

Т В О Й К Р У Г О З О Р

В. П. КАРЦЕВ

# ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР МАГНИТОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»

ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР МАГНИТОВ

В. П. КАРЦЕВ







**ПРОСВЕЩЕНИЕ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО







---

Т В О Й      К Р У Г О З О Р

---

В. П. КАРЦЕВ

---

# ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР МАГНИТОВ

---

ИЛЛЮСТРАЦИИ Е. В. СТАНИКОВОЙ

М О С К В А

« П Р О С В Е Щ Е Н И Е »

2 0 0 8

УДК 087.5:53  
ББК 22.3  
К27

Серия «Твой кругозор» основана в 2007 году

**КАРЦЕВ В. П.**

**К27** Путешествие в мир магнитов: [для ст. школ. возраста] / В. П. Карцев; ил. Е. В. Станиковой. — М. : Просвещение, 2008. — 160 с. : ил. — (Твой кругозор). — ISBN 978-5-09-019121-0.

Мы привыкли к магниту и относимся к нему чуточку снисходительно, как к устаревшему атрибуту школьных уроков физики, порой даже не подозревая, сколько магнитов вокруг нас. В нашей квартире десятки магнитов: в электробритве, динамиках, магнитофоне, в банках с гвоздями, наконец. Сами мы — тоже магниты: биотоки, текущие в нас, рожают вокруг причудливый пульсирующий узор магнитных силовых линий. Земля, на которой мы живем, — гигантский голубой магнит. Впрочем, никто и никогда не сможет сказать, что знает о магните все. Слишком уж необъятна эта проблема. Автор приглашает читателей совершить увлекательное путешествие в мир магнитов и их истории, сквозь находки и потери, радость открытий и горечь разочарований, годы бесплодных раздумий и мгновения ослепительного прозрения.

**УДК 087.5:53  
ББК 22.3**

**НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗДАНИЕ**

*Серия «Твой кругозор»*

***Карцев Владимир Петрович***

**Путешествие в мир магнитов**

**ДЛЯ СТАРШЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА**

Зав. редакцией ***В. И. Егудин***

Редактор ***Е. Г. Таран***

Художественный редактор ***Т. В. Глушкова***

Технический редактор ***Н. Н. Бажанова***

Компьютерная верстка ***Э. Н. Малания***

Корректор ***Н. В. Малаховская***



Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000.  
Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 11.07.08. Формат 70×100 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Ньютон. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 10,91. Тираж 10 000 экз.  
Заказ № 4979.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение»

127521, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 41

Отпечатано в ОАО «Тверской ордена Трудового Красного Знамени  
полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР».

170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.



**ISBN 978-5-09-019121-0**

© Издательство «Просвещение», 2008

© Издательство «Просвещение»,  
оформление, дизайн серии, 2008



# СОДЕРЖАНИЕ

---

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| От автора                               | 6   |
| Геркулесов камень                       | 8   |
| Рукотворные магниты                     | 18  |
| Гильберт разъединяет                    | 24  |
| Франклин, Ломоносов, Араго изучают...   | 31  |
| Эрстед объединяет                       | 40  |
| Железо обзаводится «помощником»         | 47  |
| Капица: «краткость — сестра успеха»     | 54  |
| Биттер: «секрет — в охлаждении»         | 66  |
| Оннес и другие: «сначала медленно вниз» | 72  |
| Потребители просыпаются...              | 95  |
| Сортировщики микрочастиц                | 105 |
| ЭПР                                     | 111 |
| Пирамиды ядерного века                  | 114 |
| Плазма в магнитной рубашке              | 138 |
| Энергетика XXI века                     | 149 |
| Послесловие                             | 160 |

Мир магнитен. Магнитен от гигантских далеких туманностей до элементарных частиц. Человека пронизывают мириады магнитных полей различного происхождения.

Мы привыкли к магниту и относимся к нему чуточку снисходительно, как к устаревшему атрибуту школьных уроков физики, порой даже не подозревая, сколько магнитов вокруг нас. В нашей квартире десятки магнитов: в компьютере, телефоне, телевизоре, в банках с гвоздями, наконец. Сами мы — тоже магниты: биотоки, текущие в нас, рождают вокруг причудливый пульсирующий узор магнитных силовых линий. Земля, на которой мы живем, — гигантский голубой магнит. Солнце — желтый плазменный шар — магнит еще более грандиозный. Галактики и туманности, едва различимые радиотелескопами, — непостижимые по размерам магниты.

Свойство магнита притягивать некоторые предметы и в наши дни не потеряло своей чарующей таинственности. Еще не родился и, наверное, не родится никогда человек, который мог бы сказать: «Я знаю о магните ВСЕ». Почему магнит притягивает? Этот вопрос всегда будет внушать необъяснимое волнение перед прекрасной таинственностью природы и рождать жажду новых знаний и новых открытий. В данной книге читатель тоже не найдет полного ответа на этот вопрос. И основная причина — необъятность проблемы магнита.

И все же человек знает о магните очень много. Во всяком случае, вполне достаточно, чтобы заставить его служить себе.

Научные исследования, например, в области создания термоядерных генераторов электроэнергии, исследования природы материи в ускорителях заряженных частиц, создание новых материалов, электроэнергетика — это области, где требуются грандиозные, невиданные ранее по размерам и силе магниты. Проблема создания сильных, сверхсильных, ультрасильных и еще более сильных магнитных полей стала одной из основных в современной физике и технике.

Хотя ученые только еще начали понимать сущность таинственных проявлений магнетизма, им уже сегодня удалось создать новые материалы, новые магниты, новые удивительные устройства. Кажется, магнит, еще недавно непонятный и непокорный, уже начинает беспрекословно подчиняться приказам проникшего в его тайны человека. По этому поводу уместно вспомнить слова поэта: «Никто не выполнит приказа точнее, чем Солнце, если приказать ему утром встать с востока» (Велимир Хлебников).

---

---

Века не принесли полной разгадки, но многое уже познано, и все понятное позволяет неизмеримо превзойти то, что даровала человеку природа. Не понимая полностью сути процессов, приводящих к притяжению магнитом других тел, люди тем не менее научились сами создавать такие магниты, которые могут поспорить с уникальными творениями природы.

Автору хотелось, чтобы путешествие в мир магнитов и их историю было интересным читателю, ведь в этом мире есть потери и находки, радость открытий и горечь разочарований, годы бесплодных раздумий и мгновения ослепительного прозрения.

Автору хотелось, чтобы читатель прочувствовал то беспокойство, которое владеет физиками и инженерами: от магнитов зависит очень многое, и они должны быть все мощнее.

Автору хотелось, чтобы читатель, закрыв книгу, другими глазами посмотрел на ставшие привычными магниты, поверил в интригующую таинственность их природы, узнал о масштабности выполняемой ими работы и почувствовал величественность их будущего.

# ГЕРКУЛЕСОВ КАМЕНЬ

---

*В этой главе приводятся древние названия магнита, упоминается о летающей статуе Арсинои и подвергаются сомнению претензии одного итальянского ювелира.*

В тенистом уголке одного из самаркандских базаров, пропахших корицей и пловом, автор, тогда еще будучи мальчиком, часто видел древнего старика в белоснежной чалме и тонкой выделки халате, подпоясанном цветастым платком. Все знали его — это был почтенный хранитель мечети в комплексе Шах-и-Зинда. На базаре он сидел безучастно, разложив перед собой на лотке фигурки фантастических животных, сделанные из рисового теста и раскрашенные лаковыми красками. Иногда на этом же лотке он раскладывал старинные монеты — от выпуклых монет времен Александра Македонского и плоских медяшек кушанских властителей до царских серебряных рублей — и другие музейные древности. Как-то он показал мне небольшой продолговатый брусок, изрезанный затейливыми узорами. «Это — священная наrsa, — сказал он, — Минг йиллар — тысяча лет. Купишь — всегда здоровый, сильный будешь». Я повертел брусок в руках. Он был тяжел и холоден на ощупь. Узоры местами стерлись. Возможно, этому брусочку в самом деле уже тысяча лет. Я поднес к нему лезвие перочинного ножа. Несильный стук — лезвие прилипло к торцу. Так я и думал: узоры — это стершиеся буквы. Буквы составляют заклинание, сам брусок — магнит. Заклинание призвано усилить действие этого «камня любви» — приворотного камня средневековья. Лезвие ножа отрывалось от бруска довольно легко. Это был обыкновенный слабый магнит. Поле на его поверхности, как я сейчас могу оценить — не больше 5—10 мТл<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Величина магнитного поля в системе единиц СИ измеряется в тесла (Тл). В 1 Тл содержится 1000 мТл. Магнитное поле Земли составляет в среднем 0,05—0,10 мТл; магниты ускорителей создают в зазоре поле порядка 2 Тл. Физики часто пользуются нестандартной системой единиц СГС, в ней интенсивность магнитного поля, или индукция, измеряется более мелкими единицами — гауссами (Гс) (10 Гс = 1 мТл).

Уже на расстоянии 1 м стрелка компаса перестает замечать его существование. Сейчас есть магниты гораздо сильнее, но их создание потребовало веков цивилизации.

То, что показывал старик, было обработанным и украшенным куском магнетита — материала, встречающегося в некоторых железорудных месторождениях. Такие магниты известны уже много сотен лет. А может быть — тысяч. И я решил по книгам проследить историю магнита.

Итак, литература о магните. Ее оказалось неожиданно много.

Природные магниты, попросту говоря, кусочки магнитного железняка — магнетита (химический состав 31%  $\text{FeO}$  и 69%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), не везде назывались магнитами. В разных странах их называли по-разному: китайцы называли его чу-ши; греки — адамас и каламита, геркулесов камень; французы — айман; индусы — тхумбака; египтяне — кость Ора, испанцы — пьедрамант; немцы — магнесс и зигельштейн; англичане — лоудстоун.

Добрая половина этих названий переводится как любящий, любовник. Так поэтическим языком древних описано свойство магнетита притягивать, «любить» железо.

...Самые старые «документальные» свидетельства о знакомстве людей с магнитами пришли к нам из Центральной Америки. На городской площади гватемальского городка Демокрасия стоит джюжина древних фигур, найденных при раскопках городища ольмеков. «Толстые мальчики», как их называли за округлость и массивность, — символы сытости, благополучия, плодovitости. Эти скульптуры более трех тысяч лет назад высечены из глыб магнитной породы. Интересно, что магнитные силовые линии как бы выходят из живота «толстиков»! Кстати, кроме «толстых мальчиков», древние ольмеки умели высекать фигуры морских черепах с намагниченной головой, связывая, возможно, способность черепах находить курс в открытом море со свойствами магнита ориентироваться в магнитном поле Земли.

Есть намеки, правда, весьма туманные, на то, что в седой древности знали о магнитах и в Азии, и в Китае. Много лет назад китайский фольклорист Су Матзен собрал библиотеку старинных летописей. Вот сведения из этих летописей, посвященные магнитам.

...Идут караваны по бескрайним гобийским пескам. Направо, налево — унылые желтые барханы. Солнце скрыто желтой пеленой пыли. Далекий путь из императорских пагод на берегах Янцзы до минаретов кушанских царств. Трудно пришлось бы караванщикам, если бы не было в караване белого верблюда. Белого верблюда с его бесценным грузом. Бесценным, хотя это не золото, не жемчуг и не слоновая кость. Защищенный деревянной резной клеткой, между горбами белого верблюда совершал свой путь через пустыню глиняный сосуд, в котором на деревянной «лодочке» плавал в воде небольшой продолговатый кусок намагниченного железа. Края сосуда были выкрашены в четыре цвета. Красный обозначал юг, черный — север, зеленый — восток и белый — запад. Глиняный сосуд с кусочком железа в нем был примитивным древним компасом, указывавшим караванщикам путь в бескрайних песках.

...Император Чеу Кун решил отблагодарить послов далекого Юе-Чана (Вьетнама) за белых фазанов — доставленные ими символы дружбы — и подарил им пять колесниц с фигурками, всегда указывавшими на юг. Послы отправились домой, достигли берега моря, миновали много неведомых городов и год спустя прибыли на родину...

Возможно, в этих легендах, относящихся к 1100 г. до н.э., содержится первое упоминание о компасе, т.е. полезно использованном магните. Но не исключено, однако, что в процессе многократного перевода и неизбежной реконструкции текстов их технический смысл был искажен. Известный историк физики Я. Б. Дорфман считал, например, что «югоуказатели» на повозках на самом деле были примитивными устройствами для выдерживания колесами любого наперед заданного, в том числе и южного, направления. Ясно, что в этом случае «югоуказатели» не имеют никакого отношения ни к магнетизму, ни к магнитам.

В китайских летописях встречаются описания магнитных ворот, через которые не мог пройти недоброжелатель с оружием, а также магнитных мостовых и прочих применений волшебного камня чу-ши, попросту магнитного железняка.

В другой легенде рассказывается о военной победе императора Хуанг-Ти, одержанной более трех тысяч лет назад. Этой победой он был обязан своим мастерам, изготовившим повозки, на которых были установлены фигурки человека с рукой, вытянутой вперед. Фигурки могли вращаться, но вытянутая рука всегда указывала на юг.

С помощью таких повозок Хуанг-Ти смог в густом тумане напасть на врага с тыла и разгромить его.

Опираясь на сведения, приведенные в древнейших китайских энциклопедиях, можно высказать догадку о том, что между 300 и 400 гг. до н.э. магнитная стрелка использовалась на кораблях.

Если же перейти от легенд к твердо установленным фактам, то компас значительно «помолодеет». Так, в музее хранится китайский компас «лишь» тысячеклетней давности, напоминающий по форме нашу хохломскую ложку.

Из других древнейших упоминаний о магнитах следует выделить рассказ о часовне Магомета с магнитным сводом, под которым парит железный сундук с прахом пророка. Однако европейским путешественникам ни разу не удалось увидеть этой диковины, даже тем, кто, прикинувшись правоверным и обманув бдительность мулл, проник в храм Каабы.

Гораздо более определенно можно ссылаться на европейские источники. О магните в той или иной связи писали до нашей эры Пифагор, Гиппократ, Платон, Эпикур, Аристотель и Лукреций, потом Плиний, Плутарх, Гален и Птолемей.

Тысячи лет назад кабиры (так называли бродячих фокусников Древней Греции) странствовали по своей земле и давали в тени олив удивительные представления. Одно из них всегда приковывало внимание обитателей окрестных селений. То, что делали кабиры, внушало благоговейное почтение к их тайному могуществу.



Несколько тяжелых железных колец висели, ничем не связанные между собой, одно под другим, не падая. Казалось, могущественный Зевс, сильный и невидимый, поддерживает ладонями на весу эти кольца.

Секрет кабиров заключался в том, что кольца эти были сделаны из «геркулесова камня», добывавшегося где-то в Маниссе.

Название «магнит», как утверждает Платон, дано магнетиту Еврипидом, называвшим его в своих драмах «камнем из Магнезии». По другой, значительно более красивой и известной, но менее правдоподобной притче Плиния (заимствованной им у Никандра) название дано в честь сказочного волопаса Магниса, гвозди от сандалий и железная палка которого прилипали к неведомым камням.

По-видимому, слово «магнит» действительно происходит от названия греческой провинции Магнезия (в западной Турции), жителей которой звали магнетами. Так утверждал Тит Лукреций Кар в своей поэме «О природе вещей». Русский путешественник В. А. Теплов, посетивший Магнезию в 80-х годах позапрошлого века, утверждал, что гора известна частыми ударами в нее молний (этим же славилась и гора Магнитная на Урале, почти целиком состоящая из магнетита). Наиболее распространенная из сказок о чудодейственной силе магнита, вошедшая в сказки «Тысяча и одной ночи», заимствована у Плиния, который утверждал, что в Эфиопии существует гора Зимир, вытягивающая из кораблей все гвозди и железные части.

И в Азии, и в Европе, по-видимому, давно использовали магнетизм Земли, применяя для ориентирования магнитный камень, подвешенный на нити или установленный на дощечке, плавающей на спокойной поверхности воды. В старом французском романе «О розе» магнит описывался под названием «маринетта», из чего можно сделать вывод об использовании его на морских судах.



Эти обстоятельства не смогли помешать итальянцам построить в Неаполе памятник Флавио Джойя, жителю города Амальфи, который якобы изобрел магнитный компас в 1302 г., и отпраздновать в 2006 г. семисотлетие открытия. Не за легенду говорят хотя бы упоминания о компасе монаха из монастыря св. Альбана Александра Некэма в 1187 г. и стихи поэта Гюйо Прованского, написанные в 1206 г.

Но красивая легенда о Флавио Джойя, «изобретателе компаса», до сих пор живет у итальянцев.

...Давным-давно в городке Амальфи, который стоял у моря, жил Флавио Джойя, ювелир и инкрустатор. Он был беден и весел, а кроме того, любил Анджелу, дочь богатого рыбака Доменико.

Рыбак Доменико не хотел, чтобы его дочь вышла замуж за «сухопутного» Джойя, и поставил перед Флавио тяжелое условие — научиться плавать по прямой линии в тумане и в ночи. Ясно, что это условие невыполнимо: попробуйте погрести пять минут, закрыв глаза — наверняка приплывете туда, откуда отплыли.

Но Флавио был не из тех, кто унывает. В работе для инкрустирования маленькими кусочками железа он использовал магнитный камень. Как-то Флавио заметил, что, если положить этот камень на кусочек дерева, плавающий в воде, он поворачивается всегда в одну сторону. Так, по легенде, Флавио изобрел компас. Через месяц он женился на красавице Анджеле, а рыбаки получили компас.

(Этот поэтический рассказ, к сожалению, совершенно «рассыпается», если подойти к нему с позиций исторического анализа. Анатолий Коваленко, советский специалист по компасам, убедительно показал, что благодаря путанице и «испорченному телефону» имя секретаря папы Флавио Бьендо, рассказывавшего в 1450 г. о том, что жители Амальфи знают о компасе, превратилось в имя ювелира Флавио Джойя — «изобретателя компаса»).



Магнитная сила привлекала не только мореходов. Ею всерьез интересовались и древние строители. Плиний писал, что александрийский архитектор Хинократ (или Тимохарес) начал делать свод храма Арсиной из магнитного камня, для того чтобы железная фигура Арсиной висела в воздухе; этот замысел не был, по-видимому, осуществлен из-за смерти Хинократа и брата Арсиной, Птолемея, который, как выразились бы сейчас, «спонсировал» это предприятие.

Многие историки религии единодушно и независимо утверждают, что в александрийском храме Сераписа статуя бога Солнца могла, к изумлению молящихся, взлетать к потолку, увлекаемая силой большого магнита. А через тысячи лет идея «храма Арсиной» вновь обрела своих приверженцев: архитекторы — наши современники предложили проекты сооружений с использованием магнитных сводов, напоминающих свод Хинократа.

Даже из этого краткого обзора видно, что магнит был хорошо известен древним. Мало того, магнитные свойства уже тогда использовались.

И все-таки... почему? Почему магнит — магнит? Кто первым упомянул магнит и кто дал его свойствам объяснение?

Как и во многих иных случаях, истоки «научного» знания о магните восходят к греческому философу Фалесу Милетскому, который в VI столетии до нашей эры попытался дать первое известное в литературе объяснение свойствам магнита. «Магнит живой, ибо он двигает железо». Вряд ли он, разумеется, считал, что магнит жив в том смысле, как живы живые существа.

Аристотель, толкуя мысли Фалеса в своем трактате о душе, писал: он (Фалес) почитал причиной всякого движения душу, и, следовательно, лишь благодаря ей магнит может сообщать движение железу.

Итак, душа. Еще Орфей пел, что «железо тянется к магниту, как невеста к жениху». А, может быть, в магните живет душа злая? Может быть, магниты созданы злыми демонами на погибель людям и на пользу ворами? Ведь то, что обладает свойством отодвигать запоры и отпирать замки, наверняка создано ради воровства. Платон (IV столетие до нашей эры) утверждал, что свойства магнита имеют божественное происхождение, и тем самым избежал многих раздумий и сомнений.

Он писал, например: «...Божественная сила магнита передается от железа к железу подобно тому, как вдохновение музыки передается через поэта его рассказчику и слушателю». Объяснение эпикурейца Лукреция явно было убедительней, хотя с современных позиций наивно. Мы приводим ниже эту несколько затянутую цитату из Лукреция ввиду ее исключительной ценности. Ведь этим гекзаметрам уже более двух тысяч лет!

«Мне остается сказать, по какому закону природы  
То происходит, что камень притягивать может железо,  
Камень же этот по имени месторождения магнитом  
Назван был греками, так как он найден в пределах магнетов.  
Люди весьма удивляются камню такому. Он часто  
Цепь представляет из звеньев, держащихся сами собою.

Можешь увидеть ты пять таких звеньев, порой даже больше.  
Распределенные рядом, качаясь от легкого ветра,  
Звенья такие свисают, одно под другим прилепившись.  
Звенья одно от другого всю силу и цепкость приемлют.  
Вот как здесь действует этого камня текучая сила...  
Прежде всего из магнита должны семена выделяться  
Множеством или же ток истекать, разбивая толчками  
Воздух, который везде между камнем лежит и железом,  
Только что станет пустым пространство меж ними, и много  
Места очистится там, как тотчас же, общию кучей  
Первоначала туда стремглав понесутся железа;  
Следом за тем кольцо устремляется всем своим телом.  
Вовсе не надо тебе удивляться, что ток из магнита  
Не в состоянии совсем на другие действовать вещи:  
Частью их тяжесть стоять заставляет, — как золото, — частью  
Пористы телом они, и поэтому ток устремляется  
Может свободно сквозь них, никуда не толкая при этом;  
К этому роду вещей мы дерево можем причислить.  
Среднее место меж тем и другим занимает железо...  
Вещи, в которых их ткань совпадает взаимно с другою.  
Так что где выпуклость есть, у другой оказалась бы там же  
Впадина, — эта их связь и окажется самою тесной.  
Есть и такие еще, что крючками и петлями будто  
Держатся крепко, и этим друг с другом скрепляются вместе.  
Это скорее всего происходит в железе с магнитом...»

Про крючки и петли сказано, может быть, слишком прямолинейно. Однако каждому ясно, что древние отлично понимали главное. Кроме магнита есть нечто, его окружающее. Можно говорить о душе, об атмосфере, об истечениях или исторгаемых наружу семенах. Сейчас это называют магнитным полем. Именно оно тянет железо к магниту.

Великолепная картина, данная Лукрецием, поэтически перелагает тезис Эпикура: «Фигуры атомов и неделимых тел, истекающих из камня и из железа, так подходят друг к другу, что легко сцепляются между собой; итак, ударившись о твердые части камня и железа, а затем отскочив в середину, они одновременно и связываются друг с другом, и влекут железо».

Великий Платон, философ-идеалист, так комментировал механизм магнитных действий: «...ввиду того, что не бывает никакой пустоты, эти тела со всех сторон толкают друг друга, и когда они разделяются и соединяются, все, обменявшись местами, переходят на свое обычное место. Вероятно, те, кто произведет правильное исследование, придут в изумление от этих запутанных взаимоотношений».

Что и говорить, повествуя о «запутанных взаимоотношениях», Платон был весьма дальновиден. Последующие открытия убедили ученых в том, что природа магнетизма гораздо сложнее, чем зацепления с помощью крючков и зацепок. Механистических представлений древних оказалось недостаточно, чтобы справиться с описанием магнитных явлений. Даже сейчас, когда мы очень многое знаем о при-

роде магнетизма и благодаря этим знаниям сумели создать ряд исключительно важных магнитных материалов, еще остаются, к сожалению, справедливыми слова великого Гильберта: «Скорбите и плачьте, ученые, по поводу того, что ни прежние перипатетики, ни сами вульгарные философы, ни Иоанн Костей, высмеивающий все это, не могли постичь этой столь благородной и замечательной природы».

Уникальная способность магнита притягивать железные предметы ассоциировалась в воображении древних с плотской любовью, и поэтому первые объяснения притягивающего действия этих камней были связаны с приписыванием магниту женского, а железу мужского начала. Иногда считали и наоборот. Это, конечно, нисколько не меняло дела. Суть сводилась к тому, что любые «притяжения», в том числе и притяжение магнита, были механически приравнены одно другому. Стремление пылинок к потертому о шерсть янтарю, металлических колец к магниту, одного человека к другому считали явлениями одного порядка. В обширную за счет этого коллекцию «магнитов» попали многие, весьма странные с современной точки зрения экспонаты. Так, в свое время писали о «креагическом», или «мясном», магните, поскольку некоторые видели, как куски мяса прилипают к губе.

Гильберт когда-то писал: «Пламя серы притягивает, так как оно похищает некоторые металлы благодаря своей способности проникать внутрь их. Так белая нефть привлекает пламя, так как она испускает и испаряет воспламеняющийся газ, почему она на некотором расстоянии и воспламеняется; таким же образом дым только что потушенной свечи воспринимает пламя от другого пламени: ведь огонь ползет к огню сквозь воспламеняющуюся среду...»

В семейство «магнитов» попали также: рыба-прилипала; морские моллюски, присосавшиеся к днищу корабля; камень сагдон, к которому якобы притягиваются деревья, причем с такой силой, что оторвать их можно только, обрубая сучья и ветви; камень катохит, притягивающий к себе мясо (как впоследствии выяснилось, этот камень «от его липкости и присущего ему клея» пристаёт к теплым рукам).

Воображением и наблюдательностью наших предков было образовано и семейство «антимагнитов», т.е. семейство существ и веществ, взаимно отталкивающихся. В это семейство попали и антипатичные друг другу люди; и пламя свечи, отталкивающееся от магнита; и масло, отталкивающее воду.

«...Плиний, выдающийся человек и лучший из тех, кто делал выписки (ведь он передал потомству не всегда и не преимущественно то, что он видел и открыл сам, а чужое), списал у других сказку, ставшую в новое время, благодаря частым пересказам, общеизвестной: в Индии, у реки Инда, есть две горы; природа одной, состоящей из магнита, такова, что она задерживает всякое железо; другая, состоящая из феамеда, отталкивает железо. Так, если в обуви имеются железные гвозди, то нет возможности оторвать подошвы от одной из этих гор, а на другую нет возможности ступить». Гильберт, человек, на долю которого выпало разделить все эти явления «притяжения и отталкивания» на соответствующие категории и выделить из них лишь то, что непосредственно касается магнита,

отвергал всякие рассуждения о феамеде — веществе, отталкивающемся от железа. Может быть, это была ошибка Гильберта. Альберт Великий писал, что в его время был найден магнит, который одной своей стороной притягивал к себе железо, а другой, противоположной, отталкивал его.

Сегодня хорошо известно, что есть материалы, которые магнитом отталкиваются. К их числу, например, принадлежит медь. Правда, это отталкивание очень слабое, но кто знает, не могли ли древние каким-то образом заметить его и создать свое учение о феамеде — антимангите.

Сейчас такие вещества называют диамагнетиками.

Вещества, притягивающиеся к магниту, называют парамагнетиками и ферромагнетиками. Свойство притяжения в наибольшей степени присуще ферромагнетикам, и, в первую очередь, железу, никелю и кобальту.

Причиной магнитных свойств единодушно считают вращение заряженных электронов вокруг ядра атома и собственное вращение электрона вокруг оси (спин). Всякое движение заряда — это электрический ток, а каждый ток создает магнитное поле.

Магнитные свойства атомов, так же как и все их свойства, находят отражение в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Изменению номера элемента в таблице Менделеева соответствует изменение структуры электронных оболочек атома. Структуры оболочек ферромагнитных атомов таковы, что все электроны, грубо говоря, вращаются в одну сторону, создавая сильный суммирующий магнитный момент. В неферромагнитных же атомах магнитные моменты электронов направлены в разные стороны, что приводит к их взаимной компенсации.

В немагнитном ферромагнетике магнитный момент тела в целом равен нулю. Это объясняется тем, что в ферромагнетиках все атомы делятся на группы — так называемые домены. Каждый из доменов, видимый невооруженным глазом, содержит миллиарды атомов, ориентированных в одном направлении, и, таким образом, имеет солидный суммарный магнитный момент. Однако тело в целом магнитным моментом не обладает, поскольку домены в теле расположены хаотично.

Помещая тело в магнитное поле, мы способствуем тому, что все домены постепенно ориентируются в направлении внешнего магнитного поля и их магнитные свойства суммируются. Сняв внешнее магнитное поле, получим новый магнит — ферромагнитное тело, в котором все домены намагничены в одном направлении. Если мы хотим в течение длительного времени сохранить магнитные свойства «рукотворного магнита», нужно приложить усилия к тому, чтобы домены не вернулись к прежнему хаотическому расположению. Для этого магнит не нужно трясти и нагревать.

Почему же намагниченные тела притягиваются? Теория утверждает, что всякая система пытается принять такое положение, в котором ее энергия минимальна.

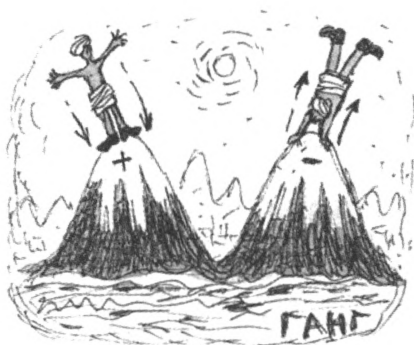
Почему камень падает на землю? Он падает на землю потому, что стремится занять такое положение, в котором его потенциальная

энергия будет минимальной. Другими словами, камень стремится занять энергетически наиболее низкое положение и поэтому падает.

Существуют громоздкие математические формулы, говорящие о том, что суммарная энергия двух магнитов, касающихся один другого, меньше, чем энергия магнитов, разнесенных на некоторое расстояние. Поскольку система должна занять энергетически наиболее «низкое» положение, магниты притягиваются. То же самое можно сказать о магните и куске железа.

Такое объяснение универсально и просто. Если оно вас удовлетворяет, можете считать загадку магнита решенной.

Нужно отметить, однако, что поскольку современное объяснение магнетизма следует из категорий квантовой физики, полная разгадка тайны магнита наступит тогда, когда мы полностью поймем суть пока еще таинственных процессов, происходящих в микромире.



# РУКОТВОРНЫЕ МАГНИТЫ

---

*В этой главе, начинающейся историей флюгера Оксфордского собора, говорится о тех магнитах, которые сделаны людьми с помощью других магнитов.*

Из железа изготовляют множество чрезвычайно полезных вещей. Так, англичанин Вильям Гильберт четыре столетия назад писал: «Иное железо пригодно для панцирей, иное — против выстрелов метательных орудий, иное — против мечей и против стали кривых сабель (обычно называемой «цементированной сталью»); одно служит для мечей, другое нужно для лошадиных копыт. Из него делаются гвозди, крюки, задвижки, пилы, ключи, решетки, двери, створки, лопаты, палочки, подпорки, рыболовные и прочие крючки, трезубцы, горшки, треножники, наковальни, молоты, клинья, цепи, ручные и ножные оковы, кирки, сечки, серпы, корзинки, заступы, мотыги, струги, грабли, сошники, вилы, чаши, чашечки, ложечки, ложки, вертелы, ножи, кинжалы, мечи, секиры, копья, дротики, пики, обоюдоострые мечи, якоря и множество нужных для мореходства предметов; кроме того, ядра, короткие копья, шины, панцири, шлемы, нагрудники, конские подковы, ножи, проволоки, струны для музыкантов, кресла, опускные решетки, луки, баллисты и гибельные для человеческого рода бомбарды, пули и пушечные ядра и бесконечное множество неизвестных латинянам орудий».

К этому очень полному списку нужно, по-видимому, добавить, по крайней мере, еще один важнейший пункт — из железа делают магниты.

Говорят, настоятель Оксфордского собора никак не мог взять в толк, что от него хочет этот знаменитый Фарадей. Он пришел просить, чтобы ему отдали на исследование железную палку флюгера собора.

— И зачем вам такая старая проржавевшая палка? Того и гляди, флюгер-петух свалится с нее! Ведь она стоит на верхушке собора, наверное, уже лет триста!

— Вот и отлично, — так, надо полагать, ответил Фарадей, — нам как раз и нужна эта заржавевшая развалина. Проследите, пожалуйста, только за тем, чтобы, пока ее снимают и спускают вниз, не меняли бы ее вертикального положения!

Когда палку сняли и поставили вертикально во дворе собора, Фа-радей с помощником поднесли поочередно к ее верхнему и нижнему концам компас. Палка флюгера оказалась слабым магнитом — ее нижний конец был южным полюсом, верхний — северным.

Еще раньше, задолго до этих событий, Гильберт заметил, что все железные колонны, стоящие вертикально в Ирландии, сами по себе становятся магнитами, причем нижний их конец всегда южный.

Путешественники, побывавшие в Австралии, рассказывали, что там происходит то же самое — железные колонны всегда становятся магнитами. Только южный полюс у них — наверху.

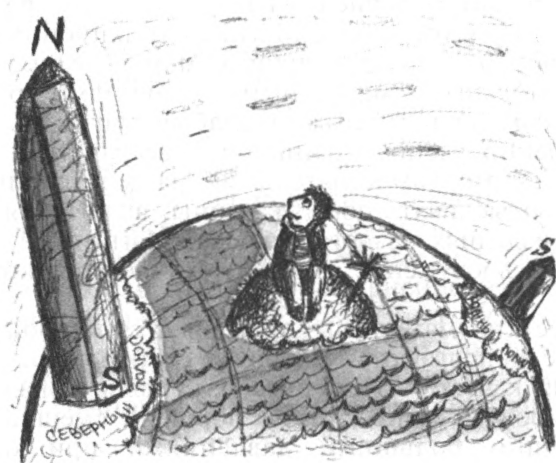
Точно так же, расположив железный стержень в направлении север — юг, можно заметить, что стержень намагничивается: конец, обращенный к югу, приобретает северную полярность, и наоборот.

Стальные корпуса кораблей, стоящих на стапелях, во время постройки приобретают намагниченность за счет магнитного поля Земли и становятся, таким образом, гигантскими плавающими магнитами.

Естественные магниты вытачивали из кусков магнитного железа, и они достигали подчас довольно значительных размеров. По сей день в Тартусском университете в Эстонии находится самый крупный известный естественный магнит. Его масса 13 кг, а подъемная сила 40 кг (в арматуре).

Такие магниты в медной оправе с железными накладками в изобилии выпускались уральскими заводами. Их использовали горные офицеры, моряки, изготовители компасов, исследователи. Такие магниты заказывали и богатые любители курьезов. Обычно оправой магнитов служила красиво отделанная медная коробочка, наверху крепилась подвижная ручка, снизу подвешивалось «ярмо» с фигурно вырезанной рамкой и крючком для подвески груза. Эти магниты поднимали груз, превышающий по массе сам магнит раз в десять.

Один из самых сильных естественных магнитов был, по преданию, у Ньютона — в его перстень был вставлен магнит, поднимавший предметы, масса которых была в 50 (!) раз больше массы самого магнита.



Искусственные магниты, полученные методом натирания, стали изготавливать в Англии еще в XVIII веке. При изготовлении магнитов не все сорта железа вели себя одинаково: в одном случае быстро получали желаемый результат, в другом — намагниченность была ничтожной. Легконамагничивающиеся вещества, как правило, так же легко и размагничиваются (чистое железо); труднонамагничивающиеся вещества (сталь) остаются сильнонамагниченными и после удаления внешнего магнитного поля. Первые вещества обычно называют магнитомягкими, вторые — магнито жесткими.

В конце XIX века заметили, что добавка к железу 3% вольфрама примерно в 3 раза улучшает свойства искусственных магнитов. Добавка кобальта улучшает свойства еще в 3 раза.

Лучшим предвоенным магнитным сплавом был сплав альнико на базе алюминия, никеля и кобальта. С помощью магнитов из альнико можно было поднимать железные предметы массой, в 500 раз превышающей массу самого магнита. При измененной технологии (при спекании порошкообразного альнико) удалось поднять предмет, масса которого превосходила массу магнита в 4450 раз.

Еще более сильные магниты изготавливают из сплава магнико, в состав которого входят железо, кобальт, никель и некоторые другие добавки. Созданные на основе этого сплава «порошковые» магниты могут поднимать груз железа массой, более чем в 5000 раз превышающей их собственную.

Еще более сильными являются так называемые оксидно-бариевые магниты.

Неисчислимы примеры применения магнитных материалов. Постоянные магниты являются очень важной частью многих устройств, применяемых в нашей повседневной жизни. Их можно встретить в телефоне, телевизоре, DVD-плеере, в автомобиле, в устройстве, снимающем данные с вашей кредитной карты. Изготавливали даже «магнитные челюсти», т.е. сильно намагниченные стальные челюсти, взаимно отталкивающиеся и вследствие этого не нуждающиеся в креплениях. Магниты широко применяют и в современной науке. Магнитные материалы нужны для работы в СВЧ-диапазонах, для магнитозаписи и воспроизведения, создания магнитных запоминающих устройств. Магнитострикционные преобразователи позволяют определять глубину моря. Без магнитометров с высокочувствительными магнитными элементами трудно обойтись, если нужно измерить ничтожно слабые магнитные поля, сколь угодно изошренно распределенные в пространстве. Магнитная дефектоскопия — это самостоятельный раздел теории и практики, позволяющий отыскивать поры, каверны, включения в металлических слитках, изделиях разного размера. Магнитные измерения уже давно взяты на вооружение отделов технического контроля многих предприятий.

Магнито жесткие материалы производятся особой отраслью металлургии, где используются наиболее современные способы плавки и контроля качества. Исходные материалы попадают в мельницы с атмосферой инертных газов, порошки смешиваются, прессуются чудовищно большими давлениями при одновременном



наложении громадных магнитных полей, которые ориентируют домены для усиления их действия.

Часто сплавы, из которых делают магниты, кроме железа, содержат алюминий, никель, кобальт, медь, титан, другие металлы. Пропорции подобраны таким образом, чтобы слитки разной формы обладали наибольшей магнитной индукцией, их структуру можно по заказу делать то однородной, то анизотропной, в ней прорастиваются в заданном направлении игольчатые кристаллы, тепловые и электромагнитные волны помогают металлофизикам варьировать свойства заготовок, добиваясь объемного распределения их качеств.

В итоге удастся создать магниты с весьма высокой подъемной силой. Сплав кобальта с редкоземельными элементами позволяет, например, поднять груз 200 г на 1 г массы магнита.

Самый большой в мире постоянный магнит весит 2 т. С его помощью создается магнитное поле интенсивностью 0,11 Тл в объеме примерно 10 л. Такой магнит применяют во вспомогательном оборудовании ядерного реактора Чикагского университета; это — часть магнитогидродинамической установки для перекачивания жидких металлов.

А бывали случаи, когда с магнитами боролись, когда они оказывались вредными. Возьмем, например, намагничивание корпуса корабля, когда он долго находится в одном положении. Такая «спонтанная» намагниченность совсем не безобидна: мало того, что компасы корабля начинают «врать», принимая поле самого судна за поле Земли и неправильно указывая направление, плавающие корабли-магниты могут притягивать железные предметы. Если такие предметы будут связаны с минами, результат притяжения очевиден. Вот почему ученым пришлось вмешаться в проделки Природы и специально размагничивать корабли, чтобы на них перестали реагировать магнитные мины.

Вот история времен Великой Отечественной войны, которая иллюстрирует ответственную работу специалистов по магнетизму в те суровые годы.

Впервые о магнитных минах советские моряки узнали еще в 1919 г., когда флот Антанты «засыпал» этим до того невиданным оружием русло Северной Двины. В тех минах железная стрелка поворачивалась под влиянием магнитного поля плывущего неподалеку корабля и замыкала контакты взрывателя. Обезвредить магнитные мины было непросто: они были донными, а не плавающими на якорях, потому обычное траление цели не достигало. Кроме того, взрыв происходил под обычно слабо бронированным днищем корабля, так что корабль был обречен.

Военные моряки нашей страны предвидели опасность возможной войны и предугадали грядущее применение агрессором магнитных мин. По заданию ВМФ СССР в середине 1930-х годов за разработку мер обезвреживания подобного оружия взялся Анатолий Петрович Александров, знаменитый впоследствии академик, один из руководителей советской мирной атомной программы, тогда молодой ученый.



А. П. Александров с коллегами предложили «размагничивать» корабли. Этот метод борьбы с минами поначалу вызвал возражения у многих, поскольку полностью лишить корабль магнитного поля очень непросто. Поэтому оппоненты предлагали заняться разработкой специальных тралов. Противники метода Александра вспоминали про якобы неудачные опыты по размагничиванию корабля «Марат». Или предлагалось брать пример с англичан, которые решили идти альтернативным путем: намагничивать корабль так сильно, чтобы мина срабатывала задолго до прохождения корабля.

Ученые отстаивали свою правоту. Во-первых, показывая лабораторную модель, которая не действовала на чувствительный датчик магнитного поля; во-вторых, напоминая, что враг может устанавливать мины с «заглублением», срабатывающие только от очень сильного сигнала. Доводы А. П. Александрова были признаны убедительными.

События настолько убыстрились, что жизнь стала напоминать киноленту, пущенную с большой скоростью:

1937 г. — удачные опыты по размагничиванию судов в Кронштадте;

1938 г. — удачное пробное размагничивание «Дозорного» и «Марата»;

1939 г. — успешное плавание размагниченного «Выборного» над магнитными минами (без заряда) в Онежском озере;

1940 г. — замеры полей у судов на Балтике, Днепре, в реке Москве, монтаж опытных систем размагничивания;

1941 г. — начинается война, работы не завершены. 21 июня на магнитных минах в Финском заливе подрываются эсминец «Гневный» и крейсер «Максим Горький», 24 июня на одной из донных мин (гитлеровцами выставлена первая партия из 160 магнитных мин) подрывался тральщик БТЩ-208, в июне А. П. Александровым размагничен крейсер «Киров»; формируются коллективы из ученых, моряков и судостроителей для массового оснащения кораблей токнесущими обмотками, нивелирующими намагниченность корпуса. После 1942 г. ни один наш корабль не подрывался на магнитной mine.

...Магнетизм «положения» приобретают все железные предметы, длительно лежавшие в магнитном поле, — будь то поле Земли или поле другого магнита. Магнетизмом положения еще в древние века пользовались кузнецы — первые люди, получавшие магниты искусственным путем из обыкновенного железа.

Магнетизм положения — частное проявление более общего случая. Известно, что любое железное или стальное тело, внесенное в поле магнита, само становится магнитом. К гвоздю, притянутому подковообразным школьным магнитом, притягивается бритва, к ней — скрепка и так далее.

На этом принципе основан применяемый некоторыми врачами очень полезный инструмент для извлечения из желудка и дыхательных путей рассеянных пациентов игл, булавок и других железных предметов. Этот инструмент, называемый магнитным зондом, опускается, например, в желудок пациента. За операцией следят на экране специальных мониторов. Секрет зонда, с помощью которого можно вынуть из желудка даже раскрытую английскую булавку, заключается в том, что железный наконечник его является магнитом не всегда, а лишь в необходимый момент. Это происходит вследствие того, что внутри зонда пропущен гибкий стальной стержень. При необходимости «включить» магнит наружный конец стержня подсоединяют к постоянному магниту. Стержень намагничивается и притягивает к себе проглоченный предмет.

Намагничивание железных предметов от находящегося поблизости магнита доставляет и по сей день неприятности людям, носящим часы и по долгу службы имеющим дело с мощными магнитами. В таких часах все железные части намагничиваются, и к силе пружинки в них добавляются силы притяжения, искажающие ход часов до такой степени, что ими становится невозможно пользоваться. В конце XIX века эта проблема приобрела столь крупные масштабы, что понадобилась разработка прибора для размагничивания часов. А предприимчивая часовая компания «Валтхам», в свою очередь, выпустила в 1888 г. часы, которые не боялись никаких магнитных полей. Для испытания эти часы поместили на 15 мин у самого жерла гигантской «пушки-магнита» майора Кинга. Секрет фирмы оказался очень простым. Самым надежным экраном для предохранения железных частей механизма — пружинки, балансира — от намагничивания является само железо. Корпус часов «Валтхама» был изготовлен из обычной магнитной стали.

Искусственные магниты можно также получить, натирая куском магнитного железняка в одном направлении железные бруски или просто прислоняя ненамагниченный образец к постоянному магниту. Интересно, что этим способом можно получить искусственные магниты гораздо более сильные, чем исходные.



# ГИЛЬБЕРТ РАЗЪЕДИНЯЕТ

---

*Что случится с магнитом, если положить рядом с ним бриллианты? Почему магнит — магнит? «Дело в душе», — считает Гильберт.*

Лев Николаевич Толстой, как оказывается, работал и на ниве научно-популярного жанра. Вот что писал он об электричестве: «Когда придумано было это электричество, стали его прилагать к делу: придумали золотить и серебрить электричеством, придумали свет электрический и придумали электричеством на дальнем расстоянии с места на место передавать знаки. Для этого кладут куски разных металлов в стаканчики, в них наливают жидкости. В стаканчиках набирается электричество, и это электричество проводят по проволочке в то место, куда хотят, а из того места проволоку проводят в землю».



Надо полагать, что великий писатель, написав фразу: «Когда придумано было это электричество», имел в виду сравнительно недавние времена — что-нибудь 100—150 лет до времени Толстого или где-то 200—250 лет до нашего времени.

У современных ученых есть некоторые основания утверждать, что «придумано было это электричество» три-четыре тысячи лет назад и что «придумали золотить и серебрить электричеством» в то же самое время. Доказательством, возможно, могут служить «странные» предметы, найденные археологами в засохшем и отвердевшем иле неподалеку от берегов Тигра, южнее Багдада. Они хранятся (если пережили разграбление, вызванное войной) в Иракском музее в Багдаде и в историко-научной литературе известны как «багдадские батареи».

Что представляли собой эти странные предметы? И, собственно, чем они странны? Дело в том, что археологи, нашедшие их в 1936 г. в древней могиле при строительстве железной дороги вблизи Багдада, долгое время не могли понять их назначения. Небольшие сосуды из отожженной глины имели весьма необычную «начинку» — разъеденные медные цилиндрики и железные бруски. Исследовав цилиндрики, археологи пришли к выводу, что разъедание, скорее всего, результат воздействия уксусной или лимонной кислоты, хорошо известных в то время. Однако самое неожиданное находилось на дне сосудов — это был небольшой и невзрачный на вид слой битума, того самого битума, который и сегодня иногда используют в качестве электрической изоляции.

Ученые рассуждали так: если в медный сосуд с кислотой поместить железную пластину, используя изоляцию (битум), то получается не что иное, как химический источник тока. Американские ученые воспроизвели устройство и, используя винный уксус в качестве электролита, действительно, получили батарею, способную обеспечивать напряжение в полвольта в течение восемнадцати дней. Физик Уолтер Винтон из лондонского Музея науки специально прибыл в Багдад для изучения «батарей». Вот что он писал: «Налейте немножко кислоты в медный сосуд — любой кислоты, например, уксусная тоже подойдет — и — пожалуйста! — у Вас есть простая батарея, которая будет создавать некоторое напряжение и электрический ток. А несколько таких, соединенных последовательно, представят собой настоящую гальваническую батарею, которая будет обладать достаточной мощностью, чтобы приводить в действие электрический звонок, электролампочку или небольшой моторчик». Он пришел к выводу о том, что неопознанный вначале объект есть примитивная батарея. «Это совершенно очевидно и достойно полного доверия», — писал он. Исследования показали, что «Багдадские батареи» были созданы в период с 250 г. до н.э. до 250 г. н.э. Их было найдено несколько, причем чаще всего в окружении различных объектов магии, амулетов и тому подобного. Некоторые ученые (Пол Кейзер из Университета в Колорадо) считают, что батареи использовались Вавилонскими лекарями как удобный заменитель электрических рыб, электрошоковый удар которых применяли для обезболивания. А по мнению некоторых ученых (сошлемся на немца Вильгельма Кенига), золотое покрытие вавилонских украшений сделано настолько тонко,

что всякий метод нанесения золота, кроме гальванического, исключается! Тысячи клинописных табличек описывают секреты древних мастеров, но расшифровать их пока не удастся — помимо всего прочего, при их написании использовался язык, известный только посвященным в тайны мастерства. Несомненно, когда-нибудь таблички расшифруют и, возможно, мы станем свидетелями новых сюрпризов.

Может быть, древние знали об электричестве гораздо больше, чем нам кажется...

Известный египтолог Бругш Паша установил, что в египетских храмах и на пилонах их ворот существовали... громоотводы! Они представляли собой высокие деревянные мачты с металлической обшивкой. Надпись на храме в Эдфу, построенном Птолемеем IV в 212 г. до н.э. гласит: «Это высокий пилон бога Эдфу на троне Хоруса, светоносца. Столбы поставлены попарно с целью разбить бурю на высоте небес». Такие же шести, только сделанные из железа, были известны древним индусам.

Минойцы древнего Крита тоже, возможно, использовали громоотводы. На украшении минойского сосуда, относящегося к 1500 г. до н.э., явственно видны громоотводы, причем с заостренными верху наконечниками — такими, какими их изобрел через три с лишним тысячи лет Бенжамин Франклин. Греческий археолог Хриссоула Кардара объясняла наличие «громоотводов» на храмах, обычно строящихся на вершинах гор, культом громопоклонников, стремившихся «спустить с небес» молнию и вызвать дождь. Позже такую же цель преследовали критянские «кузнечные боги», Телчины.

Высокие медные статуи времен римских деятелей Нумы Помпилия и Туллия Гостилия тоже, считают, служили для того, чтобы отводить удары громовержца от грешных голов горожан...

Во время царствования императора Карла Римского крестьяне «для отвода грозы» ставили на полях высокие колья. Но отметим, однако, что сам император сурово карал за это под вполне современным лозунгом борьбы с суевериями.

Неужели и электрическая природа молний была очевидна древним, как она лишь относительно недавно стала ясна Франклину?

Принято считать, что об электричестве человечество узнало в тот момент, когда юная дочь Фалеса из Милета, замечательного наблюдателя и философа-материалиста, пытаясь очистить свое янтарное веретено от приставших к нему мелких пылинок и ниточек, заметила, что, счищенные, они снова спешат прильнуть к нему...

Видимо, свойство янтаря притягивать мелкие тряпочки, нитки, солому было весьма хорошо известно и до Фалеса, и не только в Милете. Этим притяжением объясняются, очевидно, и названия янтаря у разных народов: электрон — притягивающий к себе (Греция), харпакс — грабитель (Рим); кавуба — притягивающий к себе (Персия) и т.п.

И еще одно таинственное свойство было у янтаря и подобных ему предметов: потеряв янтарь в темноте, можно было видеть, как весь он взрывается голубоватыми искрами. Искры сопровождает тихий треск, почти неслышимый шорох. Явление это было столь

слабо ощутимо, что отождествлять его с грандиозным сверкающим мечом — молнией и громом, которые внушали древним панический страх, — было почти невыносимым. Потребовались тысячелетия, чтобы перекинуть мост между этими столь близкими по природе и столь различными по масштабу явлениями.

Можно лишь поражаться тому, что лишь через две тысячи лет после Фалеса таинственные свойства янтаря привлекли внимание исследователя. Им оказался английский врач Вильям Гильберт из Колчестера.

Вильям Гильберт родился в 1540 г. Сразу после школы он поступил в колледж святого Джона в Кембридже, через два года он становится бакалавром, через четыре — магистром, через пять — доктором медицины. Постепенно он достигает вершины медицинской карьеры тех времен и становится лейб-медиком королевы.

Трудно сказать, почему именно медик написал первую научную работу по магнетизму. Может быть, это было связано с тем, что толченый магнит у средневековых лекарей считался сильным слабительным. Сам Гильберт полагал, что магнитное железо «...возвращает красоту и здоровье девушкам, страдающим бледностью и дурным цветом лица, так как оно сильно сушит и стягивает, не причиняя вреда».

Однако горький опыт показал Гильберту, что магниты при приеме внутрь иногда «...вызывают мучительные боли во внутренних органах, чешотку рта и языка, ослабление и сухотку членов».

Может быть, экскурсии Гильберта в природу магнетизма и были порождены желанием узнать, где истина: является магнит лекарством или нет. Гильберт приходит к выводу, что «природа магнита двойственная, и больше — злобная и пагубная». По пути к этому выводу Гильберт делает ряд других, значительно более ценных. Что было известно науке о магните до Гильберта?

В 1269 г. Пьер Перегрин из Марикурта написал книгу «Письма о магните», в которой собрал много сведений о магните, накопившихся до него и открытых им лично. Перегрин впервые говорит о полюсах магнитов, о притяжении («совокуплении») разноименных полюсов и отталкивании одноименных, об изготовлении искусственных магнитов путем натирания железа естественным природным магнитом, о проникновении магнитных сил через стекло и воду, о компасе. Причину притяжения южного и северного полюсов Перегрин и его последователи объясняли довольно туманно: «Южная часть притягивается той, которая имеет свойства и природу севера, хотя они обе имеют одну и ту же специфическую форму. Однако это не исключает некоторых свойств, существующих более полно в южной части. Но эти свойства северная часть имеет лишь в возможности, и поэтому они при этой возможности и проявляются».

Ценность этой точки зрения заключается в том, что она, наталкивая на размышления, привела средневекового арабского мыслителя Ибн-Рушда (Аверроэса) к гениальной догадке. По его мнению, естественный магнит искажал ближайшее к нему пространство в соответствии с его формой. Ближайшие к магниту области среды, в свою очередь, искажали ближайшие к ним и так до тех пор, пока «спе-

ции» не достигали железа. В этих рассуждениях снова видится намек на существование магнитного поля — особой формы материи.

До Гильберта было известно и явление «старения магнитов». Так, алхимик Гебер (XII век) писал: «У меня был магнит, поднимавший 100 драхм железа. Я дал ему полежать некоторое время и поднес к нему другой кусок железа. Магнит его не поднял. В куске оказалось 80 драхм. Значит, сила магнита ослабла».

К другим важнейшим догильбертовским событиям можно отнести открытие в XIV веке магнитного склонения, обнаруженные Колумбом в 1492 г. изменения склонения магнитной стрелки на одной и той же параллели, а также открытие магнитного наклона Георгом Гартманом (Нюрнберг, 1544 г.).

В течение 18 лет Гильберт на собственные деньги ставит бесчисленное количество опытов, которые он описывает в книге «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов», вышедшей в 1600 г. И сам Гильберт, и его современники чрезвычайно высоко оценивали этот труд. Так, Гильберт впервые в истории книгопечатания ставит свое имя впереди названия книги, подчеркивая тем самым свои заслуги.

Заслуги его действительно велики. Самой значительной из них явилось то, что он впервые в истории, задолго до Бэкона, провозгласил опыт критерием истины и все положения проверял в процессе специально поставленных экспериментов.

Изготовив из магнетита шар-терреллу («маленькую Землю»), Гильберт заметил, что этот шар по магнитным свойствам сильно напоминает Землю. У терреллы так же, как и терры (Земли), оказались северный и южный полюсы, экватор, изолинии, магнитное наклоне-





ние. Эти свойства позволили Гильберту провозгласить Землю «большим магнитом». До Гильберта о магнетизме Земли никто не подозревал, и притяжение северного, окрашенного в черный цвет, конца магнитной стрелки (Кстати, почему южный конец магнитной стрелки красный, а северный черный? Не исключено, что здесь использованы древнекитайские традиции. Китайцы всегда окрашивали южный конец стрелки в красный цвет. В древнем ассирийском календаре времен Александра Македонского север называется черной страной, юг — красной, восток — зеленой и запад — белой. Городские ворота в Китае окрашивались всегда в соответствии с этим правилом. Вполне вероятно, что такое обозначение стран света было в то время общепринятым, и отголоском этого являются названия Черного и Красного морей, лежащих на юг и север от центрального — Средиземного.) к северному полюсу Земли объяснялось в средние века тем, что «железо направляется к северным звездам, так как ему сообщена сила полярных звезд, подобно тому, как Солнцу следуют растения, например подсолнечник».

Гильберт опроверг широко распространенное мнение о влиянии алмазов на магнитные свойства. Он собрал 17 крупных алмазов и в присутствии свидетелей показал, что эти камни никоим образом не влияют на магниты.

Он открыл, что при нагревании магнита выше некоторой температуры его магнитные свойства исчезают; впоследствии эта температура (588 °C) была названа точкой Кюри, в честь Пьера Кюри.

Гильберт открыл, что когда приближают к одному полюсу магнита кусок железа, другой полюс начинает притягивать сильнее. Эта идея была запатентована лишь через 250 лет после смерти Гильберта.

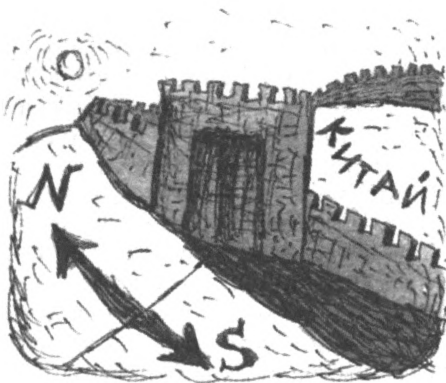
Гильберт открыл, что предметы из мягкого железа, в течение долгого времени лежащие неподвижно, приобретают намагниченность в направлении север — юг. Процесс намагничивания ускоряется, если по железу постукивать молотком. (С этим явлением автору пришлось встретиться в одной из служебных командировок на электростанцию небольшого южного городка. Вызов был странным: «Срочно вылетайте выяснения причин магнитности турбин». Оказалось, что при работе громадные паровые турбины (тогда самые большие в мире) превращаются в гигантские магниты, собирающие со всего машинного зала болты, шпильки, гвозди, гаечные ключи. При исследовании выяснилось, что турбины поступали уже сильно намагниченными. При транспортировке турбины были ориентированы с севера на юг, а перестук колес ускорил намагничивание. При работе турбина, вращаясь в собственном магнитном поле, стала генератором постоянного тока и еще больше намагнитила себя этим током. В конце концов турбина превратилась в очень сильный магнит, о чем можно было судить хотя бы по тому обстоятельству, что для отрыва от турбины ее стальной крышки пришлось использовать пятидесятитонный кран.)

Гильберт открыл экранирующее действие железа. Он первым сказал, что магнит со «шлемом» или «носом», т.е. магнит, вправленный в арматуру из мягкого железа, притягивает гораздо сильнее. Гильберт высказал гениальную мысль о том, что действие магнита распространяется подобно свету.

Гильберт многое сделал и открыл. Но... он почти ничего не смог объяснить. Все его рассуждения носят схоластический и наивный характер.

Весьма туманно объяснял Гильберт и природу магнетизма. Его ответ, по существу, сводится к тому, что всему причиной душа магнита. Это, в известной мере, шаг назад по сравнению с объяснением Лукреция. Оправданием великому первооткрывателю может, видимо, служить лишь то, что и с позиций современной квантовой физики притяжение магнита не такая уж очевидная вещь... Другим, значительно более серьезным извинением может служить то, что за словом «душа» у Гильберта иногда ясно слышится слово «поле»...

Очень важным в учении Гильберта представляется то, что он, по-видимому, первым отличил электрические явления от магнитных, вскрыв их различную природу. Гильберту удалось разделить магнитные и электрические явления, которые с тех пор стали исследовать раздельно.



# ФРАНКЛИН, ЛОМОНОСОВ, АРАГО ИЗУЧАЮТ...

---

*В этой главе рассказывается о янтарном перстне; о тайне дергающихся лапок; о том, как человек узнал, что магнетизм и электричество — близкие родственники; о пользе тесноты в лабораториях.*

Гильберт обнаружил довольно много веществ, которые, как и янтарь, могут притягивать мелкие кусочки материи и пылинки. Манипулируя с этими и подобными веществами, любознательный бургомистр немецкого города Магдебурга Отто фон Герике изготовил странную машину — это был шар из серы, приводимый во вращение несложным механизмом. Вращающийся шар касался металлической цепочки, присоединенной к длинному металлическому бруску, подвешенному на веревках. Если шар при вращении придерживали ладонями, то на нем накапливался значительный электрический заряд, отводимый цепочкой к бруску.

Шары из серы изготавливали следующим образом: из стекла выдували тонкий шарообразный сосуд, в который заливали расплавленную серу. Когда сера остывала, стекло разбивали и получали шар из серы. (К сожалению, Герике слишком уважал ученых своего времени, чтобы вращать просто стеклянный шар. Ему нужен был шар из серы, поскольку именно о ней писал Гильберт. Об электрических свойствах стекла было тогда известно очень мало. А ведь если бы бургомистр попробовал тереть ладонями стеклянный шар, он бы получил более мощную машину!) С помощью шара из серы Отто фон Герике удалось провести очень эффектные опыты: при трении шара о ладони между руками и бруском проскакивали искры, причем некоторые из них были довольно крупными.

Машина Герике получила сразу же очень широкое распространение, и неудивительно, что с ее помощью удалось обнаружить много электрических эффектов.

Один из необычных случаев произошел в знаменитой Лейденской лаборатории. Студент по имени Канеус использовал машину Герике для того, чтобы «зарядить электричеством» воду в стеклянной колбе, которую он держал в ладонях. Зарядка осуществлялась при помощи



цепочки, подсоединенной к бруску машины. Цепочка спускалась через горлышко колбы в воду. По истечении некоторого времени Канеус решил убрать свободной рукой цепочку — вынуть ее из сосуда. Прикоснувшись к цепочке, он получил страшный электрический удар, от которого чуть не умер.

Оказалось, что в сосудах такого типа электричество может накапливаться в очень больших количествах. Таким образом была открыта так называемая лейденская банка — простейший конденсатор.

Сведения о новом изобретении быстро распространились по Европе и Америке. Во всех лабораториях и аристократических салонах ставились удивительные опыты, одновременно неприятные, забавные и таинственные.

Столица Франции, естественно, не осталась в стороне от этого «лейденского поветрия». Придворный электрик Людовика XVI иезуит Нолле провел такой опыт: 180 монахов взяли за руки. В тот момент, когда первый монах взялся за головку банки, все 180 монахов, сведенные одной судорогой, вскрикнули с ужасом. Несмотря на неприятное ощущение, тысячи людей хотели подвергнуться этому испытанию. Изготавливались новые банки, более мощные.

Лейденская банка стала одним из необходимейших атрибутов многих исследований. С ее помощью можно было получить электрические искры длиной в несколько сантиметров.

И на родине Гильберта продолжались исследования электричества. Этим занимался Ньютон, его лаборант научился передавать заряд лейденской банки по влажной веревке.

Наиболее дальновидному исследователю пришла в голову мысль о том, что и сверкающая молния, раскалывающая грозовое небо, — это грандиозная электрическая искра, полученная с помощью исполинской лейденской банки... Этим исследователем оказался американец Бенджамин Франклин (1706—1790). Сын бедных родителей, он мало ходил в школу: то помогал отцу варить мыло, то обучался слесарному делу, то выполнял поручения брата-типографа.

В двадцать семь лет он стал популярнейшим писателем. Его «Бедный Ричард» выдержал бесчисленное количество изданий. «Я мог бы попытаться вызвать к себе добрые чувства, провозгласив, что я пишу

эти выпуски не для чего иного, как для блага общества; но это было бы неискренне, и, кроме того, современники мои слишком умны для того, чтобы быть обманутыми таким образом... Истина же в том, что я крайне беден, и... издатель обещал мне значительную часть выручки...», — откровенно писал Франклин по поводу своей писательской деятельности.

Физикой он заинтересовался после того, как прослушал лекцию по электричеству, на которой была показана электрическая искра и продемонстрировано неприятное действие на человека разряда лейденской банки. Пользуясь словами «батарея», «конденсатор», «проводник», «заряд», «разряд», «обмотка», мы вряд ли помним о том, что Франклин был первым, кто дал названия всем этим предметам и явлениям. Всего семь лет он занимался физикой (с 1747 по 1753 г.), но его вклад в науку оказался огромным.

В последние годы жизни Франклин стал одной из выдающихся фигур в политической жизни Америки, активным борцом за освобождение ее от колониального ига Англии. Обаятельнейший, интереснейший человек своего времени, веселый и жизнерадостный, атлетически сложенный, Франклин был всегда окружен почитателями.

Обратимся же к семи «электрическим» годам из жизни Франклина, точнее, к тем из них, которые были связаны с доказательством электрической природы молнии.

После случайно прослушанной лекции Франклин развил довольно простую, но стройную и правильную теорию статического электричества и его передачи от одного тела к другому — ту теорию, которую мы узнали в школе, впервые знакомясь с электричеством. Сейчас мы сделали бы лишь одну поправку к этому учению: Франклин наугад принял, что тело, которое накапливает электричество, заряжается положительно, а тело, теряющее электричество, заряжается отрицательно. Мы знаем теперь, что носителем электричества в проводниках является отрицательно заряженный электрон. Поэтому наэлектризованное тело, на наш взгляд, должно быть признано отрицательным. Естественно, что Франклин не мог предугадать этого. Чтобы не ломать установившегося со времен Франклина представления, сейчас направление тока (от «плюса» к «минусу») принимают обратным направлению происходящего в действительности процесса — движения электронов.

Четкие представления Франклина о природе электричества позволили ему создать теорию, по которой и молния есть не что иное, как электрическая искра. В одном из своих трудов Франклин описал, как нужно поставить доказывающий это опыт.

Француз Далибар, по описанию Франклина, провел в Марли опыт: металлический стержень, установленный на горе, приближали одним концом к заземленному стержню. Во время грозы 10 мая 1752 г. Далибар получил из грозового облака большую синюю электрическую искру, сопровождавшуюся резким треском и запахом озона. Уже через восемь дней Далибар показал этот опыт королю.

Однако, хотя Далибар первым получил «молнию с небес», ясно, что первооткрывателем был Франклин. В 1753 г. Франклин поставил и свой знаменитый эксперимент с воздушным змеем.

В том же году аналогичные эксперименты провели М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман. Рихман хотел количественно оценить явление электризации при разряде молнии. Неосторожно наклонившись слишком близко к стержню своей «громовой машины», Рихман был поражен молнией в голову.

Научный мир содрогнулся. И до того молнии убивали, особенно звонарей у колоколов на церковных башнях, а тут жертвой оказался ученый. По Ломоносову, «погиб Рихман славной смертью», печалился петербургский коллега Крафт («это был второй Плиний»), оплакивал учителя молодой Румовский («молнией поражен Орфей, Эскулап и Зороастр»). Со временем страсти утихли, а ученые стали принимать меры безопасности.

К. Г. Кратценштейну (1723—1795), который констатировал ужасную смерть Рихмана от разряда, вошедшего в висок и покинувшего тело через мизинец ноги («башмак разодравши, но даже не прожегши»), не суждено было утешиться до конца жизни. Он приехал в Петрополь служить механиком в Академии наук уже известным доктором медицины и философии, получив премию Академии Бордо за объяснение механизма подъема водяных паров в воздухе, будучи избранным в Академию Леопольдины за излечение электризацией паралича пальца у женщины. Рихмана он, по его мнению, не уберег, в отчаянии уехал из России, даже не продлив контракта с Академией Санкт-Петербурга, и осел в Копенгагене до конца своих дней.

О молнии и защите от нее всегда ходило множество диковинных рассказов и небылиц. Известно было, например, что кельтские воины, если гроза застигала их в поле, ложились на землю, зажигали факел и втыкали в землю острием вверх свои длинные мечи. Молния была в мечи и уходила в землю, не причиняя вреда воинам.

Много позднее итальянец Вольта на опыте показал, что пламя свечи создает столб теплого воздуха, электропроводность которого повышена. Сам ученый построил эффектный электрометр со свечой, вдохновляясь, как он говорил, примером древнеегипетских жрецов. Когда надо было «выпросить бога», они разжигали огромный жертвенный костер, по столбу дыма из небес в землю била молния, якобы возвещавшая волю Юпитера, Зевса или Озириса.

Впрочем, о древних громоотводах забылось, только монахи пытались отогнать громы и молнии охранными молитвами, а в народе далекими отзвуками прошлого жили странные рассказы о молниях, богах, грозах и жертвах небесного огня. И нет числа таким рассказам, как не было меры тайне, сопутствующей природе молнии. Неудивительно, что после предложения Франклина поставить железные палки для защиты от молнии, Европа и Америка разделились на два лагеря: ярых приверженцев громоотвода и столь же ярых его противников. В Париже одно время считались модными шляпки с громоотводом. В то же время парижский домовладелец де Визери, поставивший на своем доме на Сен-Опера громоотвод, подвергся яростным нападкам соседей, которые в конце концов подали на него в суд. Это было в 1780 г. Процесс длился четыре года. Защитником громоотвода на процессе выступал никому еще не известный адвокат Максимилиан Робеспьер. На стороне противников

громоотвода экспертом выступал Жан-Поль Марат. В конце концов де Визери был оправдан... Но французы еще долго противились громоотводу. Может быть, это продолжалось бы и дальше, если бы не один курьезный случай.

В Филадельфии (США) в 1782 г. было установлено 400 громоотводов (всего в Филадельфии было в то время 1300 домов). Крыши всех общественных зданий, за исключением, разумеется, гостиницы французского посольства, были увенчаны металлическими штырями громоотводов. Во время грозы 27 марта 1782 г. именно в дом-исключение ударила молния. Гостиница была частично разрушена, а живший в ней французский офицер убит. После этого случая, вызвавшего широкий общественный резонанс, даже Франция официально признала громоотвод.

Возможно, лишь после этих очень громких процессов и событий электрическая природа молнии стала общепризнанной. Ни у кого не оставалось сомнений в том, что молния — это электрическое явление. Связь молнии с электричеством была прочно доказана. Примерно в это же время ученые стали понемногу подходить к восприятию идеи о том, что молния каким-то образом связана и с магнетизмом. Однако перебросить такой мостик было чрезвычайно сложно, главным образом, из-за недостатка систематических сведений, касающихся магнита.

Какая неведомая, таинственная сила направляет стрелку компаса? В чьих силах сообщить неживому камню способность двигаться, при-сущую только живому? Кто бы мог подумать, что именно электричество порождает столь разные и столь могучие эффекты — и молнию, и магнетизм?

Правильное направление мыслям ученых о природе магнетизма, как и в случае электричества, дала молния.

В начале XIX столетия французский ученый Франсуа Араго выпустил книгу «Гром и молния». В этой книге содержится несколько любопытнейших записей, некоторые из них, быть может, и привели к тому, что приятель Араго, французский физик Андре-Мари Ампер, впервые дал правильное объяснение магнетизму.

Вот некоторые выдержки из книги «Гром и молния»: «...В июле 1681 года корабль «Квик» был поражен молнией. Когда же наступила ночь, то оказалось по положению звезд, что из трех компасов... два, вместо того, чтобы, как и прежде, указывать на север, указывали на юг, прежний северный конец третьего компаса направлен был к западу...»

И еще: «...В июне 1731 года один купец поместил в углу своей комнаты в Уэксфильде большой ящик, наполненный ножами, вилками и другими предметами, сделанными из железа и стали... Молния проникла в дом именно через угол, в котором стоял ящик, разбила его и разбросала все вещи, которые в нем находились. Все эти вилки и ножи... оказались сильно намагниченными...»

Все более очевидным для исследований становился факт тесной связи молнии и магнетизма. Следует учесть, что связь молнии и электричества была в то время хорошо известна, поэтому становится ясным, что недалек был день, когда наиболее прозорливый увидит

связь между электричеством и магнетизмом. Многие уже почти угадали эту связь; не хватало лишь небольшого усилия, чтобы преодолеть барьер, разделяющий две великие силы природы. Так, петербургский академик Франц Ульрих Теодор Эпинус прочел 7 сентября 1758 г. на общем собрании Академии трактат «О сходстве электрической силы с магнитною», в котором он почти вплотную подошел к решению проблемы. Недоставало какого-то мостика, какой-то связующей нити... Надежды усилились, когда научные круги Европы познакомились с итальянскими «новинками» — опытами профессора анатомии Алоизо Луиджи Гальвани.

Случайно получилось так, что в комнате, где в ноябре 1780 г. Гальвани изучал на препарированных лягушках их нервную систему, работал его приятель — физик, производивший по методу Вольты опыты с электричеством. Одну из отпрепарированных лягушек Гальвани по рассеянности положил на стол рядом с электрической машиной. В это время в комнату вошла жена Гальвани. Ее взору предстала жуткая картина: при искрах в электрической машине лапки мертвой лягушки, прикасавшиеся к железному предмету (скальпелю), дергались. Жена Гальвани с ужасом указала на это мужу. Гальвани был поражен и решил, что причина этого — электрические искры. Для того чтобы получить более сильный эффект, он вывел несколько препарированных лягушек на медных проволочках на железный балкон во время грозы. Однако не только молнии — гигантские электрические разряды — влияли на поведение лягушек. При порывах ветра лягушки раскачивались на своих проволочках и иногда касались железного балкона. Как только это случалось, лапки дергались.

Опыты Гальвани пробудили в широкой публике старые мечты о бессмертии. Бессмертие казалось совсем близким, осязаемым. Сегодня содрогается лапка убитой лягушки, а завтра... Бесчисленное количество людей стали продельывать опыты по методике Гальвани.

Вот что писали об этом в одной из старых энциклопедий: «В течение целых тысячелетий хладнокровное племя лягушек беззаботно совершало свой жизненный путь, как наметила его природа, свободно росло и наслаждалось земными благами, зная одного только врага, господина аиста, да еще, пожалуй, терпя урон от гурманов, которые требовали для себя жертвы в виде пары лягушачьих лапок со всего несметного рода. Но в исходе позапрошлого столетия наступил злосчастный век для лягушек. Злой рок воцарился над ними, и вряд ли когда-либо лягушки от него освободятся. Затравлены, схвачены, замучены, скальпированы, убиты, обезглавлены — но и со смертью не пришел конец их бедствиям. Лягушка стала физическим прибором, отдала себя в распоряжение науки. Срежут ей голову, сдерут с нее кожу, расправят мускулы и проткнут спину проволокой, а она все же не смеет уйти к месту вечного упокоения; повинувшись приказанию физиков или физиологов, нервы ее придут в раздражение и мускулы будут сокращаться, пока не высохнет последняя капля «живой воды». И все это лежит на совести Алоизо Луиджи Гальвани...».

Но и сам Гальвани не был счастлив. Умерла любимая жена Лючия, он лишился кафедры за отказ присягнуть Наполеону, заняв-



шему Италию, погибли два его племянника. Вскоре и сам ученый умер от голода.

Понять, почему лапки мертвых лягушек дергаются, Гальвани не было суждено. Лишь великий Алессандро Вольта понял, что соединение разных металлических проводников (у Гальвани медная проволока была привязана к железному балкону) само по себе вызывает появление на их концах электрических зарядов. Если замкнуть концы через тело лягушки, образуется электрический ток, который является не кратковременным, как при «страшных опытах» Отто фон Герике, а длительным. О природе этого тока у Вольты с Гальвани был очень серьезный спор: Гальвани был уверен, что источником тока является сама лягушка, а Вольта считал, что первопричина тока — соединение двух разных металлов.

Хотя в споре Гальвани оказался не прав, он тем не менее заложил основы учения о биотоках организма.

Вольта ставил совсем другие опыты — он скептически относился к теории «животного электричества» Гальвани. Иногда его можно было увидеть за странным занятием: он брал две монеты или два кружочка — обязательно из разных металлов — и... клал их себе в рот: одну на язык, другую под язык. Если после этого монеты или кружочки соединяли проволочкой, Вольта чувствовал солоноватый вкус — тот самый вкус, но гораздо слабее, что можем почувствовать мы, лизнув одновременно два контакта батарейки. Из опытов, проведенных раньше с машиной Герике и электрофором, Вольта знал, что такой вкус вызывается электричеством. Положив один на другой множество кружков (свыше ста), Вольта получил довольно мощный источник электричества — вольтов столб. Присоединив к верхнему и нижнему концам столба проводнички и взяв их в рот, Вольта убедился в том, что этот источник, в отличие от машины Герике и электрофора, действует длительно.



Вслед за этим Вольта сделал еще одно изобретение — он создал электрическую батарею, пышно названную «коронай сосудов» и состоявшую из многих последовательно соединенных цинковых и медных пластин, опущенных попарно в сосуды с разбавленной кислотой. Это был уже довольно солидный источник электрической энергии (солидный, конечно, по тем временам; сейчас с помощью «короны сосудов» можно было бы привести в действие разве что электрический звонок).

20 марта 1800 г. Вольта сделал доклад о своих исследованиях в Лондонском Королевском обществе. Можно считать, что с этого дня источником постоянного электрического тока — вольтов столб и батарея — стали известны многим физикам и их начали широко применять. Распространению этого изобретения и расширению опытов с электричеством способствовало приглашение Вольта Наполеоном в Париж для чтения лекций перед видными физиками Франции. В России тоже довольно быстро узнали об открытии Вольта. Одна из самых гигантских и мощных электрических батарей того времени, состоящая из 3000 «кружков», была построена русским профессором В. В. Петровым, открывшим с помощью этой батареи прославившую его электрическую дугу.

Уже в 1808 г. известный английский физик сэр Гемфри Дэви осуществил электрическое дуговое освещение на практике. Электричество начало свое победное шествие по всему миру. Особенно быстро развивалось электрическое освещение. Небольшие лампы предлагалось даже помещать на головах слуг и служанок в богатых домах. Так, журнал «Сайнтифик Америкэн» писал в середине XIX века: «Вскоре настанет то время, когда и частные дома будут освещаться девушками, вместо того чтобы использовать электрические лампы на колоннах. Такая девушка (яркостью в 50—60 свечей) будет сидеть в кресле гостиной и ждать, пока не позвонят

гости — тогда она включит на себе свет, примет посетителя и проводит в приемную. Стоимость такой девушки будет гораздо ниже стоимости необходимого для приема специального слуги и газового освещения. Гораздо приятней иметь в доме электродевушку, чем громоздкие канделябры, которые постоянно угрожают упасть вам на голову. Каждый домовладелец с эстетическим чувством будет рад заменить канделябры девушками, для которых уже выпущено 2500 комплектов ламп и батарей».

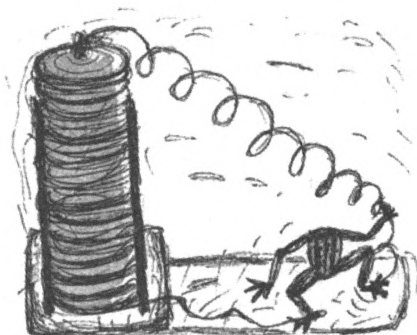
Электричество уже до этого прочно вошло в обиход физических лабораторий. С ним проводились многочисленные опыты на животных, с его помощью получали дугу и миниатюрные молнии — искры.



Слово «электричество» вошло в лексикон простых людей. Электричество подозревали теперь во всех труднообъяснимых и таинственных случаях. Взгляды того времени — во фразе: «Все электрическое — таинственное, поэтому все таинственное — электрическое». Роберт Берне в своем шутовском стихотворении «Золотое кольцо» еще раньше писал:

— Зачем надевают кольцо золотое  
На палец, когда обручаются двое? —  
Меня любопытная дева спросила.  
Не став пред вопросом в тупик,  
Ответил я так собеседнице милой:  
— Владеет любовь электрической силой,  
А золото — проводник!

Очень близко к решению проблемы подошел Дэви. Ему удалось установить, что электрическая дуга отклоняется под действием магнита. Это уже была связь, но связь робкая, тонкая, связь, которой не придали должного значения. Магнитная стрелка впервые повернулась под действием тока в опытах итальянского физика Романьози: в 1802 г. Романьози заметил, что при поднесении компасной стрелки к вольтову столбу она чуть заметно отклоняется. Иногда никакого эффекта не наблюдалось. Романьози не смог понять того, что стрелка отклонялась лишь тогда, когда вольтов столб замкнут на нагрузку, другими словами, лишь тогда, когда по нему течет ток. Открыть это выпало на долю Ганса Христиана Эрстеда.



# ЭРСТЕД ОБЪЕДИНЯЕТ

---

*Когда 43-летний копенгагенский профессор Ганс Христиан Эрстед (1777—1851) разослал европейским коллегам свой ставший сразу знаменитым «Памфлет» о действии электрического тока на магнитную иглу — всего четыре странички на латинском языке — и когда многие ученые смогли с ним познакомиться, их удивлению не было границ. Неужели ток на самом деле действует на магнит столь странно?*

Чтобы разобраться в «проблеме Эрстеда», которую, бесспорно, следует считать ключевой в учении об электричестве и магнетизме и в применении электричества для создания магнитов, нужно вернуться на два с половиной столетия назад и представить себе маленький датский остров Лангеланд, городок на нем под названием Рюдкобинг и семью бедного аптекаря, в которой родился Ганс Христиан. Нужда гнала за семьей по пятам, и начальное образование братьям Гансу Христиану и Андерсу пришлось получать где придется: городской парикмахер учил их немецкому; его жена — датскому; пастор маленькой церквушки научил их правилам грамматики, познакомил с историей и литературой; землемер научил сложению и вычитанию, а заезжий студент впервые рассказал им удивительные вещи о свойствах минералов, пробудил любознательность и приучил любить аромат тайны. В двадцать лет Ганс, приобщенный к науке и познавший столь малую часть ее, уже вынужден был стоять за стойкой отцовской аптеки и помогать ему. Здесь медицина надолго пленила его, потеснив химию, историю, литературу, и еще более укрепила в нем уверенность в его научном предназначении. Он решает поступить в Копенгагенский университет, но не знает, что изучать. Он берется за все: за медицину, физику, астрономию, философию, поэзию. Он увлечен всем сразу и всем серьезно. Как нельзя кстати помогла стипендия, основанная тем самым доктором медицины Кратценштейном, который вошел в историю, засвидетельствовав смерть Рихмана в опытах Рихмана и Ломоносова. Он родился в Германии (шестой сын бедного учителя), окончил университет в Галле, несчастливо служил в Академии Санкт-Петербурга, после чего 42 года преподавал в университете города Копенгагена.

Вместе с Гансом учился и брат, но юриспруденции. Держась за руки, братья гуляли по зеленым лужайкам университетских дворов или сидели на ступенях старинных зданий или в гулких аудиториях, отрешенные, с горящими глазами. Их начинающееся служение науке было сродни какому-то мистическому действию, столь подходящему для этих монастырских стен и холодных келий со стрельчатыми окнами. Ганс был счастлив в университетских стенах; он писал позднее, что для того чтобы юноша был абсолютно свободен, он должен наслаждаться в великом царстве мысли и воображения, где есть борьба, где есть свобода, где побежденному дано право восстать и бороться снова. Он жил, упиваясь трудностями и первыми небольшими победами, познанием новых истин и устранением предыдущих ошибок. Но чем он занимался? Золотая медаль университета 1797 г. была присуждена ему за эссе «Границы поэзии и прозы». Он разбрасывался и, казалось, заранее ставил крест на своей научной карьере, предпочитая разносторонность глубине. Следующая его работа, также высоко оцененная, была посвящена свойствам щелочей, а диссертация, за которую он получил звание доктора философии, — медицине (как и у Кратценштейна).

Наступило новое столетие. В вихре французской революции, на полях сражений американской войны за независимость рождалось новое восприятие мира, очищение умов и душ от устоявшихся догм, ветер свободы манил молодых. Начавшийся промышленный переворот затопил традиционный мир техники нескончаемым потоком новых практических изобретений. Век XIX заявил о себе новым образом жизни и мыслей, новыми социальными и политическими идеями, новой философией, новым восприятием искусства и литературы. Все это захватывает Ганса, он стремится попасть туда, где бурлит жизнь, где решаются главные научные и философские вопросы, — в Германию, Францию, другие европейские страны. Дания была в этом смысле провинцией Европы, и Эрстед не мог и не хотел там оставаться. Он искал понимания, он искал новых друзей.

Его талант, упорство и случайность сплелись в счастливый клубок, и вот он, блестяще защитив диссертацию, едет по направлению университета на годичную стажировку во Францию, Германию, Голландию. В то время он скорее был философом, чем физиком. Его новые друзья — большей частью философы. Много времени он провел в Германии. Там он слушал лекции Фихте о возможностях исследований физических явлений с помощью поэзии, о связи физики с мифологией. Ему нравились лекции Шлегеля, но Эрстед не мог согласиться с ним в необходимости отказа от непосредственного, экспериментального исследования физических явлений. Его поразили Шеллинг, как ранее поразили Гегель. Его увлекла идея о всеобщей связи явлений, он увидел в ней оправдание и смысл своей кажущейся разбросанности — все изучавшееся им оказывалось, по этой философии, взаимосвязанным и взаимообусловленным. Он стал одержим идеей всеобщей связи. Связи всего со всем. Быстро нашлась и родственная душа, мыслящая так же, как он, столь же разносторонняя и романтическая. Это был физик Риттер, изобретатель аккумулятора, гениальный фантазер, источник сумасбродней-

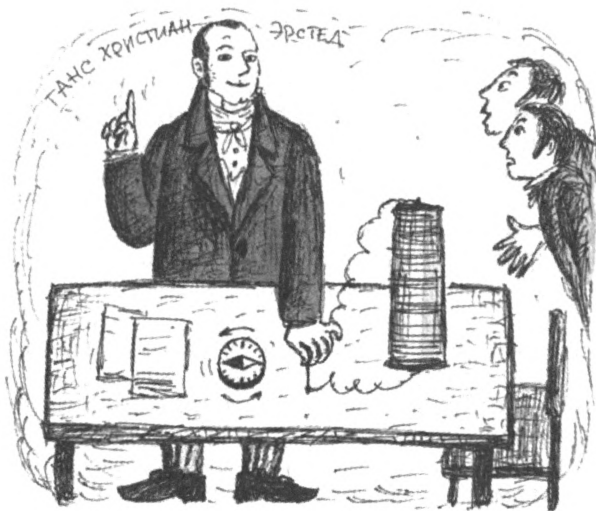
ших идей. В одном из писем Эрстеду Риттер, в частности, высказал такую мысль: годы максимальных наклонов эклиптики, по его мнению, соответствовали годам самых крупных открытий в области электричества. Так, 1745 г. отмечен изобретением лейденской банки, в 1746 г. Вильке изобрел электрофор, в 1782 г. появился конденсатор Вольта, а в 1801 г. — вольтов столб. «Вы можете теперь вычислить, — писал Риттер, — что эпоха новых открытий наступит в 1819 или 1820 году, и мы сможем стать ее свидетелями». Иногда такие предсказания сбываются, хотя и не в полной мере. Это предсказание сбылось, открытие произошло в 1820 г., сделал его Эрстед, но Риттеру не пришлось быть свидетелем этого. Он умер в 1810 г.

Идея всеобщей связи не давала Эрстеду покоя. Необычайная энергия, свойственная ему с детства, вела его к новым и новым поискам. В 1813 г. во Франции выходит его труд «Исследования идентичности химических и электрических сил». В нем Эрстед впервые высказывает идею о связи вольтова электричества и магнетизма. Он пишет: «Следует испробовать, не производит ли электричество... каких-либо действий на магнит...» Его соображения были простыми: электричество рождает свет — искру, звук — треск, наконец, оно может производить тепло — проволока, замыкающая зажимы лейденской банки, нагревается. Не может ли электричество производить магнитных действий? Говорят, Эрстед не расставался с магнитом. Этот кусочек металла должен был заставлять его думать.

Идея связи электричества и магнетизма тогда буквально носилась в воздухе, и многие лучшие умы Европы были ею увлечены. Еще Франц Ульрих Теодор Эпинус подмечал их сходство, а француз Франсуа Араго потратил много лет для сбора таинственных, на первый взгляд, историй о кораблях, сокровищах и необычных небесных явлениях, в которых он тоже видел эту ускользающую связь.

Однажды на рейде Ла-Пальмы, главного порта Майорки, появилось французское военное судно. Состояние его было настолько жалким, что корабль едва дошел до причала. Когда команда сошла на





берег и уступила палубу нескольким именитым французским ученым, в том числе двадцатидвухлетнему Араго, выяснилось, что корабль разрушен молнией. Пока члены комиссии осматривали судно, покачивая головами при виде обгоревших мачт и надстроек, Араго поспешил к компасам и там увидел примерно то, что ожидал: стрелки компасов указывали в разные стороны...

Через год, копаясь в том, что еще несколько дней назад было генуэзским судном (оно разбилось, наскочив на скалы вблизи берегов Алжира), Араго снова обнаружил, что стрелки компасов размагничены. В кромешной тьме южной туманной ночи капитан, направив по компасу судно к северу, подальше от опасных мест, на самом деле неудержимо двигался к тому, чего так старательно пытался избежать. Корабль шел к югу, прямо на скалы, обманутый пораженным молнией магнитным компасом...

Все эти, на первый взгляд, малозначащие и не связанные между собой факты Араго собирал не зря. Молния — это гигантская электрическая искра! Сейчас нам трудно почувствовать сенсационность такого утверждения, но в то время многие простые люди, не то что ученые, восторженно приветствовали открытие Франклина: оно открывало путь в область новых «серендипити» — открытий на каждом шагу. Араго, собравший множество фактов, свидетельствующих о связи молнии с магнетизмом, чувствовал, что он на пороге нового открытия.

Радость и досада — вот, возможно, те чувства, которые он испытал, когда узнал решение долго не дававшейся ему задачи, решение, найденное Эрстедом.

Историки науки, возможно, еще долго будут оставаться в неведении и недоумении относительно обстоятельств этого странного открытия, которое стало чуть ли не классическим примером случайной случайности.

Не ясна даже дата открытия. Одни исследователи относят его к 1819 г., другие — к 1820 г. Кое-кто сомневается даже в авторстве Эрстеда. Действительно, обстоятельства открытия дают возможность для кривотолков. 15 февраля 1820 г. Эрстед, уже заслуженный профессор, читал студентам лекции по физике. На лабораторном столе находились вольтов столб, провод, замыкающий его, зажимы и компас. В то время, когда Эрстед замыкал цепь, стрелка компаса вздрагивала и поворачивалась по направлению к проводу. Это было первое непосредственное подтверждение связи электричества и магнетизма. Это было то, что так долго искали все европейские и американские физики. Решение проблемы было потрясающе просто.

Казалось бы, все ясно. Эрстед продемонстрировал студентам еще одно подтверждение своей давнишней идеи о всеобщей связи разнородных явлений. Но почему же возникают сомнения, почему вокруг этого события впоследствии разгорелось так много жарких споров? Дело в том, что студенты, присутствовавшие на лекции, рассказывали потом совсем другое. По их словам, Эрстед хотел продемонстрировать на лекции всего лишь интересное свойство электричества нагревать проволоку, а компас оказался на столе совершенно случайно. И именно случайностью объявили они то, что компас лежал рядом с этой проволокой, и совсем случайно, по их мнению, один из зорких студентов обратил внимание на поворачивающуюся стрелку, а удивление профессора, по их словам, было неподдельным. Сам Эрстед в своих позднейших работах писал: «Все присутствующие в аудитории — свидетели того, что я заранее объявил о результате эксперимента. Открытие, таким образом, не было случайностью, как бы хотел заключить профессор Гильберт из тех выражений, которые я использовал при первом оповещении об открытии».

Следует сказать, что отклонение стрелки компаса в лекционном опыте было весьма незначительным, и поэтому в июле 1820 г. Эрстед снова повторил эксперимент, используя более мощные батареи. Эффект был значительно сильнее, причем тем сильнее, чем толще проволока, которой он замыкал контакты батареи. (Чем больше диаметр проволоки, тем меньше ее сопротивление и, стало быть, больше ток короткого замыкания.) Кроме того, он выяснил одну странную вещь, не укладывающуюся в ньютоновские представления о действии и противодействии. Выражаясь его же словами, «магнитный эффект электрического тока имеет круговое движение».

Чем же был поражен ученый? Почему в своем четырехстраничном памфлете он тщательно перечисляет свидетелей, не забывая упомянуть ни об одной из их регалий? Среди них «Лауриц Эсмарх — видный ученый; министр юстиции, достойный человек Влейкель — кавалер ордена Дании; удостоенный высочайших наград Гаук, чье знакомство с естественными науками прославлено в стране; Рейнхард, профессор естественной истории; Якобсон, профессор медицины, человек, обладающий высочайшим мастерством проведения экспериментов; опытный химик Цейзе, доктор философии...»



Дело в том, что Эрстед, трактуя эксперимент, заронил глубокую мысль — мысль о вихревом характере электромагнитных явлений. «Вихреобразность» процесса, вызывающего в памяти водоворот, вихрь, спираль, долго не находила сторонников, и даже Фарадей поначалу не оценил эту мысль. Он еще долго был убежден в том, что силы, действующие между проводниками с током и магнитной стрелкой, — это силы притяжения и отталкивания, подчиняющиеся законам Ньютона.

Опыт Эрстеда доказывал не только связь между электричеством и магнетизмом. Не напрасно Эрстед в своем памфлете перечисляет свидетелей. То, что открылось ему, было новой тайной, не укладывавшейся в рамки ньютоновских законов и прямо нарушающей третий из них: направления возмущающей силы — электричества (определяемого направлением провода), и силы реакции — магнетизма (определяемого направлением магнитной стрелки), были у Эрстеда *перпендикулярны*. Ученые, сгрудившиеся у лабораторного стола Эрстеда, впервые видели «противодействие», не противоположное по направлению «действию».

Памфлет Эрстеда вышел в свет 21 июля 1820 г. Мы не случайно точно указываем дату. Дальнейшие события развивались в весьма непривычном для неторопливой тогда науки темпе. Уже через несколько дней памфлет появился в Женеве, где в то время находился с визитом Араго. Первое же знакомство с опытом Эрстеда показало ему, что найдена разгадка задачи, над которой бился и он, и многие другие. Впечатление от опытов было столь велико, что один из присутствующих при демонстрации поднялся и с волнением произнес ставшую впоследствии знаменитой фразу: «Господа, происходит переворот...»

Араго возвращается в Париж потрясенный. На первом же заседании Академии, на котором он присутствовал сразу по возвращении, 4 сентября 1820 г., он делает устное сообщение об опытах Эрстеда. Записи, сделанные в академическом журнале бесстрашной рукой протоколиста, свидетельствуют, что академики просили Араго уже на следующем заседании, 11 сентября, т.е. через неделю, показать всем присутствующим опыт Эрстеда.

Сообщение Араго слушал и внезапно побледневший академик Ампер. Он, должно быть, почувствовал в тот момент, что пришла его пора перед лицом всего мира принять из рук Эрстеда эстафету открытия. Он долго ждал этого часа, успел состариться, превратиться из юноши в солидного профессора. И вот час пробил — 4 сентября 1820 г. Ампер понял, что должен действовать. Через две недели он сообщил о рождении электродинамики.

После открытия почести посыпались на Эрстеда как из рога изобилия: он был избран членом многих авторитетнейших научных обществ, в том числе Лондонского Королевского общества и Академии Франции, англичане присудили ему медаль Копли, а из Франции он получил давно заслуженный им приз в 3000 золотых франков, некогда назначенный Наполеоном для авторов самых крупных открытий в области электричества.

Принимая все эти почести, Эрстед никогда не забывал о том, что новый век требует нового подхода к обучению. Он основал в Дании общество для поощрения научных занятий. Польщенный европейской славой Эрстеда, король Фредерик VI пожаловал ему Большой крест Данеборга — высшую награду и, кроме того, разрешил основать Политехнический институт. В те же годы Эрстед организует литературный журнал, читает просветительные лекции для женщин, покровительствует «маленькому Гансу Христиану», своему тезке, будущему великому писателю Гансу Христиану Андерсену. Он совершает десятки заграничных поездок, блестяще овладевает немецким, французским, английским, латинским языками, на которых он читает лекции о науке и литературе. Эрстед становится национальным героем.

Он скончался 9 марта 1851 г. Хоронили его ночью. Толпа из двухсот тысяч человек, освещая путь факелами, провожала своего героя в последний путь. Звучали траурные мелодии, специально сочиненные в его память. Ученые, правительственные чиновники, члены королевской семьи, дипломаты, студенты, горожане восприняли его смерть как личную потерю. За многое они были благодарны ему. И не в последнюю очередь за то, что он подарил миру новые тайны.



# ЖЕЛЕЗО ОБЗАВОДИТСЯ

## «ПОМОЩНИКОМ»

---

*До XVIII века слова «магнит» и «железо» были синонимами. Затем на авансцену уверенно вышел электрический ток, он стал хозяином положения. А железо? Уже «мягкое», а не «жесткое», оно превратилось в своеобразный усилитель магнитного поля, повышая его в сотни раз!*

Мало кому заметный, но поистине радикальный переворот от железа к железу с током совершился в 20-е годы XIX столетия в лабораториях ученых.

После опубликования памфлета Эрстеда многие заинтересовались проблемами электромагнетизма: в том же 1820 г. Араго продемонстрировал проволоку с током, облепленную железными опилками, а Ампер доказал, что спираль с током — соленоид — обладает всеми свойствами природного магнита, притягивая мелкие железные предметы.

Что касается первого электромагнита, т.е. катушки, обтекаемой током и содержащей внутри железный сердечник, то его изобретения пришлось ждать еще пять лет. Это устройство создал Вильям Стерджен.

Он родился в Ланкастере в 1783 г. в семье сапожника. Отец не уделял семье ни малейшего внимания; он наслаждался жизнью, удил рыбу и слыл большим любителем петушиных боев. Молодого Вильяма послали учиться мастерству к сапожнику, и тот, по-видимому, держал его в черном теле. Вильям голодал, и поэтому, как только представился случай, сбежал от сапожника в воинскую часть. Было ему в то время девятнадцать лет. Через два года Вильям дослужился до артиллериста, он много читал, ставил физические и химические опыты.

Однажды, когда их часть стояла на острове Ньюфаундленд, налетел страшный ураган, сопровождавшийся молниями и громом. Ураган произвел на Вильяма неожиданно сильное впечатление и привлек его внимание к электричеству. Он стал читать книги по естествознанию, однако вскоре с горечью понял, что ничего в них не понимает. Тогда он решил начать с самых азов и занялся письмом, чтением и грамматикой. Сержант той же части снабжал его книгами,

которые Вильям, освободившись от вахты, читал по ночам. Вскоре он перешел к математике, мертвым и новым языкам, оптике и естествознанию. Его страстью в свободное время было ремонтировать часы и чертить.

После освобождения от воинской службы в 1820 г. Стерджен купил токарный станок и посвятил себя изготовлению физических приборов, в частности электрических. Благодаря поддержке известного тогда химика Джеймса Марша он был назначен лектором в Военную академию Ост-Индской компании в Аддискомбе, где и преподавал до 1838 г.

Первым вкладом Стерджена в науку стала разработка им модифицированной модели вращающихся цилиндров Ампера, описанной в «Философском журнале» в 1823 г. На следующий год он написал четыре статьи по термоэлектричеству, а 23 мая 1825 г. представил Обществу искусств несколько усовершенствованных приборов для электромагнитных экспериментов, среди которых был ставший теперь знаменитым первый электромагнит — железный сердечник, окруженный катушками с проволокой, по которой проходит ток. Идея цилиндрического и подковообразного магнитов захватила его еще в 1823 г. Тогда Стерджен и построил вращающееся «колесо Стерджена» — фактически одну из первых модификаций электромотора.

Стерджен сделал ряд очень важных открытий, о которых написал несколько статей, однако «Философский журнал», для которого они предназначались, отказался их печатать, и Стерджену не оставалось ничего, как создать свой собственный журнал — «Анналы электричества».

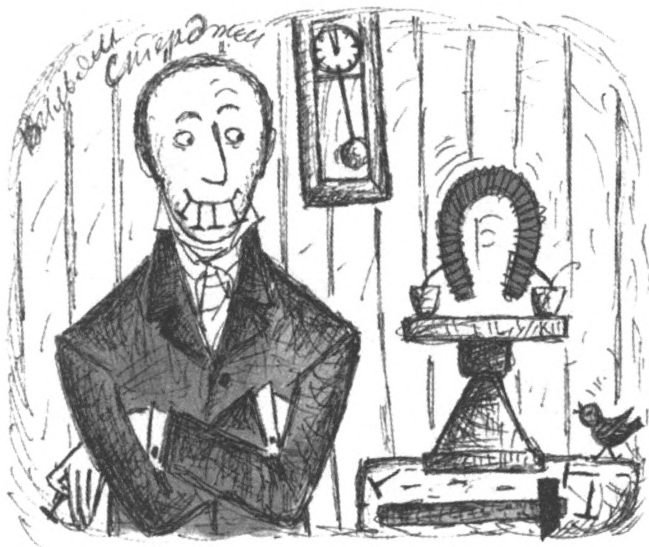
Музей науки в Манчестере, директором которого стал Стерджен в 1840 г., был слишком научным, чтобы быть прибыльным, и Стерджен жил в бедности. В 1850 г. он умер, так и не получив в награду за свое великое изобретение ни богатства, ни славы.

Ученик Стерджена, знаменитый английский физик Джеймс Прескотт Джоуль, писал, что Стерджен был высокого роста и хорошо сложен, обладал благородной внешностью и приятными манерами. К сожалению, портрета его не сохранилось. На его могильной плите выбито: «Здесь лежит изобретатель электромагнита...»

Первый в мире электромагнит, продемонстрированный Стердженом 23 мая 1825 г. Обществу искусств, представлял собой согнутый в подкову лакированный железный стержень длиной 30 и диаметром 1,3 см, покрытый сверху одним слоем изолированной медной проволоки. Электроэнергией он снабжался от гальванической батареи (вольтова столба). Электромагнит удерживал на весу 3600 г и значительно превосходил по силе природные магниты такой же массы. Это было блестящее по тем временам достижение.

Сам Стерджен особенно высоко оценивал свою идею, связанную с заменой жесткого железа мягким. Ученый свободно оперировал такими понятиями, как «магнетизм», «магнитная энергия», «однородность магнитного материала», «отжиг железа» и т.д.

Правление общества оценило заслуги Стерджена. Он получил медаль и денежную премию, а первый электромагнит был выставлен в музее общества.



Джоуль, экспериментируя с самым первым магнитом Стерджена, сумел довести его подъемную силу до 20 кг. Это было в том же 1825 г.

В 1828 г. лондонский часовой мастер Воткинс изготовил электромагнит, который поднимал 30 кг.

Тогда же профессор Молл из Утрехта, взяв за основу конструкцию Воткинса, изготовил магнит, «поднимавший наковальню массой 60 кг и не поднимавший наковальню массой 80 кг».

В 1832 г. Стерджен изготовил магнит, поднимавший 160 кг, но уже в том же году Марш создал магнит, способный поднять более 200 кг. Однако Стерджен не собирался терять первенства. По его заказу в 1840 г. был выполнен электромагнит, способный поднять уже 550 кг!

К тому времени у Стерджена нашелся очень сильный соперник за океаном. В апреле 1831 г. профессор Йельского университета Джозеф Генри (его именем названа единица индуктивности) построил электромагнит массой около 300 кг, поднимавший около 1 т.

Все эти магниты по конструкции представляли собой подковообразные стержни, обмотанные проволокой. Джоуль в ноябре 1840 г. создал магнит собственной конструкции, в виде толстой стальной трубы, разрезанной вдоль оси. Сечение этого магнита было очень большим, магнит оказался компактным и поднимал 1,3 т. В то же время Джоуль построил магнит совершенно новой конструкции — притягиваемый груз испытывал действие не двух полюсов, как обычно, а значительно большего количества, что позволило резко увеличить поднимаемый груз. Магнит массой 5,5 кг удерживал груз массой 1,2 т.

Сейчас трудно себе представить, насколько тяжело было тогда создавать электромагниты. Ведь даже закон Ома инженерам в то время не был известен.



Когда немецкий учитель Георг Симон Ом положил на стол ректора Берлинского университета свою диссертацию, где впервые был сформулирован закон, без которого невозможен ни один электротехнический расчет, он получил весьма резкую отповедь. Электричество-де не поддается никакому математическому описанию, так как «электричество — это собственный гнев, собственное бушевание тела, его гневное Я, которое проявляется в каждом теле, когда его раздражают». Ректором Берлинского университета был в те годы Георг Вильгельм Фридрих Гегель.

Первые магниты были сделаны «как бог на душу положит». Однако не любая форма давала хороший результат. Случайно получилось так, что Стерджен для своего первого магнита выбрал очень удачную — подковообразную — форму (подковообразные магниты изготавливают до сих пор). Отсутствие опыта и элементарной методики расчета магнитов привело к тому, что некоторые разновидности магнитов, предложенные в то время, были бы, на наш взгляд, просто абсурдными. Так, трехлапый магнит не мог бы успешно работать, так как магнитные потоки каждого стержня противодействовали бы друг другу — поток одного стержня замыкали на втором стержне, где он действовал навстречу потоку этого стержня.

Негодной, на современный взгляд, оказывается и очень часто использовавшаяся конструкция, один магнит в которой составлен из трех более мелких и намотанных отдельно. Ясно, что в промежутках между этими маленькими магнитами магнитные поля двух соседних стержней взаимно уничтожаются.

Лабораторные магниты того периода изготавливались «на глазок». Никакой теории, которая позволила бы заранее предсказать свойства магнитов, не существовало. Первый вклад в теорию расчета электромагнитов внесли русские ученые Э. Х. Ленц и Б. С. Якоби, указавшие на связь подъемной силы электромагнита и произведение силы тока в катушках на число витков обмотки.

После Ленца и Якоби крупный вклад в теорию расчета магнитов внесли англичане братья Гопкинсоны, которые предложили метод учета насыщения — явления, давно замеченного проектировщиками магнитов и заключающегося в том, что в магните заданной формы после некоторого предела увеличением тока в катушках нельзя повысить его подъемную силу. Современная теория связывает это явление с тем, что при достижении некоторого намагничивающего тока элементарные магнитики (диполи) железа (ферромагнетика), ранее расположенные беспорядочно, в основном ориентированы в одном направлении и при дальнейшем усилении намагничивающего тока существенного увеличения числа магнитиков, ориентированных в одном направлении, не происходит. Насыщение стали привело к тому, что индукция магнитного поля первых магнитов не превышала 2 Тл.

Наступила новая эра усиления мощности магнитов, но не путем увеличения их размеров, а посредством совершенствования их формы и борьбы с насыщением.

Нельзя сказать, чтобы эта борьба была очень успешной. За почти двести лет этой напряженной войны физиков с непокорной «насыщающейся» сталью индукция магнитного поля в магнитах возросла всего лишь в два с половиной раза. Над этой проблемой работали многие видные физики и электротехники.

Что могли физики противопоставить природе? Только очень точный учет и полное использование природных свойств материалов. И вот появляются магниты с короткими коническими полюсами, массивными стальными магнитопроводами и громадными катушками.

Масса магнитов быстро увеличивается — теперь в большей степени за счет катушек. Если в 1881 г. самый большой в мире лабораторный магнит весил около 1 т, то в 1930 г. — уже около 120 т.

Первым отметку «5 Тл» пересек в 1903 г. магнит профессора Грея в Глазго. Ему удалось это сделать, применив мощные катушки, близкие придвинутые к коническим полюсам.

Интересная идея была высказана французским ученым Перро в 1914 г.: он предложил кроме двух обычных катушек, расположенных на полюсах, использовать третью, охватывающую собой рабочую зону машин. Индукция магнитного поля магнита Перро достигла 5,1 Тл. В 1914 г. профессор Беккерель (младший) в Парижском музее естественной истории создал магнит, индукция магнитного поля которого возросла до 5,5 Тл, три других самых мощных магнита того времени — Вейсса в Цюрихе, Кайзера в Бонне и Эймса в США — работали на уровне 4,5 Тл.

Следует отметить, что создание Беккерелем магнита с индукцией поля 5,5 Тл, было воспринято физиками всего мира как большая сенсация. «Гигантский», «мощнейший», — писали об этом электромагните газеты. Увеличение индукции магнитного поля лишь на 10% стоило многих трудов и ухищрений. Однако самое главное заключалось в том, что для изготовления полюсов магнита был использован новый материал — сплав железа с кобальтом, который насыщается при индукции, на несколько процентов большей, чем ранее применяемые материалы. Потребляя мощность 22 кВт, электромагнит в

междуполосном промежутке создавал поле, магнитная индукция которого составляла 5,5 Тл. При замене феррокобальтовых наконечников железными индукция полей снижалась до 5,2 Тл.

Если расстояние между полюсами было 2 мм и полезный объем 14 мм<sup>3</sup> (т.е. объем, в который можно было поместить лишь небольшой образец), то индукция магнитного поля достигла 5,9 Тл. Когда полезный объем был уменьшен до 0,5 мм<sup>3</sup> (полюсы, по сути дела, соприкасались), индукция поля возросла до 6,5 Тл. Обмотка электромагнита состояла из тысячи витков медной трубки, по сечению которой шел ток, а по полости — охлаждающая вода. Магнит охлаждался так хорошо, что мог работать круглые сутки. Другие магниты, не имевшие искусственного охлаждения, не могли вследствие сильного нагрева работать подряд более 2 ч.

Беккерель хотел при помощи этого магнита уточнить некоторые неясности теории эффекта Зеемана. «Хорошо известно», — говорил Беккерель, — что в этом явлении есть еще кое-что непонятное — это «кое-что» вызвано недостатком зоркости наших инструментов». С помощью нового мощного магнита Беккерель хотел повысить эту «зоркость», сделать более отчетливыми неясные места теории.

Все физики могли видеть, с каким трудом были получены дополнительные 0,5 Тл, тем не менее некоторые из них полагали, что весь вопрос заключается в стоимости и размерах магнита. Сделать магнит колоссальным, вложить в него массу денег — и можно получить сколько угодно большое магнитное поле.

Надежду на то, что электромагнит гораздо большей мощности, возможно в 100 Тл, будет построен в ближайшие годы, выразили на Международном конгрессе электриков в 1914 г. директор международного бюро мер и весов Гийом и профессор физики в Сорбонне Перрен. Они полагали, что по стоимости электромагнит будет равен мощному дредноуту (12—14 млн долл.) и потребует для создания нескольких лет.

Однако даже такой ценой не удалось бы повысить индукцию поля электромагнитов до 100 Тл или, что то же самое в единицах другой системы измерений (СГС), — до 1 млн Гс. Даже сейчас такое стационарное поле — недостижимая мечта физиков. И виновно в этом не в последнюю очередь магнитное насыщение материалов.

В 30-е годы прошлого века в Белль-Ви, близ Парижа, вступил в строй самый большой из всех построенных ранее лабораторных магнитов. Этот магнит был создан Французской академией наук для изучения магнетизма. Кроме огромной массы он имел полюсные наконечники из особого сплава — пермендюра, обладающего несколько большей индукцией насыщения, чем сталь. Это позволило достичь большого поля. Но и оно составляло лишь 5,2 Тл при производстве силы тока на количество витков, равном 500 тыс. А. Длина магнита — 630 см, высота — 275 см, масса — 120 т.

В 1934 г. в университете шведского города Упсала вступил в строй новый мощный магнит. Он отличался от французского тем, что полюсы его имели значительно большую конусность, а катушки и сам полюс — меньшую высоту. Этот электромагнит, рассчитанный Дрейфусом, оказался гораздо эффективней французского. Он весил всего



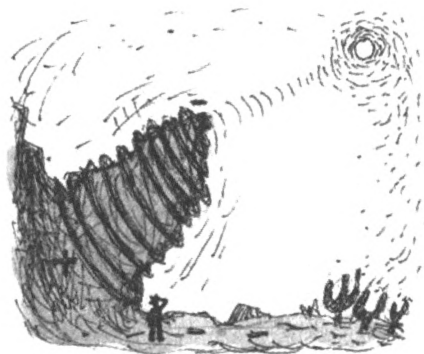
лишь 30 т, но с его помощью при том же объеме можно было получить поле примерно 5,8 Тл. В этом магните полюсы притягивались с силой более 60 т.

С тех пор было построено много мощных электромагнитов, но парижский и упсальский до сего времени остаются рекордсменами — первый по массе, второй по эффективности.

Сейчас почти в каждой физической лаборатории имеется электромагнит: магниты используются для изучения свойств веществ в сильных полях, для испытания новых материалов, в современных уникальных измерительных приборах, в квантовой электронике, при исследовании взаимодействия атомных частиц, для медицинских и биологических исследований. Они не поражают размерами, однако с их помощью можно получить в довольно значительном объеме поле 4—5 Тл, необходимое для исследований.

Самый впечатляющий и необычный исследовательский электромагнит, который никогда не был построен, предложил знаменитый американский изобретатель Томас Альва Эдисон. В начале 90-х годов позапрошлого столетия он предложил создать мощный приемник, который бы регистрировал электромагнитные процессы на Солнце. Проект заключался в следующем. В городе Огдене, штат Нью-Джерси, есть отвесная скала из магнитного железняка, масса которой не менее 100 млн т. Если бы обмотать эту скалу большим количеством проволоки так, чтобы скала играла роль гигантского сердечника колоссального электромагнита, то с помощью этой обмотки, в силу ее большой индуктивности, можно было бы следить за изменением магнитного состояния Солнца.

В настоящее время, конечно, в таком датчике магнитного поля космических тел нет необходимости. Электромагнитные процессы на Солнце можно хорошо изучать с помощью радиотелескопов и других приборов, хотя и громоздких, но все-таки в несколько тысяч раз более легких и удобных, чем магнитная скала. Однако для своего времени идея Эдисона была удивительно смелой и передовой.



# КАПИЦА:

## «КРАТКОСТЬ — СЕСТРА УСПЕХА»

---

*Электромагнит можно перегружать без того, чтобы он сгорел, если увеличить ток, обтекающий обмотку, но на короткое время. Форсаж — это последний резерв на пути достижения сверхсильных полей, поэтому магнитные рекорды обычно принадлежат создателям импульсных систем.*

Это направление берет начало от Вольта, который, заинтересовавшись электрическими рыбами, попробовал построить что-то подобное живой природе. Нильский сомик оказался слабым, гораздо лучше рыба «Торпедо» — гигантский электрический скат. Создавая разряд напряжением 50—60 В, он может убить зашедшего в воду теленка, электрический угорь Амазонки создает импульс напряжением до 500 В.

До Вольта уже были известны такие способы создания электричества, как натирание стекла шерстью, лейденская банка, нагрев турмалина. Сам Вольта научился электризовать жидкости кипячением и химическими реакциями, потом он построил вольтов столб, опустив два разнородных металла в едкую жидкость, однако этот источник не имел с «Торпедо» ничего общего, хотя изобретатель придал своей конструкции форму рыбы.

Потом природой электрического удара угря занялся Фарадей. 6 декабря 1838 г. он доложил результаты опытов перед Королевским обществом. Фарадей использовал два металлических электрода, один конец которых касался рыбы, а к другому были присоединены медные проводнички. Они, в свою очередь, крепились к небольшому соленоиду — проволоочной спирали, внутри которой помещалась железная проволока. Во время разряда угря соленоид создавал относительно сильное магнитное поле, которое намагничивало проволочку. По расположению магнитных полюсов проволоочки Фарадей определял полярность напряжения рыбы. Этот эксперимент долго оставался экзотическим эпизодом в истории физики. И лишь много лет спустя всерьез начал заниматься изучением импульсных магнитных полей замечательный советский физик академик П. Л. Капица.



Петр Леонидович Капица родился в 1894 г. в Кронштадте. Он окончил Петроградский политехнический институт и в 1921 г. был послан в Лондон в составе первой советской научно-промышленной делегации. Петр Леонидович и не предполагал тогда, что долго проживет в Англии, создаст там собственную школу и превратится из скромного доцента в ученого с мировым именем. Большую роль во всем этом сыграл другой член делегации, известный физик А. Ф. Иоффе. Это он послал Капицу в Кембридж просить место в лаборатории знаменитого физика Э. Резерфорда. Однако Резерфорд заколебался: в его «сургучно-веревочной», хотя и блестящей ядерной лаборатории уже работало 30 стажеров. Говорят, что Капица тогда заметил: «30 и 31 различаются примерно на 3%; поскольку Вы всегда предостерегаете против рабской точности измерений, такая трехпроцентная разница вовсе не будет Вами замечена». Правильна ли эта версия, сказать трудно, но так или иначе Капица остался у Резерфорда (с условием не вести «красную пропаганду»), и вскоре скромный стажер, плохо знающий английский язык, стал близким Резерфорду человеком, имеющим свою лабораторию. Вслед за Фарадеем Капица обратился к импульсным магнитным полям, задумав довести их до небывалой силы.

Вот история восхождения молодого советского физика в Кембридже, в Кавендишской лаборатории Резерфорда, описанная им самим в письмах к матери О. И. Капице.

«12 августа 21-го года.

...Вчера в первый раз имел разговор на научную тему с профессором Резерфордом. Он был очень любезен: повел к себе в комнату, показывал приборы. В этом человеке, безусловно, есть что-то обаятельное, хотя порою он и груб».

«1 ноября 21-го года.

...Результаты, которые я получил, уже дают надежду на благополучный исход моих опытов. Резерфорд доволен, как передавал мне его ассистент. Это сказывается на его отношении ко мне. Когда он меня встречает, всегда говорит приветственные слова. Пригласил в



это воскресенье пить чай к себе, и я наблюдал его дома. Он очень мил и прост... Но... когда он недоволен, только держись, так обложит, что мое почтение».

Для изучения свойств альфа-частиц П. Л. Капица предложил помещать камеру Вильсона в магнитное поле. В нем траектория заряженной частицы искривляется, причем радиус искривления зависит от импульса частицы.

«29 ноября 1922-го года.

Для меня сегодняшний день до известной степени исторический... Вот лежит фотография — на ней только три искривленные линии — полет альфа-частицы в магнитном поле страшной силы. Эти три линии стоили профессору Резерфорду 150 фунтов стерлингов, а мне и Эмилию Яновичу — трех с половиной месяцев усиленной работы. Но

вот они тут, и в университете о них все знают и говорят. Странно: всего три искривленные линии! Крокодил очень доволен этими тремя искривленными линиями. Правда, это только начало работы, но уже из этого первого снимка можно вывести целый ряд заключений, о которых прежде или совсем не подозревали, или же догадывались по косвенным фактам. Ко мне в комнату — в лабораторию — приходило много народу смотреть три искривленные линии, люди восхищались ими...»

«4 декабря 1922-го года.

Я эти дни был что-то вроде именинника, 2-го в субботу был прием у проф. Дж. Томсона по случаю приезда голландского физика Зеемана. Конечно, надо было напаять сигарет. Я говорил с Зеemannом, и меня представляли примерно таким образом, что это, дескать, такой физик, который решает такие проблемы, которые считаются невозможными (для решения). И эти генералы меня трепали около 20 минут, пока я не ушмыгнул в угол... Сегодня Зеemann и лорд Релей (сын) были у меня в лаборатории и смотрели мою работу...»

«15 июня 1923-го года.

Вчера был посвящен в доктора философии... Мне так дорого стоил этот миг, что я почти без штанов. Благо Крокодил дал взаймы, и я смогу поехать отдохнуть...»

Проведя серию экспериментов в магнитных полях до 43 тыс. Э (4,3 Тл), Капица решил распространить измерения на более сильные поля. Для этого необходимо было создать соленоиды, поле которых превышало бы прежнее примерно в 10 раз.

Основные трудности при создании сильных полей заключаются в том, что для этого необходим источник тока огромной мощности,

кроме того, существует опасность разрушения соленоида при нагревании. Для решения этих проблем Капица предложил создавать сильные магнитные поля на очень короткое время, в течение которого можно еще провести необходимые измерения и в то же время избежать разрушения соленоида.

Известно, что любая обмотка обладает тепловой инерцией: она не может мгновенно нагреться до температуры плавления даже под влиянием очень большого тока. В системах, работающих кратковременно, упрощается проблема источника сильного тока. Поэтому в качестве такого источника можно использовать устройства, способные дать мгновенный мощный разряд, следующий за относительно продолжительным периодом зарядки. Таких устройств довольно много (вспомним электрического утря у Фарадея). Можно, например, использовать электрическую энергию, накопленную в конденсаторной батарее, работающей при разрядке практически в режиме короткого замыкания. Можно воспользоваться магнитной энергией, накопленной в магнитном поле трансформатора. По расчетам Капицы, для получения магнитного поля 50 Тл понадобится трансформатор с малым числом витков на вторичной обмотке, с сердечником длиной 2—3 м и диаметром 30—40 см.

Модельный эксперимент с использованием магнитного поля трансформатора был без промедления проведен П. Л. Капицей вместе с известным английским физиком П. М. С. Блэкеттом. Эксперимент оказался неудачным. Выяснилось, что быстро механически разорвать первичную цепь трансформатора почти невозможно: при разрыве появляется дуга, и энергия намагниченного железа, вместо того чтобы обрушиться лавиной во вторичную цепь, возвращается в первичную и выделяется в дуге.

Конденсаторы также оказались непригодными, поскольку в то время они были весьма несовершенны и громоздки.

П. Л. Капица обратился к аккумуляторным батареям. Их тоже пришлось специально конструировать, поскольку необходимо было, чтобы их собственная емкость и активное сопротивление были бы минимальными. С помощью новых аккумуляторных батарей при их коротком замыкании удалось мгновенно получить ток 7 тыс. А и мощность 1000 кВт. Разряжая батарею на один из соленоидов с внутренним диаметром 1 мм, П. Л. Капица получил на 0,003 с (пока соленоид не разрушился) магнитное поле 50 Тл. С помощью этой батареи было испытано множество соленоидов самых разнообразных конструкций. В одном из соленоидов, навитом медной лентой, можно было проводить измерения в поле до 13 Тл. Когда же этот соленоид поместили на время опыта в жидкий азот, оказалось возможным проводить регулярные измерения в магнитном поле с индукцией 25 Тл. Это было тем максимумом, которого удалось в то время добиться с помощью аккумуляторов. Для получения больших полей необходимо было искать другой, более мощный источник электроэнергии, который должен был давать мощность порядка 50 тыс. кВт в течение времени, пока обмотка не нагреется до 150 °С (тепловой предел электроизоляции), т.е. в течение 0,01 с.

В январе 1923 г. в Лондоне П. Л. Капица познакомился с молодым советским инженером М. П. Костенко, в то время работавшим в Англии. Костенко, как и Капица, был инженером-электромехаником по образованию и окончил тот же Политехнический институт. Вскоре они подружились. Петр Леонидович предложил своим новым друзьям супругам Костенко вместе съездить в отпуск во Францию. Он помог им получить французские визы, и они вместе отпраздновали в Париже День взятия Бастилии.

Интересно, что в то время Костенко как раз занимался теми вещами, которые могли заинтересовать Капицу, — он разрабатывал, в частности, электромагнитный молот и электромагнитную пушку — специализированные электромеханические системы, важным элементом которых была электрическая машина, работающая в режиме короткого замыкания.

Для опытов Капицы нужны были большие токи на весьма небольшие моменты времени. И он подумывал о токах короткого замыкания. Костенко, уже работавший с генераторами, действующими в условиях коротких замыканий (электромагнитный молот), предложил использовать для этой цели большие всплески тока, возникающие при внезапном коротком замыкании синхронных генераторов. В качестве нового источника большой мгновенной мощности можно было взять быстроходный синхронный генератор, чтобы использовать в течение небольшого промежутка времени запасенную ранее электромагнитную и кинетическую энергию ротора.

Костенко мастерски подобрал параметры необходимого генератора, получив максимально возможные для машины заданных габаритов всплески тока и соответствующие магнитные поля.

Капица ознакомил с проектом руководителя Кавендишской лаборатории. Профессор Резерфорд высоко оценил идею эксперимента и даже предположил возможность создания с помощью «ударного генератора» магнитных полей порядка 700 Тл (!) и тем самым, воздействуя на внутреннее поле атома и заставив все электроны вращаться в одной плоскости, «сплющить атом».

Костенко и Капица стали соавторами предложенного ими устройства и получили 30 июня 1926 г. английский патент. Импульсный генератор был изготовлен и с большим успехом испытан.

В качестве мощного источника тока П. Л. Капица и М. П. Костенко предложили использовать электрогенератор номинальной мощностью 2 тыс. кВт, который в режиме короткого замыкания не сгорал, как обычные генераторы, а выдавал без аварийных последствий в течение 0,01 с мощность 50 тыс. кВт. Этот генератор был построен фирмой «Метрополитен Веккерс» по расчетам М. П. Костенко, П. Л. Капицы и Майлса Уокера. Генератор приводился во вращение специальным электродвигателем, получавшим энергию от аккумуляторных батарей.

Масса ротора генератора составляла 2,5 т, диаметр его — 50 см. Большой момент инерции ротора позволял обойтись без специального маховика. Генератор давал переменный ток, что было очень существенно, поскольку большой ток короткого замыкания был нужен лишь на небольшой промежуток времени. Если бы генератор давал

постоянный ток, то по прошествии 0,01 с этот постоянный ток громадной силы должен быть выключен, а это само по себе — сложнейшая проблема. Переменный ток, как известно, два раза в течение каждого периода сам проходит через нулевое значение, и выключить генератор, когда ток проходит нулевое значение, не представляет особого труда. Нужно только строго синхронизировать момент прохождения тока через нуль с моментами включения и выключения генератора на короткое замыкание. Сделать это абсолютно точно невозможно: момент выключения может совпадать с таким временем, когда ток в обмотке еще не равен нулю. Поэтому П. Л. Капица «на всякий случай» пришлось сконструировать выключатель на ток 5 тыс. А (амплитуда тока 30 тыс. А), отключающий цепь за 0,0001 с. Этот выключатель сам по себе — подлинное произведение инженерного искусства.

Соленоид, на который обрушился колоссальный ток короткого замыкания генератора, представлял собой катушку из медной проволоки квадратного сечения. В последующих экспериментах медь была заменена сплавом меди с кадмием, обладающим большей механической прочностью при несколько повышенном электросопротивлении. Когда ток генератора проходил через катушку, в ней развивались грандиозные механические усилия, достигающие нескольких десятков тонн. Чтобы эти усилия не разорвали обмотку, она снаружи скреплялась прочной стальной лентой, воспринимающей усилия.

Это, однако, было не все. Под влиянием мощных сил катушка немного разматывалась, и концы ее отрывались от тех электровыводов, через которые к катушке подавался ток. Катушка за катушкой «погибали» вследствие второстепенного явления уже после того, как были преодолены, казалось бы, все основные трудности. Устранение «мелочей» заняло несколько месяцев. Наконец решение было найдено. Капица создал обмотку, которая могла «дышать», т.е. автоматически расширяться. Один из контактов был сделан подвижным и сам после нескольких испытаний занимал то положение, которое ему «больше нравилось».

Другой серьезной трудностью была краткость времени, в течение которого можно было производить измерения. Ведь магнитное поле существовало в соленоиде всего 0,01 с, и за это время все эксперименты надо было начать и закончить. Кроме того, работу осложняли микроземлетрясения, происходящие при резком торможении генератора в тот момент, когда его обмотка замыкалась накоротко. Несмотря на то, что генератор был установлен на массивном фундаменте, покоящемся на скальном основании на виброустойчивой подушке, волна микроземлетрясения искажала результаты измерений. Чтобы этого не происходило, П. Л. Капица нашел весьма изящный выход. Он расположил соленоид с объектом исследования в другом конце зала на расстоянии 20 м от генератора. Волна землетрясения, движущаяся со скоростью звука в данной среде, проходила 20 м за 0,01 с и достигала соленоида уже к тому времени, когда измерения проведены.

В момент короткого замыкания температура в обмотке очень сильно повышается, а затем постепенно выравнивается. Расчеты по-

казали, что эта температура должна превышать температуру Солнца. Это дало повод профессору Эддингтону шутливо заявить: «Работы П. Л. Капицы и Э. Резерфорда по расщеплению атома приводят к тому, что, хотя температура в глубинах звезд, быть может, равна миллионам градусов, эти глубины являются довольно прохладным местом по сравнению с Кавендишской лабораторией».

Вот что писал П. Л. Капица о своих опытах Резерфорду, находившемуся в то время в Каире.

«Кембридж. 17 декабря 1925 г.

Я пишу Вам это письмо в Каир, дабы рассказать, что мы уже сумели получить поля, превышающие 270 тыс., в цилиндрическом объеме диаметром 1 см и высотой 4,5 см. Мы не смогли пойти дальше, так как разорвалась катушка, и это произошло с оглушительным грохотом, который, несомненно, доставил бы Вам массу удовольствия, если бы Вы слышали его...

Но результатом взрыва был только шум, поскольку, кроме катушки, никакая аппаратура не претерпела разрушений. Катушка же не была усилена внешним ободом, каковой мы теперь намереваемся сделать.

...Я очень счастлив, что в общем все прошло хорошо, и отныне Вы можете с уверенностью считать, что 98 процентов денег были потрачены не впустую, и все работает исправно.

Авария явилась наиболее интересной частью эксперимента и окончательно укрепляет веру в успех, ибо теперь мы точно знаем, что происходит, когда катушка разрывается. Мы также знаем теперь, как выглядит дуга в 13 тыс. А. Очевидно, тут вообще нет ничего пагубного для аппаратуры и даже для экспериментаторов, если они держатся на достаточном расстоянии.

Со страшным нетерпением жажду увидеть Вас снова в лаборатории, чтобы в мельчайших деталях, иные из которых забавны, рассказать Вам об этой схватке с машинами».

С помощью импульсного генератора П. Л. Капице удалось провести планомерные исследования в магнитных полях до 32 Тл. Это поле, занимавшее объем всего 2 см<sup>3</sup>, стало верхней границей уверенно получаемого магнитного поля. Вплоть до этой границы Капица совместно с другими учеными исследовал явления Зеемана и Пашена — Бека, магнитосопротивление, магнитострикцию и другие эффекты.

Рассматривая перспективы получения еще более сильных магнитных полей, П. Л. Капица указывал в одной из своих статей, что уже в то время (в 1920-е годы) состояние техники позволяло сделать конденсаторные батареи, которые могли бы создать поле 200—300 Тл. Однако технические трудности оказались столь велики, что только лишь через 40 лет таким способом удалось получить поля, о которых говорил П. Л. Капица.

Рекорды, поставленные П. Л. Капицей, оставались нетронутыми более 20 лет. Они были побиты лишь в 1950-х годах.

Постепенно Капица убедил Резерфорда построить специальную лабораторию для исследований в сильных магнитных полях и при сверхнизких температурах. Резерфорд поддержал эти предложения и даже получил соответствующие средства. Решение вопроса сильно



облегчалось тем, что авторитет Капицы в Кембридже уже был чрезвычайно высок — его избрали даже членом Лондонского Королевского общества, т.е. английским академиком.

И вот на древней кембриджской земле рядом со старыми корпусами колледжа поднялось современное, хотя и не слишком большое здание лаборатории имени Монда, директором которой был назначен П. Л. Капица.

Торжественное открытие состоялось в феврале 1933 г. в присутствии премьер-министра Великобритании С. Болдуина и, разумеется, Э. Резерфорда.

Резерфорд был необычайно доволен и новым зданием, и его оборудованием, и особенно новым директором Монд-лаборатории. П. Л. Капица, по мысли Резерфорда, должен был бы впоследствии стать его преемником и по Кавендишской лаборатории.

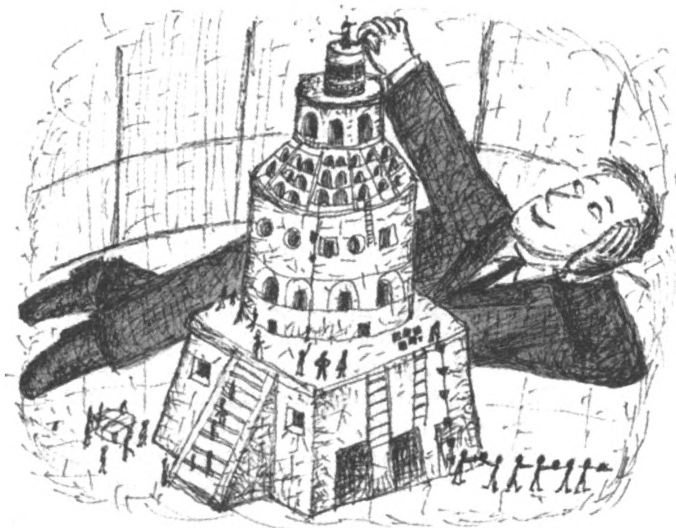
Н. Винер вспоминал: «...в Кембридже была все же одна дорогостоящая лаборатория, оборудованная по последнему слову техники. Я имею в виду лабораторию русского физика Капицы, создавшего специальные мощные генераторы, которые замыкались накоротко, создавая токи огромной силы, пропускавшиеся по массивным проводам; провода шипели и трещали, как рассерженные змеи, а в окружающем пространстве возникало магнитное поле колоссальной силы... Капица был пионером в создании лабораторий-заводов с мощным оборудованием... Сейчас, в связи с созданием атомной бомбы и развитием исследований по физике атомного ядра, такие лаборатории стали совершенно обычными».

Однако директором Монд-лаборатории П. Л. Капица пробыл недолго. Пришло время возвращаться на родину, надо было налаживать научную работу в Москве — создавать Институт физических проблем Академии наук СССР. Главными темами научных исследований этого института стали магнетизм и сверхнизкие температуры.

Обе эти проблемы должны были решаться комплексно, с участием физиков-экспериментаторов и физиков-теоретиков. Капица думал о том, что их работа в рамках единого института будет способствовать общему прогрессу исследований. По его замыслу, здесь должны были работать первоклассные ученые, полностью отдавшие себя научному творчеству.

Однако Капица приехал в Москву, не имея ни сотрудников, ни научной школы. Готовых кадров не было. А может, это и неплохо — создавать новые направления и традиции.

Несколько лет заняло формирование и обучение основного и вспомогательного состава сотрудников, образование его ядра. В институте культивировалось служение науке. Руководство его также должно было участвовать в научном процессе. Капица не собирался отказываться от проведения собственных исследований. «Только когда работаешь в лаборатории сам, своими руками проводишь эксперименты, пускай часто даже в самой рутинной их части, только при этом условии можно добиться настоящих результатов в науке, — писал он. — Чужими руками хорошей работы не сделаешь. Человек, который отдает несколько десятков минут для того, чтобы руководить научной работой, не может быть большим ученым. Я, во всяком



случае, не видел и не слышал о большом ученом, который бы так работал, и думаю, что этого вообще быть не может. Я уверен, что в тот момент, когда даже самый крупный ученый перестал работать сам в лаборатории, он не только прекращает свой рост, но и вообще перестает быть ученым».

Наконец, институт укомплектован, в нем ведутся исследования... Резерфорд сделал Институту щедрый подарок — все оборудование, на котором в Кавендишской лаборатории работал Капица. «Мне кажется, цель достигнута, и институт можно считать не только одним из самых передовых в Советском Союзе, но и в Европе», — писал радостный Капица.

На установке для получения сверхсильных магнитных полей кавендишцы — механик Пирсон и лаборант Лауэрман — помогали продолжать кембриджские опыты. В одном из них был зафиксирован новый рекорд — получено импульсное магнитное поле в 50 Тл.

Мировая наука остро нуждалась в сверхсильных магнитных полях. Физики циклотронной лаборатории Гарвардского университета, например, мечтали о полях хотя бы 20 Тл, которые могли бы заметно искривлять траектории частиц, попадающих в толстые фотоэмульсии. Они использовали конденсаторные батареи.

Мощные конденсаторные батареи за 0,00001 с могли обеспечить получение электрической мощности 1 млн кВт или 1 млрд Вт (мощность Днепрогэса 600 тыс. кВт), удалось получить магнитное поле более 100 Тл. Внезапное высвобождение огромной энергии происходило с грохотом, напоминающим удар грома.

Вся эта лавина энергии загонялась в один-единственный массивный виток. Как показал П. Л. Капица, соленоиды обычного типа с намотанной на них медной проволокой «выживают» лишь в полях до 30—35 Тл. Соленоиды «биттеровского» типа, изготовленные из медных дисков, оказались устойчивее, но и они выдерживали магнитные

поля не выше 50—70 Тл. Соленоиды не в состоянии противодействовать огромным усилиям, возникающим в таких полях. Особенно слабым местом казалась межвитковая изоляция. Чтобы от нее избавиться, пришлось перейти на один-единственный массивный виток, который вместе с держателем изготовили из меди, закаленной стали или бериллиевой бронзы.

Цель экспериментов — выяснить, насколько различные металлы могут противостоять механическим и тепловым воздействиям сверхсильных импульсных полей. Эксперименты показали, что ни один металл не может без разрушения выдержать усилия, возникающие в магнитном поле 100 Тл. Казалось бы, этим и будут ограничены успехи физики сверхсильных полей. Однако современными учеными, по видимому, найден выход из этого затруднительного положения. Он заключается в применении «бессиловых» обмоток, где используются принципы наложения противоположно направленных сил.

Разработано большое число бессиловых и малосиловых обмоток. Бессиловые обмотки — это последняя надежда физиков на получение устойчивых полей в неразрушающихся обмотках в том случае, если не будут открыты более прочные и тугоплавкие материалы.

Сильные магнитные поля при разрядке мощных конденсаторных батарей на биттеровский соленоид, иногда запеченный для прочности в керамику, или на отдельный виток сейчас широко используются для создания полей 20—70 Тл.

Значительным техническим достижением является создание в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова (С. Х. Хакимов с сотрудниками) соленоида нового типа, представляющего собой цельноточеную спираль из бериллиевой бронзы. Этот импульсный магнит создает в зоне диаметром 8 см магнитное поле 30 Тл.

А не существует ли способа получения сильного магнитного поля, основанного не на внезапном обрушивании на соленоид громадной энергии, а на каком-то ином принципе? Советские электротехники Г. А. Бабат и М. С. Лозинский в 1940 г. опубликовали статью, в которой высказали идею о «концентраторе» потока.

Эту идею легко понять. Представим себе разрезанную трубку с током, со стороны разреза замкнутую металлическим поршнем. Внутри трубки ток создает магнитное поле, характеризующееся густотой магнитных силовых линий, т.е. числом их, приходящимся на единицу площади сечения внутренней области трубки. Что произойдет, если поршень внезапно ввести во внутреннюю область трубки? Внутреннее сечение трубки резко сократится. Так как число силовых линий, сцепленных с трубкой, мгновенно измениться не может, плотность их в уменьшившемся сечении столь же резко возрастет. Следовательно, возрастут и магнитная индукция, и напряженность магнитного поля.

Таким образом, принцип «концентрации» потока сводится к тому, что поле относительно небольшой напряженности создается сначала в большом объеме, затем сечение магнитного потока резко сокращают — поле резко возрастает.

Хауленд и Фонер, используя идею Г. А. Бабата и М. С. Лозинского, создали концентратор без механического сокращения рабочей зо-

ны магнита. Выяснилось, что, поместив внутри соленоида массивный виток с небольшим внутренним диаметром, можно также добиться эффекта концентрации: при импульсе тока во внешней обмотке в массивном витке наводятся вихревые токи, которые вытесняют магнитный поток к центральному отверстию массивного витка. С помощью концентраторов получено магнитное поле 45 Тл, в то время как в соленоиде без массивного витка поле более 30—35 Тл получить весьма трудно.

В других экспериментах получено магнитное поле 20 Тл в значительном объеме (примерно равном объему стакана). В этот объем вставлялись толстые фотоэмульсии для исследования ядерных процессов. Батарея конденсаторов при этом имела массу более 30 т.

Вершиной, венчающей все исследования в области сверхсильных магнитных полей, явилась серия экспериментов, проведенных советскими физиками под руководством академика А. Д. Сахарова в 1950-х годах в обстановке суперсекретности, на суперсекретном же полигоне в суперсекретном городе Сарове. Рассматривая идею концентрации магнитного потока и понимая, что эффект концентрации тем выше, чем быстрее произойдет «схлопывание» зоны концентрации, Сахаров пришел к выводу, что этот эффект будет наиболее успешным в том случае, если схлопывание произвести с помощью взрывчатых веществ.

Если внутри замкнутого массивного витка каким-то образом создать магнитное поле, то затем, сжимая виток с помощью кумулятивного взрыва, можно добиться того, что плотность магнитного поля внутри суженного витка сильно возрастет. Это происходит в силу того обстоятельства, что магнитный поток, сцепленный с каким-то контуром, не может мгновенно изменяться. Аналогичные идеи были позже опробованы и американскими физиками в Лос-Аламосской лаборатории.

Первоначальное магнитное поле 100 Тл создается при помощи устройства, также работающего на взрывном принципе. Металлическое кольцо-виток диаметром 7,5—10 см окружают 4—8 кг взрывчатки. Когда внешнее поле достигает максимума, взрывчатку подрывают и кольцо за 0,000001 с, т.е. со скоростью 4 км/с, сужается до 0,4 см.

В процессе схлопывания советскими физиками было измерено магнитное поле 2500 Тл, а американскими — 1460 Тл. (Это рекордное магнитное поле было получено путем последовательного использования двух взрывных, или магнитокумулятивных, генераторов МК-1, МК-2. Второй из них использовался для создания «запального» поля, которое затем охлопывалось генератором МК-1.) Дальнейшие измерения поля были невозможны, поскольку во время схлопывания диаметр кольца уменьшался настолько, что оно раздавливало датчик, с помощью которого производили измерения. Весь процесс длился миллионные доли секунды.

А. Д. Сахаров считал, что достигнутое поле — не предел. Используя другие взрывчатые вещества, например ядерные заряды, можно получить магнитные поля, равные 10 000 Тл. Такие поля существуют лишь в недрах планет и звезд. Давление магнитного поля растет про-

порционально квадрату его напряженности, поэтому при достижении столь сильных полей будут развиваться и соответствующие давления.

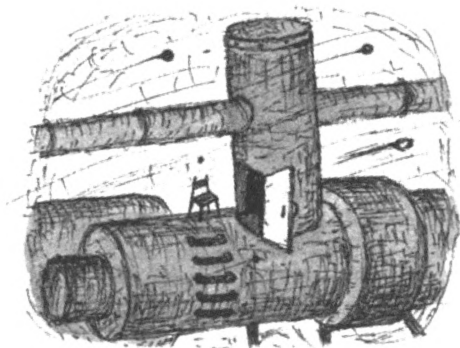
Проведение экспериментов при одновременном сочетании столь сильного поля и давления имеет чрезвычайно большое значение для изучения, например, процессов, происходящих внутри планет и звезд, при гравитационном коллапсе сверхзвезд и т.п.

Применяют ли импульсные поля в технике? Перспективы технического использования импульсных полей весьма многообещающи, хотя эта область техники пока делает свои первые шаги.

С помощью магнитного импульсного поля, например, наклепывают защитную металлическую трубку на стальной трос. Давление, развиваемое импульсным полем, настолько велико, что трубка придавливается к негладкой поверхности троса с такой плотностью, какую невозможно получить другим способом.

Точно так же можно использовать электромагнитные усилия, возникающие в мощных магнитных полях, для штамповки деталей, запрессовки проводящих элементов в изоляционные втулки и других технических целей. Сверхсильные импульсные магнитные поля, по-видимому, найдут применение в дальней космической радиосвязи, при изучении элементарных частиц и свойств плазмы.

Быть может, наиболее грандиозный и смелый проект использования импульсных полей в физических исследованиях — проект, в котором предлагается применять крупный магнитокумулятивный генератор для получения заряженных частиц с колоссальной энергией. Чтобы разогнать частицы до энергии 1012 эВ, в качестве заряда потребуется использовать ядерное устройство. Взрыв предполагается осуществить в камере объемом 104 м<sup>3</sup>, находящейся на дне шахты глубиной 1 км. Удивительно, что это, казалось бы, безумно дорогое устройство должно быть значительно дешевле обычного ускорителя, дающего частицы с той же энергией.



# БИТТЕР:

## «СЕКРЕТ — В ОХЛАЖДЕНИИ»

---

*В этом рассказе о соленоидах речь пойдет о скульпторе, занявшемся физикой; о «проклятой» формуле, выведенной в 1898 г.; о соленоидах, которые требуют охлаждения воздухом, водой, керосином. Здесь же придется вспомнить о магните «грейпфруте» и магните из жидкого серебра.*

Когда Ампер согнул проволоку колечком, которое назвал соленоидом, ему, чтобы получить заметное магнитное поле, достаточно было пропускать по виткам ток в доли ампера. Этот ток нагревал, конечно, проводник, но выделенное тепло легко отбиралось воздухом комнаты. Почти 100 лет воздушный океан сообщал свою температуру проводникам, через которые пропускали электрический ток, но наконец пробил час, когда охлаждающих возможностей атмосферы оказалось недостаточно. И тут в истории магнитов уместно вспомнить имя Френсиса Биттера.

Биттер (1902—1967) родился в городе Виховкин, в штате Нью-Джерси, в семье известного американского скульптора. Тогда Виховкин еще не был превращен в мрачный придаток громадного порта Нью-Йорка, а представлял собой раскинувшийся на живописных зеленых холмах открытый восточным теплым ветрам маленький городок. Казалось, все способствовало тому, чтобы Френсис стал скульптором: творчество отца, склонность к занятиям искусством, прекрасные каменоломни по соседству, наконец, большой спрос на могильные памятники.

Дом, где жил Френсис, был выстроен по проекту отца. Вся жилая площадь и двор с фонтанами и конюшнями (Френсис любил лошадей) были отгорожены от улицы высокой стеной.

В 1909 г. семья переехала в Нью-Йорк. Впоследствии в своей книге «Магниты: курс для физиков» Биттер вспоминал: «Жизнь в нашей нью-йоркской студии была сравнительно размеренной. Жизнь детей подчинена строжайшему режиму. Мы изучали три языка: немецкий — с родителями, французский — с гувернанткой и английский — в школе. Уроки фортепьяно, танцев, посещение Музея естественной истории в дождливые дни, чтение «полезных» книг по воскресеньям — так проходила наша жизнь, пока я не был



отослан двенадцати лет в школу». В это время погиб в такси, потерявшем управление, его отец, и мать тяжело переживала это несчастье.

«В моем образовании наука отсутствовала вообще, — писал Биттер, — хотя мы проходили восхитительные курсы алгебры и геометрии, которые я любил больше всего. Эти предметы легко давались мне, и, если я правильно вспоминаю, я был одним из лучших учеников в классе. Доказать теорему, исходя из постулатов, или решить уравнение — это было для меня волнующим переживанием, куда более интересным, чем латынь, история, английский и география».

Под влиянием дяди, профессора Чикагского университета, Биттер поступил в 1919 г. в это учебное заведение. Он еще не интересовался наукой, но считался одним из лучших студентов, во всяком случае, одним из наиболее способных. Вершиной его активности в студенческие годы стала отнюдь не научная работа, а организация для своих однокашников дешевой поездки в Европу на судне-скотовозе. И тут, в Вене, он впервые увлекся работами Эйнштейна и его теорией относительности.

В Чикагский университет Биттер не вернулся. Его привлек теперь Колумбийский университет, где он стал единственным студентом, избравшим для изучения небесную механику, учитывающую релятивистские эффекты. Интерес к этим проблемам Биттер сохранил на всю жизнь. Одна из его первых публичных лекций была посвящена теории относительности, преобразованиям Лоренца.

В 1925 г. он стал бакалавром и поехал в Берлин доучиваться. «Я слушал много известнейших лекторов. Я слушал Макса Планка, отца квантовой теории; Макса фон Лауэ, который открыл рассеяние рентгеновских лучей в кристаллах; Альберта Эйнштейна. Я помню коллоквиум, на котором впервые было сообщено о волновой механике Эрвина Шредингера. Я ехал обратно в метро уже поздно ночью, когда внезапно заметил, что в вагон вслед за мной вошел Эйнштейн. Хотя я не был ему представлен формально, он, видимо, сразу узнал

меня по коллоквиуму, так как сразу начал: «Слушайте, что Вы об этом думаете? В какое чудесное время мы живем!».

Возможно, именно эта встреча и определила научные интересы Биттера. Для начала он купил двухтомную «Теорию электричества и магнетизма» и проштудировал ее от корки до корки.

В 1926 г. Биттер уже заканчивал докторскую диссертацию в Колумбийском университете, когда выяснилось, что тема диссертации была уже кем-то ранее досконально разработана. «И когда я бессмысленно шлялся по коридорам, мысленно взвешивал, какая другая тема могла бы потянуть на настоящее исследование, мой взгляд упал на внушительного вида магнит в одной из пустых лабораторий...», — писал впоследствии Биттер. Так один из наиболее знаменитых ученых-«магнитчиков» обратился к магниту.

На выбор Биттером научного направления оказал огромное влияние его визит в Кембридж, в магнитную лабораторию П. Л. Капицы. Однако это было только толчком. Биттер пошел своим путем в направлении создания не импульсных магнитов, а магнитов, предназначенных для длительной работы.

Во время войны Биттер обезвреживал магнитные мины, разбрасываемые немецкими самолетами-амфибиями вблизи английских портов. Это было необычное время для Биттера. Он жил в скромном частном доме на Арлингтонской улице в Александрии, близ Вашингтона, в атмосфере строгой секретности. Лишь в послевоенные годы Биттер стал заниматься «мегагауссной» тематикой — проектировал сверхсильные магниты.

В 1965 г. он перенес тяжелую операцию, и врачи не могли сказать ничего утешительного. Однако он не сдался и продолжал работать, но уже над мощными разрядными импульсными магнитами. 26 июля 1967 г. Биттер скончался, а 21 ноября 1967 г. главная магнитная лаборатория США — Национальная магнитная лаборатория — была названа его именем.

В 1930-е годы Биттеру для исследования тонких магнитных явлений в газах потребовалось сильное магнитное поле — примерно 10 Тл. Необходимо было в короткий срок создать магнит, который мог бы в течение длительного времени (несколько часов) обеспечить исследователю это грандиозное поле, в 20 тыс. раз превышающее магнитное поле Земли.

Перед тем как приняться за решение этой задачи, Биттер изучил все, что было до него сделано в области сильных магнитных полей.

В это время уже работали очень мощные электромагниты в Белль-Ви, близ Парижа (поле до 9 Тл), в Упсальском университете в Швеции (до 7 Тл). Это были громадные сооружения со стальным магнитопроводом и ярмом, классические магниты массой несколько десятков тонн. Нечего было и думать о том, чтобы создать магнитное поле 10 Тл с помощью электромагнита со стальным сердечником, хотя теоретически легко показать, что, несмотря на «насыщение», в магнитных системах со сталью можно получить сколь угодно большое поле. Бесконечное поле будет в том случае, если вся Вселенная, за исключением точки, в которой создается магнитное поле, будет заполнена намагниченным железом...



Биттер прекрасно понимал, что для достижения поля 10 Тл ему придется заполнить насыщенным железом если не Вселенную, то уж во всяком случае свою лабораторию. Вариант с железным сердечником не подходил. Пришлось взяться за изобретенный французскими учеными Араго и Ампером электромагнит без стального сердечника, позже названный соленоидом. Он представляет собой спираль, обтекаемую электрическим током. Неприятности, которые подстерегали ученых на этом пути, были сформулированы французским электротехником Фабри в виде формулы — «формулы Фабри», опубликованной в журнале «Электрическое освещение» за 1898 г.

О чем говорит формула? Об очень грустных вещах: если вы хотите увеличить магнитное поле, например, в 10 раз, извольте увеличить электрическую мощность, расходуемую в соленоиде, в 100 раз. Для достижения сильных магнитных полей потребуются целые электростанции. Академику П. Л. Капице, уже в 1923—1927 гг. получившему поле 50 Тл, не пришлось преодолевать эту трудность — он сумел создать сильное поле, продолжающееся во времени лишь одну тысячную долю секунды. Но это не устраивало Биттера — ему нужны были стационарные поля. Выход был один — нужно строить соленоид.

Биттер отправился на Бостонскую электростанцию. Ему удалось договориться с руководством Эдисоновской электрической компании о том, что ночью, когда в городе будет некоторая свободная электрическая мощность, Биттер будет питать этой мощностью свое прожорливое «дитя». Магнит размером с автомобильное колесо был установлен в одном из помещений электростанции. Когда его включили впервые в 1937 г., в зале случилось что-то невообразимое: мелкая железная пыль, опилки, гвозди, болтики со всех концов помещения устремились к небольшому бронзовому кожуху, к которому были подведены две мощные водопроводные трубы. По ним подавалась охлаждающая вода из теплообменника, который омывался водой из реки, протекающей поблизости. Роль этих труб очень большая. Если бы к магниту не подавалась охлаждающая вода со скоростью 50 л/с, то магнит мгновенно бы сгорел.

Потребляемая мощность магнита примерно равна 1700 кВт, или 1,7 МВт. Вся эта мощность выделялась в виде тепла, которое необходимо было тут же отводить во избежание повышения температуры магнита.

Конструкция Биттера оказалась настолько удачной, что до сих пор соленоиды, построенные по этому принципу, называют биттеровскими. Оригинальный биттеровский соленоид, с помощью которого впервые в течение длительного времени было получено магнитное поле 10 Тл, представлял собой штампованные медные диски с 600 отверстиями для охлаждающей воды, имевшие радиальную прорезь. Последняя служила для того, чтобы, немного изогнув диск, можно было присоединить его к следующему диску для образования непрерывной спирали с током.

Первый биттеровский соленоид с полем 10 Тл, будучи сильнейшим в мире, непрерывно работал «на науку». Единственным перебоем в его работе было время, когда для осуществления «манхет-

тенского проекта» (создание первой американской атомной бомбы) с помощью магнита Биттера в Ок-Ридже разделяли изотопы урана.

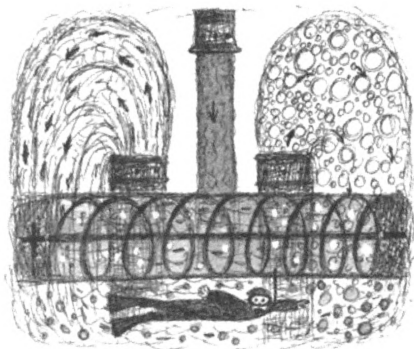
Бурное развитие физики в 60-е годы прошлого века, особенно таких ее направлений, как магнитное удержание плазмы, исследования сверхпроводимости, антиферромагнетизма, квантовой оптики, элементарных частиц, привели к тому, что сверхсильные магнитные поля стали остро необходимы, и для их получения были организованы лаборатории и институты в Советском Союзе, США и Англии.

Достигнутое в 1965 г. магнитное поле 25 Тл в полмиллиона раз больше земного, в 100 раз больше поля солнечных пятен и лишь в 4 раза уступает магнитному полю, которое, по расчетам, должно существовать в атомном ядре.

Поле 25 Тл достигнуто в Национальной магнитной лаборатории США с помощью тройного соленоида, созданного Кольмом по расчету Монтгомери. Этот рекордный соленоид с внутренним диаметром 10 см потреблял мощность 16 тыс. кВт. Его внешняя секция намотана полый медной шиной квадратного сечения, внутренние секции выполнены из медных дисков, на поверхности которых химическим способом вытравлены радиальные каналы для охлаждения. Для изготовления магнита использовано более 3 т меди. Давление магнитного поля на внутренние секции было так велико, что медь начала «течь». Это давление более чем в 3 раза превышало существующее на дне глубочайшей океанской впадины. Интересна система охлаждения магнита, основанная на принципе пленочного кипения. При этом температура охлаждаемой медной спирали была выше 100 °С, что вызывало возникновение на ней многочисленных пузырьков пара, которые в течение тысячных долей секунды превращались в огромное количество сравнительно холодной воды, водопадом обрушивающейся на соленоид. (Слово «водопад» здесь использовано не случайно. Для охлаждения этого магнита используется вода протекающей неподалеку от лаборатории реки. Тепло, выделяющееся в соленоиде, столь велико, что температура воды в реке на участке ниже лаборатории повышается на полградуса.) Удельная теплота парообразования воды очень велика, поэтому при образовании на поверхности спирали пузырьков от спирали отбирается гораздо более значительная энергия, чем та, которая отбиралась бы просто при нагревании охлаждающей воды.

Этот принцип локального, или пленочного, кипения был впервые использован в небольшом магните Кольма, с помощью которого получено поле 12,6 Тл. По сравнению с соленоидом Биттера (поле 10 Тл) размером с колесо легковой автомашины этот магнит величиной с грейпфрут был просто крошкой.

Сходную систему охлаждения имеет еще один грандиозный магнит. Он был создан в Физическом

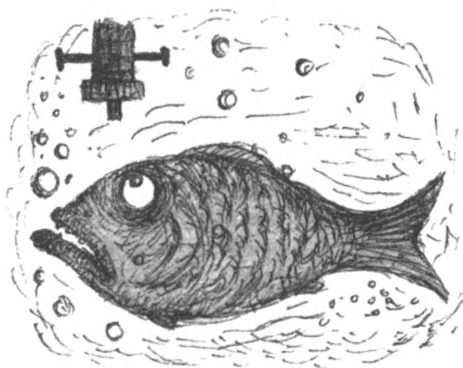


институте АН СССР имени П. Н. Лебедева под руководством академика А. М. Прохорова научными сотрудниками Л. П. Максимовым и В. Г. Веселаго. Соленоид, напоминающий из-за множества шлангов-шупалец чудовищного осьминога, рассчитан на получение магнитных полей более 20 Тл. Чтобы снабжать это «чудовище» электроэнергией, построена специальная электростанция.

Колоссальное поле, полученное Кольмом в его магните на 25 Тл, создано в рабочей зоне диаметром всего 10 см, хотя размер магнита более 1 м в поперечнике. Проводить какие-либо крупномасштабные исследования на этом соленоиде довольно сложно, поэтому конструкторы искали новые пути, с помощью которых можно было бы получать значительные магнитные поля в больших рабочих объемах.

Может быть, использовать другое охлаждающее вещество? Интересный эксперимент был проведен в Калифорнийском университете. Там еще в 1959 г. был построен соленоид, охлаждаемый керосином. Почему выбран именно керосин? Дело в том, что вода, особенно с примесями, не является идеальным изолятором, и по достижении некоторого напряжения начинают сказываться ее электрические свойства. Обмотка, охлаждаемая водой, подвергается коррозии. Анализ других жидкостей, которые можно было бы использовать для охлаждения, показал, что с точки зрения теплоемкости и безвредности наилучшим для обмотки является очищенный керосин, закупоренный в сосуде, наполненном нейтральным газом.

«Керосиновый» соленоид, имеющий внутренний диаметр 10 см, был намотан медной шиной, потреблял мощность 6 тыс. кВт и обеспечивал получение магнитного поля 10 Тл. Каждую секунду к нему для охлаждения подавался центнер очищенного керосина.



# ОННЕС И ДРУГИЕ:

## «СНАЧАЛА МЕДЛЕННО ВНИЗ...»

---

*Этот пожилой человек с бледным лицом и уныло висящими усами не производил впечатления героической личности, хотя он совершил не один научный подвиг. Он оживил «солнечный» газ — гелий, понизив его температуру почти до абсолютного нуля. Он открыл фантастические материалы — сверхпроводники. Он первым создал столь технически совершенно оснащенную лабораторию, что она стала эталоном для грядущих лабораторий XX века!*

Его звали Гейке Камерлинг-Оннес (1853—1926). Он учился у знаменитых Кирхгофа (правила Кирхгофа) и Бунзена (горелка Бунзена). На рубеже XIX и XX веков ему удалось создать в Лейденском университете лабораторию с невиданно мощными оживителями воздуха, азота и водорода, с сильным коллективом стеклодувов, со своим научным журналом.

Он знал, что делал. Еще в 1790 г. Ван-Марум, директор музея в Гааге, первым в мире превратил газ аммиак в жидкость, кипящую при 33 °C! Камерлинг-Оннес достойно отметил столетний юбилей соотечественника. Хотя со сжижением водорода его опередил Дьюар, последний газ (гелий) все же стал жидкостью у голландца (1908 г.: при температуре — 268 °C; Нобелевская премия 1913 г.).

Камерлинг-Оннес сжижал газы, чтобы выяснить, что же несут с собой все более низкие температуры. С температурой было все ясно — у нее было предельно низкое значение, а как с электрическим сопротивлением? Оно снижалось вместе с температурой. Формула Фабри давала надежду на получение поля примерно 100 Тл. Несколько лет труда — и сверхсильное магнитное поле должно появиться! Какая великая желанная цель!

Но исследователи недооценивали два обстоятельства: во-первых, низких температур достигать не так просто. Чтобы их получить, необходимо затратить значительную энергию; во-вторых, с ростом напряженности магнитного поля вследствие явления, называемого магнитосопротивлением, растет и электрическое сопротивление металла, причем при низких температурах эффект магнитосопротивления проявляется особенно сильно.



Академик П. Л. Капица в одной из своих статей представил результаты проверки идеи, предложенной в свое время известным французским ученым Перреном: охлаждать соленоиды жидким воздухом.

Выяснилось, что для охлаждения соленоида с магнитным полем 10 Тл, создаваемым в области диаметром 1 см, потребуется прокачивать через него 24 л/с жидкого воздуха. Для обеспечения работы соленоида пришлось бы построить завод по производству жидкого воздуха.

Может быть, в результате этих обстоятельств, а может быть, и по другим причинам, развитие низкотемпературных, но несверхпроводящих, или, как их иногда называют, криогенных магнитов сильно задержалось.

Первой попыткой использовать низкую температуру для снижения электрического сопротивления была постройка в 60-х годах прошлого века одного из самых больших в мире соленоидов на 10 Тл, выполненного из алюминия, охлаждаемого жидким неоном (температура кипения 27 К). Внутренний диаметр соленоида составил 30 см, длина 200 см, масса алюминиевых обмоток 5 т. Это один из самых больших соленоидов в мире. Он предназначался для термоядерных исследований и поэтому на концах имел «магнитные пробки», в которых напряженность магнитного поля достигала 20 Тл. Такой соленоид мог работать лишь в течение 1 мин; за это короткое время весь запасенный в криостатах жидкий неон превращался в газ.

Предпринято немало попыток создать большее магнитное поле, применив другие охлаждающие вещества (например, жидкий азот, жидкий водород) и другие материалы обмоток (например, натрий, запрессованный в тонкую стальную трубку). Результаты проведенных экспериментов были многообещающими, но превзойти достигнутое пока никто не смог.

Чаще всего такие магниты питаются от собственной энергетической установки, вырабатывающей постоянный ток мощностью несколько тысяч киловатт. Когда этой мощности недостаточно (как это получилось с рекордным соленоидом Кольма), на вал машин насаживают маховик. Накопив в нем достаточную энергию, можно, как это было сделано П. Л. Капицей, в течение короткого времени снимать с генераторов мощность, превышающую номинальную в несколько раз.

В настоящее время генераторы, предназначенные для кратковременного питания крупных электромагнитов, могут иметь массу роторов до нескольких сотен тонн.

В Королевском радарном центре Великобритании источником питания соленоидов служили мощные аккумуляторные батареи, снятые с подводной лодки.

В поисках новых путей Кольм разработал конструкцию соленоида, названного им гидромагнитом. Соленоид состоит из соосных труб, между которыми в радиальном направлении поступает какая-нибудь хорошо проводящая электричество жидкость, например жидкий натрий или жидкое серебро. Обе трубы помещены в небольшое магнитное поле. Поступающая жидкость пересекает силовые линии поля, и в ней наводится электродвижущая сила (ЭДС), под действием которой в жидкости начинает течь электрический ток, совпадающий по направлению с током, создающим поле возбуждения. Таким образом, сама жидкость становится обмоткой соленоида. Магнитное поле, которое можно получить с помощью этой «обмотки», зависит от скорости перемещения жидкости, ее электропроводности и значения поля возбуждения. Кольм рассчитал, что в гидромагните, наполненном расплавленным серебром, при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  в магнитном поле 6 Тл при расходуемой мощности 70 тыс. кВт и скорости поступления серебра 200 л/с можно получить магнитное поле 40 Тл.

Однако, если отвлечься от прочих трудностей, достижение столь грандиозных полей приводит к тому, что материалы обмотки под действием давления магнитного поля начинают течь. В соленоиде Кольма на 25 Тл давление, как уже говорилось, в 3 раза превышает давление на дне глубочайшей океанской впадины. А давление растёт пропорционально квадрату напряженности поля. При увеличении напряженности поля чуть больше чем в 3 раза давление возрастает в 10 раз.

При поле напряженностью 100 Тл магнитные усилия эквивалентны тем, которые развиваются в жерле пушки при выстреле. Держать такое поле — это все равно, что задержать взорвавшийся в казенной части пушки снаряд таким образом, чтобы и снаряд не вылетел, и пушка не разорвалась.

А обязательно ли рост напряженности поля связан с ростом давления? Электромагнитная сила может быть рассчитана как векторное произведение плотности тока в обмотке на индукцию магнитного поля (это та же самая лоренцева сила, которая отклоняет частицы в ускорителях). Разработана конфигурация обмоток и соленоидов, в которых почти полностью отсутствуют усилия. Такие обмотки и соленоиды называют бессиловыми. Недавно была построена крупная

бессиловая система для исследования термоядерных реакций, работающая на несколько ином принципе: в ней усилия с обмоток соленоидов переносятся на массивную стальную несущую конструкцию.

При изучении вопроса о возможности создания бессиловых обмоток ученые пришли к выводу, что эта проблема совсем не безнадежна.

Рассмотрим, например, обмотку, выполненную в виде длинной спирали с большим шагом. Такая обмотка создает два поля (поле, конечно, одно, но для удобства его часто раскладывают на осевую и радиальную составляющие, которые дают в сумме действительное поле): суммарное поле, направленное вдоль оси (осевое), и поле, окружающее каждую проволочку в отдельности (кольцевое). Осевое поле обмотки стремится разорвать ее; поле, окружающее обмотку, стремится ее сжать. Таким образом, усилия, направленные в разные стороны, взаимно уничтожаются.

Более приемлемой, возможно, окажется другая обмотка. Ее можно выполнить из нескольких слоев, причем обмотка во внутреннем слое почти параллельна оси, а во внешнем — почти перпендикулярна к ней. В такой обмотке переход от осевого поля к кольцевому осуществляется постепенно, и усилия сжатия распространяются равномерно на все слои. Эта система — прообраз мощных систем будущего, в которых магнитные поля колоссальной напряженности будут сочетаться с изяществом и ажурностью конструкции.

Логическим развитием тенденции охлаждения соленоидов стал уход в зону предельно низких температур. У Биттера охлаждение витков водой позволяло повысить пропускаемые по ним токи, ни о какой экономии энергии речи не было, ибо потери росли быстрее, чем ток. При низких температурах снижалось сопротивление проводников и вместе с ним выделение тепла током. Наконец, произошло невероятное событие — почти у абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) электропроводность некоторых металлов росла до бесконечности! «Глашатаем» этого события и его же «виновником» оказался Гейке Камерлинг-Оннес.

В жизни Камерлинг-Оннеса ничто, казалось, не предвещало мировой славы. Известный ученый, опубликовавший в специальной литературе многочисленные работы по радиоактивности, термодинамике и сжижению газа, обладающий скорее инженерным складом ума, чем аналитическим. Но в 1911 г. одним весенним утром он вошел в лабораторию обычным заведующим кафедрой, а вышел первооткрывателем сверхпроводимости. Один день принес ему бессмертие. Вот как это произошло.

До того было неясно, как должно изменяться электрическое сопротивление металлов при снижении их температуры.

Ученые придерживались трех различных точек зрения:

1. Из классической теории электромагнетизма известно, что сопротивление проводника падает с уменьшением температуры. Объяснить это явление можно довольно просто. Электрический ток — это поток свободных электронов, проходящих сквозь кристаллическую решетку металла. При высоких темпе-

ратурах вследствие теплового колебания атомов кристаллической решетки вероятность столкновения электронов с решеткой велика. Это препятствует движению электронов и создает сопротивление току. При низких температурах, когда амплитуда колебаний атомов в решетке уменьшается, вероятность столкновения электронов с решеткой становится меньше и ток встречает, таким образом, меньшее сопротивление. При абсолютном нуле, когда решетка уже неподвижна, сопротивление проводника равно нулю.

2. Сопротивление току сохранится и при абсолютном нуле, поскольку и тогда некоторые электроны будут сталкиваться с решеткой, тем более что кристаллические решетки, как правило, не являются идеальными — в них всегда есть дефекты и включения примесей.
3. Сопротивления металлов при приближении температуры к абсолютному нулю должны возрасть, так как в силу конденсации электронов на решетке (грубая аналогия — образование капелек воды на холодной ложке, поднесенной к горячему чаю) их число при охлаждении непрерывно снижается, вследствие чего электропроводность, определяемая числом свободных электронов, уменьшается (электропроводность — величина, обратная удельному сопротивлению).

Действительно, трудно представить себе еще какой-нибудь вариант. Но... Весной 1911 г. Камерлинг-Оннес заморозил ртуть в сосуде Дьюара, содержащем жидкий гелий. Затем он пропустил через ртуть ток и наблюдал за стрелками измерительных приборов, показывающих сопротивление, которое, как и следовало ожидать, постепенно снижалось по мере падения температуры. Такое соотношение между сопротивлением и температурой сохранялось до тех пор, пока температура не снизилась до 4,12 К. Внезапно электрическое сопротивление ртути исчезло совсем; не осталось даже сопротивления, обусловленного столкновениями электронов с дефектами и примесями решетки.

Камерлинг-Оннес повторил эксперимент. Он взял очень загрязненную ртуть, у которой остаточное сопротивление, вызываемое примесями, должно быть очень явно выражено. Однако вблизи той же температуры (4,12 К) сопротивление ртути почти также внезапно исчезло. Как увеличить сопротивление столбика ртути, довести его до того значения, которое было бы зарегистрировано приборами? Очевидно, нужно увеличить длину столбика и уменьшить его сечение. Камерлинг-Оннес изготовил столбик ртути толщиной менее человеческого волоса и длиной 20 см. Измерив теперь сопротивление, он поразился: стрелки приборов не сдвинулись с места. Нуль.

Камерлинг-Оннес готовил еще один эксперимент с еще большей точностью измерений. Из ртути ученый изготавливает кольцо и подвешивает его горизонтально на тонкой нити. Если в таком кольце навести ток, выключив, например, находящийся поблизости электро-



магнит, нить закрутится на некоторый угол. Этот угол можно измерить с большой точностью, укрепив на нити зеркальце и проследивая положение «зайчика». Если в кольце существует хоть какое-нибудь сопротивление, ток в кольце будет постепенно затухать. Это приведет к ослаблению закручивания нити, и «зайчик» переместится. Камерлинг-Оннес продлевает этот опыт. «Зайчик» не трогается с места.

Это могло означать только одно: равенство нулю электрического сопротивления кольца, т.е. сверхпроводимость ртути при температуре, близкой к абсолютному нулю.

Камерлинг-Оннес понимал всю ответственность, которая ляжет на него, когда он объявит, что сопротивление было равно нулю, и много раз повторял измерения, все время повышая их точность. Опять нуль! Открыта сверхпроводимость!

Понадобилось, однако, более полувека для того, чтобы сверхпроводимость перестала быть исключительно лабораторным курьезом. Наиболее известное и, видимо, ценное свойство сверхпроводников — отсутствие электрического сопротивления постоянному току. Результаты прямых измерений говорят о том, что оно меньше сопротивления металлов при нормальной температуре по крайней мере в  $10^{23}$  раз.

Иногда спрашивают: «Неужели сопротивление сверхпроводников равно нулю? Может быть, оно просто очень мало, и мы не замечаем его лишь потому, что не обладаем совершенной измерительной техникой?»

Разрешить этот вопрос попытался американский ученый Коллинс. В марте 1954 г. он возбудил ток в сверхпроводящем свинцовом кольце и наблюдал за значением этого тока. Если сопротивление, хотя бы ничтожное, есть, то ток все время будет уменьшаться, «затухать». Например, для уменьшения тока в серебряном кольце практически до нуля требуется всего лишь несколько десятых долей секунды. Как же затухал ток в кольце Коллинса? Измерения, произведенные в сентябре 1956 г., показали, что в кольце Коллинса ток абсолютно не изменился. Опыт бы, возможно, продолжался бы с тем же результатом и поныне, если бы не прекратилось снабжение лабораторий гелием — говорят, вследствие забастовки транспортных рабочих. Впоследствии этот же опыт проводился в течение 10 лет. Расчет показал, что ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи, уменьшится на значение, которое можно зафиксировать, за время, не меньшее 100 тыс. лет.

Однако при исследовании затухания магнитного кольца внутри ниобий-циркониевой трубки (особый класс сверхпроводников — так называемые сверхпроводники второго рода) было найдено, что поток все-таки затухает. Это затухание происходит по логарифмическому закону — за первую секунду поток снижается на 1%, за следующие 10 с — еще на 1% и т.д. Полное затухание потока в этой трубке, т.е. снижение его до значения, которое уже нельзя измерить современными приборами, займет  $10^{92}$  лет. Это время в миллиарды миллиардов раз превышает время существования нашей Галактики. К результатам таких экспериментов следует, однако, подходить с осторож-

ностью. Известно, что всякое кольцо, создающее магнитное поле, испытывает силы, стремящиеся увеличить кольцо в размерах, которые могут попросту разорвать его. Увеличение диаметра кольца хотя бы на одну миллионную часть сразу же выразится в снижении поля, которое можно приписать наличию в сверхпроводнике электрического сопротивления.

Если первое основное свойство сверхпроводников — отсутствие сопротивления — было открыто в 1911 г., то второе важнейшее свойство — лишь спустя 22 года. В 1933 г. немецкие физики Мейснер и Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводники — идеальные диамагнетики. Что это означает?

Мы постоянно находимся в магнитном поле Земли. Силовыми линиями этого поля пронизываются все предметы и существа на Земле. Если на пути силовых линий попадает какой-нибудь ферромагнетик, например, кусок железа, то в этом куске магнитные линии как бы сгущаются. Если же на пути силовой линии встретится диамагнетик, в нем, наоборот, создается разрежение, вакуум силовых линий. В сверхпроводник магнитные силовые линии вообще не проникают. Другими словами, сверхпроводник — абсолютный диамагнетик. Внутренняя область сверхпроводника идеально экранирована от внешних магнитных полей токами, протекающими в тонком поверхностном слое сверхпроводника. В этот слой проникает и магнитное поле, вследствие чего его глубину называют глубиной проникновения и обозначают буквой  $\lambda$ . Диамагнетизмом сверхпроводников можно воспользоваться, например, для того чтобы придать силовым линиям магнитного поля заданную конфигурацию. Поле будет обходить сверхпроводник, а силовые линии принимать очертания, повторяющие контур сверхпроводника.

Сверхпроводник существенно отличается от идеального проводника с сопротивлением, равным нулю. В идеальный проводник поле может проникать. Наоборот, никакими способами нельзя заставить магнитное поле проникнуть внутрь сверхпроводника!

Впрочем, один способ есть: при достижении магнитным полем в какой-либо точке сверхпроводника значения, превышающего некоторое критическое значение, сверхпроводник в этой точке выходит из сверхпроводящего состояния. Критические магнитные поля чистых металлов малы: они не превышают сотых долей тесла.

Ток, протекающий по сверхпроводнику, при превышении им критического значения или критической плотности также может вызывать потерю сверхпроводимости. Значение этого тока в чистых сверхпроводниках связано с критическим магнитным полем так называемым правилом Сильсби: сверхпроводимость уничтожается таким током в проводнике, который создает на поверхности сверхпроводника поле, равное критическому. Значение поля на поверхности проводника можно установить, пользуясь законом полного тока.

У каждого сверхпроводника есть также своя критическая температура, т.е. температура, выше которой он скачком теряет сверхпроводящие свойства. Эта температура весьма мала.

На критическую температуру влияют, хотя и слабо, механические напряжения в образце. Как правило (однако, не всегда), увеличение

механических напряжений в образце влечет за собой повышение критической температуры. Это можно установить лишь с помощью весьма чувствительных методов.

Аналогичная зависимость существует между механическим напряжением и критическим магнитным полем. Было показано, в частности, что критическое поле образца олова при 2 К, составляющее 0,021 Тл, повысилось до 1,5 Тл, после того как в олове были искусственно созданы механические напряжения.

Уменьшение размеров испытуемого образца примерно до 1 мкм существенно изменяет свойства сверхпроводника. Такой образец уже не будет диамагнитным, а его критическое поле и ток сильно возрастут.

Уменьшая толщину образца, можно увеличить его критическое поле в несколько сот раз. У сверхпроводящей свинцовой пленки толщиной 20 Å критическое поле равно 40 Тл. Плотность критического тока в тонких сверхпроводящих пленках также сильно возрастает.

В слоях толщиной около 100 Å плотность тока достигает 107—108 А/см<sup>2</sup>.

При увеличении частоты магнитного поля или тока сверхпроводник постепенно начинает приобретать сопротивление. Однако при частоте вплоть до 107 Гц оно еще практически равно нулю.

Чистые сверхпроводники (за исключением ниобия) относят к сверхпроводникам 1-го рода (группы). Большинство сверхпроводников, а их уже открыто более тысячи, относят к сверхпроводникам 2-го рода. Термин «сверхпроводники 2-го рода» введен в 1952 г. советским ученым А. А. Абрикосовым (сейчас работает в США), развившим теорию сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау. Термин оказался необходим для определения сверхпроводников с отрицательной поверхностной энергией, в отличие от сверхпроводников 1-го рода, у которых поверхностная энергия на границе сверхпроводящей и нормальной фаз положительна. Отрицательная поверхностная энергия может иметь место, если так называемый параметр Гинзбурга — Ландау больше  $1/\sqrt{2}$ .

В 1961 г., встретившись со студентами МГУ, прославленный академик Л. Д. Ландау рассказал о себе. Родился он в Баку. В школе учился посредственно, зато любил математику, в 12 лет научился дифференцировать, в 13 — интегрировать.

В Бакинском университете он учился одновременно на двух факультетах — физики и химии, но, когда в 1924 г. перевелся в Ленинград, отдал предпочтение физике. Заниматься наукой и печататься в специальных журналах начал еще студентом, после аспирантуры Ленинградского физтеха полтора года стажировался в Германии, Швейцарии, Дании, Англии, где его поразили скромность, доступность, приветливость таких признанных светил европейской науки, как В. Паули, В. Гейзенберг, М. Дирак, Н. Бор, А. Эйнштейн. Потом работал в Ленинграде, Харькове, Москве.

Л. Д. Ландау был поистине человеком необычным. Талантливый, работоспособный, мыслящий оригинально, он славился невероятным стремлением оспаривать все устоявшееся. Так, он считал, или, по

крайней мере, писал, что Татьяна Ларина «в целом была довольно занудной особой», что замысел «Героя нашего времени» мог бы разъяснить один лишь Лермонтов и т.п.

Будучи в 1930-х годах в заграничной командировке, он поразил одного своего приятеля и соавтора взглядами на брак. Тот впоследствии вспоминал: «Ландау нравилось делать заявления, шокирующие представителей буржуазного общества. Когда мы были вместе с ним в Копенгагене, я женился. Он одобрил мой выбор (и играл в теннис с моей женой). Однажды он спросил нас, как долго мы собираемся быть вместе. Когда я ответил, что, конечно же, весьма долгое время и что у нас нет никаких намерений расторгнуть брак, он ужасно разволновался и сказал, что только капиталистическое общество может заставить своих членов испортить саму по себе неплохую вещь, чрезмерно продляя ее таким способом».

В 1937 г., поссорившись с директором Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) А. Ф. Иоффе и руководством Харьковского университета, где он работал после ЛФТИ, Л. Д. Ландау появляется в Москве. П. Л. Капица приглашает его в Институт физических проблем, и Ландау немедленно соглашается.

Он сразу же начинает активнейшую деятельность в новых мало-разработанных и важных направлениях — в теории фазовых переходов, статистической теории атомных ядер, каскадной теории электронных ливней... Основное внимание его занимает загадка непонятного явления, открытого П. Л. Капицей, — сверхтекучести.

Ландау предположил, что жидкий гелий представляет собой некоторый конгломерат из двух жидкостей, находящихся в различных квантовых состояниях. Этим он и объяснял одновременные встречные движения жидкого гелия.

Вокруг талантливого физика довольно быстро сформировалось окружение, «школа Ландау». Попастъ туда было нелегко, «теорминимум» включал десять дисциплин, за 28 лет всего 43 человека сдали эти экзамены целиком. Рекорд (два с половиной месяца) остался за Померанчуком, обычно у соискателей на подготовку и сдачу экзаменов уходило до трех лет.

На теоретических семинарах можно было говорить о любой проблеме теоретической физики. Со времени стажировки в Копенгагене у Н. Бора Ландау вместе с тогдашними коллегами В. Вайскопфом и Р. Пайерлсом взяли за правило не придерживаться узких специализаций, чтобы всегда видеть физику целиком. Атмосфера обсуждений была предельно демократичной, можно было резко критиковать взгляды другого при условии, что критика шла на пользу обсуждаемому предмету. Неслучайно, что эта творческая атмосфера способствовала созданию знаменитого «Курса теоретической физики», выросшего впоследствии до десяти томов и выполняющего функции камертона советской науки.

Курс стал издаваться с 1938 г.; авторами выступили тогда Ландау и его друг Евгений Михайлович Лифшиц. Без Лифшица курс никогда бы не увидел света. Гений Ландау имел одну особенность — он писал с колоссальным трудом даже письма. Лифшиц говорил об этом: «Ему было нелегко написать даже статью с изложением собственной

(без соавторов!) научной работы, и все такие статьи в течение многих лет писались для него другими. Непреодолимое стремление к лаконичности и четкости выражений заставляло его так долго подбирать каждую фразу, что в результате труд написания чего угодно — будь то научная статья или личное письмо — становился мучительным».

Все книги Ландау написаны в соавторстве с Е. М. Лифшицем, А. С. Ахиезером, А. И. Китайгородским, Ю. Б. Румером, А. Я. Смородинским; это же относится и к большинству его статей. Если отвлечься от соавторства с Р. Пайерлсом, Э. Теллером и другими крупными зарубежными физиками, основной массив совместных работ Ландау падает на сотрудничество с его многочисленными учениками (А. А. Абрикосов, Е. М. Лифшиц, И. А. Померанчук, И. М. Халатников и др.).

Жизнь и творчество Ландау неотделимы от жизни и творчества его учеников. Ландау выработал, как говорит академик Капица, «крайне своеобразный процесс исследования, основная особенность которого заложена в том обстоятельстве, что трудно отделить собственную работу Ландау от работы его студентов. Трудно представить, как он мог бы успешно работать в столь различных областях физики без своих студентов».

В школе Ландау были глубоко восприняты и развиты традиции научного общения, бережно пестовавшиеся в лучших европейских физических школах (в кавендишской у Дж. Томсона и Э. Резерфорда, в копенгагенской у Н. Бора). Достаточно сказать, что научное общение Ландау было настолько интенсивным, что он мог бы не читать физических книг и журналов, черпая информацию у студентов и коллег на своих бурных семинарах.

Касаясь взаимоотношений со своими соавторами и учениками, Ландау как-то сказал со свойственной ему образностью: «Некоторые говорят, что я граблю своих учеников. Некоторые — что ученики грабят меня. Правильнее было бы сказать, что у нас происходит взаимный грабеж».

Преданность и любовь физиков к Ландау особенно ярко проявились в 1962 г., когда Ландау тяжело пострадал в автомобильной катастрофе. Шесть лет ученики, друзья, коллеги ежедневно боролись за жизнь ученого, но вернуть его в строй не удалось. Посол Швеции вручил Ландау Нобелевскую премию в больничной палате. Автору посчастливилось беседовать с Ландау в 1963 г. Это было в саду Института физических проблем — так называемого «капичника». Тогда Ландау многие часы сидел на садовой скамье, недалеко от своей квартиры, он охотно разговаривал, отвечал на вопросы, но было видно, что его мозг уже занят более важными, чем физика, материями.

Ландау, по его собственным словам, прожил свою жизнь счастливо, все ему удавалось, он сделал все, на что был способен.

Он трезво и скромно оценивал свои успехи в науке. Известна его логарифмическая шкала ценностей — научных заслуг отдельных ученых, состоящая из пяти классов, причем представители каждого последующего класса сделали, по мнению Ландау, в десять раз меньше предыдущего.

К первому классу он причислял Ньютона, Френкеля, Клаузиуса, Максвелла, Больцмана, Гиббса, Лоренца и Планка, Бора, Гейзенберга, Шредингера, Дирака и Ферми. Эйнштейн принадлежал к «половинному классу». Себя Ландау относил к «двухполовинному классу», но однажды после какой-то особо удачной работы он перевел себя во второй класс.

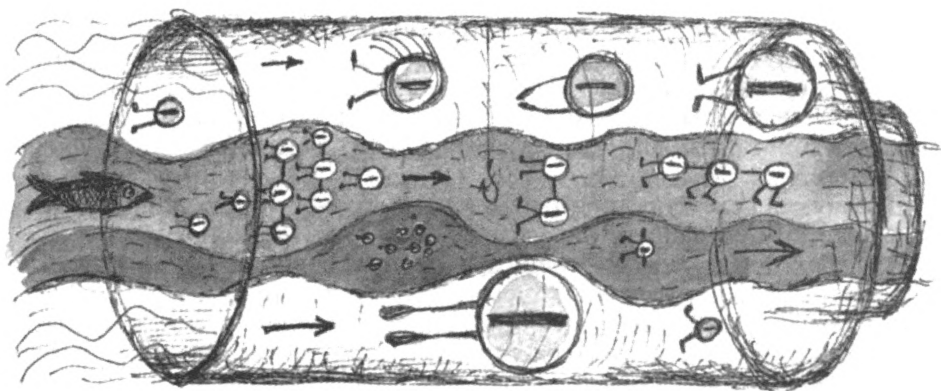
В 1950 г. Ландау и считающий себя его учеником В. Л. Гинзбург (ныне академик) опубликовали обобщенную феноменологическую теорию сверхпроводимости, являющуюся по существу следствием идеи об одновременном существовании в материале двух электронных жидкостей.

Ландау первым сопоставил два «странных» явления — сверхпроводимость и сверхтекучесть и открытое П. Л. Капицей течение жидкого гелия II без трения через узкие капилляры, и предположил, что они родственны. Сверхпроводимость — это сверхтекучесть весьма своеобразной жидкости — электронной. Эта идея Ландау оказалась в высшей степени плодотворной, на ее основе построено большинство теорий сверхпроводимости.

Ярким достижением в разработке теории сверхпроводимости являются работы ученика Л. Д. Ландау члена-корреспондента АН СССР А. А. Абрикосова. Он, детально рассмотрев один из «малоинтересных» частных случаев уравнения Гинзбурга — Ландау, теоретически подтвердил давнюю догадку Шубникова о преимуществах сверхпроводящих сплавов перед сверхпроводящими металлами. За разработку этой теории ее авторы были удостоены Ленинской премии, а «феноменологическая» теория получила мировое признание. Когда основные положения ее были доложены Абрикосовым на Международной конференции по низким температурам в Москве, в зале долго не смолкали аплодисменты.

Итак, теория разработана, она утверждает, что в металлургических лабораториях со дня на день должны появиться сплавы с предсказанными физиками чудесными свойствами...

И вот в 1961 г. американский физик Дж. Кунцлер, исследуя сплав ниобия с оловом, обнаруживает совершенно фантастические сверхпроводящие свойства этого соединения. Оказалось, что даже самое сильное магнитное поле 8,8 Тл, имевшееся тогда в Соединенных



Штатах, не в силах разрушить сверхпроводимость сплава. (В 1961 г. в США крупнейший исследовательский электромагнит давал поле 8,8 Тл; именно в его поле и проводились испытания нового сверхпроводника. Поле магнита, как видно из статьи Кунцлера, оказалось недостаточным, чтобы «выключить» сверхпроводимость.) Вскоре в Институте физических проблем под руководством члена-корреспондента АН СССР Н. Е. Алексеевского было обнаружено несколько других сверхпроводящих соединений и сплавов, обладающих удивительными свойствами...

Путь к сверхпроводящим магнитам, сверхпроводящим техническим устройствам был открыт...

Уже через несколько лет были созданы магниты, о которых Камерлинг-Оннес мог только мечтать: сверхпроводящие, легкие, дешевые, небольшие по габаритам.

Сверхпроводники, имеющие параметры Гинзбурга — Ландау более  $1/\sqrt{2}$ , — это в основном различные сверхпроводящие сплавы. Из теории ГЛАГ (В. Л. Гинзбург — Л. Д. Ландау — А. А. Абрикосов — Л. П. Горьков) следует, что критические поля и температуры сверхпроводников 2-го рода должны быть очень высокими. Открытие Кунцлером сверхпроводимости у  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  блестяще подтвердило этот вывод. Как выяснилось позже, критические поля многих сплавов (таких, например, как  $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ,  $\text{V}_3\text{Ga}$  и др.) превышают 20—25 Тл. Эти сверхпроводники обладают по сравнению со сверхпроводниками 1-го рода более высокими критическими полями и температурами. Возможно, что в скором времени будут открыты сверхпроводники с еще лучшими сверхпроводящими свойствами. Так, пределом критической температуры этих материалов считают 40 К (достигнуты температуры, превышающие 20 К). Это ограничение относится к известному типу сверхпроводимости, при котором образовании электронной пары, способной двигаться через решетку без трения, обуславливается полем колебаний решетки. В этом поле один электрон испускает квант колебания, а другой поглощает его, вследствие чего потеря энергии не происходит и электрическое сопротивление отсутствует.

Как показал американский ученый Купер, электроны в сверхпроводящем состоянии образуют пары. Образование этих пар становится возможным, когда взаимодействие электронов проводимости, имеющих антипараллельные спины (грубо говоря, вращающиеся в разные стороны), с решеткой приводит к возникновению между ними сил притяжения, преодолевающих силы электрического отталкивания.

На основании предположения Купера были разработаны наиболее популярная «микроскопическая» модель сверхпроводимости БКШ, названная по фамилиям авторов Дж. Бардина, Л. Купера, Дж. Шриффера, а также теория сверхпроводимости Н. Н. Боголюбова.

На разрыв куперовских пар требуется затратить некоторую энергию. В результате этого энергия сверхпроводящих электронов на некоторое значение меньше энергии нормальных электронов. Эту разницу называют энергетической щелью. Это так называемый фотонный механизм образования куперовских пар. Расчеты показывают,

что такой механизм может обеспечить сверхпроводимость при температурах, ни в коем случае не превышающих 50 К. Конечно, даже эта температура не очень удобна для работы, но и ее достичь пока не удалось. Рекорд перехода в сверхпроводящее состояние у сплава ниобия с германием (24 К) продержался почти 10 лет.

А не может ли существовать иных механизмов, приводящих к образованию электронных пар? В 1964 г. американец В. Литтл предположил существование механизма, при котором электроны могли бы взаимодействовать, индуцируя электрический заряд на длинных органических молекулах. В то же время академик В. А. Гинзбург теоретически открыл еще один так называемый экситонный механизм образования куперовских пар. Эти теории, так же как и другие появившиеся в тот период, предсказывали, что сверхпроводимость может существовать даже при комнатных температурах, т.е. при 300 К.

Физики-экспериментаторы не покидали лабораторий, лихорадочно исследуя «подозрительные» материалы — органические полимеры и слоистые структуры «металл — проводник». Им сопутствовала удача — были открыты новые сверхпроводники, но... температура их перехода оказалась небольшой. Гораздо ниже уже достигнутых 24 К.

Полна драматизма история научных открытий! Увлечись органическими полимерами и слоистыми структурами, ученые-экспериментаторы оказались недостаточно внимательными к другим веществам, в частности, к керамикам. В 1979 г. исследователи Института общей и неорганической химии АН СССР имени Н. С. Курнакова И. С. Шаплыгин, Б. Г. Кохан и В. Б. Лазарев получили новые лантан-стронциевую и лантан-бариевую керамики. Керамика оказалась примечательной — она проводила ток, как обычный металл. Электросопротивление керамики, как и полагалось, снижалось с понижением температуры. Исследователи довели испытание до температуры жидкого азота (77 К) и остановились... Они никак не ожидали того, что эта керамика, если понизить ее температуру еще немного — до 40 градусов... превратилась бы в удивительный высокотемпературный сверхпроводник, который так давно искали! Но не там...

И вот в апреле 1986 г. ученые Цюрихского филиала фирмы IBM в Швейцарии Дж. Беднорц и А. Мюллер, исследуя по существу ту же керамику, что и наши химики, но при более низких температурах, обнаружили в ней сверхпроводимость при 30 К! Так был побит рекорд, продержавшийся почти 10 лет! Интересно, что этому не сразу поверили, и, например, журнал «Физикл Ревью Леттерс» отказал авторам в публикации, даже несмотря на то, что статья была очень осторожно названа «Возможность высокотемпературной сверхпроводимости в системе La-Ba-Cu-O». Статью согласился взять немецкий физический журнал.

Однако и эта важнейшая статья не была замечена — в январском 1987 г. номере журнала «Физикс тудей», где зарегистрированы все крупнейшие достижения физики 1986 г., об этом открытии не сказано ни слова! Лишь одна японская группа на всякий случай перепроверила результат и убедилась в том, что высокотемпературная



сверхпроводимость стала реальностью! Уже через год после опубликования статьи Беднорц и Мюллер стали нобелевскими лауреатами. Интересно, что их экспериментальное открытие не потребовало ни какого-либо специального и дорогостоящего оборудования, обычно ассоциирующегося с современными исследованиями, ни необычных и дорогих материалов, ни экзотической технологии. Его можно было сделать в любой мало-мальски оснащенной лаборатории. Еще более интересно то, что авторы проводили свои эксперименты как средневековые алхимики, грубо говоря, вслепую, «методом тыка», не имея в головах какой-либо теории или идеи, которую они хотели бы подтвердить или опровергнуть. Они вслепую пробовали различные сочетания материалов, пока не наткнулись на нужный.

В таких экспериментах трудно искать логику. Здесь громадную роль играют опыт, интуиция. Наконец, удача. Академик А. С. Боровик-Романов рассказывал: «...Долгое время не удавалось напылить франций на германий. Тогда нидерландский физик Хендрик Казимир предложил в качестве промежуточного слоя использовать рений. Логика его предложения состояла в том, что... между Францией и Германией в качестве «скрепляющего» природного элемента протекает река Рейн. Результат превзошел все ожидания!!!» (цитирую по статье А. Буздина и А. Варламова).

Настоящий бум начался в начале 1987 г. Из лабораторий США, КНР, СССР с лихорадочной скоростью стали поступать новые и новые сверхсенсационные сообщения. Температура сверхпроводящего перехода росла буквально на глазах!

1987 г. — Чу с сотрудниками, используя идею «химического сжатия» для модифицирования структуры, синтезировали керамику из оксидов бария, иттрия и меди с критической температурой 93 К.

11 марта 1987 г. на общемосковском семинаре физиков, проводящемся в ФИАНе под руководством В. Л. Гинзбурга, заведующий лабораторией сверхпроводимости Физического института АН СССР имени П. Н. Лебедева А. И. Головашкин сообщил, что ему и его сотрудникам на одном из образцов керамики удалось получить температуру сверхпроводящего перехода 102 К. Перейден рубеж, еще полгода назад казавшийся немыслимым! Впервые обнаружен нефотонный механизм образования куперовских пар, предсказанный четверть века назад.

1988 год — Маеда с сотрудниками, синтезируя серию оксидов соединений висмута, стронция, кальция, меди, получили для одного из них критическую температуру 108 К, а уже через месяц Шенг и Херман получили соединение оксидов титана, бария, кальция, меди с критической температурой 125 К.

1993 г. — сотрудники химфака МГУ Е. В. Антипов и С. Н. Путилин открыли соединения оксидов ртути, бария, кальция, меди со значением критической температуры 135 К, причем при внешнем давлении 350 тыс. атмосфер температура сверхпроводящего перехода возрастает до 164 К. Что всего лишь на несколько градусов ниже самой низкой «естественной» температуры, зарегистрированной на Земле!

А ученые штурмуют «комнатные температуры» — около  $0^{\circ}\text{C}$ . Может быть, когда эта книга выйдет в свет, «комнатные» сверхпроводники станут реальностью!

Если же механизм сверхпроводимости совсем иной, то возможно получение более высоких критических температур. Так, в печати обсуждалась возможность сверхпроводимости в линейных полимерах вплоть до критической температуры 1000 К.

Свойства сверхпроводников 1-го и 2-го рода значительно различаются: например, переход в сверхпроводящее состояние у сверхпроводников 2-го рода происходит очень плавно, в широком диапазоне значений магнитного поля.

Поскольку сверхпроводники 2-рода проницаемы для магнитных полей и обладают при наличии неоднородности состава гистерезисом, питание их переменным током или помещение их в переменное магнитное поле вызывает потери энергии. Показано, что эти потери при частоте 50 Гц для ниобий-циркониевого (25% циркония) сплава составляют 0,3 кВт, если по сверхпроводнику длиной 1 м проходит ток 10 кА. Эти потери можно значительно снизить, если уменьшить размеры сверхпроводника, например, разделив его на тонкие нити или впрессовав в пористый материал.

Такие «синтетические» сверхпроводники обладают по крайней мере двумя преимуществами: во-первых, при уменьшении размеров сверхпроводника улучшаются его сверхпроводящие свойства; во-вторых, снижаются потери на вихревые токи в несверхпроводящих областях синтетического сверхпроводника.

Если вспомнить Камерлинг-Оннеса, то, будучи скорее инженером, чем чистым физиком, он уже в 1913 г. решил построить сверхпроводящий электромагнит на 10 Тл, не потребляющий энергии. Поскольку, рассуждал Камерлинг-Оннес, сопротивление сверхпроводника равно нулю, ток в сверхпроводящем кольце будет циркулировать вечно, не затухая. Всякий ток, как известно, создает магнитное поле. Так почему бы не сделать из сверхпроводящей проволоки мощный электромагнит, не нуждающийся в питании энергией? Это было бы революцией в электротехнике, и человечество сэкономило бы миллионы киловатт электроэнергии, растрачиваемой понапрасну не только в обмотках магнитов, но и в обмотках электрических машин и трансформаторов. Наконец, можно было бы передавать электроэнергию по сверхпроводящим линиям передачи без потерь.

К сожалению, мечте Камерлинг-Оннеса о сверхпроводящем соленоиде на 10 Тл не суждено было сбыться по крайней мере при его жизни. Как только Камерлинг-Оннес пробовал пропускать по сверхпроводнику значительный ток, сверхпроводимость исчезала. Вскоре оказалось, что и слабое магнитное поле (индукция самое большее в несколько сотых долей тесла) также уничтожает сверхпроводимость. Поскольку такие слабые поля можно было гораздо проще получить с помощью постоянных магнитов, реализацией идеи создания сверхпроводящих магнитов никто тогда серьезно не занялся. Это довольно грустное открытие сделало с того времени разговоры о сверхпроводящих магнитах беспредметными.

Надежды на постройку мощных сверхпроводящих магнитов возродились почти через двадцать лет, в начале 1930-х годов, когда голландские физики Де Гааз и Вуугд, преемники Камерлинг-Оннеса по Лейденской лаборатории (Камерлинг-Оннес умер в 1926 г., так и не дожив до начала практического использования своего открытия), установили, что сплав свинца с висмутом остается сверхпроводящим в магнитных полях, превышающих 1,5 Тл. Это открытие давало возможность строить сверхпроводящие магниты по крайней мере с таким полем. Однако эти магниты так никто и не построил. Известный физик Кеезом, бывший в то время директором Лейденской лаборатории, объявил, что максимальные токи, которые при наличии магнитного поля выключают сверхпроводимость в сплаве свинца с висмутом, ничтожно малы. Приговор был вынесен.

В истории сверхпроводящих магнитов произошло, быть может, самое драматическое событие. Впоследствии оказалось, что Кеезом сделал то, чего не имел права делать: он экстраполировал данные, полученные им в слабых полях, на область сильных полей. К несчастью, Кеезом был слишком авторитетен. Едва узнав о его результатах, физики оставили надежду построить сверхпроводящий магнит и занялись другими проблемами. Между тем в настоящее время известно, что критический ток для сплава свинец-висмут в полях до 2 Тл достаточно высок для того, чтобы создать довольно мощные сверхпроводящие магниты. Авторитет Кеезома стоил физике очень дорого: постройка сверхпроводящих магнитов была отложена почти на 30 лет.

Лишь после того, как в 1961 г. Кунцлер и его сотрудники объявили, что кусочек проволоки из сплава ниобия с оловом ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ) оставался сверхпроводящим в поле 8,8 Тл даже в том случае, когда одновременно по этой проволоке пропускали ток плотностью  $1000 \text{ А/мм}^2$ , началась новая эра в истории сверхпроводимости.

Свойства вновь открытых сверхпроводников делали реальными планы их использования в технике. Сверхпроводимость начала как бы вторую жизнь, но теперь уже не в качестве любопытного лабораторного феномена, а как явление, открывающее перед инженерной практикой весьма серьезные перспективы. Но и здесь оказались свои трудности.

Если все сложилось так удачно, то спрашивается, почему традиционные мамонтоподобные магниты еще не вышли из употребления? Почему до сих пор сверхпроводящие магниты не завоевали принадлежащего им по праву места?

Пожалуй, в первую очередь, это объясняется тем, что сверхпроводники с хорошими свойствами оказались очень капризными. Обращение с ними потребовало от ученых поиска новых технологических решений, новых представлений о природе сверхпроводимости. Сейчас уже созданы сверхпроводящие электротехнические материалы, которые можно успешно использовать в электромагнитах. Среди них есть, например, такие сплавы, как ниобий-цирконий-титан и ниобий-титан. Они хорошо поддаются обработке, и из них сравнительно легко получить проволоку. Злые языки, правда, подшучивают, что эта проволока дороговата, так как ее пока что изготавливают сами ученые. Но производство сверхпроводящей проволоки уже налажено на заводах, и стоимость ее неуклонно снижается.

Однако наиболее перспективные сверхпроводящие материалы (сплавы ниобий-олово и ванадий-галлий) чрезвычайно хрупки (например, сплав ванадий-галлий легко растирается в порошок пальцами). Поэтому такие соединения приходится упаковывать в гибкие трубки или наносить на гибкую подложку. Даже такая сложная технология изготовления себя оправдывает. Вот лишь один факт. В сверхпроводящих соленоидах, навитых из стальной ленты с нанесенным на нее слоем из сплава ниобий-олово, достигнуты магнитные поля до 17 Тл. И это при массе магнита в несколько десятков килограммов вместо нескольких десятков тонн и практически при нулевом потреблении электроэнергии вместо нескольких тысяч киловатт, которые потребовались бы для работы несверхпроводящего магнита с теми же параметрами!

Сверхпроводящие соленоиды могут работать почти не потребляя энергии, поскольку однажды возбужденный в них ток практически не затухает.

Количество энергии, расходуемой в оживителе гелия и необходимой для поддержания магнитов при низкой температуре, не идет ни в какое сравнение с теми громадными количествами ее, которые тратятся в несверхпроводящих магнитах.

Конечно, постройка сверхпроводящих магнитов — далеко не простое дело. Одна из серьезных и неожиданных трудностей, с которой пришлось столкнуться конструкторам сверхпроводящих магнитов, — так называемая проблема деградации сверхпроводящей проволоки в соленоидах. Чтобы понять сущность деградации, вспомним, как, например, определяют нагрузку, которую может выдержать балка. Для этого, конечно, не обязательно ее подвергать испытаниям. Надо лишь знать материал, из которого сделана балка, и характер ее нагружения в работе. А так как прочность материала известна (она измерена в результате испытаний небольших образцов), то все сводится к несложным расчетам. Грубо говоря, во сколько раз сечение балки больше сечения образца, во столько раз большую нагрузку эта балка сможет выдержать. Словом, какой бы длинной или толстой ни была балка, ее свойства можно более или менее достоверно заранее рассчитать, зная свойства маленького образца из того же материала.

А вот для сверхпроводящих сплавов этих простых зависимостей не существует. Если сечение одной проволоки в 10 раз больше сечения другой, сделанной из такого же материала, то это вовсе не значит, что по первой можно пропускать ток в 10 раз больший. Кроме того, характеристики сверхпроводника, измеренные на кусочке проволоки, не совпадают с характеристиками навитых на катушки длинных кусков проволоки. Катушки, рассчитанные на одно поле, дают в действительности другое, значительно более низкое.

Это явление объясняют тем, что магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде так называемых квантов потока. Так как проникновение потока носит скачкообразный характер и всякое изменение поля во времени вызывает появление ЭДС, в некоторых участках проволоки образуются вихревые токи, разогревающие проволоку и преждевременно переводящие ее в нормальное, несверхпроводящее

состояние. Поэтому приходится увеличивать объем и массу катушки по сравнению с теми, которые она имела бы, если бы характеристики короткого и длинного кусков проволоки совпадали. Это очень невыгодно по экономическим соображениям: сверхпроводящая проволока пока еще дорога (тысячи долларов за 1 кг).

В настоящее время проблему деградации интенсивно исследуют. Иногда с ней удастся справиться. Уменьшению деградации способствует, например, покрытие сверхпроводящей проволоки медью. Выяснилось, что при увеличении толщины слоя меди свойства сверхпроводящих соленоидов значительно улучшаются. Поэтому некоторые исследователи пришли к выводу, что наилучшим материалом для сверхпроводящих магнитов является... медь, в которую впрессован сверхпроводник! В таких системах эффект деградации полностью отсутствует.

Для получения низких температур пользуются гелием, превращающимся в жидкость при 4,2 К. Даже самые незначительные количества тепла, проникшего в сосуд, где содержится жидкий гелий, способны вызвать его быстрое испарение, поэтому жидкий гелий надо хранить в специальных сосудах, имеющих исключительно хорошую теплоизоляцию.

Решать эту проблему конструкторам сверхпроводящих магнитов фактически не пришлось. Они воспользовались плодами разработок, проведенных теми, кто занимался вопросами освоения космоса. Успехи ученых и инженеров СССР и США, работавших над задачей хранения ракетного топлива в сосудах-криостатах, привели к созданию надежной конструкции и эффективного способа изоляции таких сосудов. В них можно хранить жидкий гелий в течение нескольких месяцев.

Наиболее прогрессивным до сего времени методом охлаждения газообразного гелия является метод получения его в жидком виде с помощью созданного академиком П. Л. Капицей в 1934 г. поршневого детандера. Сущность этого метода заключается в том, что газообразный гелий расширяется в специальном сосуде — детандере, толкая при этом поршень, т.е. совершает некоторую работу, отдавая энергию. При этом гелий охлаждается. Многократно повторяя цикл, можно в принципе добиться того, что гелий охладится до 4,2 К и превратится в жидкость. Чаше всего, однако, охлаждение гелия в поршневом детандере сочетается с другими способами охлаждения, например дросселированием.

При дросселировании предварительно сжатый и охлажденный гелий пропускается через узкую щель — дроссель, где он расширяется. Физическая сущность охлаждения при дросселировании (эффект Джоуля — Томсона) состоит в том, что при увеличении объема газа, происходящем при расширении в дросселе, межмолекулярные расстояния в газе растут, при этом совершается некоторая работа против сил притяжения. Газ теряет свою внутреннюю энергию и, следовательно, охлаждается.

Один из «классических» детандерных ожижителей гелия создан в Институте физических проблем АН СССР. Опишем принцип его работы.

Поршневой компрессор сжимает гелий, поступающий из газгольдеров, и подает его в ожижитель. Туда поступает около 350 м<sup>3</sup>/ч газообразного гелия, сжатого до 22—23 атм. Сначала гелий охлаждают в ванне с жидким азотом (70 К). Затем часть охлажденного гелия поступает в поршневой детандер, где гелий расширяется, заставляя двигаться поршень, причем температура гелия в это время падает до 11—12 К. Холодный гелий используется теперь для охлаждения новых порций гелия. Другая часть газообразного охлажденного гелия поступает в так называемую дроссельную ступень, где газ заставляют пройти через дроссель. При этом уже основательно охлажденный газ еще больше охлаждается, частично превращаясь в жидкость (сжижается примерно около 10% первоначально имевшегося количества гелия).

Производительность аппарата — 45 л/ч, расход электроэнергии — 2,5 кВт · ч/л жидкого гелия. Такая производительность, однако, не предел. В конце двадцатого столетия в нашей стране и в США были созданы гелиевые ожижительные установки производительностью 200 л/ч и более. Мала или велика эта производительность?

Теплота испарения жидкого гелия настолько низка, что электролампочка мощностью 4 Вт, работающая в жидком гелии, испарила бы более 50 л жидкого гелия за 1 ч!

Тем не менее полное отсутствие сопротивления у сверхпроводящих обмоток и, следовательно, отсутствие выделения тепла позволяют обходиться такими количествами жидкого гелия даже для самых крупных обмоток. Важно лишь обеспечить очень хорошую теплоизоляцию области, где находится сверхпроводящая обмотка, с тем чтобы тепло не поступало в эту область извне.

Самая лучшая теплоизоляция — это высокий вакуум (остаточное давление 10<sup>-5</sup>—10<sup>-6</sup> мм рт.ст.). Теплопроводность остаточного газа в этом случае ничтожно мала для того, чтобы обеспечить хоть сколько-нибудь заметную теплопередачу. При вакуумной изоляции решающее значение приобретает теплопередача лучеиспусканием. Чтобы ликвидировать или по крайней мере существенно снизить передачу тепла от области с высокой температурой к низкотемпературной, на пути излучения в вакууме необходимо поставить отражающие экраны, охлаждаемые каким-либо хладагентом. Охлаждение экрана необходимо потому, что теплопередача излучением пропорциональна разности четвертых степеней температур поверхностей. Снижая эту разность, можно добиться еще большего эффекта теплоизоляции. Достаточно сказать, что установка экрана, охлаждаемого жидким азотом, снижает приток тепла в низкотемпературную область в 200 раз!

Хранят жидкий гелий в специальных сосудах Дьюара. Обычно они имеют сферическую форму, поскольку сфера при данном объеме имеет самую маленькую поверхность, а каждый лишний сантиметр поверхности — это и лишний приток тепла внутрь сосуда! Наиболее часто употребляемый сосуд (модель СД-10Г) может вместить около 10 л жидкого гелия. Гелий содержится в сферическом резервуаре, который расположен внутри ванны с азотом, помещенной, в свою очередь, внутри сферического корпуса, имеющего комнатную температуру. В пространстве между внешним корпусом и сосудами с азотом и

гелием создается глубокий вакуум. В таком сосуде в сутки теряется не более 2% гелия.

Существуют стандартные сосуды большей емкости, например, на 50, 80, 100 л. Развитие сверхпроводниковой техники приведет к созданию значительно больших емкостей. Уже сейчас для централизованного снабжения гелием используют гелиевые цистерны вместимостью 10—30 тыс. л. В этих гигантских устройствах применяются уже несколько иные принципы теплоизоляции. Здесь использована так называемая многослойная вакуумэкранная изоляция. Она представляет собой вакуумный промежуток, заполненный большим числом слоев алюминиевой фольги, проложенных теплоизоляционными материалами, например, стеклотканью или стеклобумагой. Количество этих экранов может быть очень большим (более 100).

Можно считать в принципе решенной и проблему перекачки жидкого гелия по трубам, особенно остро стоящую перед теми, кто занимается созданием сверхпроводниковых линий электропередачи. Принцип, на котором создаются эти трубы, практически тот же, что и используемый при создании сосудов Дьюара. Это внутренняя труба с жидким гелием, окруженная концентрическим экраном, находящимся при температуре жидкого азота и помещенным, в свою очередь, во внешний кожух, имеющий обычную температуру. На внутренней поверхности гелиевой трубы нанесена пленка сверхпроводника, она и является токопроводом такой линии электропередачи.

Первые эксперименты в области создания крупных криогенных систем приносят обнадеживающие результаты. Можно быть уверенным в том, что уже в скором времени мы станем свидетелями новых поразительных успехов в этой области.

Успешно решена и задача создания сверхпроводящего магнита, магнитное поле которого существует при комнатной температуре. Одним из замечательных достижений на этом пути можно считать разработку и постройку сотрудниками Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры имени Д. В. Ефремова, Института атомной энергии имени И. В. Курчатова и Физического института АН СССР имени П. Н. Лебедева «гибридного» магнита, в котором сверхпроводящий соленоид с полем при комнатной температуре добавляет свое поле к полю биттеровского медного водоохлаждаемого соленоида на 15 Тл — суммарное поле составляет 25 Тл.

На Международном симпозиуме по сильным магнитным полям в Осаке, проводившемся в 1982 г., группа американских исследователей (Л. Рубин с сотрудниками) сообщила, что им удалось построить гибридный электромагнит на 30 Тл.

Победа над деградацией и решение технической задачи охлаждения сверхпроводников до сверхнизких температур позволили ученым создать уникальные сверхпроводящие магнитные системы для исследования плазмы, магнитогидродинамических (МГД) установок, пузырьковых камер. В качестве примера упомянем построенный в США сверхпроводящий магнит, который может создавать магнитное поле 4 Тл в цилиндрическом объеме диаметром 20 см и длиной около 1,5 м. В сверхпроводящем магните для пузырьковой камеры достигнуто поле 7 Тл в объеме диаметром 18 см. Созданы сверхпроводя-

щие магнитные системы с магнитным полем около 2 Тл и рабочим объемом диаметром до 5 м.

При покорении холодного мира сверхпроводников ученым пришлось заново решать множество проблем, считавшихся решенными. Например, какой источник тока годится, чтобы питать сверхпроводящее устройство? Если речь идет о сравнительно небольших токах, то в принципе годятся привычные батареи, генераторы или аккумуляторы. Однако ток, который можно пропустить по сверхпроводнику сечением 1 мм<sup>2</sup>, составляет 1000 А, что более чем в 100 раз больше тока, пропускаемого через медный проводник такого же сечения. Это колоссальное преимущество сверхпроводников обернулось для инженеров новой трудностью. Ведь этот ток нужно получить от генератора, работающего при комнатной температуре, а уж потом по проводам передать в криостат с жидким гелием, где помещается сверхпроводящий магнит. Сечение проводов, по которым передается ток (а они несверхпроводящие), должно быть по крайней мере в 100 раз больше сечения сверхпроводника. По такому большому сечению, как через широко раскрытые ворота, тепло из комнаты (в полном соответствии с законом Фурье) лавиной устремится в криостат, гелий мгновенно выкипит, а сверхпроводимость исчезнет.

Вот почему перед конструкторами встала задача создать такие устройства, которые генерировали бы большие токи не вне криостата, а внутри него. Это удалось сделать, используя особые свойства сверхпроводников, например их диамагнетизм. Именно диамагнетизмом объясняется показываемый иногда в физических лабораториях опыт с «парящим магнитом». Описания парящего магнита не сходят со страниц книг, посвященных физике низких температур. Впрочем, не только этих...

«...Я немного прошелся между скалами, небо было совершенно ясно, и солнце жгло так сильно, что я принужден был отвернуться от него. Вдруг стало темно, но совсем не так, как от облака, когда оно закрывает Солнце. Я оглянулся назад и увидел в воздухе большое непрозрачное тело, заслонявшее солнце и двигавшееся по направлению к острову... По мере приближения ко мне этого тела оно стало мне казаться твердым; основание же его было плоско, гладко и сверкало ярко, отражая освещенную солнцем поверхность моря...»

То, что увидел Лемюэль Гулливер, «сначала хирург, а потом капитан нескольких кораблей», было летающим островом. В его толще на алмазных опорах был установлен магнит, который, отталкиваясь от некоей субстанции, находящейся в толще Земли, создавал подъемную силу!

Вряд ли Свифт предполагал, что через двести лет московский физик В. К. Аркадьев воплотит эту «безумную» идею почти в том же виде, хотя и в несколько ином масштабе. В его опыте небольшой магнит висел без какой-либо поддержки над свинцовой пластинкой. Эксперимент этот, называемый тогда «гроб Магомета» (по преданию, гроб с телом пророка висел в пространстве без всяких опор), был проведен при температуре, весьма близкой к абсолютному нулю, когда свинец становится сверхпроводником. Модификацию опыта Аркадьева реализовал по предложению В. И. Ожогина



в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова молодой ученый А. В. Инюшкин. «Теплый» магнит висит над сверхпроводящим кругом из свинца, спрятанным в сосуд Дьюара из нержавеющей стали. Для нас в этих опытах особенно важно то, что он демонстрирует идеальный диамагнетизм некоторых сверхпроводников. В диамагнитное тело не могут проникнуть силовые линии магнитного поля: диамагнетик является для силовых линий магнитного поля непреодолимой преградой, стеной, непроницаемой плоскостью.

Диамагнетизм сверхпроводников — это поверхностный эффект, распространяющийся на глубину порядка 0,001 мм. Поверхность сверхпроводника превращается в своеобразное «магнитное зеркало», отражающее силовые линии внешнего магнитного поля. Можно считать, что и оригинал — падающий магнит, и отражение его в «магнитном зеркале» обладают абсолютно идентичными магнитными полями. Под тем местом, где у оригинала находится северный полюс, возникает отражение северного полюса. Эти полюсы отталкиваются до тех пор, пока не устанавливается равновесие; сила отталкивания магнита и его «двойника» становится равной массе магнита.

Принцип магнитного зеркала может найти многочисленные применения. Например, в электронных микроскопах, где пучок электронов фокусируется магнитным полем, фольга из сверхпроводника позволит до такой степени повысить разрешающую способность микроскопа, что станут различимыми отдельные атомы.

Магнитные свойства сверхпроводящего и нормального состояний проводника настолько различаются, что можно говорить о двух разных материалах. Из этого, в частности, следует, например, что сверхпроводящее кольцо вовсе не должно иметь дырку — отверстие в обычном механическом смысле. Сверхпроводящая пластинка, не имеющая отверстий, может считаться в магнитном отношении кольцом, если хотя бы в одной ее точке, не соприкасающейся с краем, сверхпроводимость нарушена.

Несверхпроводящую, или «нормальную», зону в сверхпроводнике можно создать различными способами: нагревать его в какой-либо точке до температуры, превышающей критическую, сделать сильным местное магнитное поле; освещать узким пучком света небольшую область сверхпроводника (в последнем случае сверхпроводимость также теряется вследствие выделения тепла).

Если воспользоваться тем, что расположение нормальной области («отверстия») на поверхности сверхпроводника легко менять, можно создать накопитель магнитного потока, или, как его иногда называют, топологический генератор. Особенно примечательным в этой конструкции является то, что постоянный ток снимается с неподвижной части устройства. По сути дела, это устройство есть бесколлекторный генератор постоянного тока, принципиальная неосуществимость которого была многократно доказана. В настоящее время в советских, американских и голландских лабораториях работают многие сотни таких «неосуществимых» устройств.

К числу устройств, считавшихся невозможными, относится и трансформатор постоянного тока. Получить постоянный ток во вторичной обмотке несверхпроводящего трансформатора действительно

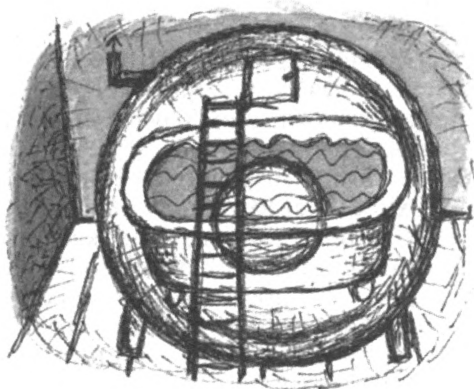
невозможно. Если подать на его первичную обмотку постоянный ток, то во вторичной обмотке появится слабый импульс тока, но он быстро затухает вследствие электрического сопротивления вторичной обмотки.

Если же вторичная цепь трансформатора будет сверхпроводящей, то при подаче тока в первичную обмотку во вторичной наведется ЭДС, вызывающая ток, который не может затухнуть даже тогда, когда уже нет вызвавшей его ЭДС. С помощью таких трансформаторов постоянного тока удавалось, подавая в криостат с жидким гелием небольшой ток по тонким проводникам, трансформировать его, доводя до 25 тыс. А.

Таким образом, особые свойства сверхпроводников были поставлены на борьбу с трудностями, проистекающими из тех же особых свойств. Благодаря такому подходу уже разработаны генераторы и трансформаторы, с помощью которых сверхпроводящий электромагнит может снабжаться током в несколько тысяч ампер! И этот ток циркулирует по сверхпроводящей обмотке в то время, когда из области с комнатной температурой к генератору или к трансформатору подается ток силой всего в несколько ампер.

Эти устройства помогают также сократить потребление сверхпроводящими магнитами жидкого гелия, т.е. сделать их еще более экономичными.

Какие прогнозы можно уже сейчас делать относительно будущего сверхпроводящих магнитов? Теперь ясно, что недалеко то время, когда будут построены сверхпроводящие магниты, создающие поле около 25 Тл в рабочем объеме, измеряемом несколькими кубическими метрами.



# ПОТРЕБИТЕЛИ ПРОСЫПАЮТСЯ...

---

*Про магнитные органы, «магнитные Биллы» и «магнитные Форды»; как магнитами просеивать зерно, сортировать руду, чистить пляжный песок и ловить преступников; о магнитных поездах без колес, магнитных игрушках и магнитных щупальцах; наконец, о фокусниках, мистификаторах и проходимцах, которые умеют обманывать людей, пользуясь тем, что магнитное поле всесильно, но невидимо.*

После открытий Романьози, Эрстеда, Ампера, Стерджена, Генри и Джоуля человечество получило в свои руки магниты неслыханной доселе силы. Куда направить эту мощь? Легкость получения больших усилий с помощью электромагнитов побуждала использовать эти новинки буквально во всех устройствах, где требовалось приложить хоть мало-мальски серьезное усилие. Ученые на несколько лет уподобились мальчику, который, впервые получив магнит в руки, пытается притянуть им все, что попадаетеся на глаза: гвозди, бритвы, кровать, соседскую кошку. Электромагниты в большом числе появились в физических лабораториях, аристократических салонах, кабинетах врачей.

В одном из старинных журналов есть описание магнитного органа, установленного в соборе американского города Гарден-сити. В этом органе клапаны открывались при помощи специальных магнитов. Когда органист нажимал клавишу, в цепь магнита подавался ток, магнит притягивал стерженек, прикрепленный к клапану той трубки, которая должна была звучать. Этот процесс происходил так быстро, что трубку можно было бы заставить звучать шестьсот раз в минуту. На таком магнитном органе можно было исполнять весьма виртуозные вещи.

Уже в 1869 г. магниты широко использовали в приводе жаккардовых станков и для пробивания отверстий в металлических плитах. Но прежде всего, конечно, электромагниты стали использовать по прямому назначению — для подъема тяжелых железных предметов. Сначала подъемные магниты исследовались в научных лабораториях. Еще в 1864 г. в Свободной академии Нью-Йорка был создан электромагнит, весящий 260 кг, «который поднял семерых человек однажды и сколько он еще может поднять — никто не знает». Этот магнит, сделанный Чарльзом и Чесдером, представлял собой два стержня круглого сечения из мягкого железа диаметром 10 см и

длиной по 1 м, соединенных в виде буквы V. На стержни было намотано 80 кг медной проволоки, изолированной хлопчатобумажной тканью. Для передвижения магнита по помещению использовалась вагонетка.

Вскоре после того, как было построено еще несколько таких крупных магнитов и все могли убедиться в их силе, надежности, компактности и удобстве, было предложено использовать электромагниты для подъема железных и стальных деталей на металлургических и металлообрабатывающих заводах. Вот как описывается рождение магнитного крана на сталелитейных заводах в Кливленде в питтсбургской газете «Пресс» за 1888 г.

«Для проверки магнита в производственных условиях он был подвешен на тросе к цеховому крану. Подвеска осуществлялась с помощью веревки, поскольку железная цепь намагничивалась и мешала работе. Для возбуждения магнита было достаточно тока 5,5—6 А. При этом легко поднимался груз 320 кг, который мог быть легко сброшен при выключении тока... В цехе, где был пущен магнит, рассчитывали получить работу по переноске железа 14 или 15 человек. С пуском магнита они оказались по отношению к нему в позиции Отелло, поскольку один мальчик с помощью кнопки стал теперь выполнять всю работу всей этой банды».

Сквозь грубоватый юмор питтсбургского журналиста просвечивает не слишком привлекательная картина технического прогресса при капитализме. Впрочем, с помощью магнитов некоторым из ставших в цехе ненужными рабочим была найдена работа по магнитной очистке территории завода и улиц. Этим рабочим называли «магнитными Биллами». В их обязанности входило носить на спине батарею, питающую электричеством магнит, который «Билл» держал в руках. С помощью этого магнита он собирал с земли железные опилки, гвозди и мелкие железные детали.

С развитием автомобильного транспорта «магнитный Билл» был заменен «магнитным Фордом», который ездил по плохим дорогам того времени и собирал с дороги все, что могло вызвать прокол камеры. Особенно большое применение «магнитные Форды» нашли во время первой мировой войны, когда резина была весьма дефицитной. «Магнитный Форд» экономически себя оправдывал. Так, доктор



Браун из форта Байард в Нью-Мексико, применив в 1928 г. на автомобиле магнит диаметром 30 см, сократил количество проколов у своей машины на 75% и собрал за короткое время 2 т гвоздей.

В журнале «Сайнтифик Америкэн» дается описание «магнитного Форда»: на любую старую автомашину на высоте 5—10 см над землей подвешивается один или несколько небольших магнитов, которые «прошупывают» пространство перед колесами машины и между ними. С помощью одной такой машины за год было собрано около 12,5 т железа, «причем в Северной Дакоте сбор составлял 6,5 фунтов на милю, в то время как в Южной Дакоте — лишь 1,75 фунта на милю».

В России магниту было найдено весьма своеобразное применение — вплоть до революции «Общество конно-железных дорог и омнибусов» использовало магниты для очистки овса, шедшего на корм лошадям, от железных гвоздей. Во всей Европе и Америке магниты широко применялись на мельницах для очистки зерна.

Одним из крупнейших подъемных электромагнитов стал магнит, построенный в 1903 г. в США. С его помощью можно было поднять груз в 20 т, т.е. железнодорожный вагон. Несколько позже был построен еще более мощный электромагнит, способный поднять 75 т, другими словами, целый паровоз.

Один из крупнейших электромагнитов, грузом которого была железная «баба» массой 20 т («скулодробитель» — английский эквивалент «бабы»), был предназначен для разрушения бракованного литья. Электромагнит в этом случае имел серьезные преимущества, поскольку освобождение «бабы» при необходимости ее сброса вниз производилось просто поворотом выключателя.

Широко известен рекламный снимок, сделанный одной из немецких фирм, производящих магниты. Рабочий удерживается, уцепившись за стоящую вертикально цепь, прикрепленную к полу. Шар, укрепленный на другом конце железной цепи, притягивается к магниту так сильно, что цепь остается натянутой, несмотря на то, что на ней повис человек. Железный шар не прикасается к магниту, и это говорит о колоссальной притягивающей силе этого магнита, так как с увеличением расстояния от притягиваемого предмета до магнита сила притяжения резко падает. Прокладывая между подковообразным магнитом и притянутым им телом лист бумаги, мы тем самым снижаем силу притяжения в 2 раза.

Широкое использование подъемных магнитов началось после того, как японцы чрезвычайно успешно применили их в массовом



масштабе на судостроительной верфи в Йокогаме в 20-х годах прошлого столетия.

Магнитная очистка зерна на мельницах стала прообразом чрезвычайно важного в настоящее время применения магнитов. Речь идет о так называемых магнитных сепараторах. Принцип их действия состоит в том, что смесь руды и пустой породы подается по конвейеру мимо полюсов магнита. Если пустая порода магнитна, она будет извлечена из смеси. Принцип магнитного сепаратора предложен еще в 1792 г., т.е. до изобретения электромагнита. Затем на аналогичный сепаратор с электромагнитами был выдан патент в 1847 г. Артуру Воллу. За Воллом последовал в 1854 г. Шено, получивший патент на сепаратор с вращающимися магнитами.

В настоящее время магнитный метод разделения применяют во многих отраслях горнодобывающей промышленности, в частности, в угледобывающей, где он начинает конкурировать с так называемым мокрым методом обогащения.

Почти повсеместно уголь обогащают в специальных отсадочных или флотационных установках. И отсадочный, и флотационный методы являются мокрыми, так как процесс обогащения происходит в воде, в результате чего и порода, и угольный концентрат нуждаются в сушке. Кроме того, мокрые методы требуют большого расхода (несколько тысяч кубометров) воды, очистки загрязненной воды и предотвращения смерзания частиц в районах с суровым климатом.

Почти все неиспользуемые в угле примеси магнитны. Это дает возможность избежать мокрых процессов, установив по ходу движения ленты с размельченной породой магнитный ребристый ролик, который захватывает примеси и выносит их из породы. Такой метод очистки, позволивший снизить зольность угольной мелочи с 12—17 до 7—8%, был впервые предложен и испытан в Советском Союзе.

А как очистить породу, например, от пирита, который немагнитен? Здесь ученые тоже нашли выход — пирит пропаривается в паровоздушной среде при температуре 270—300 °C и покрывается слоем магнитных окислов.

Другой тип сепаратора был изобретен в 80-х годах XIX века Эдисоном. Говорят, что это произошло во время одной из ежедневных утренних прогулок Эдисона. Гуляя по берегу Лонг-Айленда, Эдисон заметил, что песок пляжа содержит частички окиси железа. Если сыпать такой песок между полюсами магнитов, можно легко отделить немагнитные частицы от окиси железа. Эта идея Эдисона решила одну из проблем того времени: что делать с залежами руды, в которой содержание железа невелико?

Эдисон предложил преобразовать руду таким образом, чтобы она стала похожей на легко разделяемый песок пляжа, попросту говоря, размолоть ее. После размола в дробилках руда поступает в башню и сыпается с ее вершины. При падении частицы встречают все усиливающиеся магнитные поля нескольких мощных электромагнитов. Магнитная окись железа оседает на магнитах и снимается с их накопчиков, а пустая порода беспрепятственно падает вниз.

Благодаря этому изобретению Эдисона залежи железной руды в штате Нью-Джерси, ранее считавшиеся промышленно бросовыми,



стали рентабельными, для их разработки был построен целый город, названный по имени изобретателя — Эдисон-Сити.

Магнитные сепараторы применяют и в сельском хозяйстве для отделения семян клевера, льна, люцерны от семян сорняков. Инженеры воспользовались здесь оружием «врага» и обратили его против него самого. Дело в том, что семена сорняков (горчачка, плевела), как правило, более шероховаты, их поверхность покрыта миниатюрными зацепками, позволяющими семенам прикрепляться к шерсти животных, одежде людей и т.п., что помогает сорнякам в их быстром распространении. Если засыпать загрязненные сорняками семена мелкими железными опилками, то опилки скопятся на семенах сорняков, в то время как гладкие семена злаков останутся чистыми. Теперь достаточно легко очистить зерно от сорняков в устройстве типа магнитного сепаратора.

Очень сходный по существу метод используется сейчас и при поимке преступника. Часто потожировые отпечатки пальцев, оставленные нарушителями на месте преступления, очень слабы и вдобавок ко всему оставлены на каком-нибудь материале с грубой фактурой: досках, фанере, картоне. Криминалист В. Сорокин предложил вместо существующего способа опыления следов цветными порошками использовать в подобных случаях магнитную кисть, представляющую собой небольшой магнит с узким полюсом, который проносят над исследуемой поверхностью в нескольких направлениях.

Перед этим магнит опускают в сосуд с мельчайшими железными опилками. Опилки облепляют полюс в виде всем известной «бороды» магнита. Эта борода и играет роль тончайших щетинок кисти. При проведении магнитной кистью над загрязненной поверхностью железные пылинки прилипают к потожировому веществу следа и окрашивают его в характерный темно-серый цвет. Незагрязненная поверхность остается чистой. Окрашенные железной пылью отпечатки пальцев очень хорошо копируются на дактилоскопическую пленку.

Это не единственное применение магнита в криминалистике. В свое время в журнале «Советская милиция» сообщалось о портативном мощном электромагните, применяемом для добычи вещественных доказательств со дна водоемов. В том же номере описывался случай, когда следователю с помощью такого электромагнита удалось обнаружить на дне заброшенного пруда топор, которым было совершено преступление.

Этот же принцип используют для подъема железных предметов с затонувших судов.

Подъемные магниты очень широко используют там, где необходимы особо большие усилия и несложные крепления. Например, в знаменитом батискафе профессора Пикара, исследовавшего глубочайшие океанские впадины, мощный электромагнит был применен для удержания железного балласта. В случае аварии Пикар мог разомкнуть цепь питания электромагнита и, освободив батискаф от балласта, немедленно всплыть.

Электромагниты использовались и на транспорте. Так, для улучшения сцепления колес вагонеток с рельсами (увеличение трения) инженеры еще в 1910 г. применили подмагничивание колес с помощью электромагнитов. Используя электромагниты, удалось увеличить коэффициент трения и, следовательно, массу перевозимого груза.

Этим, безусловно, не ограничиваются возможности применения магнитов на транспорте. Существует, например, идея, выдвинутая инженерами фирмы «Вестингауз», предложившими использовать «магнитные подушки» для электровоза. В конструкции американских инженеров магниты, вмонтированные в корпус электровоза, создадут отталкивание между электровозом и железными направляющими рельсами, что позволит обойтись без колес и повысить скорость поездов до 1000 км/ч. Испытания моделей таких электровозов дали обнадеживающие результаты. Во многих странах уже созданы экспериментальные поезда «на магнитной подушке».

Электромагниты можно также использовать для стыковки кораблей в космосе. Другим немаловажным применением электромагнитов может стать магнитная обувь космонавтов, незаменимая, по-видимому, не только в условиях невесомости, но и при ремонтных работах на земле.

В годы войны беспокойная мысль конструкторов электромагнитов сразу же «нащупала» возможность применения их в военных целях. Непосредственно перед войной были изобретены магнитные мины, т.е. мины, боек которых приводился в действие поворотом магнитной стрелки, влекомой стальной машиной корабля.

Другим, значительно более проблематичным предложением стала старая идея использовать электромагнит для ловли ядер противника. Предполагалось осуществить эту идею следующим образом: на корабле «лицом» к противнику устанавливается мощный электромагнит, полюс которого покрыт прочной броней. Ядра неприятеля притягиваются этим магнитом и попадают на брону. Остальная часть корабля может быть незащищенной.



Конечно, такой проект вряд ли осуществим. Стрельба со своего корабля будет малоэффективной, так как траектория будет искажаться магнитом, вследствие чего прицельный огонь станет невозможным. Далее, и это особенно важно в данном случае, для искривления пути неприятельских ядер понадобится такой мощный магнит, который и в настоящее время ученые построить не в состоянии.

Следует, однако, отметить, что проект защиты фортов от ядер противника не остался лишь на бумаге. Магнит-броня, заранее обреченный на бездействие, был построен. Это произошло потому, что техника расчетов магнитного поля в XIX веке была недостаточно разработанной, и заранее знать, каково будет поле магнита и, следовательно, его эффективность, было нельзя. В 1887 г. майор американского флота Кинг приказал сделать гигантский электромагнит из двух крупнейших береговых орудий калибром 36 см, поставленных рядом в форте Виллетс-Пойнт. Магнитная цепь замыкалась с помощью притороченных к пушкам железнодорожных рельсов. Пушки, каждая из которых была по 5 м длиной и весила 25 т, были обмотаны многожильным торпедным кабелем длиной 14 миль. Для питания использовался электрогенератор, обычно применявшийся для ламп прожекторов. При включении тока к жерлам пушек притягивались толстые стальные плиты, которые могли быть оторваны лишь при усилии 10 т. У жерла пушки могли висеть, как гроздь, одно под другим четыре ядра, каждое массой 120 кг. Те, у кого в карманах или руках были небольшие стальные предметы, начинали чувствовать приближение к пушке за 2 м. Действие же пушек на магнитную стрелку, как писали авторы, распространялось более чем на 10 км! Что же касалось неприятельских ядер... их пушка не притягивала.

Надежды майора Кинга на то, что магнитная пушка станет полезной уже тем, что будет «сбивать с толку» стрелки компасов неприятельских кораблей при их подходе к форту, тоже были необоснованными. Дело в том, что на самих кораблях имеются сотни различных магнитов и массивных стальных устройств, которые, не будь приняты специальные меры, не дали бы возможности правильно вести судно. Существует специальная наука «компасное дело», которая разрабатывает способы защиты от магнитных полей своих корабельных устройств не то что от поля, хотя и мощного, но далекого магнита — гигантской магнитной пушки.

Особым толчком к развитию этой науки послужили аварии у берегов Ирландии в 1860 г. двух пассажирских пароходов, сопровождающиеся большим числом жертв; эти аварии произошли из-за погрешностей компасов.

Идея использовать магнитное притяжение находила все новых приверженцев не только среди ученых, инженеров, писателей, но и... среди мистификаторов. Вот одна из нашумевших историй.

Как-то в одном европейском военном ведомстве произошел большой переполох. Ведомство всегда осаждали изобретатели, предлагая то сверхдальнобойные пушки, то сверхмощные взрывчатые вещества. И на этот раз изобретатель представил новое взрывчатое вещество. Но удивительное было не в этом. В отличие от других изобретателей он попросил посмотреть на свое изобретение в действии. Была сос-

тавлена авторитетная комиссия, которая прибыла в лабораторию изобретателя.

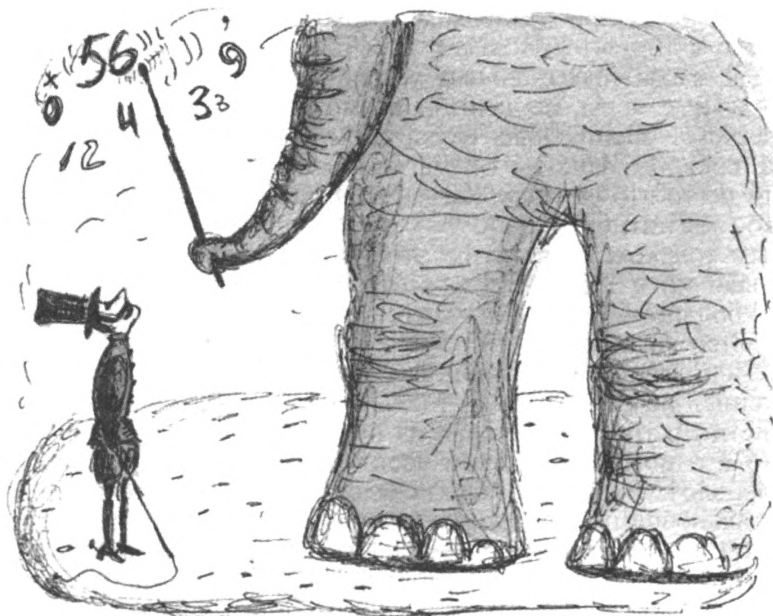
Посреди лаборатории стоял стол. На этот стол насыпали щепотку новой взрывчатки, на которую ставили тяжелый, в несколько пудов, кусок железа. Изобретатель замыкал ток в цепи, «поджигавшей» новую взрывчатку, и громадная железная глыба подлетала к потолку. Падая обратно, она в щепы разбивала стол.

Военные были потрясены. Об открытии узнали газетчики. Всю прессу наводнили сообщения о новом сверхмощном взрывчатом веществе, которое сулило переворот в военном деле. Но вот что было удивительно — руководитель военного ведомства не привлек к ответу газетчиков, разгласивших новую военную тайну. Наоборот, он всячески поощрял их.

Изобретатель получил солидную сумму денег и... скрылся в неизвестном направлении. Это показалось подозрительным, и эксперты произвели обследование заброшенной лаборатории. И вот что оказалось: прямо над потолком лаборатории, в комнате наверху, был установлен мощный электромагнит. Замыкая цепь для взрыва, изобретатель замыкал цепь электромагнита. Железная глыба подсакивала к потолку, к магниту. Для того чтобы глыба «не прилипла» к потолку, цепь электромагнита тотчас же разрывалась, и глыба летела вниз.

Знал ли руководитель военного ведомства об этом, остается загадкой. Однако психологическое воздействие на другие страны газетная шумиха оказала большое.

Другой мистификатор путешествовал по Европе. В середине 1880-х годов пронеслась волна об ученом слоне, который умел не только складывать и вычитать, но даже умножать, делить и извлекать корни.



Делалось это следующим образом. Дрессировщик, например, спрашивал слона: «Сколько будет семью восемь?» Перед слоном стояла доска с цифрами. После вопроса слон брал хоботом указку и уверенно показывал цифру 56. Точно так же производились деление и извлечение квадратного корня. Фокус также был достаточно прост: под каждой цифрой на доске был спрятан небольшой электромагнит. Когда слону задавался вопрос, в обмотку магнита, расположенного под цифрой, означающей правильный ответ, подавался ток. Железная указка в хоботе слона сама притягивалась к правильной цифре. Ответ получался автоматически. Несмотря на всю простоту этой «дрессировки», секрет фокуса долгое время не могли раскрыть, и «ученый слон» пользовался громадным успехом.

В средние века весьма распространенным иллюзионным номером были так называемые послушные рыбы, изготовлявшиеся из дерева. Они плавали в бассейне и повиновались малейшему мановению руки фокусника, который заставлял их двигаться во всевозможных направлениях. Секрет фокуса был чрезвычайно прост: в рукаве у фокусника был спрятан магнит, а в головы рыб вставлены кусочки железа.

Более близкими к нам по времени были манипуляции англичанина Джонаса. Его коронный номер: Джонас предлагал некоторым зрителям положить часы на стол, после чего он, не прикасаясь к ним, произвольно менял положение стрелок. Трюк, естественно, проводился с помощью магнита.

Современным воплощением такой идеи являются хорошо известные электрикам электромагнитные муфты, с помощью которых можно вращать устройства, отделенные от двигателя какой-нибудь преградой, например стеной.

До сих пор не ясен трюк с магнитом, который проделывал в своем «Храме очарований, или механическом, оптическом и физическом кабинете Гамулецкого де Колла» известный русский иллюзионист Гамулецкий. Его «кабинет», просуществовавший до 1842 г., прославился помимо всего прочего и тем, что посетители, поднимавшиеся по украшенной канделябрами и устланной коврами лестнице, еще издали могли заметить на верхней площадке лестницы золоченую фигуру ангела, выполненную в натуральный человеческий рост, которая парила в горизонтальном положении над дверью кабинета, не будучи подвешенной. В этом мог убедиться каждый желающий. Когда посетители вступали на площадку, ангел поднимал руку, подносил ко рту валторну и «играл на ней, шевеля пальцами самым естественным образом».

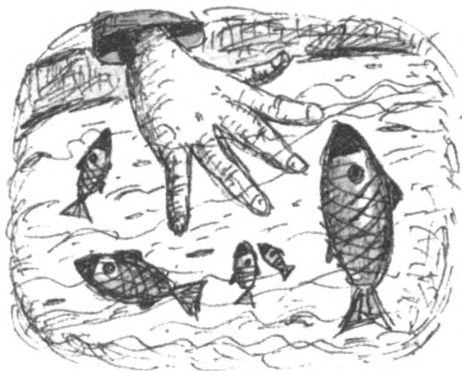
«Десять лет, — говорил Гамулецкий, — я трудился, чтобы найти точку и вес магнита и железа, дабы удержать ангела в воздухе. Помимо трудов немало и средств употребил я на это чудо».

По-видимому, роль атрибута иллюзионистов как нельзя более подходила таинственному камню — магниту.

На рубеже XIX и XX столетий необыкновенной популярностью пользовались так называемые спиритические сеансы. Сеансы эти проводились по-разному, однако суть их всех сводилась к тому, что спирит, или медиум, ведущий этот сеанс, получал тем или иным

способом «сигналы» из загробного мира. С помощью этих сигналов участники спиритических сеансов могли «связаться» с любым умершим лицом — великими полководцами и куртизанками древности, умершими родственниками и т.п. Сигналы из загробного мира были различными. Иногда это были толчки стола, на котором лежали руки людей — участников сеанса.

Секрет стола был необычайно прост — в его ножке помещалась батарея, а под столешницей — небольшой электромагнит с якорем. Лицо, ведущее спиритический сеанс, могло посредством особой кнопки замыкать цепь электромагнита, и якорь магнита ударял по столешнице.



# СОРТИРОВЩИКИ МИКРОЧАСТИЦ

---

*Д. Дальтон и Ч. Вильсон никогда не встречались, они жили с разрывом времени порядка ста лет, но тем не менее именно их труды помогли заметить то, что не видно невооруженному человеческому глазу — движение элементарных частиц. Тут снова придется вспомнить П. Л. Капицу, предложившего совместить первый обнаружитель частиц с магнитом, что породило семейство полезнейших научных приборов.*

Эту историю надо начать с Джона Дальтона (1766—1844), самоучки, который сначала преподавал математику детям в Манчестере, а потом занялся исследованиями воздуха, газовых смесей, составил первую таблицу атомных масс, изучал свойства перегретого пара.

Затем пришла пора Джеймса Прескотта Джоуля (1818—1899). Он учился дома, а к физике его приохотил именно Дальтон. Ученики знали о профессоре по дальтонизму, цветовой слепоте, но серьезные люди слышали и о соревновании учителя с Гей-Люссаком, помогавшем самому Бертолле, летавшему над Парижем в монгольфьере, но все же отставшем от Дальтона в установлении закона расширения газа при нагревании.

Джоуль стал большим ученым. Он много и весьма успешно занимался магнетизмом. Джоуль поведал миру о существовании предела намагничивания стали, о магнитном насыщении. Джоуль измерил тепло, выделяемое электрическим током. Джоуль заметил магнитострикцию, т.е. изменение объема намагничиваемого железа.

А тем временем, словно следуя заранее известному сценарию, сотни исследователей день за днем приближали появление удивительного магнитного прибора, рождение которого никто, конечно, не мог заранее предполагать.

В 1880 г. Э. Гольдштейн отклонил пучок катодных лучей (позднее узнали, что это поток электронов), поднеся к нему магнит. Отрицательный знак заряда этих лучей определил Ж. Перрен, увязав направление магнитного поля с траекторией пучка. Его опыт уточнил Дж. Дж. Томсон, потом Дж. Лармор предсказал прецессию электронов во внешнем магнитном поле.

В конце позапрошлого века физики активно разрабатывали интереснейший раздел теории — строение вещества, и самыми действенными инструментами в руках исследователей оказались электричес-

кое (оно ускоряло заряженные частицы) и магнитное (оно искривляло путь частиц) поля.

Сегодня каждому школьнику известно, что магнитное поле отклоняет летящий электрический заряд, ничего другого неизменное во времени магнитное поле делать не «умеет». А тогда, при жизни наших пра- и прапрадедов, это правило только-только обретало плоть: то Зееман расщепил магнитным полем спектральные линии (1896), то Браун построил катодно-лучевую трубку (1897), то магниты смогли отклонить лучи, испускаемые радием (1899).

В 1907 г. Дж. Дж. Томсон, только что получивший Нобелевскую премию за открытие электрона, предложил построить масс-спектрометр, сыгравший огромную роль в физике элементарных частиц. Это сейчас магниты широко применяют для исследования поведения веществ в сильных магнитных полях, для излучения гальваномагнитных, термомагнитных, магнитострикционных явлений, для получения сверхнизких температур (всего лишь на тысячную долю градуса выше абсолютного нуля) методом адиабатического (т.е. без обмена теплом между телом и окружающей средой) размагничивания. Они применяются в квантовых генераторах — мазерах и для анализа частиц по их массе в магнитных масс-спектрометрах.

Принцип магнитной спектрографии используют для разделения изотопов различных элементов. Изотопы, как известно, — это атомы одного и того же элемента, в ядрах которых содержится одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. Следовательно, массы ядер изотопов различны, и их орбиты при движении в магнитном поле тоже различны. Траектории движения более тяжелых ядер меньше искривлены, вследствие чего легкие и тяжелые ядра движутся в магнитном поле по разным орбитам. В сильном магнитном поле могут быть разделены даже очень «похожие» изотопы.

Магнитные спектрографы создавались как бы в три этапа. Сначала Чарльз Вильсон (1869—1959) изобрел камеру для фиксации следов пролета заряженных частиц (1912), за что много позже получил Нобелевскую премию. Вот гдегодились знания Дальтона о перегретом паре! Если резко расширить объем влажного воздуха, то он охладится, и в состоянии перенасыщения ничтожной причины достаточно для конденсации пара. Вот почему камеру Вильсона тщательно очищают от пыли, оберегают от сотрясений. Теперь достаточно одной-единственной заряженной частице пролететь через камеру, чтобы ее путь был отмечен туманным следом. Трек надо осветить, сфотографировать, и визитная карточка гостыи попадет в распоряжение ученых.

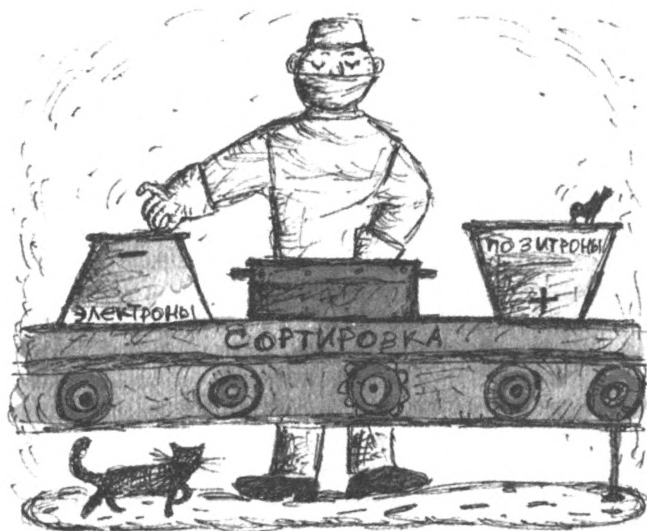
Камера Вильсона появилась, а тем временем А. Демистр по идее Дж. Дж. Томсона построил первый масс-спектрограф (1918). Через год Ф. Астон создал уже хороший аппарат: частицы не только пролетали зазор конденсатора и пятнышко между полюсами магнита, но, пройдя серию узкоориентированных щелей, попадали на фотопластинку.

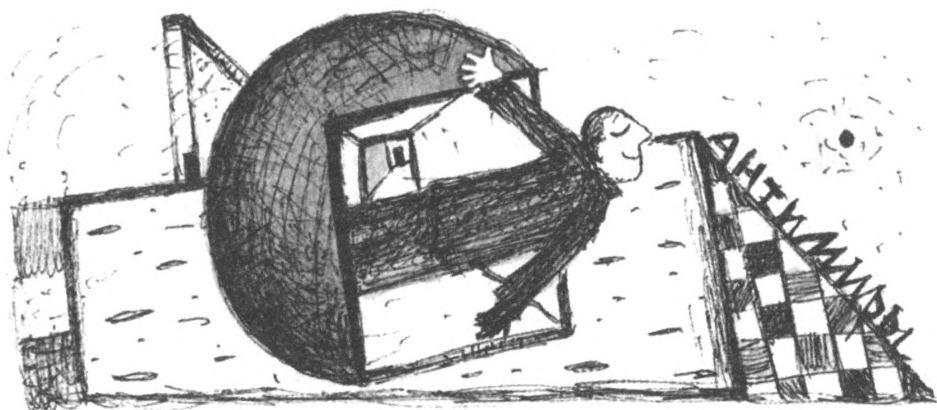
Но вот магнит «встретился» с камерой Вильсона, и помог этой встрече П. Л. Капица! Дело в том, что паровая камера не могла ответить на вопрос, какая же частица пролетела. Камера Вильсона предупреждала о появлении частиц, не «опознавая» их.

Выход из этого положения был найден П. Л. Капицей, опубликовавшим в 1923 г. в журнале Кембриджского философского общества небольшую статью, в которой описывал некоторые эксперименты по наблюдению следов альфа-частиц в камере Вильсона. Установка П. Л. Капицы представляла собой камеру Вильсона, помещенную в сильное магнитное поле. Что это давало? Мы знаем о том, что в магнитном поле любая заряженная частица движется по кривой, радиус которой обратно пропорционален напряженности магнитного поля и прямо пропорционален массе частицы и ее скорости. Таким образом, зная напряженность магнитного поля и измерив радиус трека частицы в камере Вильсона, можно узнать ее массу и энергию.

Идея П. Л. Капицы о магнитной камере Вильсона нашла приверженцев. Среди них был и американец К. Андерсон, который в 1932 г. поместил камеру Вильсона внутри крупного электромагнита со стальным сердечником и полем около 2 Тл. Полюсы магнита были сконструированы таким образом, что создаваемое магнитное поле оказалось совершенно однородным, т.е. во всех точках камеры поле было одинаковым. Это давало возможность более точно определять энергию частиц. Андерсона кроме энергии интересовали еще и знаки заряда частицы. При заданном направлении магнитного поля и известном направлении движения положительно заряженные частицы будут отклоняться в одну сторону, а отрицательно заряженные — в другую.

Исследуя вильсонограммы (так иногда называют фотографии следов в камере Вильсона) космических лучей, Андерсон внезапно увидел поразительную вещь: частица, по импульсу аналогичная электрону, отклонялась магнитным полем так, как если бы она была заряжена положительно. Андерсон твердо знал, что электрон так отклоняться в магнитном поле не может, поскольку он обладает отрицательным зарядом и должен отклоняться в противоположную сторону.





Противоречия можно было бы примирить, если бы приписать этому «электрону» положительный заряд. Существование «антиэлектрона», обладающего положительным зарядом, было предсказано в 1928 г. молодым английским физиком Полем Дираком на основе анализа «квантовых» уравнений движения электрона.

Частица, открытая Андерсоном, действительно оказалась анти-электроном, или, как его теперь называют, позитроном. Это была первая обнаруженная человеком частица из антимира. Ее открытие было бы крайне затруднительно без сильного магнитного поля, без мощного магнита. Так, академик Д. В. Скобельцын, напавший на след позитрона гораздо раньше Андерсона, упустил его, поскольку магнит Скобельцына давал поле лишь 0,3 Тл.

Камера Вильсона была незаменимым лабораторным устройством до тех пор, пока энергии (скорости) излучаемых в ней частиц были относительно невелики. Но в 1950-х годах в СССР, США и других странах вступили в строй гигантские ускорители, способные сообщать частицам колоссальную скорость. Энергия частиц была при этом столь велика, что они беспрепятственно пронизывали камеру Вильсона и почти не отклонялись магнитным полем. Это и не удивительно — камера Вильсона заполнена газом, почти не представляющим собой преграды для частиц. Частицы столь больших энергий необходимо было исследовать по-другому.

Камеру Вильсона Капица «доделал» основательно, но резервы ее улучшения уже иссякали. В 1948 г. Нобелевскую премию получил П. Блэкетт, который пристроил к камере Вильсона множество счетчиков элементарных частиц, которые при необходимости включали камеру и отключали ее, когда она простаивала без дела. Но гораздо более серьезное предложение сделал американец, физик Дональд Глезер, ученик Андерсона. И если Андерсон открыл позитрон-антиэлектрон, то заслуга Глезера была не меньше: он открыл «антикамеру Вильсона» — пузырьковую камеру.

Поучительна история этого открытия. Поучительна потому, что она еще раз убедительно показывает, что человек, одержимый какой-то идеей, способен видеть в известных вещах только ему одному по-



нятные явления, улавливать лишь для него очевидные ассоциации, приводящие в конце концов к открытию.

Дональд Глезер в течение долгого времени мучительно искал материал, твердый или жидкий, находящийся в таком неустойчивом равновесии, которое могла бы нарушить даже одна-единственная атомная частица. В этом случае частица, непредставимо эфемерная, могла бы оставить за собой видимый глазом след, который состоял бы, например, из пузырьков испарившейся жидкости. Временами Глезер терял надежду — слишком ничтожной казалась вероятность испарить энергией единственной частицы заметное количество жидкости.

Однажды Глезеру попало на глаза тридцатилетней давности статья Кенрика, Гильберта и Визмера о «странной жидкости» — диэтиловом эфире, нагретом до  $140^{\circ}\text{C}$ . «Странность» жидкости заключалась в том, что при этой температуре она обязательно бурно вскипала, однако всегда через различные промежутки времени. Проведя 30 экспериментов, авторы убедились в том, что промежутки времени перед вскипанием этой «капризной» жидкости образовывали ряд, соответствующий закону случайных событий.

Глезер засел за расчеты, которые показали, что частота вскипания жидкости в точности соответствует возможности попадания в колбу космических лучей, т.е. отдельных атомных частиц с высокой энергией. Так была открыта первая жидкость, пригодная для использования в пузырьковой камере, за создание которой Глезер получил в 1960 г. Нобелевскую премию.

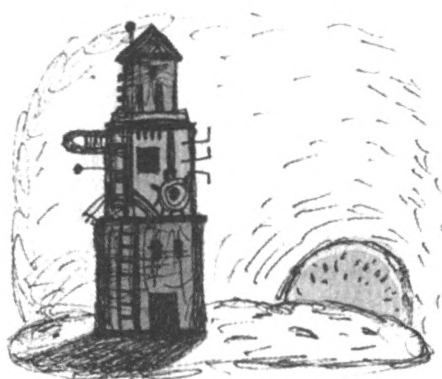
Пузырьковая камера действительно может быть названа «антикамерой Вильсона»: если в камере Вильсона след частицы составлен капельками жидкости, осевшими на ионизированных атомах, то в пузырьковой камере, наоборот, след состоит из пузырьков газа, образовавшихся в исходной жидкости за счет тепла, выделенного при образовании заряженных ионов. В пузырьковой камере применяют органические жидкости или ожиженные газы. Первая лабораторная модель камеры была с наперсток. Сегодня полезные объемы пузырьков камер различны — от нескольких долей литра до нескольких сот литров. Различаются и магниты, используемые с этими камерами. Для советской фреоновой камеры диаметром 115 см и глубиной 50 см был изготовлен магнит с полем 2,65 Тл и массой 72 т.

Существуют еще более крупные камеры и магниты. В США построена, например, жидководородная пузырьковая камера объемом 600 л. В Дубне пущена крупнейшая в мире пропановая камера диаметром 2 м. Эта камера установлена на одном из антипротонных каналов дубнинского синхрофазотрона.

Довольно крупная жидководородная камера диаметром около 5 м «Мирабель» установлена в Протвино на Серпуховском ускорителе для фиксации последствий удара протонов, ускоренных до 76 ГэВ, в ядро-протон атома водорода. Именно камеры такого типа дают две трети всей новой информации об элементарных частицах, поэтому нет ничего удивительного в готовности физиков идти на любые расходы по созданию магнито-жидководородных регистраторов. «Мирабель», например, выглядит трехэтажной башней, в центре которой расположена камера, окруженная сложными инженерными сооруже-

ниями, куда входит магнит, оживитель водорода ( $-246^{\circ}\text{C}$ !), системы автоматического управления режимами и измерений. Полученная информация использовалась для совместной работы советских ученых и физиков из Французского центра ядерных исследований в Саклэ.

В последнее время для создания пузырьковых камер, особенно больших, широко используют сверхпроводниковые магниты. Это позволяет резко снизить размеры, массу и энергопотребление магнитной системы. В недалеком будущем такие системы, по-видимому, будут обходиться и дешевле обычных.



*И вновь рассказ про П.Л. Капицу; про «открытого» им физика, в свою очередь, сделавшего открытие, связанное с электромагнетизмом.*

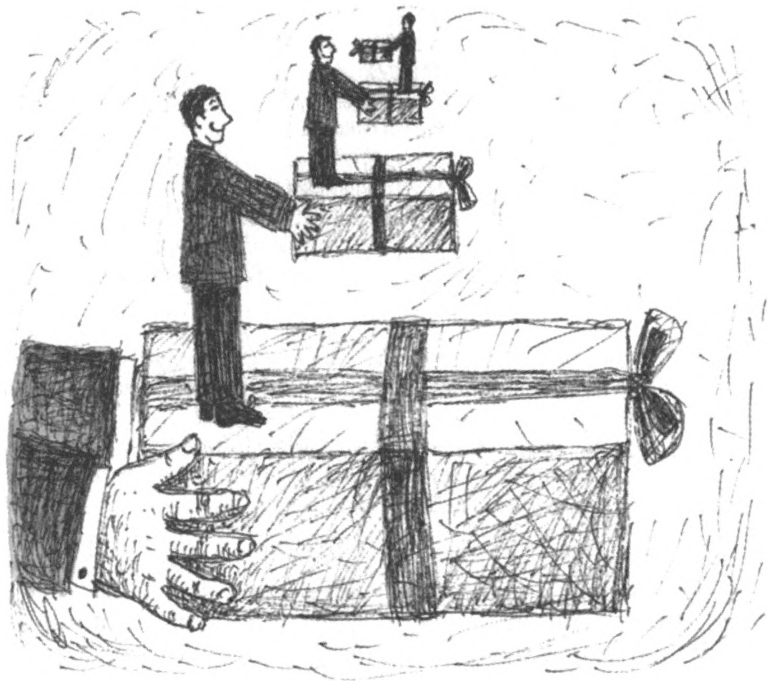
*О применении магнетизма можно рассказывать много, но никак нельзя умолчать об открытии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Дело было так.*

После революции магнитная лаборатория Московского университета, которой было присвоено имя Максвелла, вписала яркие главы в теорию магнетизма. Еще в 1913 г. ученик П. И. Лебедева В. К. Аркадьев заметил первый магниторезонансный эффект — поглощение ферромагнетиками высокочастотных электромагнитных колебаний.

«Исследования полного спектра вещества, — писал Аркадьев, — открывают перед нами возможность проникнуть в геометрическое распределение зарядов отдельных атомов и молекул, изучить строение их и подойти к решению самых разнообразных физико-химических вопросов. Эта огромная задача, которую электронная теория материи ставит спектральному анализу, открывает спектроскопии широкое поле интересной и плодотворной работы, но она требует для своего решения ряда систематически проведенных исследований в разных частях спектра... Ближайшей задачей является определение полос поглощения по всей доступной нам шкале электромагнитных волн...»

Это все та же великая лебедевская программа изучения процессов взаимодействия излучения с веществом. Работы Аркадьева вызвали большой интерес. П. Эренфест писал ему в Москву 20 июня 1913 г.: «Я вчера рассказывал о Ваших магнитных работах Вейссу и Эйнштейну. Оба проявили большой интерес к Вашим опытам и к Вашим идеям».

Е. К. Завойский начал свои исследования еще до войны, в 1939 г., и уже в мае 1941 г., экспериментируя на протонах, впервые с группой коллег наблюдал странные сигналы, которые из-за старого, то и дело замыкающего электромагнита, носили нерегулярный характер. Война прервала работы, провести контрольные опыты не удалось, материалы не были опубликованы. А эти сигналы подавала им природа, готовая поведать ученым об одном из заветнейших ее секретов.



За открытие ядерного магнитного резонанса американские физики Ф. Блох, Р. Паунд и Е. Пэрселл были удостоены в 1946 г. Нобелевской премии по физике.

Во время войны Завойский, изучая поглощение радиоволн парамагнетиками, обратил внимание на явно выраженный максимум поглощения, смещавшийся в сторону более сильных магнитных полей при повышении частоты волн, — это определенно указывало на резонансную природу эффекта.

В 1943 г. из эвакуации в Москву возвращается П. Л. Капица (опять Капица, патриарх магнетизма XX века!). Он привез с собой Е. К. Завойского, который в ту пору заведовал кафедрой физики Казанского университета имени В. И. Ульянова-Ленина. Без сильных сотрудников, с плохеньким оборудованием ему удалось открыть ЭПР! Парамагнетик мог поглощать энергию, когда при некоторых частотах поля электроны «переворачивались» другим, высокочастотным полем. Как тут не вспомнить про исследования Столетова, изучавшего намагничивание мягкого железа!

Капица предложил Завойскому продемонстрировать эффект на оборудовании Института физических проблем в Москве и исследовать эффект при низких температурах. Вместе с Завойским над созданием экспериментальной установки работал будущий академик А. И. Шальников.

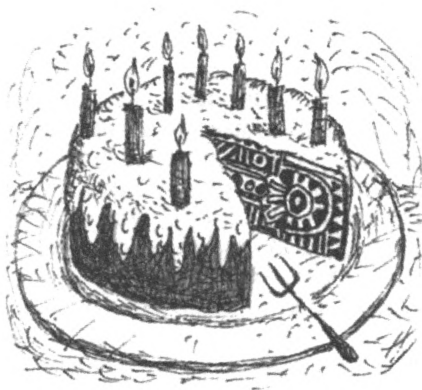
В 1974 г., когда праздновали восьмидесятилетие П. Л. Капицы, Е. К. Завойский преподнес ему в качестве подарка макет своей знаменитой теперь установки. Вот какой текст сопровождал подарок:

«Глубокоуважаемый Петр Леонидович!

Вы — первый физик, оценивший электронный парамагнитный резонанс. В день Вашего юбилея в память об этом прошу принять Вас то, что сохранилось... 1946 г. Институт физических проблем. Подвал. Установка по изучению ЭПР в диапазоне длин волн 10 см на клистроне, собранная из деталей: клистрон — американский, высокочастотный кабель — немецкий. Остальная аппаратура была отечественной. Не все сохранилось. Но в памяти осталась атмосфера дружелюбия. Вы и Александр Иосифович Шальников во многом определили счастливую судьбу ЭПР. 1974 г.

Ваш Е. К. Завойский».

Открытие Завойского сильно продвинуло исследования, которые позднее привели к созданию лазеров, а также способствовали обнаружению новых, близких по природе к ЭПР, физических эффектов — ядерного парамагнитного резонанса, ферромагнитного и антиферромагнитного резонанса, акустического парамагнитного резонанса и др.



# ПИРАМИДЫ ЯДЕРНОГО ВЕКА

---

*Еще Демокрит был уверен, что, разрезая яблоко пополам, половинки — еще пополам, четвертинки — снова пополам и так далее, можно дойти до мельчайших «атомов» материи. Древнегреческий философ был прав; на 90-м раздвоении перед ним «лежало бы» два атома. Но где взять «нож» для столь тонких разрезов? Сегодня нужные инструменты есть, к их созданию причастны великий Лоуренс и не менее великий Векслер, трудами которых вошли в практику ускорители элементарных частиц. Существование последних без магнитов немислимо.*

О людях эпохи, об уровне развития ее науки и искусства мы судим, прежде всего, по сохранившимся памятникам. Египетские пирамиды, римские акведуки, русские иконы, флорентийские фрески, пещеры Аджанты, средневековые европейские соборы, более близкие к нам по времени плотины и телескопы являются уникальными символами ушедших эпох, подчас точнее воссоздающими те времена, чем пухлые тома хроник. А среди памятников, которые оставит после себя наш беспоконный век, быть может, наиболее яркими будут заброшенные к тому времени гигантские ускорители, которые, как нельзя лучше, характеризуют ядерный век: состояние его науки, техники, искусства, его материальные возможности и даже отношения между людьми и народами. Ускорители — это пирамиды нашего века... Люди, причастные к этим творениям, окружены заботой и вниманием; на них смотрит с восхищением весь мир; они находятся на самом переднем крае человеческих знаний и мастерства; перед ними неизведанные глубины вечности, космоса, материи, человеческой души... Счастливы те известные и безвестные избранники, которые создают современные ускорители — пирамиды ядерного века...

Это очень человеческая черта — присваивать одной яркой и незаурядной личности заслуги, которые правильнее было бы отнести ко многим. Так стало с Эрнестом Лоуренсом — «изобретателем» циклотрона. Как Колумб не открыл Америки, так Лоуренс не изобрел циклотрона — ускорителя атомных частиц, который за короткое время, благодаря неумолимому любопытству физиков, вырос до исполинских, невероятных прежде размеров. До Лоуренса, вместе с Лоуренсом и после него было много талантливых ученых, которые были бы

вправе разделить с ним честь открытия. Так, можно было бы упомянуть харьковских физиков, испытывших на два года раньше Лоуренса устройство, напоминавшее циклотрон. Можно упомянуть и многих других. Но спросите любого физика: «Кто изобрел циклотрон?» И он ответит без колебаний: «Лоуренс».

Человек, который бы вдруг оказался на захлавленной территории Калифорнийского университета в 1932 г., мог заметить небольшое, буквально разваливающееся на глазах здание, размещавшееся на пути в учебные химические лаборатории. Из здания доносился натужный вой генераторов, сыпались искры, тлели огоньки в ртутных выпрямителях. Все вокруг было залито светом мощных ламп. Суеуились какие-то люди. Здесь создавался циклотрон. Руководил работами Лоуренс.

Жизнь Эрнеста Лоуренса напоминает жизнь типичного «счастливого». Да, у Лоуренса были все основания считаться счастливым. Как и большинство известных физиков своего времени, он учился в нескольких университетах: Миннесотском, Чикагском и Йельском. Еще раньше, в школе, его интерес к физике был поддержан учителем Эйки. В Йельском университете Лоуренс получил степень доктора философии (примерно соответствует степени кандидата физико-математических наук) за его исключительные способности к экспериментированию. Так, во время обучения в Йельском университете еще в 1925 г. он предложил принципы осуществления цветного телевидения, а позже самостоятельно построил такой телевизор (В 60-х годах прошлого века японскими фирмами был выпущен в продажу цветной транзисторный телевизор, работающий по принципу, предложенному Лоуренсом), предложил способ измерения отрезков времени порядка одной миллионной доли секунды и т.д.

Особый интерес Лоуренса вызывало в то время ускорение ионов. Как это сделать? В книге одного из наиболее известных создателей уникальных советских ускорителей Е. Г. Комара «Ускорители заряженных частиц» сопоставляются различные методы ускорения вещества. Действительно, что значит ускорить частицу, придать ей энергию? Это значит увеличить ее скорость. Бросая камень, вы ускоряете заряженные частицы, входящие в атомы камня. Ускорить частицы можно и другим способом, например, выстреливая ими из ружья.

Рассмотрим этот случай. Пусть пуля массой 100 г летит со скоростью 1 км/с. Какова кинетическая энергия пули? Она может быть рассчитана по известной формуле:  $E = mv^2/2 = 100 \cdot 10^{10}/2 \text{ эрг} = 3,13 \cdot 10^{17} \text{ МэВ}$ . Казалось бы, стрельба — идеальный метод для ускорения частиц, поскольку с небольшими затратами мы получили огромную энергию. Однако все обстоит не так просто. Эта колоссальная энергия распределяется между частицами, и энергия каждой частицы в отдельности, определяющая интенсивность ядерных превращений, будет, конечно, ничтожной. Так, на каждый протон такой системы приходится всего 0,005 эВ энергии, чего, естественно, совершенно недостаточно.

А что, если увеличить скорость пули? Скорость стоит в формуле для энергии в квадрате и сильно влияет на уровень энергии. Расчеты, однако, показывают, что увеличение скорости даже до космической

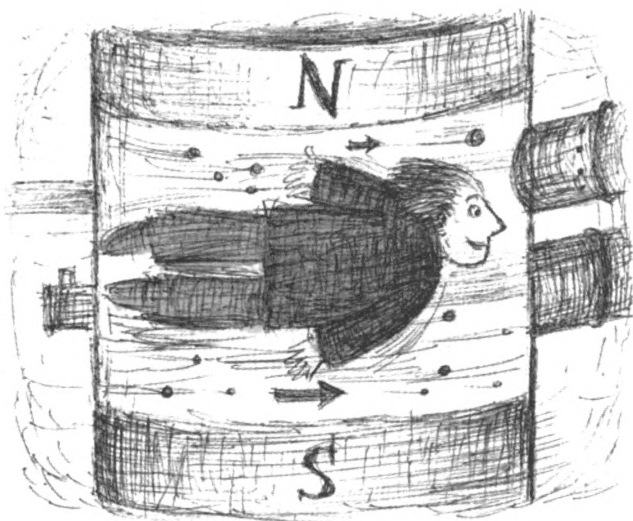
также не приводит к достижению достаточной энергии элементарных частиц.

Может быть, использовать для ускорения частиц идею, положенную в основу работы всех электродвигателей? Пусть у нас будет очень длинный электромагнит — порядка нескольких километров с полем в зазоре около 2 Тл. Если теперь в зазоре этого электромагнита разместить проводник с током, то проводник начнет двигаться. К концу своего движения он может приобрести значительную энергию, если, конечно, не расплавится (чем большее хотим получить ускорение, тем большую плотность тока в проводнике мы должны обеспечить). Это расплавление происходит в обычных проводниках уже при скорости  $10^7$  см/с, его явно недостаточно для ускорения при высоких энергиях.

Вот почему наиболее эффективным методом ускорения заряженных частиц оказывается их ускорение в электрическом поле. Под влиянием разности потенциалов 1 млн В частица приобретает энергию 1 МэВ.

Однажды, занимаясь в библиотеке, Лоуренс прочитал статью немецкого автора о двух вакуумированных трубках, между которыми было электрическое поле. Заряженная частица, перескакивая из трубки в трубку, значительно увеличивала свою энергию.

«А почему бы, — подумал Лоуренс, — не соединить подряд четыре, десять, сто трубок? Тогда мы могли бы в соответствующее число раз увеличить и энергию частицы, может быть, довести ее до такой, которая будет достаточной, чтобы разбить атом?... Наверное, это возможно... Но тогда установка будет очень длинной, может быть, несколько километров в длину... А что, если свернуть эти трубки в спираль? Тогда их можно будет разместить на небольшом пространстве... Но частицы движутся прямолинейно... Как заставить их бежать по спирали? Частицы движутся прямолинейно не всегда: попав в магнитное поле, частицы начинают двигаться по





кругу... Значит, нужно применить магнитное поле — разместить эту спираль из трубок между полюсами магнита...»

Так Лоуренс открыл принцип действия циклотрона. Это открытие оказало сильнейшее влияние не только на жизнь самого Лоуренса, но и на дальнейшее развитие ядерной физики.

Однако идея — это еще не все. И хотя две небольшие модели, построенные Лоуренсом, свидетельствовали о правильности нового принципа, нужно было довести этот принцип до возможности его практического использования. В течение пяти лет Лоуренс вместе со своими студентами работает над проблемами обеспечения сверх-высокого вакуума, создания мощных высокочастотных генераторов, подбора магнита.

Нужно было спешить. Ускорители того времени уже давали протоны с энергией до 0,8 МэВ. Согласно работам Эрнеста Резерфорда и некоторым выводам квантовой механики, протоны с энергией около 1 МэВ должны расщеплять атомы. Честь первым расщепить атом была настолько заманчивой, что за нее с колоссальным энтузиазмом соревновались несколько всемирно известных лабораторий.

Под руководством Резерфорда работали Кокрофт и Уолтон в Кембридже, самые «опасные» для Лоуренса соперники. Манера исследования Резерфорда заключалась в максимальной простоте, изяществе и чистоте опытов.

На горе Дженеросо в Швейцарии европейские физики Браш, Ланж и Урбан для ускорения протонов попытались использовать молнию, что дало бы им сразу весьма значительный перевес, поскольку разность потенциалов, которую можно было получить с помощью молнии, очень велика, и частицы были бы ускорены молнией до 15 МэВ и выше. Исследователи натянули между соседними скалами металлическую сетку. Во время грозы на этой сетке скапливался значительный положительный заряд. Однажды ученым удалось получить искусственную молнию длиной около 5 м. Это означало, что достигнута энергия 10 МэВ. Однако такое достижение обошлось дорого: в результате несчастного случая погиб доктор Урбан...

Тем не менее соревнование продолжалось. И Лоуренс надеялся быть первым. Он всегда улыбался. Он не признавал никаких препятствий: ни финансовых, ни научных, ни технических. Он игнорировал трудности экспериментального и, что гораздо опасней, теоретического характера.

Небольшое деревянное здание, в котором производились первые эксперименты Лоуренса, дало начало грандиозной радиационной лаборатории в Беркли, раскинувшейся на берегу моря на живописных холмах Сан-Франциско, где впоследствии был установлен гигантский фазотрон, на котором сделано одно из волнующих открытий нашего времени — обнаружен антипротон.

«Антимир начинается в Беркли», — с гордостью говорили берклийцы следующих поколений. Но когда Лоуренс приступал к строительству первого циклотрона, у него были только идея, тысяча долларов и уверенность в том, что он все может, уверенность, не такая уж необоснованная для «счастливчика».

Первое, с чего нужно было начать, — сделать магнит. Однако такой традиционный подход потребовал бы слишком много времени, и поэтому Лоуренс купил громадный восьмидесятитонный магнит, залежавшийся на складе и ранее предназначавшийся для не выкупленного заказчиком экзотического радиопередатчика; Лоуренсу удалось приобрести его буквально за гроши.

Отсутствие радиодеталей восполнялось за счет собственных старых радиоприемников, «заимствования» бесхозных приемников и радиодеталей, а то и просто в результате посещения ближайших свалок.

Механические детали физики делали сами или заказывали на небольших заводах. Вакуумная камера первого циклотрона представляла собой сплюснутую в пламени горелки лабораторную колбу.

Помогали Лоуренсу в основном студенты. Это, естественно, не было их основным занятием, а потому все было направлено на то, чтобы изготовить циклотрон как можно быстрее. Очень часто работы велись ночью, и перерыв делался лишь в четыре часа утра, когда уставшие студенты и их руководитель шли перекусить в ближайший ночной ресторан «Белая таверна». Все в лаборатории делалось только бегом. Лоуренс был полон энергии и оптимизма, он не замечал мелких неполадок и ошибок и акцентировал внимание только на успехах. Казалось, что его высокую и плотную фигуру можно было видеть сразу в нескольких местах. Его звали «маэстро» за виртуозность в экспериментах и абсолютно точные и уверенные советы, которые он давал сотрудникам. В то же время Лоуренс стремился, чтобы каждый работал творчески и разделял радость открытия, которое, однако, впоследствии будет приписано только ему одному, великому «маэстро».

В 1932 г. первый в мире циклотрон был построен. Он давал пучок протонов с энергией 1,2 МэВ, т.е. намного превосходящей ту, при которой атомы могли быть расщеплены. Но Лоуренс опоздал...

Кокрофт и Уолтон, ученики Резерфорда, использовав принципиально другой метод исследования и получив пучок с энергией всего лишь 0,7 МэВ, уже добились в Кавендишской лаборатории искусственного расщепления атома...

Это было для Лоуренса жестоким, но полезным уроком. Он решает теперь направить свои усилия на совершенствование циклотрона и увеличение энергии частиц, получаемых с его помощью, прекрасно понимая, что увеличение энергии частиц даст возможность заняться вопросами взаимодействия частиц, открывающими путь к познанию законов атома. Открытие сделано, теперь необходимо добиваться систематических и достоверных результатов. Вот что по этому поводу говорил Дж. Томсон, который, по выражению П. Л. Капицы, «из всех физиков конца прошлого и начала этого века сделал самые фундаментальные открытия (открыл электрон и изотопы)», в своей книге «Воспоминания и раздумья».

«...Обычно не первый шаг в открытии нового физического явления стоит больших денег. Так, открытие Рентгеном X-лучей, или Кюри радия, или продолжительные опыты Ч. Т. Вильсона над образованием капелек на частицах, заряженных электричеством, — все они стоили ничтожные суммы. Открытия, подобные этим, обя-

заны тому, что не может быть куплено, — именно остроте и силе наблюдательности, интуиции, непоколебимому энтузиазму до окончательного разрешения всех затруднений и противоречий, сопутствующих пионерской работе. Когда первоначальное открытие сделано, наблюдаемый эффект очень мал и требует целого ряда длительных опытов для получения достоверных результатов. Вот это стремление добиться большого эффекта и стоит дорого. Это может означать затрату многих тысяч фунтов стерлингов для постройки сильных магнитов, или же для получения электродвижущих сил во много сот тысяч вольт, или же для приобретения больших запасов радия. Но все эти деньги хорошо израсходованы, так как они дают нам возможность добиваться новых знаний гораздо быстрее и с большей достоверностью».

Академик П. Л. Капица сделал по этому поводу такое сравнение: «Когда Колумб отправился в экспедицию, результатом которой было открытие Америки, он ехал на простом маленьком фрегате, на лодчонке, с современной точки зрения. Но чтобы освоить Америку как страну, потребовалось построить большие корабли, как «Лузитания», «Титаник», и это полностью себя оправдало».

Если первый циклотрон Лоуренса стоил 1 тыс. долл., то синхротрон на 6 тыс. МэВ — 3 млн долл., а синхротрон Брукхейвенской лаборатории на 30 тыс. МэВ — уже 34 млн долл. Если при постройке первого циклотрона у Лоренса было всего несколько помощников-студентов, то впоследствии в радиационной лаборатории штат возрос до нескольких тысяч человек.

Сам Лоуренс в свои 38 лет стал одним из признанных великих физиков. Один из его друзей в день получения Лоуренсом Нобелевской премии шутливо телеграфировал ему: «Дорогой Эрнест, ты подаешь некоторые надежды в смысле карьеры...» Это уже из области анекдотов, которые Вольтер сравнил с колосками, остающимися на поле истории, когда урожай уже собран.

Какие же задачи призваны решать столь большие коллективы на этих громадных магнитах, перевозимых в нескольких железнодорожных составах и располагающихся в подземных галереях? В развитии физики XX века можно выделить три этапа: изучение атома, изучение атомного ядра и, наконец, изучение структуры элементарных частиц. Наряду с продолжением второго и первого этапов сейчас ведутся интенсивные исследования на третьем этапе.

Ускорители имеют в этом смысле двоякое значение. Во-первых, при взаимодействии ускоренных частиц с ядрами других элементов возникают новые частицы, еще не известные науке. Во-вторых, ускоренные частицы, согласно представлениям квантовой механики, можно трактовать как волны определенной длины, причем длина волны тем меньше, чем больше энергия ускоренной частицы. Из физики также известно: с помощью любых волн можно «видеть» лишь те предметы, линейные размеры которых больше длины волны. В противном случае волна «не заметит» препятствия. Поэтому для исследования структуры мелких объектов микромира необходимо иметь волны с возможно меньшей длиной, т.е. максимально ускоренные частицы.

Для решения задач, связанных с исследованиями структуры пространства (не обладает ли пространство квантовыми свойствами?) на расстоянии 10—15 см и меньше, а также структуры времени (может быть, и время течет не непрерывно, а некоторыми порциями?) в промежутках, равных 10—25 с и менее, необходимы ускорители частиц на энергию 1 млн МэВ (почти в 1 млн раз больше энергии, полученной Лоуренсом в 1932 г.).

С помощью новых мощных ускорителей ученые надеются разрешить многие вопросы. Почему природа избрала именно водород элементом, из которого синтезированы все остальные? Почему материя устойчива? Почему электрический заряд электрона точно равен противоположному по знаку заряду протона? Почему этот заряд равен именно  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл? Почему протон тяжелее электрона именно в 1846 раз? Не могут ли оказаться гравитационные, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия лишь различными аспектами единой физической реальности?

Существует ли «пятая сила», кроме перечисленных?

Есть ли в природе монополи — частицы, имеющие только один магнитный полюс и эквивалентные электрическим зарядам? Наконец, можно ли обнаружить «бесы» — кварки, из которых, быть может, состоят все «элементарные» частицы? Не может ли время течь в обратную сторону? Все эти вопросы касаются самых глубин нашего миропонимания.

Профессор Роберт Оппенгеймер, в свое время глава американского атомного проекта, не исключал, что в процессе экспериментов на грандиозных ускорителях могут быть сделаны просто потрясающие открытия. Кто сказал, например, что причина всегда предшествует следствию?

«Неизвестно, будет ли иметь смысл традиционное причинное описание событий, т.е. описание, при котором будущее зависит от прошлого непрерывно прослеживаемым образом. В хорошо изученных областях энергии не замечено ничего, что делало бы такие представления о пространстве, времени и причинности неправильными. Высокий уровень энергии запланированных ускорителей поможет разрешить эти вопросы».

Упоенные успехами, Лоуренс и его помощники сразу же после запуска первого циклотрона заложили новую гигантскую машину — «циклотрон-мамонт», «циклотрон-гигант», «циклотрон-монстр». На постройку его были выделены колоссальные средства. Сотни людей участвовали в строительстве.

И вот циклотрон-колосс построен. Мерцающие полированные плоскости его гигантских многометровых магнитов уже готовы к тому, чтобы между ними начал вращаться рой атомных частиц, ускоренных до гигантской по тем временам энергии — 60 млн эВ.

Но что произошло? Почему проектировщики торопливо проходят мимо еще не пущенного гиганта, стараясь не глядеть на него? Почему все разговоры о машине, сожравшей миллионы, встречают холодное молчание?

При уточнении расчетов выяснилось, что вся эта масса металла бесполезна — лоуренсовский циклотрон в силу присущих ему осо-

бенностей и в соответствии с неумолимой теорией относительности в принципе не может давать частицы энергией выше 25—30 МэВ.

Масса любой частицы возрастает при приближении скорости частицы к скорости света. Но частица с большей массой менее подвижна — она начинает отставать от частиц с меньшей энергией и запаздывает к ускоряющему промежутку, т.е. попадает к нему в тот момент, когда ускоряющее электрическое поле мало или направлено навстречу частице и тормозит ее. Все попытки вырваться из этого порочного круга были тщетны...

...Ненужный многотонный магнит несостоявшегося рекордного циклотрона пылился в лаборатории уже более четырех лет, когда появились статьи советского физика Владимира Векслера, где впервые была высказана идея «автофазировки», с помощью которой можно теоретически безгранично повышать энергию частиц, получаемых в ускорителях. Может быть, только физики в состоянии оценить эстетическую сторону этого нового принципа. Частицы сами по себе, повинувшись влиянию электрического поля изменяющейся частоты, приходят к ускоряющему промежутку как раз в тот момент, когда это необходимо — ни на мгновение раньше, ни на мгновение позже.

Те самые исторические три статьи, подписанные до того неизвестным именем — В. И. Векслер — появились в 1944 г. в журнале «Доклады Академии наук СССР». Эти статьи открыли новую эпоху в создании ускорителей.

«Нельзя ли использовать это «вредное» для циклотрона нарастание массы частиц при увеличении их скорости в наших целях? — писал Векслер. — Иными словами, нельзя ли создать такие условия, при которых период обращения частиц, по крайней мере в среднем за много оборотов, автоматически поддерживался бы всегда равным периоду ускоряющего переменного поля именно за счет возрастания энергии частиц? Если бы нам удалось осуществить это требование, то очевидно, что важный для ускорения резонанс мог бы сохраняться сколь угодно долго, т.е. можно было бы ускорять частицы до сколь угодно больших энергий».

Идея Векслера сводилась к тому, чтобы при росте массы частиц повышалось и магнитное поле, что уменьшало бы радиусы их орбит: «При каждом прохождении через щель частицы испытывают разное приращение массы (и соответственно разное приращение радиуса, по которому их заворачивает магнитное поле) в зависимости от напряжения поля между дуантами в момент ускорения данной частицы. Оказывается, что среди всех частиц имеются такие выделенные «удачливые» частицы (они обычно называются равновесными). Для этих равновесных частиц механизм, автоматически поддерживающий постоянство периода обращения, особенно прост.

«Удачливые» частицы при каждом прохождении через щель дуантов испытывают приращение массы и увеличение радиуса окружности. Оно точно компенсирует уменьшение радиуса, вызванное приращением магнитного поля за время одного оборота. Следовательно, «удачливые» (равновесные) частицы могут резонансно ускоряться до тех пор, пока происходит возрастание магнитного поля».

Удивительна, почти неправдоподобна судьба академика В. И. Векслера. Семи лет, в начале первой мировой войны, остался он без отца, погибшего на фронте, и в 1921 г. во время голода на Житомирщине, страшной разрухи, навсегда бросил свой сиротский дом и один, без денег оказался в Москве. Он становится беспризорником. Ночует, греясь у асфальтовых чанов, на Хитровом рынке. Во время одной из облав его забирает милиция и направляет в детский дом имени Коминтерна, в дом-коммуну, устроенную в старинном, покинутом хозяевами особняке в Хамовниках. (Заметим походя, что некоторые биографы Векслера видят описанные выше события его жизни в более розовых тонах.)

В том доме поселились 25 бывших беспризорных. Жизнь их была строго регламентирована: ранний подъем, кухонные работы, уборка, завтрак, школьные занятия, обед. Вечером в коммуне работали всевозможные кружки. После ужина в точно обусловленное время — сон. В доме-коммуне царили свои законы. По всем вопросам жизни решение принимали на общем собрании, и оно не подлежало обсуждению, критике и обжалованию.

Здесь, в коммуне, Владимир Векслер необычайно увлекся физикой и однажды поразил своих друзей тем, что сам построил детекторный радиоприемник.

Он оказался прирожденным общественником, всегда был впереди, не пропускал ни одного культурного мероприятия, ни одного посещения театра; он — активный участник антирелигиозной пропаганды, всевозможных коллективных выходов, работ на общественных огородах.

Владимир довольно прилично окончил школу и в 1925 г. был отправлен Хамовническим райкомом комсомола Москвы электромонтером на фабрику имени Свердлова. Там он проработал более двух лет и, разумеется, отлично проявил себя как с производственной, так и с общественной стороны. Завод дал ему комсомольскую путевку в институт. В то время шла кампания по совершенствованию вузовской работы, полная всяческих перемен и реформ, частых изменений программ и профилей обучения. Так и получилось, что В. И. Векслер, поступив на очное отделение Плехановского института народного хозяйства, окончил в конце концов экстерном в 1931 г. Московский энергетический институт, получив диплом инженера-электротехника. Его узкой специальностью стало рентгеновское оборудование.

К этому времени он работал во Всесоюзном электротехническом институте, в лаборатории рентгеноструктурного анализа, где разрабатывал методы измерения ионизирующего излучения, собственными руками изготавливая нужные установки. Один из его учеников вспоминал впоследствии: «Почти 20 лет он сам собирал, монтировал различные придуманные им установки, никогда не чураясь любой работы. Это позволило ему ясно видеть не только фасад современной физики, не только ее идейную сторону, но и все, что скрывается за окончательными результатами, за точностью измерений. Весьма характерно, хотя это и не единственный в истории науки пример, что один из крупнейших современных физиков по образованию инженер.

Правда, к В. И. Векслеру не следует подходить с обычной меркой. Формальный образовательный ценз для него очень мало значил. Он всю жизнь учился и переучивался. И до самых последних лет жизни, вечерами, в отпуске, он тщательно изучал и конспектировал теоретические работы. Многократные длительные поездки из Дубны в Москву он также использовал для бесед на научные темы и учебу.

В 1936 г. в жизни Векслера произошло важное событие. Им заинтересовались молодые сотрудники Физического института Академии наук (ФИАН) И. М. Франк, П. А. Черенков, Л. В. Грошев. И вот И. М. Франк предложил ему сделать доклад на семинаре, потом Векслера пригласили к С. И. Вавилову, последовало обучение в докторантуре ФИАН.

Поначалу Векслер занялся космическими лучами, потом пришлось заняться лоуренсовским циклотроном. Построить циклотрон, подобный лоуренсовскому, оказалось делом нелегким. Хотя уже в середине 1930-х годов циклотрон с диаметром полюсных наконечников примерно в метр, как у Лоуренса, был создан в Ленинграде, только к 1940-му году, благодаря кипучей энергии И. В. Курчатова и его коллег, удалось запустить в работу первую в Европе «атомную дробилку», как тогда называли циклотрон. Вавилов понимал, что глубокие исследования в области ядерной физики невозможны без постройки мощного ускорителя. Уже в то время он предложил создать самый крупный в мире ускоритель, диаметр полюсных наконечников которого должен был составить несколько метров. Многим и через тридцать лет такое смелое решение казалось невероятным. Но оно было принято и начало воплощаться в жизнь. Была укомплектована циклотронная бригада. В нее вошли В. И. Векслер, С. Н. Вернов, Л. В. Грошев, П. А. Черенков и Е. Л. Фейнберг. Тут же П. А. Черенков и С. Н. Вернов стали изготавливать модель будущего циклотрона. Подобрали магнит, еще небольшой, с диаметром полюсов около тридцати сантиметров, тщательно обработали полюсы. Продолжение этих работ помешала война.

Вновь эта идея возникла в 1943 г., когда для осуществления советской атомной программы потребовалось создать мощный ускоритель, настолько мощный, что принцип циклотрона Лоуренса уже не годился. Полностью идея нового ускорителя созрела у Векслера на рубеже 1944 г. Уже в начале 1944 г. С. И. Вавилов собрал в своем директорском кабинете экстренное заседание Ученого совета. Там Векслер сделал свое сообщение. Обсуждение было бурным. Предложение Векслера казалось фантастическим, нереализуемым. Но — физически неуязвимым...

«Сотрудников В. И. Векслера, — вспоминает профессор М. С. Рабинович, — всегда поражала его не столько потрясающая работоспособность, сколько не знающая удержу фантазия. Беседуя со своими учениками, он часто говорил: «У меня есть некоторая идея, которую я хотел бы обсудить». Начинался жаркий спор. Идея подвергалась ожесточенной критике. Температура дискуссии быстро поднималась. Все присутствующие изо всех сил старались опровергнуть новое предложение. Спор продолжался и в следующие дни. Иногда, чтобы разобраться, требовалась большая теоретическая работа. После такой

работы спор продолжался. На возражения следовали контрвозражения. Для нас — учеников В. И. Векслера — такой метод разработки различных физических идей явился превосходной школой. Она много давала, но одновременно и много требовала. Не каждый мог выдержать такую работу в течение многих лет, но можно назвать многих ученых, которые прошли подобную школу идей у В. И. Векслера. Многие из его учеников сами в настоящее время стали руководителями больших коллективов научных сотрудников».

Больше всего В. И. Векслер любил работать с молодежью, особенно с молодыми теоретиками. И это понятно. При бурной творческой работе у В. И. Векслера возникало много идей, иногда были и неправильные, но большей частью весьма интересные и настолько на первый взгляд необычные, фантастические, что они вызывали у многих физиков, привыкших к традиционному, медленному, «солидному» движению по дороге науки, возражения, порой даже насмешку и нежелание спорить по существу. К сожалению, некоторые даже очень хорошие физики настороженно встретили его самую блестящую идею — принцип автофазировки, который привел к принципиально новым методам создания ускорителей заряженных частиц. Поэтому В. И. Векслеру было проще с молодежью, которая только выработывала свой стиль работы.

Идея автофазировки понравилась Л. Н. Мандельштаму, статьи В. И. Векслера были молниеносно переведены на английский язык (несколько позже аналогичное предложение выдвинул американец Э. М. Макмиллан).

Наконец-то Лоуренс смог возобновить работы на заброшенном циклотроне, и уже через несколько месяцев на нем были получены частицы с энергией 500 (!) МэВ. По это был уже не циклотрон, а совершенно новая машина — синхроциклотрон.

Однако, прежде чем перейти к описанию этой новой машины, обратимся к некоторым физическим явлениям, лежащим в основе процесса ускорения заряженных частиц.

Лоуренс первым использовал магнитное поле для возвращения частиц к одним и тем же ускоряющим промежуткам. Известно, что любая заряженная частица, двигаясь в магнитном поле, будет двигаться по окружности. В двух точках такой окружности Лоуренс расположил ускоряющие промежутки. Вот для этого Лоуренсу и понадобился старый магнит, завалявшийся на складе Калифорнийского университета.

С ростом энергии частиц, получаемых в ускорителе, увеличивается радиус орбит, по которым вращаются частицы, а вместе с ним и диаметр магнитов. Поэтому-то самые большие магниты в мире — это магниты ускорителей.

Заряженная частица подвержена в циклотроне влиянию двух сил: центробежной, которая стремится «выбросить» частицу из циклотрона, и центростремительной лоренцевой силы, которая заставляет частицу двигаться по окружности. Если в какой-то точке орбиты напряженность, скажем, резко падает до нуля, частица в этой точке, не сдерживаемая лоренцевой центростремительной силой, выскочит из циклотрона.



Исходя из этих соображений, напряженность поля по орбите циклотрона устанавливают строго постоянной. Равенство центробежной и центростремительной сил на равновесной орбите обеспечивает так называемую горизонтальную устойчивость частицы. Что это значит? Предположим, что частица под влиянием каких-либо сил перешла с равновесной орбиты на орбиту большего радиуса. В этом случае лоренцева центростремительная сила будет больше центробежной, и в результате частица начнет смещаться в сторону орбиты меньшего радиуса до тех пор, пока не достигнет равновесной орбиты. При уменьшении радиуса орбиты частицы наблюдается обратная картина.

А что случится, если частица перейдет на более низкую или более высокую орбиту? Если полюсные наконечники магнита параллельны друг другу и магнитные силовые линии, которые должны быть перпендикулярны к стальным поверхностям, представляют собой параллельные прямые, то при смещении орбиты вверх или вниз частица не «заметит» каких-либо изменений в магнитном поле. Все орбиты — средняя, более низкая и более высокая — будут для частицы равноценными, что приведет в конце концов вследствие неидеальности изготовления поверхностей полюсов к тому, что частицы «потеряются» в полюсах магнита.

Чтобы этого не произошло или, как говорят, для обеспечения «вертикальной устойчивости» или «вертикальной фокусировки» движения частицы, полюсы магнитов скашивают так, чтобы зазор к краю полюса становился больше. В действительности, однако, скашивают не сами полюсы, а магнитные крышки вакуумной камеры, в которой происходит ускорение.

В этом случае поле магнита ускорителя изменится: если непосредственно под центром полюса силовые линии по-прежнему будут прямыми, перпендикулярными плоскостям полюсов, то на внешнем крае полюса силовые линии будут выгибаться наружу, образуя так называемое бочкообразное выпучивание силовых линий. Бочкообразное магнитное поле характерно тем, что на его «экваториальном облуче» поле минимально, а с продвижением вверх или вниз оно увеличивается. Частица, движущаяся в таком поле, не может «упасть» на полюс магнита, так как в этом случае ей пришлось бы перейти из области со слабым полем в область с сильным полем, т.е. затратить некоторую энергию.

Сам полюс имеет коническую форму, поскольку по высоте полюса от него отпочковываются магнитные силовые линии потока рассеяния. Таким образом, чем дальше идти вдоль полюса от рабочей зоны, тем больший магнитный поток по нему проходит.

Что было бы, если бы полюс был цилиндрическим, а его сечение постоянным по высоте? В этом случае индукция в полюсе в его части, близкой к рабочей зоне ( $B = \Phi/S$ , где  $\Phi$  — магнитный поток;  $S$  — сечение пути магнитного потока), была бы очень низкой, а вдали от рабочей зоны — чрезмерно высокой. Получилось бы, что полюс в различных его сечениях загружен по-разному и, главное, неразумно. Чтобы этого не происходило, полюсам придают коническую форму. Тогда меньшему потоку будет соответствовать меньшее сече-

ние, и индукция во всех сечениях станет одинаковой, а полюс равномерно нагруженным. Стараются сделать так, чтобы индукция в полюсе была равна индукции в рабочей зоне, т.е. 1,4—1,7 Тл.

Почему нельзя выбрать большую индукцию? В принципе это возможно, однако при более высокой индукции сердечник магнитопровода будет сильно насыщен, и чтобы провести по нему магнитный поток, потребуется большой намагничивающий ток. Кроме того, если полюсы насыщены, трудно обеспечить нужное распределение магнитного поля в рабочей зоне.

Конические полюсы электромагнита циклотрона чаще всего изготавливают из одной стальной поковки. На полюсах закрепляют главные катушки, создающие сильное магнитное поле. Их обычно изготавливают из толстой (сечением 50—100 мм<sup>2</sup>) медной или алюминиевой шины с отверстием внутри для охлаждающей воды.

Кроме основной в циклотронах имеется дополнительная обмотка, расположенная около зазора. Она состоит из двух катушек, размещенных вблизи среза полюса. Эти катушки предназначены для «нацеливания» частиц на мишень, иными словами, для регулирования высоты плоскости, по которой движутся частицы в циклотроне. Эта плоскость, вопреки ожиданиям, обычно находится не посередине между полюсами из-за различных случайных факторов. Сейф, стальная дверь, баллон с газом, оказавшиеся поблизости, могут вызвать смещение средней плоскости.

Один из крупнейших электромагнитов описанного типа установлен в синхроциклотроне на 660 МэВ в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Диаметр полюсов этого магнита 6 м, масса 7 тыс. т. Несколько уступает ему в размерах синхроциклотрон в Беркли. Магнит в Дубне и по сей день остается самым крупным по размерам электромагнитом в мире.

Массу магнитов (т) циклотронов можно подсчитать по приближенной формуле  $G = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot r^{2,5}$ , где  $r$  — радиус полюса, см.

Масса обычных магнитов ускорителей составляет несколько тысяч тонн. Магниты циклотронов и, следовательно, сами циклотроны — это громадные и дорогостоящие сооружения. Их обычно размещают в специальных корпусах, огороженных бетонными стенами толщиной несколько метров, которые служат защитой от излучения. Поворотные двери также делают из бетона.

Циклотроны применяют в основном для научных исследований. Однако в последнее время они служат и для получения радиоактивных изотопов, необходимых промышленности и сельскому хозяйству. Сейчас в ряде стран имеется несколько циклотронов, на которых не проводят никаких научных исследований. Эти атомные машины играют роль своеобразного технологического оборудования фабрики, производящей изотопы.

Оказывается, есть предел энергии частиц, ускоряемых в циклотроне. Его диктует теория относительности. Известно, что масса любой частицы в соответствии с теорией относительности возрастает по мере приближения скорости частицы к скорости света. Но частица с большой массой менее «поворотлива»: она начинает отставать от частиц с меньшей энергией и запаздывает к ускоряю-

шему промежутку, т.е. попадает туда в тот момент, когда ускоряющее электрическое поле мало или направлено навстречу частице.

По расчетам верхний предел энергии протонов, получаемых в обычном циклотроне, равен 25 МэВ. Чем больше напряженность магнитного поля, тем больше оборотов делает заряженная частица в единицу времени. Возникает вопрос: нельзя ли сделать так, чтобы от центра к краю полюсов магнитное поле увеличивалось? Тогда приращение массы и, следовательно, «неповоротливость» частицы с ростом ее энергии могли бы быть скомпенсированы, а энергия частиц, получаемых в циклотроне, увеличена.

Но в циклотронах делают наоборот: магнитное поле к краю полюса снижают, осуществляя этим вертикальную фокусировку. Как примирить эти противоположные требования? Как одновременно иметь вертикальную фокусировку и увеличить поле от центра полюса к периферии?

Этой задачей интересовались давно. Еще в 1938 г. американский ученый Томас предложил формулу, в соответствии с которой должно изменяться магнитное поле в зазоре циклотрона с тем, чтобы эти два условия обеспечивались одновременно. Однако форма полюса при этом оказалась чересчур сложной. Поэтому идея «изохронного» циклотрона имела в то время немного приверженцев.

Со временем положение изменилось. Инженеры-физики предложили вместо сложных полюсов Томаса использовать обычные цилиндрические полюсы, покрытые стальными накладками простой формы. Как выяснилось, такие накладки обеспечивают одновременное нарастание поля по радиусу и вертикальную фокусировку. Для коррекции поля в зазоре изохронного циклотрона обычно применяют сложную систему концентрических и секторных корректирующих обмоток и накладок.

Изохронные циклотроны позволяют повысить энергию частиц, получаемых на ускорителях этого типа, до 700—800 МэВ. Дальнейшее увеличение энергии — довольно сложная проблема, так как по технологическим причинам трудно точно выдержать все требования к конфигурациям магнитного поля циклотронов столь высоких энергий.

В синхроциклотронах, или фазотронах, установлены аналогичные магнитные системы с тем лишь отличием, что частота ускоряющего напряжения по мере возрастания энергии частиц уменьшается; это позволяет отяжелевшим частицам вовремя проходить ускоряющий промежуток. Такое изменение частоты эквивалентно изменению поля в изохронном циклотроне. Предел энергии частиц, получаемых в синхроциклотронах, также составляет 700—800 МэВ. Магниты циклотронного типа устанавливаются и на микротронах, которые служат для резонансного ускорения электронов в электрическом поле высокой частоты. В магнитах микротронов обычно используется магнитное поле примерно в 10 раз меньшее, чем в циклотронах.

В силу различных причин физического и технического характера (о некоторых из них мы уже говорили) невозможно создать обычные циклотроны с энергией выше 25 МэВ, а изохронные циклотроны и синхроциклотроны с энергией выше 800 МэВ. Однако имеются еще

экономические факторы, ограничивающие создание сверхмощных ускорителей. Подсчитаем, например, массу циклотронического ускорителя на энергию 10 тыс. МэВ или 10 ГэВ. Если магнитное поле на конечной орбите составит 1,45 Тл, то ее радиус должен быть примерно равным 25 м. Подставив это значение в приведенное ранее выражение для массы магнита  $G = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot r^{2,5}$ , получим, что масса такого магнита составляет 1,5 млн т. Сама постановка вопроса о построении такого магнита была бы беспредметной.

Почему это происходит? Почему циклотрон на большую энергию имеет такую большую массу? Первая причина, очевидно, заключается в том, что мы выбрали небольшое магнитное поле. Если бы удалось это поле в несколько раз повысить, во столько же раз можно было бы снизить радиус и во столько же в степени два с половиной раза снизить массу магнита. Однако значительно повысить магнитное поле в циклотронах нельзя, так как сталь будет сильно насыщаться.

Другая причина, вызывающая необходимость столь большой массы магнита, объясняется самим принципом работы циклотрона. Поскольку его магнитное поле постоянно во времени, частица, приобретающая в ускоряющем промежутке очередную «порцию» энергии, движется по орбите большего радиуса, и траектория ее движения напоминает спираль. Именно эта спиралевидность орбиты вынуждает иметь в циклотроне полный набор орбит различных радиусов — от нуля до радиуса конечной орбиты.

Однако, видимо, нет неизбежной необходимости иметь в ускорителе полный набор орбит различных радиусов. Если бы магнитное поле в ускорителе с ростом энергии частиц менялось, то, согласно формуле  $r = mv/H$ , радиус орбиты мог бы оставаться всегда постоянным. Для этого нужно лишь обеспечить закон изменения магнитного поля магнита во времени, приближающийся к закону изменения во времени энергии частиц. В этом случае стало бы возможным вместо цилиндрических полюсов оставить узкое кольцо по краю полюса, а сердцевину полюса убрать вообще. Такие ускорители позволяют при относительно небольшой (по сравнению с гипотетическим циклотроном на ту же энергию) стоимости получать пучки частиц с колоссальными энергиями.

Кольцевые ускорители были главным достижением создателей ускорительной техники после Лоуренса и Векслера. Природа давно оценила преимущества трубчатых конструкций. Распилите кость — она внутри полая. Если бы она не была пустотелой, она была бы тяжелее, но не прочнее. И природа выбрала инженерно правильное и, следовательно, эстетически безупречное решение.

Кольцевой ускоритель — это ускоритель Лоуренса и Векслера, у которого вынута сердцевина полюса магнита и оставлено лишь узкое кольцо. Масса магнита снижается при этом в сотни раз, а ускоритель приобретает правильные, почти архитектурные формы. Красота этого решения — в глубочайшей технологической целесообразности.

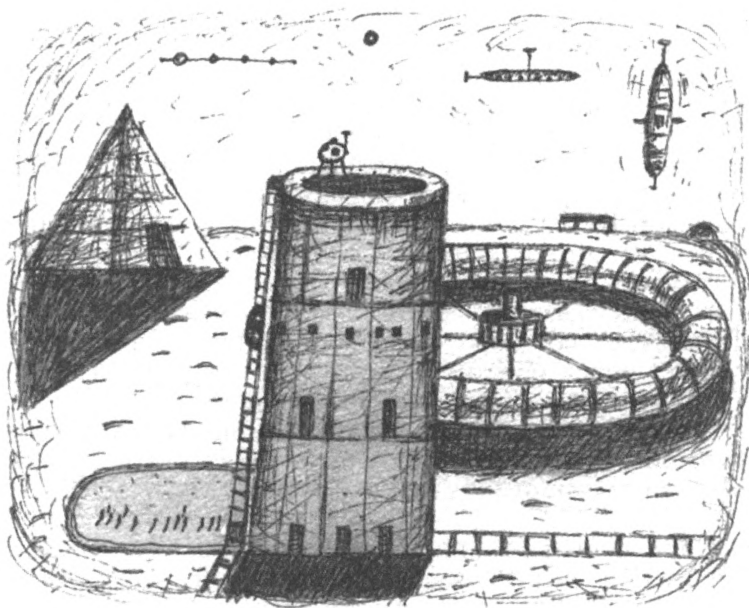
Кольцевые ускорители включают синхротроны и синхрофазотроны — самые крупные и дорогостоящие физические приборы, когда-либо находившиеся в распоряжении человека. Диаметр кольце-

вых магнитов таких ускорителей равен нескольким километрам, магнитная система кольцевых ускорителей обычно состоит из нескольких отдельных секторных магнитов, составляющих в плане кольцо. Между этими секторными магнитами находятся ускоряющие промежутки. Стоимость магнитов синхротронов и синхрофазотронов (между этими двумя типами ускорителей различие невелико) составляет около половины стоимости всего синхротрона.

Как осуществляется вертикальная фокусировка в синхротронах? Принцип тот же, что и в циклотронах: магниты изготавливают так, чтобы магнитное поле на внешнем радиусе было меньше, чем на внутреннем. Тогда каждая частица, вышедшая из серединной плоскости, испытывает со стороны бочкообразного поля силы, заставляющие ее вернуться обратно. Такую фокусировку называют мягкой. На синхротронах с мягкой фокусировкой можно получить энергию примерно до 15 тыс. МэВ. По-видимому, дубнинский синхрофазотрон был и остается крупнейшей в мире установкой подобного типа (энергия частиц 10 тыс. МэВ, масса магнита 36 тыс. т).

Почему при использовании мягкой фокусировки нельзя достичь больших значений энергии частиц? Дело в том, что с увеличением энергии частиц должен, естественно, расти и радиус ускорителя. Это увеличение радиуса происходит в соответствии с формулой  $E = 300 \cdot H$ , где  $E$  — энергия, эВ;  $H$  — напряженность магнитного поля, Э. Но чем больше радиус, тем больше амплитуда колебаний частицы вокруг своей равновесной орбиты. Сбить частицу с орбиты могут случайные молекулы газа в вакуумной трубке, флуктуации ускоряющего напряжения и частоты. В связи с этим рабочую зону (апертуру пучка) приходится увеличивать, чтобы частица не потерялась в металле магнита во время своего пути, составляющего в ускорителе примерно 0,5 млн км. Это обходится очень дорого. Так, масса ускорителя на 30 тыс. МэВ с мягкой фокусировкой составила бы 100 тыс. т. Чтобы свести к минимуму всякие колебания частицы вокруг равновесной орбиты и снизить сечение пучка, нужно ввести более жесткую фокусировку, т.е. заставить частицы как можно меньше отходить от своей равновесной орбиты.

Как это сделать, никто не знал. Решение проблемы было выдвинуто группой физиков Брукхейвенской лаборатории в составе Куранта, Ливингстона, Снайдера. Ливингстон как-то предложил рассчитать, как поведет себя частица, ускоряемая в системе из нескольких магнитов, если в каждом следующем магните будет меняться направление, в котором поле снижается. Расчет на электронной машине показал, что частица в этом случае движется по стабильной орбите и, кроме того, подвергается сильным фокусирующим усилиям. В том секторе, где полюсы наклонены внутрь, осуществляются сильная вертикальная фокусировка и горизонтальная дефокусировка; в следующем секторе, где полюсы наклонены наружу, фокусировка обратная. Эффект в целом заключается в том, что при определенном расположении секторов пучок сильно фокусировался, и отклонение частиц от равновесной орбиты было очень небольшим. Действие магнитов равнозначно в этом смысле действию двух линз вогнутой и выпук-



лой, которые, будучи поставлены одна за другой, дают в целом эффект собирания лучей. Эта идея оказалась очень плодотворной. На ее основе построены все крупнейшие ускорители. На принципе жесткой фокусировки работает и Серпуховский ускоритель протонов на 76 ГэВ.

В основу постройки крупнейшего в мире ускорителя 1960-х годов — Серпуховского — были положены идеи В. И. Векслера. Пучок протонов, разогнанный в этом исполинском ускорителе, достиг энергии 76 ГэВ (миллиардов электрон-вольт!). Под стать этой грандиозной энергии и сам ускоритель.

Этот синхротрон стал базой физического института, размещенного в Серпухове, — Института физики высоких энергий (ИФВЭ). Здесь были получены важнейшие научные результаты: открыт новый в физике высоких энергий тип симметрии — масштабная инвариантность, положенная теперь в основу теории сильных взаимодействий на малых расстояниях с участием кварков — так называемой квантовой хромодинамики. В Серпухове открыт и новый физический эффект сложной природы, описывающий поведение сталкивающихся частиц, — «серпуховский эффект».

Ученые США не остались в долгу и начали строить свой, еще более мощный ускоритель. В этом, может быть, сыграл свою роль «эффект подстегивания», о котором остроумно рассказывал академик Л. А. Арцимович: «Делегация ученых великой державы А, возвращаясь после поездки в великую державу Б, докладывает:

— По богатству идей, глубине понимания научных проблем и квалификации научных кадров мы не только не уступаем нашим зарубежным коллегам, но даже стоим впереди них. Однако там не пожалели денег, и они смогли построить новую замечательную уста-

новку  $X$ , и если мы немедленно не начнем строить уже давно задуманную нами установку  $Y$ , то почти сразу же окажемся в жалком и отчаянном положении.

Вслед за этим делегация державы  $B$  возвращается из державы  $A$  и декларирует:

— Мы, конечно, в идейном отношении гораздо выше их, но нельзя ждать ни одного часа более. Они уже приступают к строительству установки  $Y$ , и если мы прозеваем, то через несколько лет нам стыдно будет показаться на любой научной конференции. Поэтому надо немедленно строить установку, которая во столько же раз мощнее установки  $Y$ , во сколько последняя превосходит нашу старую машину  $X$ . И так далее...»

(Интересно, что сейчас, после завершения «холодной войны», эта логика получила весьма характерное продолжение — и Россия, и Соединенные Штаты отказались от постройки сверхмощных ускорителей, даже уже запланированных. Так, несмотря на уже понесенные расходы в 2 млрд (!!!) долл., в 1993 г. прекращено строительство сверхпроводникового суперколлайдера в Техасе. Проект был необычайно амбициозным — уже прорыты были подземные туннели длиной около 15 км. Стоимость ускорителя приближалась к 12 млрд долл. и уже соперничала со стоимостью всей космической программой США. С падением СССР и ненужностью более доказывать преимущества американской науки и сам ускоритель стал ненужным. Его туннели, правда, пригодились при съемках фильма с Жан-Клодом Ван Даммом «Универсальный солдат». Выжил лишь один такой проект: самый мощный в мире ускоритель — большой европейский адронный коллайдер ценой почти в 10 млрд долл., запущенный ЦЕРНом в мае 2008 г. Энергия столкновений его частиц должна была быть столь большой, что породила опасения о том, выживет ли после этих экспериментов сама Земля — повторение опасений, связанных с первым экспериментальным взрывом атомного оружия. Это и неудивительно — на ускорителе, где будут воспроизведены условия, близкие к имевшим место после «Большого взрыва», породившего Вселенную, ученые надеются прояснить вопросы, связанные, например, с возможностью путешествия во времени (как в романе Карла Сагана и фильме «Контакт»).

Для создания жесткой фокусировки в серпуховском и подобных ему ускорителях поставлены друг за другом секции магнитов с разным направлением спада поля; если в первом магните поле спадает по направлению к внешнему радиусу (вертикальная фокусировка), то в следующем магните оно спадает к центру, уменьшая сечение пучка в горизонтальном направлении. В результате сечение пучка и, следовательно, размеры рабочей зоны магнита становятся меньше, что позволяет увеличить энергию частиц без существенного утяжеления магнита.

Принцип жесткой фокусировки стал широко применяться не только в ускорителях. Например, для фокусировки пучка и подачи его к столу экспериментатора широко используются поворотные магниты и квадрупольные линзы, работающие на этом принципе.

Создание ускорителей с жесткой фокусировкой позволит увеличить энергию получаемых частиц при снижении массы магнитной системы. Однако и в этом случае строительство синхротрона будет под силу лишь экономически мощным государствам. Решение вопроса о строительстве такой машины возможно только в государственном масштабе, как, например, вопрос о строительстве нового города. Сравнение с городом здесь не случайно — рядом с ускорителем неминуемо вырастет научный центр с целым городом ученых, технического персонала и т.п.

Один из таких новых городов вырос в Батавии, недалеко от Чикаго, в США. Там в «Фермилаб» — лаборатории Ферми — построен протонный синхротрон на 500 ГэВ.

Неудивительно, что идея нового ускорителя родилась в Радиационной лаборатории имени Лоуренса, где был построен первый циклотрон. Предварительный эскизный проект синхротрона на 200 ГэВ был разработан инженерами-физиками в Беркли еще в 1960-годах, когда определялось направление следующего этапа работ США в области физики высоких энергий. Несмотря на успехи ускорительной техники, обнадеживающие результаты экспериментов на крупных ускорителях, ряд коренных вопросов строения материи продолжает волновать неутоленное воображение ученых. Все эти вопросы «прекрасного, но все еще загадочного мира», возможно, могли бы быть решены в процессе экспериментов с соударениями частиц, еще более энергичных, чем те, которые получают с помощью наиболее мощных синхротронов, включая даже Серпуховский. Кроме того, путешествие в мир столь экзотических энергий могло бы привести к весьма неожиданным открытиям. Настойчивость физиков привела к тому, что конгресс США одобрил в 1967 г. ассигнования в 250 млн долл. на постройку «малого варианта» нового ускорителя («большой вариант» стоил бы 350 млн долл.). Из 125 мест, предложенных для постройки ускорителя, была выбрана плоская местность Кун-Холлоу вблизи Батавии в штате Иллинойс площадью 10 квадратных миль. Для постройки и эксплуатации будущего ускорителя была создана Исследовательская ассоциация университетов. Так возникла база для будущей Национальной ускорительной лаборатории США, директором которой был назначен Роберт Вильсон. Это он впоследствии рассказывал о драматических событиях постройки уникального ускорителя.

Получив 250 млн долл., Вильсон и его новые сотрудники решили сделать ускоритель не на 200 ГэВ, как было запланировано, а сразу на 500 ГэВ. Отважные участники встречи 15 июня 1967 г. на месте постройки будущей машины решили построить ускоритель всего за пять лет (в этот день они не знали хотя бы приблизительно даже диаметра будущего ускорителя).

Вообще говоря, диаметр ускорителя для получения большей энергии целесообразно было делать возможно большим, и поэтому его, казалось, должен был бы определить размер заданного участка. Однако стоимость ускорителя тем больше, чем больше диаметр магнитов, а она ограничена сверху ассигнованной суммой. Если задаться желаемой энергией частиц, то диаметр будет определяться уже тем макси-



мальным магнитным полем, которое удастся обеспечить, и расстояниями между поворачивающимися магнитами.

Был выбран диаметр, равный ровно 2 км. Часть окружности, примерно четверть ее, должна была быть освобождена для устройства ввода и вывода протонного пучка, ускоряющих и измерительных устройств. Тогда при магнитном поле 1,8 Тл можно было бы достичь энергии 400 ГэВ, а при магнитном поле 2,25 Тл — 500 ГэВ.

Такое магнитное поле и даже значительно большее в принципе можно было бы довольно легко получить при помощи сверхпроводящих магнитов. Однако проектировщики решили не рисковать и остановились на хорошо освоенных электромагнитах со стальным сердечником.

Важным параметром магнитов, определяющим их стоимость, является, как мы видели, апертура — рабочее пространство между полюсами магнита. Чем больше апертура, тем легче предотвратить рассеяние протонов на стенках камеры из-за их взаимного электростатического отталкивания и неточного «прицеливания». Большая апертура, однако, — это серьезное возрастание затрат на материалы сердечника и обмоток, на земляные работы (туннель становится шире и выше), на радиационную защиту и электроэнергию, затрачиваемую в обмотках. Точно рассчитать увеличение надежности работы ускорителя за счет увеличения апертуры вряд ли возможно, и проектировщики остановились на значении, подсказанном опытом и интуицией. Для примененной системы жесткой фокусировки был выбран зазор между полюсами 5 см и ширина полюсов 10 см на одной стороне магнитов и, соответственно, 3,8 и 12,5 см — на другой. Интересно обратить внимание на очевидную «нерасчетность» этих цифр (особенно если перевести их в дюймы), так же как и на случайный размер диаметра (2 км).

В результате расчетов, проведенных на основе учета приведенных данных, длина каждого из 660 поворачивающихся магнитов (каждый массой 11 кг) оказалась равной 6,5 м, высота — 30 см и ширина — около 80 см. 180 фокусирующих магнитов имеют длину 2,3 м, весят каждый по 5 т. Функции поворота и фокусировки здесь, как мы видим, разделены.

Крайне упрощена была система питания магнита. Вместо надежной, но дорогостоящей системы мотор-генераторов, дающей постоянный ток, здесь была установлена система мощных селеновых выпрямителей для выпрямления обычного трехфазного тока из сети. Крайне упрощен и фундамент — он не имеет бетонных опор, покоящихся на скальном основании. Возможные в этом случае перекосы магнитов снимаются специальными юстировочными устройствами. Сам туннель составлен из стандартных бетонных секций, установленных на не очень мощном бетонном монолите.

И все же вся эта затея была, по выражению ее авторов, «бравადой». Некоторая доля риска и самонадеянности была социально обусловлена — нужно было привлечь к делу нужных людей. То, что эта идея в конце концов осуществлена и крупнейший в мире ускоритель заработал, — результат сочетания интуиции, осторожной смелости и упорства физиков и инженеров, случайного благополучного сте-

чения обстоятельств и крайне удачного «поворота дела» в правительстве США, неожиданно для самих создателей ускорителя отпустившем им огромную сумму денег. Построенный ускоритель успешно работает. Исследователи планируют сделать его еще мощнее, заменив обычные магниты более сильными, сверхпроводниковыми.

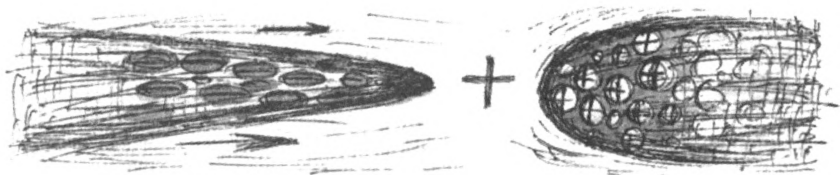
Ускорители — удовольствие дорогое. Например, ускоритель на 1000 ГэВ будет стоить несколько миллиардов долларов, диаметр его секционированного кольцевого магнита составит около 7 км. На строительстве такого ускорителя будут заняты тысячи человек и сотни организаций. Правда, масса магнита при введении жесткой фокусировки для такой энергии частиц весьма умеренна — «всего» 30 тыс. т. Для защиты от излучения придется построить вокруг ускорителя бетонные стены толщиной 12 м.

Возрастание энергии до столь высоких значений приводит к новым трудностям, касающимся фокусировки. Ведь диаметр ускорителя на 1000 ГэВ — около 7 км, а для того чтобы частица не уклонялась от равновесной орбиты и не терялась бы в полюсах магнита, необходимо устанавливать магнит с погрешностью до 0,01 мм. Магнитные системы этих гигантских ускорителей действуют по кибернетическому принципу. Любая погрешность в изменении направления пучка тотчас же фиксируется приборами, и в ускоряющую систему из вычислительного центра подается команда об изменении ее параметров, которая должна перевести пучок-нарушитель на свою орбиту.

А может быть, физики найдут какое-нибудь более изящное решение, которое позволит достичь новых колоссальных энергий путем сравнительно небольших затрат?

Относительно недавно были предложены совершенно новые идеи создания сверхмощных ускорителей. Одна из них заключается в том, что ядро и цель — частица и мишень — «выстреливаются» навстречу друг другу с помощью сравнительно небольших ускорителей и сталкиваются с громадной, невиданной ранее силой. Эту идею предложили физики из Новосибирска Г. И. Будкер, А. А. Наумов, А. Н. Скринский, В. А. Сидоров, В. С. Панасюк. Им первым удалось осуществить на практике идею встречных электрон-позитронных пучков. В установке ВЭПП-2, магниты которой имеют диаметр всего лишь 3 м, новосибирским физикам удалось достичь энергии взаимодействия частиц, равной 2 млн МэВ! Обычный линейный ускоритель на ту же энергию уместился бы не во всяком европейском государстве.

Идея ускорителя без магнитов принадлежит Энрико Ферми, который, конечно, имел в виду обойтись именно без магнитов, но не без магнитного поля, иначе ускоритель получился бы колоссальной длины. Вместо поля магнитов Ферми предложил использовать магнитное поле Земли. Ускоритель типа синхротрона должен был бы представлять собой вакуумную трубу, опоясывающую земной шар вдоль магнитного экватора. Осуществление такого проекта могло бы дать пучки чрезвычайно энергичных частиц, однако стоимость ускорителя, по-видимому, оказалась бы громадной — ведь орбита частиц должна быть круговой, а Земля — далеко не идеальный шар. Чтобы обеспечить идеальную окружность, пришлось бы про-



рывать туннели, строить виадуки над океанами и т.д. А проблема обеспечения герметичности и высокого вакуума устройства, опоясывающего земной шар!

Какую же энергию частиц можно получить с помощью ускорителей? Естественно, что самый большой возможный на нашей планете ускоритель должен располагаться по экватору Земли. Индукция магнитного поля, определяемая насыщением стали, равна, скажем, 2 Тл. При этих условиях максимальная энергия ускоряемых протонов будет равна 1010 МэВ.

Космической эре свойственны и космические проекты. Таким является проект «лунатрона». Ускоритель можно разместить на нескольких спутниках, вращающихся вокруг Земли. На спутниках можно установить фокусирующие магниты, ускоряющие пластины, инжекторы. С помощью такой системы можно будет достичь энергии порядка 108 МэВ. Большое преимущество такой системы — отсутствие необходимости вакуумировать рабочее пространство, ведь лунатрон будет размещен вне атмосферы (т.е. в условиях естественного высокого вакуума).

Чрезвычайно интересная идея ускорителя была предложена советским физиком академиком Г. И. Будкером. Она заключается в том, чтобы слабым наводящим полем создавать мощный круговой пучок электронов. Этот пучок стал бы, по сути дела, гибким шнуром, по которому течет очень сильный электрический ток. Электрический ток всегда создает магнитное поле, стремящееся уменьшить сечение проводника (пинч-эффект). Однако чем меньше диаметр шнура, тем больше при том же токе магнитное поле, создаваемое на поверхности шнура. Г. И. Будкер предложил использовать это очень сильное магнитное поле как рабочее поле ускорителя. В пучке электронов диаметром 6 м можно удерживать протоны с энергией вплоть до 104 МэВ.

Большие надежды возлагают физики и на сверхпроводимость. Ограничителем магнитного поля ускорителей является индукция насыщения стали (около 2 Тл). Однако если сталь из ускорителя убрать, возникнет много других проблем. Сопротивление магнитному полю ускорителя, например, сразу увеличится. Чтобы сохранить поток прежним, нужно сильно увеличить мощность питания обмоток, которая и при ускорителе со сталью была огромной. Мощность питания американского синхрофазотрона «Беватрон» составляла 100 тыс. кВт. Таковую мощность потребляет город со стотысячным населением.

При рассмотрении проекта ускорителя «Газовая и электрическая компания» тихоокеанского побережья специально занималась вопросом: не будут ли «садиться» все лампы в городах Беркли и Окленд, когда в ускорителе разгоняется пучок протонов?

А ведь «Беватрон» — относительно небольшой ускоритель и к тому же со стальным сердечником. В ускорителях на 300 тыс. — 1 млн МэВ без стали потребление электроэнергии будет гораздо больше. Соответственно, более дорогостоящим и громоздким окажется сам ускоритель. Но если разобраться, эта колоссальная энергия будет в большей мере тратиться попусту. Для поддержания магнитного поля не требуется энергия: постоянный магнит ниоткуда не получает энергию, а его магнитное поле не расходуется, когда им что-либо притягиваешь. Энергия необходима лишь на установление поля: если в этой области пространства магнитного поля раньше не было, а теперь оно есть — это значит, что затрачена некоторая энергия. Остальная электроэнергия тратится на нагревание обмоток, обладающих электрическим сопротивлением. Не будь сопротивления, потери бы исчезли. Если подсчитать, какая часть энергии в ускорителях используется полезно, то окажется, что она ничтожна.

Именно с этим обстоятельством и связаны попытки использовать в качестве материала обмоток магнитов ускорителей сверхпроводник. У сверхпроводника омическое сопротивление отсутствует и, следовательно, потери энергии также отсутствуют. Другая положительная сторона применения сверхпроводящих обмоток — возможность сильного увеличения магнитного поля, а стало быть, и уменьшения радиуса ускорителя. Если удастся достичь магнитного поля 10 Тл, размеры ускорителей уменьшатся вдесятеро.

В Фермилаб построены сверхпроводниковые магниты трубчатого типа длиной 7 м каждый, дающие поле 4,5 Тл. 774 таких магнита установлены на кольцо окружностью 6,2 км — то есть на уже знакомом нам ускорителе в Батавии. Еще 240 магнитов используются для фокусировки пучка. Частицы, ускоренные в поле обычных магнитов, впрыскиваются затем в кольцо сверхпроводящих магнитов устройства, названного Теватроном, способного разгонять частицы до 1000 Мэв.

В поисках новых путей, позволяющих более дешевым и эффективным способом получать частицы высоких энергий, ученые ФИАНа выдвинули идею построить в Протвино ускорительно-накопительный комплекс (УНК) на энергию ускоряемых протонов 3000 ГэВ. Большой вклад в развитие и осуществление этой идеи внес академик А. А. Логунов. Частицы энергий 70 ГэВ, ускоряемые на уже существующем Серпуховском ускорителе, будут «впрыскиваться» в УНК для дальнейшего ускорения. В УНК будут использоваться мощные сверхпроводящие магниты, которые позволят снизить длину окружности ускорителя с 60 до 20 км, резко уменьшить энергозатраты на питание магнитов. Несмотря на гигантские финансовые расходы, комплекс решено строить, и строительство начато. Ученые предполагают, что уникальный физический прибор поможет раскрыть самые сокровенные тайны строения вещества. Новый ускоритель будет стоить около миллиарда рублей, диаметр его секционного кольцевого магнита — около 7 км, а займется его строительством несколько тысяч человек и сотни организаций. Защищаться от излучения такого ускорителя придется бетонными стенами двенадцатиметровой толщины.

Строительство новых сверхмощных ускорителей вызывает определенное напряжение даже для высокоразвитых стран. Это напряжение не только финансовое, но и «умственное». Поэтому ускорители на такие большие энергии следует строить «всем миром» — т.е. в буквальном смысле силами всех стран.

Еще в 1963 г., когда В. И. Векслер получал международную премию «Атом для мира», он призвал к международному сотрудничеству ученых в деле постройки сверхмощных ускорителей: «Природа одна; проблемы, которые она представляет нам на данном этапе развития науки, очень часто имеют единственное решение, конечно, не зависящее от того, где живут — в Советском Союзе или в Соединенных Штатах — люди, стремящиеся найти это решение».

Неизвестно, как в конце концов разрешится эта проблема — будут ли такие ускорители строить отдельные государства или группы государств, или, наконец, проблема попадет в ранг вопросов, решаемых ООН. А пока энергия ускорителей десятикратно увеличивается каждые шесть лет. И магниты тут играют одну из главных ролей.



# ПЛАЗМА В МАГНИТНОЙ РУБАШКЕ

---

*Среди технологических революций конца XX — начала XXI века одной из самых главных является перевод потребителей с углеводородных на другие виды топлива. Запасы нефти, газа, угля не безграничны. Топливо дорожает с каждым днем, и с ним дорожает жизнь всех народов мира. И снова магнитные поля оказываются в центре внимания. Только они смогут обуздать своенравную плазму в «мирной» термоядерной реакции, которая должна прийти на смену «обычным» ядерным реакциям деления радиоактивных ядер урана и тория.*

«Что бы еще сжечь?» — навязчивым рефреном звучит вопрос, вечно мучающий энергетиков. Довольно долго нас выручали дрова, но у них малая энергоемкость, а потому дровяная цивилизация примитивна. Сегодняшнее наше благосостояние основано на сжигании ископаемого топлива, однако легкодоступные запасы нефти, угля и природного газа медленно, но верно иссякают.

Волей-неволей приходится переориентировать топливно-энергетический баланс стран на что-то другое. В XXI веке остатки органического топлива придется сохранять для сырьевых нужд химии. А основным энергосырьем, по-видимому, станет ядерное топливо.

Ядерная энергия много лучше энергии химической вследствие высокой концентрации на единицу массы топлива. Уран, один из самых дорогих металлов, стал самым дешевым топливом, ибо по производству тепла 1 г его эквивалентен 3 т антрацита. Даже переход на все более трудноразрабатываемые месторождения, что со временем неизбежно, атомная энергетика в состоянии перенести безболезненно. Хотя уран подорожает, стоимость топлива скажется только на пятой части затрат, нужных для производства электроэнергии на АЭС.

Но самые привлекательные перспективы связаны не с делением ядер, а с их синтезом. Если солюются два легких ядра, то при этом выделится гораздо больше энергии, чем при делении тяжелого ядра. Энергоресурсы для синтеза ядер много доступнее: из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить столько же энергии, сколько из 350 л бензина, так что четыре земных океана равноценны 1400 океанам бензиновым! Даже при стократном росте потребления этих запасов хватит на миллиарды лет.

Технология ядерного синтеза не-сложна. Ядра дейтерия и трития — изотопов водорода — составлены из протона плюс один или два нейтрона. Если эти ядра сольются, то возникнут новое летящее ядро гелия (оно несет пятую часть энергии синтеза) и осколок — свободный нейтрон (четыре пятых энергии). Отобрать энергию реакции можно нагревом воды.

Чтобы воплотить в жизнь эту очередность действий, нужно сначала решить простую задачу: как сблизить ядра, ведь они расталкиваются электрическими силами? Выяснилось, что подвести ядра вплотную друг к другу можно тремя способами.

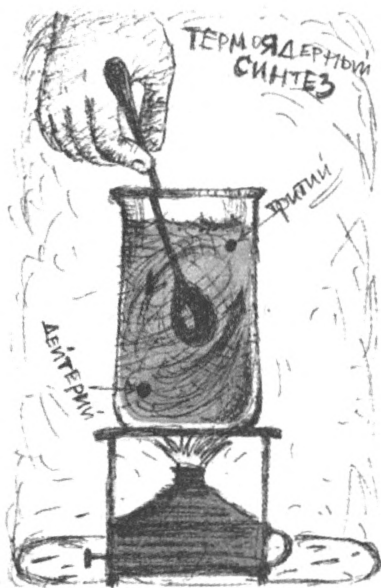
Инерцией, например. Если ядро-снаряд сильно разогнать, то при большой скорости оно проскочит в мертвую зону около ядра-мишени, где ядерное притяжение уже в сотни раз сильнее электрического отталкивания. А разогнать ядро можно на ускорителе (это пока экономически невыгодно) или нагревом газа (потому и называется синтез термоядерным).

Второй способ сближения — сжать смесь нужных атомов какими-то сторонними силами, очистив ядра от электронной «скорлупы». Этот способ оказался вполне приемлемым. И еще одно предложение: погасить расталкивание особым ядерным «клеем» из мюонов — элементарных частиц.

Еще в середине XX века ученые отважно взялись за решение проблемы «термояда», хотя кое-что оставалось неизвестным. Какова природа ядерных сил? Почему они в миллионы раз интенсивнее химических? Отчего эти силы действуют только вблизи ядер, зависят от их ориентации и скорости, а вне ядра быстро исчезают?

За последние полвека появились (но пока только в лабораторном исполнении или только в мыслях, уже подкрепленных расчетами и опытами) три класса гипотетических конструкций ядерных реакторов синтеза будущего.

Весьма перспективными оказались лазерные реакторы. Под руководством академика Н. Г. Басова в Физическом институте АН СССР были построены гигантские модели, напоминающие сказочных спрутов. Стекланные шарики с газовой начинкой расстреливаются сотнями лазерных вспышек, с разных сторон согласованно бьющих в одну цель. Горящие мишени сжимаются расширяющимся газом, плазма начинает рассеиваться, но за миллиардные доли секунды часть ядер успевает слиться. Пока что показатели таких пушек почти рекордны: температура плазмы уже достигла нужных 100 млн градусов, но плотность ее надо поднять еще раз в пятьдесят.



Самое заслуженное и, видимо, наиболее перспективное направление разработок, родившееся в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова, — токамаки. (Это название образовано из слов ТОк, КАмера, МАгнитные Катушки. Другая расшифровка: ТОроидальная КАмера с АКсиальным магнитным полем. Есть и иные расшифровки, некоторые довольно смешные.) В тороидальной камере газ греется, а плазму от соприкосновения со стенками удерживают огромные магнитные поля. На токамаках удалось нагреть плазму до 250 млн градусов, но плотность или время удержания ее надо бы увеличить раз в десять.

Какой сосуд выдержит такую высокую температуру? Прикоснувшись к стенкам сосуда, плазма либо охладится до такой температуры, при которой реакция станет невозможной, либо испарит стенку, как испарила стальную башню и песок при термоядерном взрыве на атолле Бикини. Никакой материал не может выдержать таких высоких температур, и поэтому поставленный в 1950-х годах вопрос: «В чем держать плазму?» — привлек внимание ученых всего мира.

Физики Советского Союза, США и Великобритании, являвшиеся в то время «атомной тройкой», разъединенные непроницаемым барьером секретности, примерно в одно время начали работать над этой проблемой. После выступления И. В. Курчатова в Харуэлле в 1956 г., где он неожиданно для английских и американских физиков «раскрыл карты» и рассказал о самых «секретных» советских термоядерных исследованиях. Барьер секретности был снят, и выяснилось, что физики трех разных стран пришли к одному выводу: единственная возможность удержать плазму и не дать ей охладиться — использовать магнитное поле. Невидимое, неосязаемое, оно прочной сетью силовых линий будет держать плазму вдали от стенок любого сосуда, которые она могла бы испепелить. Выяснилось также, что физики СССР, США и Англии не только разработали однотипные установки, но и получили на них примерно одинаковые параметры плазмы. Более того, жаргонные названия установок также оказались одинаковыми!

Идея магнитной термоизоляции плазмы основана на известном свойстве электрически заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, искривлять свою траекторию и двигаться по спирали силовых линий поля. Это искривление траектории в неоднородном магнитном поле приводит к тому, что частица выталкивается в область, где магнитное поле более слабое. Задача состоит в том, чтобы плазму со всех сторон окружить более сильным полем. Эта задача решается во многих лабораториях мира.

Магнитное удержание плазмы открыли советские ученые, которые в 1950 г. предложили удерживать плазму в так называемых магнитных ловушках (или, как часто их называют, в магнитных бутылках).

Примером весьма простой системы для магнитного удержания плазмы может служить ловушка с магнитными пробками или зеркалами (пробкотрон). Система представляет собой длинную трубу, в которой создано продольное магнитное поле. На концах трубы намотаны более массивные обмотки, чем в середине. Это приводит к тому, что магнитные силовые линии на концах трубы расположены гу-



ще и магнитное поле в этих областях сильнее. Таким образом, частица, попавшая в магнитную бутылку, не может покинуть систему, ибо ей пришлось бы пересекать силовые линии и вследствие лоренцевой силы «накручиваться» на них. На этом принципе была построена огромная магнитная ловушка установки «Огра-1», пущенная в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова еще в 1958 г. Вакуумная камера «Огра-1» имеет длину 19 м при внутреннем диаметре 1,4 м. Средний диаметр обмотки, создающей магнитное поле, составляет 1,8 м, напряженность поля в середине камеры — 0,5 Тл, в пробках — 0,8 Тл.

Но, как выяснилось, магнитная система указанного типа в ее «чистом» виде обладает серьезными недостатками. В этой системе самое слабое магнитное поле получается в середине канала у стенок. Сюда и устремляется плазма при разряде и уже менее чем через 0,001 с оказывается на стенках камеры.

Новый шаг по усовершенствованию «бутылок» был сделан в 60-х годах прошлого столетия, когда в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова была пущена установка ПР-5. Идея этой установки предложена Б. Б. Кадомцевым, который исследовал причины неудач с чистыми пробкотронами. Он установил, что для более успешного удержания плазмы необходимо усложнить конфигурацию магнитного поля, и предложил в дополнение к системе магнитных пробок вдоль образующих активного цилиндра сделать еще одну обмотку таким образом, чтобы по соседним проводникам ток шел в противоположных направлениях. Это должно было привести к тому, что вблизи стенок цилиндра создавалось бы дополнительное магнитное поле, препятствующее приближению плазмы к стенкам.

При наложении поля прямолинейных проводников на «бутылочное поле» получается весьма замысловатая картина.

Установка была построена сотрудниками Института атомной энергии имени И. В. Курчатова, работавшими под руководством М. С. Иоффе. Прямолинейные проводники были расположены под катушками, создающими магнитное поле пробок. Индукция продольного магнитного поля в центре камеры составляла 0,8 Тл, в области пробок — 1,3 Тл, индукция магнитного поля прямолинейных проводников вблизи стенок была равной 0,8 Тл, длина рабочего объема — 1,5 м, диаметр — 40 см.

Первые же эксперименты окрылили физиков. Устойчивость плазмы возросла в 35 раз по сравнению с устойчивостью, имевшей место на чистых пробкотронах, и плазма жила в течение нескольких сотых долей секунды.

Усложнение конфигурации магнитного поля — ключ к долгоживущей плазме. Созданы магнитные системы со встречными полями (установка «Орех»), антипробкотроны и другие весьма изощренные установки.

Можно попытаться преодолеть «ускользание» частиц из рабочей зоны через «горлышки» магнитных бутылок типа пробкотрон еще одним остроумным способом: сделать рабочую зону не цилиндрической, а тороидальной. В этом случае частица, ускользающая из пробкотрона через горлышко, опять оказывается в рабочей зоне!

Эта идея, оказавшаяся очень жизнеспособной, и была использована во множестве модификаций. Что будет, например, если создать в тороидальной камере продольное магнитное поле? Любая заряженная частица, попавшая в камеру, должна была бы двигаться так, чтобы ее траектория «навивалась» на магнитные силовые линии. Однако вскоре сами авторы нашли в своей системе серьезный дефект. Оказалось, что в тороидальной камере, где магнитные силовые линии искривлены, индукция магнитного поля (густота силовых линий) у внутренней стенки трубы выше, чем у наружной. Это объясняется упругостью силовых линий, стремлением их как можно больше сократиться. В результате у внутренней стенки, где путь короче, скапливается больше силовых линий, чем у наружной.

Эта неоднородность магнитного поля изменяет спиральный характер орбит частиц. Вблизи внутренней поверхности замкнутой на себя трубы — тора, где поле больше — частицы должны были бы двигаться по орбите с меньшим радиусом, чем около внешней поверхности. В результате этого заряженные частицы «дрейфуют» поперек силовых линий магнитного поля, причем положительно заряженные ядра налетают на «потолок» трубы, а электроны — на ее «дно». Этот дрейф частиц — вещь довольно неприятная сама по себе, но косвенный эффект дрейфа просто катастрофичен. Разделение зарядов по знаку вызывает возникновение в пространстве камеры непредусмотренного электрического поля, которое совершенно искажает орбиты частиц, бросая их на стенки камеры.

Как избежать неоднородности магнитного поля? Как сделать так, чтобы силовые линии в тороидальной камере были равной длины?

Этого можно добиться в том случае, если заставить силовую линию, которая идет вдоль внутренней поверхности камеры, на каком-то участке поменяться местами с силовой линией, идущей около внешней поверхности. Тогда длина всех силовых линий была бы одинаковой, и все силовые линии оказались бы в равных условиях: каждая силовая линия, сделав виток по поверхности тора, не попадала бы в прежнюю точку, а образовывала бы поверхность, называемую магнитной поверхностью.

Такого эффекта можно было бы достичь, изгибая силовые линии вокруг оси тора. В этом случае силовые линии имели бы примерно такую же форму, как отдельные нити крученой веревки. Во вращательно-преобразованном магнитном поле дрейф частиц свелся бы к минимуму.

Частицы, быстро движущиеся вдоль силовых линий и таким образом все время огибающие ось камеры, не могут упасть на нижнюю или верхнюю стенку. Когда частица, дрейфующая вверх, находится ниже оси, она, естественно, стремится отодвинуться от нее; когда же частица находится внизу, тот же самый дрейф вверх компенсирует прежнее смещение, подвигая ее к оси. В результате среднее расстояние частицы от оси остается неизменным. Подобная система использована в стеллараторе, построенном в США. Его камера в плане имеет вид гаревой дорожки стадиона. Внутренний радиус камеры — 20 см, длина по оси — 12 м, индукция магнитного поля — около 5 Тл. Мощность питающей электроустановки — 15 тыс. кВт.

Остроумный способ «вращательного преобразования» или «свисания» магнитных силовых линий был предложен американским физиком Л. Спитцером и советским физиком академиком Л. А. Арцимовичем.

Мы уже говорили о том, что обычное «нескрученное» продольное магнитное поле обладает неоднородностью, приводящей к тому, что отрицательные частицы врезаются в «пол», а положительные — в «потолок» камеры. А что, если, оставив одну половину тора неизменной, перепутать «пол» и «потолок» в другой половине или, короче говоря, превратить тор-бублик в восьмерку? Тогда, начав падать в одной половине бывшего тора, частица должна будет «падать вверх» на другой его половине и, таким образом, в среднем останется на одном расстоянии от оси камеры.

Если оценить тороидальные камеры типа стелларатора с винтовой обмоткой, преобразованные в восьмерку, то можно сделать вывод о том, что стеллараторы — это весьма совершенные магнитные системы для удержания плазмы. Их недостаток — трудность изготовления и дороговизна.

А нельзя ли для удержания плазмы в магнитном поле использовать магнитное поле самой плазмы? Если в плазме есть какое-то упорядоченное движение заряженных частиц в одну сторону, то это означает, что плазма представляет собой гибкий шнур с электрическим током, так как, по определению, электрический ток — это и есть упорядоченное движение заряженных частиц.

Ток создает вокруг себя магнитное поле, силовые линии которого опоясывают провод, по которому этот ток проходит. Одним из важных свойств силовых линий является их стремление идти по кратчайшему пути, их упругость, максвелловское натяжение, приводящее к тому, что силовые линии стремятся сжать опоясываемый ими проводник с током. В случае обычных медных проводов упругость силовых линий не может привести к уменьшению диаметра проводов, поскольку кристаллическую решетку твердых тел деформировать довольно трудно. Если ток течет по плазменному шнуру, то упругость силовых линий, охватывающих этот шнур, приводит к тому, что шнур уменьшается в сечении и отходит от стенок камеры. Это явление, получающее название пинч-эффекта, казалось бы, полностью решает задачу магнитной термоизоляции плазмы: стоит «организовать» в плазме ток, как она сама отойдет от его стенок и сожмется в тонкий шнур в середине сосуда.

Однако здесь начинает действовать свойство заряженных частиц (и, следовательно, плазмы в целом) выталкиваться в область с более слабым полем, туда, где меньше силовых линий, где они расположены не так густо. Это свойство приводит к тому, что малейший изгиб или местное сужение плазменного шнура, в конце концов, приводит к аварийному процессу. Пусть, например, в силу каких-либо случайных обстоятельств в шнуре образовался небольшой изгиб. Тогда на выпуклой части изогнутого шнура силовые линии магнитного поля становятся более редкими, а на вогнутой — более густыми. Плазменный шнур начинает выталкиваться из той области, где силовые линии расположены гуще, наружу, к стенкам сосуда, изгиб плазменного

шнура увеличивается, и плазма, в конце концов, попадает на стенки камеры. Это происходит так же, как в сжатой длинной пружине, которая, как известно, неустойчива к поперечным деформациям. Точно таким же образом местное сужение плазменного шнура приводит к еще большему его сужению, а затем — к разрыву.

Бороться с этими явлениями можно при помощи магнитного поля. Если вдоль плазменного шнура проходят силовые линии магнитного поля, создаваемого каким-то посторонним источником, то упругость этих линий приведет к тому, что любой изгиб, случайно возникший у шнура, будет ликвидирован так же, как и случайное сужение шнура. Примерно то же самое произойдет, если внутри сжатой пружины пропустить растянутые упругие жгуты.

Чтобы возвращение плазмы в устойчивое состояние проходило более эффективно, необходимо создать в ней очень сильное продольное магнитное поле.

Другим действенным способом преодоления изгибов плазменного шнура, особенно изгибов с большим радиусом, может быть использование более или менее массивного металлического кожуха, сосуда, в котором содержится плазма. Между кожухом и плазменным шнуром проходит какой-то магнитный поток, т.е. существует магнитное поле с его условными силовыми линиями. Если плазменный шнур сместится со своего прежнего положения, магнитное поле между ним и кожухом искривится, деформируется. В одном месте силовые линии будут сдвинуты, в другом — растянуты. Если опять учесть присущее магнитным силовым линиям свойство упругости, то станет ясно, что они постараются вернуть плазменный шнур в прежнее положение вдоль оси камеры.

Стабилизация плазмы продольным полем становится особенно эффективной, когда удастся сделать так, чтобы продольное поле существовало лишь в плазме, а вне ее, т.е. в пространстве между стенками камеры и шнуром, отсутствовало. Это можно осуществить в том случае, когда сжимающийся при прохождении сильного тока плазменный шнур увлекает за собой все силовые линии продольного поля, созданного в полном объеме камеры. Отрываясь от стенок камеры, плазменный шнур увлекает за собой все магнитные силовые линии, ранее существовавшие в камере, создавая между стенками камеры и шнуром магнитный вакуум в отношении продольного поля.

Все эти идеи начали практически воплощаться уже в 1950-х годах. Первые установки представляли собой стеклянные, фарфоровые или кварцевые тороидальные камеры (впоследствии камеры чаще всего стали делать из тонкой нержавеющей немагнитной стали), внутри которых размещали рабочие камеры с медными толстыми стенками, иногда называемыми лайнерами. На камеру наматывали обмотку, создававшую продольное стабилизирующее магнитное поле до 0,05 Тл. Внутренняя тороидальная камера заполнялась газом. Этот кольцевой газовый виток служил вторичной обмоткой трансформатора. Роль первичной обмотки, питающейся от мощной конденсаторной батареи, выполнял внешний металлический кожух камеры. Для снижения магнитного сопротивления использовали железный сердечник. Иногда в качестве первичной обмотки применяли обычную медную.

В одной из первых установок трансформатор состоял из двух отдельных сердечников, имевших круглые внутренние отверстия для размещения разрядной камеры. Сердечники с внутренним диаметром 1,5 м и внешним диаметром 3 м были намотаны ленточной трансформаторной сталью.

Если на первичную обмотку такого трансформатора дать мощный импульс тока от конденсаторной батареи, то во вторичном газовом витке также возникнет электрический ток. Этот ток проходит по газу, разогревает его до высокой температуры, превращая в плазму. Плазменный шнур под влиянием тока сжимается и отрывается от стенок.

Сходные конструкции имели и другие первые американские экспериментальные установки: «Спектр», «Альфа» и «Пихэпстрон». На них были проведены многочисленные эксперименты, результаты которых, однако, не оправдали надежд. Выяснилось, что стабилизирующее продольное поле, вопреки первоначальным прогнозам, было мало для того, чтобы сделать плазменный шнур устойчивым к разного рода случайным возмущениям. Продольное магнитное поле по отношению к собственному полю плазмы было слишком мало. Упругие жгуты внутри пружины оказались слабыми для удержания ее от аварийных изгибов.

Чтобы обойти эту трудность, необходимо было резко увеличить продольное поле и ослабить собственное поле шнура. Эта задача была решена советскими учеными на установках типа токамак. Для создания сильного продольного поля в системе использованы мощные соленоиды, которые приходилось питать от мощных импульсных генераторов, используемых обычно для возбуждения синхротронов. Хотя магнитное поле, создаваемое такими системами, импульсное (продолжительность импульса примерно 0,2 с), оно в сотни раз превосходит по длительности время разряда и для него является практически постоянным. Магнитное поле установок типа токамак достигает 3,5—5 Тл, т.е. в сотни раз превышает поле установок типа «Альфа».

А как не допустить уменьшения радиуса шнура при линч-эффекте? Ведь при уменьшении радиуса возрастает собственное поле шнура, и те преимущества, которые достигнуты применением мощного продольного поля, сводятся к нулю. Однако если поле шнура мало, то шнур останется слишком широким. Он будет касаться стенок камеры и охлаждаться. Для преодоления этого явления конструкторы установок типа токамак решили применить в тороидальной камере диафрагмы с небольшими по сравнению с диаметром камеры отверстиями. Эксперименты показали, что эта конструкция обеспечивает образование шнура с сечением, ограниченным размерами отверстий диафрагм. В установке «Токамак-3», пущенной в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова в 1962 г., отверстие диафрагмы имело диаметр 20 см, диаметр поперечного сечения тора — 40 см, диаметр внешнего кожуха — 50 см, диаметр тора — 2 м. Продольное магнитное поле до 4 Тл создавали восемь катушек с внешним диаметром около 1 м. Каждая катушка — это монолит из 352 медных витков, запеченных в эпоксидной смоле. Питание катушек производилось от



ударного, т.е. кратковременно действующего, генератора мощностью около 75 тыс. кВт. В 1964 г. пущена усовершенствованная установка «Токамак-5», в которой осуществлено автоматическое управление положением плазменного шнура внутри камеры.

В 1975 г. вошла в строй установка «Токамак-10», обладающая рекордными, чрезвычайно обнадеживающими характеристиками. Дальнейшее развитие привело к разработке токамаков, обладающих параметрами, удовлетворяющими «критерию Лоусона». В принципе на этих токамаках мы вступим, по выражению академика Л. А. Арцимовича, в «термоядерное Эльдorado». И все же нельзя забывать о том, о чем говорил Л. А. Арцимович. Он часто подчеркивал, что еще в 1958 г. на II Между-

народной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве казалось, что до осуществления термоядерного синтеза рукой подать — нужно пройти небольшой путь между двумя точками; потом оказалось, что надо не пройти, а проехать на велосипеде; потом — что проехать на велосипеде, но по канату; потом оказалось, что велосипед одноколесный; потом — что ехать нужно с завязанными глазами; и, наконец, — что ехать необходимо задом наперед.

Результаты экспериментов на установках типа токамак чрезвычайно обнадеживающие. Подобные системы, по-видимому, будут широко применяться в дальнейших исследованиях.

Каким будет термоядерный генератор? Магнитная ловушка, по-видимому, получится весьма большой. Только тогда мощность, потребляемая ею, будет невелика по сравнению с мощностью генератора. Это происходит потому, что мощность генератора находится в кубической зависимости от линейного размера системы, а потребляемая обмотками мощность пропорциональна линейному размеру.

Исходя из соображений, касающихся мощности, потребляемой магнитной ловушкой, можно считать, что термоядерный генератор должен быть никак не меньше нескольких метров в диаметре. Только в этом случае полезная мощность генератора будет больше мощности, потребляемой магнитной системой.

Однако если удастся создать громадные сверхпроводящие обмотки, что весьма реально, КПД генераторов резко возрастет.

Стоимость электроэнергии, получаемой от термоядерных электростанций, будет очень низкой вследствие дешевизны исходного сырья (воды). Настанет время, когда электростанции будут вырабатывать буквально океаны электроэнергии. С помощью этой электроэнергии станет возможным, быть может, не только кардинально изменить

условия жизни на Земле — повернуть вспять реки, осушить болота, обводнить пустыни, — но и изменить облик окружающего космического пространства — заселить и «оживить» Луну, окружить Марс атмосферой.

Л. А. Арцимович писал: «Вряд ли есть какие-либо сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена. Природа может расположить на пути решения этой проблемы лишь ограниченное число трудностей, и после того, как человеку, благодаря непрерывному проявлению творческой активности, удастся их преодолеть, она уже не в состоянии будет изобрести новые. Неизвестно лишь, насколько затянется этот процесс...»

Одна из основных трудностей на этом пути — создание магнитного поля заданной геометрии и величины. Магнитные поля в современных термоядерных ловушках относительно невелики. Тем не менее если учесть громадные объемы камер, отсутствие ферромагнитного сердечника, а также специальные требования к форме магнитного поля, затрудняющие создание таких систем, то следует признать, что имеющиеся ловушки — большое техническое достижение.

Последние годы стали временем дальнейшего развития исследований с помощью токамаков. В России, США, Европе, Японии создаются все новые конструкции, призванные повысить параметры плазмы до значений, соответствующих термоядерной реакции.

Токамак Т-15 интересен сверхпроводящей тороидальной обмоткой, что является перспективным техническим решением. Токамаки JET, TFTR, JT-60 также предназначены дать первые нейтроны термоядерной реакции. Для всех этих конструкций характерны крупные размеры: радиус камеры — в пределах 2,6—3 м, радиус поперечного сечения камеры — 0,85—1,25 м. Медные тороидальные обмотки создают круговое магнитное поле 3,5—5 Тл. Мощность генераторов, питающих эти обмотки во время режима работы, длящегося несколько секунд, составляет несколько сотен тысяч киловатт.

Специалисты России, США, Японии и европейских стран провели проектную проработку интернационального токамака-реактора — ИНТОР. Согласно проекту, опытный реактор содержит тороидальную камеру радиусом 5,2 и 1,4 м. В этом «бублике» объемом  $320 \text{ м}^3$  горит плазма плотностью  $1,4 \cdot 10^{14}$  част./см<sup>3</sup> с температурой 100 млн градусов, «зажигаемая» током 6,4 млн А, который наводится от индуктора, расположенного в центре камеры.

Стенка из нержавеющей стали охлаждается водой, за стенкой размещен «бланкет» толщиной полметра, в котором за год вырабатывается 7 кг трития. Магнитная система, колпаком укрывающая камеру, выполнена из медненных сверхпроводящих лент ниобия с оловом и ниобия с титаном. Она создает поле на обмотках 11,6 и 8 Тл, а в центре рабочей камеры 5,5 Тл. В магнитном поле запасена энергия, равная 10 тыс. кВт·ч.

В проекте предусмотрено выделение 620 тыс. кВт термоядерной энергии в течение 200 с, импульсные нагрузки оборудования будут покрываться из электросети и от генератора мощностью 1 млн кВт. Токамак типа ИНТОР еще не может быть динамически выгодным

источником энергии, он станет прообразом будущего реактора термоядерной электростанции.

На программу токамаков делается сегодня главная ставка, но не следует забывать, что ведутся исследования по другим вариантам термоядерных реакторов. Весьма перспективна дочерняя ветвь токамаков — открытые магнитные ловушки. Здесь результаты не так высоки, но еще далеко не все резервы исчерпаны.

Нет сомнений в том, что мы живем в преддверии энергетического господства ядерных реакторов синтеза. Из многих альтернативных конструкций наверняка удастся выбрать что-то подходящее. Конечно, «чистые» реакторы-синтезаторы, производящие электричество из водорода, появятся не сразу. Сначала термоядерные реакторы, видимо, будут помогать обогащать уран на нынешних АЭС. Со временем энергия нейтронов синтеза частично пойдет на осуществление своего электрогенераторного цикла. И уж тогда-то можно будет начать постепенный демонтаж урановых котлов.





# ЭНЕРГЕТИКА XXI ВЕКА

---

*Сверхпроводники часто называют ключом к электротехнике и энергетике будущего. Это объясняется их поистине удивительными свойствами, проявляющимися при сверхнизких температурах, близких к абсолютному нулю — минус 273 градуса по Цельсию.*

Конечно, достижение столь низких температур — удовольствие недешевое. Оказалось, однако, что стоимость рефрижераторов и тепловой защиты холодных зон порой несравнима с достигаемыми громадными преимуществами. Становится возможным без чрезмерных затрат получать огромные токи (в несколько тысяч раз большие, чем в обычных проводниках) и огромные магнитные поля при скромных сечениях токонесущих шин, а ведь именно это является чрезвычайно важным при создании мощных электроэнергетических устройств. Появились и начали использоваться новые сверхпроводники, не теряющие своих свойств при «обычных» температурах!

Выгода от создания именно крупных устройств и машин очевидна: при мощности электрического генератора 300 МВт нужен 1 кг металла на 1 кВт, а для машины мощностью 800 МВт — только 0,58 кг/кВт! Вот почему генераторы становятся все крупнее.

Допустим, необходимо построить электростанцию мощностью 2400 МВт. Обычно такую мощность обеспечивают восемь блоков по 300 МВт. А если взять более мощные машины? Укрупнение мощности энергоблоков на ГРЭС общей мощностью 2400 МВт с 300 до 800 МВт уменьшает удельные капиталовложения на 10,6%, снижает трудозатраты на 30%, повышает производительность труда в эксплуатации на 42% и уменьшает расход условного топлива на 4%.

Этим в основном и объясняется невиданный рост мощностей турбогенераторов в 2 раза за каждые 20 лет. Так быстро растут мощности разве что у двигателей ракет и самолетов. «Гигантомания» имеет, оказывается, прочную экономическую основу.

Рост единичной мощности турбогенераторов существенно ограничивается прочностью материалов роторов и бандажных колец. При частоте вращения 3000 об./мин на них действуют громадные центробежные усилия, тем большие, чем больше диаметр ротора. Так, в турбогенераторе на 100 МВт при частоте вращения 3000 об./мин диаметр ротора составляет 1000 мм, а в генераторе мощностью

1200 МВт — «всего» 1250 мм. При увеличении мощности в 12 раз диаметр ротора изменится лишь в 1,25 раза. При дальнейшем увеличении диаметра ротора его могут разорвать центробежные силы.

В настоящее время на Костромской ГРЭС успешно работает крупный отечественный двухполюсный турбогенератор ТВВ-1200-2. Его ротор — цельнокованный из высококачественной легированной стали. Охлаждение обмоток ротора производится водородом, статора — водой. Сооружение этой машины стало для мировой техники весьма знаменательным событием. Из числа многих технических трудностей, которые пришлось преодолеть машиностроителям, назовем лишь одну — создание цельной поковки ротора значительных габаритов. Инженеры и рабочие Ижорского завода с честью вышли из этого затруднения: металл для заготовки массой 230 т варили одновременно в мартеновской и двух электрических печах; сталеваром удалось обеспечить синхронность плавок. Так был создан самый крупный слиток в истории отечественной металлургии.

Технические данные отечественных турбогенераторов находятся сегодня на уровне характеристик лучших зарубежных машин, а зачастую и превосходят их. Одно из наиболее значительных зарубежных достижений — построенный германской фирмой «Броун-Бовери» турбогенератор мощностью 1300 МВт для АЭС «Библис». В отличие от большинства отечественных турбогенераторов у него невысокая частота вращения (1500 об./мин), что позволяет резко увеличить диаметр ротора (уменьшились центробежные усилия!), сделать его составным и увеличить объем машины. Вот некоторые данные этого одного из крупнейших в мире турбогенераторов: мощность — 1300 МВт, КПД = 98,65%, статор и ротор охлаждаются водой, масса ротора — 204 т, статора — 371 т, диаметр ротора — 1,8 м, длина — 7,5 м.

Увеличение мощности турбогенераторов наталкивается на серьезные трудности. Одна из них — необходимость конструировать роторы диаметром, не превышающим 1350 мм. Такое требование обусловлено, во-первых, возможностями металлургической промышленности; во-вторых, достигнутым уже сейчас пределом механической прочности (при частоте вращения 3000 об./мин). Кроме того, увеличить длину ротора при заданном диаметре также невозможно из-за возникновения недопустимого прогиба вала и резонансных явлений.

Не меньшая проблема — цельнокованные бандажные лобовых частей обмотки ротора (каппы) большого диаметра из немагнитных материалов (составные роторы и бандажные при частоте вращения 3000 об./мин не применяют вследствие низкой эксплуатационной надежности).

С ростом мощности и интенсификации охлаждения меняются и показатели турбогенераторов. Увеличивается токовая загрузка при сравнительно малой изменяющейся магнитной индукции (последняя ограничена магнитными свойствами материалов и не может быть существенно повышена). Резко снижается удельный расход материалов, несколько возрастает КПД.

Наибольшая мощность двухполюсных генераторов традиционных типов, которую, по-видимому, удастся реализовать в ближайшие годы, будет 2000—2500 МВт, а наибольшая мощность четырехполюсных — 4000—5000 МВт.

Ясно, что для создания генераторов большей мощности понадобятся новые конструкторские решения и материалы. В этой связи особые надежды ученые и инженеры возлагают на сверхпроводимость. Недаром одним из основных направлений развития технических наук считают теоретические и экспериментальные исследования в области сверхпроводящих материалов, а одним из основных направлений развития техники — разработка сверхпроводникового электрооборудования. Сверхпроводящее электрооборудование позволит резко увеличить электрические и магнитные нагрузки в элементах устройств и благодаря этому резко сократить их размеры. В сверхпроводящем проводе допустима плотность тока, в 10—50 раз превышающая плотность тока в обычном электрооборудовании. Магнитные поля можно будет довести до значений порядка 10 Тл по сравнению с 0,8—1 Тл в обычных машинах. Если учесть, что размеры электротехнических устройств обратно пропорциональны произведению допустимой плотности тока на индукцию магнитного поля, то ясно, что применение сверхпроводников уменьшит размеры и массу электрооборудования во много раз!

Первая электрическая машина со сверхпроводниками — прототип будущих сверхпроводящих генераторов — была спроектирована и построена автором — тогда аспирантом Института электромеханики в Ленинграде — в Институте физических проблем в Москве еще в 60-х годах прошлого века. Это была машина постоянного тока с обычным («теплым») якорем и сверхпроводниковой обмоткой возбуждения. Мощность ее составляла всего несколько ватт.

Пилотный образец нового сверхпроводникового турбогенератора серии КТГ-1000, разработанный под руководством академика И. А. Глебова, докторов технических наук В. Г. Новицкого и В. Н. Шахтарина, был испытан еще летом 1975 г., за ним последовал модельный криогенный турбогенератор КТ-2-2, созданный объединением «Электросила» в содружестве с учеными харьковского Физико-технического института низких температур. Результаты испытаний позволили приступить к проектированию сверхпроводникового агрегата значительно большей мощности.

Машина мощностью 1300 МВт имеет длину около 10 м при массе 280 т, в то время как аналогичная по мощности машина обычного исполнения имеет длину 20 м при массе 700 т! Наконец, при использовании сверхпроводников можно реально достичь единичной мощности генераторов в 20 000 МВт!

Выигрыш в материалах сокращает примерно три четверти стоимости машины. Облегчаются производственные процессы. Любому машиностроительному заводу проще и дешевле сделать несколько крупных электрических машин, чем большое количество мелких: меньше требуется рабочих, не так напряженно загружаются станочный парк и другое оборудование.

Для установки мощного турбогенератора нужна относительно небольшая площадь электростанции. Значит, сокращаются расходы на сооружение машинного зала, станцию можно быстрее ввести в строй. И, наконец, чем крупнее электрическая машина, тем выше ее КПД.

Однако все эти преимущества не исключают технических трудностей, возникающих при создании крупных энергетических агрегатов. И, что самое существенное, их мощность можно увеличивать лишь до определенных пределов. Расчеты показывают, что перешагнуть верхний предел, ограниченный мощностью турбогенератора 2500 МВт, ротор которого вращается с частотой 3000 об./мин, вряд ли удастся, так как этот предел определяется, в первую очередь, прочностными характеристиками: напряжения в механической конструкции машины более высокой мощности возрастают настолько, что центробежные силы неизбежно вызовут разрушение ротора.

Немало забот возникает и при транспортировке. Для перевозки того же турбогенератора мощностью 1200 МВт пришлось построить сочлененный транспортер грузоподъемностью 500 т, длиной почти 64 м. Каждая из двух его тележек опиралась на 16 вагонных осей.

Многие препятствия сами по себе отпадают, если использовать эффект сверхпроводимости и применить сверхпроводящие материалы. Тогда потери в роторной обмотке можно практически свести к нулю, так как постоянный ток не будет встречать в ней сопротивления. А раз так, повышается КПД машины. Протекающий по сверхпроводящей обмотке возбуждения ток большой силы создает столь сильное магнитное поле, что уже нет необходимости применять стальной магнитопровод, традиционный для любой электрической машины. Устранение стали снизит массу ротора и его инерционность.

Создание криогенных электрических машин — не дань моде, а необходимость, естественное следствие научно-технического прогресса. И есть все основания утверждать, что сверхпроводящие турбогенераторы мощностью более 1000 МВт найдут свое место в энергосистемах.

Российские ученые продолжают работать над созданием сверхпроводящих турбогенераторов для энергетики. За истекшие годы удалось построить опытные конструкции мощностью 0,018 и 1 МВт, а затем и 20 МВт...

Рассмотрим, как устроены эти необычные машины.

Сверхпроводящая обмотка возбуждения находится в гелиевой ванне. Плотность тока в проводниках из ниобиево-титанового сплава или соединения ниобий—олово составляла около 1000 А на 1 мм<sup>2</sup> в магнитном поле до 5 Тл. (Нужно отметить, что проводники из соединения ниобий—олово, производившиеся в Советском Союзе, всегда были вне конкуренции по качеству. Сейчас производство таких сверхпроводников несколько заглохло, поскольку некоторые кооперирующиеся предприятия оказались «за кордоном» — в Казахстане.) Жидкий гелий поступает во вращающийся ротор по трубе, расположенной в центре полого вала. Испарившийся газ направляется обратно в

конденсационную установку через зазор между этой трубой и внутренней стенкой вала.

В конструкции трубопровода для гелия, как и в самом роторе, есть вакуумные полости, создающие хорошую теплоизоляцию. Вращающий момент от первичного двигателя подается к обмотке возбуждения через «тепловые мосты» — конструкцию, достаточно прочную механически, но плохо передающую тепло.

В итоге конструкция ротора представляет собой вращающийся криостат со сверхпроводящей обмоткой возбуждения.

Статор сверхпроводящего турбогенератора, как и в традиционном варианте, имеет трехфазную обмотку, в которой магнитным полем ротора возбуждается электродвижущая сила. Исследования показали, что применять сверхпроводящую обмотку в статоре нецелесообразно, так как на переменном токе в сверхпроводниках возникают немалые потери. Но в конструкции статора с «обычной» обмоткой есть свои особенности.

Обмотку оказалось возможным в принципе разместить в воздушном зазоре между статором и ротором и крепить по-новому, с помощью эпоксидных смол и конструктивных элементов из стеклопластика. Такая схема позволила разместить больше медных проводников в статоре.

Оригинальна и система охлаждения статора: тепло отводится фреоном, который одновременно выполняет и функцию изолятора. В перспективе это отведенное тепло можно будет использовать для практических целей с помощью теплового насоса.

В роторе турбогенератора мощностью 20 МВт был применен медный провод прямоугольного сечения  $2,5 \times 3,5$  мм. В него впрессовано 3600 жил из ниобий-титана. Такой провод способен пропускать ток до 2200 А.

Испытания нового генератора подтвердили расчетные данные. Он оказался вдвое легче традиционных машин той же мощности, а его КПД выше на 1%. Сейчас этот генератор работает в системе «Ленэнерго» в качестве синхронного компенсатора и вырабатывает реактивную мощность. Накопленный в процессе его эксплуатации опыт уникален, его нет ни у одной другой страны. Не случайно РАО «ЕЭС России» заказало ученым разработать высоковольтный генератор для линий передач постоянного тока. А космическая программа США попросила разработать узлы для компактного бортового автономного источника питания.

Энергетикам нужны не только холодные генераторы. Уже изготовлено и испытано несколько десятков сверхпроводящих трансформаторов (первый из них построен американцем Мак-Фи в 1961 г.; трансформатор работал на уровне 15 кВт). Имеются проекты сверхпроводящих трансформаторов на мощность до 1 млн кВт. При достаточно больших мощностях сверхпроводящие трансформаторы будут легче обычных на 40—50% при примерно одинаковых с обычными трансформаторами потерях мощности (в этих расчетах учитывалась и мощность ожигателя).

У сверхпроводящих трансформаторов, однако, есть и существенные недостатки. Они связаны с необходимостью защиты трансфор-

матора от выхода его из сверхпроводящего состояния при перегрузках, коротких замыканиях, перегревах, когда магнитное поле, ток или температура могут достичь критических значений.

Если трансформатор при этом не разрушится, то потребуется несколько часов, чтобы снова охладить его и восстановить сверхпроводимость. В ряде случаев такой перерыв в электроснабжении неприемлем. Поэтому, прежде чем говорить о массовом изготовлении сверхпроводящих трансформаторов, необходимо разработать меры защиты от аварийных режимов и возможности обеспечения потребителей электроэнергией во время простоев сверхпроводящего трансформатора. Достигнутые в этой области успехи позволяют думать, что в ближайшем будущем проблема защиты сверхпроводящих трансформаторов будет решена, и они займут свое место на электростанциях.

В последние годы становится все более близкой к осуществлению мечта о сверхпроводящих линиях электропередачи. Все возрастающая потребность в электроэнергии делает очень привлекательной передачу большой мощности на большие расстояния. Ученые убедительно показали перспективность сверхпроводящих линий передачи. Стоимость линий будет сопоставима со стоимостью обычных воздушных линий передачи электроэнергии (стоимость сверхпроводника, если учесть высокое значение критической плотности его тока по сравнению с экономически целесообразной плотностью тока в медных или алюминиевых проводах, невелика) и ниже стоимости кабельных линий.

Осуществлять сверхпроводниковые линии электропередачи предполагается так: между конечными пунктами передачи в земле прокладывается трубопровод с жидким азотом. Внутри этого трубопровода располагается трубопровод с жидким гелием. Гелий и азот протекают по трубопроводам вследствие создания между исходным и конечным пунктами разности давлений. Таким образом, ожижительно-насосные станции будут лишь на концах линии.

Жидкий азот можно использовать одновременно и в качестве диэлектрика. Гелиевый трубопровод поддерживается внутри азотного диэлектрическими стойками (у большинства изоляторов диэлектрические свойства при низких температурах улучшаются). Гелиевый трубопровод имеет вакуумную изоляцию. Внутренняя поверхность трубопровода жидкого гелия покрыта слоем сверхпроводника.

Потери в такой линии с учетом неизбежных потерь на концах линии, где сверхпроводник должен стыковаться с шинами при обычной температуре, не превысят нескольких долей процента, а в обычных линиях электропередачи потери в 5—10 раз больше!

Силами ученых и инженеров уже созданы реальные сверхпроводящие кабели переменного и постоянного тока. Подобные линии могут передавать мощности во много тысяч мегаватт при КПД более 99%, при умеренной стоимости и относительно невысоком (110—220 кВ) напряжении. Может быть, еще более важно, что сверхпроводящие линии электропередачи не будут нуждаться в дорогостоящих устройствах компенсации реактивной мощности. Обычные линии требуют установки токовых реакторов, мощных конденсаторов, чтобы нивели-



ровать чрезмерные потери напряжения вдоль трассы, а линии на сверхпроводниках в состоянии себя самокомпенсировать!

Подсчитано, что при передаче по сверхпроводниковым кабельным линиям электропередач мощности порядка 20 Мвт на расстояние свыше 2000 км электрические потери снизятся на 10%, что соответствует сбережению 10 млн т условного топлива в год при стоимости системы, примерно равной стоимостям традиционных линий передач.

Сверхпроводники оказались незаменимыми и в электрических машинах, принцип действия которых предельно прост, но которых никогда раньше не строили, ибо для их работы нужны очень сильные магниты. Речь идет о магнитогидродинамических (МГД) машинах, осуществить которые Фарадей пытался еще в 1831 г.

Идея его опыта проста. В воду Темзы на ее противоположных берегах погружали две металлические пластинки. Если скорость реки 0,2 м/с, то, уподобив струи воды проводникам, движущимся с запада на восток в магнитном поле Земли (его вертикальная составляющая примерно равна  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл), с электродов можно снять напряжение примерно 10 мкВ/м.

К сожалению, этот опыт окончился неудачей: «генератор-река» не заработал. Фарадей не смог замерить ток в цепи. Но через несколько лет лорд Кельвин повторил опыт Фарадея и получил небольшой ток. Казалось бы, все осталось, как у Фарадея: те же пластины, та же река, те же приборы. Разве что место не совсем то. Кельвин построил свой генератор ниже по Темзе, там, где ее воды смешиваются с соленой водой пролива.

Вот она — разгадка! Вода ниже по течению была более соленой и, следовательно, обладала большей проводимостью! Это было сразу же зарегистрировано приборами. Увеличение проводимости «рабочего тела» — генеральный путь увеличения мощности МГД-генераторов.

Но увеличить мощность можно и другим способом — повышая магнитное поле. Мощность МГД-генератора прямо пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля.

Мечты об МГД-генераторах получили реальную основу примерно в середине прошлого века вместе с появлением первых партий сверхпроводящих промышленных материалов (ниобий-титан, ниобий-цирконий), из которых удалось сделать первые, еще маленькие, но работающие модели генераторов, двигателей, токопроводов, соленоидов.

МГД-генераторами занялись всерьез во многих странах, потому что в таких машинах можно использовать плазму в 8—10 раз более горячую, чем пар в турбинах тепловых электростанций, а при этом по известной формуле Карно КПД будет уже не 40, а все 60%.

Конечно, создать и экономично использовать такую станцию не просто: нелегко разместить рядом поток плазмы (2500 К) и криостат с обмоткой в жидком гелии (4—5 К), раскаленные электроды обгорают и зашлаковываются, из шлаков надо выщелачивать те присадки, которые только что добавлялись в топливо для ионизации плазмы, но ожидаемые выгоды должны окупить все трудозатраты.

Можно представить себе, как выглядит сверхпроводящая магнитная система МГД-генератора. Две сверхпроводящие обмотки расположены по бокам канала с плазмой, отделенного от обмоток многослойной тепловой изоляцией. Обмотки закреплены в титановых кассетах, и между ними поставлены титановые распорки. Кстати сказать, эти кассеты и распорки должны быть чрезвычайно прочными, так как электродинамические силы в обмотках с током стремятся разорвать их и притянуть друг к другу.

Поскольку в сверхпроводящей обмотке тепло не выделяется, рефрижератор, который требуется для работы сверхпроводящей магнитной системы, должен отводить лишь то тепло, которое поступает в криостат с жидким гелием через тепловую изоляцию и токоподводы. Потери в токоподводах можно свести практически к нулю, если использовать короткозамкнутые сверхпроводящие катушки, питаемые от сверхпроводящего трансформатора постоянного тока.

Гелиевый оживитель, который будет восполнять потери гелия, испаряющегося через изоляцию, по расчетам должен вырабатывать несколько десятков литров жидкого гелия в 1 ч. Такие оживители выпускает промышленность.

Раз возможен сверхпроводниковый МГД-генератор, значит, возможен и сверхпроводниковый МГД-двигатель! В опыте Фрадея движение воды в реке должно было дать ток. Но если к системе ток подвести, будет двигаться сама вода! Это — принцип МГД электродвижения. Он необычайно интересен проектировщикам ледоколов, военных судов, особенно подводных лодок, — МГД движители почти бесшумны, и подводную лодку труднее обнаружить! Сейчас работы приостановлены — оказалось, что вода океанов недостаточно солонa, чтобы сделать такие движители эффективными. Но вот если увеличить (сильно) магнитное поле, двигатель будет эффективно работать и при имеющейся солёности морей и океанов!

Без сверхпроводящих обмоток были бы нереальными крупные



токамаки, рабочая зона термоядерных генераторов — надежды энергетики будущего. В установке «Токамак-7», например, обмотка массой 12 т обтекалась током 4,5 кА и создавала на оси плазменного тора объемом 6 м<sup>3</sup> магнитное поле 2,4 Тл. Это поле создавалось 48 сверхпроводящими катушками, потребляющими за час всего 150 л жидкого гелия, повторное сжижение которого требует мощности 300—400 кВт.

Не только большая энергетика нуждается в экономичных компактных мощных электромагнитах, без них трудно обойтись учебным, работающим с рекордно сильными полями. На порядок производительнее становятся установки для магнитного разделения изотопов. Уже не рассматриваются проекты крупных ускорителей без сверхпроводящих электромагнитов. Совершенно нереально обойтись без сверхпроводников на пузырьковых камерах, которые становятся чрезвычайно надежными и чувствительными регистраторами элементарных частиц. Так, одна из рекордно больших магнитных систем на сверхпроводниках (Аргонская национальная лаборатория, США) создает поле 1,8 Тл с запасенной энергией 80 МДж. Исполинская обмотка массой 45 т (из них 400 кг ушло на сверхпроводник) при внутреннем диаметре 4,8 м, наружном 5,3 м и высоте 3 м требует для охлаждения до 4,2 К всего 500 кВт — ничтожно малую мощность.

Еще более внушительным представляется сверхпроводящий магнит пузырьковой камеры Европейского центра ядерных исследований в Женеве. Он имеет следующие характеристики: магнитное поле в центре — до 3 Тл, внутренний диаметр «катушки» — 4,7 м, запасенная энергия — 800 МДж.

В конце 1977 г. в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) вступил в строй один из крупнейших в мире сверхпроводящих магнитов «Гиперон». Рабочая зона его имеет диаметр 1 м, поле в центре системы — 5 Тл (!). Уникальный магнит предназначен для проведения экспериментов на протонном синхротроне ИФВЭ в Серпухове.

Осмыслив эти впечатляющие цифры, уже как-то неудобно говорить о том, что техническое освоение сверхпроводимости только начинается. В качестве примера можно напомнить о критических параметрах сверхпроводников. Если температура, давление, ток, магнитное поле превысят некоторые предельные значения, называемые критическими, сверхпроводник потеряет свои необычные свойства, превратившись в обычный материал.

Наличие фазового перехода вполне естественно использовать для контроля внешних условий. Если есть сверхпроводимость, значит, поле меньше критического; если у датчика восстановилось сопротивление — поле выше критического. Уже разработана серия самых разнообразных сверхпроводящих измерителей: болометр на спутнике может «почувствовать» зажженную спичку на Земле, гальванометры становятся чувствительнее в несколько тысяч раз; в резонаторах ультравысокой добротности колебания электромагнитного поля словно консервируются, ибо они чрезвычайно долго не затухают.

Среди сверхпроводящих устройств можно назвать детекторы альфа-частиц, криотроны (выпрямители), ячейки ЭВМ для схем памяти

и переключения. Много пишется про сверхпроводящие малоиндуктивные гальванометры (СЛАГи) и квантовые интерферометры на сверхпроводниках (СКВИДы), в которых полезно служат туннельные контакты. Их цель — измерять малые магнитные поля, они могут зафиксировать даже квант магнитного потока! Магниторезонансные томографы намного точнее регистрируют состояние больных.

Сверхпроводники нашли свое применение в магнитных сепараторах: в автомобильном, морском, авиационном транспорте, в транспортном магнитном подвесе скоростных железных дорог.

Теперь наступает время окинуть взором всю электрическую часть энергетики, чтобы понять, как россыпь сверхпроводящих устройств может дать суммарный эффект. Сверхпроводники могут повысить единичную мощность энергоагрегатов, высоковольтная энергетика может постепенно превратиться в многоамперную, вместо четырехшестикратного преобразования напряжения между электростанцией и потребителем реально говорить об одной-двух трансформациях с соответствующим упрощением и удешевлением схемы, общий КПД электрических сетей неминуемо вырастет вследствие джоулевых потерь. Но и это еще не все.

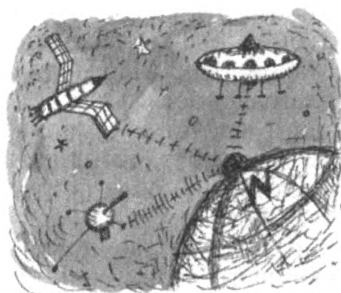
Электрические системы неизбежно приобретут другой вид, когда в них будут применять сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН)! Дело в том, что из всех отраслей промышленности только в энергетике нет складов: выработанное тепло и электричество хранить негде, их надо потреблять сразу. Определенные надежды связаны со сверхпроводниками. Из-за отсутствия в них электрического сопротивления ток может циркулировать по замкнутому сверхпроводящему контуру сколь угодно долго без затухания до тех пор, пока не настанет время его отбора потребителем. СПИНЫ станут естественными элементами электрической сети, их остается только оснастить регуляторами, переключателями или преобразователями тока или частоты при объединении с источниками и потребителями электричества.

Энергоемкость СПИНов может быть самой различной — от  $10^{-5}$  (энергия портфеля, выпавшего из рук) до 1 кВт·ч (глыба 10 т, упавшая со скалы 40 м) или 10 млн кВт·ч! Столь мощный накопитель должен иметь размеры беговой дорожки вокруг футбольного поля, его цена будет составлять 500 млн долл., а КПД — 95%. Равноценная гидроаккумулирующая электростанция окажется на 20% дешевле, но на свои нужды потратит треть мощности! Поучительна раскладка стоимости такого СПИНа по составляющим: на рефрижераторы — 2—4%, на преобразователи тока — 10%, на сверхпроводящую обмотку — 15—20%, на теплоизоляцию холодной зоны — 25%, а на бандажи, крепления и распорки — почти 50%.

Основой энергетики XXI века могут стать атомные и термоядерные станции с чрезвычайно мощными электрогенераторами. Электрические поля, порожденные сверхпроводящими электромагнитами, могучими реками смогут перетекать по сверхпроводящим линиям электропередачи в сверхпроводящие накопители энергии, откуда по мере необходимости будут отбираться потребителями. Электростанции смогут равномерно вырабатывать мощность и днем, и ночью, а

освобождение их от плановых режимов должно повысить экономичность и срок службы главных агрегатов.

К наземным электростанциям можно добавить космические солнечные станции. Зависнув над фиксированными точками планеты, они должны будут преобразовывать солнечные лучи в коротковолновое электромагнитное излучение, чтобы посылать сфокусированные потоки энергии к наземным преобразователям в токи промышленного назначения. Все электрооборудование наземно-космических электрических систем должно быть сверхпроводящим, в противном случае потери в проводниках конечной электропроводности окажутся, по-видимому, неприемлемо большими.



# ПОСЛЕСЛОВИЕ

---

Никогда во всей истории человечества еще не было периода, когда мировоззрение и благосостояние человека в столь сильной степени зависели бы от прогресса науки, как сейчас.

...Маленькой дрожащей стрелке, с одного конца выкрашенной в черный цвет, с другого — в красный, мы обязаны удивительными открытиями. Неизвестные миры, экзотические животные, благоухающие острова, ледяные континенты и не знающие цивилизации народы предстали перед глазами изумленных «водителей фрегатов», сверявших свой путь с маленькой стрелкой компаса.

В огромном арсенале атрибутов современной жизни магнит занимает совершенно особое место. Без него невозможно никакое исследование, никакая наука, никакая промышленность, никакая цивилизованная жизнь. Если вспомнить еще и о том, что не обладай Земля магнитным полем, она была бы сейчас испепеленной космическим излучением планетой, такой, как Марс, то можно почувствовать к магниту нечто вроде благодарности.

Но кроме благодарности магнит достоин и уважения — ведь если мыслить в исторических масштабах, то приходится сознаться, что мы немногое еще можем сказать о природе притяжения магнита.

Почему магнит притягивает?

Этот вопрос еще сотни лет будет волновать умы мальчишек и ученых. Не станем переоценивать своих знаний. Кто это делает, часто попадает впросак. Вспомним, что было написано об электричестве в 1755 г. в одном лондонском еженедельнике: «Электричество — сила, хорошо изученная человеком. Ее с успехом применяют для лечения болезней, эта сила способна ускорять развитие растений».

Эти самонадеянные слова были написаны до Фарадея, Ампера, Максвелла, когда люди, как теперь смело можно утверждать, почти ничего не знали об электричестве. Мы много знаем об электричестве и магнетизме и с каждым днем узнаем все больше и больше. Но за одной проблемой встают другие, не менее сложные и интересные. Жизнь всегда будет полна загадок. И наряду с самыми сложными — загадкой жизни и загадкой Вселенной — загадка магнита всегда будет давать пищу для любознательного ума.

...Альберт Эйнштейн на всю жизнь запомнил тот день, когда ему, четырехлетнему ребенку, подарили новую игрушку — компас. На всю жизнь сохранил он детскую удивленность чудесными свойствами магнита, теми самыми свойствами, которые тысячи лет назад волновали наших предков.

Вряд ли когда-нибудь найдется человек, который возьмет на себя смелость утверждать: «Я постиг загадку магнита!» Однако ученые, познавшие удивительно небольшую толику тайны, смогли создать устройства, способные соперничать с самыми сильными магнитами, созданными природой.





Т В О Й      К Р У Г О З О Р

В. П. КАРЦЕВ

---

# ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР МАГНИТОВ

---

НАС ОКРУЖАЮТ ДЕСЯТКИ МАГНИТОВ.  
САМИ МЫ – ТОЖЕ МАГНИТЫ.  
ПЛАНЕТА, НА КОТОРОЙ МЫ ЖИВЕМ, – ГИГАНТСКИЙ  
МАГНИТ. ВПРОЧЕМ, НИКТО И НИКОГДА НЕ СМОЖЕТ  
СКАЗАТЬ, ЧТО ЗНАЕТ О МАГНИТЕ ВСЕ.

---

«Твой кругозор» — это проверенные временем традиции научно-познавательной литературы для детей. В серию вошли лучшие книги по гуманитарным и естественно-научным предметам, написанные российскими и зарубежными авторами. Книги серии позволят вам расширить кругозор, повысить свой образовательный уровень и стать знатоками в различных областях знаний.

МАТЕМАТИКА РУССКИЙ ЯЗЫК ФИЗИКА ГЕОГРАФИЯ ИСТОРИЯ

ISBN 978-5-09-019121-0



9 785090 191210