верхнего критического — поля поле проникает полностью в глубь образца, который переходит в нормальное состояние (последний нижний рисунок). На рисунке изображены части бесконечного цилиндра.

твердотельного мазера. Магнит Аутлера стимулировал, по-видимому, широкий интерес к практическому применению сверхпроводящих магнитов. Начались интенсивные поиски новых сверхпроводящих сплавов, способных выдерживать большие поля, чем сверхпроводящий ниобий. Несколько таких сплавов было найдено в начале 60-х годов в лабораториях телефонной компании «Бэлл». Таким образом были созданы условия для решающих технических достижений последних нескольких лет.

Все известные массивные сверхпроводники можно разделить на две группы — сверхпроводники 1-го рода и сверхпроводники 2-го рода. Сверхпроводники 1-го и 2-го рода отличаются друг от друга своим поведением во внешнем магнитном поле (рис. 4). В случае сверхпроводников 1-го рода магнитное поле полностью вытесняется из толщи сверхпроводника до тех пор, пока напряженность внешнего поля не достигнет некоторого определенного значения, известного как критическое поле, при котором образец сразу переходит в несверхпроводящее состояние, а само магнитное поле полностью проникает в глубь образца. Этот переход обратим: когда внешнее поле снижается ниже критического, поле снова вытесняется из образца, который опять переходит в сверхпроводящее состояние. Для сверхпроводников 1-го рода наивысшее известное критическое поле порядка 1000 гс, что делает эти сверхпроводники непригодными для создания сильных сверхпроводящих магнитов.

С другой стороны, в случае сверхпроводников 2-го рода внешнее поле не проникает в образец до тех пор, пока его значение не становится равным некоему и н и ж н е м у критическому полю, после чего поле частично проникает в образец. Проникновение поля в образец постепенно увеличивается с увеличением поля, и когда поле достигает в е р х н е г о критического значения, образец полностью теряет все следы сверхпроводимости.

Существование сверхпроводников 2-го рода было предсказано в 1957 г. русским физиком А. А. Абрикосовым, который продолжил более ранние работы В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау. На основании выводов, сделанных из работ Абрикосова, можно предположить, что для некоторых сверхпроводников 2-го рода верхнее критическое поле может достигать 300 000 гс. Создание все новых и новых сплавов, являющихся сверхпроводниками 2-го рода, дает все основания предполагать, что в ближайшие годы могут быть сконструированы магниты, генерирующие поля порядка 300 000 гс.

Существенная разница между сверхпроводниками 1-го и 2-го рода может быть выражена отношением двух параметров — глубины проникновения и длины когерентности. Как упоминалось выше, глубина проникновения — это расстояние, на которое проникает малое внешнее поле в глубь сверхпроводника, равное обычно  $10^{-5}$  см. Эта глубина зависит от числа сверхпроводящих электронов, находящихся в материале. Длину же когерентности можно рассматривать как наименьшее расстояние, на котором может изменяться число сверхпроводящих электронов. Эта длина для очень чистого сверхпроводника 1-го рода по порядку величины равна обычно  $10^{-4}$  см и быстро уменьшается с загрязнением сверхпроводника. Когда отношение глубины проникновения к длине когерентности мало, проникновение магнитного поля в сверхпроводник энергетически невыгодно. Когда это отношение превышает определенную величину ( $1/\sqrt{2}$ ), энергетический баланс нарушается. Сверхпроводник 2-го рода, находящийся в полях, превышающих нижнее критическое поле, разбивается на области с сильными и слабыми полями.

Решение Абрикосовым вопроса о глубине проникновения показало, что, по-видимому, проникновение поля происходит дискретными единицами магнитного потока, называемыми квантами потока. Эксперименты, поставленные с целью обнаружения квантования потока, показали, что квант потока равен  $2 \cdot 10^{-7}$  гс/см<sup>2</sup>. Внутри сверхпроводника 2-го рода квантовый поток образует множество нитей с большой напряженностью поля, пронизывающих немагнитную сверхпроводящую массу. Наличие такой решетки, образованной магнитными линиями, было подтверждено экспериментально в 1964 г. во Франции в Ядерном центре в Сакле. В этих экспериментах магнитные линии использовались как дифракционная решетка для рассеяния пучка медленных нейтронов. Пространственное расположение магнитных линий можно было определить из углового распределения рассеянных нейтронов.

Из расчетов следует также, что верхнее критическое поле сверхпроводников 2-го рода должно быть пропорционально отношению глубины проникновения к длине когерентности. Поскольку это отношение растет с увеличением примесей, очевидно, что для магнитов нужно выбирать сверхпроводящие сплавы с наименьшей длиной свободного пробега электронов, т. е. сплавы с большим числом центров рассеяния, а следовательно, и с большим электросопротивлением в нормальном, несверхпроводящем состоянии.

К сожалению, эти требования к сверхпроводникам 2-го рода встречаются с определенными ограничениями. Наиболее важным ограничением

является тот факт, что идеальный сверхпроводник 2-го рода, описываемый теорией Абрикосова, не имеет поверхности и не может поэтому проводить электрический ток без сопротивления. Такой вывод следует из того, что наличие тока приводит к возникновению силы, действующей на незакрепленные нити с магнитным потоком. В результате возникает движение нитей, что в свою очередь должно привести к появлению электродвижущей силы, а следовательно, и сопротивления. Чтобы обойти эти трудности и сделать теорию Абрикосова пригодной для описания реальных сверхпроводников 2-го рода, было сделано несколько предположений. Наиболее обещающий подход был развит сотрудниками лабораторий компаний «Бэлл» и «Дженерал электрик». Их идеи основаны на том, что в проводнике 2-го рода, способном проводить большие токи, линии квантованного потока собираются группами, образуя «узлы». Эти «узлы» «пришпиливаются» к определенным участкам в сверхпроводнике — к примесным центрам и дефектам — и могут поэтому противодействовать силам, возникающим при прохождении тока через материал. При увеличении тока силы, действующие на узлы, растут до тех пор, пока узлы не начинают «перепрыгивать» через удерживающий их барьер. Этот процесс, известный как «перепрыгивание» (или «скачки») магнитного потока, вызывает локальный нагрев, который снижает барьер и может привести к разрушению сверхпроводимости всего образца. При создании сверхпроводящих соленоидов для снижения эффекта «скачков потока» был разработан целый ряд методов. В общем было обнаружено, что материалы, подвергшиеся предварительной механической обработке и имеющие в связи с этим большее число дефектов кристаллической решетки, а следовательно, и большее число мест для «пришпиливания», могут выдерживать более высокие критические поля.

Мы кратко остановились на некоторых характерных свойствах, которыми должны обладать сверхпроводники, используемые для создания сверхпроводящих магнитов с сильными магнитными полями. Остановимся теперь на некоторых материалах, обладающих этими характерными свойствами. К настоящему времени промышленность выпускает только три таких материала: интерметаллическое соединение ниобия и олова ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ) и два металлических сплава, ниобий — цирконий ( $\text{Nb} - \text{Zr}$ ) и ниобий — титан ( $\text{Nb} - \text{Ti}$ ).

Выбор материала зависит от целого ряда факторов. Температура, при которой материал становится сверхпроводником (называемая критической температурой), должна быть значительно выше, чем температура жидкого гелия ( $4,2^\circ$  Кельвина), чтобы сохранение образца в сверхпроводящем состоянии не сопровождалось существенными трудностями. Материал должен также проводить большие токи в присутствии высокого магнитного поля, а также должен быть достаточно удобен для намотки катушек магнита.

Связь тока с магнитным полем для данного сверхпроводника изображается обычно кривой, которая дает зависимость максимальной плотности тока, текущего через короткий образец, от внешнего магнитного поля. На рис. 5 приведены типичные кривые для трех наиболее распространенных сверхпроводящих материалов: ниобия-олова, ниобия — циркония и ниобия — титана.

Наивысшее поле, при котором сохраняются какие-либо признаки сверхпроводимости, связано с внутренними свойствами материала и не зависит существенным образом от способа его изготовления. Критический ток, однако, сильно зависит от металлургических процессов изготовления сверхпроводника, особенно от способа его термообработки. По этой

причине для каждого сверхпроводника наблюдается большой разброс на кривых зависимости тока от поля. Сплавы ниобий — цирконий дают возможность получать токи достаточно высокой плотности вплоть до полей порядка 60 000 гс. Сплавы из ниобия и тантала можно использовать до полей 90 000 гс, а применяя ниобий-олово, можно достигнуть полей, приближающихся к 200 000 гс.

Поскольку соединение ниобий-олово позволяет получать сильные поля и одновременно обеспечивает большие плотности тока при слабых полях, оно, по-видимому, предпочтительнее для создания всех сверхпроводящих магнитов. Однако кривые зависимости тока от поля отнюдь не учитывают трудностей изготовления и стоимость материала. Сплавы ниобий — цирконий и ниобий — титан пластичные и их легко изготовить. Что же касается ниобия-олова, то это соединение является необычайно хрупким и требует при изготовлении специальной трудоемкой методики. Благодаря достигнутым недавно успехам в технологии изготовления соединения ниобий-олово теперь конкурирует с двумя другими сплавами во всей области магнитных полей. Можно ожидать, что дальнейшее его удешевление, связанное с массовым производством, приведет в конце концов к тому, что все сверхпроводящие магниты будут изготавливаться из соединения ниобий-олово.

Был разработан целый ряд способов для изготовления сверхпроводящих катушек из соединения  $Nb_3Sn$ . В некоторых случаях интерметаллическое соединение образуется после намотки катушки при ее термообработке. Однако в результате такого процесса катушку нельзя перемотать, если происходит повреждение какого-либо ее участка. В другой методике для сохранения гибкости проводника в сверхпроводящем состоянии очень тонкий слой из ниобия-олова наносился на тонкую металлическую ленту. Тонкость слоя ниобий-олово позволяла изготавливать витки диаметром меньше дюйма без повреждения.

Во всех случаях использования  $Nb_3Sn$  большая часть площади поперечного сечения катушки занята материалом, не принимающим участия в процессе создания поля. В результате плотность полезной обмотки такой катушки сравнительно низка: для типичной катушки из  $Nb_3Sn$  в сверхпроводимости участвует только 15% общей площади поперечного сечения катушки. Несмотря на это, в силу своей способности проводить токи большой плотности, средняя плотность тока в катушке из  $Nb_3Sn$  может значительно превышать максимальную плотность тока в катушках, изготовленных из двух упомянутых сверхпроводящих сплавов, даже в слабых полях.

Имея кривые зависимости тока от поля и достаточное количество сверхпроводящей проволоки, можно было бы ожидать, что намотка соленоида или катушки, способных создавать требуемое магнитное поле в пределах критического поля проволоки, является уже тривиальным

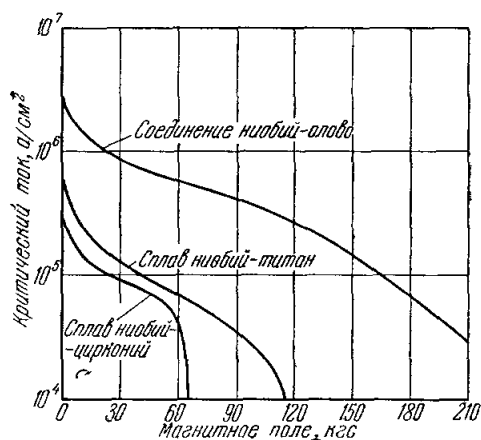


Рис. 5. Кривые зависимости тока от поля. Максимальная плотность тока короткого образца сверхпроводящего материала как функция внешнего магнитного поля. Приведены кривые для трех наиболее распространенных сверхпроводящих материалов.

процессом. К сожалению, дело обстоит не так просто, и на этой стадии возникает также целый ряд трудностей.

Основные трудности можно суммировать термином «деградация тока», что связано с тем, что ток в соленоиде значительно ниже тока, ожидаемого из измерений короткого куска проволоки. В первое время деградация тока связывалась с дефектами проволоки, но скоро стало очевидным, что этот эффект является более фундаментальным. Например, катушки, изготовленные из сплавов Nb — Zr, часто обнаруживают эффект «тренировки», при котором критический ток катушки увеличивается после каждого «отжига» (т. е. перехода в несверхпроводящее состояние). При достижении некоторого максимального тока, много меньшего критического тока, определенного для короткого куска проволоки, дополнительный «отжиг» может вызвать переход к наинизшему критическому току, и весь цикл «тренировки» начинается сначала.

Все это усложняется еще и тем фактом, что магнитное поле, создаваемое сверхпроводящим соленоидом, не всегда пропорционально току, протекающему через обмотку. Как уже упоминалось выше, иногда происходит резкий скачок «пришпиленных» «узлов» магнитного потока. Эти локальные разрывы напряженности поля тесно связаны с деградацией тока. Скачкам магнитного потока отвечает выделение энергии в обмотке, а это в отдельных участках может вызвать повышение температуры выше критической температуры сверхпроводника. Возникшее электросопротивление участка вызывает еще больший нагрев, который в свою очередь может вызвать отжиг всего соленоида.

Другая трудность, возникающая при создании сверхпроводящих магнитов, связана с вопросом отвода энергии, возникающей при отжиге обмотки. Эта энергия должна быть равномерно распределена по всему объему соленоида, чтобы предотвратить возникновение локальных «горячих мест», или, если это возможно, должна отводиться наружу из дьюаровского сосуда с помощью специальной цепи. Интересно отметить в этой связи, что энергия, содержащаяся в сверхпроводящем магните, может быть очень большой и при быстром выделении может вызвать повреждение сверхпроводящей цепи. Сверхпроводящий магнит является эффективным устройством для хранения энергии, сравнимым с электрическими конденсаторами или маховым колесом.

Короче говоря, конструктору сверхпроводящих магнитов нужно решить две основные проблемы: во-первых, создать обмотку, свойства которой как можно ближе соответствуют теоретическому максимальному полю, полученному для данной геометрии и данной проволоки; во-вторых, создать устройство, которое может обеспечить циклическую работу без возникновения частых повреждений. Один из способов, снижающих эффект деградации тока, связан с концепцией так называемой «стабилизации поля». Уже в течение некоторого времени известно, что если сверхпроводящий соленоид поместить во внешнее магнитное поле, то его критический ток можно повысить. С увеличением внешнего поля ток в соленоиде тоже повышается до тех пор, пока не достигает теоретического максимального значения, равного полю соленоида плюс приложенное внешнее поле.

Чтобы использовать это свойство, соленоид нужно разделить на две концентрические секции или больше, причем наружные секции должны создавать «стабилизирующие» внешние поля для внутренних секций. Такой способ конструирования создает дополнительные преимущества, заключающиеся в том, что для соленоида с большой напряженностью поля, для которого вырожденный ток может оказаться выше критического тока, определенного по короткому куску проволоки, в сверхпроводящую цепь должны включаться только внутренние секции, что дает возможность



более эффективно использовать наружные секции обмотки. К недостаткам таких систем следует отнести дополнительное усложнение в системе возбуждения и необходимость нескольких источников питания.

Для очень больших катушек, когда вопрос о деградации тока стоит особенно остро, интересное его решение было найдено Ч. Лэйвриком в Аргоннской национальной лаборатории. Несколько тонких проволок из сплава ниобий — цирконий были соединены вместе и покрыты хорошо проводящей оболочкой из индия.

Из полученного таким образом проводника был намотан соленоид, создающий поля напряженностью 45 000 гс в диаметре 11 дюймов. Индиевое покрытие снижало эффект «скачков» магнитного потока и сводило

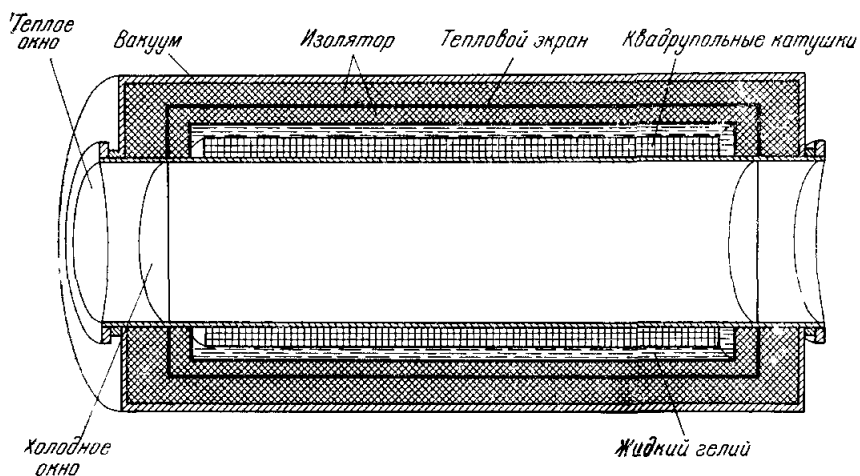


Рис. 6. Магнит, фокусирующий протоны, помещенный для охлаждения в дьюар, содержащий жидкий гелий при температуре 4,2° К.

Окна из алюминиевой фольги снижают поток энергии излучения во внутренний холодный объем магнита.

к минимуму деградацию тока, а также обеспечивало шунтирующую цепь, препятствующую возникновению высоковольтного напряжения при «отжиге» соленоида. З. Стекли и А. Кантровиц из лаборатории фирмы «Авко-Эверетт» продвинулись еще на один шаг. Увеличивая покрытие из нормального проводника, можно добиться того, чтобы локальная температура не превышала температуры перехода сверхпроводника. Такая обмотка не переходит в нормальное состояние, когда ток в магните превышает критический. Вместо этого в тот момент, когда ток в области наибольшего поля превышает критический, сопротивление, возникающее в шунтирующей оболочке, создает небольшую разность потенциалов. Во время работы ток, проходящий через магнит, увеличивают до тех пор, пока на клеммах не возникнет наибольшая разность потенциалов, после чего ток понижают до момента исчезновения напряжения. Недостатком такой стабилизации тока является малый объем, занимаемый сверхпроводником, по сравнению с нормальным материалом, в результате чего этот способ удобен только для соленоидов с большим внутренним диаметром.

В Брукхейвене недавно был применен другой способ стабилизации, который удобен при работе с лентой из  $Nb_3Sn$ . Путем откачки жидкого гелия, в котором находится магнит, температура может быть понижена ниже 2,18° К, в результате чего гелий переходит в сверхтекучую фазу. В сверхтекучем состоянии эффективная теплопроводность жидкого гелия может быть в 10 000 раз больше теплопроводности меди при очень неболь-

шой его вязкости, в результате чего гелий проникает в очень узкие щели. Не вызывает сомнения, что благодаря этим свойствам работа соленоида в сверхтекучем гелии значительно улучшается. Это сильнее всего проявляется в соленоиде с деградированной сверхпроводимостью, но можно достичь существенного улучшения даже для магнитов, работающих на максимальном токе. Этот способ был нами использован для увеличения максимального поля соленоида от 86 000 гс при 4,2° К до 98 000 гс при 1,3° К. Когда соленоид находится в сверхтекучем гелии, снижается также эффект «скачков» магнитного потока.

Сверхпроводник не обладает сопротивлением и не поглощает мощности; поэтому, если клеммы соленоида замкнуть другим сверхпроводником, ток, наведенный в обмотке, будет циркулировать бесконечно и магнитное поле будет оставаться абсолютно стабильным. Однако для установления требуемого начального тока, нужно предусмотреть возможность выключения закорачивающей сверхпроводящей цепи. Процесс выключения этой цепи осуществляется обычно с помощью нагревателя, смонтированного на одной из секций сверхпроводящего провода между клеммами соленоида. При включении соленоида нагреватель включается, температура замыкающей цепи повышается выше температуры ее сверхпроводящего перехода и цепь перестает быть сверхпроводящей. Затем ток в соленоиде повышается до требуемой величины, нагреватель выключается, ток питания понижается до нуля и устанавливается бесконечная циркуляция тока через обмотку соленоида и выключатель.

Напряженности полей, достигаемых с помощью сверхпроводящих магнитов, быстро увеличиваются. К настоящему времени уже получены поля напряженностью 140 000 гс, и есть все основания ожидать в ближайшие месяцы достижения полей от 150 000 до 175 000 гс. В силу того, что механические напряжения, вызываемые магнитным полем в проволоке, растут как квадрат поля, при увеличении полей необходимо учитывать механические напряжения, возникающие в материалах, используемых для создания сверхпроводящих магнитов.

В Брукхэйвене для экспериментов по рассеянию нейтронов используется сверхпроводящий магнит с напряженностью поля 50 000 гс. Чтобы нейтроны могли входить и выходить из магнита под прямым углом к полю, магнит разделен на две секции. Прокладки между секциями необходимо было сделать из материалов, которые не сильно поглощают нейтронный пучок и в то же время являются достаточно прочными, чтобы выдерживать силы, достигающие примерно 5 *T* и стремящиеся соединить секции магнита.

В последние годы было предпринято много попыток для создания магнитов специальных типов. Например, был сконструирован длинный соленоид, снабженный корректирующей обмоткой, поле которого, достигающее 60 000 гс, изменялось в объеме, равном кубическому дюйму, не больше чем на несколько миллионных долей. Поле такой высокой однородности необходимо при изучении ядерного магнитного резонанса, при котором величина резонансного сигнала существенным образом зависит от неоднородности поля. Неудобство применения сверхпроводящих магнитов для этих экспериментов связано с наличием небольших остаточных магнитных полей, составляющих несколько процентов максимального поля и остающихся после выключения магнита. Остаточный магнитный поток исчезает, конечно, при нагреве магнита выше температуры его сверхпроводящего перехода.

В других случаях однородность поля незначительна, но очень важно свести к минимуму расстояние от области высокого поля до наружной стенки дьюара. Это требование особенно существенно при наблю-

дениях эффекта Мёссбауэра, который широко используется теперь для изучения многих проблем в физике твердого тела и ядерной физике. Способность сверхпроводящих магнитов создавать поля большой напряженности при малом объеме всей установки уменьшает размер требуемых

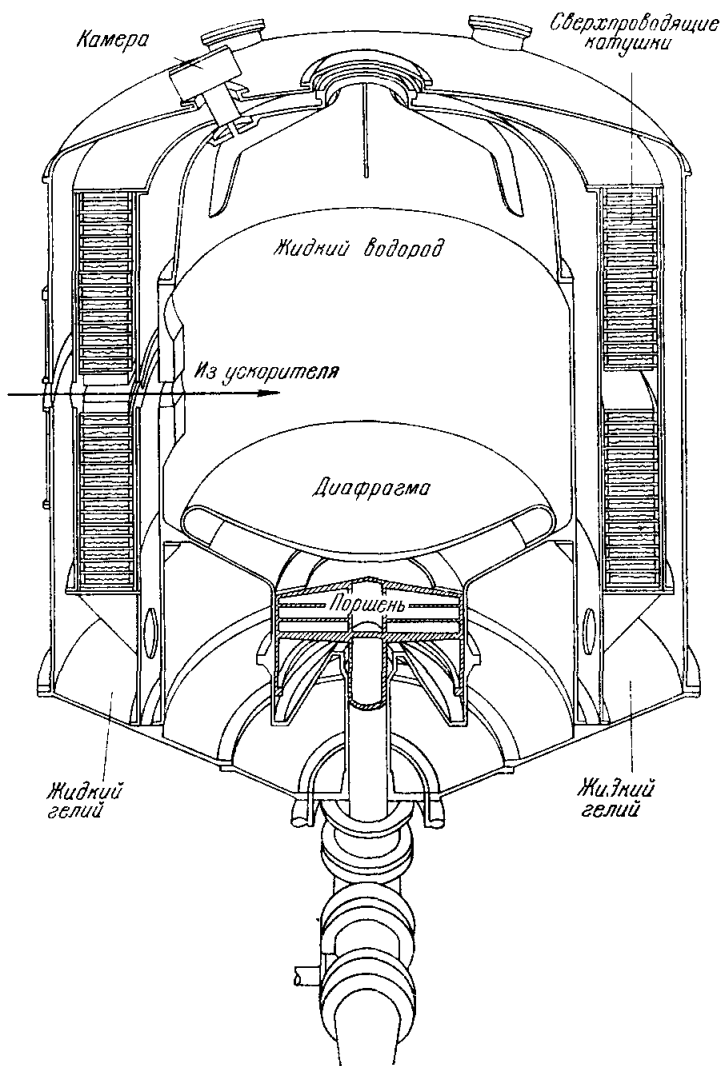


Рис. 7. Пузырьковая камера, конструкция которой предложена для Брукхэйвского синхротрона.

Сверхпроводящая обмотка имеет диаметр 16 футов. Система охлаждения гелия, необходимого для охлаждения обмотки, будет объединена с охлаждающей системой, изотопляющей жидкий водород для самой камеры. Большая диафрагма, расположенная на дне камеры, предназначена для резкого снижения давления в камере, в результате чего входящие частицы могут образовывать пузырьки в жидком водороде.

радиоактивных источников и делает возможным проведение экспериментов, ранее не выполнимых. На установке, используемой в лаборатории одного из авторов (Крейг), расстояние от области поля напряженностью 60 000 гс до детектора излучения меньше двух дюймов. Это составляет примерно пятую часть расстояния, требуемого при использовании обычных магнитов.

Недавно сверхпроводящие магниты начали играть все возрастающую важную роль в физике высоких энергий. Одно из наиболее очевидных приложений — пузырьковая камера с жидким гелием, в которой система

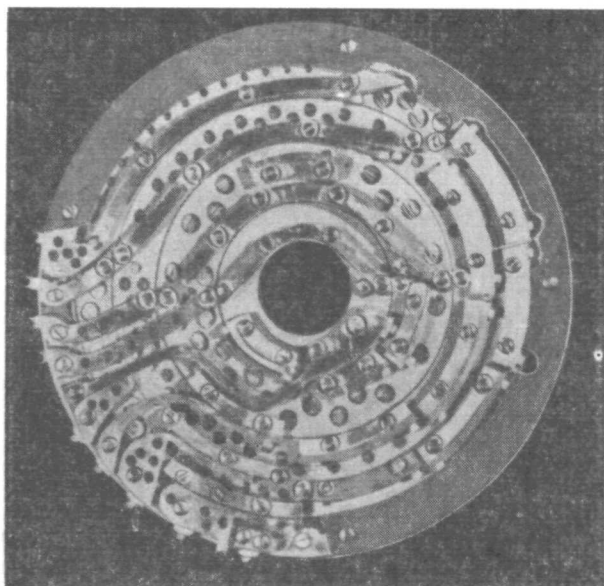


Рис. 8. Четыре concentric обмотки, генерирующие поле во внутреннем объеме сверхпроводящего магнита, используемого в Брукхэйвене для измерения гиромагнитного отношения отрицательной сигма-частицы ( $\Sigma^-$ ).

Питание каждой секции производится независимо; максимальная напряженность поля 125 000 гс. Короткозамкнутые выключатели, позволяющие магниту работать без питания после установления поля, расположены в изоляционном кольце, окружающем магнит.

жидкого гелия, необходимого для охлаждения сверхпроводящей обмотки, может быть частично объединена с охлаждающей системой самой камеры.

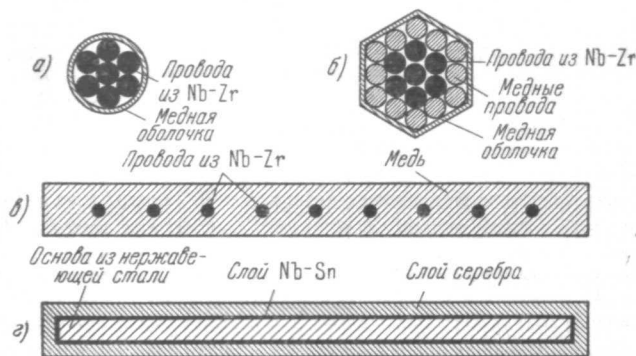


Рис. 9. Составные сверхпроводники, используемые обычно для намотки магнитов, создающих сильные поля.

На рисунке изображены площади поперечных сечений. Два кабеля (а, б) состоят из проволок толщиной 0,01 дюйма каждая. Ширина поперечного сечения лент (в, г) 0,5 дюйма и толщина 0,04 дюйма. Масштаб на рисунке не выдержан.

Сейчас практикуются камеры диаметром 14 футов, и, возможно, для них понадобятся сверхпроводящие соленоиды с внутренним диаметром 16 футов и запасом энергии до  $10^9$  Дж.

Отклоняющие и фокусирующие магниты, используемые для направления в зону проведения эксперимента пучка частиц, созданных ускорителем, потребляют огромную мощность. Брукхэйвенский синхротрон потребляет значительно меньше мощности, чем аппаратура для направления пучка. Ведутся исследования, цель которых — заменить эти магниты

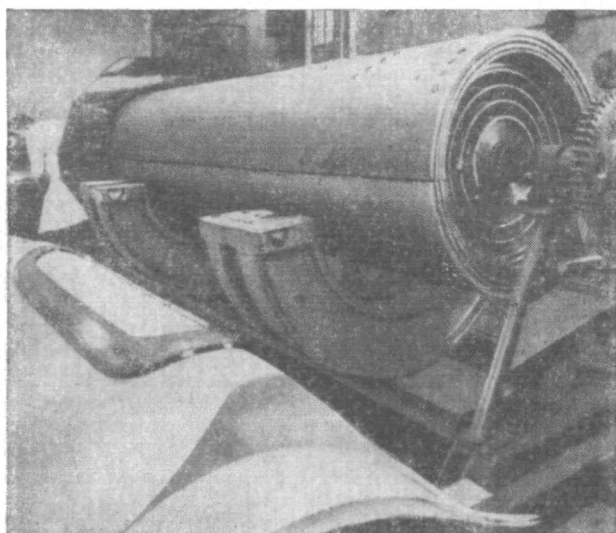


Рис. 10. Самый большой в мире сверхпроводящий магнит, собранный в исследовательской лаборатории «Авко».

Восьмитонный магнит генерирует поля 40 000 гс в объеме длиной 5 футов и диаметром 1 фут. Магнит способен хранить энергию 5 млн. дж. Изображенный магнит является работающей моделью магнита, сконструированного для использования в магнитогидродинамическом генераторе. Обмотка магнита состоит из 20 седлообразных витков; один из витков можно видеть на переднем плане.

на сверхпроводящие. Сильные поля, получаемые с помощью сверхпроводящих магнитов, а также их высокий градиент делают возможным анализ и фокусировку пучков на более коротких расстояниях, что особенно важно при исследовании частиц с коротким временем жизни. Квадрупольный сверхпроводящий фокусирующий магнит, изображенный на рис. 1 и 2, создает поле, градиент которого примерно в 5 раз выше градиента поля, создаваемого обычным фокусирующим магнитом. Мы ожидаем, наконец, что сверхпроводящие магниты будут использованы в самих ускорителях. Если для изменения траектории заряженных частиц использовать сверхпроводящие магниты с высокой напряженностью поля, можно уменьшить размер будущих ускорителей.

В физике высоких энергий существуют такие специфические эксперименты, в которых с успехом могут быть использованы сверхпроводящие магниты. Мы создали сверхпроводящий соленоид, который применяется в Брукхэйвене в эксперименте по измерению гироманнитного отношения отрицательной сигма-частицы ( $\Sigma^-$ ). Магнит используется для получения наибольшей величины произведения поля на расстояние вдоль траектории полета частиц. Сверхпроводящий магнит использовался в связи с невозможностью создания требуемого поля в столь малом существующем зазоре какими-либо другими средствами. Сконструированный магнит состоит из четырех concentric секций и создает максимальное поле напряженностью 125 000 гс.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением приложений сверхпроводящих магнитов с сильными полями, которые либо находятся в стадии конструирования, либо их создание возможно на базе уже существующих знаний. В силу быстрого развития этой области стоит остановиться на некоторых более спекулятивных возможностях. Быть может, наиболее волнующей областью будущего применения сверхпроводящих магнитов является область космических исследований. Пионерами в этой области

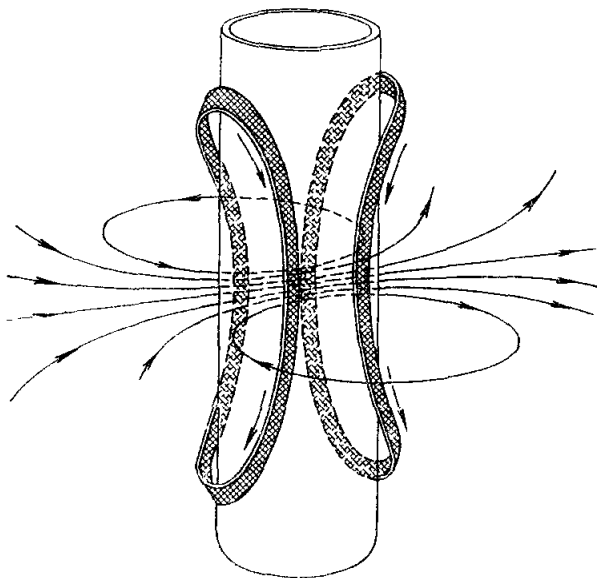


Рис. 11. Седлообразные витки, из которых состоит магнит, изображенный на рис. 10.

Витки создают поле, перпендикулярное к оси внутреннего отверстия магнита. На рисунке изображены только два упрощенных витка.

является группа исследователей в лаборатории «Авко» \*). Они детально рассмотрели вопросы энергетических запасов и пришли к выводу о существовании фундаментальной зависимости между запасами энергии, заключенной в магнитном поле, и весом установки, требуемой для противодействия магнитным силам. Из этой зависимости следует, что минимальный вес магнита равняется запасу энергии, умноженному на плотность материала, из которого сделан магнит, и деленному на прочность на разрыв этого материала. При благоприятных условиях устройство для хранения магнитной энергии в космическом пространстве может достичь 10% эффективности аналогичного устройства с использованием тринитротолуола. Вместе с тем энергия, содержащаяся в магните, может быть переведена непосредственно в электрическую энергию быстрее и более эффективно.

Другим, еще более обещающим устройством для космоса может быть магнитный экран от излучения. Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при длительных полетах в космосе, является вопрос о защите экипажа от интенсивного потока частиц высокой энергии, образующихся при солнечных вспышках. Обычное решение этого вопроса сводится к созданию массивных бронированных стенок. Другое, более обещающее решение вопроса — заставить заряженные частицы отклоняться от косми-

\*) См. 7. (Прим. пер.)

ческого корабля, заряженного до высокого электрического потенциала. Этого можно достичь, если окружить корабль облаком электронов, движущихся в магнитном поле, напряженность которого достаточно велика, чтобы удерживать орбиты электронов близко к космическому кораблю. Вычисления группы в «Авко» показали, что при использовании сверхпроводящего магнита такое экранирование может быть достигнуто при выигрыше в весе в 20 раз по сравнению с обычным экранированием.

И наконец, сверхпроводники могут быть использованы при возвращении космического корабля в атмосферу Земли. Сильное магнитное поле может создать гидромагнитное торможение в облаке ионизированного воздуха, которое образуется при входе космического корабля в атмосферу. При гидромагнитном торможении кинетическая энергия корабля будет поглощаться магнитным полем, избавляя корабль от перегрева. При использовании сверхпроводящих магнитов общий вес устройства, необходимого для защиты корабля от перегрева и разрушения, может быть значительно снижен.

Во всяком случае уже ясно, что сверхпроводящие магниты конкурируют даже с наиболее рафинированными способами создания сильных стабильных магнитных полей и что для многих экспериментальных областей они открывают уникальные перспективы.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА \*)

1. J. E. Kunzler, M. Tanenbaum, Scientific American, June 1962.
2. Г. Кольм, А. Фриман, УФН 88, 703 (1966).
- 3\*. Дж. Кюнцлер, УФН 86 (1), 125 (1965).
- 4\*. М. Г. Кремлев, Сверхпроводящие магниты — см. стр. 675 этого выпуска УФН.
- 5\*. В. Р. Карасик, Физика и техника сильных магнитных полей, М., «Наука», 1964.
- 6\*. Э. Линтон, Сверхпроводимость, М., «Мир», 1964.
- 7\*. О. П. Анашкин, Б. М. Белицкий, В. Б. Бродский, Л. В. Курносова, Л. А. Разоренов, Т. М. Сидякина, М. И. Фрадкин, Косм. исследования 6, № 1 (1967).  
См. также:  
Vernon L. Newhouse, Applied Superconductivity, Wiley and Sons, 1964.  
Charles P. Bean, Roland W. Sehnitt, Science 140 (No. 3562), 26 (1963).  
D. Bruce Montgomery, IEEE Spectrum 1 (2), 103 (1964).  
P. P. Craig, в сб. Mössbauer Effect Methodology, ed. by Irwin J. Gruverman, Plenum Press, 1965.

---

\*) Звездочкой помечена литература, добавленная переводчиком. (Ред.)