

# Оглавление

Предисловие .....	7
Введение .....	11
<b>Глава 1. Откуда мы знаем про магнитные поля небесных тел</b>	
1. Что должен отвечать на вопрос о наблюдениях магнитных полей студент-астроном.....	14
2. Как наблюдают магнитные поля галактик ...	16
3. Как наблюдают магнитное поле Солнца .....	23
4. Изотопы помогают солнечникам.....	31
5. Что мы знаем о магнитных полях звезд.....	34
6. Что можно рассказать про Землю .....	40
<b>Глава 2. Как устроены магнитные поля небесных тел</b>	
1. Магнитные поля спиральных галактик .....	43
2. Магнитное поле Солнца .....	51
3. Магнитные циклы звезд .....	65
4. А что же известно про магнитное поле Земли? .....	67
<b>Глава 3. Откуда берутся магнитные поля небесных тел</b>	
1. В мире больших магнитных чисел Рейнольдса .....	73
2. Пожалуй, самое трудное .....	81

3. Турбулентная (конвективная) диффузия .....	83
4. Динамо, и зачем оно нужно.....	88
5. Восьмерка Зельдовича .....	97
6. Чему же равна альфа, или Немного топологии.....	100
7. Как строятся модели генерации магнитного поля.....	104
8. Какие же модели построили теоретики? ...	106
9. Нелинейное динамо .....	111
10. Магнитная спиральность вступает в игру....	115
11. Теперь про геодинамо.....	119

#### **Глава 4. Вокруг традиционных динамо**

1. Магнитные поля скоплений галактик.....	124
2. Магнитные поля джетов и другая экзотика в мире галактик.....	126
3. Магнитные поля аккреционных дисков .....	129
4. Начальное магнитное поле, космология и элементарные частицы .....	131

#### **Глава 5. От космического магнетизма к другим областям физики**

1. Динамо-эксперименты.....	135
2. Явление перемежаемости.....	140
3. Несколько слов о современных радиотелескопах .....	141

Заключение .....	145
Примечания .....	149
Литература .....	151
Предметно-именной указатель .....	155

# Предисловие

Физика без математики — все равно что голый в метро: можно, но неприлично. Эти слова безвестный мыслитель вырезал когда-то на парте Центральной физической аудитории физфака МГУ. Безусловно, портить факультетское имущество нехорошо, но трудно не согласиться с тем, что проблема, подмеченная в этой фразе, существует и с годами становится все более актуальной.

Безусловно, сейчас профессионально заниматься физикой без знания математики совершенно невозможно, хотя степень необходимых знаний математики тоже может сильно меняться от одной области физики к другой. В конце концов, один из авторов науки об электромагнетизме — Майкл Фарадей — был совершенно не склонен писать формулы, но открыл много нового и полезного. Мы часто будем обращаться к его идеям и в этой книге.

В других науках тоже есть свои профессиональные фильтры, которые отсекают любителей от профессионалов. Забавно услышать по радио историческую передачу о Второй мировой войне и отметить, что автор незнаком с немецким языком. Несомненно, нельзя быть филологом-классиком без знания древнегреческого, а выучить его сложнее, чем освоить курс матанализа.

Однако специалисты по античной литературе способны рассказать о своей работе так, что для этого не нужно учить латынь и греческий. Когда я был аспирантом, мне советовали слушать полезные для работы лекции. Я последовал совету и прослушал на филфаке лекции по античной литературе — и никогда не пожалел об этом, хотя времени изучить хотя бы латынь не нашлось: как-то не до того было.

Потом у меня появились дети, они выросли и тоже занялись наукой. Правда, далекой от формул. Они рассказали мне, что формулы вселяют священный ужас в людей, далеких от физики (примерно как в физике — обсуждение фаллекова гендекасиллаба). Видя формулы, люди просто перестают читать.

Можно, конечно, сказать, что систематика растений — ею занимается мой сын — нестрогая наука, одни цветочки и травки, пустые разговоры. Нет ничего дальше от истины, чем такое суждение. На заседаниях постоянно действующего семинара «Об основных интересных вопросах современной науки», который проводится в нашей семье, я узнал, что математика — наука весьма нестрогая и разболтанная. В систематике растений никто бы не допустил, чтобы словами многочлен и полином называлось бы в точности одно и то же. Да и формулировки теорем и определений, мягко говоря, оставляют желать лучшего. Сравнение разных учебников показывает, что их авторы не удосужились согласовать тексты так, чтобы избежать редакционных разногласий, не продумали, о чем нужно сказать в начале, а о чем в конце, и т. п. С такой расхлябанностью нельзя заниматься описанием новых видов...

Видимо, и про физику нужно учиться писать так, чтобы это было понятно представителям других специальностей, но сохраняя научность, не уходя в безответственные разговоры.

Такие книги, разумеется, есть, но до какого-то времени занятия в университете существенно отличались от таких книг, с точки зрения высокой науки незначимых.

Положение изменилось, когда наш ректор ввел межфакультетские курсы, на которых, по его замыслу, как раз и нужно было рассказывать о новых научных идеях, и так, чтобы слушатель понял сказанное и при этом не должен был окончить хотя бы три курса физфака.

Не могу сказать, что мы все были в восторге от этой идеи. Уж очень мы привыкли к мысли о том, что про физику или математику нужно говорить профессионально, а об истории искусств каждый культурный человек будет с легкостью рассуждать, развлекаясь. Не могу забыть, как в начале 1990-х мы с немецким соавтором ехали из Берлина в Бонн. У нас была возможность сделать остановку в Магдебурге, где я бывал и до этого, а он — еще нет: Германия объединилась лишь недавно. У нас возникли разногласия. Я настаивал на осмотре собора со знаменитым монументом Эрнста Барлаха, а он был уверен, что нужно смотреть музей Отто фон Гёрике, открывшего вакуум. Нам так и не удалось договориться.

Сейчас ясно, что с таким подходом убедить налогоплательщиков давать деньги на физику будет трудно. Нужно учиться говорить понятно для непрофессионалов.

Мы прочитали курс по математическому моделированию как межфакультетский. Потом стало ясно, что он полезен и нашим студентам.

В этой книге я попытался переработать содержание тех частей курса, которые рассказывал сам. Скажу честно, я не знаю, как писать такие книги, но хочу научиться.

Посмотрим, как у меня получится.

Время написать эту книгу нашлось из-за пандемии коронавируса. Пришлось уехать в глухую деревню в муромских лесах. Интернет был, но было и свободное время.

Безусловно, эта книга — не учебник физики и тем более не учебник по всем тем смежным вопросам, которые упоминаются в книге. Чтобы иметь о них представление, нужно обратиться совсем к другим книгам. Скорее это часть большой саги о жизни, из которой можно узнать, в частности, о том, как и для чего работают физики. По крайней мере, некоторые.

# Введение

Мы собираемся поговорить о том, как устроена современная физика в той ее части, где существенно востребованы современные математические идеи (таких областей физики — большинство). Разумеется, мы обсудим и то, что интересно мне лично, — просто потому, что на другие темы должны говорить люди, на них специализирующиеся. Я занимаюсь магнетизмом небесных тел — в широком смысле слова. Чем же отличается эта область физики от всех прочих многочисленных областей?

Можно привести простой пример. На физическом факультете МГУ есть много разных научных групп, так или иначе изучающих магнитные явления. Регулярно — раз в несколько лет — проводится российская конференция по магнетизму. Делается много докладов, работают секции, жизнь кипит.

Удивительно, но на этой конференции не было сделано ни одного доклада по магнетизму небесных тел, включая геомагнетизм. Несмотря на то что на факультете есть отделение геофизики, где занимаются, в частности, геомагнетизмом. Один из деканов был специалистом в этой области в текущем столетии.

Среди организаторов конференции были мои однокурсники, которых я хорошо знал со студенческих лет. Я много

раз говорил с ними — без всякого результата — о том, что неплохо было бы организовать на конференции секцию по космическому магнетизму.

Как говорят, *nothing personal*. Просто организаторы конференции не воспринимают космический магнетизм как часть науки о магнитных явлениях. Это кажется необычным, но у организаторов конференции есть свои резоны.

Наверное, в космическом магнетизме есть что-то необычное и интересное, что заслуживает обсуждения. Этому и посвящена эта книга.

## Глава 1

# Откуда мы знаем про магнитные поля небесных тел

Много лет назад мы с коллегами написали обзорную статью про очень конкретный вопрос из области астрономии. Статья так и называлась: «Магнетизм галактик». Она была написана по-английски, но суть дела от этого не меняется. В то давнее время интернета не было, поэтому журналы выдавали авторам отписки статей, которые авторы могли послать по почте своим научным знакомым: приятно же, когда твоими статьями кто-то интересуется. Чтобы сообщить авторам, что кто-то не против прочитать их статью, желающий присылал им специальные открытки-запросы на отписки. В тот раз открытки пришли, и соавторы поручили мне как самому молодому в команде пойти на почту и разослать отписки. Открыток было много, но все какие-то странные, от знакомых астрономов вовсе ничего не пришло — наверное, они прочитали нашу статью в библиотеке (тогда люди еще ходили в научные библиотеки; я и сам ходил и хорошо

это помню). Но открытки пришли из самых различных мест, совершенно не связанных с астрономией. Особенно запомнилось письмо из Каирского зоопарка — его сотрудники тоже не могли жить без магнетизма галактик.

Так я узнал о том, что вопросы космического магнетизма интересуют широкую публику. Попробуем хотя бы отчасти удовлетворить ее интерес.

У человека нет специального органа чувств, с помощью которого можно непосредственно ощущать магнитное поле. Мы судим о присутствии магнитного поля по тому, как оно действует на что-то другое, прежде всего на магнитную стрелку. Мы делаем так, если интересуемся магнитным полем прямо в том месте, где находимся сами. С небесными телами дело обстоит гораздо сложнее: мы живем только на одном небесном теле — нашей Земле. Люди уже побывали на Луне, космические аппараты достигли Марса и Венеры и пролетели в окрестностях других планет. На многих из этих космических аппаратов стояли сложные приборы — магнитометры, которые измеряли магнитное поле в той точке, где в тот момент находились. В этом смысле магнитометры похожи на магнитные стрелки. Это, безусловно, очень важные данные, но мы бы практически ничего не узнали о космическом магнетизме, если бы у астрономов не было других методов измерения (или, может быть, лучше сказать «наблюдения») магнитного поля на астрономических расстояниях.

## **1. Что должен отвечать на вопрос о наблюдениях магнитных полей студент-астроном**

Начнем с простого — с того, что должно быть известно каждому студенту.

В основном знания в области астрономии мы получаем из света, приходящего от различных небесных тел.

Не обязательно света в видимом диапазоне, но и радиоволн, рентгеновского излучения и других видов электромагнитных волн. Безусловно, астрономы очень ценят все остальные источники информации: космические лучи, гравитационные волны, нейтрино несут важные сведения, но все же основную массу знаний дают электромагнитные колебания.

Оказывается, магнитное поле может влиять на свойства света. При определенных условиях атомы излучают или поглощают электромагнитные волны в очень узком диапазоне частот (можно сказать, одного цвета) — в некоторой спектральной линии. Если же атом находится в магнитном поле, то спектральная линия распадается на две или несколько линий, соответствующих нескольким разным частотам. В физике принят термин «расщепление спектральных линий». По тому, насколько велико это расщепление (как различаются цвета, соответствующие этим линиям), можно узнать, насколько сильно магнитное поле в точке, где излучается свет. Явление расщепления спектральных линий в магнитном поле называется эффектом Зеемана.

С помощью эффекта Зеемана в начале XX в. американский астроном Хейл впервые измерил магнитное поле в солнечных пятнах. Так люди узнали, что Солнце является гигантским магнитом. Это был триумф физики и астрономии: стало ясно, что не нужно лететь на удаленное небесное тело для того, чтобы узнать, какое там магнитное поле.

Поэтому каждый студент должен уверенно отвечать: в астрономии магнитные поля измеряют по эффекту Зеемана. Однако часто студенты не знают того, что они знать обязаны.

Этот ответ верен, но, как часто бывает со студенческими знаниями, он очень неполон. Если бы в распоряжении астрономов был только эффект Зеемана, сегодня наши знания о космическом магнетизме были бы гораздо беднее.

## 2. Как наблюдают магнитные поля галактик

Что же прочитали в нашей статье уважаемые сотрудники Каирского зоопарка о том, как наблюдают магнитные поля галактик? Конечно, никто не собирается отказываться от старого доброго эффекта Зеемана, который уже больше ста лет верой и правдой служит астрономам. Проблема только в том, что он хорош для измерения магнитных полей в солнечных пятнах, но плохо работает при измерении магнитных полей галактик — галактики тоже являются магнитами.

Разберемся в том, что может помешать измерению магнитного поля с помощью эффекта Зеемана. Прежде всего, магнитное поле должно быть достаточно большим, чтобы расщепление спектральных линий было заметным. Магнитные поля галактик намного слабее, чем магнитные поля на Солнце. Однако эта трудность — еще полбеды. За долгие годы спектроскописты научились измерять и слабые магнитные поля. Проблема в том, что эффект Зеемана не единственный, который воздействует на спектральные линии.

Есть еще эффект Доплера: свет, приходящий от движущегося тела, мы видим с несколько другой частотой, чем наблюдатель, движущийся вместе с телом. Само по себе это тоже не беда, но разные атомы, излучающие свет в данном кусочке вещества на далеком небесном теле, движутся с самыми различными скоростями, так что спектральная линия не просто смещается, а размывается. Становится трудно заметить расщепление спектральной линии, поскольку каждая из линий, на которые распалась первоначальная линия, размывается эффектом Доплера, причем величина размывания может быть много больше, чем величина расщепления.

Спектроскописты научились справляться с размыванием спектральных линий, но у всего есть пределы. Магнитные

поля галактик не только гораздо слабее солнечных, но и вещество галактик, находящееся в пространстве между звезд, гораздо более разрежено, чем вещество Солнца, а разброс скоростей электронов и ионов, излучающих свет (радиоволны), может быть гораздо больше, чем диапазон скоростей атомов на Солнце. Не очень хорошо в этой очень разреженной среде обстоит дело и со спектральными линиями — у излучения Солнца их гораздо больше.

Измерить магнитное поле с помощью эффекта Зеемана все же удастся в некоторых частях галактик, где плотность межзвездной среды и напряженность магнитного поля побольше, а скорости — поменьше. Это холодные молекулярные облака межзвездного газа. Такие наблюдения очень важны и полезны, но все же это частности.

И тут астрономия получает совершенно неожиданную поддержку от неожиданного союзника — сахарной промышленности.

В этой индустрии важно оперативно измерять содержание сахара в растворе, который образуется при его вываривании, скажем, из сахарной свеклы. Для этого сообразительные специалисты сахарного дела используют возможность сделать свет поляризованным. В луче поляризованного света векторы электрического (и магнитного) поля направлены не как попало, а колеблются в одной плоскости, которая называется плоскостью поляризации. Несомненно, тут придется потрудиться, но это технически разрешимая задача.

Если луч поляризованного света проходит через раствор сахара, то положение плоскости поляризации не остается постоянным. Она поворачивается на некоторый угол, по величине которого можно вычислить концентрацию сахара в растворе и соответственно обнаружить нечистых на руку или просто небрежных рабочих и выяснить, соблюдали ли

рабочие рецептуру приготовления. Конечно, цель — бороться за качество продукции.

Это явление называется эффектом Фарадея по имени обнаружившего этот эффект знаменитого английского физика XIX в.

Плоскость поляризации вращается в сахаре потому, что молекулы сахара, плавающие в растворе, обладают определенной асимметрией. Точнее, молекулы сахара (как и многие другие органические молекулы) могут существовать в двух вариантах — «правом» и «левом» — это зеркальные отражения друг друга. Живые организмы (в частности, сахарная свекла) вырабатывают молекулы сахара одной ориентации. Почему это происходит, не до конца ясно, но, поскольку мы говорим об астрономии, это вопрос второстепенный. Пусть с этой загадкой природы разбираются другие.

Важно то, что магнитное поле действует на свет так же, как и сахар: происходит поворот плоскости поляризации. Эффект Фарадея в магнитном поле можно, разумеется, наблюдать в лабораторном эксперименте. Теоретическая физика объясняет причину этого явления. О ней написано в одной из книг замечательного отечественного физика, лауреата Нобелевской премии В. Л. Гинзбурга. Она переведена на английский язык, и астрономы, начавшие наблюдать магнитные поля с помощью эффекта Фарадея, учились по этой книге.

Оказывается, угол поворота плоскости поляризации пропорционален квадрату длины волны излучения. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется мерой фарадеевского вращения и обозначается как  $RM$  (rotation measure). (Удивительно, но в русском языке имя Фарадея упоминается чаще, чем в его родном английском.) В свою очередь, мера фарадеевского вращения пропорциональна напряженности магнитного поля (точнее,

его компоненте вдоль луча зрения), плотности электронов и длине области, занятой магнитным полем.

Для астрономии очень важно, что в этой зависимости участвует длина области, то есть эффект является интегральным. Это значит, что можно использовать гигантские размеры небесных тел, — в эффекте Зеемана такой зависимости нет. Приятно и то, что эффект Фарадея не связан со спектральными линиями.

Для того чтобы воспользоваться эффектом Фарадея в астрономических наблюдениях, нужно понять, в каком диапазоне длин волн разумно вести наблюдения.

Понятно, что угол поворота плоскости поляризации должен быть не слишком маленьким, иначе его трудно заметить. Соответственно, длина волны должна быть не слишком маленькой. Но она должна быть и не слишком большой. Дело в том, что угол поворота плоскости поляризации определен с точностью до  $180^\circ$ . Если плоскость поляризации повернулась на  $190^\circ$ , то наблюдатель скажет, что она повернулась всего на  $10^\circ$ !

В 1970-х гг., когда астрономия подходила к наблюдению магнитных полей галактик, было уже известно, какого порядка их магнитные поля. Эту оценку получил на 20 лет раньше великий Энрико Ферми, который предположил, что космические лучи, то есть протоны и другие атомные ядра высоких энергий, удерживаются в нашей галактике Млечный Путь ее магнитным полем. Для этого магнитное поле должно быть достаточно большим. Из других наблюдений была примерно известна плотность межзвездного газа. Все вместе указывало на то, что фарадеевское вращение следует наблюдать в том диапазоне, который относится к сфере радиоастрономии. Например, можно сопоставлять данные, полученные на длинах волн в 6 и 18 сантиметров. Хорошо к ним добавить и данные, полученные на 3-м и 21-м сантиметре,

и получить убедительное доказательство того, что мы имеем дело именно с фарадеевским вращением.

К моменту, когда радиоастрономы осознали все эти обстоятельства, произошло событие, во многом определившее судьбы изучения магнитных полей галактик. К этому времени хозяйство ФРГ восстановилось после военной катастрофы и руководители немецкой науки стали обдумывать, как можно хотя бы отчасти восстановить славные традиции немецкой науки. Предусмотрительные ученые мужи справедливо решили, что нет смысла догонять ушедших вперед конкурентов и гораздо лучше заняться чем-то принципиально новым. Были выделены деньги на строительство очень большого радиотелескопа. Он был построен недалеко от Бонна, в горах, в местечке с красивым названием Эффельсберг. Для научного руководства новым телескопом был приглашен Рихард Вилебинский. По происхождению он поляк, но вырос и выучился радиоастрономии в Австралии — стране, которая традиционно является одним из лидеров в этой области науки. Между прочим, он всегда был горячим сторонником научного сотрудничества с астрономами нашей страны.

Вилебинский правильно выбрал направление для научного прорыва — наблюдение магнитных полей внешних галактик (то есть не Млечного Пути) с помощью вычисления мер фарадеевского вращения и других характеристик поляризованного излучения межзвездной среды спиральных галактик.

Вилебинскому удалось сформировать работоспособную научную группу, которая со временем выросла в сообщество замечательных радиоастрономов, на несколько десятилетий ставших абсолютными лидерами в этой области.

Трудно описать всех членов этой группы, поэтому назову только некоторых. Прежде всего это Райнер Бек, ставший

на несколько десятилетий безусловным лидером в наблюдении магнитных полей галактик, а также крупные ученые Марита Краузе и Элли Бергхьюзен, нидерландский радиоастроном, выпускница Лейденского университета, знаменитого своими традициями радиоастрономии. Все эти люди — яркие индивидуальности, о которых в кругах специалистов ходят легенды. Когда встречаются два эксперта в области магнитных полей галактик, то тут же вспоминают, как оба в одно и то же время были в гостях у Элли и как она кормила всех супом, сделанным из одного пакетика концентрата.

Именно группа Института радиоастрономии в Бонне получила основные наблюдательные сведения о магнитных полях спиральных галактик. Кроме спиральных, есть и другие виды галактик, но именно спиральные наиболее интересны для понимания галактического магнетизма.

Очевидно, никакое научное лидерство не может продолжаться бесконечно долго. Сменяются научные поколения и научные приоритеты. Со временем к немецкой группе присоединились и коллеги, и конкуренты. Расскажу об одной из групп, которые конкурируют с немецкими астрономами. В 90-х гг. прошлого века радиообсерватория Ягеллонского университета в Кракове, в Польше, представляла собой коллекцию ретротехники. Не было ни оборудования, ни тематики, ни денег: в стране выполнялся план Бальцеровича, что было тяжелее реформ Гайдара. Берусь утверждать это на основании личного опыта.

Руководство Ягеллонского университета и обновленное руководство обсерватории поставили цель сохранить обсерваторию и найти для нее научную нишу, в которой можно было бы занять лидирующие позиции в науке. Реализацию плана они видели в тесном сотрудничестве с группой из Бонна (где не хватало исследователей младшего поколения) и в концентрации усилий по изучению магнитных полей карликовых

галактик. План блестяще удалось воплотить. Не берусь утверждать, надолго ли, но магнитные поля карликовых галактик теперь польская тематика.

Мне почему-то кажется, что это поучительные истории.

Можно спросить, стоило ли тратить столько сил на наблюдения каких-то слабых магнитных полей далеких галактик? Конечно, с помощью этих наблюдений нельзя прямо решать народнохозяйственные проблемы. Однако на опыте изучения магнитных полей спиральных галактик выросло новое поколение радиоастрономов, которое поставило перед собой совершенно новые планы, потребовавшие новых достижений в наблюдательной технике. При планировании и строительстве новых радиотелескопов пришлось решать очень сложные задачи с помощью методов, которые обязательно пригодятся при решении совершенно земных проблем.

Магнитные поля галактик слабые, но это не значит, что они неинтересны астрономии и астрофизике. Судить о том, важно или неважно магнитное поле, приходится не по абсолютным значениям его напряженности, а по сопоставлению этой величины с другими сходными величинами: Солнце и галактики — очень разные объекты. И в Солнце, и в спиральных галактиках плотность энергии магнитных полей сопоставима с плотностью энергии движений (исключая общую энергию вращения), так что магнитные поля могут влиять на течения вещества и Солнца, и галактик и воздействовать на другие физические процессы. А кроме того, интересно, что бывают магниты размером с целую галактику.

Есть и еще один резон изучать магнитные поля галактик. Считается, что природа магнетизма галактик, звезд и планет имеет много общего (мы еще вернемся к этому вопросу). Существует много теоретических работ, в которых строятся

различные модели происхождения этих магнитных полей. Нет сомнений, что космический магнетизм связан с процессами, происходящими не на поверхности, а внутри небесных тел. Интересно сравнивать эти модели с наблюдениями. Для Солнца, звезд и планет мы вынуждены использовать косвенные приемы, чтобы узнать, что именно происходит в глубинах этих тел, даже если мы хорошо знаем, что происходит на поверхности. Причина понятна: Солнце и Земля непрозрачны и мы не можем наблюдать то, что происходит в их глубинах. Галактики представляют собой счастливое исключение: они прозрачны (по крайней мере, частично) и для оптического, и для радиоизлучения, так что мы можем заглянуть прямо в ту область, в которой работает огромная динамо-машина, создающая магнитное поле. Обидно было бы упустить эту возможность!

### **3. Как наблюдают магнитное поле Солнца**

Казалось бы, мы уже обсудили этот вопрос. Магнитное поле Солнца наблюдают прежде всего по эффекту Зеемана. Это, конечно, правда, но не вся. Оказывается, нам очень интересно не только состояние магнитного поля Солнца сегодня и в прошедшие несколько лет. На Солнце происходят важные процессы, длительность которых интересно проследить на протяжении десятилетий и столетий, — мы расскажем о них позже.

Оказывается, узнать, как вело себя магнитное поле Солнца до того, как люди научились измерять его, можно по данным о солнечных пятнах.

«Взирая на солнце, прищури глаза свои, и ты смело разглядишь в нем пятна», — проницательно заметил Козьма Прутков. Это, пожалуй, все-таки преувеличение. Смотреть на Солнце опасно, пятна на нем видны не всегда, но,

действительно, большие солнечные пятна можно наблюдать невооруженным глазом. Люди делали это с незапамятных времен и писали об этом в разнообразных летописях. В частности, русские летописи упоминают пятна как «гвозди на Солнце» (так написано в Никоновской летописи под 1365 и 1371 гг.)<sup>1</sup>.

Пятна — места на поверхности Солнца, где температура ниже, чем в остальных частях поверхности. Поэтому они темные. Нам сейчас не очень важно, откуда берутся эти пятна. Важно другое: в пятнах не только температура ниже, но и само магнитное поле в сотню раз больше, чем в среднем по поверхности Солнца. Это видно по измерениям магнитных полей в солнечных пятнах и на остальной поверхности Солнца. Собственно, именно поэтому Хейл и открыл магнитное поле Солнца в солнечных пятнах, где его легче наблюдать. Можно понять, почему температура и напряженность магнитного поля связаны друг с другом. И температура, и магнитное поле вносят свой вклад в давление вещества (об этом рассказывается в учебниках физики). Солнечные пятна существуют довольно долго — около месяца. Поэтому давление в пятнах должно быть примерно такое же, как вокруг них, иначе пятна немедленно разлетятся на клочки или, наоборот, сожмутся. В пятне температура ниже и связанное с ней давление тоже ниже. Естественно думать, что это понижение компенсируется большим значением магнитного поля и соответствующим увеличением магнитного давления. Может быть, это качественное рассуждение и не покажется убедительным приверженцам математической строгости, но современные наблюдения солнечных пятен его подтверждают. И можно применить его к старым наблюдениям солнечных пятен, выполненным в те годы, когда Хейл еще не начал измерять в них магнитное поле.

Безусловно, сообщения летописей и других исторических источников очень интересны, но трудно полагаться на надежность их данных о магнитном поле Солнца. Проблема не только в том, что простым глазом солнечные пятна все же трудно наблюдать. Авторы хроник далеко не всегда интересовались именно физикой Солнца и не стремились донести до нас эту информацию. Как правило, их интересовали совсем другие, гораздо более приземленные вопросы. Далеко не всегда современный читатель легко может решить, насколько сильно хотел древний автор рассказать нам именно о физике Солнца. Это не значит, что современная наука игнорирует подобные случайные упоминания о явлениях, интересных для астрономии, в частности о солнечных пятнах. Есть специальный раздел астрономии — археоастрономия, где подобные сведения собираются, систематизируются и по мере возможности используются для целей астрономии и истории. Однако если имеются какие-то более систематические данные, то естественно использовать именно их.

К счастью, астрономия в более или менее современных формах появилась уже около 400 лет назад. В 1609 г. Галилео Галилей сконструировал первый телескоп, а точнее, приспособил подзорную трубу для астрономических наблюдений. В частности, он приделал к подзорной трубе подставку: даже в руках человека, никогда не нарушающего спортивный режим, подзорная труба немного дрожит, поэтому через нее трудно рассматривать Луну, планеты и звезды.

Через два года после изобретения телескопа, в 1611 г., Галилей включил в свой план работ пятна: на небе не так уж много того, что легко и интересно наблюдать. Как известно, Галилей дорого заплатил за свое открытие — наблюдения солнечных пятен не прошли даром для его зрения. Об этом должен помнить каждый покупатель любительского телескопа.

В целом история создания телескопа хорошо рассказана в знаменитой пьесе Брехта «Жизнь Галилея», хотя автор, конечно, совершенно не собирался писать учебник по истории науки.

Галилей был человеком с идеями. Наблюдения солнечных пятен были лишь одним из многих его увлечений. Он действительно тщательно наблюдал (но недолго) и зарисовывал их — до изобретения фотографии оставались еще столетия. О тщательности говорят сравнения рисунков Галилея с рисунками его современников, менее известных, но более профессиональных астрономов.

К счастью, наблюдение солнечных пятен быстро стало очень модным занятием. Мы знаем, что католическая церковь осудила Галилея как еретика. Разумеется, церковники вели себя нехорошо, так что их наследникам в наши дни пришлось извиняться. Однако важно, что они не просто ругали Галилея, а сами проверяли его наблюдения. Не берусь точно сказать, как в их головах уживались тщательные наблюдения с гонениями на Галилея. Об этом лучше расскажут историки науки. Но факт остается фактом: огромная часть первоначальных наблюдений солнечных пятен была выполнена католическими священниками. Среди них были даже миссионеры, проповедовавшие христианство на Дальнем Востоке и совмещавшие проповедь с астрономическими наблюдениями. Вероятно, астрономия была их настоящим призванием. Вряд ли можно было ожидать, что подобные любительские наблюдения станут основой для систематического мониторинга солнечной активности. Однако здесь астрономии очень повезло. Король Франции Людовик XIV был настоящим фанатом физики Солнца. Он, видимо, был очень непростым и закрытым человеком, который далеко не всегда подробно описывал мотивы своих поступков. Однако в 1667 г. он основал Парижскую обсерваторию как уникальное для своего

времени научное учреждение. Видимо, он и настоял на том, чтобы в центре внимания этой обсерватории были наблюдения солнечных пятен.

Несомненно, Людовик опирался на уже существовавшую во Франции астрономическую школу. Поэтому систематические наблюдения солнечных пятен начались еще до основания этой обсерватории. Можно сказать, что из этих наблюдений и выросла Парижская обсерватория.

Астрономии повезло с королем Людовиком не просто потому, что он основал Парижскую обсерваторию, которая существует и до сегодняшнего дня. На эпоху его царствования пришелся совершенно особый период солнечной активности, получивший название минимума Маундера, — мы расскажем о нем позже. В это время машина, поддерживающая и организующая солнечную активность, дала существенный сбой, природа которого является предметом острых научных дискуссий. Без усилий Людовика XIV и его астрономов мы знали бы о минимуме Маундера гораздо меньше, чем мы знаем сейчас.

Надо сказать, что любовь Людовика XIV к физике Солнца кажется несколько загадочной. Достаточно сравнить его отношение к физике Солнца с тем, как описывает французских ученых той поры современник короля герцог Сен-Симон, один из мастеров французской прозы. В его недавно напечатанных в русском переводе мемуарах мы читаем о том, что в Версаль пришли какие-то дикие и совершенно ненужные люди — члены академии наук. Такое отношение к науке встречается, безусловно, и в наши дни, но уже не считается признаком просвещенного ума. Кажется, король был умнее герцога.

Людовик, конечно, не сидел у телескопа и не вел журнал наблюдений. Однако трудно себе представить, что астрономы, выполнявшие программу работ обсерватории,

так долго вели подробные наблюдения — солнечных пятен-то в это время почти не было. Один из наблюдателей, Пикар, совершил настоящий научный подвиг — за 10 лет заметил лишь одно пятно.

Очевидно, Людовик не сам проводил наблюдения, но, видимо, следил, чтобы его астрономы работали последовательно и аккуратно. Иначе трудно представить, почему один из ведущих наблюдателей — Жан Пикар — не бросил наблюдения за те 10 лет, в которые ему удалось увидеть лишь одно солнечное пятно. Представьте, за 10 лет никаких внятных результатов! Любой другой на его месте нашел бы более интересное занятие. Пикар ведь понятия не имел, что отсутствие солнечных пятен в этом случае гораздо важнее, чем их присутствие.

Стоит вспомнить и сотрудников Парижской обсерватории, которые сохранили в ее архивах данные этих важных наблюдений. Эти столетия в истории Франции были отнюдь не легкими и безоблачными. Несколько революций, войны — и вся страна приобрела совсем другой облик. Париж времен Людовика XIV отнюдь не похож на тот Париж больших бульваров, который мы так любим. Когда данные архивы оказались востребованными, сотрудники обсерватории — среди них стоит назвать прежде всего Элизабет Нем-Риб с ее огромным энтузиазмом и любовью к науке — извлекли результаты наблюдений и ввели в научный оборот.

В 90-х гг. прошлого века я проработал год в группе Е. Нем-Риб и участвовал в работе над этими бесценными данными. С тех пор Париж — одно из самых любимых мест в мире, не считая Москвы.

Оценивая эти старые архивные результаты, приходится, естественно, считаться с тем, что 400 лет — это большой срок. Некоторые наблюдения утеряны и дошли до нас лишь в пересказе. Телескопы Пикара и другого наблюдателя —

Ла Ира — были неизмеримо хуже современных и не могли видеть мелких пятен. Часто мы плохо понимаем мотивацию исследователей, проводивших эту работу. При введении в научный оборот архивных данных высказывалось мнение, что наблюдатели просто преуменьшали число солнечных пятен — ведь Людовик был Король-Солнце, а какие на нем могут быть пятна? Французские историки (а среди них был знаменитый Ле Гофф) специально изучали этот вопрос и не согласны с таким предположением.

Тем не менее приходится считаться с тем, что восстановленные архивные данные чем-то похожи на исторические реконструкции. Так астрономическое исследование неожиданно сближается с историческим, а история — менее точная наука, чем физика и математика.

Оценивая достоверность реконструкции истории солнечной активности по архивным данным, можно подойти к делу с двух позиций. Безусловно, французские астрономы далекого XVII в. не всегда следовали нормам современной науки. Насколько известно, они не читали *The Astrophysical Journal* и не писали заявок на гранты Российского фонда фундаментальных исследований. Они, вероятно, мало задумывались и о гендерных проблемах астрономии, если вообще допускали, что женщины могут заниматься наукой. Упрекнув их во всем этом, можно ориентироваться только на современные данные. Мне, однако, больше нравится другой подход: постараться взять от предшественников все лучшее, не забывая, о том, что эти работы имели и свои недостатки.

Пожалуй, существует некоторая параллель между научным проектом по физике Солнца, выполненным под руководством Людовика XIV, и советским атомным проектом прошлого века. Людовик, которого не назовешь либералом, мог удовлетворять свои прихоти. В истории он известен

и менее симпатичными предприятиями, чем исследования солнечных пятен. Однако его концентрация усилий на выбранном направлении действительно дала впечатляющие результаты. Мы привыкли думать, что свобода — необходимая предпосылка развития науки. С этих позиций знаменитый английский мыслитель и историк Бокль в книге «История цивилизации в Англии» рассматривал эпоху Людовика XIV как начало конца французской науки, вскоре после этого она стала проигрывать английской. Видимо, астрономический проект Людовика заставляет быть более осторожным в оценках, хотя в конечном счете свобода лучше несвободы. Мне кажется, что об этом уже говорилось не так давно.

Людовик прожил долгую жизнь, но, естественно, все равно умер. Примерно в это же время умер и Ла Ир — последний из плеяды французских наблюдателей той поры, посвятивший себя солнечной тематике. Новое поколение нашло себе новые задачи — не менее интересные и важные, но не связанные с солнечной активностью. Эстафета исследований солнечных пятен перешла к Гринвичской обсерватории, чья работа пополнялась серией любительских, но очень хороших и ценных наблюдений в Германии, а во второй половине позапрошлого века возникла целая сеть обсерваторий и стало возможным проверять данные одной обсерватории по данным другой. Естественно, это повышает достоверность реконструкции.

Однако вплоть до самого последнего времени база данных солнечных пятен остается не вполне однородной. Дело в том, что быстро обновляется наблюдательная техника. От наблюдений в наземных обсерваториях наука переходит к наблюдениям на космических станциях. Они гораздо более точны, чем наземные наблюдения, однако должны ли мы учитывать каждую мелочь в виде отдельного пятна? К тому же каждая станция работает ограниченное время,

а сопоставление данных разных станций, мягко говоря, непростая задача.

Поддержание постоянного мониторинга солнечной активности на наземных станциях очень плохо вписывается в правила современной грантовой науки. В общем, научная жизнь — совсем не тихая гавань, где все говорят друг другу только комплименты.

Сейчас число солнечных пятен — далеко не единственный индекс солнечной активности. Этим словом называют интегральный количественный показатель, который характеризует солнечную активность как целое. Даже имея в руках карты распределения магнитного поля по поверхности Солнца, приходится суммировать эти сложные картины и строить такие индексы. Одним из таких полезных индексов является суммарная площадь солнечных пятен. Но у данного индекса есть недостаток: первые наблюдатели не всегда оставляли достаточно подробные зарисовки для того, чтобы вычислить площади!

#### **4. Изотопы помогают солнечникам**

Четыреста лет — большой срок в сравнении с масштабом человеческой жизни, но астрономы привыкли оперировать большими числами и хотят узнать и о том, что было на Солнце еще раньше. Тут на помощь совсем неожиданно приходит еще одна наука — изотопная геохимия.

Оказывается, солнечная активность записана в изотопном составе некоторых элементов «в слоях земных», как говорил М. В. Ломоносов. Происходит это так. Землю постоянно бомбардирует поток очень быстрых частиц, прилетающих из глубин нашей Галактики — Млечного Пути, а может быть, и откуда-нибудь подальше. На Земле эти частицы — их называют космические лучи — вступают в реакции с ядрами

различных химических элементов, в результате чего образуются другие изотопы, например радиоактивный изотоп углерода. Чем больше космических лучей, тем выше его содержание в атмосфере и на поверхности Земли. Оттуда он попадает в деревья и откладывается в их годовых кольцах. Он попадает в полярные льды и тоже откладывается в годовых слоях этих льдов. Это очень интересно само по себе, но пока не имеет отношения к Солнцу.

Космические лучи должны как-то долететь до Земли. А этому мешает магнитное поле Солнца: в нем так или иначе запутываются заряженные частицы, из которых и состоят космические лучи. Поэтому, чем сильнее магнитное поле Солнца, тем меньше космических лучей долетает до Земли и тем ниже содержание радиоактивного изотопа углерода в соответствующем древесном кольце. Так можно пытаться проследить изменения солнечной активности за время, существенно превышающее четыреста лет.

Что тут сказать? Это очень косвенные измерения. Мы привыкли говорить о том, что астрономия, физика и математика — точные науки. Но мы входим в область геологии, странным образом пересекающейся с ботаникой. Известна шутка: если есть два геолога, то высказано три мнения по любому вопросу. Тем не менее геология доказала свою практическую важность — это особенно чувствуется в нашей стране, благосостояние которой, уж какое ни есть, основано главным образом на достижениях геологии. Мы почему-то до сих пор больше любим физику, с некоторой иронией относимся к химикам и совсем мало ценим коллег-геологов, не говоря уже о всяких ботаниках и историках, но нам приходится учиться у геологов, а конкретно — у геохимиков.

Геохимики подтверждают, что связь между солнечной активностью и содержанием радиоактивных изотопов

действительно существует. Она их, правда, не очень интересует. Гораздо важнее знать, когда именно образовались те или иные геологические структуры — от этого прямо зависит разведка, скажем, новых нефтяных месторождений. До Солнца ли тут?! На этом фоне в качестве интересной, но побочной задачи изучаются и следы солнечной активности. Определение содержания радиоактивного углерода само по себе очень важно для геологии и, как ни странно, для археологии. По тому, как в процессе радиоактивного распада изменяется содержание радиоактивного углерода, определяется возраст разных геологических, а главное, археологических объектов. Археология появляется потому, что время, за которое распадается изотоп углерода (более аккуратно — период полураспада), сопоставимо скорее с временами, интересными археологам, а не геологам — у тех свои любимые изотопы.

Нужно, конечно, пересчитать и годовые кольца. С этим тоже непросто: есть старые деревья, но их возраст не определен. Однако дендрохронологи — люди, научившиеся хорошо считать эти кольца, — умеют сопоставлять кольца различных ископаемых стволов и так достраивать шкалу.

В итоге совокупные усилия специалистов разных наук позволяют отслеживать и дополнять запись солнечной активности до 10 000 лет. Безусловно, это гораздо более суммарная и приблизительная запись, чем та, которую дают прямые наблюдения с помощью телескопа.

Однако у научного доказательства есть своя специфика. В конце концов, наука родилась в жарких спорах древнегреческих мыслителей, имевших избыток свободного времени, на рыночной площади древних Афин. Поэтому элемент чисто человеческой убедительности сохраняется в науке до сих пор. В частности, широкие научные массы поверили в то, что сохранившиеся в астрономических архивах сведения

о старых наблюдениях с помощью телескопов представляют интерес, только после того, как данные были подтверждены изотопными данными. Столь велик был и остается авторитет ядерной физики.

## 5. Что мы знаем о магнитных полях звезд

Солнце — более или менее рядовая звезда. Было бы странно, если бы солнечный магнетизм представлял собой уникальное явление во Вселенной. Однако это утверждение нуждается в доказательстве. Великий Аристотель завещал нам правило: в науке нужно доказывать. На каком уровне строгости и полноты — это уже другой вопрос.

Попытки наблюдательно изучить звездный магнетизм начались с 70-х гг. прошлого века. Астрономы попробовали прибегнуть в первую очередь к знакомым методам: изучить что-то наподобие эффекта Зеемана. Примерно в это время замечательный американский спектроскопист Олин Вильсон сформулировал и реализовал программу многолетнего мониторинга звезд, похожих на Солнце по своим физическим характеристикам, в двух спектральных линиях, которые, как свидетельствует опыт солнечной астрономии, говорят о поведении магнитного поля. По обозначениям этих линий H и K ионизованного кальция проект известен как «H-K-проект». Его удалось поддерживать в рабочем состоянии на протяжении 35 лет, потом он несколько преобразовался, но существует и до сих пор. Мы еще вернемся к его результатам, когда расскажем, что именно узнали астрономы про магнитные поля звезд, а сейчас поговорим о самих наблюдениях.

Если вы не король великой страны или не мультимиллионер, решивший потратить все свое состояние на предмет своего увлечения, — привет Третьякову, Щукину