

Космический магнетизм приходит в лабораторию

Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г.

Мы привыкли к тому, что магнитные явления – прежде всего процессы в важных, но маленьких деталях всяких технических устройств. Они связаны с тонкими квантово-механическими процессами, а рассказы о магнитных явлениях пестрят таинственным и малопонятным словом *спин*. Оказывается, что магнетизм в космосе выглядит совсем по-другому. Астрономы установили, что очень многие небесные тела, например, Солнце или наша галактика (Млечный Путь) являются гигантскими магнитами. Характерные размеры магнитного поля сравнимы с размерами самого небесного тела, например, Солнца. Вещество, из которого состоит Солнце, солнечная плазма, очень горячее, а межзвездный газ в Млечном Пути очень разреженный. В таких условиях не приходится обсуждать возможность того, что магнитное поле связано с упорядочиванием спинов, как это происходит в ферромагнетиках. Очевидно, что космический магнетизм связан с какими-то процессами, принадлежащими к области классической физики, которую, надеемся, еще проходят в средней школе.

У космических магнитных полей есть еще одно важное отличие от привычных нам магнитных полей – они сравнительно очень сильные. Конечно, не стоит сравнивать непосредственно напряженности магнитного поля в домашнем приборе или на Солнце. Для тел очень разного масштаба приходится выбирать соразмерные им мерки магнитного поля. Лучше рассмотреть простой пример. Допустим, что нерадивый школьник прогулял занятия и, оправдываясь перед разгневанными родителями, говорит, что не смог дойти до школы потому, что магнитное поле около школы было слишком велико. Нетрудно предвидеть реакцию родителей: “Ты бы хоть потрудился придумать правдоподобную причину!” Напротив, для объяснения движений космических сред подобное объяснение выглядит вполне естественно – именно магнитное поле Земли мешает выброшенному Солнцем облаку плазмы (которое совсем не безопасно для жителей нашей планеты) достичь поверхности Земли.

Магнитное поле Земли – это, пожалуй, единственный пример космического магнетизма, который можно наблюдать невооруженным глазом. Для этого придется поехать в заполярье и посмотреть на полярное сияние. Во время него магнитное поле Земли визуализируется заряженными частицами, подобно солнечным лучам в пыльной комнате. Мы привыкли думать о том, почему магнитная стрелка показывает на север. Конечно, сама стрелка – маленький ферромагнетик. Его свойства определяются этими самыми спинами. Но почему магнитом является сама Земля и почему ее магнитный полюс примерно совпадает с географическим? Без этого магнитная стрелка была бы бесполезной. Конечно, на Земле есть месторождения железных руд, намагниченность которых кое-что вносит в геомагнитное поле. Таким образом, создаются некоторые магнитные аномалии, например, Курская магнитная аномалия (КМА). Образование таких аномалий – не только интересное, но и важное для народного хозяйства явление, однако, как показывает само название, магнитные аномалии лишь 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.

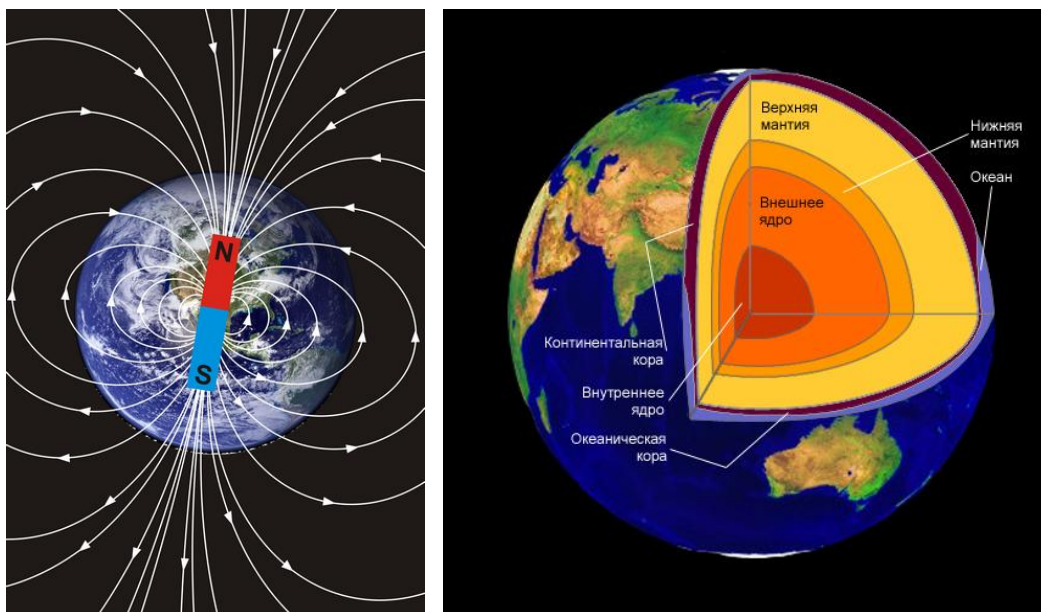


Рис. 1. Магнитное поле Земли имеет такую же структуру, как поле плоского магнита, однако внутреннее строение Земли исключает наличие там постоянного магнита

Какие же таинственные процессы приводят к образованию магнитных полей небесных тел? На самом деле выбор очень невелик. Мы находимся 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 раньше и показывали), что при движении проводящей рамки в магнитном поле в рамке начинает течь ток. Для нас важно сделать следующий шаг – этот наведенный (или, говоря по-научному, индуцированный) ток сам по себе создает магнитное поле. Можно надеяться, что это наведенное поле сложится с исходным так, чтобы общее магнитное поле шаг за шагом нарастало. В 1919 г. Дж. Лармор осознал, что это – единственный шанс объяснить магнитное поле Солнца не прибегая к фантастическим гипотезам о каких-то новых взаимодействиях (за такими гипотезами, конечно, дело не стало, но все они не выдержали сопоставление с реальностью).

Короткая заметка Лармора (в ней всего одна страница) оказалась первым шагом в изучении процесса самовозбуждения магнитного поля в движущихся проводящих средах (читай – на Солнце). Начало XX века – время развития автомобилизма. Автомобиль казался загадочным и притягивающим. Появились футбольные клубы «Динамо» и «Торпедо», станция метро «Динамо». Кстати, динамо – это какая-то штука в автомобиле, где вырабатывается электрический ток, а заодно и магнитное поле. По имени этого таинственного прибора назвали и новый раздел физики – теорию динамо.

Именно так и принято было говорить долгие годы *теория динамо*. Физика – да и химия тоже – наука экспериментальная. Можно долго и очень убедительно обсуждать упрощенные модели физических процессов, которыми оперирует теоретическая физика, но очень скоро говорят, что неплохо было бы подтвердить все эти домыслы экспериментально. При изучении динамо такого подтверждения пришлось ждать почти столетие.

Трудность в экспериментальной проверке идеи динамо состоит вот в чем. Представим себе небольшой и убедительный физический эксперимент – перережем провод, по которому идет электрический ток, освещающий комнату (при выполнении этого эксперимента следует подумать о том, чтобы тебя не ударило током). Исход эксперимента предсказуем – свет погаснет почти мгновенно, а заодно исчезнет и магнитное поле, порожденное током. Энергия магнитного поля перейдет в тепло

из-за, как говорят, омических потерь. Для того, чтобы работало динамо, индукционный эффект должен перебороть омические потери. Для того чтобы оценить относительную величину индукционных эффектов и омические потери, вводят т.н. безразмерное магнитное число Рейнольдса $Rm = vL/\nu_m$.

Числитель этой дроби содержит величины, с которыми связаны индукционные эффекты, т.е. скорость движения рамки v и ее размер L , а знаменатель – т.н. коэффициент магнитной диффузии ν_m , который обратно пропорционален удельной электрической проводимости среды. Для того, чтобы индукция победила диссипацию, нужно, чтобы магнитное число Рейнольдса было достаточно велико (расчеты показывают, что нужно как минимум $Rm = 17$).

Поиск возможной схемы динамо-эксперимента – прежде всего борьба за высокое магнитное число Рейнольдса. Возможности лабораторной физики здесь очень ограничены. Дело в том, что движущихся хорошо проводящих сред не так много. В астрономическом контексте 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.

Среди жидкостей тоже выбор невелик. Электролиты – очень неважные проводники. Остаются жидкие металлы. Их немного. Ртуть очень дорогая и опасная, а главное очень тяжелая и не очень хороший проводник. Для того, чтобы разогнать большое количество ртути до необходимых скоростей нужна огромная энергия. Галлий (постпереходный металл, стоящий в таблице Менделеева под номером 31) вдвое легче ртути и становится жидким при почти комнатных температурах, тоже дорогой и не так хорошо, как хотелось бы, проводит электрический ток – ведь каждая единица, деленная на Ом и на метр (размерность удельной электропроводности в системе СИ) на счету! Следующий кандидат – натрий. Химику не нужно объяснять, что натрий – взрывоопасное вещество. К тому же он еще твердый при комнатных температурах, так что для получения жидкого натрия его придется нагревать до сотни градусов. Зато натрий сравнительно дешевый. Но главное – он проводит электрический ток лучше галлия и он очень легкий (кусочек натрия, брошенный в воду, плавает по поверхности). Дальше идут уже металлы, становящиеся жидкими при высоких температурах. Это – уже последняя, отчаянная возможность, до использования которой люди пока не доходят.



Рис. 2. Полярные сияния – отражения процессов в магнитосфере Земли

Проводящие газы – это плазма. Из нее в огромном большинстве состоят небесные тела. Здесь гораздо больше возможностей. Не исключено, что в будущем нас ждут и лабораторные динамо-эксперименты с плазмой, но сейчас эти возможности еще в стадии обсуждения. Что касается солнечной плазмы и плазмы других небесных тел, то ее проводимость тоже не такая уж большая.

Итак, мы определились с возможным веществом для динамо-экспериментов: это натрий и, как вспомогательное вещество – галлий. Этот выбор был ясен уже в самом начале пути, полвека назад.

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, движущаяся со скоростью 10 м/с - зрелище циклопическое, а в космосе это очень скромные цифры.

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

Прежде чем говорить об истории конкретных экспериментов, обсудим, что, собственно, хочется в них узнать. В самом деле, пусть мы не можем проводить эксперименты с Солнцем и другими небесными телами, но наблюдать-то мы их можем. Зачем же тогда бороться за эксперимент?

Здесь вспоминается, как в уже, к сожалению, далекие студенческие годы нас мучили философскими проблемами физики. Из таких занятий выносишь твердое убеждение, что никаких философских проблем физики (а также химии и других наук) в природе не существует. Видимо, есть все же и исключения. На тех же занятиях нам рассказывали, чем отличается эксперимент от наблюдения – наблюдаешь то, что видно, а в эксперименте можно варьировать условия и выяснять те вопросы, которые интересны тебе, а не те, на которые отвечает сама природа. Конечно, все это верно с большими ограничениями – и в экспериментальной установке можно померить не все, а кое-что, и наблюдатели научились по-своему выпрашивать природу, но, тем не менее, наблюдение – не эксперимент. Посмотрим, как эта общая мысль преломляется в контексте задачи динамо.

Не все так просто с самим механизмом динамо. Во-первых, в Солнце, да и в Земле, нет, конечно, никаких металлических рамок с током – их работу должны воспроизводить потоки среды. Организовать нужное движение потоком жидкости значительно сложнее, чем двигать нужным образом провод. Однако это – далеко не главная проблема. Гораздо хуже то, что простые течения заведомо не могут работать как ди-

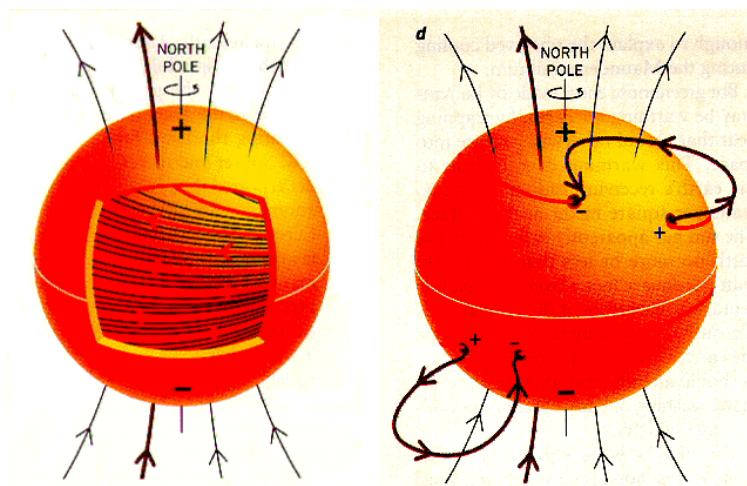


Рис. 3. Так схематично можно представить себе магнитное поле Солнца и механизм образования солнечных пятен

намо. Про это тоже рассказывают в школе под именем правила Ленца. По этому правилу 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.

На первый взгляд правило Ленца ставит крест на идее динамо. Однако хитроумные 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 (конечно, если эта вторая рамка подходящим образом расположена). Это не противоречит правилу Ленца. Теперь можно добиться того, чтобы индукционный эффект во второй рамке усиливал магнитное поле в первой, но, конечно, ослаблял его во второй рамке. 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. На поле теоретической физики это расстояние удалось преодолеть в 60-ые годы прошлого века. Решающей здесь стала работа отечественного физика Юрия Пономаренко, который сумел предложить конкретное течение проводящей жидкости, которое достаточно сложно для того, чтобы в нем генерировалось магнитное поле, но достаточно просто для того, 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 среди работ, посвященных динамо. Этого совсем нельзя сказать о самом Пономаренко. Его классическая работа осталась изолированным достижением в его научном творчестве, а его биография совершенно исчезла из памяти научного сообщества. Честно говоря, мы могли бы лучше помнить своих героев.

На самом деле течение, предложенное Пономаренко, не такое уж сложное – это бесконечная вращающаяся струя проводящей жидкости, окруженная проводящей средой. Замечательно, что в этом течении самое низкое из известных критическое магнитное число Рейнольдса. Течение Пономаренко достаточно удобно воспроизводить в лаборатории, так что идея Пономаренко стала одной из основных в динамо-экспериментах.

Сейчас уже экспериментально подтверждено, что течение Пономаренко (лучше сказать, течение, близкое к течению Пономаренко) действительно генерирует магнитное поле – мы подробнее расскажем об этом ниже. Однако на самом деле оно генерирует магнитное поле плохо, так что это поле растет очень медленно. В то же время прямые астрономические наблюдения показывают, что, скажем, на Солнце магнитные поля изменяются быстро. Каждый цикл солнечной активности, т.е. каждые 11 лет, солнечный магнитный диполь меняет знак на противоположный. Конечно, 11 лет – значительное время по меркам человеческой жизни, но для звезд это очень быстрые изменения. Ничего подобного динамо Пономаренко обеспечить не может. Причина этого в том, что в работе динамо Пономаренко магнитная диффузия играет не только разрушительную роль (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, т.е. магнитное поле, диффундирует не так, как скалярная величина, т.е. температура.

Для того чтобы магнитное поле изменялось быстро, так, как это бывает в солнечном цикле, необходим гораздо более сложный механизм, чем динамо Пономаренко. Такой механизм был предложен в 1955 году замечательным американским астрономом Юджином Паркером. Представим себе поле магнитного диполя, направленного

вдоль оси вращения Солнца. Поскольку солнечная плазма – хороший проводник, то магнитные линии двигаются вместе с солнечной плазмой, а Солнце вращается не как твердое тело (оно же не твердое!), а так, что 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. В этом случае действительно в одном полушарии вихри вращаются в основном вправо, а в другом – влево. И действительно оказывается, что если эта среда проводящая, то возникает магнитное поле, направленное по электрическому току (а не перпендикулярно к нему, как учат в школе), а это, в свою очередь, приводит к искомому превращению тороидального поля в полоидальное.

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

Макс Штеенбек был колоритным человеком. В молодости – ведущий инженер фирмы Сименс – он изобрел массу занятных вещей, как например магнитную торпеду. Она взрывается не при первом контакте с корпусом корабля, как другие торпеды, а тогда, когда проникнет внутрь корпуса. Разрушения при этом возрастают многократно. Изобретение произвело глубокое, но какое-то не очень благоприятное впечатление на противников Германии по II Мировой войне, так что десятилетие после конца войны пришлось провести в специальном закрытом институте («шарашке») в Сухуми. Потом его отпустили в ГДР и сделали президентом Академии наук этой страны. Сделали заслуженно: обсуждаемая работа – наиболее яркое достижение физики ГДР. Гораздо более молодые 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 и формулы были набраны готическим шрифтом (очень помогает при ссылках!) и опубликована в малоизвестном журнале. Тем не менее, она скоро была переведена на английский язык и стала очень популярной среди специалистов. В частности, из ее тяжелых обозначений в науку пришло название альфа-эффект для преобразования тороидального магнитного поля в полоидальное: в статье все возникающие величины были последовательно перенумерованы буквами греческого алфавита. Нельзя сказать, чтобы это было удачное обозначение, но у истории своя логика!

Конечно, роль альфа-эффекта подтверждается математическими выкладками, но одними выкладками очень трудно убедить физиков. Ясную физическую картину того, как можно без участия магнитной диффузии генерировать магнитное поле, дал замечательный отечественный физик, трижды Герой социалистического труда, один из

руководителей советской атомной программы Я.Б. Зельдович. Как видим, его основная область деятельности тоже была не совсем мирная, так что из страны Якова Борисовича выпускали только в самом крайнем случае, так что каждая поездка за границу была для него большим событием. Поэтому на симпозиуме в Кракове уже в 70-ых он был в состоянии легкой эйфории, так что, отвечая на вопрос о том, как же может работать динамо – ведь для этого нужно на месте, где была одна магнитная линия, получить две, а эти линии приклеены к жидкости – он проделал следующий трюк. Он попросил у одного из слушателей его доклада, 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 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, казалось, что беглого устного замечания на заграничной конференции вполне достаточно.

Забавно, что все эти три эпизода были совершенно независимы, немецкие физики не читали Паркера и т.д. Наука может развиваться совершенно алогично, люди придумывают решения еще ненаписанных 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. Только в самое последнее время физики стали делать зеркально-асимметричные заполнения волноводов и пробовать извлечь из этого интересные эффекты. Совершенно по-другому обстоит дело в микромире. Оказывается, есть реакции между элементарными частицами, которые по-другому идут после отражения в зеркале. В это трудно поверить, но несколько нобелевских премий за эксперименты в этой области, проведенные в 60-ых годах, убеждают нас в том, что это действительно так (тех, кто способен читать статьи по физике высоких энергий, убеждают сами эксперименты). Оказывается, что и в физике космических сред, как и в микрофизике, зеркальная асимметрия тоже играет решающую 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 – только гуманное отношение к читателю удерживает нас от этого.

Конечно, нет никакой надежды, что люди поверят до конца в этот букет нестандартных идей, если его не поддержать хоть какими-то экспериментами.

Это было понятно уже в 60-ых годах, когда Макс Штеенбек, наверное, используя свое служебное положение, договорился с советскими физиками о постановке первого динамо-эксперимента. Надо сказать, что магнитная гидродинамика, к которой по своему смыслу должен был принадлежать этот эксперимент, была одной из тех областей, в которых советская физика была особенно сильна. Эта область науки пользовалась вниманием правительства, которое 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. Сейчас уже трудно понять, что двигало людьми, принимавшими это решение. Насколько мы знаем, в Латвии нет крупных месторождений цветных металлов, цветной металлургии и других областей промышленности, где могли бы найти применение открытия физиков этого института. С тех пор прошло много лет, теперь Рига – далекое зарубежье. Неожиданный подарок Советского правительства обогатил Латвийскую республику выдающимся институтом, с которым не совсем понятно, что делать, а у России, в которой полно потенциальных потребителей этих исследований, отобрал соответствующую научную инфраструктуру.

В каждой из двух стран физики по-своему отреагировали на возникшую проблему. Латвийские физики подружились с немецкими физиками и за несколько дней до конца прошлого тысячелетия впервые получили самовозбуждение магнитного поля в потоке жидкого натрия. Это был действительно циклопический эксперимент. Тонны натрия прокачивались мощными насосами через систему труб и емкостей, занимавших трехэтажное здание. Много лет 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.

Интересно, что буквально 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 – в стране была разруха. Впрочем, и в Латвии, наверное, было нелегко. Некоторый задел был у физиков Института механики сплошных сред в Перми. Тем не менее, на исходе 90-ых было принято решение начать в институте экспериментальные работы по магнитной гидродинамике жидких металлов при больших магнитных числах Рейнольдса, ориентированных на изучение процесса динамо. Конечно, эта фундаментальная научная проблема – совсем не единственное, чем занимается лаборатория. Она делает много прикладных работ, которые дают результаты, прямо сейчас использующиеся на промышленных предприятиях, в том числе и на тех, которые находятся в Пермском крае, а некоторые представляют интерес и для зарубежных партнеров.

Важно было то, что работа лаборатории не замыкается на этих прикладных работах. Наоборот, прикладные работы гармонично сочетаются с изучением такого фундаментального явления, как динамо.

При планировании динамо-эксперимента в Перми было ясно, что в обозримом будущем не удастся соревноваться с немецкими, а потом и с французскими, и с американскими физиками в размерах установки, т.е. в том 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. Для этого насосы разгоняют жидкий натрий. Это требует больших затрат энергии – вязкость натрия маленькая, так что разными 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.

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 очень 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 вычислялся, скажем, альфа-эффект и выяснялось, какие конфигурации магнитного поля генерируются в солнечной плазме с таким альфа-эффектом. Возникающие при этом трудности легко вообразить, представив себе команду разработчиков нового телевизора, которые заодно ставят разные материаловедческие эксперименты со своим детищем.

Командам, работающим в области динамо-экспериментов, наконец удалось достичь разумного разделения труда в этой области. Лионские физики научились воспроизводить на своей установке разнообразные режимы работы динамо, которые воспроизводят поведение магнитного поля на Солнце и на Земле. В этих небесных телах временное поведение магнитных полей очень различно. Оба типа поведения удалось воспроизвести в Лионе, но пусть об этом напишут их авторы.

В Перми же пошли по другому пути – стали измерять разнообразные коэффициенты переноса магнитного поля в турбулентном потоке. В частности, впервые в мире удалось измерить сам альфа-эффект, т.е. основную величину, с которой связана генерация магнитного поля. Этот результат тоже общепризнан в кругу специалистов.

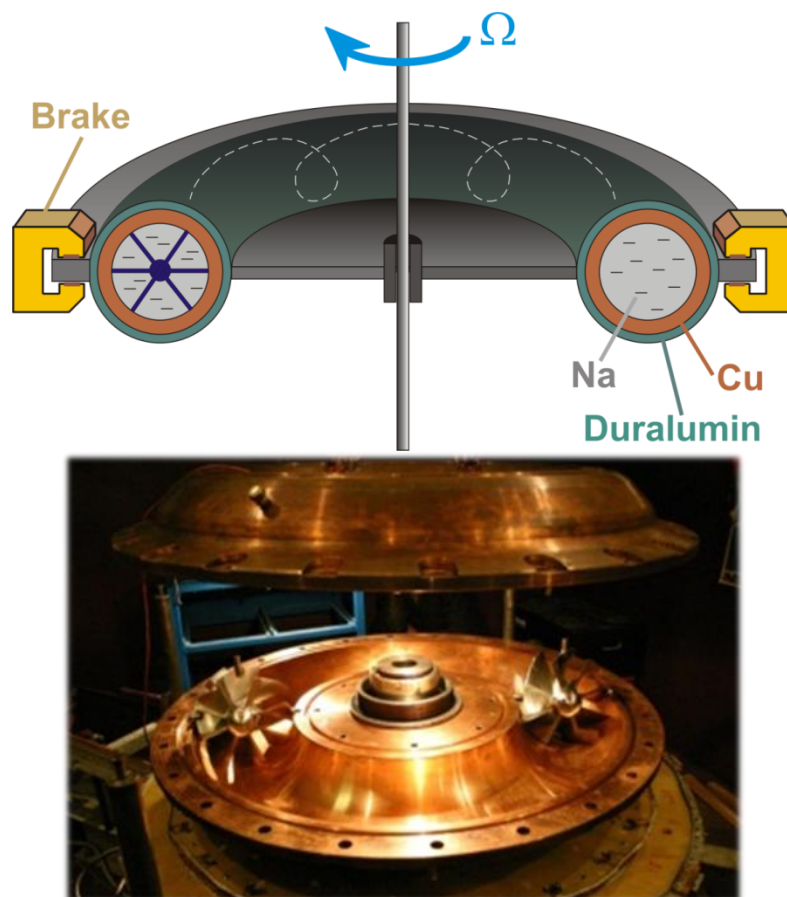


Рис. 4. Схема пермского динамо-эксперимента и сам тороидальный канал

Отметим, что специалисты разных стран, работающие в области динамо-эксперимента, тесно сотрудничают друг с другом. Совсем не только пермские физики ездят в Лион, но и 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. Хочется думать, что впереди много новых побед, а их не бывает без поражений.