

Космический магнит в нашей лаборатории

Д.Д.Соколов,

доктор физико-математических наук

Р.А.Степанов,

доктор физико-математических наук

П.Г.Фрик,

Институт механики сплошных сред УрО РАН,

Физический факультет МГУ им М.В.Ломоносова



1

Полярные сияния на Земле, на снимке, сделанном с МКС (а), и на Юпитере — северное (б) и южное (в) www.ridus.ru/news/3781,

Мы привыкли к тому, что магнитные процессы происходят главным образом в маленьких, но важных деталях всяких технических устройств и связаны с тонкими квантово-механическими явлениями, а в статьях о них, прикидывающихся популярными, то и дело повторяется таинственное и малопонятное слово «спин». Но магнетизм бывает и в космосе, и там он выглядит совсем по-другому. Астрономы установили, что очень многие небесные тела, например Солнце или наша галактика — Млечный Путь, являются гигантскими магнитами, причем размеры магнитного поля сравнимы с размерами самого небесного тела. Вещество, из которого состоит Солнце — солнечная плазма, — очень горячее, а межзвездный газ в Млечном Пути очень разреженный. Поэтому магнитное поле в них связано не с упорядочиванием спинов, как в ферромагнетиках, а с какими-то процессами, принадлежащими к области классической физики, которую, надеемся, еще проходят в средней школе.

Космические магнитные поля существенно сильнее привычных нам полей. Не стоит сравнивать непосредственно напряженности магнитного поля в DVD-плеере, сотовом телефоне и часах с полем Солнца или галактики. Для тел очень разного размера приходится выбирать соразмерные им масштабы. Нерадивый школьник прогулял занятия и, оправдываясь, говорит, что не смог прийти до школы потому, что магнитное поле около школы было слишком велико. Нетрудно предвидеть реакцию родителей... Однако для объяснения движений космических сред это объяснение вполне естественно — именно магнитное поле Земли мешает выброшенному Солнцем облаку плазмы достичь поверхности Земли.

Магнитное поле Земли — единственный пример космического магнетизма, который можно наблюдать невооруженным глазом (рис. 1). Полярное сияние — это визуализация магнитного поля Земли заряженными частицами, подобная визуализации лазерного луча пылью в воздухе. Стрелка компаса показывает на север, потому что она сама — маленький ферромагнетик, ее свойства определяются теми самыми спинами. Но почему магнитом является сама Земля и почему ее магнитный полюс примерно совпадает с географическим?

На Земле есть месторождения железных руд, намагниченность которых кое-что вносит в геомагнитное поле, создает магнитные аномалии, например Курскую магнитную анома-

лию. Но они вносят небольшие искажения в общее (как говорят, главное) геомагнитное поле. Это поле формируется где-то в глубине Земли, а температура там достаточно высока для того, чтобы о ферромагнетиках не заходила и речь.

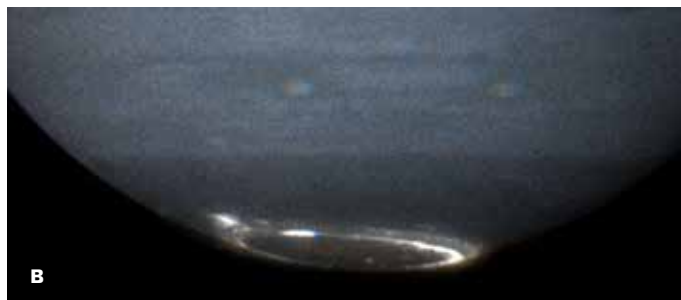
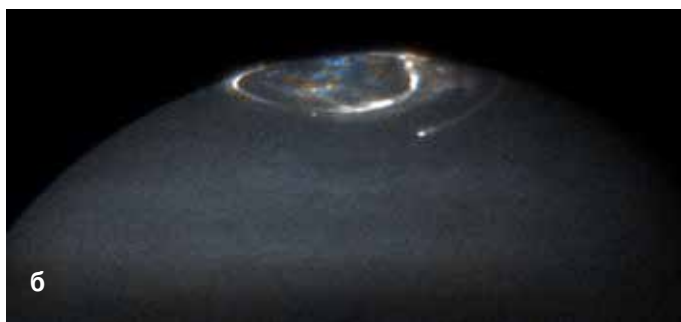
Какие процессы приводят к образованию магнитных полей небесных тел — планет, звезд и галактик? Выбор невелик: мы в области классической физики, а она знает только один процесс, который в принципе может приводить к росту магнитного поля. Это — явление электромагнитной индукции. В школе рассказывают (а иногда и показывают), что при движении проводящей рамки в магнитном поле в ней начинает течь ток. Этот наведенный или индуцированный ток тоже создает магнитное поле. Может ли случиться так, что это наведенное поле сложится с исходным так, чтобы общее магнитное поле увеличилось? Почти век назад, в 1919 году, физик Джозеф Лармор понял, что именно индуцированный ток в глубинах Солнца — единственный шанс объяснить магнитное поле нашей звезды, не прибегая к фантастическим гипотезам о каких-то новых взаимодействиях (за такими гипотезами дело не стало, но все они не выдержали сопоставления с реальностью).

Короткая заметка Лармора (в ней была всего одна страница) оказалась первым шагом в изучении процесса самовозбуждения магнитного поля в движущихся проводящих средах. Начало XX века — время развития электричества, язык откликнулся популярностью новых слов, в том числе слова «динамо». Устройство, которое преобразует механическую работу в электрическую, называли «динамо-машиной», а новый раздел физики — «теорией динамо». Именно так и принято было говорить долгие годы, так говорят и ныне — теория динамо.

Физика — наука экспериментальная: можно долго обсуждать модели физических процессов, которыми оперируют теоретики, но физики скоро начали говорить, что неплохо было бы подтвердить все эти домыслы экспериментально. А именно: надо подтвердить, что наведенное поле может сложиться с исходным. Этого подтверждения пришлось ждать почти век.

В чем проблема?

Трудность в экспериментальной проверке идеи динамо состоит вот в чем. Если нажать на выключатель и разорвать проводящий контур, по которому идет ток, свет погаснет, а



www.biguniverse.ru/posts/reviews/astromiya-a-za-nedelyu-6-12-fevralya-2012/



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

Что касается скорости движений, то возможности лабораторной физики явно проигрывают возможностям космической среды. Однако главное преимущество космосу дают огромные размеры. Лабораторная установка размером в 10 метров, в которой среда движется со скоростью 10 м/сек, — зрелище циклопическое, а для космоса это очень скромные цифры.

В итоге для Солнца магнитное число Рейнольдса достигает миллионов, а для современной лаборатории сотня — предел мечтаний, результат многолетнего упорного труда. Тем не менее это уже больше заветных 17, так что шансы есть.

Однако не все так просто с самим механизмом динамо. На Солнце, да и в Земле нет металлических рамок с током — их работу должны воспроизводить потоки среды. Организовать нужное движение потока жидкости значительно сложнее, чем двигать нужным образом провод. Однако гораздо хуже то, что простые течения заведомо не могут работать как динамо. Про это тоже рассказывают в школе: согласно правилу Ленца, магнитное поле, возникшее в проводящей рамке за счет явления электромагнитной индукции, направлено противоположно исходному магнитному полю и не усиливает его, а ослабляет. Поэтому движение одной рамки не может привести к самовозбуждению в ней магнитного поля.

Умный Ленца обойдет

И все же физики нашли лазейку в правиле Ленца. Рассмотрим две рамки, движущиеся в магнитном поле. Индукционный эффект в первой рамке ослабляет магнитное поле в этой же самой рамке, но может усиливать его во второй, если она подходящим образом расположена. Это правилу Ленца не противоречит. Теперь можно добиться того, чтобы индукционный эффект во второй рамке усиливал магнитное поле в первой, но, конечно, ослаблял его во второй. Можно надеяться, что совместная работа двух рамок приведет к тому, что в каждой из них индукция станет больше потерь и магнитное поле начнет лавинообразно нарастать.

Конечно, в принципе можно надеяться на все, что прямо не запрещено законами природы, но от надежды до уверенности расстояние заметное. Его удалось преодолеть в 60-е годы прошлого века, и сделал это Ю.Б.Пономаренко. Он придумал такое конкретное течение проводящей жидкости, которое оказалось достаточно сложным для того, чтобы в нем генерировалось магнитное поле, но достаточно простым, чтобы уравнение индукции, которое описывает поведение магнитного поля, можно было решить точно.

Судьба первопроходцев в науке часто бывает трудной. Работа Пономаренко — одна из наиболее известных работ, посвященных динамо. Этого совсем нельзя сказать о самом Пономаренко — его биография совершенно исчезла из памяти научного сообщества. Честно говоря, мы могли бы лучше помнить своих героев.

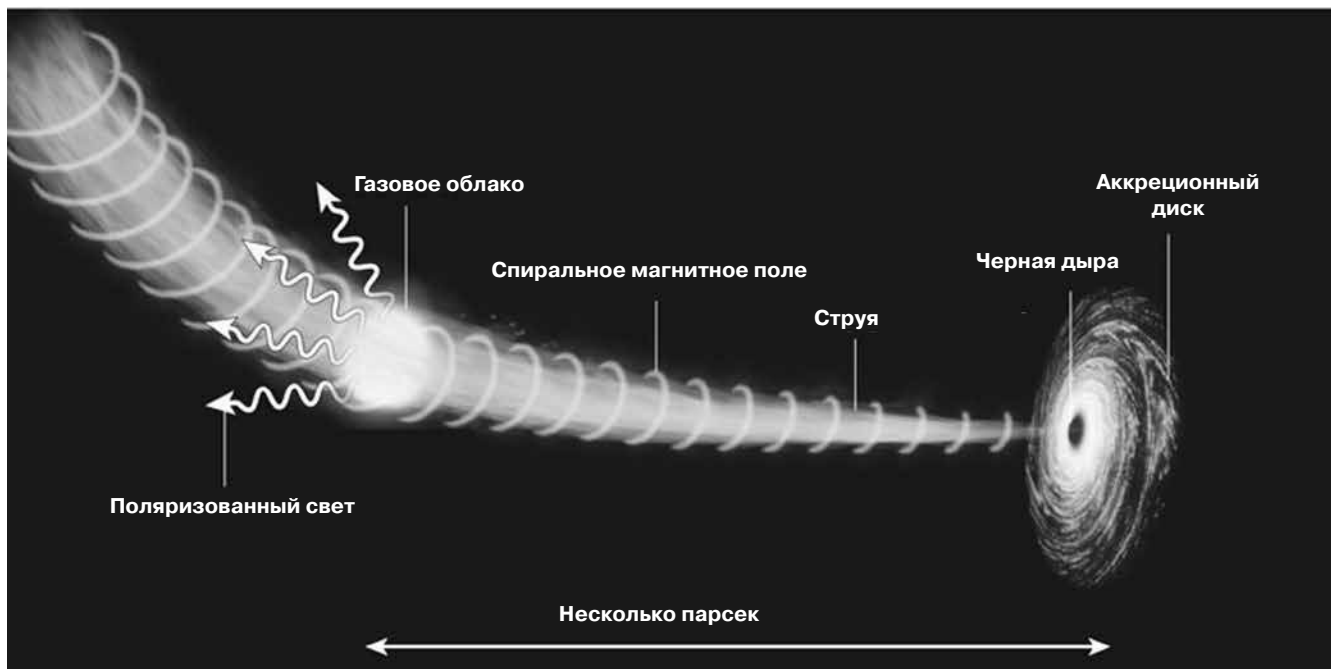
Течение, придуманное Пономаренко, — это бесконечная вращающаяся струя проводящей жидкости, окруженная проводящей средой (рис. 2). Такое течение удобно воспроизводить в лаборатории, и у него самое низкое из известных

заодно исчезнет магнитное поле, порожденное током. Энергия магнитного поля перейдет в тепло из-за омических потерь (и отчасти из-за излучения). Для того чтобы работало динамо, индукционный эффект должен побороть омические потери. Чтобы оценить относительную величину индукционных эффектов и омические потери, вводят так называемое безразмерное магнитное число Рейнольдса $Rm = vL/\eta$. Числитель этой дроби содержит величины, с которыми связаны индукционные эффекты, — скорость движения рамки и ее размер, а знаменатель — коэффициент магнитной диффузии, который пропорционален удельной электрическому сопротивлению среды. Для того чтобы индукция победила омические потери, магнитное число Рейнольдса должно быть достаточно велико — расчеты показывают, что нужно достичь значения около 17.

Поиск возможной схемы динамо-эксперимента — прежде всего борьба за высокое магнитное число Рейнольдса. Возможности лабораторной физики здесь не слишком велики — движущихся хорошо проводящих сред не так много. Если мы хотим моделировать планетарные и космические эффекты, то речь не идет о твердых проводниках. В космосе твердые тела редкость, а те, что есть — твердые оболочки Земли, например, — заведомо не создают интересных индукционных эффектов. Проводящие газы — это плазма. Из нее в огромном большинстве состоят небесные тела. Не исключено, что в будущем нас ждут и лабораторные динамо-эксперименты с плазмой, но сейчас эти возможности еще в стадии обсуждения.

Среди жидкостей выбор тоже невелик. У электролитов проводимость плохая, остаются жидкие металлы. Ртуть дорогая, опасная, очень тяжелая и плохой проводник. Чтобы разогнать большое количество ртути до необходимых скоростей, нужна огромная энергия. В лабораторных экспериментах по изучению течений жидких металлов широко используется галлий — он вдвое легче ртути и плавится при 29°C (а его сплавы даже при 17°C), но галлий тоже дорогой и не так хорошо, как хотелось бы, проводит электрический ток. Большая плотность и слабая проводимость — недостатки и других низкотемпературных сплавов (например, широко известного сплава Вуда). Следующий кандидат, натрий, взрывоопасен, и его придется нагревать до сотни градусов. Но он дешевый, проводит ток лучше галлия и очень легкий. Есть еще эвтектический сплав натрия с галлием, который плавится при 12°C, правда, он очень агрессивен, как и литий.

Итак, мы определились с возможным веществом для динамо-экспериментов: это натрий, разумный компромисс требуемых физических свойств и опасности. Выбор был ясен уже в самом начале пути, полвека назад.



2

Так выглядит вращающаяся струя, «джет», в мире галактик

критическое магнитное число Рейнольдса, так что идея Пономаренко стала одной из основных в динамо-экспериментах.

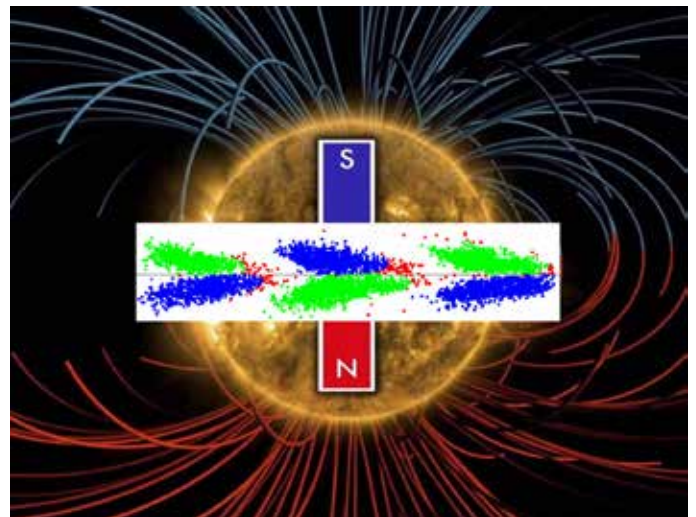
Сейчас экспериментально подтверждено, что течение, примерно так и устроенное, действительно генерирует магнитное поле. Однако на самом деле оно генерирует его не очень хорошо, и поле растет медленно. В то же время астрономические наблюдения показывают, что, скажем, на Солнце магнитные поля изменяются быстро. Каждый цикл солнечной активности, то есть каждые 11 лет, солнечный магнитный диполь меняет знак на противоположный — для звезд это очень быстрые изменения. Ничего подобного динамо Пономаренко обеспечить не может. Причина в том, что в работе динамо Пономаренко магнитная диффузия не только вызывает омические потери, но и обеспечивает работу одного из контуров, в которых происходит индукция магнитного поля. Это еще один тонкий эффект в нашей науке: векторная величина, то есть магнитное поле, диффундирует не так, как скалярная величина, то есть температура.

Для того чтобы магнитное поле изменялось быстро, так, как это бывает в солнечном цикле, необходим более сложный механизм, чем динамо Пономаренко. Такой механизм предложил в 1955 году Юджин Паркер. Представим себе поле магнитного диполя, направленного вдоль оси вращения Солнца. Поскольку солнечная плазма — относительно хороший проводник, то магнитные линии движутся вместе с солнечной плазмой. Но Солнце вращается не как твердое тело — разные его слои вращаются с различной угловой скоростью, это называется дифференциальным вращением. В результате одни частицы солнечного вещества обгоняют другие, магнитные линии вытягиваются в азимутальном направлении, а из дипольного поля получается магнитное поле, которое наматывается на некоторый тор внутри Солнца — его так и называют тороидальным. Это — индукционный эффект в первом контуре. Он достаточно прост, и в нем сомнений нет.

Для того чтобы динамо заработало, нужно как-то превратить тороидальное магнитное поле в поле магнитного диполя (его называют полоидальным). Этого нельзя сделать простыми течениями. Паркер догадался, что для этого течения должны

быть зеркально-асимметричными. В северном полушарии течения должны содержать больше вихрей, вращающихся в правую (по ходу общего движения вихря) сторону, а в южном полушарии — в левую. Оказывается, что именно так обстоит дело во вращающемся теле, в котором есть конвективные потоки и переменная плотность. Тогда в одном полушарии вихри действительно вращаются в основном вправо, а в другом — влево. И если эта среда проводящая, то возникает магнитное поле, направленное по электрическому току (а не перпендикулярно к нему, как обычно), а это, в свою очередь, приводит к искомому превращению тороидального поля в полоидальное (рис. 3).

На рис. 3 изображены магнитные линии магнита, находящегося внутри сферы, — полоидальное магнитное поле, то, которое рисуют в школьных учебниках. На белом прямоугольнике показано, как по наблюдениям солнечных пятен визуализиру-



3

Полоидальное и тороидальное магнитные поля. На основном рисунке показано, как выглядят магнитные линии магнита, находящегося внутри сферы, — полоидальное магнитное поле. На белом поле показано, как по наблюдениям солнечных пятен визуализируется тороидальное магнитное поле

ется тороидальное магнитное поле. Это поле непосредственно не наблюдаемо, поскольку сосредоточено под поверхностью Солнца. Зато на поверхность Солнца в виде групп солнечных пятен выплывают отдельные магнитные трубки, отделяющиеся от тороидального поля. Показано, как в ходе солнечного цикла (11 лет) меняются широты тех мест, куда выплывают группы пятен (по горизонтальной оси — время, по вертикальной — широта). Видно, что пятна образуют кластеры, находящиеся в разных полушариях. Темным и светлым показаны кластеры с группами пятен противоположной полярности, а отдельные точки — те немногие пятна, для которых использованный метод разделения кластеров дал ненадежные результаты. Видно, что тороидальное магнитное поле дрейфует в ходе цикла солнечной активности от средних широт к солнечному экватору, оно антисимметрично по отношению к экватору и меняет знак каждый цикл. Это правило полярности Хейла.

Паркер аргументировал свои мысли с помощью аналогии с циклонами на Земле. Такая аргументация выглядела не очень убедительно, хотя сейчас мы знаем, что он правильно угадал нужные уравнения и характер их решения. Подвести под эти соображения базу в виде продуманных уравнений, вытекающих из уравнений Максвелла, а не из аналогий, удалось десятилетием позже, в замечательной работе Макса Штеенбека, Фрица Краузе и Карла Хайнца Рэдлера.

Альфа-эффект приходит в динамо

Макс Штеенбек вообще был колоритным человеком. В молодости ведущий инженер фирмы «Сименс», он изобрел массу занятных вещей, например торпеду, которая взрывается не при первом контакте с корпусом корабля, как все нормальные торпеды, а когда проникнет внутрь корпуса. Разрушения при этом возрастают многократно. Изобретение произвело такое впечатление на противников Германии во Второй мировой войне, что десять лет после ее окончания ему пришлось провести в специальном закрытом институте («шарашке») в Сухуми. Как, кстати, и многим другим немецким физикам и инженерам. Потом его отпустили в ГДР и сделали президентом Академии наук этой страны. Сделали заслуженно: обсуждаемая работа — наиболее яркое достижение физики ГДР. Младшие соавторы Штеенбека вспоминают, что он — заядлый курильщик — говорил им, куря сигару: «Вы живете как свиньи, те тоже не курят!»

Работа была написана тяжелым языком, конечно, по-немецки, символы физических величин набраны готическим шрифтом, и опубликована в малоизвестном журнале. Однако ее быстро перевели на английский язык, и она стала популярной среди специалистов. При переводе все символы были последовательно обозначены буквами греческого алфавита, а процесс преобразования тороидального магнитного поля в полоидальное получил название «альфа-эффект». Говорят, что у истории есть своя логика, но иногда она несколько странная.

Роль альфа-эффекта подтверждается математическими выкладками, но одними выкладками физиков убедить трудно. Ясную физическую картину того, как можно без участия магнитной диффузии генерировать магнитное поле, дал Я.Б.Зельдович. Поскольку он был одним из создателей атомной и водородной бомб, за рубеж его выпускали очень редко, и каждая поездка за границу была для него большим событием. Поэтому на симпозиуме в Кракове, уже в 70-х, он был в состоянии легкой эйфории и, отвечая на вопрос, как же может работать динамо — ведь для этого нужно на месте, где была одна магнитная линия, получить две, а эти линии приклеены к жидкости, — проделал следующий трюк. Он попросил одного из слушателей, сидевшего в первом ряду, дать ему брючный ремень и показал на этом ремне, как течение сначала вытягивает магнитную петлю (это делает дифференциальное вращение), а потом сворачивает ее в восьмерку и складывает



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

вдвое (здесь уже нужен альфа-эффект — ведь надо сделать зеркально-асимметричную операцию). История умалчивает о том, что стало с брючным ремнем и его хозяином, но эту иллюстрацию усвоили все специалисты, а ее автор не нашел нужным описать ее в какой-нибудь специальной работе. Видимо, ему казалось, что этого замечания достаточно.

Забавно, что все эти эпизоды были совершенно независимы — немецкие физики не читали Паркера и так далее. Наука может развиваться совершенно алогично, люди придумывают решения еще не написанных уравнений, делают все для того, чтобы их идеи не стали достоянием публики, но из всего этого со временем вырастает последовательная наука.

У альфа-эффекта есть и еще одна важная черта. В окружающем нас мире почти нет явлений, связанных с зеркально-асимметричными средами, пожалуй, только закон Бэра в географии (о том, какой берег подмывает река в данном полушарии), да то, что органические молекулы в живом веществе имеют только одну ориентацию, напоминают нам о роли зеркальной асимметрии. В последнее время физики стали делать зеркально-асимметричные заполнения волноводов и пробуют извлечь из этого интересные эффекты. Совершенно по-другому обстоит дело в микромире — есть реакции между элементарными частицами, которые идут иначе после отражения в зеркале. Оказывается, что и в физике космических сред, как и в микрофизике, зеркальная асимметрия тоже играет роль. В современной физике любят говорить о том, что космология смыкается с микрофизикой. При изучении динамо такое смыкание тоже, как мы видим, происходит, но каким-то неожиданным образом.

Видимо, сказанного достаточно для того, чтобы читатель почувствовал: изучение динамо полно совершенно нестандартными идеями, которые диковато выглядят для человека, не соприкасающегося близко с этой областью физики. При этом список нестандартных идей из теории динамо легко продолжить, но ограничение объема статьи удерживает нас от этого.

Эксперимент

Конечно, нет никакой надежды, что люди до конца поверят в нестандартные идеи, если их не поддержать хоть какими-то экспериментами. Это было понятно уже в 60-х годах, когда Макс Штеенбек, вероятно используя служебное положение, договорился с советскими физиками о постановке первого динамо-эксперимента. Магнитная гидродинамика, к которой по своему смыслу должен был принадлежать этот эксперимент, была одной из сильных областей советской физики. Эта область науки пользовалась вниманием правительства, оно нашло время принять специальное решение о том, что центром исследований в области магнитной гидродинамики должна была стать Латвийская ССР, а именно Институт физики Латвийской ССР в Саласпилсе под Ригой.

С тех пор прошло много лет, теперь Рига — далекое зарубежье. Латвийские физики подружились с немецкими физиками и за несколько дней до конца прошлого тысячелетия впервые получили самовозбуждение магнитного поля в потоке жидкого



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

натрия. Это был действительно циклопический эксперимент. Тонны натрия прокачивались мощными насосами через систему труб и емкостей, занимавших трехэтажное здание. Немало времени ушло на решение самых разнообразных технических проблем, хотя бы на устранение пробок при течении натрия. Тем не менее успех был достигнут, и работа нашла мировое признание. Через несколько дней самовозбуждение магнитного поля было получено в другом динамо-эксперименте, на этот раз чисто немецком, который проводили в Карлсруэ. Эта работа тоже приобрела мировую известность.

Российским физикам пришлось начинать с нуля. Некоторый задел был у физиков Института механики сплошных сред в Перми, и на исходе 90-х приняли решение начать там экспериментальные работы по магнитной гидродинамике жидких металлов при больших магнитных числах Рейнольдса, ориентированные на изучение процесса динамо.

При планировании динамо-эксперимента в Перми было ясно, что в обозримом будущем не удастся соревноваться с зарубежными физиками в размерах установки, то есть в том самом L , которое входит в магнитное число Рейнольдса, — просто не хватит денег. К счастью, удалось найти свежий подход к задаче. Прежние установки создавали течение, которое в принципе можно поддерживать неопределенно долгое время. Насосы разгоняют жидкий натрий, и это требует больших затрат энергии — вязкость натрия маленькая, так что турбинами разогнать его нелегко.

Идея пермской установки в другом: ее действие импульсное, а быстрое течение возникает лишь на короткое время. Берется тороидальная емкость и долго разгоняется сравнительно маломощным мотором, а потом быстро тормозится мощными тормозами. При этом жидкость внутри емкости продолжает свое движение — вязкость-то маленькая, — а стоящие в канале диверторы формируют нужный профиль потока. Конечно, такой поток довольно быстро теряет скорость, но за это время многое удастся померить (рис. 4).

Лаборатория начинала работу тогда, когда самовозбуждение магнитного поля еще не было достигнуто нигде в мире, но после успехов в Риге и в Карлсруэ стало ясно, что нужно искать новые ориентиры. Это же пришлось делать и другим группам, работающим с динамо-экспериментами, в частности нашим французским коллегам из Лиона.

При решении этой стратегической проблемы было важно увидеть, что динамо-эксперименты в чем-то родственны разнообразным работам по электротехнике и электронике. Во всех этих случаях речь идет о построении сложного прибора, который обеспечивает желаемое поведение электромагнитного поля. При этом возникает два типа задач. Одни задачи — как сделать из известных материалов то, что хочется, и как оно будет себя вести, а другие — каковы свойства различных материалов и почему они такие. В физике это два разных класса задач. Никому не приходит в голову одновременно разрабатывать телевизор и выяснять, почему медь — хороший проводник и какова ее электропроводность. В астрофизике по многим причинам эти две области деятельности практически не разделены, так что во многих теоретических работах по динамо одновременно вычисляли, скажем, альфа-эффект и выясняли, какие конфи-



4

Сравнительно небольшая установка пермского эксперимента имеет внушительные размеры. На фото один из участников эксперимента, профессор С.Ю.Хрипченко, за сборкой установки

гурации магнитного поля генерируются в солнечной плазме с таким альфа-эффектом. Возникающие при этом трудности легко вообразить, представив себе команду разработчиков нового телевизора, если они заодно ставят разные материалovedческие эксперименты с материалами, из которых сделаны схемные элементы — лампы, транзисторы, резисторы и т. д.

Командам, работающим в области динамо-экспериментов, удалось достичь разумного разделения труда в этой области. Лионские физики научились воспроизводить на своей установке разнообразные режимы работы динамо, которые моделируют поведение магнитного поля на Солнце и на Земле. В этих небесных телах временное поведение магнитных полей очень различно, и оба типа поведения им удалось воспроизвести в Лионе. В Перми же пошли по другому пути — стали измерять разнообразные коэффициенты переноса магнитного поля в турбулентном потоке. Впервые в мире удалось измерить сам альфа-эффект, то есть основную величину, с которой связана генерация магнитного поля. Этот результат тоже общепризнан в кругу специалистов.

Специалисты разных стран, работающие в области динамо-эксперимента, сотрудничают друг с другом. Пермские физики ездят в Лион, французские физики бывают в Перми, вместе с пермскими коллегами проводят измерения на пермских установках, публикуют совместные работы. Наша область еще находится в начале своего развития. Пройдены лишь первые рубежи, достигнуты первые результаты, пережиты первые разочарования. Однако мы уже знаем, откуда берется то, что двигает стрелочку на рис. 5.



5

Узнаёте?

Подробнее об этой работе, о ее истории, о проблеме и обо всем, что ее окружает, можно прочесть в статье: Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Динамо: на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту. «Успехи физических наук», 2014, № 3 (<http://ufn.ru/ru/articles/2014/3/>).