

Научное издание

*ГРИГОРЬЕВ Владимир Иванович*

## **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ**

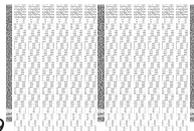
Редактор *Р.А. Бунатян*  
Оригинал-макет: *Р.А. Бунатян*  
Формление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 24.11.03. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7.  
Уч.-изд. л. 7. Тираж экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»  
МАИК «Наука/Интерпериодика»  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90  
E-mail: [fizmat@maik.ru](mailto:fizmat@maik.ru), [fmlsale@maik.ru](mailto:fmlsale@maik.ru);  
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ»  
140010, г. Люберцы, Московская обл., Октябрьский пр-т, 403

ISBN 978-5-9221-0393-0



УДК 535.1  
ББК 22.34  
Г 83

Григорьев В.И. **Электромагнетизм космических тел.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 112 с. — ISBN 978-5-9221-0393-0.

В книге в доступной форме изложена одна из интереснейших и не получивших еще окончательного оформления проблем современной физики — проблема электромагнетизма планет и звезд.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Табл. 2. Ил. 1.

## Оглавление

Введение.....	4
1. Уильям Гильберт .....	7
2. От Уильяма Гильберта до Шарля Огюстена Кулона.....	11
3. Атмосферное электричество.....	18
4. Загадочное открытие Вольта .....	22
5. Что же является источником магнетизма?.....	29
6. Гипотеза Ампера .....	31
7. Электромагнитное поле .....	38
8. Майкл Фарадей.....	39
9. Джеймс Клерк Максвелл .....	46
10. Пьер Кюри и геомагнетизм .....	58
11. Новый век и новые проблемы .....	62
12. Гипотеза Сазерленда.....	65
13. Динамо-механизм .....	69
14. Бароэлектрическое перераспределение зарядов.....	72
15. Простейшие модели.....	77
16. Главные баромагнитные поля .....	82
17. Квазиравновесные бароэлектрические поля .....	86
18. О прогнозировании землетрясений .....	94
19. Магнитные поля и дифференциальные потоки .....	103
Заключение.....	110

## Введение

Первые упоминания о природных постоянных магнитах, таинственных камнях, притягивающих железо, появились в Китае в глубокой древности. Такие камни называли «сидеритами», «геркулесовыми», «лидийскими», а то и просто «камнями», а позже за ними сохранилось названием «магнит». Римский натуралист Плиний писал, что это название произошло от имени пастуха Магнеса, заметившего, что гвозди его обуви и железный кончик палки в некоторых местах пристают к горе Иде. О магнитах в Европе знали еще в VII веке до н. э. (Фалес Милетский).

Удивительное свойство магнита указывать направления на север было оценено прежде всего мореходами. Появление компаса в Европе относят к XII веку. Впервые этот прибор был описан английским монахом Александром Некэмом (около 1187 г.): «Моряки во времена плавания, когда не могут ориентироваться по Солнцу из-за пасмурной погоды или когда мир погружен в темноту ночи и когда они не знают, в каком направлении держать путь, пользуются свободно плавающей стрелкой, один конец которой показывает на север».

Примерно через 80 лет после этого в сочинении П. Перигрина были описаны все известные ему свойства магнита, предложены сохранившиеся поныне названия полюсов — северный (который указывает направление на север) и южный и введены некоторые усовершенствования компаса.

Новый важный импульс, касающийся компаса, дали плавания Христофора Колумба из Европы в Америку. До этого считалось, что магнитная стрелка указывает точно на север и даже предполагалось, что это вызывается действием Полярной звезды. Но наблюдения за компасом на каравеллах Колумба обнаружили, что направление стрелки компаса неодинаково в разных точках Земли.

Об этом говорят как об изменении склонения, т.е. отклонения направления магнитной стрелки от плоскости меридиана. Заметим попутно, что ее отклонение от горизонтальной плоскости называют наклоном: оно также зависит от места наблюдения: на полюсах (магнитных) стрелка устанавливается вертикально, а на экваторе (также магнитном, т.е. на одинаковом расстоянии от этих полюсов) – горизонтально.

Так, 17 сентября 1492 г. капитан, определив азимут Солнца, обнаружил, что стрелка изменила за 4 дня свое направление на целое деление компаса. Матросы решили, что корабль сбился с пути. Чтобы успокоить взволнованную команду, Колумбу пришлось пойти на обман — он заявил, что курс корабля остался прежним, что не стрелка компаса изменила свое направление, а переместилась Полярная звезда.

Изменения склонений объясняли влиянием материков, которое в разных местах может быть неодинаковым. Что же касается наклона, то здесь первый важнейший шаг принадлежал Уильяму Гильберту, деятельности которого мы уделим ниже особое внимание.

Попытки объяснить загадочное поведение магнита долго оставались безуспешными. Была и другая загадка, которая тоже касалась действия на расстоянии. Но здесь действие возникало, если кусочки янтаря натирались рукой. Такое взаимодействие стало называться электрическим (от греческого слова «электрон» — янтарь).

Поскольку электрические явления долгое время не находили интересных применений в жизни людей, ими и интересовались значительно меньше, чем магнитными. Но к XVIII веку наметился перелом, а к середине XIX века, в первую очередь, благодаря открытиям Фарадея и Максвелла, стало ясно, что электричество и магнетизм неразрывны. Возникло учение об электромагнетизме.

Учение это стремительно вторглось в технику, став основой одной из основ произошедшей в ней революции. Но эта революция почти не затронула науку о нашей родной планете, о Земле. По-прежнему оставалась нерешенной проблема земного магнетизма, и хотя уже было установлено наблюдениями, что над Землей имеется не только магнитное, но и электрическое поле, это явление тоже не находило надежного объяснения.

Теория в сочетании с наблюдениями привели, тем временем, к убеждению, что магнитные поля есть не только у Земли, но и у других небесных тел. А электрические? По-видимому, и они. Таким образом, появились проблемы космического электромагнетизма.

Они были сформулированы сравнительно недавно, но уже появились новые идеи и результаты, рассказ о которых может вызвать интерес у широкого круга читателей. Попыткой популярного рассказа об этом и является настоящая книга.

Настоящая книга задумана как популярное изложение материалов, включенных в монографию В. И. Григорьева, Е. В. Григорьевой и В. С. Ростовского «Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд», издание которой намечено на 2003 г.



## 1. Уильям ГИЛЬБЕРТ

Начало развития одного из важнейших разделов физики — учения об электричестве и магнетизме, и, в частности, первые попытки объяснить магнитное поле Земли, связано с именем Уильяма Гильберта.

Великий английский естествоиспытатель, Уильям Гильберт (Gilbert) родился в 1640 г. в семье главного судьи и члена городского совета города Колчестера в графстве Эссекс. В этом городе он окончил классическую школу и в мае 1558 г. поступил в колледж святого Джона в Кембридже. Позже его обучение продолжалось в Оксфорде.

В 1560 г. он получил степень бакалавра, а через 4 года стал «мастером искусств». К тому времени уже определился его выбор: он серьезно занялся изучением медицины, в 1569 г. получил степень доктора медицины и был избран старшим членом учебного общества колледжа святого Джона в Кембридже.

В 60-е годы Гильберт, как писал о нем биограф, «с большим успехом и одобрением практиковал в качестве врача» на континенте и в Англии. Успехи Гильберта как врача были так значительны, что королева Елизавета Тюдор сделала его своим лейб-медиком. Королева живо интересовалась и научными занятиями Гильберта и даже посетила его лабораторию, где он продемонстрировал ей некоторые опыты.

В доме и в лаборатории Гильберта, который по воспоминаниям знавших его людей был веселым, общительным и радушным человеком, часто собирались его многочисленные коллеги и друзья. В их числе были и моряки, которые рассказывали ему о наблюдениях над компасом — одним из основных навигационных приборов, игравшим едва ли не главную роль во время кругосветных плаваний.

Эти рассказы позволили Гильберту собрать богатый материал оклонениях магнитной стрелки, который позже вошел в его знаменитую книгу.

Первое время научные интересы Гильберта относились к химии (вероятно, в связи с его врачебной деятельностью), а затем — к астрономии. Он изучил практически всю имевшуюся литературу о движении планет и был самым активным в Англии сторонником и пропагандистом идей Николая Коперника (1473–1543) и Джордано Бруно (1547–1600).

После смерти королевы Елизаветы Тюдор в 1603 г. Гильберт был оставлен лейб-медиком при новом короле Якове I, но не пробыл в этой должности и года. 30 ноября 1603 г. Уильям Гильберт скончался на 63-м году от чумы и был похоронен в церкви святой Троицы в Кольчестере.

Всю свою библиотеку, все приборы и коллекцию минералов Гильберт, у которого не было наследников, завещал колледжу, но, к сожалению, все это погибло в 1666 г. во время большого лондонского пожара.

Конечно, основной вклад Гильберта в науку связан с его трудами по магнетизму и электричеству. Более того, само возникновение этих важнейших разделов физики по справедливости должно быть связано с его именем.

Что было известно об электрических явлениях до Гильберта?

Фалес Милетский (около 642–548 гг. до н. э.) описал загадочное явление: кусочки натертого руками янтаря начинали притягивать крупинки и соломинки, расположенные поблизости.

О магнитных явлениях узнали раньше и немного больше.

Гильберт — и в этом его особая заслуга — первым, даже до Роджера Бэкона (1214–1292), которого часто называют прародителем экспериментального метода в науке, целеустремленно и сознательно шел от опытов в изучении магнитных и электрических явлений.

Главным итогом его исследований явился труд «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле». В этой книге описано более 600 проделанных Гильбертом опытов и изложены те выводы, к которым они привели автора.

Гильберт установил, что у магнита всегда имеются два неразделимых полюса: если магнит распилить на две части, то у каждой из половинок оказывается вновь по паре полюсов. Полюса, которые Гильберт назвал одноименными, отталкиваются, а другие — разноименные — притягиваются.

Гильберт открыл явление магнитной индукции: брусок железа, расположенный возле магнита, сам приобретает магнитные свойства. Что касается природных магнитов, то силу притяжения к ним железных предметов можно увеличить с помощью надлежащей железной арматуры. От действия магнита, как показали опыты, можно частично загородиться железными перегородками, но погружение в воду не влияет заметным образом на притяжение к ним. Гильберт даже заметил, что удары по магнитам могут ослабить их действие.

Гильберт не только экспериментировал с магнитами, он поставил перед собой проблему, для решения которой, как выяснилось, оказалось недостаточно даже и прошедшей после работ Гильберта половины тысячелетия: проблему, почему вообще существует магнетизм Земли?

Ответ, который предложил Гильберт, опять-таки базировался на экспериментах. Был изготовлен постоянный магнит в форме шара, названный Гильбертом Тереллой, (т.е. маленькой моделью Земли), и Гильберт при помощи магнитной стрелки, перемещавшейся над различными участками его поверхности, изучал создаваемое им магнитное поле. Оно оказалось весьма похожим на то, что имеется над Землей. На экваторе, т.е. на равных расстояниях от полюсов, стрелки магнита располагались горизонтально, т.е. параллельно поверхности шара, а чем ближе к полюсам, тем сильнее оказывалось наклонение стрелки, принимавшей вертикальное положение над полюсами.

Идея Гильберта, что Земля — большой постоянный магнит, не выдержала испытанием временем. Значительно позже, в XIX веке французским ученым Пьером Кюри (1859–1906) было установлено, что при высоких температурах (а в недрах Земли они весьма высоки) постоянный магнит размагничивается. Об этом — ниже.

Проблема магнетизма Земли, остальных планет, а также и других небесных тел — одна из старейших проблем классического естествознания — с новой остротой встала в наши дни перед естествоиспытателями, и ее полного разрешения нет и поныне. Об этом нам предстоит много говорить ниже. И пусть не все возникающие здесь проблемы уже нашли разрешение, но их масштаб мы понимаем все яснее. Значение и роль трудов Гильберта остаются непреходящими.

Если магнитами, хотя бы из-за прикладных целей мореплавания, уже немного интересовались и до Гильберта, то в ис-

следовании электричества он безусловно и безоговорочно был первым. И здесь ему принадлежат важные достижения. Даже первый прибор — прообраз известного любому школьнику электроскопа (он назвал его «версором») был придуман им. Гильберт установил, что электризация (тоже его термин) происходит при натирании не только янтаря, но также и многих тел другого состава, в том числе стекла.

Гильберту удалось экспериментально обнаружить даже такие тонкие эффекты, как влияние пламени на заряженные тела. Значительно опережая свое время, Гильберт высказывал догадку о связи нагревания с тепловым движением частиц тел. Но попытка Гильберта понять природу магнетизма потерпела, естественно, в те давние времена неудачу, хотя он постоянно думал об этом и выдвигал ряд идей, включая даже приписывание магниту души.

Должная оценка провидческих трудов Гильберта как в области физики, так и в методологии науки, появилась лишь теперь, через 400 лет после выхода его гениальных творений.



## *2. От Уильяма ГИЛЬБЕРТА до Шарля Огюстена КУЛОНА*

Через 100 лет после Гильберта родился Исаак Ньютон. И хотя он непосредственно ни электричеством, ни магнетизмом почти не занимался, его труды оказали решающее влияние и на эти области физики. Это отчетливо прослеживается в трудах Кулона, которого отделяет от Ньютона еще один век.

Ньютон, сформулировав три основных закона механики, выступил с грандиозной всеобъемлющей программой описания всех физических процессов: рассматривая любую механическую систему как совокупность материальных частиц и опираясь на законы Ньютона, можно было бы, зная положения и скорости всех частиц в некоторый (обычно говорят «начальный») момент времени, рассчитать их дальнейшее движение, т. е. предсказать эволюцию всей системы. Однако для этого требуется еще нечто очень важное: нужно знать, каковы силы, действующие на каждую из частиц системы.

Таким образом, сразу же возникает принципиальной важности вопрос: какие типы сил существуют в природе? Как они зависят от движения частиц и от их взаимного расположения?

Первым и исключительно важным примером решения такого рода проблем явился сформулированный самим Ньютоном закон гравитационного взаимодействия тел — знаменитый закон всемирного тяготения. По этому закону, между любыми «точечными» телами (размеры которых значительно меньше расстояний между ними) действует притяжение с силой, не зависящей от их скоростей\*, прямо пропорциональной массам тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

---

\* Как выяснилось через 300 лет после Ньютона, — лишь приближенно.

Великий труд Ньютона «Математические начала натуральной философии» почти на 300 лет определил дальнейшее развитие физики. И дело не только в том, что в нем нашли объяснения важнейшие задачи физики и астрономии. Была предложена четкая программа научных исследований. Одной из центральных частей этой программы было исследование сил.

Кулон одним из первых после Ньютона сделал важный шаг в этом направлении — он, опираясь на эксперимент, нашел закон взаимодействия электрических зарядов. Но об этом французском физике, главное научное достижение которого, увековечившее его имя, было сделано, на первый взгляд, почти случайно, хочется рассказать подробнее.

Шарль Огюстен Кулон (Ch. A. Coulomb) — французский физик и инженер, экспериментальные исследования которого имели основополагающее значение для формирования учения об электричестве и магнетизме, член Парижской академии наук — родился 14 июня 1736 г. на юго-западе Франции, в городе Ангулеме. Его отец Анри Кулон, мелкий правительственный чиновник, вскоре после рождения Шарля переехал с семьей в Париж, где некоторое время занимал доходную должность по сбору налогов, но, пустившись в спекуляции, разорившие его, вернулся на родину, на юг Франции, в Монпелье. Шарль с матерью остался в Париже.

В конце 40-х гг. Шарля поместили в одну из лучших школ того времени, где обучались молодые люди дворянского происхождения, — «Колледж четырех наций», известный также как Колледж Мазарини. Уровень преподавания там был достаточно высок, в частности большое внимание уделялось математике. Во всяком случае, юный Шарль настолько увлекся науками, что решительно воспротивился намерениям матери избрать для него профессию медика или, в крайнем случае, юриста. Конфликт был настолько серьезен, что Шарль покинул Париж и переехал к отцу в Монпелье.

В этом городе еще в 1706 г. было основано научное общество, второе после столичной академии. В феврале 1757 г. 21-летний Кулон прочитал там свою первую научную работу «Геометрический очерк средне-пропорциональных кривых» и вскоре был избран адъюнктом по классу математики.

Но это приносило лишь моральное удовлетворение, нужно было выбирать дальнейший путь. Посоветовавшись с отцом, Шарль избрал карьеру военного инженера.

Научное общество Монпелье снабдило Кулона нужными рекомендациями, и после сдачи экзаменов (достаточно трудных, так что подготовка к ним потребовала девяти месяцев занятий с преподавателем) Шарль Кулон в феврале 1760 г. направился в Мезьер, в Военно-инженерную школу — одно из лучших высших технических учебных заведений того времени.

Кулон окончил Школу в 1761 г. Хотя отзыв о нем руководителя Школы выглядит местами отнюдь не восторженно («Его работа об осаде хуже средней, рисунки сделаны очень плохо, с подчистками и пометками. <...> Он полагает, как и другие со сходным образом мыслей, что древесину для лафетов и повозок можно просто найти в лесу»), он, вероятно, был среди лучших выпускников (во всяком случае, его работа была отмечена денежной премией).

Получив чин лейтенанта, Шарль Кулон был направлен в Брест — крупный порт на западном побережье Франции.

В Бресте Кулону были поручены картографические работы, связанные с возведением и перестройкой укреплений на побережье. Но эта деятельность была непродолжительной. Меньше чем через два года Кулону пришлось экстренно включиться в работы по возведению крепости на острове Мартиника (Вест-Индия) для защиты его от англичан.

Объявленный конкурс на проект укрепления выиграл опытный военный инженер де Рошмор, но этот проект вызвал большой спор, в который был вовлечен и Кулон. Проект в целом удалось отстоять, но в него пришлось внести значительные изменения; в частности, ассигнования были уменьшены более чем в два раза. Кулон, остался фактическим руководителем строительства, под началом его работало почти полторы тысячи человек, и он оказался перед лицом множества весьма сложных (и далеко не только технических) задач.

Условия работы были трудными, климат очень тяжелым, не хватало людей, да и тех, которые оставались, преследовали болезни, уносившие многие жизни. Сам Кулон за восемь лет работы на острове тяжело болел восемь раз и впоследствии вернулся во Францию с сильно подорванным здоровьем. Большой приобретенный им опыт достался Кулону дорогой ценой. Но даже на Мартинике Кулон не забывал о науке.

Кулон вернулся во Францию в 1772 г. и получил назначение в Бушен. Условия работы здесь были несравненно легче, появилась возможность активно продолжить научную деятельность.

После возвращения на родину Кулон, проведя еще довольно большое число новых исследований, послал свой мемуар в Парижскую академию наук, а затем зачитал его на двух заседаниях в марте и апреле 1773 г. Об этом труде весьма похвально отозвались два академика, которым было поручено его рецензирование (одного из них, Борда, Кулон впоследствии, спасая в период якобинской диктатуры, прятал в своем поместье). А в 1773 г. для молодого автора одобрение академиков было большой поддержкой.

Но вскоре он увлекся новыми проблемами, и это увлечение оказалось исключительно благотворным. В 1775 г. Парижская академия наук объявила конкурсную задачу «Изыскание лучшего способа изготовления магнитных стрелок, их подвешивания и проверки совпадения их направления с направлением магнитного меридиана и, наконец, объяснение их регулярных суточных вариации».

Что касается последней части задачи (которая удивительным образом, неожиданно приблизила Кулона к тематике Гильберта!), ее решение в то время было явно недоступно, но вот задача о наилучшем устройстве компаса и, в частности, подвеса магнитной стрелки, была актуальна.

О том, насколько эта задача была непроста, какую высокую точность требовалось обеспечивать, можно судить хотя бы по следующему факту: подвешенная на тонкой шелковой нити стрелка так чувствительно реагировала на все воздействия, что приходилось защищать ее не только от слабейших воздушных потоков, но даже и от приближения глаза наблюдателя (на стрелке и на теле человека часто находятся электрические заряды, и их взаимодействие может сказаться на силах).

Чтобы исключить это влияние, Кулон решил заменить шелковые нити металлической проводящей электричество проволокой. Это был шаг, сыгравший очень большую роль в дальнейшем, когда Кулон изобрел и начал использовать крутильные весы.

Но пока до этих работ было еще далеко. В 1777 г. Кулон становится победителем конкурса, посвященного разработке прибора для исследования магнитного поля Земли и тут же погружается в другую большую работу — в исследование трения. В 1779 г. (а затем повторно в 1781) академия объявила еще один конкурс, посвященный именно трению. Уже в 1780 г. Кулон представил в академию конкурсную работу «Теория простых ма-

шин», которая через год также была удостоена премии. Результаты этой работы базировались на многочисленных экспериментах, в которых Кулон исследовал как трение между твердыми телами, так и трение в жидкостях и газах. Эти работы Кулон проводил уже в Лиле, куда он был переведен в начале 1780 г.

Примерно через год исполнилось его давнишнее желание — перевод в Париж.

Капитан Кулон настойчиво хлопотал о переводе в Париж, и когда это произошло, осуществилась и еще одна его большая мечта: 12 декабря 1781 г. он был избран в академики по классу механики.

В Париже на Кулона почти сразу же обрушилось множество дел, в том числе и административных. Некоторые из них имели политическую окраску, и одно из них даже закончилось для Кулона недельным заключением в тюрьму аббатства Сен-Жермен де Пре. Заседания в многочисленных комиссиях, в частности в Комиссии по каналам в Бретани, оставляли мало времени для науки, и, тем не менее, Кулон представил в 1784 г. в академию свою работу, которую можно считать весьма важной: мемуар о кручении тонких металлических нитей, а 1785–1789 гг. — серию мемуаров по электричеству и магнетизму.

Исследование кручения нитей может показаться имеющим лишь вспомогательное, «техническое» значение, но без него были бы невозможны дальнейшие количественные измерения силы взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов. Как и всегда, труд Кулона отличался глубиной и изобретательностью. Так, диаметр очень тонких нитей Кулон определял их взвешиванием и измерением длины.

Многое из того, что вошло в классические исследования Кулона, можно теперь заметить и в трудах некоторых его предшественников. Так, крутильные весы использовал еще в 1773 г. выдающийся английский ученый Генри Кавендиш (1731–1810), но он не печатал своих трудов, и его рукописи были опубликованы великим Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879) лишь столетие спустя.

Важным для решения всей проблемы моментом явилось то, что Кулон понял: нужно исследовать взаимодействие «точечных» заряженных тел, т. е. таких, расстояния между которыми значительно превосходит их размеры. Но и здесь Кулон не был первым. К такой же мысли пришел и англичанин Робайсон (1739–1805), который в результате тщательных опытов пришел

к выводу, что сила электрического взаимодействия между телами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними; но он сообщил о своих результатах лишь в 1801 г., значительно позже Кулона.

При экспериментальном исследовании зависимости взаимодействия между зарядами от расстояния между ними Кулону очень помогла аналогия: подобно тому, как частота колебаний маятника зависит от силы тяготения, частота колебаний вокруг вертикальной оси вращения зарядов, или магнитных полюсов, укрепленных на концах горизонтального стержня в крутильных весах (а измерение этой частоты достаточно просто), также зависит от действующей силы.

Впрочем, «закон обратных квадратов» для взаимодействия зарядов уже давно казался многим почти очевидным. И дело здесь не только в гипнотизирующем примере закона всемирного тяготения великого Ньютона; другой закон не позволил бы объяснить множество наблюдавшихся позже фактов (например, почему внутри ящика с проводящими стенками, какой бы заряд на них не помещался, никакое электрическое поле не ощущается).

Только в наши дни удалось понять, какое важное место во всей физической картине мира занимает «закон обратных квадратов». Если бы сила взаимодействия была бы чуть иной, например, если бы она была обратно пропорциональна не квадрату расстояния, а некоторой другой его степени, то ни планетные системы, ни даже атомы не бы быть находиться в состоянии устойчивого динамического равновесия.

Закон Кулона гласит: покоящиеся точечные одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются с силой, пропорциональной величине этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Этот закон известен теперь, наверное, любому школьнику. Но вряд ли многим известно, какое искусство и наблюдательность пришлось проявить исследователю. Кулон заметил попутно, что заряды довольно быстро «стекают» с тел, и правильно объяснил это тем, что воздух обладает некоторой проводимостью — это обстоятельство осложняло эксперимент, но оно само стало важным открытием.

Многие знают, что закон взаимодействия магнитных полюсов, также тщательно изученный Кулоном, внешне очень похож на закон взаимодействия электрических зарядов. Из-за это-

го электростатика и магнитостатика долго представлялись во всем подобными друг другу, если не считать того удивительного факта, что «магнитные заряды» противоположных знаков — полюса магнитов — почему-то всегда встречаются попарно и никогда — по отдельности. Лишь после работ Ампера выяснилось, что магнитные поля постоянных магнитов обусловлены не тем, что они состоят из огромного числа маленьких магнетиков (как полагал и Кулон), а электрическими токами, т. е. движением в атомах электрических зарядов (что, следует заметить, во времена Ампера и само выступало не более, как в качестве замечательной догадки).

Современную классическую (т. е. неквантовую) теорию электрических и магнитных явлений часто называют электродинамикой Фарадея и Максвелла. Но, конечно, в написании этой важнейшей главы физики почетное место занимают и многие другие замечательные ученые. В числе первых здесь по праву должно быть упомянуто имя Шарля Кулона.

\*  
⎵

### *3. Атмосферное электричество*

До конца XVIII века при всех исследованиях электрических явлений физики пользовались электростатическими машинами, в которых определяющую роль играла электризация трением. Вот как описывается в учебнике XIX века одна из таких машин.

«Изобретатель воздушного насоса Отто фон Герике устроил из серного шара род первой электрической машины. Он описывает ее следующим образом: Если кому угодно повторить мои опыты, пусть возьмет стеклянный баллон величиною с детскую голову, наполнит его растолченной серой и расплавит ее; по охлаждении разобьет баллон, вынет шар и сохраняет его в сухом месте. Если угодно, можно в шаре провертеть отверстие, чтобы удобно было вращать его на вставленном железном стержне как на оси. Если в темной комнате тереть шар сухой ладонью, то можно наблюдать не только притяжения и отталкивания, но заметен и свет, подобный издаваемому сахаром, когда его колют.»

Электрические явления начали вызывать все больший интерес, особенно после изобретения лейденской банки.

В январе 1746 г. Реомюр в Париже получил письмо на латинском языке из Лейдена от тамошнего профессора Мюшенброка. В письме было сказано: «Хочу сообщить вам новый и странный опыт, который советую самим никогда не повторять. Я делал некоторые исследования над электрическою силой и для этой цели повесил на двух шнурах из голубого шелка железный ствол, получавший, через сообщение, электричество от стеклянного шара, который приводился в быстрое вращение и натирался прикосновением руки.

На конце ствола свободно висела медная проволока, конец которой был погружен в круглый стеклянный сосуд, отчасти наполненный водою, который я держал в правой руке; другою

же рукой я пробовал извлечь искры из наэлектризованного ствола. Вдруг моя правая рука была поражена с такою силою, что все тело содрогнулось как от удара молнии. Сосуд, хотя и из тонкого стекла, обыкновенно сотрясением этим не разбивается и кисть руки не перемещается, но рука и все тело поражаются столь страшным образом, что я сказать не могу, одним словом, я думал, что пришел конец.»

«Лейденская банка» — так называли описанный Мушенбром первый конденсатор (накопитель зарядов) вызвала большой интерес и целый поток новых опытов. Но этот интерес еще более усилился, когда было установлено, что «земное электричество» родственно «небесному», что искры, наблюдавшиеся при опытах с лейденскими банками, являются маленькими моделями давно известных людям величественных и порою грозных стрел Зевса — молний.

Электрическая природа молнии впервые была убедительно доказана Бенджаменом Франклином. Этот самобытный и яркий американский ученый и общественный деятель родился в Бостоне в 1706 г. Первую половину жизни он занимался издательской и тесно связанной с ней политической деятельностью.

Не получив систематического научного образования, Франклин лишь в 40 лет обратился к физике. Его заинтересовало стекание электрических зарядов с острия проводника, и, приняв идею, что искры, наблюдаемые при разряде лейденской банки, и молнии имеют общую природу, он пришел к мысли, что можно разряжать грозовые облака. 20 июля 1750 г. в письме к своему другу Питеру Коллинсону он сообщает ему о задуманном опыте: установить на высоком месте длинный заостренный железный шест и попытаться заметить, не возникают ли искры при прохождении грозовых облаков.

Эта идея была реализована через два года во Франции. Поощряемые королем, Бюффон, Далибар и Делор провели нужный опыт. Приставленный для наблюдения возле вертикального металлического шеста солдат при появлении грозовой тучи слышал треск и наблюдал проскакивающие искры.

Опыты, подтверждающие электрическую природу молнии, были вскоре повторены многими физиками. В России, в Петербурге жертвой такого опыта летом 1753 г. стал работавший вместе с М. В. Ломоносовым Георг Вильгельм Рихман (как и Франклин, он пользовался воздушным змеем и, вероятно, был убит молнией).

Изобретение громоотвода (правильнее называть его молниеводом, хотя его действие проявляется не столько в том, что молнии направляются по безопасному каналу, сколько в предотвращении их появления из-за того, что стекающие с острия заряды частично разряжают грозовое облако) произвело огромное впечатление. Оно нашло отражение даже в дамских модах — моделями громоотводов начали украшать шляпки. Дошло дело и до политики. Английский король, чтобы не уподобляться республиканцу Франклину, запретил остроконечные завершения громоотводов. Воспротивившийся этому запрету президент Королевского общества поплатился должностью.

Но политика на этот раз, вопреки обыкновению, сыграла положительную роль. Французский физик Луи Гейом Лемонье, убежденный роялист, а значит, идеологический противник республиканца Франклина, решил бороться против него научными методами: им также был запущен воздушный змей, но только в абсолютно безоблачную, ясную погоду, когда никаких грозových туч не было и в помине. А от нити, шедшей к змею, и при этом проскочила искра!

Таким образом было сделано открытие того, что потом получило название «поле ясной погоды». Экспериментальное исследование этого поля (как и любого электрического поля) в отличие от магнитного, оказалось задачей довольно трудной.

Так, уже в наше время появились квантовые магнетометры высочайшей чувствительности (их называют «сквидами», от англ. Superconducting Quantum Interference Device — *сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство*), позволяющие не только замечать, но даже и измерять весьма слабые магнитные поля. Что же касается электрических полей, то, хотя измерение их напряженности в принципе элементарно просто (поместите неподвижный единичный точечный заряд в интересующую Вас точку и, измерив действующую на него силу, Вы найдете напряженность электрического поля), но попытка реализовать все это встречает значительные трудности, которые часто лицемерно именуется «лишь техническими». Для реальных измерений электрических полей в атмосфере обычно используют «обходные пути». Один из таких путей связан с применением так называемых флюксометров.

Чтобы понять работу этих приборов, нужно вспомнить о знаменитой «клетке Фарадея».

Читатель, полагаю, помнит, что если внести в электрическое поле проводник, то в первые мгновения в нем начнутся токи, т. е. начнут перераспределяться заряды, и это перераспределение закончится тем, что поле исчезнет. И так же будет, если проводник вовсе не сплошной, если в нем есть полости. Если, это, к примеру, обыкновенная жестяная банка.

Это и есть «клетка Фарадея» — банка с проводящими стенками, внутрь которой постоянное электрическое поле не проникает. Если внутри такой банки имеется провод, то ток по нему, естественно, не течет.

Но если доньшки этой банки то открывать, то закрывать, т. е. то впускать внутрь электрическое поле, то от него вновь отгораживаться, в проволочке будет то возбуждаться, то исчезать ток, и этот переменный ток можно измерить и по нему узнать, какое электрическое поле окружает банку. Это и объясняет принцип действия флюксометров.

Есть, конечно, довольно много и других методов измерения напряженности поля ясной погоды, но все они, во-первых, не очень удобны, во-вторых, не очень точны.

По-видимому, сказанным объясняется тот факт, что во многих местах на Земле уже давно ведется систематическое и тщательное слежение за магнитным полем, тогда как данные об электрическом поле (а они очень важны!) далеко не так полны.

Поиски истолкования физической природы поля ясной погоды дали не менее того, что принесло установление электрической природы молнии. Но для того, чтобы это выяснить, потребовалось еще немало времени и трудов, о чем мы постараемся подробнее рассказать ниже.

\*  
⎵

## 4. Загадочные открытия ВОЛЬТА

Конечно, электрические машины усложнялись и совершенствовались, но в принципе все оставалось таким же, как было при натирании рукой кусочков янтаря.

Правда, уже было досконально известно, что существует электрический ток: есть такие вещества (проводники), по которым заряды могут перетекать от одних заряженных тел к другим (напомним что Кулон открыл даже проводимость воздуха).

Открытие и изучение электрических токов стало новым важнейшим этапом развития физики, но продвижение здесь существенно тормозилось отсутствием простых и удобных источников тока. Переломным моментом здесь стало изобретение знаменитого **вольтового столба**.

Но это заслуживает более подробного рассказа.

Прославленный итальянский естествоиспытатель Алессандро Вольта, благодаря которому в физику вошли принципиально новые источники тока — гальванические элементы, открывшие для науки и техники невиданные ранее возможности, родился 18 февраля 1745 г. в городке Комо.

Он был четвертым ребенком в семье падре Филиппо Вольты и его супруги Маддалены. История их замужества была весьма романтической: Филиппо похитил из одного из ломбардских монастырей 19-летнюю красавицу послушницу Маддалену, дочь графа Джузеппе Инзаге.

Маленького Сандрино родители сдали на руки кормилице, жившей в деревне Брунате и «забыли» о нем на целых тридцать месяцев. Малыш, вольно росший на лоне природы, получился бойким, здоровым, но диковатым: рассказывали, что слово «мама» он произнес только к четырем годам, а нормально заговорил лишь лет в семь. Но был веселым, добрым и чутким ребенком.

Большая перемена произошла в его жизни в 1752 г., когда, потеряв отца, он оказался в доме дяди Александра, соборного каноника.

За воспитание племянника дядя принялся всерьез: много латыни, история, арифметика, правила поведения и т. д. Плоды воспитательных усилий сказались незамедлительно и были поразительными. Юный Вольта менялся на глазах! Он восторженно воспринимал знания, становился все общительнее и остроумнее, его все больше интересовало искусство, особенно музыка.

Ребенок был очень впечатлителен. Десятилетнего Вольта потрясли известия о катастрофе в Лиссабоне, и он поклялся разгадать тайну землетрясений.

Он был очень деятелен. Энергия переполняет Алессандро, и однажды это едва не привело к роковым последствиям. Когда ему было 12 лет, мальчик пытался разгадать «тайну золотого блеска» в ключе возле Монтеверди (как оказалось потом, блестящие кусочки слюды) и, упав в воду, утонул! Поблизости не оказалось никого, кто бы мог его вытащить. К счастью, один из крестьян сумел спустить воду, и ребенка откачали. «Родился вторично!» — говорили тогда.

Дядя, который делался ему все ближе, видя жадный интерес способного юноши к наукам, старался снабжать его книгами. По мере их выхода, в доме появлялись и изучались тома Энциклопедии. Но Алессандро охотно учился и работать руками: навещая мужа своей кормилицы, он перенимал у него пригодившееся впоследствии искусство изготовления термометров и барометров.

В ноябре 1757 г. Алессандро отдадут в класс философии коллегии ордена иезуитов в городе Комо. Но уже в 1761 г. дядя, поняв, что Вольту намереваются завербовать в иезуиты, забирает мальчика из коллегии.

В эти годы произошли события, сыгравших в жизни Вольты заметную роль. В 1758 г., как и было предсказано, вновь появилась комета Галлея. Это не могло не поразить пытливого юношу, мысли которого обратились к трудам великого Ньютона. Их разделял почти точно один век, и это тоже казалось исполненным особого значения.

Вообще юноша все более отчетливо осознавал, что его призвание — не гуманитарная область, а естественные науки. Он увлекается идеей об объяснении электрических явлений ньютоновской теорией тяготения, даже посылает знаменитому парижскому академику Ж. А. Нолле (1700–1770) свою поэму вместе с

рассуждениями о различных электрических явлениях. Но одних рассуждений ему мало. Узнав о работах Бенджамена Франклина (1706–1790), Вольта в 1768 г., поразив жителей Комо, устанавливает первый в городе громоотвод, колокольчики которые звенели в грозовую погоду. Это знаменательное обстоятельство можно считать первым шагом Вольта в сторону геоэлектрики.

То время вообще было отмечено бурным всплеском интереса общества к электрическим явлениям. Демонстрации электрических опытов, особенно после изобретения лейденской банки, проводились и за плату. Некто Бозе высказал даже желание быть убитым электричеством, если об этом потом напишут в изданиях Парижской академии наук. Но это из области курьезов.

Алессандро Вольта суждено было сыграть существенную роль в изучении электричества. Но это — еще в будущем, правда, уже недалекое. Пока же все чаще и острее встает вопрос о выборе дальнейшего пути.

После настойчивых хлопот 22 октября 1774 г. Вольта получает назначение сверхштатным интендантом-регентом королевской школы в городе Комо. Это уже определенное общественное положение, хотя должность без жалования, работа тяжелая, условий для занятий наукой почти никаких.

Но 29-летний Вольта полон идей и энтузиазма, и уже через год ему удается добиться крупного успеха: он изобретает электрофор — «вечный электроносец».

Идея этого прибора может показаться теперь очень простой: если к заряженному телу приблизить заземленный проводник, а затем убрать провод заземления, то на этом проводнике останется индуцированный заряд, который можно, например, передать лейденской банке. Повторяя эту операцию множество раз, можно «добыть» сколь угодно большой заряд.

Весть об электрофоре принесла его изобретателю заслуженную славу. Это отразилось и на его положении в школе: к идеям молодого энергичного регента, старавшегося улучшать и преподавание, и научную работу, стали прислушиваться, и 1 ноября 1755 г. Вольта был назначен штатным профессором (учителем) школы.

Наблюдательность и изобретательность Вольта вскоре проявились еще раз. Плавая по озеру на лодке, он установил, что газ, поднимающийся со дна от воткнутого в ил шеста, прекрасно горит. Вскоре Вольта уже демонстрировал не только газовые горелки, но и пистолеты, в которых вместо пороха взрывался газ,

поджигаемый электрической искрой. Замечательно, что тогда же он первым выдвинул идею о передаче электрических сигналов по проводам по линии Павия–Милан. Понимая настоятельную необходимость научного общения, Вольта добился поездки в Швейцарию, где ему даже удалось посетить Вольтера.

Еще одним важным знаком признания заслуг Вольта явилось его назначение в ноябре 1778 г. профессором экспериментальной физики университета в Павии и избрание его членом королевского общества в Лондоне. Приятной новостью было также увеличение зарплаты.

Профессору Вольта идет четвертый десяток лет, он признанный ученый. Его электрофором пользуются во многих лабораториях. Быстро разносится и известие об изобретенном им электрометре с конденсатором — чувствительнейшем приборе. В 1782 г. Вольта — на стажировке в академии наук в Париже, и вскоре он избирается ее членом-корреспондентом. Знакомства с ним ищут в Австрии, в Пруссии и даже в далекой России. В 1785 г. его избирают членом-корреспондентом академии наук и литературы в Падуе, а вскоре (на 1785–1786 учебный год) — ректором университета в Павии, с 1791 г. Вольта — член Лондонского королевского общества.

Но не эти успехи и почести стали главными в жизни Вольта в этот период, а дискуссия между ним и Луиджи Гальвани (1737–1798).

В 1791 г. в Болонье вышло в свет сочинение профессора анатомии Луиджи Гальвани (1737–1789), в котором автор поведал об удивительных результатах одиннадцатилетних экспериментальных исследований.

Все началось с того, писал Гальвани, что, препарировав лягушку, «... я положил ее без особой цели на стол, где стояла электрическая машина. Когда один из моих слушателей слегка коснулся нерва концом ножа, лапка содрогнулась как бы от сильной конвульсии. Другой из присутствовавших заметил, что это случалось только в то время, когда из кондуктора машины извлекалась искра». Впоследствии было замечено, что сокращение лапок наблюдается во время гроз и даже просто при приближении грозового облака.

Пораженный этими явлениями, Гальвани пришел к выводу о существовании особого рода «животного электричества», подобного тому, что уже было известно у электрических рыб, например у скатов.

Не всем опытам Гальвани мог дать объяснение. Так, оставалось непонятным, почему лапки препарированных лягушек поразному сокращались в зависимости от того, дужкой из какого металла соединяли их позвончики с нервами на лапке (наибольший эффект получался, если эта дужка была составлена из кусочков различных металлов). Но интерес все это вызывало тем большим, что электричество вообще «вошло в моду» и даже начало признаваться целебным.

Естественно, что Вольта заинтересовавшись опытами Гальвани, проверил их, но пришел к принципиально новым выводам. Вольта понял, что ни о каком «животном электричестве» говорить не приходится, и что лапки лягушек (как и многие другие ткани животных) выступали лишь в роли чувствительных электродов. Он доказал на опыте, что электризация происходит при соприкосновении различных веществ, в том числе и металлов.

Конечно, во времена Вольта еще почти ничего не было известно о строении веществ, в частности металлов. Это сегодня физики уже знают, что есть такая величина — работа выхода, т. е. та энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы вырвать его из вещества. Для цинка, например, эта работа выхода меньше, чем для меди, и поэтому при соприкосновении цинковой и медной пластинок некоторому количеству электронов «энергетически выгодно» переходить из цинка в медь, отчего первая заряжается положительно, а вторая — отрицательно.

Вольта всего этого знать не мог, но проницательность и умение понимать язык природы позволили ему почти на два столетия опередить свое время и даже указать, в какой последовательности нужно расположить металлы, чтобы наибольший эффект соответствовал металлам, более удаленным друг от друга.

Это открытие было огромной заслугой Вольта, но даже оно не была главным. Заметив, что прослойка из влажной ткани (особенно если пропитать ее раствором соли, или кислоты) может усилить электризацию пары различных металлов, Вольта пришел к своему самому важному изобретению. Поняв, что из пар металлов, разделенных такими прослойками, можно составлять эффективные цепочки, он положил начало новой эпохе не только в физике, но и в технике. После долгого периода, когда были известны только электростатические источники зарядов и токов, появился принципиально новый источник; его называют

теперь гальваническим, хотя термин «вольтов столб» исторически более оправдан.

Новый источник открывал невиданные ранее возможности создания электрических устройств различных типов (к примеру, «вольтова дуга», долгое время бывшая самым ярким осветительным прибором).

К этому нельзя не добавить, что в наши дни и открытия Гальвани заново обрели исключительную значимость: зародилась наука, которую можно назвать электрофизиологией, и она показывает, какую важнейшую роль в живых организмах играют токи и электромагнитные поля.

Наступивший XIX век принес Вольта новые достижения, признание и почести. В конце июня 1800 г. Бонапарт открывает университет в Павии, где Вольта назначается профессором экспериментальной физики, в декабре он вводится в комиссию Института Франции по изучению гальванизма, а в декабре (опять-таки по предложению Бонапарта, который проявлял к Вольта особый, повышенный интерес) ему присуждается золотая медаль и премия первого консула. В 1802 г. Вольта избирается в академию Болоньи, через год — членом-корреспондентом Института Франции и удостоивается приглашения в академию наук Санкт-Петербурга (избран в 1819 г.). Римский Папа назначает ему пенсию, во Франции его награждают орденом Почетного Легиона. В 1809 г. Вольта становится сенатором Итальянского королевства, а в следующем году ему присваивается титул графа. В 1812 г. Наполеон из ставки в Москве назначает его президентом коллегии выборщиков.

С 1814 г. Вольта — декан философского факультета университета Павии. Австрийские власти даже предоставляют ему право исполнять обязанности декана без посещения службы и подтверждают законность выплаты ему пенсий почетного профессора и экс-сенатора.

Когда возникает коммуна в Лозанне, Вольта избирают первым ее депутатом, хотя никакого интереса к политике он никогда не испытывал. Если начинался разговор о ней, Вольта обычно лишь отшучивался.

В конце жизни он, ограничившись кругом своей семьи, заметно утратил интерес к науке, даже к своему главному детищу, знаменитому «вольтову столбу».

Нужно признать, что Вольта, изобретатель гальванических элементов, не имел никакого представления о том, почему и как

они действуют. Это, конечно, не умаляет его заслуги: ведь пахарь, бросающий семя в землю, тоже не может полностью объяснить, каковы те процессы, которые определяют рост растения. Для этих объяснений потребуются непростые и длительные исследования, но пока они ведутся, колос растет.

Позже мы попытаемся разобраться в основных физических процессах, определяющих работу гальванических элементов, а пока, заметив еще раз, что изобретение Вольта необычайно подхлестнуло изучение электрических токов, обратимся к рассказу о первых шагах науки об электромагнетизме.



## *5. Что же является источником магнетизма?*

Напомним, что еще Кулон заметил весьма много общего во взаимодействии между электрическими зарядами и магнитными полюсами. Это сходство было настолько полным, что почти само собой возникло мнение, что наряду с электрическими, существуют и магнитные заряды, но только они почему-то всегда выступают не по отдельности, а неразделимыми парами полюсов противоположного знака. В остальном электростатика и магнитостатика почти дублировали друг друга, как два весьма похожих, но независимых раздела физики.

Все радикально переменялось благодаря открытию Эрстеда.

Ханс Кристиан Эрстед вошел в историю физики прежде всего как фактический основоположник учения об электромагнетизме. Он обнаружил, что электрический ток, протекающий по проводнику, оказывает воздействие на расположенную поблизости от проводника магнитную стрелку.

Это замечательное открытие, значение которого оказалось исключительно важным, многие годы некоторыми историками науки несправедливо воспринималось как результат счастливой случайности: уж очень технически несложен опыт Эрстеда, который сегодня способен повторить любой школьник, у которого есть батарейка от карманного фонаря, проволочка и компас.

Но эта простота обманчива. Эрстед пришел к своему замечательному открытию отнюдь не случайно. Им руководила глубокая убежденность о связи электричества с магнетизмом.

К 1820 г., когда Эрстед сделал это открытие, ему было 43 года и он уже был непременным секретарем Датского королевского общества и автором большого числа работ посвященных акустике, электричеству и молекулярной физике. Заслуженную известность Эрстед приобрел и как блестящий лектор и

популяризатор науки, создатель первой в Дании физической лаборатории и Общества по распространению естествознания, что способствовало заметному улучшению преподавания в стране.

Вся научная деятельность Эрстеда была пронизана убежденностью о взаимосвязи и единстве многих, на первый взгляд, независимых явлений. Идея о связи между электричеством и магнетизмом могла возникнуть у него, если он знал о случайно замеченных фактах намагничивания железной проволоки громотводов молниями. Но решающее значение имел, разумеется, его гениальный по простоте опыт.

Обнаружив, что магнитная стрелка поворачивается под действием тока, протекающего по расположенному вблизи нее проводу, Эрстед не только открыл магнитное воздействие тока. Физика впервые столкнулась с неведомым ранее случаем нецентральной силы, т. е. силы, не направленной вдоль прямой линии, проходящей от одного взаимодействующего тела к другому: если до включения тока стрелка компаса располагалась параллельно проводу, то после включения тока появлялась сила, стремящаяся ориентировать ее перпендикулярно проводу. Иными словами, наблюдалось появление вращающего момента сил.

Весть об открытии Эрстеда очень скоро облетела всех физиков и произвела сильное впечатление. Особенно быстро и активно отреагировал на нее Ампер.

Об этом гениальном французском ученом хочется рассказать подробнее.



## 6. Гипотеза АМПЕРА

Андре-Мари Ампер (Ampere) — выдающийся французский ученый, физик, математик и химик, в честь которого названа одна из основных электрических величин — единица силы тока *ампер*, автор самого термина «электродинамика» как наименования учения об электричестве и магнетизме, один из основоположников этого учения, член Парижской академии наук, Лондонского и Эдинбургского королевских обществ, иностранный член многих академий, в том числе Санкт-Петербургской и ряда других научных учреждений — родился 22 января 1775 г.

Предки Андре-Мари Ампера были ремесленниками и жили в окрестностях Лиона. Их профессиональный и культурный уровень быстро возрастал от поколения к поколению, прадед ученого Жан-Жозеф был не только опытным каменотесом, но и выполнял сложные строительные и реставрационные работы, а его сын Франсуа уже стал типичным просвещенным городским буржуа, представителем довольно зажиточного третьего сословия и женился на дворянке.

Отец Андре-Мари, Жан-Жак Ампер получил хорошее образование, владел древними языками, составил себе прекрасную библиотеку, живо интересовался идеями просветителей. Воспитывая детей, он вдохновлялся педагогическими идеями Руссо. Его политическим идеалом была конституционная монархия.

Революция застала Жан-Жака Ампера на купленной незадолго до этого должности королевского прокурора и королевского советника в Лионе, куда семья сравнительно недавно переехала из деревни. Падение Бастилии семья Амперов встретило с энтузиазмом. Но вскоре на семью обрушилась беда.

Жан-Жак придерживался умеренных взглядов, и поплатился за это. В Лионе во время революции свирепствовал одержимый мистическими идеями лютый и алчный якобинец вместе со

своими подручными, он клеветал на ни в чем не повинных людей ограбил их и обрушивал на них всевозможные кары именем революции.

Лионцы восстали против зверств якобинцев, восстание было подавлено и жирондист Жан-Жак Ампер (хотя его действия были как раз продиктованы намерением спасти вожаков якобинцев от ярости толпы) был гильотинирован 24 ноября 1793 г.

Это было страшное потрясение для Андре-Мари и всей семьи (к тому же перенесшей недавно еще один удар — от туберкулеза умерла Антуанетта, старшая из сестер).

Можно сказать, что спасли Андре-Мари, вернули его к жизни книги.

Читать он начал примерно с четырех лет, к 14 годам залпом прочитал подряд все статьи из всех 20 томов «Энциклопедии» Дидро и Даламбера (и многое помнил до конца своей жизни). Одаренность проявилась у ребенка очень рано. Так, он научился считать, даже еще не умея писать цифр. В 14 лет, чтобы читать труды Бернулли и Эйлера (которые он, изумляя библиотекаря, доставал в Лионе), в несколько недель изучил латинский язык. Чтение вообще было не только главным, но и единственным источником его знаний. Других учителей у него не было, он никогда не ходил в школу, не сдал за всю свою жизнь ни одного экзамена. Но он постоянно и много черпал из книг. Тем более поразительно, что в конце жизни Ампер, впав в глубокую депрессию, вообще почти перестал читать, и многие книги, попав на полки в его библиотеке, так и оставались неразрезанными

Круг его юношеского чтения был настолько широк, что это чтение может даже показаться беспорядочным. Но Ампер не просто читал, он изучал, творчески усваивая прочитанное. Не случайно уже в 12–14 лет он начал представлять математические мемуары в Лионскую академию, писал научные труды по ботанике, изобретал новые конструкции воздушных змеев, трудился над созданием нового международного общечеловеческого языка, был погружен в философские размышления и даже совмещал все это с сочинением эпической поэмы — разносторонность всегда отличала его.

Перенесенные душевные травмы почти на два года выбили Андре-Мари из колеи. Только к 20 годам он вновь обретает тягу к книгам и знаниям. Но по-прежнему, когда, казалось, он начал поправляться после ударов, на взгляд многих окружающих, его поведения оставалось странным. Он часто бродит в одиночест-

ве, неуклюжий и неряшливо одетый, порой громко и размеренно скандируя латинские стихи, или разговаривая сам с собой. К тому же, он очень близорук (он узнает об этом только в 20-летнем возрасте благодаря случайности, взглянув на мир через очки приятеля. Когда он вскоре приобрел очки, это стало для него поистине знаменательным событием! Говорят, что, «прозрев», Ампер начал необычайно пылко и восторженно воспринимать красоту природы). Но, как это ни странно, в молодости Ампер не проявлял интереса к изобразительному искусству, а музыкой заинтересовался только к 30 годам, когда ему открылось очарование простых и бесхитростных мелодий.

Наверное, одним из главных импульсов, вернувших Ампера к активной жизни, стала его встреча с золотоволосой Катрин Каррон. Ампер влюбился сходу и навсегда, но согласия на свадьбу не имевшему надежных доходов Амперу удалось добиться только через три года. Родители невесты даже пытались найти ему работу в торговле, но, к счастью для науки и для самого Ампера, эти попытки не увенчались успехом. Большую поддержку Амперу всегда оказывала Элиза, сестра Катрин, раньше других оценившая его редкостные душевные качества.

В августе 1800 г. родился сын Амперов, которого в честь деда назвали Жан-Жаком.

Еще до женитьбы Ампер начал преподавать, давая частные уроки по математике. Теперь же ему удалось выхлопотать место учителя в Центральной школе г. Бурга. Пройдя в феврале 1802 г. собеседование в Комиссии, он был признан подготовленным для проведения занятий.

Обстановка в бургской школе была убогой, и Ампер пытался хотя бы немного усовершенствовать физический и химический кабинеты, хотя денег для этого ни у школы, ни, тем более, у учителя не было. Жалование было очень небольшим, а приходилось жить отдельно от жены и ребенка, оставшихся в Лионе. Хотя, чем могла, помогала мать, Амперу приходилось искать дополнительного заработка, давая еще уроки в частном пансионе Дюпра и Оливье.

Несмотря на большую педагогическую нагрузку, Ампер не оставляет научную работу. Именно в это время во вступительной лекции в Центральной школе в 1802 г., а еще раньше — на заседании Лионской академии, в присутствии Вольта, он впервые высказывает мысль, что магнитные и электрические явления могут быть объяснены исходя из единых принципов.

Не ослабевают и его усилия в области математики. Здесь на первый план выходят исследования по теории вероятностей. Они были замечены в Академии наук, где, в частности, на них обратил внимание Лаплас (1749–1827).

Это явилось основанием для признания Ампера подходящим на должность преподавателя в открывавшемся тогда Лионском лицее. Его кандидатура была выдвинута Даламбером. В апреле 1803 г. декретом Консульства Ампер был назначен на желанное для него место преподавателя лицея.

Однако Ампер оставался в Лионе меньше двух лет. Уже в середине октября 1804 г. он был зачислен на должность репетитора Политехнической школы в Париже и переехал туда.

Переезд в Париж произошел вскоре после того, как Ампер овдовел. Потеря обожаемой жены повергла его в отчаяние и религиозное смятение. Может быть, еще и поэтому Ампер, несмотря на мольбы его матери, поспешил оставить Лион (куда все последующие годы рвалась его душа), чтобы начать в Париже преподавание в организованной десять лет назад Политехнической школе.

Начав работать репетитором, Ампер уже в 1807 г. приступил к самостоятельным занятиям и через несколько лет стал профессором математического анализа. Вскоре в Политехнической школе появился 24-летний Араго, с которым Ампер проводил впоследствии важные совместные исследования. Отношение к Амперу коллег, среди которых было немало действительно крупных ученых, было вполне благожелательным (несмотря на непопулярность у студентов странно одевавшегося и вообще странно державшегося преподавателя), его научная работа шла успешно, но душевная рана, нанесенная потерей жены, была мучительной. Может быть, этим объясняется возникший у него, но не оказавшийся плодотворным интерес к психологии.

Движимые лучшими чувствами, друзья Ампера познакомили его с семейством, в котором была дочь «на выданье», 26-летняя Жанна-Франсуаза. Жертвой торгашеской алчности и грубого эгоизма этой женщины и всего ее семейства вскоре и стал доверчивый, простодушный и беззащитный в своей наивности Ампер, которого через некоторое время попросту выгнали из дома, и ему пришлось обрести временный кров в Министерстве внутренних дел.

Число профессиональных обязанностей Ампера, от которого постоянно требовали денег, тем временем возрастало. Он на-

значается на должность профессора математического анализа (именно труды по математике открыли, заметим, Амперу дорогу в Парижскую Академию наук), экзаменатора по механике в первом отделении Политехнической школы, он работает (до 1810 г.) в Консультативном бюро искусств и ремесел, а с осени 1808 г. — в должности главного инспектора университета. Эта последняя работа, взявшись за которую Ампера вынудили стесненные материальные обстоятельства, требовала постоянных разъездов и отнимала особенно много времени и сил. Он отдал этой изнурительной работе 28 лет, и последняя командировка закончилась по дороге в Марсель в 1936 г. его кончиной.

Периодом резкого взлета научной активности, временем его главных достижений оказались годы после его избрания в 1814 г. в Академию наук.

Андре-Мари Ампер был избран в число членов Парижской Академии наук по секции геометрии 28 ноября 1814 г. Круг его научных и педагогических интересов к тому времени уже вполне определился, и ничто, казалось бы, не предвещало здесь заметных изменений. Но пора этих изменений уже приближалась, близилось второе десятилетие XIX века, время самых главных научных свершений Ампера.

В 1820 г. Ампер узнал от Араго об опытах, которые незадолго до того проводил датский физик Ханс Кристиан Эрстед.

4 и 11 сентября Араго (1786–1853) сделал в Париже сообщения о работах Эрстеда и даже повторил некоторые из его экспериментов. Большого интереса у академиков это, впрочем, не вызвало, но Ампера захватило полностью. Вопреки своему обыкновению, он выступил здесь не только как теоретик, но занялся в маленькой комнатке в своей скромной квартире проведением опытов, для чего даже собственноручно изготовил столик; эта реликвия сохраняется поныне в Колледж де Франс. Заметим, что от перенесенной в юности травмы Ампер мог полноценно работать лишь одной рукой, что всегда затрудняло его. Даже писать ему было трудно; можно добавить, его странность проявлялась и в том, что вообще сидя работать (и даже думать) ему было трудно.

Ампер отложил все остальные дела, погрузившись в изучение новой проблемы. Как потом писали его современники, идеи и открытия появлялись в те дни у Ампера подобно тому, как Афина возникла из головы Зевса — в полном блеске законченности и совершенства.

18 и 25 сентября 1820 г. Ампер сделал свои первые сообщения об электромагнетизме. Фактически за две недели он пришел к своим самым главным научным результатам.

Влияние этих трудов Ампера на многие отрасли науки — от физики атома и элементарны частиц до электротехники и геофизики — невозможно переоценить.

Открытие Эрстеда многими толковалось тогда так, что под действием тока провод, по которому этот ток протекает, намагничивается, а потому и действует на магнитную стрелку.

Ампер выдвинул принципиально новую, радикальную и даже, на первый взгляд, дерзкую идею: никаких магнитных зарядов в природе вообще не существует, есть только электрические заряды, и магнетизм возникает только из-за движения электрических зарядов, т. е. из-за электрических токов.

Прошло без малого двести лет с того момента, когда Ампер выступил с этой гипотезой, и, казалось бы, пора разобраться, был ли он прав (и тогда название «гипотеза» делается неуместным), или же от нее нужно отказаться.

Первое впечатление — гипотезе Ампера противоречит даже сам факт существования постоянных магнитов: ведь никаких токов, ответственных за возникновение магнетизма, здесь, вроде бы, нет! Ампер возражает: магнетизм порождается огромным числом крошечных электрических атомных контуров тока. Можно только поражаться, что такая глубочайшая идея могла появиться в ту пору, когда не только еще не знали ничего об устройстве атомов, но даже еще не существовало и слова «электрон»! Каждый такой контур выступает как «магнитный листок» — элементарный магнитный двухполюсник. Этим и объясняется, почему магнитные заряды одного знака — «магнитные монополи», в отличие от монополей электрических, в природе не встречаются.

Почему же все-таки и поныне «гипотеза»? Ведь уже не раз казалось, что найдены «магниты», в которых электрических зарядов нет. Вот, к примеру, нейтрон. У этой частицы нулевой электрический заряд, но есть магнитный момент.

Опять «момент», т. е. опять магнитный двухполюсник, и его появление вновь объясняется в нынешней теории элементарных частиц «микроскопическими» токами, только теперь уже не внутри атома, а внутри нейтрона. Так можно ли уверенно утверждать, что магнетизм всегда порождается движением электрических зарядов?

Гипотеза Ампера в такой заостренной формулировке принимается не всеми теоретиками. Больше того, некоторые варианты теории говорят о том, что магнитные монополи («однополюсники») должны проявляться, но только при огромных, недостижимых для нас сегодня энергиях.

Гипотеза Ампера явилась важным, принципиальным шагом к утверждению идеи о единстве природы. Но она поставила перед исследователями ряд новых вопросов. В первую очередь, потребовалось дать полную и замкнутую теорию взаимодействия токов. Эту задачу с подлинным блеском, действуя как теоретик и как экспериментатор, решил сам Ампер. Чтобы найти, как взаимодействуют токи в различных контурах, ему пришлось сформулировать законы магнитного взаимодействия отдельных элементов тока («закон Ампера») и воздействия токов на магниты («правило Ампера»). По существу, была создана новая наука об электричестве и магнетизме, и даже термин **электродинамика** был введен одним из замечательных ученых прошлого, Андре-Мари Ампером.

\*  
⎵

## 7. Электромагнитное поле

Великий Ньютон, открыв закон всемирного тяготения, определил направление многих последующих исследований. Дело в том, что по его примеру и Кулон, и Ампер, да фактически и все, кто исследовал существующие в природе типы сил, видели конечную цель в нахождении количественного закона взаимодействия, не пытаясь объяснять его физическую природу. И при этом, подобно Ньютону, рассматривали мгновенное взаимодействие через пустое пространство, не вводя в рассмотрение чего-либо, что явилось бы посредником в этом взаимодействии.

Конечно, сам Ньютон понимал, что существует некий механизм передачи взаимодействия, но, как он писал, «Все, что не вытекает из явлений, является гипотезой. Гипотезам же нет места в экспериментальной физике. В последней выводят некоторые положения из наблюдаемых явлений и обобщают их путем индукции». Таким образом, вопрос о «механизме» взаимодействия, по мнению многих физиков, причислялся к разряду неактуальных. Торжествовала концепция дальнего действия — мгновенного и не нуждающегося в посредниках действия на расстоянии.

Но вот еще слова Ньютона: «Я считаю нелепостью допущение, будто тело, находящееся на некотором расстоянии от другого тела, может действовать на него через пустое пространство безо всякого посредства. Поэтому тяжесть должна вызываться каким-то действующим постоянно по определенным законам агентом».

Уверенность в существовании такого «агента» и в электрических и магнитных взаимодействиях не оставляла и еще одного великого английского физика — Майкла Фарадея. Об этом замечательном ученом и человеке нужно рассказать подробнее.

## 8. Майкл ФАРАДЕЙ

Майкл Фарадей (Michael Faraday) — один из величайших физиков и привлекательнейших людей XIX века, родоначальник современной полевой концепции в электродинамике, автор ряда фундаментальных открытий, в том числе закона электромагнитной индукции, законов электролиза, явления вращения плоскости поляризации света при его распространении в веществе вдоль линий магнитного поля, один из первых исследователей воздействия магнитного поля на среды — по праву может считаться одним из основоположников современной физики.

Фарадей родился 22 сентября 1791 г. в Лондоне в семье бедного кузнеца. Кузнецом был и его старший брат Роберт, всячески поощрявший тягу Майкла к знаниям и на первых порах поддерживавший его материально. Мать Фарадея была прекрасной, трудолюбивой и мудрой, хотя и необразованной женщиной, она дожила до времени, когда ее сын достиг успехов и признания и по праву им гордилась.

Весьма скромные доходы кузнеца не позволили Майклу окончить даже среднюю школу, и двенадцати лет он поступил учеником к владельцу книжной лавки и переплетной мастерской, где ему предстояло пробыть 10 лет. Все это время Фарадей напряженно занимался самообразованием, прочитал всю доступную ему литературу по физике и по химии, повторяя, по возможности, в устроенной им домашней физико-химической лаборатории опыты, которые описывались в книгах, посещал по вечерам и воскресеньям частные лекции по физике и астрономии. По шиллингу на оплату каждой лекции он получал от брата. На этих лекциях у Фарадея появились новые знакомые, и он стал писать им письма, чтобы выработать ясный и лаконичный стиль изложения, прося друзей указывать ему на все недостатки; он старался также изучать приемы ораторского искусства.

Одним из клиентов переплетной мастерской был член Королевского общества Денс (Dence) который, заметив огромную тягу Фарадея к науке, помог ему попасть на лекции выдающегося физико-химика Гемфри Деви в Королевском институте. Фарадей тщательно записал и переплел четыре лекции и вместе с письмом послал их лектору.

Этот «смелый и наивный шаг», по словам самого Фарадея, оказал на его судьбу решающее влияние: в 1913 г. Деви (не без некоторого колебания) пригласил его на освободившееся место ассистента в Королевский институт. Осенью того же года Деви отправился на два года в поездку по научным центрам Европы, взяв с собой и Фарадея в качестве ассистента (а порой, заметим, и лакея, благодаря жене Деви, находившей нужным «ставить на место» молодого человека). Это путешествие имело для Фарадея большое значение: он вместе с Деви посетил ряд лабораторий, познакомился с выдающимися учеными: Ампером, Шеврелем, Гей-Люссаком, и они обратили внимание на блестящие способности молодого англичанина.

После возвращения в 1815 г. в Королевский институт Фарадей приступил к интенсивной работе, в которой все большее место начали занимать самостоятельные исследования. В 1816 г. он начал читать публичный курс лекций по физике и химии в Обществе для самообразования. В том же году появляется и его первая печатная работа.

В 1821 г. в жизни Фарадея произошло несколько важных событий. Он получил место надзирателя за зданием и лабораториями Королевского института (технического смотрителя, по нынешней терминологии); появились две крупные его работы (о вращении тока вокруг магнита и магнита вокруг тока и о сжигании хлора). В том же году он женился, и, как показала вся его дальнейшая жизнь, женился весьма счастливо.

В период до 1921 г. Фарадей опубликовал около 40 работ, главным образом, по химии. Затем его блестящие экспериментальные исследования все более начали переключаться на область электромагнетизма.

К тому времени только что произошло открытие Эрстедом магнитного действия электрического тока, и Фарадея увлекала проблема связи между электричеством и магнетизмом. В 1922 г. в его лабораторном дневнике появляется запись: «Превратить магнетизм в электричество». Но он продолжал и другие исследования.

Вскоре Фарадей был избран членом Королевского общества. Это произошло несмотря на активное противодействие Деви, отношения Фарадея с которым стали к тому времени непростыми, хотя Деви любил повторять, что из всех его открытий самым значительным было открытие Фарадея. Последний также никогда не упускал случая воздать должное Деви. «Это был великий человек», — сказал он уже на склоне лет химику Дюма, когда тот начал говорить о слабостях Деви.

Спустя год после избрания в Королевское общество Фарадея назначили директором лаборатории Королевского института. В 1827 г. он получил в этом институте профессорскую кафедру.

Несмотря на стесненное материальное положение, Фарадей в 1830 г. решительно бросает все свои побочные занятия, выполнение любых платных научно-технических исследований и других работ (кроме чтения лекций по химии), чтобы целиком посвятить научным изысканиям.

Вскоре его труды увенчиваются блестящим успехом: 29 августа 1831 г. Фарадей открывает явление электромагнитной индукции — явление порождения электрического поля переменным магнитным полем.

Как уже говорилось выше, электрические и магнитные явления долгое время казались независимыми и несвязанными друг с другом, хотя электростатика и магнитостатика в значительной степени друг друга «дублировали». Если рядом с несущим электрический заряд телом поместить постоянный магнит, то, казалось, он не влияет на заряды. Правда, уже было установлено, что магнит воздействует на провод, по которому течет электрический ток, но если тока нет, то действие магнита его и не порождает. Но только магнита неподвижного! Напомню читателю известный любому школьнику опыт: если внутри катушки провода (физики часто говорят «контур») покоится постоянный магнит, никакого тока в контуре не возникает, но если тот же магнит начать вдвигать в катушку, или выдвигать из нее, или заменить постоянный магнит электромагнитом и менять силу протекающего по нему тока, то ток в контуре пойдет, какими бы причинами ни вызывалось изменение «магнитного потока» (наглядно говоря, числа силовых линий, пронизывающих площадку, ограниченную этим контуром).

Лишь позже была понята глубокая причина этого. Фарадей фактически открыл, что кроме электрического поля, порождаемого электрическими зарядами (его иногда называют «полем

кулоновского типа») существует и другое электрическое поле, силовые линии которого, в отличие от поля кулоновского типа, не начинаются или не кончаются на зарядах, а замкнуты (такие поля называют поэтому вихревыми). Эти два типа полей носят одинаковое название «электрические» по простой, но важнейшей причине: они проявляются одинаковым образом в эксперименте по воздействию на заряды.

Здесь уместно небольшое отступление.

Если физику предлагается дать определение некоторого понятия, он указывает, как оно проявляется на опыте и как можно измерить величины, которые количественно его описывают. Так, на вопрос «что такое напряженность электрического поля», физик отвечает: «чтобы определить напряженность электрического поля в некоторой точке, нужно поместить в эту точку положительный единичный неподвижный заряд и измерить, какова действующая на него сила.

Читателю, склонному к «философскому осмыслению», такой ответ может показаться сухим и неинтересным. Возможно, ему больше импонирует мнение Гегеля, полагавшего, что «электричество есть яростная сущность материи», но для физика, не склонного к туманным и высокопарным словесам, он является точным и исчерпывающим.

Но как только принято такое определение и эксперимент подтверждает, что в переменном магнитное поле на покоящийся заряд действует сила, остается только согласиться, что переменное магнитное поле порождает электрическое поле, а оно, в свою очередь, может явиться и причиной тока в контуре.

Десять дней напряженнейшей работы позволили Фарадею всесторонне и полностью исследовать это открытое им явление, которое, без преувеличения, можно назвать фундаментом, на котором покоится, в частности, вся современная электротехника. Но сам Фарадей не интересовался прикладными возможностями своих открытий, он стремился к главному — к исследованию законов Природы.

Открытие электромагнитной индукции принесло Фарадею заслуженную известность. Но он по-прежнему был очень стеснен в средствах, так что его друзья были вынуждены хлопотать о предоставлении ему пожизненной правительственной пенсии. Эти хлопоты увенчались успехом лишь в 1835 г. Но когда у Фарадея возникло впечатление, что министр казначейства относится к этой пенсии как к подачке ученому, последний направил

ему полное гордого достоинства письмо, в котором отказывался от всякой пенсии. Министру пришлось просить извинения у Фарадея.

В 1833–1834 гг. Фарадей изучал прохождение электрических токов через растворы кислот, солей и щелочей, что привело его к открытию законов электролиза. Это можно назвать одним из первых важных шагов в сторону современной атомистики. Фарадей понял все основные черты процесса прохождения электролиза. Задолго до появления «микроскопической» модели этого процесса Фарадей уже «мысленным взором», как любили выражаться прежде, видел, что в растворах электролитов нейтральные молекулы разделяются на ионы, несущие противоположные по знаку заряды, причем эти заряды всегда кратны некоей одинаковой для всех ионов величине (мы теперь понимаем, что это заряд электрона, открытие которого, таким образом, Фарадей предвосхитил почти на три четверти века). Естественно, законы электролиза сыграли важную роль в становлении представлений о дискретных носителях электрического заряда и о величине заряда, который впоследствии называли элементарным.

До конца 30-х гг. Фарадей выполнил обширные исследования электрических явлений в диэлектриках.

Постоянное огромное умственное напряжение подорвало здоровье Фарадея и вынудило его в 1840 г. на пять лет прервать научную работу. Вернувшись к ней вновь, Фарадей в 1846 г. открыл явление вращения плоскости поляризации света, распространяющегося в прозрачных веществах, помещенных в магнитное поле, вдоль линий напряженности этого поля. Повидимому, сам Фарадей (взволнованно написавший, что он «намагнитил свет и осветил магнитную силовую линию») придавал этому открытию большое значение. И действительно, оно явилось первым указанием на существование связи между оптикой и магнетизмом.

После появления выдвинутой Лоренцом программы объяснения электромагнитных процессов в веществе на базе «микроскопически-электронных» представлений, появилось объяснение этого явления: под действием линейно поляризованной световой волны электроны в атомах начинают совершать колебания, но если все это происходит в магнитном поле, то под его воздействием плоскость этих колебаний несколько поворачивается по отношению к плоскости, в которой лежит напряженность электричес-

кого поля в падающей волне. Во вторичной же световой волне, порождаемой начавшимися колебаниями электронов, плоскость колебаний электрического поля (а она определяется направлением порождающих ее колебаний электронов) оказывается уже несколько повернутой по сравнению с той, что была у «первичной» волны.

Убежденность в глубокой связи между электрическими, магнитными, оптическими и другими физическими (а также химическими) явлениями была вообще лейт-мотивом всего научного миропонимания Фарадея.

В 1855 г. болезнь вновь заставила Фарадея прервать работу. Он значительно слабел, стал катастрофически терять память. Ему приходилось записывать в лабораторный журнал все, вплоть до того, куда и что он положил перед уходом из лаборатории и что он уже сделал и что собирался делать далее. Но даже когда он, чтобы все же продолжать работать, должен был отказаться от многого, в том числе и от посещений друзей, последнее, от чего он отказался, оставались лекции для детей. Они продолжались почти до последнего дня его жизни 25 июля 1867 г.

Последние экспериментальные работы Фарадея были посвящены исследованиям магнитных свойств сред. Одним из наиболее значительных результатов здесь явилось открытие диамагнетизма.

Даже приведенный далеко не полный перечень того, что внес в физику Фарадей, позволяет оценить исключительное значение его трудов.

Но в этом перечне отсутствует главное, что составляет его громадную научную заслугу: Фарадей был первым, кто создал полевую концепцию в учении об электричестве и магнетизме. Если до него господствовало представление о прямом и мгновенном взаимодействии зарядов и токов через пустое пространство, то Фарадей последовательно развивал идею о том, что активным материальным переносчиком этого взаимодействия является электромагнитное поле. Об этом прекрасно написал Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879), ставший его последователем и развивший далее его учение и облекший представления об электромагнитном поле в четкую математическую форму: «Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели центры напряжения сил дальнего действия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетво-

---

ряясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды, Фарадей искал сущность реальных явлений, протекающих в среде».

Полевая точка зрения на электродинамику, основоположником которой был Фарадей, стала неотъемлемой составной частью науки нашего времени.

Учению об электромагнитном поле придал блистательную физическую и математическую завершенность еще один из величайших физиков мира Джеймс Клерк Максвелл.

\*  
⎵

## 9. Джеймс Клерк МАКСВЕЛЛ

Джеймс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 г. в Эдинбурге.

Его отец Джон Клерк Максвелл принадлежал к древнему шотландскому роду Клерков. Он изучал право в Эдинбургском университете, потом вступил в адвокатскую коллегия, хотя интересовался лишь наукой и техникой, посещал заседания Эдинбургского философского общества и испытывал неприязнь к «грязным адвокатским делишкам», как он о них отзывался.

Джону Клерку Максвеллу было 37 лет, когда скончалась его мать, оставив на его попечение сестру Изабеллу, вдову государственного министра по делам Шотландии, с годовалой Дженимой.

Обстоятельства заставляли Джона принимать новое радикальное решение. Первым сделанным им шагом стала 4 октября 1826 г. женитьба на Франсуаз Кэй, дочери судьи Адмиралтейского суда Роберта Ходжона Кея.

Под влиянием этой артистически одаренной, тонкой, но в то же время энергичной и волевой женщины Джон решил навсегда покинуть Эдинбург и поселиться в доставшемся ему по наследству поместье в южной Шотландии. Поместье находилось в красивейшем месте, но было разоренным, там даже не было подходящего дома, и его планированием и постройкой нужно было заняться в первую очередь.

Джон Клерк Максвелл решил все, начиная с дома («небольшого, но допускающего возможность расширения»), сделать по-новому. Все должно было быть рационально, просто, но удобно. Дом получил название «Гленлэр» — «Берлога в узкой лощине». Там, в атмосфере любви, в окружении прекрасной природы протекли детские годы Джеймса.

Ему было 8 лет, когда скончалась его мать. Последние дни она очень страдала, и Джеймса утешали тем, что ее кончина была избавлением от этих страданий. Единственным воспитателем Джеймса остался его отец. Между отцом и сыном создалась исключительная духовная близость и взаимопонимание. На всю жизнь Джеймсу запомнилось, как отец ясными ночами выносил его из дома и рассказывал о звездном небе. Они даже изготовили потом «небесный глобус» — бумажный шар, на котором были выколоты созвездия, и когда зажигали внутри шара свечу, на потолке и на стенах появлялась картина звездного неба.

У него были друзья-сверстники, он с наслаждением носился на пони, умудрялся плавать на деревянной бадье, сам мастерилил себе игрушки, плел корзины и даже вышивал. Когда научился читать, довольно беспорядочно перечитал имевшиеся в доме книги, увлеченно рисовал «магические диски» — прообразы мультфильмов, даже сочинял стихи. Но систематического образования он не получал, что все больше беспокоило его отца (который, правда, вспоминал годы своей учебы в Хай-скул в Эдинбурге с живым отвращением) и родных. Был приглашен воспитатель — довольно милый юноша, не оправдавший, однако, как и несколько других последовавших за ним учителей, возлагавшихся на них надежд.

В конце концов было решено, что Джеймс должен переехать в Эдинбург, поселиться у своей тети и поступить в недавно созданную школу, носившую название Эдинбургской академии.

В школе Джеймса ждала малоприятная встреча. Одет он был непохоже на других: вся его одежда, вплоть до башмаков была изготовлена по оригинальным проектам его отца, не забывая о том, «что носят», а думавшего лишь о «рациональности» одежды и обуви. Естественно, в первый же день новые одноклассники набросились на Джеймса, и очень пострадала бы не только его одежда, но и он сам, если бы не сила и ловкость, приобретенная им в Гленлэре. После этого за Джеймсом осталось прозвище «Бешеный», и его начали побаиваться.

Первое время Джеймс не блистал в школе успехами. Он очень тосковал по отцу, по всему дому и даже (это нашло отражение в его письмах) по всем оставшимся в Гленлэре животным, включая его любимых лягушек. Успешной учебе мешала и недостаточная домашняя подготовка. Похоже, перелом произошел, когда пришло время изучать геометрию. Она на всю жизнь осталась для Максвелла любимым разделом математики.

Он увлеченно склеивал из бумаги многогранники. После посещения вместе с отцом Эдинбургского философского общества, где они прослушали доклад о форме этрусских ваз, Джеймс занялся способами рисования овалов. Он знал о методе, издавна применявшемся садовниками: в землю забивают два колышка (два фокуса), придерживающих веревочную петлю, вдоль которой скользит натягивающая веревку острая палка, которой и рисуется на земле эллипс.

Джеймс предложил обобщить этот метод. Так появилась его первая научная работа «О черчении овальных кривых, имеющих несколько фокусов». Отец показал начерченные сыном овалы профессору Форбсу, который 16 апреля 1864 г. доложил о них на заседании Эдинбургского философского общества, а потом опубликовал работу юного Максвелла со своими комментариями в Трудах Эдинбургского Королевского общества.

Весной 1847 г. состоялось важное для Джеймса знакомство с физиком Вильямом Николем (1767–1851), заслужившим известность изобретением очень удачного поляризатора (призмы Николя, часто именуемой просто «николем»). Продемонстрированные Николем изумительные картины хроматической поляризации, произвели на Джеймса Максвелла огромное впечатление, и он решил использовать это явление для исследования внутренних напряжений в прозрачных веществах. Он с увлечением зарисовывал цветные фигуры, которые наблюдал в опытах, и даже послал наиболее интересные рисунки Николю, и тот щедро отблагодарил его, прислав ему в подарок собственноручно изготовленные им два николя. Максвелл бережно хранил и впоследствии с успехом использовал этот подарок, начав изучать упругие напряжения в нагружаемых телах.

Интерес Максвелла к теории упругости нашел отражение в его докладе «О равновесии упругих тел», прочитанном им в 1850 г. на заседании Эдинбургского Королевского общества. Этот доклад, в который вошли результаты не только экспериментальных, но и теоретических исследования автора, вызвал серьезный интерес специалистов.

Но это произошло уже после того, как в 1847 г. Джеймс Клерк Максвелл одним из первых окончил Эдинбургскую академию, которая так неласково встретила его и которую он потом полюбил и где его также полюбили. При расставании весь класс спел сочиненный им гимн.

И Джеймс, и его отец отчетливо понимали, что для серьезной научной работы подготовка в Эдинбургской академии недостаточна и следует продолжить обучение. Но мысль о разлуке с отцом, самым близким ему человеком была так тягостна, что было решено не покидать Эдинбурга.

Поступив осенью 1847 года в Эдинбургский университет, Максвелл все заметнее переходит от математики к физике. Приехав летом в Гленлэр, он даже устроил там небольшую лабораторию, где занимался изучением оптическими методами механических напряжений при деформациях. Доклад об этих исследованиях он представил в Эдинбургском Королевском обществе в 1850 г.

Несмотря на то, что в университете преподавали интересные ученые и опытные педагоги, очень хорошо относившиеся к Джеймсу, и он, и его отец все яснее понимали, что дальнейший рост требует перехода в Кембридж. Решиться на это было трудно: этих двух людей связывало все, и, казалось, жить в разлуке они не смогут. Но рассудок победил чувства, и осенью 1850 г. Джеймс уехал в Кембридж.

После непродолжительного пребывания в старейшем из колледжей Кембриджа Питерхаузе (колледже святого Петра) Максвелл перевелся в колледж святой Троицы — Тринити-колледж, основанный в 1546 г. славный тем, что здесь учился и работал великий Исаак Ньютон (1643–1727).

Наиболее трудной частью всего обучения был математический трипос — выпускной экзамен, к которому готовились три года с помощью тьюторов — специально приглашаемых преподавателей.

Тьютору Максвелла досталась нелегкая доля — Максвелл прибыл в Кембридж «с поистине безграничным, но хаотическим состоянием знаний». И однако он добился высокого положения в Кембридже. Он поднялся до второго места, уступив первое Э. Д. Роузу (1831–1907), который впоследствии сам стал знаменитым тьютором и внес ценный вклад в механику.

Успехи Максвелла были замечены, и молодой бакалавр был оставлен в Тринити-колледже в качестве преподавателя. Это произошло в январе 1854 г.

А 20 февраля 1854 г. Максвелл отправил в Глазго Уильяму Томсону (1824–1907) письмо, которому было суждено сыграть и в жизни Максвелла, и в истории науки важную роль.

Обращаясь к Томсону от имени группы Кембриджской молодежи, Максвелл просит Томсона посоветовать, как изучать электричество.

Томсон ответил очень благожелательным письмом, и завязалась переписка Максвелла, только что вступившего в «нечестивое сословие бакалавров», по его выражению, с маститым ученым, ставшим в 1851 г. членом Лондонского королевского общества (с 1890 по 1895 г. его президентом) и получившим в 1892 г. титул лорда Кельвина.

Максвелл писал Томсону о полученных им результатах по теории упругости, о своем новом увлечении — теории цветного зрения, в частности о дальтонизме, но больше всего — об электричестве и магнетизме. Последнее письмо Максвелла к Томсону из Тринити-колледжа датировано 25 апреля 1856 г. Оно посвящено математической теории электромагнетизма и кончается припиской: «Я, кажется, получу профессуру».

Речь шла о профессуре в Маршалл-колледже города Абердина в его родной Шотландии. Одновременно кандидатура 25-летнего Максвелла была предложена в члены Эдинбургского Королевского общества.

Максвелл с радостью принял лестные предложения и поспешил в Гленлэр, в Шотландию, к отцу. Здесь его ожидал тяжелый удар. 2 апреля 1856 г. Джон Клерк Максвелл скоропостижно скончался на руках своего сына.

Потерю самого дорогого и близкого человека помогла перенести физика. Максвелла тогда занимало несколько проблем, в том числе проблема устойчивости колец Сатурна и, особенно, проблема цвета. Но, конечно, главный, фундаментальный вклад Максвелла в науку связан с электричеством и магнетизмом.

Максвелл в первый раз 13 ноября 1854 г. написал заметку «О фарадеевых линиях силы». Два последующих года он напряженно продолжает эти исследования, не прекращая работ по теории цветов и зрения. К этому времени он становится членом Тринити-колледжа, читает курсы гидростатики и оптики. Но главное — электродинамика.

Все грандиозное здание электродинамики покоится, если вдуматься, на весьма небольшом числе фундаментальных экспериментальных фактов. Но чтобы осознать это, Максвеллу потребовалось безоговорочно принять фарадеевскую концепцию электромагнитного поля как посредника во взаимодействиях зарядов и токов.

Влияние работ Фарадея на исследования Максвелла по электродинамике было решающим. Он писал: «прежде чем начать изучение электричества, я решил не читать никаких математических работ по этому предмету до тщательного прочтения мной «Экспериментальных исследований по электричеству» Фарадея».

Нередко можно встретить утверждение, что Максвелл «все-го лишь» перевел идеи Фарадея на язык математики. Хотя, нужно признать, что высказывания самого Максвелла дают повод для такого мнения, оно по существу неверно. Максвелл внес качественно новые принципиальные положения, без которых все дальнейшие великие открытия, в первую очередь открытие электромагнитной природы света, были бы невозможны. Но, безусловно, полевая концепция Фарадея играла первостепенную роль. Наверное, лучше всего об этом писал сам Максвелл: «Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели центры напряжения дальнего действия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетворяясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды, Фарадей искал сущность реальных явлений, протекающих в среде».

Нужно заметить, что слово «среда» не случайно: Максвелл, как и Фарадей, считал, что пространство заполнено всепроникающим эфиром, некоей средой, в которой под действием зарядов и токов возникают напряжения, что и делает эту среду посредником в электромагнитных взаимодействиях. Эти образы, заимствованные из механики сплошных сред, пронизывают даже терминологию электродинамики, которой мы пользуемся и поныне: «напряженности электрического и магнитного полей, силовые линии, электродвижущая сила» и т. д. Максвелл же принимал многое буквально. Так, «поток напряженности электрического (или магнитного) поля» ассоциировался с реальным перетеканием какой-то среды, хотя мы не придерживаемся теперь таких представлений. Это нетрудно объяснить как укоренившимся в то время взглядом на механику как на универсальную, всеобъемлющую науку, так и местом, которое занимала механика сплошных сред в научной деятельности самого Максвелла.

И вот сложилось удивительное положение: наглядные модели и образы из арсенала механики, к которым прибегал Максвелл (а он настолько часто пользовался ими, что один из его

читателей возмущенно заметил: «я думал, что вхожу в храм чистой науки, а оказался на фабрике!») — все это оказалось «строительными лесами», а в «здании» — великих уравнениях Максвелла — не пошевелился ни один камень, не изменилось ни одно из уравнений, когда эти леса были убраны и пришла пора новых толкований. Нельзя не подчеркнуть, что первый шаг к «освобождению от лесов» был сделан самим Максвеллом. Это видно уже по его работе 1964–1965 гг. «Динамическая теория электромагнитного поля».

Четыре дифференциальных уравнения Максвелла — математическая основа его теории — являются прямым обобщением экспериментальных фактов. Это:

1) закон Кулона для взаимодействия покоящихся зарядов (и, соответственно, выражение для напряженности электрического поля таких зарядов);

2) гипотеза Ампера о том, что магнитное поле является вихревым, что магнитные силовые линии замкнуты, т. е. об отсутствии в природе магнитных зарядов (монополей);

3) соотношение, связывающее распределение токов с напряженностью порождаемых ими магнитных полей. Главное открытие Максвелла связано здесь с тем, что он понял, что магнитное поле порождается как токами проводимости, связанными с движением электрических зарядов, так и с переменными электрическими полями;

4) закон электромагнитной индукции Фарадея, определяющий вихревое электрическое поле, непохожее на поля кулоновского типа: силовые линии вихревых электрических полей замкнуты и охватывают силовые линии переменных магнитных полей.

Вихревые электрические поля, как и кулоновские, воздействуют на покоящиеся заряды, в отличие от магнитных полей, действующих на токи, но не на покоящиеся заряды.

Максвелл послал Фарадею свою статью «О фарадеевских линиях силы» и 25 марта 1857 г. получил весьма одобрительное ответное письмо. В начавшейся переписке Фарадей не только постоянно поддерживал работу Максвелла, но и делился глубокими идеями. Так, он высказывает догадку, что электромагнитное поле распространяется с конечной скоростью, и идет еще дальше, когда пишет, что время установления электрического состояния «так же мало, как время прохождения света».

Но Максвелл пошел дальше качественных, хотя и гениальных догадок. Он обратил внимание на эксперименты, в которых Вильгельм Эдуард Вебер (1804–1891) и Рудольф Герман Арнут Кольрауш (1809–1858) определяли отношение количества электричества в магнитных и электрических единицах. Это отношение оказалось очень близким к значению скорости света. Эта близость была, конечно, известна физикам, но только Максвелл сделал из этого поразительный вывод о том, что свет имеет электромагнитную природу.

Веками оптика и учение об электромагнетизме развивались независимо и почти не пересекаясь. Правда, Фарадей обнаружил явление вращения плоскости поляризации в магнитном поле («Я намагнитил свет и осветил магнитные силовые линии!»), но дальше этого дело не пошло.

Озарение Максвелла решало многие проблемы. Конечно, представление о свете как о волнах в эфире объясняло многие явления интерференции, дифракции и поляризации, но при этом приходилось приписывать эфиру невиданные свойства: он не оказывал сопротивления движению в нем любых тел, но должен был обладать огромной упругостью формы. Хотя Максвелл не отказался от представлений об эфире (намек на возможность такого отказа также можно найти у Фарадея!), его теория позволила в дальнейшем справиться и с этой проблемой.

Если скорость распространения электромагнитного поля конечна, то это поле может продолжать существовать и после того, как исчезнут его источники, например прекратятся порождавшие его электрические токи. Иначе говоря, это поле может существовать самостоятельно в виде электромагнитного излучения. Таким электромагнитным излучением, согласно Максвеллу, является и свет.

Это замечательное предсказание впервые нашло подтверждение в 1887 г. в работах Генриха Рудольфа Герца (1857–1894), что явилось решающим аргументом в пользу теории Максвелла.

Важными были и опыты П. Н. Лебедева (1866–1912), доказавшие наличие давления света, т. е. подтвердившее наличие у электромагнитных волн не только энергии, но и импульса.

Успехи Максвелла не остаются незамеченными. В 1856 г. его избирают членом Эдинбургского Королевского общества и в 1860 г. он удостоивается медали Румфорда Королевского общества за работы по теории цветов и оптике.

Но жизнь в постоянном напряжении начинает подтачивать здоровье Максвелла, и в 1866 г. вместе с женой решает переселиться в свое имение в Гленлэр. У них много хозяйственных планов, они расширяют дом и, конечно, Максвелл не перестает при этом много сил отдавать физике. Но все планы опрокидывает болезнь. Максвеллы любят верховую езду, но однажды лошадь Джеймса, не слушая повода, ринулась в чащу, и он сильно ударился головой о нависшую ветку. В результате Максвелл надолго и в буквальном, и в переносном смысле слова был выбит из седла. По рекомендации врачей супруги Максвелл, как только позволило здоровье Джеймса, отправились 1867 г. в путешествие по Европе.

А в 1871 г. в жизни Максвелла происходит важное изменение. 8 марта, вскоре после выхода его новой книги «Теории тепла», он получает приглашение занять вновь организованную кафедру экспериментальной физики в Кембридже.

К тому времени в университетах Европы почти не было физических лабораторий и преподавалась «меловая физика». Эксперименты проводились в частных лабораториях ученых и на их деньги. Не было средств и на создание физической лаборатории в Кембридже, пока на помощь не пришел герцог Девонширский. Этот аристократ был прямым потомком лорда Генри Кавендиша (1731–1810), одного из крупнейших, но почти никому не известных физиков XVIII века — он жил очень уединенно, даже со слугами, чтобы не тратить времени, объяснялся, в основном, знаками, и почти не публиковал своих открытий. Когда Максвелл начал с присущей ему тщательностью изучать и публиковать бумаги Кавендиша, переданные ему герцогом Девонширским, выяснилось, что Кавендиш на 15 лет опередил Кулона, ввел понятие емкости и определил диэлектрические проницаемости ряда веществ, не говоря уже о том, что ему принадлежат первые лабораторные проверки закона всемирного тяготения Ньютона.

Благодаря финансовой помощи герцога Девонширского и неустанным трудам Максвелла, который был и автором проекта, и повседневным руководителем строительства здания лаборатории и работ по ее оборудованию, первая экспериментальная кафедра и лаборатория в Кембридже появилась. Максвелл и в области «административной физики» явил пример подлинного таланта.

Лаборатория была торжественно открыта 16 июля 1874 г.

Ей суждено было сыграть выдающуюся роль в истории физики. Заслуги Максвелла в ее создании были огромны, но он совмещал эти нагрузки с чтением лекций и, главное, — научной работой. Так, за первый год существования лаборатории он опубликовал шесть работ и среди них обработанные (что потребовало большого труда) рукописи Кавендиша. Вскоре он опубликовал работу «О динамическом доказательстве молекулярного строения тел», а в «Британской энциклопедии» появились его статьи «Атом» и «Притяжение». Много времени он уделял участию в работе комиссии по электрическим измерениям. Занимался Максвелл и популяризацией науки. Им издана адресованная широкому кругу читателей (в ней нет математики, хотя нужно признать, что это не делает ее легким чтением) книга «Материя и движение».

Но тяжелая болезнь вновь заставила его в 1879 г. вернуться в Гленлэр. Кончина Джеймса Клерка Максвелла 5 ноября 1879 г. была одной из величайших потерь для науки. После него остались его великие труды, созданная им лаборатория, в которой и поныне работают по завещанию вдовы Максвелла на учрежденную ею стипендию приезжающие со всех стран молодые физики.

Трудами Фарадея и Максвелла концепция дальнего действия в электродинамике уступила место концепции ближнего действия, в которой ведущее положение заняли представления об электромагнитном поле.

Максвелловская теория электромагнитного поля далеко не мгновенно нашла признание и понимание. Показательна в этом отношении история одного из самых удивительных последователей Максвелла — Оливера Хевисайда.

Восемнадцать лет он начал работать телеграфистом и, возможно, всю жизнь «просидел бы на ключе», если бы не болезнь: он начал глухнуть и так как в то время телеграммы принимались на слух, Оливер не смог продолжать работать и оказался на иждивении у родственников, далеко не богачей.

Но его очень интересовала наука, и он, заходя порой в магазин к знакомому букинисту, стоя у прилавка, старался просматривать некоторые книги по физике. Так в его руки попал «Трактат об электричестве и магнетизме» Максвелла, изданный в 1873 г. Ранее эта книга, судя по пометкам на полях, была в библиотеке одного из кембриджских профессоров, который, дойдя до середины, написал: «дальше понять ничего нельзя» и отнес ее букинисту.

Конечно, Хевисайду, не знавшему тогда высшей математики, эта книга была недоступна. Но он почему-то попросил букиниста известить его, если ее не купят и она «уценится». Когда цена упала до доступного Оливеру уровня, он купил книгу.

Но то, что происходил дальше, нельзя назвать просто чтением. Хевисайду пришлось не только овладеть новыми областями математики и физики, но и стать создателем и новых глав в этих науках. Достаточно сказать, например, что тот математический аппарат, который и сегодня используется при изложении теории Максвелла, был создан, как ни странно, не самим Максвеллом (он пользовался «кватарнионами», а не векторами), а Хевисайдом.

Далеко не сразу и далеко не все физики сумели понять и оценить электромагнитную теорию Максвелла. Еще в первые годы XX века, по воспоминаниям тогдашнего студента, профессор, дойдя до уравнений Максвелла, говорил: «Эти уравнения слишком сложны, чтобы рассказывать о них на лекциях, а господа студенты, желающие с ними познакомиться, благоволят приобрести конспект у служителя Ерофеича!»

Но что же такое электромагнитное поле?

Термин «поле» в математике и в физике обозначает попросту картину пространственного распределения чего-то. Так, поле температур в вашей комнате, или поле давлений и т. п. дает картину распределения этих величин в ней. Некоторые из этих величин могут быть векторами, т. е. для них нужно задавать не только численные значения, но и направления. Таким является, например, поле скоростей в некоторой жидкости.

Понятие о поле широко используется в механике сплошных сред, откуда многое почти без изменений перенесено в электродинамику. Даже термины «напряженности» электрического и магнитного полей явно происходят из теории упругости. И это не случайно: создатели теории электромагнитного поля фактически придерживались мнения, что электродинамика — это тоже механика, но механика некоей своеобразной, экзотической среды, именуемой эфиром. Эфиру приходилось приписывать огромную упругость, чтобы объяснить колоссальную скорость волн в нем (а Максвелл считал, что свет — это именно поперечные волны в эфире), но с другой стороны, мы, взмахнув рукой, никак не ощущаем сопротивления с его стороны. Но, в конце концов, экзотичность — это не более, чем непривычность, и этого недостаточно, чтобы отвергать механический эфир.

Здесь слово «механический» имеет ключевое значение, и оно означает, что эфир рассматривается как среда, подчиняющаяся законам механики Ньютона. Именно так виделось дело и Фарадею, и Максвеллу, которые, таким образом, продолжали верить в универсальность механического описания.

Появление теории относительности заставило отказаться от этих воззрений. И здесь эксперимент играл решающую роль. Попытки экспериментально определить, увлекают ли движущиеся в эфире тела его вслед за собой, привели к противоречивым результатам: из одних опытов следовало, что увлекают полностью, из других, — что увлекают частично, наконец, еще из других, — что не увлекают совсем. Таким образом, речь приходилось вести даже не об экзотичности эфира, а о внутренней противоречивости представлений о нем.

Это и привело к необходимости отказа от веры в механический эфир. Но ведь реальность существования электромагнитного поля сомнений не вызывала. Оно создается зарядами и токами, но может отрываться от них и существовать автономно, несет энергию, импульс, оказывает давление и т. д., т. е. обладает рядом важнейших свойств материи.

Но это не механическая материя, т. е. ее поведение не подчиняется законам механики! Впервые в физику вошло представление, что есть разные формы материи, и они отличаются «законами бытия», т. е. если пользоваться понятиями из арсенала математики, уравнениями, определяющими их пространственно-временное поведение. Но у всех форм материи имеются и важные общие черты: есть энергия, импульс, масса и т. д., что присуще и механической материи. Между разными видами материи существуют взаимодействия, так что и в этом смысле материя едина.

Но оставив эти важнейшие и интереснейшие вопросы, вернемся к Земле. Теперь предмет нашего обсуждения выглядит так: каковы физические причины возникновения электрического и магнитного поля Земли?

Поиски ответов на эти, далеко не новые вопросы, не требуют от нас обращения к каким-то новым гипотезам, здесь вполне достаточен надежно установленный и многократно проверенный на опыте аппарат физики, но его применение будет связано с далеко не простыми проблемами.

## 10. Пьер КЮРИ и геомагнетизм

После почти трехсотлетнего периода веры в выдвинутое Уильямом Гильбертом объяснение магнетизма Земли (Земля — большой постоянный магнит) исследования Пьера Кюри заставили отказаться от этого объяснения, и пришлось заново вернуться к этой, одной из древнейших проблем классического естествознания. Открытие Пьера Кюри имело здесь переломное значение, и об этом замечательном ученом и человеке, имя которого теперь известно всем (хотя чаще всего его связывают с проблемами радиоактивности), нужно рассказать подробнее.

Пьер Кюри родился 15 мая 1859 г. в Париже. Он был вторым сыном врача Эжена Кюри, человека передовых убеждений, которому лишь материальные обстоятельства не позволили посвятить себя естественным наукам, к которым он с юности испытывал активное влечение. Он уделял воспитанию детей огромное внимание и сумел передать своим сыновьям Жаку и Пьеру (который был моложе брата на три с половиной года) свою любовь к науке и свои высокие моральные принципы, духовную независимость и даже, если угодно, гражданское мужество (в дни Парижской коммуны он оказывал медицинскую помощь коммунарам). Он считал, что казенные методы обучения неправильны и вредны (особенно для Пьера, мечтательного и несколько медлительного), и потому его дети учились дома.

Вначале с Пьером занималась его мать, позже — отец и лишь с 14 лет — преподаватель математики и латыни. Хотя этот преподаватель оказался превосходным, но значительная роль сохранялась и за самообразованием.

В 16 лет, сдав экзамены на аттестат зрелости, Пьер Кюри получил диплом бакалавра естественных наук. В 1875 г. он начал работать помощником ассистента в лаборатории физики

профессора Леру в фармацевтическом институте и одновременно слушать лекции в Сорбонне. Через год он получил степень лиценциата физики, а когда ему исполнилось 19 лет, он был приглашен на должность ассистента на факультете естествознания Парижского университета. Здесь, в физическом практикуме он проработал 5 лет. Здесь же он совместно с профессором Дезеном выполнил свою первую экспериментальную исследовательскую работу. Она была посвящена определению длины волны теплового излучения.

Всем хорошо известно выражение «печка пышет жаром». После работ великого Максвелла стало понятно, что собою представляет этот «жар»: горячее тело испускает электромагнитные волны, и частоты этих волн зависят от температуры тела. Чем выше температура, тем более спектр излучения смещается в сторону высоких частот. При достаточно высоких температурах возникает оптическое излучение, при более низких — не воспринимаемое человеческим глазом инфракрасное. Именно оно и было предметом исследования Кюри. Методика исследования была в принципе традиционно-спектроскопическая: использовалась дифракционная решетка, но только в оптике решетки состоят из очень тонких и близко расположенных штрихов, а в инфракрасной области так называемая постоянная решетки (расстояние между ближайшими штрихами), которая должна быть порядка длины волны, во много раз больше, чем в оптике. Пьер изготовил свою решетку из множества тонких проволочек диаметром 0,125 мм, натянутых на таких же расстояниях на рамку, а в качестве детектора служил термостолбик.

В техническом отношении эксперимент был довольно несложным, хотя и требовал тщательности и аккуратности. Но, видимо, тематика не очень увлекла Кюри, во всяком случае, он более не стал к ней возвращаться.

В 1880 г. братья Кюри приступили к исследованиям, принеся им вскоре известность — они открыли и изучили явление, получившее название «пьезоэлектрический эффект».

Этот эффект — электризация некоторых кристаллов при сжатии — не был открыт случайно. По мнению, которое высказывалось впоследствии Марией Кюри, ему предшествовали глубокие размышления, касающиеся самых общих проблем симметрии, которые особенно интересовали Пьера Кюри. (Уместно заметить, что это было задолго до того, когда эти проблемы заняли в физике важнейшее место.)

За экспериментальным обнаружением электризации в ряде кристаллов (особенно детально исследовались явления в турмалине и в кварце), последовали работы, посвященные обратному эффекту — возникновению механических напряжений из-за воздействия электрического поля. Этот эффект был предсказан заранее, но опыты по его обнаружению оказались более тонкими.

Иногда высказывалось мнение, что пьезоэлектрический эффект был открыт еще в начале XIX в. Гаюи и Беккерелем, но более поздние работы показали, что это не так. В кальците, который они исследовали, этот эффект отсутствует (хотя там также наблюдалась электризация, но ее физическая природа оказалась иной).

Открытые братьями Кюри эффекты, помимо того, какое видное место они заняли в физике твердого тела, получили многочисленные применения, без которых немислима техника, в частности аудиотехника нашего времени. Начало деятельности в этом направлении было положено самими братьями Кюри, создавшими несколько принципиально новых измерительных приборов (часть из них позже была использована Пьером Кюри и при исследованиях радиоактивности).

Начатая в 1878 г. совместная работа братьев Кюри по изучению свойств кристаллов продолжалась до 1883 г., когда Жак Кюри переехал в Монпелье, где ему были поручены работы по минералогии. После этого он только изредка мог бывать в Париже и участвовать в продолжении опытов. В этом же году Пьер получил назначение руководителем в только что созданную Парижским муниципалитетом Школу промышленной физики и химии.

Новая работа Пьера Кюри потребовала значительных усилий, тем более, что он отдался ей с большим энтузиазмом. О том, как серьезно он относился к работе со студентами написал позже один из них, ставший известным физиком Поль Ланжевен.

На эксперименты времени (да и необходимого оборудования) не было.

Исследования пьезоэлектрического эффекта были по достоинству оценены. В 1895 г. за работы по физике кристаллов братьям Кюри была присуждена премия Планте. В том же году Пьер Кюри защитил диссертацию на факультете естествознания Парижского университета. Но к тому времени научные интересы Пьера Кюри претерпели заметные изменения. Он увлекся проблемой намагничивания веществ.

Эта новая масштабная проблема, начало разработки которой относится к 1891 г., привела Пьера Кюри к открытию явления, в самом названии которого было увековечено его имя. Проблема касалась влияния температуры на намагничивание.

Многочисленные эксперименты показали, что это влияние заметно различно для разных веществ — для так называемых парамагнетиков (у которых нагревание плавно уменьшало намагничивание), для диамагнетиков (где такое уменьшение не доминировало) и наконец, для ферромагнетиков. Этот последний класс веществ (в самом названии которого слышится «феррум» — железо) замечателен тем, что в них может существовать остаточное намагничивание (известные с давних пор постоянные магниты).

Но Кюри обнаружил, что при достижении определенной температуры (она получила наименование *точки Кюри*; для никеля она близка к  $600^{\circ}$ , для железа примерно вдвое выше) ферромагнетик скачком теряет остаточное намагничивание и переходит в новое состояние — парамагнетик.

Одно из следствий открытия Кюри имеет прямое отношения к геофизике. Как уже давно известно, недра планет (и, тем более, звезд) имеют очень высокую температуру. Температура ядра Земли, например, превышает  $2000^{\circ}$ , а так как точка Кюри для железа вдвое (а для никеля почти в четыре раза) ниже, то ни о каком постоянном намагничивании речи быть не может.

Но ведь магнитное поле у Земли несомненно есть! Более того, оптические методы исследования надежно установили присутствие магнитных полей на многих космических телах, в частности и на звездах.

Вновь во всей ее значительности встала проблема выяснения физической природы магнетизма планет и звезд. И на фоне этой проблемы менее заметной выглядела проблема объяснения электрического поля Земли (о других небесных телах долгое время не думали), хотя оно уже было открыто и вызвало определенный интерес.

## 11. Новый век и новые проблемы

Почти триста лет идея Гильберта, что Земля — большой постоянный магнит, выглядела если не во всем убедительной (кое-какие вопросы все же оставались), то хотя бы успокоительной.

Все радикально изменилось после открытия Пьера Кюри.

Что же касается электрического поля Земли, то здесь, на первый взгляд, положение выглядело лучше. Когда было открыто поле ясной погоды, почти немедленно было предложено его естественное, казалось бы объяснение: Земля — проводящий шар, и если он несет электрический заряд, то этот заряд растекается по поверхности, и над ней возникает электрическое поле. Поскольку это поле (в среднем) направлено вниз, то заряд нужно считать отрицательным, а зная величину напряженности поля  $\sim 120$  В/м (она прямо пропорциональна заряду и обратно пропорциональна квадрату радиуса Земли), нетрудно подсчитать, что величина заряда должна быть примерно  $6 \cdot 10^5$  Кл.

Это простое объяснение, и ныне кажущееся удовлетворительным многим геофизикам, в действительности, не объясняет многих наблюдаемых черт поля ясной погоды. Об этом позже, а пока первый вопрос: откуда берется этот заряд и, главное, почему он, несмотря на открытую еще Кулоном проводимость атмосферы, не стекает с Земли?

На это геофизики отвечают: существуют механизмы регенерации заряда Земли, в первую очередь, — грозовой механизм. За сутки на Земле происходит более 40 000 гроз, и каждую секунду 1800 молний бьют в Землю. Поскольку нижняя часть грозовых туч обычно заряжена отрицательно, можно полагать, что и заряд, приносимый молниями на Землю, также отрицателен. Но грозовой механизм — не единственный. Электрические заряды стекают с многочисленных остроконечных тел на Земле, и

этот механизм регенерации также играет заметную роль. Однако тщательные количественные оценки прихода–ухода зарядов пока не дают уверенности в окончательном правильном балансе.

Но и это не все. Напряженность геоэлектрического поля вовсе не направлена перпендикулярно к поверхности Земли, как тому следовало бы быть согласно описываемой модели. У этой напряженности есть и горизонтальная составляющая, она изменяется с полусуточным периодом, и лишь в среднем за сутки она равна нулю\*.

Но и этим не ограничиваются минусы «грозовой модели». Упомянем хотя бы еще о двух.

Напряженность электрического поля имеет постоянную (т. е. не зависящую ни от времени, ни от положения точки наблюдения) вертикальную часть, но наряду с ней у вертикальной составляющей есть и переменные части. Их временной ход и географическое распределение также не находят в этой модели четкого объяснения. Вызывает затруднение и объяснение годового хода геоэлектрического поля. Его напряженность проходит в северном полушарии через максимум в зимние месяцы, когда расстояние от Земли до Солнца минимально.

Наконец, еще одно. Вполне очевидно, что обсуждаемая модель заведомо «не работает», если речь идет о небесных телах, лишенных атмосферы, к примеру на Луне. Однако, хотя никому еще не довелось измерять непосредственно там напряженность электрического поля (а такие возможности, как мы знаем, были), имеются косвенные указания на наличие там электрического поля, причем превосходящего земное по напряженности примерно на порядок. Эти указания основываются на исследовании поляризации солнечного света, отраженного от различных участков поверхности Луны.

Появление полевой концепции в теории электромагнетизма, утвердившейся, в первую очередь, благодаря трудам Фарадея

---

\* Вдоль поверхности Земли текут так называемые теллурические токи, которые давно и успешно используются, для электроразведки; но они, а значит, и связанные с ними электрические поля, направлены горизонтально, а поскольку при переходе через границу раздела сред (конкретно, границу земля–воздух) напряженность электрического поля не меняется, то горизонтальная составляющая напряженности поля с необходимостью должна существовать и над поверхностью Земли.

и Максвелла, ознаменовало новый этап в физическом миропонимании. Изменилась даже терминология: теперь чаще стали говорить именно об электрическом и магнитном поле Земли, делая упор на слово «поле». Но от этого проблемы не стали проще, более того, к началу XIX в. стало очевидно, что от старых решений этих проблем приходится отказаться (особенно очевидной неотвратимость такого отказа выявилась в проблеме геомагнетизма), а новых решений пока не было. Впрочем, они довольно быстро начали предлагаться.



## 12. Гипотеза САЗЕРЛЕНДА

Пожалуй, хронологически первой стала «гипотеза разделения зарядов», выдвинутая молодым тогда теоретиком Сазерлендом, приехавшим в Англию из Австралии. Гипотеза выглядела так: благодаря гравитации Земли в ее недрах происходит перераспределение зарядов; электроны вытесняются из глубинных областей планеты к ее поверхности, которая оказывается, таким образом, заряженной отрицательно, тогда как в центральной части появляется избыточный положительный заряд (вся планета предполагается электронейтральной, т. е. ее полный заряд, согласно Сазерленду, — нулевой).

Но Земля (как и все другие планеты и звезды) вращается и, стало быть, вместе с ней вращаются и перераспределившиеся заряды. Вращающийся же заряд есть круговой ток, а он порождает магнитное поле. Вот он — новый механизм, предлагаемый для объяснения магнетизма небесных тел!

Приходится сказать, что гипотеза Сазерленда встретила весьма прохладный прием. И тому было несколько причин. Во-первых, само разделение зарядов не получало сколько-нибудь убедительного физического объяснения. Во-вторых (и это можно назвать главным), эта гипотеза не имела надежных экспериментальных оснований.

Против нее выдвигалось и такое возражение: даже если в Земле происходит разделение зарядов и они вращаются вместе с Землей, то ведь вместе вращается и находящийся на Земле наблюдатель; стало быть, по отношению к нему заряды покоятся, а покоящийся заряд, как известно даже школьнику, магнитного поля не порождает ...

В этом «опровержении» упущено главное: заряд не создает магнитного поля только в том случае, если и он, и наблюдатель покоятся относительно так называемой инерциальной,

т. е. не имеющей ускорения системы отсчета, каковой связанная с вращающейся Землей система отсчета не является. В том, что покоящийся во вращающейся системе заряд магнитное поле создает, можно убедиться хотя бы на простом опыте. Если положить на вращающийся табурет (часто его называют «скамьей Жуковского») заряженный металлический обруч, а в центре обруча поместить магнитную стрелку, то легко заметить, что на стрелку действует магнитное поле, стремящееся ориентировать ее вертикально. При этом, заметьте, и заряды на обруче, и стрелка друг относительно друга покоятся.

Настоятельно нужен был эксперимент, и за его проведение взялся Петр Николаевич Лебедев.

Выдающийся русский физик-экспериментатор, первым подтвердивший на опыте вывод Максвелла о наличии светового давления, Петр Николаевич Лебедев родился в Москве 8 марта 1866 г. Увлечен физикой еще в юношеские годы, но доступ в университет для него как выпускника реального училища, а не гимназии, был закрыт. Поэтому он поступил в Московское высшее техническое училище. Впоследствии П. Н. Лебедев говорил, что знакомство с техникой оказалось очень полезным при конструировании экспериментальных установок.

В 1887 г., не закончив технического училища, П. Н. Лебедев направился в Германию, в лабораторию известного физика А. Кундта. Лебедев вначале работал в Страсбурге, а затем в Берлине. В 1891 г., написав диссертацию «Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссо-Клаузиуса», он сдал экзамен на первую ученую степень.

По возвращении в Россию П. Н. Лебедев получил в Московском университете место ассистента в лаборатории профессора А. Г. Столетова.

Цикл выполненных у Кундта работ вошел в представленную П. Н. Лебедевым в 1900 г. магистерскую диссертацию «О пондеромоторном действии волн на резонаторы», за которую ему сразу (случай исключительный!) была присуждена степень доктора физики. Вскоре Лебедев был утвержден профессором Московского университета.

Не без некоторого противодействия со стороны отдельных коллег П. Н. Лебедев начинает активно проводить экспериментальную работу. К тому времени он уже успел приобрести опыт и был известен как один из первых исследователей, опирающихся на теорию Максвелла. Еще в 1995 г. он создал установку для

генерирования и приема электромагнитного излучения с длиной волны в 6 и 4 мм, исследовал отражение, преломление, поляризацию, интерференцию и др.

В 1899 г. П. Н. Лебедев при помощи виртуозных, хотя и выполненных скромными средствами опытов подтвердил теоретическое предсказание Максвелла о давлении света на твердые тела, а в 1907 г. — и на газы. Это явилась важной вехой в науке об электромагнитных явлениях. Одному из видных физиков того времени У. Томсону (лорду Кельвину) принадлежат слова: «Я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот < ... > Лебедев заставил меня сдать перед его опытами».

Изучение давления света на газы побудило П. Н. Лебедева заинтересоваться происхождением хвостов комет.

Не ограничиваясь научно-исследовательской деятельностью, Лебедев уделял много сил созданию научной школы, которая существует до наших дней. К 1905 г. в лаборатории уже было около двадцати молодых его учеников, которым суждено было сыграть видную роль в развитии физики в России. Из них уместно назвать, в первую очередь, П. П. Лазарева (1878–1942), который начал работать с Лебедевым в 1905 г. и вскоре стал его ассистентом и ближайшим помощником. После смерти П. Н. Лебедева Лазарев стал руководителем его лаборатории, а в 1916 г. — директором первого Научно-исследовательского института физики в Москве, из которого вышли такие ученые как С. И. Вавилов, Г. А. Гамбурцев, А. Л. Минц, А. П. Ребиндер, В. В. Шулейкин, Э. В. Шпольский. Именем П. Н. Лебедева назван Физический институт Академии наук.

Эксперименты Лебедева требовали применения тщательно продуманной, порой довольно сложной механики. Это иногда порождало нелепые упреки, что у Лебедева «наука сведена до уровня техники». Уместно заметить, что сам П. Н. Лебедев считал заслуживающими самого серьезного внимания вопросы связи науки с техникой.

Последний цикл исследований Лебедева незаслуженно недооценен и поныне. Эти исследования имели целью проверку гипотезы Сазерленда.

Поняв, что центробежные силы должны, как и гравитационные, вызывать перераспределение зарядов, П. Н. Лебедев выдвинул простую, но, как всегда, блестяще остроумную идею: в лаборатории невозможно воспроизвести ту гравитационную си-

туацию, которая существует в планетах, но центробежные силы должны вызывать действие, подобное действию сил тяготения. Поэтому при быстром вращении электрически нейтральных тел должно возникать, если верна гипотеза Сазерленда, магнитное поле. Именно такое «намагничивание вращением» и пытался Лебедев обнаружить на опыте.

Нужно заметить, что работа проходила в очень трудных условиях. В 1911 г. П. Н. Лебедев вместе с другими прогрессивными преподавателями принял решение, в знак протеста против реакционных действий министра Кассо, оставить Московский университет, и очень тонкий опыт, который он проводил в подвале физического факультета, был в известной мере скомкан.

Искомое эффекта обнаружить не удалось ни самому Лебедеву, ни американским экспериментаторам Сванну и Лангакру, повторившим в 1928 г. его попытку. Лишь в 1984 г. дубнинский физик Б. В. Васильев, в распоряжении которого уже была экспериментальная техника значительно более высокого уровня — сверхпроводящие экраны и сквиды (квантовые магнетометры), смог заметить, да и то лишь «признаки» этого эффекта.

Как теперь стало понятно, причина отрицательных результатов опытов Лебедева заключалась не в отсутствии эффекта, по крайней мере в условиях лабораторного эксперимента, а в недостаточной чувствительности установки: те оценки для магнитных полей, на которые он ориентировался и которые основывались на работах Сазерленда, оказались значительно завышенными.

В Городском университете имени Шанявского, где на частные средства П. Н. Лебедев создал новую физическую лабораторию, продолжить исследования он уже не успел. У него было большое сердце, и однажды, когда он, еще сравнительно молодым, греб на лодке, оно вдруг остановилось. Тогда удалось вернуть Петра Николаевича к жизни, но прожил он всего 48 лет.

Отрицательные результаты опытов Лебедева еще более усилили скептицизм по отношению к гипотезе Сазерленда, которая отошла на второй план, а потом и попросту почти забылась. В немалой степени этому способствовало и появление новой идеи, направленное на разрешение проблемы магнетизма космических тел. Выдвинутая английским теоретиком Джозефом Лармором, она вошла в науку как идея «гидромагнитного динамо».

### *13. Динамо-механизм*

В отличие от Сазерленда, Лармор не выдвигал каких-то гипотез. Он опирался на надежнейший фундамент — на законы классической электродинамики Фарадея и Максвелла. Или даже конкретнее, — на закон электромагнитной индукции Фарадея.

Классические опыты Фарадея по электромагнитной индукции может теперь повторить школьник. Если, например, внутрь проволочной катушки, подсоединенной к гальванометру, вдвигать постоянный магнит (или, наоборот, выдвигать его) то прибор регистрирует ток. Можно породить ток в катушке (физики любят говорить «в витке») и по-другому, но общим для всех вариантов остается то, что магнитное поле, в котором находится виток, должно быть переменным. Или, точнее, переменным должен быть поток индукции магнитного поля через площадку, ограниченную витком. Впрочем, об этом уже кратко говорилось выше.

Здесь мы снова сталкиваемся со словом «поток» явно из арсенала механики. И действительно, оно пришло в физику, когда началось описание движений в жидкостях. Тогда речь шла о поле скоростей, т. е. о распределении скоростей. Зная его, можно вычислить потоки в жидкости, т. е. подсчитать, сколько жидкости протекает через любую площадку, которую можно выбрать в ней.

Понятие «поток» вскоре было перенесено и на любые поля, где на месте вектора скорости фигурирует и любой другой вектор, не имеющий ничего общего с движением вещества. Так, распределение магнитного поля в пространстве описывается «вектором индукции», указывающем силу, с которой магнитное поле воздействует на электрический ток.

Поток вектора магнитной индукции через площадку, ограниченную любым выбранным контуром в проводнике, может меняться по разным причинам: из-за изменения магнитного поля, из-за изменения формы и размеров контура, т. е. перемещением связанных с ним частиц проводника, с изменением физических параметров, определяющих его состояние, например давление и температуру, и т. д. Но какими бы ни были причины изменения потока индукции, они порождают электрический ток в контуре, а поскольку ток создает магнитное поле, движение «жидких контуров» в проводниках вызывает и появление дополнительных магнитных полей. Это действительно имеет прямое отношение к работе динамо-машин: движение проводников в магнитных полях таких машин порождает токи, которые, в свою очередь, являются источниками усиления магнитных полей. Об этом можно говорить как о переходе кинетической энергии проводящего вещества в энергию магнитного поля.

Движения проводящего вещества в недрах планет и звезд благодаря такому «эффекту динамо» и рассматривается, согласно идее Лармора, как физическая причина создания (точнее, усиления) магнитных полей в планетах и звездах.

Правда, чтобы «механизм динамо» работал, должно существовать некое «затравочное», допускающее дальнейшее усиление магнитное поле, но причины его существования нетрудно изыскать (например, флуктуации).

Идеи Лармора и «динамо-механизм» надолго заняли лидирующее положение в умах физиков, занимающихся проблемами магнетизма небесных тел. Так, в книге известных геофизиков В. Н. Жаркова и В. П. Трубицина «Физика планетных недр», изданной в 1980 г., утверждается: «В настоящее время не вызывает сомнений, что тепловая или гравитационная конвекция в земном ядре является именно той причиной, которая вызывает появление геомагнитного поля».

Еще одна цитата: в статье одного из выдающихся наших теоретиков, Я. Б. Зельдовича, опубликованной им совместно с Ф. Ф. Рузмайкиным в 1982 г., сказано: «По нашему убеждению, главные проблемы земного, солнечного и галактического магнетизма, могут быть решены только с помощью теории динамо». Это красноречивое и категоричное высказывание отражает не претерпевшие изменений и поныне уמוнастроения.

Конечно, теория динамо дала немало. Но нельзя не отметить и такой момент: для нахождения (теоретического предсказания!)

магнитного поля небесных тел, нужно располагать знаниями о движениях вещества в его недрах. Как правило, такие знания отсутствуют, и тогда картину этих движений приходится более или менее правдоподобно постулировать — так возникают «модели кинематического динамо», которыми обычно дело и исчерпывается. Понятно, что «каково сырье, таков и продукт», так что степень надежности предсказаний зависит от правдоподобности исходных допущений. Об этом можно сказать и так: модель динамо не способна «давать числа», т. е., например, однозначно «из первых принципов» предсказывать количественно значения магнитных моментов планет и звезд.

Было бы, однако, неправильно недооценивать теорию динамо. Без нее ряд наблюдаемых явлений не получили бы (если и не количественного, то хотя бы и качественного) истолкования. Это, в первую очередь, относится к зависимости магнитных полей небесных тел от времени. На Солнце, например, где внутренние движения весьма бурны, как показывают наблюдения, это поле быстро и прихотливо изменяется. Изменения есть и на Земле, хотя масштаб и темп вариаций здесь значительно ниже (впрочем, по палеомагнитным данным, магнитное поле Земли испытывало не только вариации, но даже и инверсии, т. е. изменение полярности). Нельзя не согласиться, что эффекты динамо действительно определяют заметную долю магнетизма небесных тел. Но какую?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно обсудить, есть ли другие варианты объяснения магнетизма этих тел.



## 14. Бароэлектрическое перераспределение зарядов

Основной из таких альтернативных вариантов можно указать. Впрочем, это уже было сделано выше — это все тот же вариант Сазерленда, но только в радикально измененном виде.

Что было самым уязвимым пунктом гипотезы Сазерленда? Физические причины перераспределения зарядов и, тем более, его количественный масштаб оставались невыясненными. А это главное, и нужно заново обратиться к рассмотрению этих вопросов.

Почти через 60 лет после того, как Сазерленд выступил с гипотезой о разделении зарядов в недрах планет и звезд под действием гравитации, к вопросу о действии сил тяготения на распределение зарядов в веществе снова проявился интерес, хотя и по другому поводу.

В печати появилось несколько публикаций, посвященных этим проблемам, в том числе статья с обсуждением несколько неожиданной задачи об «электроне, свободно падающем в железной трубе». Получил даже известность новый термин «поле Бархилла–Шиффа». В статье этих двух авторов обсуждалось, какая сила компенсирует воздействие гравитационного поля на находящийся в нем атом, не давая ему падать.

При обсуждении этого вопроса, можно решиться на нарушение традиции популярного изложения и привлечь простейшие формулы.

На ядро атома действует гравитационная сила  $Mg$ , где  $M$  — масса ядра, а  $g$  — ускорение свободного падения. Под действием этой силы ядро смещается по отношению к центру атома, и это смещение прекращается, когда гравитационная сила уравновешивается действием электрической силы  $eE$  ( $e$  — заряд ядра,

$E$  — величина напряженности порождаемого электронами атома электрического поля, уравновешивающего гравитацию). Условие равновесия приводит к равенству  $E = Mg/e$ . Подставляя для численной оценки  $M \approx 10^{-23}$ ,  $g \approx 10^3$  (для Земли),  $e \approx 10^{-8}$  (все значения величин указаны в гауссовых единицах), получаем оценку  $E \approx 10^{-12}$ , или, в технических единицах, примерно одну стомиллионную долю В/м.

Это ничтожно малая напряженность (она, в частности, в миллиарды раз меньше напряженности поля ясно погоды), и поэтому естественно мнение, что такое ничтожно слабое поле можно считать несущественным.

Однако, если вдуматься, эта оценка ничего не дает для ответа на интересующий нас вопрос о перераспределении зарядов хотя бы уже потому, что она не учитывает роли неоднородности гравитации, т. е. ее изменения от точки к точке, а эта неоднородность играет ключевую роль, как мы постараемся показать ниже. Более того, эта оценка вообще относится не к тому электрическому полю, которое нас интересует. Поясним это подробнее.

Если не вникать в детали, устройство атома, как известно, таково: положительно заряженное ядро находится в центре отрицательного электронного облака. Если ядро смещается под действием гравитационной силы, на него начинает действовать обсуждавшаяся выше барнхилл-шиффовская сила со стороны создаваемого этим электронным облаком электрического поля.

Порождаемое электронами атома внутриатомное электрическое поле существует и в «невозмущенном» атоме, т. е. при отсутствии смещения ядра, и его напряженность различается (и по величине, и по направлению) в различных точках внутри атома, обращаясь в нуль в его центре, где находилось бы несмещенное ядро. Нулю равняется и среднее значение вектора напряженности поля в таком атоме, а если он сферически симметричен, то поле отсутствует и во внешней области.

Когда под действием гравитации ядро несколько смещается, атом приобретает электрический дипольный момент: центры распределения положительных и отрицательных зарядов в нем не совпадают (впрочем, есть много атомов и молекул, у которых «отродясь», даже без воздействия гравитации есть такой момент). Если на атом-диполь действует электрическое поле, оно может уравновесить действие гравитации. Казалось бы, мы сно-

ва вернулись к идеям Барнхилла и Шиффа, но только теперь мы должны обсуждать силу, действующую не на ядро, а на атом в целом, и должны рассматривать не внутриатомное электрическое поле, а какое-то «иное» электрическое поле, порождаемое перестройкой электронов не во внутриатомных, а в макроскопических масштабах. При этом существенно, что распределение давлений должно быть макроскопически неоднородно, так как только при этом условии может появиться макроскопическая неоднородность плотности перераспределившихся зарядов (повторим еще раз, что и в этом проявляется отличие от барнхилл-шиффовского поля).

Широко распространено ошибочное мнение, что никаких «бароэлектрических» (порождаемых перепадами давлений) и возникающих из-за неоднородностей плотности электрических полей в природе вообще не существует. Этому противоречит как теория, так, естественно, и опыт. Так, «потенциал наклепа» давно обнаружен экспериментально.

Бароэлектрическое поле, порождаемое перепадами давлений, можно назвать родственным термоэлектрическому, но только если последнее вызывается зависимостью энергии электронов в проводнике от температуры, то бароэлектрическое — от давления.

Электроны не вылетают из проводника по понятной причине: если заряженный отрицательно электрон покинет проводник, последний приобретает положительный заряд, а разноименные заряды притягиваются. Чтобы преодолеть это притяжение, требуется работа по преодолению «потенциального барьера» — работа выхода. Для различных проводников она различна. Например, для цинка она меньше, чем для меди. Поэтому, если привести в соприкосновение брусок меди с бруском цинка, части электронов из последнего энергетически выгодно перейти в медь, в результате чего возникает разность потенциалов между двумя металлами, которая и называется *контактной*.

Но даже если проводник химически однороден, т. е. работа выхода из всех его участков одинакова, но их температуры различны, также происходит перегруппировка электронов: их энергии в более горячих участках выше, чем в холодных, и потому большее их число может преодолеть потенциальный барьер.

Благодаря такой перегруппировке и появляется термоэлектрическое поле. Не только температуры проводника определяют энергии электронов в нем, но также и давления. При сжатии про-

водника эти энергии увеличиваются, и поэтому большее число электронов может преодолевать потенциальный барьер, что, как и в случае неоднородности температур, приводит к перегруппировке электронов в неоднородно напряженном веществе и к созданию электрического поля, только теперь это поле естественно называть «бароэлектрическим».

Таким образом, гипотезу Сазерленда следует уточнить в одном пункте: перераспределение зарядов в проводнике, в частности в недрах планет и звезд, возникает не непосредственно из-за действия гравитации, а благодаря порождаемым ею перепадам давлений.

Вполне очевидно, что бароэлектрическое поле порождается именно лишь при наличии перепадов давления, если же давления всюду одинаковы, поле не возникает (даже в этом его отличие от поля Барнхилла–Шиффа).

Весьма важно подчеркнуть, что бароэлектрические разности потенциалов, как и контактные, относятся к полям, которые называют «безваттными», т. е. не способными совершать работу, передавать энергию зарядам. Это имеет прямое отношение к знаменитому «правилу Вольты»: в любой электрической цепи, составленной из каких угодно элементов, создание постоянного тока за счет одних лишь контактных разностей потенциалов невозможно. Это является одним из следствий закона сохранения энергии: ведь ток, если бы он возникал, без конца нагревал бы проводник, на что тратилась бы энергия, хотя источники ее производства отсутствуют.

Порождаемое неоднородностью давлений перераспределение зарядов вызывает появление электрического поля (их естественно называть бароэлектрическими), не исчезающего и при равновесии. Для их поддержания не требуется затрат энергии.

Во вращающихся планетах и звездах, эти перераспределившиеся заряды также вовлекаются во вращение, что порождает магнитные поля (их также естественно называть баромагнитными), для поддержания которых не требуется работы (в отличие от тех магнитных полей, которые создаются за счет эффекта динамо; будем впредь для краткости называть их «динамо-полями»).

В планетах и, особенно, в звездах имеются значительные перепады температур, что также вызывает перераспределение электронов и это, благодаря вращению этих тел, также дает «термодобавки» к их магнитным полям, но, как показывают

оценки, настолько небольшие, что иногда можно вообще пренебрегать температурными эффектами.

В реальных планетах и звездах динамо- и баромагнитные поля складываются, и одна из главных задач теории состоит в том, чтобы оценить величину этих вкладов. Эта задача вовсе не проста: хотя оценки для баромагнитной части полей получаются достаточно надежно, по указанной выше причине для динамо-генерации это более затруднительно. Но если использовать полученные из наблюдений эмпирические значения для магнитных моментов, можно оценить долю этих вкладов.

Для теоретического описания бароэлектрических полей предложены различные, хотя и приводящие к близким результатам, методы. Если распределение давлений стационарно, т. е. не меняется со временем, то стационарно и бароэлектрическое поле, и для его исследования удобнее всего опереться на наиболее общее термодинамическое условие равновесия — условие постоянства величины, именуемой электрохимическим потенциалом. Не останавливаясь на детальном объяснении этого термина, ограничимся утверждением, что это условие равновесия эквивалентно требованию, что полная «избыточная» энергия, приходящаяся на единицу объема, всюду должна быть одинаковой. Термин «полная избыточная энергия» обозначает работу, которую необходимо совершить, чтобы единицу объема вещества (при постоянной, пусть даже нулевой температуре) сжать до давления  $p$ . Часть этой работы тратится и на энергию образующегося бароэлектрического поля.

\*  
⎵

## *15. Простейшие модели*

Первым делом обратимся к простейшей модели планет как химически однородных массивных холодных шаров, вращающихся как единое целое с постоянной угловой скоростью и не испытывающих внешних воздействий. Полный заряд планеты предполагается равным нулю.

Понятно, что такая модель достаточно далека от реальных планет, которые не являются ни химически однородными, ни холодными, испытывают внешние воздействия и не вращаются как единое целое, так как в недрах многих из них есть конвекционные потоки. Попытаемся все же оправдать выбор такой модели.

Пункт, касающийся химической однородности: конечно, химический состав планет существует, когда речь идет об оценке внутрипланетных электрических полей, так как их напряженности чувствительны и к химическим неоднородностям — мы имеем в виду и вклад упоминавшихся выше контактных полей; но эти вклады малы по сравнению с тем, что мы будем в дальнейшем называть главными бароэлектрическими полями, т. е. этими малыми вкладами можно пренебречь, как и вкладом термоэлектрических полей, что оправдывает пренебрежение температурными эффектами.

Принимая модель планеты-шара, мы отказываемся от учета ряда факторов, которые могут влиять на бароэлектрическое поле. К их числу относится рельеф поверхности. Горные массивы и глубокие впадины на поверхности Земли должны, казалось бы, отразиться на распределении давлений в планете, а значит, и на бароэлектрическом перераспределении зарядов и полей.

Но тщательное экспериментальное исследование гравитационного поля Земли (и центробежных добавок, обусловленных ее вращением) обнаруживает удивительное сходство с тем, что было бы, если бы Земля была жидкой и равновесной. Это известно

как явление *изостазии*. Оно обусловлено тем, что твердая кора, состоящая из гранита и базальта, изостатически уравновешена («плавает») на более тяжелой мантии. Этим и объясняется довольно слабое (хотя все же существующее) влияние рельефа на распределение электрического и магнитного полей. Упомянем и еще об одном явлении: замечено, что магнитное поле несколько меняется в окрестностях больших водоемов в процессе их затопления.

Что касается образа планеты как вращающегося как единое целое шара, то этот образ исключает из рассмотрения все эффекты динамо, что позволяет в чистом виде выделить все поля, которые имеют бароэлектрическую природу.

Давление максимально в центре такой планеты, и оно монотонно убывает по мере приближения к ее поверхности.

Будем называть «главным» то бароэлектрическое поле, которое своим появлением обязано перепадам давлений, возникающих благодаря действию собственно гравитационного поля планет, простейшая модель которых была описана выше.

Естественно, главные бароэлектрические поля стационарны. В центре планет они имеют нулевую напряженность (что очевидно даже из соображений симметрии: вектор напряженности некуда направить, так как все направления в центре равноправны), а во всех остальных точках вектор напряженности направлен радиально, а ее величина монотонно растет, достигая максимума у поверхности планеты. При этом максимальная величина напряженности, как показывает теория, получается, на первый взгляд, неправдоподобно высокой. Так, вблизи поверхности Земли она приближается к значениям, всего лишь на пару порядков уступающим типичным внутриатомным.

Первая реакция на такой вывод: «Не может быть!» Не может быть, чтобы почти непосредственно у нас под ногами было такое значительное поле, а мы его не замечали!

Впрочем, а по каким признакам мы могли бы его заметить?

Ответ, казалось бы, напрашивается. Ведь любой школьник узнает на уроках физики о законе Ома: если в проводнике имеется электрическое поле, оно порождает ток, а если напряженности полей так велики, то и токи порождаемые ими, должны быть огромной силы. Это должно было бы вызывать мощное джоулево нагревание, а оно не наблюдается.

Но в том-то и дело что не любое электрическое поле порождает ток! Выше уже говорилось, что, подобно контактному,

бароэлектрическое поле является безваттным, т. е. оно не вызывает тока, на него не распространяется закон Ома, его энергия не может передаваться заряженным частицам, увеличивая их кинетическую энергию.

Уместно продолжить сравнение с контактными полями. Опять вернемся к примеру с приведенными в соприкосновение брусками, цинковым и медным. Как уже говорилось, из-за различия работ выхода электронов из меди и цинка некоторая часть из них перейдет из цинка в медь, и возникнет контактная разность потенциалов, т. е. электрическое поле. Но при этом в толще как цинкового, так и медного бруска (если они однородны) поля не будет — в основном поле сосредоточится в весьма тонком (его толщина соизмерима с межатомными расстояниями) переходном слое. Но и там при равновесии токов нет.

Но только при равновесии! Если равновесие (за счет действия каких-то внешних сил) нарушится, токи появятся. На этом основан изящный метод, предложенный Кельвином для измерения контактных разностей потенциалов. Идея этого метода такова: пусть имеется конденсатор, пластины которого изготовлены из разных металлов, к примеру из тех же цинка и меди. Если соединить пластины проводом и замкнуть цепь на гальванометр, то, согласно правилу Вольты, тока этот гальванометр не покажет. Но если изменять расстояние между пластинами (а это потребует затрат энергии, так как после перехода части электронов из цинка в медь пластины уже оказываются заряженными, и между ними возникает кулоновское взаимодействие), из-за нарушения равновесия появится ток, и по его величине можно вычислить контактную разность потенциалов.

Нечто похожее может происходить и в Земле: пока равновесие не нарушается и распределение давлений остается неизменным, бароэлектрические поля не порождают токов. Но если оно изменяется (а причин для этого множество — от сейсмических событий до внешних нестационарных воздействий и даже до растворения солей или, если в месторождении существуют радиоактивные вещества, — до их распадов), токи могут возникать, и их можно зарегистрировать.

Вот для начала один пример, может быть, не самый яркий, но во всяком случае небезынтесный.

Геологи называют погребенными не имеющие выходов к поверхности Земли компактные месторождения золота, меди и т. п. Хотя и медленно, они изменяются, в основном из-за процессов

растворения. Появляющиеся при этом положительные ионы металлов благодаря нестационарности могут получать энергию от бароэлектрического поля и выталкиваться им из Земли. Дальнейшая их участь определяется еще одним полем — электрическим полем ясной погоды, в конечном итоге заставляющим их возвращаться на Землю; регистрация таких ионов над Землей может позволить обнаружить погребенные месторождения.

Но вернемся к количественным оценкам напряженностей равновесных бароэлектрических полей. Здесь разработаны различные теоретические методы, которые, хотя и являются приближенными, но приводят (во всяком случае, с точностью до порядка величин) к близким результатам.

Наиболее общим является метод, основанный на использовании термодинамического условия равновесия — условия постоянства электрохимического потенциала. Придерживаясь традиций популярного изложения, уместно воздержаться от подробного объяснения, что это за величина, тем более, что результативно указанное условие сводится к тому, что при равновесии плотность полной избыточной энергии должна быть во всех точках среды одинаковой\*.

Наглядное физическое истолкование этого условия таково: при увеличении давления (а это требует затраты работы) и если температура поддерживается постоянной, так как энергия теплового движения не меняется, то почти вся избыточная энергия приходится на долю электронов (что подтверждается расчетами, очевидным образом вытекает из квантового соотношения неопределенностей Гейзенберга, но, впрочем, непосредственно видно из опыта).

«Почти» — потому что получившие дополнительную энергию электроны в большем количестве преодолевают потенциальный барьер, и это вызывает перераспределение электронов — переходы их из более сжатых областей в области, где давления сравнительно меньше. Как видите, здесь просматривается сходство с термоэлектричеством. Перераспределение же электронов порождает электрическое поле, а на его долю также должна приходиться какая-то энергия.

---

\* Плотностью полной избыточной энергии называется работа, которую нужно произвести, чтобы сжать единицу объема вещества до давления  $p$ , плюс энергия возникающего в этом объеме бароэлектрического поля.

---

Применение условия постоянства электрохимического потенциала к задаче о главном бароэлектрическом поле приводит к следующим результатам.

**Напряженность главного бароэлектрического поля направлена радиально, по мере увеличения расстояния от центра ее величина растет почти по линейному закону (т. е. прямо пропорционально этому расстоянию) и, достигнув максимального (зависящего от давления в центре планеты) значения у ее поверхности, скачком обращается в нуль за ее пределами, а по самой этой поверхности распределяется отрицательный поверхностный заряд.**

\*  
⎵

## 16. Главные баромагнитные поля

После того, как найдена напряженность главного бароэлектрического поля, нетрудно вернуться к обсуждению вопроса о распределении порождающих его зарядов. Как уже было отмечено выше, в толще планеты напряженность этого поля направлена по радиусу, а ее величина растет с увеличением расстояния от центра  $r$  пропорционально  $r$ , и лишь вблизи поверхности рост делается более медленным. Это соответствует тому, что объемная плотность заряда положительна и почти постоянна, а полный объемный заряд, по модулю такой же, как поверхностный, отличается от него знаком, так что полный заряд планеты равен нулю.

Таким образом, одна из основных проблем, с которой сталкивалась гипотеза Сазерленда, — почему происходит перераспределение зарядов в планетах — находит разрешение. Причина лежит не непосредственно в действии гравитационного поля, а в вызываемых этим действием перепадах давлений. Уместно подчеркнуть, что если неоднородности давлений вызываются не тяготением, а любыми другими физическими причинами, это также должно вызывать бароэлектрические поля.

Вращение планет вместе с перераспределившимися в них зарядами — иначе говоря, круговые токи — порождают магнитное поле, которое уместно называть баромагнитным. Это, напомним, и составляло основу гипотезы Сазерленда.

Возникающий при движении заряда по окружности магнитный момент прямо пропорционален произведению радиуса этой окружности на частоту вращения и направлен вдоль оси вращения. Поэтому вклад в магнитный момент от вращения поверхностных (отрицательных) зарядов перевешивает вклад объемных (положительных) зарядов, и полный магнитный момент

оказывается направленным противоположно механическому вращательному моменту. Что же касается величины баромагнитного момента, то она оказывается пропорциональной величине механического момента, причем коэффициент пропорциональности выражается через «мировые константы», т. е. он одинаков для всех небесных тел. Это утверждение известно как «правило Блеккетта», оно основано на эмпирических данных и долгое время не находило теоретического истолкования. Впрочем, это правило оправдывается лишь приближенно, да и не всегда, что вполне естественно, так как магнитные поля небесных тел имеют не одну лишь бароэлектрическую природу, но также и часть, обязанную динамо-механизму.

В качестве иллюстрации приведем несколько примеров: для различных небесных тел радиусов  $R$ , массы  $M$  и угловых скоростей  $\omega$ , указываются расчетные значения баромагнитных моментов  $m^t$  и их эмпирические значения  $m^0$  (все величины указываются в абсолютных гауссовых единицах).

Таблица 1

Объект	$R$	$M$	$\omega$	$m^0$	$m^t$
Меркурий	$2,4 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^{26}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$10^{21}$	$10^{22}$
Венера	$6,1 \cdot 10^8$	$4,9 \cdot 10^{27}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{21}$	$5 \cdot 10^{21}$
Земля	$6,4 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{28}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{25}$	$2 \cdot 10^{25}$
Луна	$1,4 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^{26}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$10^{20}$	$10^{20}$
Марс	$3,4 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^{25}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$10^{22}$	$10^{23}$
Юпитер	$1 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^{30}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$10^{30}$	$2 \cdot 10^{30}$
Сатурн	$6 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^{29}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{29}$	$4 \cdot 10^{29}$
Уран	$2,5 \cdot 10^9$	$8,7 \cdot 10^{28}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$10^{28}$	$10^{29}$
Нептун	$2,5 \cdot 10^9$	$10^{27}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$10^{28}$	$4 \cdot 10^{29}$
Плутон	$3,2 \cdot 10^8$	$10^{27}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	?	$10^{23}$

Как показывают приведенные данные, значения баромагнитных моментов довольно близкими к эмпирическим. И это при том, что разброс величин параметров планет отнюдь не мал. Так, масса Юпитера примерно в 30 000 раз больше, чем у Луны, их радиусы различаются почти на два порядка и т. д.

Но значение этой близости нельзя преувеличивать, усматривая в нем основание переоценивать роль баромагнетизма. Так, для планет-гигантов, например для Юпитера, абсолютные значения бароэлектрических и наблюдаемых магнитных моментов

получаются довольно близкими, но не нужно забывать, что магнитное поле этой планеты находится в инверсии, т. е. ее магнитный момент направлен примерно так же, как и механический, тогда как обсуждаемая нами модель диктует антипараллельность этих моментов.

Было бы, разумеется, неправильным ожидать, что роль баромагнетизма окажется всегда заметнее, чем эффекта динамо. Особенно отчетливо это проявляется в звездах. Так, магнитное поле Солнца вовсе и не выглядит похожим на поле магнитного диполя, и лишь переходя от рассмотрения мгновенной картины распределения магнитного поля (а она определяется, в основном, именно мгновенным распределением бурных внутризвездных потоков, т. е. связана с механизмом динамо) к усредненной по достаточно большому промежутку времени, удается выявить в ней черты дипольности.

Но и в планетах у магнитного поля есть черты, явно связанные именно с динамо-эффектами. Это, в первую очередь, относится к вариациям, т. е. изменениям магнитных полей, в том числе к вариациям, называемым вековыми. Так, магнитное поле Земли испытывало (и продолжает испытывать), хотя и медленные, но отнюдь не малые изменения. Это удалось установить благодаря появлению и развитию палеомагнетизма. Так называется раздел геофизики, возникший довольно недавно, посвященный проблеме изменения магнитного поля Земли за геологические промежутки времени.

Казалось бы, как можно узнать, каким было магнитное поле Земли миллионы лет назад? Но это возможно. Дело в том, что, например, потоки раскаленной лавы, извергающейся из вулканов (вспомним опять о точке Кюри), остывая в магнитном поле Земли, «запоминают», каким было это поле — это определяет направление намагничивания лавы после ее остывания. Есть и другие важные для палеомагнитологов эффекты. Так, дно океанов нередко покрывают осадочные породы. Частицы веществ испытывали воздействие имевшегося во время осаждения магнитного поля, что и отразилось на намагничивании осадочных пород.

Конечно, за долгие тысячелетия происходили значительные геологические перемены, какие-то участки земной коры поднимались и опускались, перемещались и переворачивались, но именно методы палеомагнетизма могут помочь разобраться в этом. И некоторые важнейшие выводы уже получены. Так, осно-

вываясь на палеомагнитных данных геофизики утверждают, что изменялось не только положение магнитных полюсов (их перемещение продолжается и поныне), но даже магнитная полярность Земли. Объяснить эволюцию магнитного поля Земли, привлекая эффекты динамо, представляется затруднительным.

Но и преуменьшать значение бароэлектрических эффектов, приписывая им роль источников лишь несущественных поправок к динамо-полям, было бы неправильно. По-видимому, для планет, особенно планет Земной группы, вклады этих двух основных типов соизмеримы, тогда как в звездах мгновенная «магнитная карта» формируется в заметной мере динамо-процессами, так что оценки для главного баромагнитного поля здесь имеют вспомогательное значение.

\*  
⎵

## *17. Квазиравновесные бароэлектрические поля*

Перейдем к более подробному обсуждению нестационарных бароэлектрических и баромагнитных полей. Это заметно расширяет круг рассматриваемых явлений.

Прежде всего уточним, что нас будут интересовать достаточно медленные процессы, т. е. такие, при которых изменение распределения давлений происходит за значительно большие времена, чем перераспределение зарядов и порождаемых ими полей. Это условие оправдывает перенос и на описание нового круга процессов — их естественно назвать квазистационарными — тех теоретических методов, которые были упомянуты выше.

Изменение распределения давлений в планете может вызываться различными причинами. Некоторые из этих причин связаны с внутрипланетными процессами, в частности с локальными увеличениями напряжений, обуславливающими землетрясения. Нам еще придется об этом вспомнить, когда речь пойдет о прогнозировании сейсмических событий.

Другие изменения можно назвать регулярными. К их числу, в первую очередь, можно отнести те, что связаны с действием приливных сил.

Эти силы вызываются гравитационным воздействием на планету, на Землю например, других небесных тел, в первую очередь ее спутника Луны, а также, хотя и в меньшей мере — Солнца. Первым объяснил физическую природу вызываемых этими воздействиями приливов великий Ньютон. Это объяснение, основанное на открытом им законе всемирного тяготения, его современники сочли даже необходимым отразить в эпитафии на его памятнике.

Гравитационное притяжение между телами, расстояние между которыми значительно превышает их размеры, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Поэтому, например, приливные силы, действующие на Землю со стороны Луны, не только вызывают притяжение между ними, но из-за неоднородности сил, действующих на Землю, они стремятся растянуть нашу планету в направлении прямой, проходящей через центры этих тел, и вызвать ее сжатие в перпендикулярных направлениях.

Эти силы, действующие на какой-то участок планеты, пропорциональны его расстоянию от ее центра и обратно пропорциональны кубу расстояния от тел, тяготение которых их создает.

Приливные воздействия вызывают дополнительные сжатия и растяжения в недрах планет и, соответственно, некоторое дополнительное перераспределение зарядов. Порождаемые этим электрические поля, прибавляющиеся к главным бароэлектрическим полям, можно назвать *приливыми*.

Основная доля приливого поля Земли обязана воздействию со стороны Луны. Конечно, приливное воздействие на Землю оказывает и Солнце, но меньшее примерно в 10 раз. Этим и объясняются годовые периодические изменения поля ясной погоды — в северном полушарии летом, когда Земля находится от Солнца на наибольшем расстоянии, напряженность этого «солнечно-приливого» поля минимальна, что уже отмечалось выше.

Учет приливной силы, действующей на Землю со стороны Луны и Солнца, как то было впервые объяснено Ньютоном, вызывает периодичность морских приливов на Земле. Когда Солнце, Луна и Земля располагаются вдоль одной прямой (в новолуние и полнолуние), суммарная приливая сила достигает максимума, а значит, и приливы бароэлектрические поля делаются наибольшими, а когда на небе видна половина Луны (направления из центра Земли на Солнце и на Луну взаимно перпендикулярны), наступает и «электрический отлив».

Приливы воздействуют нарушают сферическую симметрию, отчего приливное бароэлектрическое поле, в отличие от главного, проникает и в область над поверхностью планеты.

Поскольку ось вращения Земли не направлена на Луну, приливное поле над поверхностью Земли оказывается переменным. Этим, кстати, объясняются и периодические морские приливы,

но только они имеют примерно полусуточный период, тогда как бароэлектрическое поле имеет части, меняющиеся как с суточным, так и с полусуточным периодом.

Но с полусуточным периодом, как то следует из теории, меняется лишь горизонтальная составляющая поля ясной погоды, тогда как у вертикальной его составляющей есть не только переменная, но и постоянная (т. е. не зависящая ни от времени, ни от положения места наблюдения на Земле) часть, направленная вертикально вниз.

Электрическое поле должно быть и у Луны. Его основной причиной является приливное воздействие Земли. Но поскольку масса Земли примерно в сто раз больше массы Луны, то соответственно и максимальная напряженность приливногo поля должна быть над Луной примерно на два порядка выше, чем над Землей. И еще одно: так как Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной, селеноэлектрическое поле должно быть не переменным, а почти постоянным.

Внимательный читатель, конечно, уже заметил, что бароэлектрическое поле над Землей автором настойчиво выдвигается на роль поля ясной погоды. Эта весьма радикальная тенденция требует убедительного оправдания, тем более, что она в корне отличается от распространенного, если не общепринятого «грозового» механизма формирования поля ясной погоды.

Между тем, предсказания двух теорий — имеются в виду грозовой и приливный механизмы — различаются в ряде пунктов, так что остается обсудить, за что «голосует» опыт.

Первый из указанных механизмов (он и хронологически был первым) основан на идее, что по поверхности Земли равномерно (как по поверхности любого проводящего шара) распределен отрицательный заряд, который пополняется благодаря грозам, что компенсирует его стекание из-за проводимости воздуха атмосферы. Напряженность порождаемого зарядом электрического поля направлена вертикально вниз и повсюду была бы одинаковой по величине, если бы не процессы в атмосфере.

Периодические изменения напряженности поля ясной погоды («двойная волна» над континентами и «одинарная» — над океанами) фактически не получают объяснения.

Как нечто самоочевидное, считается, что на планетах, не имеющих атмосферы (в том числе, и на Луне) ничего подобного полю ясной погоды быть не может.

Наконец, недра небесных тел считаются электронейтральными, и не усматривается никакой связи между их электрическими (если они вообще есть) и магнитными полями.

Что же касается выводов, получаемых на основе приливного механизма, то они таковы (для простоты, опять ограничимся учетом лишь одного источника приливного воздействия — Луны).

Над поверхностью Земли напряженность приливного электрического поля имеет как вертикальную, так и горизонтальную часть. Что касается вертикальной составляющей, то она складывается из постоянной и переменной частей. Постоянная (т. е. не зависящая ни от времени, ни от положения точки наблюдения на поверхности Земли) часть имеет величину порядка 100 В/м. Внешне эта часть действительно похожа на то, что было бы, если бы по поверхности Земли был равномерно распределен отрицательный заряд\*. Переменная же часть зависит от координат места наблюдения и имеет доли, изменяющиеся как с суточным (одинарная волна), так и полусуточным (двойная волна) периодом. Ее амплитуда зависит от положения места наблюдения.

Различию периодичностей над континентами и над океанами можно дать наглядное объяснение.

Приливная сила имеет горизонтальную составляющую, под действием которой в океанах возникают горизонтальные потоки жидкости. Поскольку сила меняется довольно медленно (с полусуточным периодом), порождаемые ими потоки жидкости успевают ликвидировать горизонтальные перепады давлений, а значит, и горизонтальные части напряженности бароэлектрического поля. К тому же из-за имевшегося до установления динамического равновесия горизонтального бароэлектрического поля, возникают и ионные электрические токи, что также приводит к ослаблению, а вскоре и к исчезновению горизонтальной компоненты поля.

Остающаяся же вертикальная компонента (при нулевой горизонтальной!) приводит к тому, что заряд распределяется по поверхности океана равномерно, так что напряженность электрического поля над всеми участками океана оказывается одинаковой.

Одинаковой, но не постоянной!

---

\* Вспомним, что грозовой механизм вообще не приводит к определенным, не основанным на дополнительных предположениях об общей величине заряда планеты, оценкам.

Подробнее об этом. Когда речь шла о главном бароэлектрическом поле, полный заряд планеты принимался равным нулю. Это положение сохраняется и когда в рассмотрение включаются приливные силы.

Полный поверхностный заряд оказывается при этом также равным нулю, так что заряд, выстилающий поверхность континентов (а теория позволяет его вычислить), получается по модулю равным, а по знаку противоположным заряду на поверхности океанов. Что же касается модуля этого заряда, то он меняется как раз с периодом в одни сутки, что и объясняет «одинарную волну» над океанами.

Горизонтальная же составляющая не имеет постоянной части и меняется с полусуточным периодом, так что среднее ее значение за сутки равно нулю (что, помимо общей концепции «грозовой модели» могло послужить причиной мнения о том, что горизонтальной составляющей вообще не существует).

Здесь уместно вспомнить о теллурических токах. Эти токи текут в Земле в горизонтальном направлении, а значит, если вспомнить о законе Ома, имеется и горизонтально направленное электрическое поле. Касательная же к поверхности раздела составляющая напряженности электрического поля не испытывает разрыва на поверхность раздела, а значит, если она существует под поверхностью Земли, то должна быть и над этой поверхностью, вопреки грозовому механизму.

Читатель, возможно, уже проникся ощущением, что автор безжалостно отвергает грозовой механизм, не усматривая в нем ничего положительного, безоговорочно отдавая предпочтение приливному. Но если бы это было так, пришлось бы признать, что атмосферные эффекты не влияют на геоэлектрическое поле, что заведомо неправильно.

Когда говорят о роли атмосферных эффектов, часто употребляют термин «электрическое поле нарушенной погоды». В большом обзоре И. М. Имянитова и К. С. Шифрина, посвященном исследованиям атмосферного электричества, об этом приводятся такие данные:

«1. Напряженность электрического поля над грозовыми облаками имеет обычно направление, противоположное тому, которое бывает в дни «хорошей» погоды.

2. Характер изменения поля на земле при прохождении грозового облака и изменения поля, возникающего при ударах молний, указывают, что грозовые облака, как правило, могут быть

уподоблены электрическим диполям с положительным зарядом сверху и отрицательным внизу.

3. Облака, вызывающие осадки, вызывают нерегулярные изменения поля у поверхности Земли. Облака, не дающие осадков, вызывают некоторое уменьшение поля «хорошей» погоды.

4. Туманы вызывают летом некоторое увеличение напряженности поля (по величине), а зимой — уменьшение ее.

5. Загрязнение атмосферы обычно приводит к увеличению напряженности поля.

6. Пылевые и снежные бури вызывают резкое увеличение абсолютных значений напряженностей поля и могут приводить к изменению его направления.»

Таким образом, приведенные цитаты убедительно показывают, что процессы в атмосфере существенно сказываются на геоэлектрическом поле.

Исследование корреляций между распределением гроз по различным областям Земли и изменениями электрического поля по ним часто привлекается как аргумент в пользу первичности гроз как источника зарядов на поверхности Земли и, соответственно, вторичности порождаемого этими зарядами электрического поля. Однако это скорее может служить доводом в пользу противоположного суждения: там, где приливное электрическое поле больше, там и грозы происходят чаще.

Но, очевидно, атмосферно-электрические процессы не могут затрагивать приливную часть поля и вызывают лишь добавки к нему (порой, значительные). Поэтому электрические поля планет, не имеющих атмосферы (в частности, Луны), могут именоваться «чисто приливными». Вряд ли нужно пояснять, что это придало бы экспериментальному исследованию особый интерес.

Порождаемые приливными воздействиями бароэлектрические поля должны быть не только у Земли и Луны, но и над поверхностями многих других небесных тел. О масштабах, бароэлектрических полей планет Солнечной системы и некоторых их спутников можно составить представление по величине  $A$ , которую можно назвать амплитудой напряженности приливного бароэлектрического поля.

Ниже приводятся значения необходимых параметров и величины  $A$  (в В/м). Массы  $M$  планет и источников приливного воздействия  $m$  указаны в граммах,  $R$  и  $R_0$  — в сантиметрах. Для всех величин приводятся округленные значения. В приведенный перечень включены только те объекты, для которых  $A \geq 1$  В/м.

Таблица 2

Объект	$M$ , г	$R$ , см	Источник влияния	$m$ , г	$R_0$ , см	$A$ , В/л
Меркурий	$3,3 \cdot 10^{25}$	$2,4 \cdot 10^8$	Солнце	$2 \cdot 10^{33}$	$5,8 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^4$
Венера	$4,9 \cdot 10^{27}$	$6,1 \cdot 10^8$	Солнце	$2 \cdot 10^{33}$	$1,08 \cdot 10^{13}$	$2,2 \cdot 10^4$
Земля	$6 \cdot 10^{27}$	$6,4 \cdot 10^8$	Солнце	$2 \cdot 10^{33}$	$1,5 \cdot 10^{13}$	90
Земля	$6 \cdot 10^{27}$	$6,4 \cdot 10^8$	Луна	$3,75 \cdot 10^{25}$	$3,84 \cdot 10^{10}$	$10^2$
Луна	$3,75 \cdot 10^{25}$	$1,4 \cdot 10^8$	Земля	$6 \cdot 10^{27}$	$3,84 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^3$
Марс	$6,4 \cdot 10^{26}$	$3,4 \cdot 10^8$	Солнце	$2 \cdot 10^{33}$	$2,28 \cdot 10^{13}$	5,6
Андрастея	$5,7 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^7$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$1,28 \cdot 10^{10}$	60
Амальтея	$1,9 \cdot 10^{22}$	$1,35 \cdot 10^7$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$1,81 \cdot 10^{10}$	$10^4$
Фива	$5,7 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^6$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$2,21 \cdot 10^{10}$	$5,6 \cdot 10^4$
Ио	$7,3 \cdot 10^{25}$	$1,8 \cdot 10^8$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$4,22 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^4$
Европа	$4,8 \cdot 10^{25}$	$1,48 \cdot 10^8$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$6,71 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^4$
Ганимед	$1,54 \cdot 10^{26}$	$2,6 \cdot 10^8$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$6,71 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^4$
Каллисто	$9,5 \cdot 10^{25}$	$2,36 \cdot 10^8$	Юпитер	$1,9 \cdot 10^{30}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^3$
Мимас	$4 \cdot 10^{22}$	$2,7 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$1,86 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^3$
Энцелада	$8 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$2,38 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^3$
Тетфия	$6,4 \cdot 10^{23}$	$5 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$2,95 \cdot 10^{10}$	5
Диона	$1,1 \cdot 10^{24}$	$4,8 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$3,8 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^3$
Рея	$2,3 \cdot 10^{24}$	$6,5 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$5,27 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^3$
Титан	$1,36 \cdot 10^{26}$	$2,44 \cdot 10^8$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^3$
Гиперион	$10^{23}$	$2,2 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$1,48 \cdot 10^{11}$	14
Япет	$1,1 \cdot 10^{24}$	$5,6 \cdot 10^7$	Сатурн	$5,7 \cdot 10^{29}$	$3,56 \cdot 10^{11}$	4,5
Ариэль	$1,3 \cdot 10^{24}$	$5,6 \cdot 10^7$	Уран	$8,7 \cdot 10^{28}$	$1,92 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^3$
Умбриэль	$5 \cdot 10^{23}$	$2,5 \cdot 10^7$	Уран	$8,7 \cdot 10^{28}$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^3$
Титания	$4,3 \cdot 10^{24}$	$5 \cdot 10^7$	Уран	$8,7 \cdot 10^{28}$	$4,38 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^3$
Оберон	$2,6 \cdot 10^{24}$	$4,5 \cdot 10^7$	Уран	$8,7 \cdot 10^{28}$	$5,86 \cdot 10^{10}$	$4,4 \cdot 10^3$
Миранда	$10^{23}$	$1,2 \cdot 10^7$	Уран	$8,7 \cdot 10^{28}$	$1,2 \cdot 10^7$	$5,8 \cdot 10^3$
Тритон	$10^{26}$	$1,9 \cdot 10^8$	Нептун	$1,87 \cdot 10^{29}$	$3,55 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^2$
Харон	$6,4 \cdot 10^{25}$	$6,5 \cdot 10^7$	Плутон	$10^{27}$	$1,7 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^4$

Поверхностная плотность заряда благодаря приливным воздействиям получает некоторые добавки к тем значениям, о которых шла речь при обсуждении главного бароэлектрического поля. Из-за вращения планеты эти дополнительные приливные поверхностные заряды также вращаются, что, естественно, порождает и добавки к главному баромагнитному полю. Поскольку приливные поверхностные заряды распределены неравномерно, их вращение вызывает переменные вариации магнитного поля. Амплитуда этих вариации, впрочем, настолько мала, что их, как правило, можно и не учитывать.

И еще одно замечание. Поскольку главное баромагнитное поле связано с вращением планеты, а угловая скорость этого вращения, хотя и незначительно, меняется (что надежно подтверждается наблюдениями и находит вполне естественное объяснение во внутрипланетных перемещениях), то это отражается и на напряженности главного баромагнитного поля. Хотя такие изменения также невелики, но они могут представлять интерес как дополнительный (к обычному астрономическому) способ регистрации изменений периода обращения Земли.



## 18. О прогнозировании землетрясений

Первые высказывания о том, что между землетрясениями и электромагнитными явлениями имеется взаимосвязь, имеют почти уже вековую давность. Впрочем, если учесть, что свечение атмосферы перед землетрясениями было отмечено еще в древнем Риме в 373 г. до н. э. (а это свечение, как мы сейчас понимаем, есть следствие аномального усиления электрического поля), этот период времени существенно удлиняется. Однако эти давно замеченные явления все еще не нашли достаточно полного истолкования. Мы здесь попытаемся показать, какое отношение к этим явлениям может иметь бароэлектрический эффект.

Планета, модель которой была использована выше, предполагалась сферически-симметричной.

Естественно, это отступление от сферической симметрии отражается и на распределении давлений, что должно приводить к наблюдаемым и над земной поверхностью вариациям электрического и магнитного полей. Наиболее существенно здесь следующее: несферичность поверхностей постоянного значения потенциала (изобар) может привести к возникновению у бароэлектрического поля внутри планеты не только вертикальной, но также и горизонтальной составляющей. Плотность электрических зарядов, возникающих благодаря бароэлектрическому эффекту, оказывается зависящим в этом случае от широты, и долготы, а не только от  $r$ . Это изменение важно хотя бы уже потому, что электрическое поле, порождаемое таким распределением зарядов, захватывает и область над поверхностью планеты, тогда как в сферически-симметричном варианте, напомним, бароэлектрическое поле существует только внутри планеты и скачком обращается в нуль за ее пределами.

Локальное повышение (впрочем, и понижение) давления приводит к тому, что избыточная плотность энергии электронов в некоторой области увеличивается, что порождает переходы электронов из этой области в окружающие. Такое перераспределение зарядов только в одном случае — когда сохраняется центральная симметрия — не приводит к проникновению электрического поля в область над поверхностью планеты. Во всех остальных случаях появляющийся в таких локальных областях положительный заряд и отрицательные заряды окрестных областей, куда «выдавливаются» электроны, должны создавать электрическое поле, которое проявляется и над поверхностью планеты.

Появление областей «аномального» давления должно отражаться не только на бароэлектрических, но и на баромагнитных полях. Если такая локализованная область аномальных давлений покоится относительно планеты, то связанные с ней избыточные электрические заряды порождают и над поверхностью планеты и магнитное, и электрическое поле.

К сожалению, продвижение в исследовании бароэлектрических полей пока еще недостаточно: если слежение за магнитным полем проводится регулярно во многих пунктах, то с измерениями электрического поля дело обстоит далеко не так хорошо. Хотелось бы надеяться, что это положение в обозримом будущем исправится, на что кстати, даже не потребуются значительных затрат.

Мы упоминали выше о гравитационных аномалиях. В свете сказанного выше понятно, что должны также существовать и коррелированные с ними магнитные и электрические аномалии. Корреляции между гравитационными и магнитными аномалиями действительно обнаружены уже довольно давно. Данные о корреляциях между гравитационными аномалиями и аномалиями в распределении электрического поля нам не встречались. Есть основания предполагать, что здесь опять проявляется уже упомянутая выше неполнота информации о геоэлектрическом поле вообще, хотя нужно указать и другую причину: такие исследования требуют довольно сложных методов обработки результатов измерений, поскольку напряженность электрического поля достаточно прихотливо меняется со временем.

Упомянув о гравитационных аномалиях, уместно заметить, что они часто выглядят статичными, т.е. если и меняющимися со временем, то весьма медленно. Аналогично статичными

выглядят и коррелирующие с ними магнитные (и, как вытекает из наших рассуждений, — и электрические) аномалии. Такие корреляции, по-видимому, несколько затруднительно объяснять в рамках моделей динамо, тогда как теория бароэлектрического эффекта позволяет дать им естественное и наглядное истолкование.

Если распределение давлений нестационарно, физические процессы, приводящие к появлению вариаций электромагнитных полей, можно разбить на две группы: к одной из них можно отнести «квазиравновесные» по введенной выше терминологии перераспределения зарядов, вызываемые градиентами давлений — эти перераспределения ответственны за бароэлектрические вариации полей; ко второй группе отнесем магнитогидродинамические механизмы появления вариаций магнитного поля, обусловленных вариациями внутренних дифференциальных движений в проводнике (мы выше фактически игнорировали эти процессы). Заметим, что электрическое поле, возникающее благодаря второй из указанных групп явлений, чаще всего выступает как вихревое, порождаемое изменениями магнитного поля, а не непосредственно зарядами, в отличие от полей кулоновского типа.

Многочисленные данные, касающиеся электромагнитных предвестников землетрясений, уже дают важную информацию. Появление в качестве одного из предвестников электрического поля во многих случаях не вызывает сомнений. Иногда это поле оказывается столь значительным, что может вызывать и свечение атмосферы, о чем было упомянуто выше.

Читателю, возможно, приходилось читать и о различных народных приметах надвигающихся землетрясений. Вот хотя бы две из них: вода в колодцах, говорят, становится более соленой, необычно ведут себя животные и даже насекомые.

Что касается воды, возможно, здесь действительно сказывается увеличение потока выталкиваемых из земли возрастающим бароэлектрическим полем положительных ионов. Воздействие же вариаций электрического поля на живые организмы — это пока еще огромная *terra incognita*.

Перед землетрясениями напряженности полей (здесь опять более полные данные относятся к магнитным полям) часто изменяются таким образом: вначале поле начинает возрастать, причем это возрастание происходит медленно и может значительно опережать сейсмическое событие, а непосредственно перед ним

резко спадает. Такой временной ход нетрудно объяснить, если принять бароэлектрический механизм появления предвестников: постепенное локальное повышение внутренних напряжений, а затем их быстрое снятие, сопровождающееся нередко сейсмическим событием, должно вызывать именно такую картину изменения полей во времени. И здесь уместно отметить, что объяснение этой картины при помощи других механизмов появления предвестников часто затрунительно.

Довольно распространенным является мнение, что появление полей обязано эффектам типа пьезоэлектрических. Хотя прямой пьезоэлектрический эффект проявляется, как известно, лишь в определенных анизотропных диэлектриках, причем лишь при должным образом приложенных напряжениях, что делает маловероятной реализацию всех таких условий в природе, все же полностью сбрасывать со счетов такой механизм не следует. Более того, обсуждаемый нами бароэлектрический эффект можно — хотя это и некоторая вольность — воспринимать как «пьезоэлектрический эффект в неоднородно напряженных проводниках», хотя это не вносит дополнительной ясности в обсуждаемый круг вопросов.

По поводу же электрических явлений, возникающих при разрушении твердых тел, хотелось бы добавить к сказанному выше следующее. То что при образовании трещин возникают перераспределения зарядов и в трещинах образуются значительные электрические поля, — все это, конечно, весьма важно для прогнозирования землетрясений; но такое прогнозирование, по видимому, чаще всего окажется кратковременным. Для долгосрочного прогнозирования нужно научиться замечать накопление локальных внутренних напряжений в толще Земли в тот период, когда эти напряжения еще не доходят до «предела прочности», т. е. когда разрушения еще не начинаются, когда еще не возникают трещины, так что и не могут проявляться электрические процессы, сопровождающие их появление и развитие.

По нашему мнению, роль бароэлектрического эффекта делается при этом ведущей. Но и позже, когда дело уже доходит до разрушений, значение этого эффекта как источника полей-предвестников не умалается. Добавим, что экспериментальное и теоретическое исследование роли бароэлектрического эффекта в формировании тех электродинамических процессов, которые проявляют себя на различных стадиях подготовки и протекания разрушений, пока еще даже толком и не начиналось.

В свете сказанного выше понятно, какое большое значение могут иметь лабораторные исследования явлений, проводимые, в частности, в Институте Физики Земли, равно как и работы по взрывному моделированию источников электромагнитных предвестников землетрясений.

Появление трещин и разломов при сейсмических событиях может быть связано и еще с одним эффектом, который нужно хотя бы кратко обсудить. Как уже отмечалось выше, бароэлектрическое поле является «безваттным» и потому в статических ситуациях оно не может порождать токов. Однако если под действием внешних сил в среде возникают движения, если, в частности, одни стенки трещин начинают перемещаться относительно других, то создаются условия, напоминающие то, о чем мы выше говорили, обсуждая метод Кельвина для измерения контактных разностей потенциалов. Тогда мы пытались подчеркнуть, что даже «безваттное» электрическое поле порождает токи, если существует приток энергии в систему извне.

Бароэлектрические поля у поверхности планет, как мы постарались показать выше, весьма значительны, поэтому легко понять, что токи, могущие создаваться за счет движений в проводнике, пронизанном таким бароэлектрическим полем, также могут (при достаточно энергичных движениях) оказаться большими. Внешне это даже может быть подобно явлению пробоя, напоминающего подземную грозу\*.

Идея о подземных грозах была высказана еще в начале века. Тогда же появилась и довольно фантастическая гипотеза о том, что они могут не только сопровождать землетрясения, но и стать их причиной; согласно изложенному выше, авторы этой гипотезы меняют местами причину и следствие. Магнитное эхо такой «грозы» может быть замечено и над поверхностью Земли.

---

\* Любопытно следующее сообщение: «Измерения проводились в скважине, пробуренной в плейстоценовой области (район Ташкента) на глубину 500 м. В забое скважины был заилен электрод в виде металлической трубы диаметром 0,1 и длиной в 4 м. Вторым электродом являлась обсадная стальная труба длиной 40 м. Электроды были связаны коаксиальным кабелем.

При активизации сейсмической деятельности обнаружено интенсивное стекание электрических зарядов с внешних концов кабеля на поверхность Земли. Разность потенциалов между электродами, судя по нарушению изоляции кабеля, достигала  $5 \div 10$  кВ».

Протекающие в недрах Земли процессы, приводящие в конечном итоге к землетрясениям, в частности и те градиенты давлений, которые при этом возникают, могут быть весьма разнообразными, как по их временному протеканию, так и по пространственному распределению. Поэтому невозможно указать единую и универсальную карту полей-предвестников всех землетрясений. Однако можно указать некоторые общие качественные черты этих предвестников: появление постепенно и регулярно нарастающих напряженностей полей, а затем их резкое уменьшение.

В завершение остановимся на обсуждении возможностей поляриметрических методов прогнозирования землетрясений. Поскольку такие методы прежде никем не рассматривались, остановимся на этом пункте подробнее. Но прежде следует напомнить читателю, что такое поляризация света.

Долгое время оптика и наука об электрических и магнитных явлениях относились к различным и несвязанным областям физики. Пожалуй, первым, кто перекинул мостик между этими ее разделами, был великий Фарадей.

Важнейший, решающий шаг был сделан в 1865 г. Джеймсом Клерком Максвеллом, открывшим, что свет имеет электромагнитную природу, что он представляет собой электромагнитные волны.

Волны — распространяющиеся колебания — уже давно заняли видное место в физике. Долгое время слова «физика» и «механика» могли восприниматься как синонимы, и поэтому волны считали исключительно механическими, понимали как распространение механических колебаний. Если колебания частиц среды происходит в направлении распространения волны, то ее называют продольной (таковы, например, звуковые волны в газах и жидкостях), а если перпендикулярно к этому направлению — поперечными (такие волны возможны в веществах при наличии упругости формы, в твердых телах). Если речь идет о поперечной волне, то нужно еще знать, какова поляризация, т. е. в каком из направлений происходят колебания.

Как уже отмечалось, сам Максвелл принимал истолкование электродинамики как механики особой среды — всепроникающего эфира, напряжения в которой и описывают электромагнитное поле.

Электромагнитные волны истолковывались как поперечные волны в эфире, как направленные перпендикулярно к направлению распространения волн колебания напряженности электрического и магнитного полей. Если эти колебания происходят неизменно в одной и той же плоскости, то и волна называется плоско- (или линейно-) поляризованной. Если плоскость колебаний случайным образом меняется со временем, то такую волну называют неполяризованной (в случае света — естественной). Естественный свет удобно рассматривать как наложение двух линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях волн, распространяющихся в одинаковых направлениях, сдвинутых случайным образом по фазе.

Представление о свете как о поперечных волнах было в физике и до Максвелла. Особенно значительны здесь заслуги Огюстена Жана Френеля. Поистине как чудо воспринимается, в частности, тот факт, что Френель (до появления трактата Максвелла, когда еще никто не подозревал, что свет представляет собой электромагнитную волну!) теоретически вывел законы отражения и преломления света на границе раздела сред.

Френель, в частности, выяснил, что на отражение влияет и поляризация. Постараемся наглядно объясняется это влияние.

Для этого нам придется мысленно перенестись в 1875 г., когда 22-летний Хендрик Антон Лоренц защитил в Лейденском университете докторскую диссертацию «К теории отражения и преломления света». Теория Лоренца базировалась на только недавно появившейся (и не только не получившей тогда общего признания, но даже и понятой лишь немногими физиками) теории Максвелла и на представлении, что основная, наиболее активная роль в электромагнитных процессах в веществе принадлежит электронам. Поразительнее всего, что это положение было выдвинуто Лоренцом почти за два десятка лет до того, как был «узаконен» сам факт существования электронов!

Теперь, задним числом, можно обосновать точку зрения Лоренца тем, что электрон — легчайшая из заряженных частиц в атоме, и поэтому он больше всего реагирует на воздействие электрических и магнитных полей.

Если на поверхность тела падает электромагнитная волна, она вызывает (в основном, благодаря действию ее электрического поля) колебания электронов в атомах, а начав колебаться, эти электроны сами становятся источниками вторичных волн — как отраженных, так и преломленных.

Важно вспомнить, что вторичные волны испускаются колеблющимся электроном, в основном, в направлениях, перпендикулярных к направлению колебаний, а в торцовом направлении, т. е. в направлении колебаний не испускаются вовсе. Поэтому, если падающий свет естественный, то в отраженном свете будут преобладать волны, в которых напряженность электрического поля параллельна поверхности отражающего тела. Это означает, что при отражении естественного света возникает свет (частично) поляризованный. Изучение поляризации света, отраженного от поверхности небесных тел (это называется поляриметрическими исследованиями) стало одним из ценных источников информации об этих телах.

Поляриметрические исследования небесных тел начались еще в XIX веке, когда Доминик Франсуа Араго обнаружил, что свет Солнца, отраженный от поверхности Луны, частично поляризован. Впоследствии к этому добавились исследования поляризации при отражении от ряда других небесных тел (деталей Марса, Венеры, Юпитера, Сатурна и некоторых их спутников).

Поляризация отраженного света зависит и от того, что собой представляет отражающее тело. Важен не только его химический состав, но и то, является оно изотропным (т. е. одинаковы ли его свойства по разным направлениям) или, как многие кристаллы, — анизотропным. Анизотропия может порождаться и наличием электрического поля.

Поверхность Луны, как показывают многочисленные (в первую очередь, оптические) исследования, чрезвычайно пориста и, кроме того, покрыта обломками вулканических пород или многочисленными пересекающимися трещинами. Но воздействие довольно значительного (как то указывалось выше) бароэлектрического поля вблизи поверхности Луны должно вызвать появление наведенной анизотропии (это называется эффектом Керра), что должно проявиться и в поляризации отраженного от ее поверхности света Солнца. Это и открывает возможность дистанционного исследования селеноэлектрического поля.

Но какое отношение все это может иметь к прогнозированию землетрясений на Земле?

Геофизики уже интересовались поляризацией света Солнца, отраженного от поверхности Земли, но еще не проводился детальный анализ того, меняется ли картина поляризации в связи с сейсмическими событиями. Но ведь именно это наиболее важно для их прогнозирования. Когда в периоды, предшест-

вующие землетрясениям, нарастают локальные напряжения в какой-то области внутри Земли, это, как следует из вышеизложенного, должно отразиться и на электрическом поле, что и должно повлечь за собой изменение картины поляризации отраженного света.

Учитывая, что все планеты Земной группы, включая и Луну, имеют сходный химический состав, что данные о поляризации Луны приводят к оценкам для напряженности селеноэлектрического поля у ее поверхности, близкие к тем локальным вариациям бароэлектрического поля Земли, которые должны возникать, когда механические напряжения приближаются к пределу прочности пород, есть основания ожидать эффективности метода прогнозирования землетрясений при помощи поляриметрического мониторинга поверхности Земли.

\*  
⎵

## 19. Магнитные поля и дифференциальные потоки

Учет бароэлектрического эффекта вносит в картину формирования магнитного (а также и электрического) поля планет и звезд принципиально новые черты. Это касается не только влияния перепадов давлений на формирование электрических и магнитных полей, но и обратного процесса влияния этих полей на потоки.

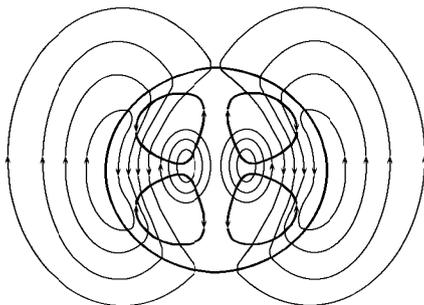
До появления теории бароэлектрического эффекта обычно при рассмотрении электромагнитных полей планет и звезд принималось, что в их недрах плотность зарядов (а значит, и напряженность электрических полей) равна нулю. Отказ от такого представления, необходимость чего диктуется изложенными выше аргументами, меняет многое в физической картине обсуждаемых нами явлений.

Основным фактором, определяющим распределение давлений в звездах и планетах, является их собственное гравитационное поле, создаваемое распределением их масс. Для самых простых и грубых оценок мы обратимся вновь к простейшей модели: будем считать, что звезда вращается как единое целое с постоянной угловой скоростью  $\omega$ .

Тогда выражение для вектора напряженности электрического поля оказывается не зависящим от  $\omega$ .

Вектор напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  линейно зависит от  $\omega$ .

Если принять для простоты, что напряженность бароэлектрического поля увеличивается по мере удаления от центра планеты по линейному закону, объемная плотность заряда получается постоянной.



На приведенном здесь рисунке изображена упрощенная схема силовых линий для магнитного поля как во внутренней области, так и во внешней области звезды.

Вид этих силовых линий, как уже отмечалось, должен отражаться на распределении дифференциальных потоков.

В область над поверхностью тела (в рамках обсуждаемой модели), главное бароэлектрическое поле не проникает, а главное баромагнитное поле, порождаемое вращением этого тела как целого, оказывается чисто дипольным.

Благодаря внутрипланетным (или внутризвездным) дифференциальным потокам главное баромагнитное поле приобретает добавки, которые вместе с магнитогидродинамическими и формируют наблюдаемое магнитное поле.

Но магнитное поле, в свою очередь, также оказывает воздействие на дифференциальные потоки. Один из механизмов этого воздействия хорошо известен — это то, что называют магнитной упругостью. Чем выше проводимость, тем в большей мере проявляется «эффект вмораживания»: движение хорошо проводящего вещества (в частности, такой среды как звездная плазма) преимущественно направлено вдоль, а не поперек магнитных силовых линий.

Другая причина такого движения является, связана с наличием объемных зарядов, при движении которых в магнитном поле проявляется сила Лоренца. Поскольку об этих зарядах исследователи прежде не упоминали, принимая, что недра звезд не заряжены, естественно, не фигурировала и эта вторая причина.

Конвективные потоки, обусловленные перепадами температур, имеются и в звездах, и в недрах планет, в частности Земли. Конвекции на Солнце, например, посвящена обширная литера-

тура. Нет, по-видимому, ни одной книги о физике Солнца, в которой бы не обсуждался этот вопрос.

Однако, хотя связь между конвективными движениями и магнитными полями уже давно стала предметом исследования, некоторые, даже качественные черты процессов еще нуждаются в дополнительном обсуждении. Преимущественно это относится к только что отмеченной доминирующей тенденции движения внутри звездного вещества вдоль, а не поперек магнитных силовых линий, что должно (если иметь в виду крупномасштабные черты движения) приводить к тому, что конвективные потоки из недр должны, в основном, быть направлены к полюсам, магнитного поля, а уже от них, охлаждаясь, растекаться в приповерхностных областях в направлении к экватору, а затем вновь опускаться вглубь звезды.

Таким образом, должны возникать меридиональные приповерхностные потоки от полюсов к экватору.

Действие на приповерхностные потоки вещества обусловленных вращением звезд сил Кориолиса приводит к появлению широтных составляющих скорости, направленных таким образом, что это приводит к замедлению вращения приповерхностных слоев, причем это замедление сказывается больше в приполярных, чем в экваториальных областях, поскольку эти силы убывают по мере приближения к экватору. В результате в меридиональных плоскостях в северном и южном полушарии должны возникать симметричные циркулярные потоки.

Частота обращения различных участков поверхности звезд неодинакова: чем ближе к экватору, тем она выше. Зависимость частоты обращения участков поверхности Солнца от их широты описывается эмпирической приближенной формулой Говарда и Харвея, которая показывает, что эта частота убывает по мере удаления от плоскости экватора. Зная, с какой частотой вращаются различные участки поверхности, нетрудно найти и линейные скорости их вращения.

Вектор линейной скорости поверхности Солнца имеет только широтную компоненту, которая быстрее всего меняется в зависимости от угла широты  $\alpha$  (отсчитываемого от плоскости экватора) при  $\alpha \approx 60^\circ$ .

Там, где перепад скоростей участков поверхности наибольший, т. е. где относительные скорости соседних слоев особенно велики, возникновение вихрей и связанных с ними солнечных пятен наиболее вероятно.

Это находится в довольно близком соответствии с данными наблюдений. Действительно, области, в которых пятна появляются в начале цикла, находятся обычно на широтах  $\pm 40^\circ$ , а затем перемещаются к экватору.

Если принять положение о вихревой природе солнечных пятен, открывается возможность для некоторых оценок магнитных полей в них. Конечно, вряд ли нужно пояснять, что ввиду сугубой приближенности модели речь пока может идти лишь о самых первых грубых прикидках.

Во вращательном движении вещества в солнечном пятне увлекаются как поверхностные, так и объемные заряды, возникающие благодаря бароэлектрическому эффекту. Вращение этих зарядов порождает магнитное поле. Оно локализовано в области пятна и его силовые линии направлены почти перпендикулярно к его поверхности, что также соответствует данным наблюдений.

Основной вклад в напряженность этого магнитного поля вносит движение приповерхностных зарядов. Для первых, достаточно грубых оценок можно принять, что отрицательные поверхностные заряды образуют сравнительно тонкий слой. Поверхностная плотность таких зарядов  $\sigma$  (в предположении, что полный электрический заряд Солнца равен нулю) находится по формуле

$$\sigma = -\sqrt{\frac{W_0}{2\pi}},$$

где  $W_0$  — плотность избыточной энергии в центре Солнца, для которой может быть принято выражение  $W_0 \approx p_0$ .

Давление в центре Солнца  $p_0$ , по общепринятым оценкам, составляет  $\sim 2,5 \cdot 10^{11}$  атм, или  $10^{17}$  ед. СГС. Это приводит к значению:  $|\sigma| \approx 2 \cdot 10^8$ .

Заряды, равномерно распределенные по поверхности круга радиуса  $L$ , вращающегося с угловой скоростью  $\Omega$ , порождают над центром этого круга магнитное поле, нормальное к поверхности и равное по модулю

$$|\mathbf{H}| = \frac{2\pi\sigma\Omega L}{c}.$$

Произведение  $\Omega L$ , которое имеет смысл относительной скорости движения противоположных краев пятна, можно оценить как  $\approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ . Что же касается размера пятен, то он часто составляет  $\sim 10^9 \div 10^{10}$  см. Это дает  $|\mathbf{H}| \approx 10^3 \div 10^4$  Э.

Конечно, приведенные выше соображения являются не более, чем предварительными, и их можно считать лишь наметками обширной программы дальнейших, как теоретических, так и экспериментальных исследований.

В заключение еще раз коснемся, того круга явлений, где переплетается влияние магнитогидродинамических и бароэлектрических эффектов. Вопрос, о котором идет речь, уже кратко упоминался выше, когда рассматривался вылет ионов из недр планеты. Но тогда из поля зрения как бы выпало правило Вольта, согласно которому безваттное бароэлектрическое поле не может порождать токов, т. е. сообщать энергию заряженным частицам. Но еще раз напомним, что это правило распространяется только на равновесные стационарные системы. Если же стационарность нарушается, то запрет Вольта снимается. Иллюстрацией тому можно назвать также рассматривавшийся выше метод Кельвина. Кратко говоря, безваттные электрические поля могут при нарушении равновесия стать посредниками в передаче энергии заряженным частицам от внешнего нестационарного источника этой энергии.

Возникновение такого источника энергии как раз и может быть связано с дифференциальными внутризвездными или внутрипланетными потоками. Из этого сразу можно сделать вывод, доступный экспериментальной проверке. Динамо-механизм формирования магнитных полей небесных тел, напомним, основан на преобразовании кинетической энергии дифференциального движения проводящего вещества в недрах этих тел в энергию магнитного поля. Но эти же движения связаны с отступлениями от стационарного, не меняющегося со временем распределения давлений в среде, что создает предпосылки для отступлений от правила Вольта, для ускорения ионов бароэлектрическим полем. Таким образом, должна наблюдаться корреляция между вариациями полей магнитогидродинамического происхождения и интенсивностью радиальных корпускулярных потоков. На Земле, где наблюдается небарометрическая зависимость концентрации положительных ионов от высоты, изменение положения максимума этой концентрации также должно быть связано с вариациями геомагнитного поля.

Отметив, что флуктуационные нарушения равновесия обуславливают возможность частичного перехода энергии бароэлектрического поля к заряженным частицам, заметим, что это может иметь непосредственное отношение к проблеме разогрева-

ния короны Солнца (как и других звезд). Поясним, в чем состоит суть этой проблемы.

Уже давно наблюдениями установлено такое удивительное изменение температуры по мере увеличения расстояния от центра Солнца: вначале эта температура падает, причем весьма значительно — от миллионов градусов в центре до нескольких тысяч у нижней части короны, а затем вновь возрастает, достигая в некоторых ее участках почти таких же значений, как и в центре звезды.

Предпринимались попытки дать этому феномену теоретическое объяснение, но, в основном, на качественном уровне. Учет бароэлектрического эффекта (конечно, при учете и других механизмов разогрева короны) открывает и дополнительные возможности количественных оценок.

Если из-за нарушений равновесия возникают радиальные потоки положительно заряженных частиц звездной плазмы (в основном, протонов, естественно, то благодаря тепловым соударениям энергия ионов в таких потоках может переходить в тепловую энергию. Но во внутренних областях звезды, где длина свободного пробега (путь ионов между двумя актами столкновений с частицами плазмы) из-за высокой плотности плазмы мала, и где поэтому за время свободного пробега иона он успевает приобрести от бароэлектрического поля лишь небольшую энергию, и эффект «ударного нагревания» сравнительно незначителен. Но в короне, где число частиц в единице объема резко уменьшается (и где поэтому длина свободного пробега, соответственно, возрастает), этот эффект, как показывают оценки, действительно может дать повышение температуры до упомянутых выше наблюдаемых значений.

Вопрос о температуре короны может подвести нас, хотя и несколько неожиданно, и к проблеме размеров звезд. В любом справочнике по астрономии приводятся сведения о радиусах звезд. Но если у Земли и других твердых планет земной группы понятие радиуса имеет прозрачный смысл, то для звезд, для плазменных образований (и даже в какой-то мере для планет-гигантов), не имеющих резкой, четко выраженной границы, понятие размеров и выяснение их значений нуждается в дополнительном обсуждении.

Понятно, что частицы звездной плазмы не разлетаются благодаря гравитации. Если бы не она, частицы звездной плазмы разлетелись бы из-за теплового движения. Таким образом, час-

тица не улетает с поверхности звезды в мировое пространство, только если энергия ее теплового движения (напомним, что эта энергия порядка  $kT$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град — постоянная Больцмана,  $T$  — температура) не превышает потенциальную энергию ее гравитационного взаимодействия со звездой, равную  $G \frac{Mm}{R}$  ( $G \approx 6,67 \cdot 10^{-8}$  в единицах СГС,  $M$  и  $m$  — массы звезды и частицы,  $R$  — радиус звезды). Используя табличные эмпирические данные о параметрах для Солнца, легко убедиться, что известное значение  $R \approx 7 \cdot 10^{10}$  см дает для  $T$  оценку  $T \approx 10^7$ , что находится в соответствии с данными о температуре короны.

\*  
⎵

## *Заключение*

Подводить итоги в науке (как и в книге) можно только понимая их заведомую предварительность.

Но, все же резон в этом занятии — подведении итогов — есть.

Оглянувшись на пройденную дорогу, легче понять, не только где и когда движение было в правильном направлении, а где в тупиковом (хотя и это никак нельзя вычеркивать из памяти как безуспешное и бесплодное), но и воскресить в памяти увиденное, вспомнить о людях, искавших правильный путь. Их усилия, хотя и не принесшие многим из них ни материальных благ, ни славы, сделал их счастливыми, наполнив жизнь прекрасным поиском клада знаний.

Какие же результаты изучения электрических и магнитных полей планет и звезд можно назвать наиболее значительными?

В первую очередь, выяснение того, что наличие таких полей — явление не исключительное, а универсальное: электрические и магнитные поля есть у всех планет и звезд, хотя, конечно, их напряженности далеко не одинаковы. Более того, они даже и не постоянны, и их переменчивость — еще один их фактов, требующих количественного объяснения.

И здесь как и много раз в прошлом, изучение звездного неба оказало огромное влияние на формирование нашей земной физики. Действительно, благодаря астрономии появилась механика Ньютона и закон всемирного тяготения, открытие явления астрономической аберрации и появление астрономических (первых!) методов доказательств конечности скорости света и измерения ее величины сыграли важную роль в формировании гениальной идеи Максвелла об электромагнитной природе света, что, в свою очередь, стало одним из главных отправных пунктов при создании теории относительности, которую по справедливости

называют вместе с квантовой теорией основными достижениями физики XX века, да и сама квантовая теория в значительной степени обязана своим возникновением спектральному анализу, который, в свою очередь, внес важный вклад в физику звезд, позволив не только доказать существование в них магнитных полей (здесь нужно вспомнить эффект Зеемана — влияние магнитного поля на частоту излучения), но и измерить их напряженности.

Конечно, в этот перечень нельзя не включить и проблемы ядерной энергетики, хотя это, возможно, и уведет чересчур далеко от круга обсуждаемых нами вопросов.

Безусловно, деление физики на «небесную» и «земную» неуместно и невозможно, и остается лишь еще раз повторить, что физика (как и вся наука!) едина. Еще одним тому примером может служить создание новой главы электродинамики — магнитной гидродинамики, о чем уже говорилось выше, когда речь зашла о механизме динамо. Еще позже была построена теория бароэлектрического эффекта, появившаяся настолько недавно, что она еще не получила должного распространения и оценки у геофизиков и астрофизиков.

Хотелось бы надеяться, что настоящая публикация сможет способствовать изменению этого положения.

Пользуюсь возможностью поблагодарить Ю. П. Гнедовского за помощь в издании настоящей книги.

\*  
⎵