

Б.Б.Кадомцев

На пульсаре



R&C
Dynamics

Б. Б. КАДОМЦЕВ

НА ПУЛЬСАРЕ

R&C
Dynamics

РХД
Москва · Ижевск

2001

Интернет-магазин

MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- техника

Внимание!

Новые проекты издательства РХД

- Электронная библиотека на компакт-дисках
<http://shop.rcd.ru/cdbooks>
 - Эксклюзивные книги — специально для Вас любая книга может быть отпечатана в одном экземпляре
<http://shop.rcd.ru/exclusive>
-

Кадомцев Б. Б.

На пульсаре. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», М.: Редакция УФН, 2001, 128 стр.

Эта небольшая книга написана для начинающих физиков — старших школьников, живо интересующихся этой областью науки, и тех студентов ВУЗов, которые решили сделать физику своей профессией. В соответствии с этим выбрана форма изложения и композиция книги. Она написана в виде бесед по физике, точнее, по тем ее разделам, которые естественно соприкасаются с физикой пульсаров — необычных нейтронных звезд.

ISBN 5-85504-013-5

© Б. Б. Кадомцев, 2001

© Редакция журнала «Успехи физических наук», 2001

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001

<http://rcd.ru>

Оглавление

От автора	4
Предисловие	5
1. Неожиданное знакомство	6
2. Что такое пульсар?	9
3. Непослушный мячик	12
4. Миша и Саша	23
Задача №1	26
Задача №2	28
Задача №3	30
5. Игра в бильярд	32
6. Своенравные фонтаны	38
Задача №4	50
7. В стране неизотропных масс	52
8. Вещество в сверхсильном магнитном поле	66
Задача №5	79
Задача №6	80
9. Нейтронная звезда	82
Задача №7	89
10. Физика пульсара	92
11. Нелинейность и самоорганизация	99
12. На пульсаре	118

От автора

Эта небольшая книга написана для начинающих физиков — старших школьников, живо интересующихся этой областью науки, и тех студентов ВУЗов, которые решили сделать физику своей профессией. В основном именно этим двум большим группам молодежи и адресована книга. В соответствии с этим выбрана форма изложения и композиция книги. Она написана в виде бесед по физике, точнее, по тем ее разделам, которые естественно соприкасаются с физикой пульсаров — необычных нейтронных звезд. Хотя по своему жанру книга может быть отнесена к научно-популярным и даже научно-художественным изданиям, все же называть ее только научно-популярной было бы неправильно. Скорее, — это композиция нескольких стилей, и читатель довольно быстро это обнаружит. Читать книгу можно сначала пропуская решения всех задач, а затем вернуться к чтению решений, если уровень подготовки читателя достаточен для их понимания.

Предисловие

В возрасте шести лет я впервые увидел море. Это было Южное море с его великолепными яркими красками. Безбрежная синева моря поразила и оглушила меня: никогда в жизни до этого я не видел ничего подобного и не представлял себе, что возможно что-то совершенно не похожее на привычное мне окружение природы средней полосы России. Позднее аналогичное ощущение возникло у меня, когда я впервые попал в горы.

А в более старшем возрасте ощущение поражающей новизны, но, конечно, гораздо меньшего масштаба, не раз возникало у меня при прочтении интересной книги, изучении наук или знакомстве с крупными городами родной страны или других стран. Аналогичное ощущение возникает, когда сам начинаешь исследовать что-то неизвестное и подобно сыщику пытаешься создать стройную картину явления по отдельным разрозненным фактам.

В современной науке очень много интересного, любознательной мысли здесь открыты широкие просторы. Но, к сожалению, многое из того, что излагается в научных изданиях и даже научно-популярных книгах, подается в форме пережеванной пищи: Вы не чувствуете трепета и волнения того, кто делает новые открытия или даже просто, вдруг ставит под сомнение то, что считалось незыблемой истиной годами или десятками лет. Поскольку современная наука сложна, трудно почувствовать себя ее соучастником и создателем: при простом знакомстве с достигнутыми в ней результатами ощущения путешественника по неведомым странам возникают далеко не всегда.

Именно поэтому мне захотелось написать небольшую книгу для молодежи, которая была бы сходна с книгой-путешествием и которая перенесла бы читателя в совершенно новый мир. Но мне хотелось бы, чтобы молодой человек, вооруженный знаниями физики, мог бы чувствовать себя достаточно уверенно и постепенно, шаг за шагом, привык к неземной природе. В этом ему должна помочь форма изложения в виде многочисленных бесед по физике.

Итак, в путь! Будем знакомиться с пульсарами — совершенно необычными небесными телами, где все не похоже на то, к чему мы привыкли на Земле.

1. Неожиданное знакомство

Миша вышел из здания Московского университета. Сегодня был день открытых дверей, когда школьникам старших классов разрешалось пройти по аудиториям и лабораториям университета. У Миши еще рябило в глазах от многочисленных беспорядочных впечатлений: приборы, механизмы, установки слились в один сплошной ряд чего-то не очень понятного, но довольно интересного и вместе с тем все же несколько однообразного.

А на улице всеми красками сверкала весна! Был один из тех майских дней, когда вся земля казалась залитой ярким солнцем, а молодая зелень сияла как чистый, светло-зеленый изумруд.

Миша присел на лавочку и попытался стряхнуть с себя груз впечатлений. Мимо него прошла девушка. Все девушки казались ему красивыми, но эта была какой-то особенной: хоть и мельком, но он уже успел разглядеть ее большие темные глаза, длинные ресницы, красивое лицо. А теперь он смотрел ей вслед и думал, что хорошо было бы с ней как-то познакомиться. Вот, например, вдруг навстречу вышел бы какой-нибудь хулиган и перегородил ей дорогу, а он, Миша, бросился бы ей на помощь. И девушка бы ему улыбнулась...

Неожиданно Миша почувствовал на себе чей-то взгляд. Он только сейчас заметил, что рядом с ним, на скамейке, сидит мужчина лет пятидесяти. Худощавый, подобранный и очень прямо сидящий, он смотрел на Мишу улыбающимся взглядом.

Миша вспыхнул. Он вообще не любил взрослых: всегда они норовят чего-то потребовать и любят лезть не в свои дела. А этот человек еще имел наглость разглядывать его как ребенка!

— Молодой человек, не смотрите, пожалуйста, волком на старого и почтенного академика, — сказал его сосед по лавочке голосом, достаточно мягким и доброжелательным, но вместе с тем твердым, четко чеканящим каждое слово.

— Я в Ваши годы тоже считал, что все люди старше сорока лет — это глупые и отжившие свой век старики, которых давно пора отправить на пенсию. Но с годами представления о возрасте меняются, а в Англии к среднему возрасту причисляют людей старше шестидесяти лет. Да, я еще, кажется, не представился, —

уважительно добавил незнакомец, — я академик Петров Леонид Андреевич, а Вас как изволите величать?

— Миша, — буркнул Миша, окончательно смущенный тем, что он познакомился со знаменитым ученым, и тем, что академик так запросто и вместе с тем по-взрослому обратился к нему, простому школьнику.

— Михаил, — воитель за чистоту врат господних, это очень хорошее имя, — сказал Леонид Андреевич.

— Так вот, Миша, — продолжил он, — я слышал, как вы задавали вопросы во время экскурсии по университету. Мне они понравились. Вообще, в науке главное — это детская любознательность до старости, умение задавать вопросы, пусть даже глупые. И часто свежему, неискушенному взгляду открывается гораздо больше, чем упорному и терпеливому профессору, уткнувшемуся носом в свои идеи.

А я, Миша, как раз сейчас занимаюсь такими исследованиями, где необходима наблюдательность, любознательность и полное отсутствие стеснительности при желании задать вопрос. Все это у тебя, — сказал он легко переходя на «ты», — кажется, есть, поэтому я приглашаю тебя помочь мне. У тебя, наверное, найдется свободное время, поскольку уже начались каникулы, так что если нет возражений, приходи завтра в десять утра по этому адресу. И академик протянул Мише свою визитную карточку, где был указан служебный адрес ученого.

— Да, — спохватился он, — чуть не забыл. У тебя есть паспорт?

— Есть, только что получил.

— Тогда не забудь его захватить, а то тебя не пустят на входе.

— Хорошо, — сказал смущенный Миша и, не успев ничего добавить, пожал руку, которую, улыбаясь, протянул ему академик.

На другой день без десяти десять Миша уже прибыл по указанному адресу: на парадном входе небольшого серого здания висела табличка «Институт системных исследований Академии наук». Миша робко вошел в вестибюль и пристроился в очередь из нескольких человек к вахтеру, стоявшему у дверей, отделявших вестибюль от основной части здания. Каждый из подходящих к вахтеру, протягивал паспорт. Вахтер, мельком взглянув на паспорт, потом почему-то очень долго изучал выписанный на небольшом листке пропуск, хотя все эти листочки были похожи друг на друга как близнецы. То же произошло и с Мишей: почти не взглянув на его паспорт, вахтер долго смотрел на его пропуск, как бы стараясь найти в нем ошибку. Затем протянул его Мише и сказал: «На второй этаж, комната 201».

На двери комнаты №201 висела табличка «Академик Петров Леонид Андреевич». Миша робко постучал и открыл дверь, но вместо академика увидел молодую женщину, сидящую за письменным столом. Женщина была миловидна, но с таким сердитым и недовольным лицом, что Мише почему-то сразу вспомнилась школьная учительница английского языка.

— Здравствуйте, меня пригласил Леонид Андреевич, — тихо пролепетал Миша и назвал свою фамилию. Вдруг лицо женщины (Миша понял, что она была секретарем академика) полностью преобразилось, превратившись в саму любезность:

— Леонид Андреевич ждет Вас. Она указала на большую дубовую дверь.

Миша открыл дверь и увидел улыбающегося Леонида Андреевича с телефонной трубкой в руках.

— А, пришел-таки, профессор, — сказал шутливо Леонид Андреевич, отрываясь от трубки.

— Садись пока в кресло, а я закончу разговор, — добавил он.

Пока Леонид Андреевич разговаривал по телефону, Миша оглядел кабинет. Это была продолговатая комната с двумя столами — одним письменным, за которым сидел Леонид Андреевич, и вторым, с приставленными к нему мягкими креслами, — для участников заседаний. На стене, напротив второго стола, висела черная школьная доска и рядом с ней плакаты. На одном из них, особенно красочном, было написано: «Пульсар», а ниже была нарисована какая-то сложная картина — чертеж.

— Здравствуй, Миша, — весело сказал Леонид Андреевич, закончивший телефонный разговор. Он сел за стол напротив Миши и сказал: «Нуте-с?», как бы приглашая его первым начать разговор. И Миша неожиданно для самого себя спросил: «А что такое пульсар?»

— Хороший вопрос, — сказал Леонид Андреевич. — С него мы и начнем. И он рассказал следующее.

2. Что такое пульсар?

В 1967 году в Кембридже был построен очень большой радиотелескоп для изучения так называемых межпланетных мерцаний радиоволн. Сами мерцания в радиодиапазоне были открыты несколько ранее, в 1964 году. Суть вот в чем. Если имеется некоторый космический источник радиоволн, то он расположен очень далеко от Земли. Поэтому радиоволнам приходится пройти огромный путь, прежде чем они достигнут поверхности Земли. При этом радиоволны проходят через облака разреженной плазмы в межпланетном пространстве. Из-за дифракции волн на этих облаках и возникают межпланетные мерцания. Изучение межпланетных мерцаний позволяет получить очень важные сведения об угловых размерах радиоисточника.

Обычно, когда говорят о радиотелескопе, возникает образ огромного параболического зеркала, которое как гигантский глаз может направляться на обзор в глубины космоса. Однако телескоп Кембриджа, точнее, Миллардской радиоастрономической обсерватории, выглядел совсем по-другому. Это огромное сооружение было больше похоже на глаз мухи или стрекозы: оно представляло собой набор более двух тысяч антенн-диполей, которые заполняли собой прямоугольник с собирающей площадью около 18 тыс. квадратных метров. Все принимающие диполи были тщательно сфазированы, так что получался как бы один огромный «сложный глаз». Меняя фазовые сдвиги между диполями, можно было менять диаграмму направленности антенны, т. е. как бы «поворачивать» этот гигантский «глаз».

Регулярные наблюдения были начаты в июле 1967 года. Диаграмма телескопа была многолучевой, поэтому можно было сразу следить за несколькими участками неба, как говорят, сканируя его сразу по нескольким направлениям. В конце августа 1967 г. сотрудница обсерватории мисс Белл, которая просматривала записи данных обзора на самописце, обнаружила более чем странную точку. Она была похожа на мерцающий источник, но наблюдалась около полуночи, когда межпланетные мерцания малы. По мере накопления наблюдательных данных стало ясно, что источник должен находиться далеко за пределами Солнечной системы, а вероятность радиопомех от дальнего космического объекта была исключена.

По мере наблюдений стало ясно, что излучение имеет вид периодически повторяющихся импульсов. Оценки длительности излучения каждого импульса показали, что они не более 20 миллисекунд. Это свидетельствовало о том, что источник имел планетные размеры и нельзя было исключить вероятность того, что сигналы приходят от внеземной цивилизации. Можно представить себе волнение профессора А. Хьюша и его коллег, встретившихся с этим явлением.

Повторные наблюдения обнаружили изумительную регулярность импульсов: частота их повторения была постоянна с точностью больше 10^{-7} .

Дополнительные наблюдения по поиску сходных объектов очень скоро увенчались успехом: были открыты еще три пульсирующих объекта. Они были названы пульсарами. Как только в начале 1968 года авторы сообщили в печати о своем открытии, все крупные радиотелескопы переключились на изучение новых космических объектов. Открытие пульсаров было удостоено Нобелевской премии.

После сообщения английских ученых было открыто довольно много пульсаров. Все они имеют исключительно высокую точность периодичности пульсации, а периоды разных пульсаров лежат в интервале от нескольких десятков миллисекунд до нескольких секунд.

Самое естественное объяснение точной периодичности пульсации состоит в том, что она связана с вращением звезды. Но тогда звезда должна иметь очень малые размеры. Такие звезды действительно были предсказаны ранее на основе чистой теории и называются они нейтронными звездами. Вещество нейтронных звезд похоже на ядерное вещество тяжелых атомных ядер.

Согласно теоретическим представлениям нейтронные звезды могут образовываться в конце эволюции массивных звезд. После того как «выгорает» термоядерное топливо звезды, т. е. почти все ядра становятся ядрами железа, центральная область звезды постепенно сжимается. Плотность растет, и в некоторый момент времени для близко расположенных ядер железа энергетически выгодно становится их рассыпание на составные части — дезинтеграцию. Вещество центральной области звезды с огромной скоростью схлопывается к центру — происходит так называемый коллапс. В то же время звездная оболочка выбрасывается, возникает взрыв. Как говорят, вспыхивает сверхновая звезда.

И после такой вспышки ядро массивной звезды схлопывается в «крохотную» нейтронную звезду (ее радиус составляет всего

несколько километров), а вокруг нее образуется быстро расширяющаяся оболочка. Расширяясь на большое расстояние от центра, эта оболочка превращается в туманность. Наиболее известной туманностью такого рода является Крабовидная туманность. И именно внутри этой туманности был обнаружен один из пульсаров, точнее, короткопериодический пульсар, т. е. сравнительно молодая нейтронная звезда.

Почему же такая звезда излучает радиоволны? Оказывается, что нейтронная звезда намагничена. Подобно Земле она имеет дипольное магнитное поле, но только это поле в десятки или даже сотни миллиардов раз сильнее магнитного поля Земли. Оказывается, что сверхсильное магнитное поле нейтронной звезды может сильно изменить свойства вещества. Кроме того, этот гигантский магнит, вращаясь с огромной скоростью, сильно возбуждает окружающую пульсар плазму. Именно эта возбужденная плазма и является радиопередатчиком, излучающим радиоволны. При этом период повторения радиоимпульсов в точности равен периоду вращения нейтронной звезды.

Короче говоря, пульсар — это удивительнейший объект Природы.

3. Непослушный мячик

— А теперь мы с тобой пойдем знакомиться с пульсаром, — сказал Леонид Андреевич.

— Как это? — невольно вырвалось у Миши.

— А сейчас сам и увидишь, — сказал Леонид Андреевич и пригласил его следовать за собой.

Они вышли из кабинета и прошли по коридору в самый его торец, где Леонид Андреевич остановился около большой двери и набрал какой-то номер на кодовом замке. Дверь медленно ушла в сторону, и они переступили порог. От неожиданности Миша чуть не ахнул: они оказались в огромном зале, совершенно круглом и с куполом в виде полусферы, причем весь купол светился ровным дневным светом. По правде сказать, Миша сначала подумал, что они вышли на улицу, и только несколькими мгновениями позже он понял, что находится в зале. Этот зал чем-то напоминал зал Планетария, только в нем не было кресел на периферии, а в центре вместо проектора, дающего изображение звезд на куполе, располагался большой круглый стол. Вокруг стола стояло несколько кресел, похожих на кресла в зубоучебных кабинетах: на этих креслах можно было легко поворачиваться и откидываться назад, чтобы было удобнее смотреть вверх. Напротив одного из кресел стоял похожий на телевизор большой монитор, а рядом находилась клавиатура компьютера. На столе лежало множество различных предметов, из которых Мише бросились в глаза коробочка с мячиками размером с шарик для пинг-понга и большие стеклянные пластины. Леонид Андреевич подошел к креслу напротив монитора, сел в него и пригласил Мишу занять место рядом. На мониторе была видна строчка «Земля, день, облачно» и затем ряд каких-то цифр. Леонид Андреевич нажал на одну из клавиш. Изображение исчезло, и он напечатал слово «Пульсар», затем несколько цифр и снова нажал на ту же клавишу, которой стер первое изображение на экране. И вдруг зал мгновенно преобразился. Весь пол вокруг стола засветился ярким голубым светом, а на потолке-куполе засияло черное ночное небо, усыпанное звездами.

— Мы на пульсаре, — сказал Леонид Андреевич. Сейчас мы с тобой проведем несколько опытов, и чтобы нам было удобнее, я включу не существующее на пульсаре Солнце.

— Впрочем, я его спрячу за облака, чтобы не было слишком ярко. Леонид Андреевич снова набрал несколько цифр на клавиатуре компьютера, и зал наполнился ярким дневным светом.

— Мы начнем с простых опытов, — сказал Леонид Андреевич. Он достал из коробки один из мячиков, поднял его над лежащей на столе стеклянной пластиной и выпустил из рук. Мячик запрыгал, постепенно уменьшая высоту подскока, и через некоторое время затих.

— Это хороший мячик, он прыгает очень долго, — сказал Леонид Андреевич.

— Если бы мячик не терял энергии при ударе, то он бы прыгал вечно. А как ты думаешь, если бы мы стали наблюдать в микроскоп скачки мячика все меньшей и меньшей амплитуды, то, может быть, мы тоже обнаружили бы вечное подпрыгивание? — спросил Леонид Андреевич.

— Не знаю, — ответил озадаченный Миша.

— Ну, давай тогда порассуждаем. Пусть мячик при ударе теряет малую долю своего импульса. Обозначим эту долю через ε . Другими словами, если перед ударом скорость шарика была v_0 , то после удара она будет равна $v_1 = v_0(1 - \varepsilon)$. Допустим, что трением шарика о воздух мы пренебрегаем. Тогда перед вторым ударом скорость будет та же самая, т. е. v_1 , а после второго удара — $v_2 = v_1(1 - \varepsilon) = v_0(1 - \varepsilon)^2$. Следовательно, после n -го удара она будет равна $v_n = v_0(1 - \varepsilon)^n$. Если первоначально шарик был брошен вверх от поверхности со скоростью v_0 , то он упадет обратно через время $t_0 = 2\frac{v_0}{g}$, где g — ускорение свободного падения. Время следующего подпрыгивания — $t_1 = 2\frac{v_1}{g} = 2\frac{v_0}{g}(1 - \varepsilon)$. Отсюда находим: $t_n = 2\frac{v_n}{g} = 2\frac{v_0}{g}(1 - \varepsilon)^n$.

Таким образом, полное время подпрыгиваний мячика равно $t = \sum_n t_n = 2\frac{v_0}{g} \sum_n (1 - \varepsilon)^n$, где знак \sum_n означает суммирование по всем n , начиная с $n = 0$ и до бесконечности. Величина $\sum_n (1 - \varepsilon)^n$ представляет собой сумму членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Поэтому $\sum_n (1 - \varepsilon)^n = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon)} = \frac{1}{\varepsilon}$. Итак, мы установили, что мячик будет прыгать только в течение ограниченного промежутка времени, по прошествии которого он полностью успокаивается.

Кстати, этим рассуждением разрешается одна из знаменитых апорий Зенона. В свое время древнегреческий философ Зенон



Элейский (V в. до н. э.) озадачил своих соотечественников необычными рассуждениями — так называемыми апориями Зенона. Одну из них он называл так: «Почему быстроногий Ахиллес не может догнать черепаху?» Вот его рассуждение.

Пусть в начальный момент Ахиллес начинает догонять черепаху. Когда он добежит до того места, откуда стартовала черепаха, она уже немного переместится вперед. Ахиллес должен добежать до этой новой точки, но когда он достигнет ее, черепаха переместится еще дальше и т. д. Получается, что Ахиллес никогда не догонит черепаху.

Решение этой апории состоит в том, что по числу описанных действий процесс, правда, неограниченный, но их суммарное время вполне конечное, и Ахиллес, безусловно, довольно быстро догонит черепаху. Впрочем, как говорят французы, вернемся к нашим баранам.

До сих пор мы бросали мячик на Земле. А теперь перенесемся на пульсар, и... Леонид Андреевич опять поколдовал с клавиатурой компьютера, затем взял мячик, поднял его над стеклянной пластиной и опустил. И вдруг, к изумлению Миши, мячик стал падать наклонно к столу, ударился о пластину, подпрыгнул и поднялся по той же самой наклонной линии, а затем стал прыгать, как бы привязанный к невидимой нити, и постепенно успокоился в той самой точке, в которую он попал первый раз. Леонид Андреевич еще раз повторил этот опыт и сказал: «А теперь я объясню тебе, почему так получается».

Дело в том, что на пульсаре настолько сильное магнитное поле, что оно влияет на движение даже простых немагнитных тел. А именно, в сверхсильном магнитном поле появляется так называемая анизотропия массы: масса вдоль направления магнитного поля m_{\parallel} сохраняет свое значение, т. е. $m_{\parallel} = m$, а поперек магнитного поля масса m_{\perp} оказывается значительно больше m . Другими словами, 2-й закон Ньютона вдоль магнитного поля сохраняет свой привычный вид:

$$m a_{\parallel} = F_{\parallel},$$

где a_{\parallel} — ускорение вдоль магнитного поля, F_{\parallel} — составляющая силы вдоль магнитного поля, а поперек магнитного поля в уравнение Ньютона входит другая масса:

$$m_{\perp} a_{\perp} = F_{\perp}.$$

Оказывается, что $m_{\perp} = m(1 + b^2)$, где b есть отношение магнитного поля B к некоторой величине $B_0 \sim 10^{10}$ Гс. На пульсаре маг-

нитное поле может достигать и даже превосходить 10^{12} Гс, поэтому величина m_{\perp} может быть значительно больше m , т. е. анизотропия массы очень велика.

Будем считать, что на нашем пульсаре $b^2 \gg 1$, поскольку именно сильная анизотропия типична для пульсара, хотя и непривычна для нас.

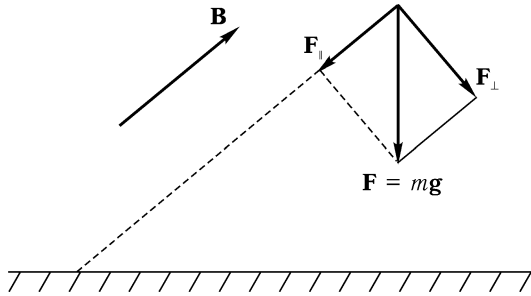


Рис. 1. Сила тяжести $\mathbf{F} = mg$ разложена на две компоненты: продольную компоненту \mathbf{F}_{\parallel} , направленную по магнитному полю \mathbf{B} , и поперечную \mathbf{F}_{\perp} , перпендикулярную магнитному полю.

Пусть магнитное поле направлено наклонно к горизонтальной плоскости, т. е. так, как показано на рис. 1. Сила тяжести $F = mg$ направлена, естественно, по вертикали вниз. Здесь m — гравитационная масса частицы, равная m_{\parallel} , а g — ускорение силы тяжести.

Силу \mathbf{F} можно разложить по правилу параллелограмма на две составляющие: вдоль и поперек магнитного поля, т. е. соответственно на \mathbf{F}_{\parallel} и \mathbf{F}_{\perp} , а затем воспользоваться 2-м законом Ньютона:

$$m_{\parallel} a_{\parallel} = F_{\parallel}, \quad m_{\perp} a_{\perp} = F_{\perp}.$$

Так как $m_{\perp} \gg m_{\parallel}$, то ускорение a_{\perp} поперек силовой линии оказывается значительно меньше продольного ускорения. Поэтому шарик «скатывается» почти по силовой линии. Мы легко можем найти, насколько он отклоняется от силовой линии в точке удара о горизонтальную плоскость. В самом деле, если начальная скорость равна нулю, то длина пути L вдоль силовой линии связана соотношением $L = F_{\parallel} t^2 / 2m_{\parallel}$ со временем падения t до удара о плоскость. А поперечное отклонение S равно $\frac{F_{\perp} t^2}{2m_{\perp}}$, так что

$$\frac{S}{L} = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} \cdot \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}}.$$

Это отношение много меньше единицы, если отношение F_{\perp}/F_{\parallel} не очень велико, т. е. если силовая линия не очень сильно «прижата» к плоскости.

Величины ускорения и скорости вдоль и поперек силовой линии сильно различаются между собой. Что же касается импульсов p_{\parallel} и p_{\perp} , то по закону Ньютона они равны соответственно:

$$p_{\parallel} = m_{\parallel}v_{\parallel} = F_{\parallel}t, \quad p_{\perp} = m_{\perp}v_{\perp} = F_{\perp}t,$$

или $\mathbf{p} = \mathbf{F}t$. Следовательно, импульс направлен вдоль силы тяжести, т. е. по вертикали. Таким образом, для импульсов такого сильного видоизменения нет.

Рассмотрим теперь, что происходит при ударе мячика о горизонтальную поверхность. Если удар упругий, то представляется естественным, что вертикальная составляющая импульса должна изменить знак. Так как горизонтальная составляющая импульса отсутствует, то это означает, что скорости v_{\perp} и v_{\parallel} должны сменить знак. Следовательно, мячик пробежит первоначальную траекторию в обратном направлении. За счет небольшой неупругости амплитуда последующих подскоков будет уменьшаться, и мячик в конце концов успокоится в точке ударов.

Проведем теперь еще один опыт. А именно, бросим мячик с небольшим толчком по горизонтали. Теперь мячик будет обладать горизонтальной составляющей импульса, и поэтому точки последовательных ударов будут смещаться вдоль плоскости. Короче говоря, картина будет, как на рис. 2а. Она совершенно не похожа на картину подпрыгивания мячика на Земле (рис. 2б). Как это понять?

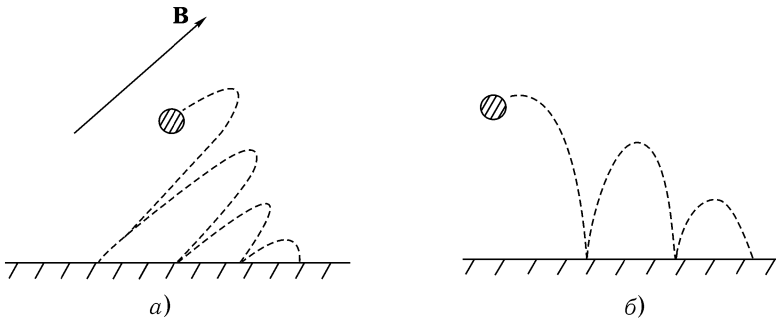


Рис. 2. Мячик в сильном магнитном поле (а) прыгает существенно иначе, чем в обычных условиях (б).

Прежде всего учтем, что вертикальный толчок мячика на пульсаре приводит не только к вертикальному движению, чего для обычного тела с изотропной массой быть не может. Кроме того, на пульсаре мячик отпрыгивает от горизонтальной плоскости совсем не так, как на Земле. На Земле, т. е. при изотропной массе, в силу сохранения горизонтального импульса (при упругом отскоке) угол падения равен углу отражения, и мячик подсакивает привычным для нас образом (рис. 2б). В случае анизотропной массы равенства углов падения и отражения уже нет, и траектория выглядит, как на рис. 2а. От удара к удару мячик постепенно смещается по горизонтали.

— А что, если вместо мячика взять бусинку на натянутой нити, чтобы она не давала бусинке смещаться в горизонтальном направлении? — спросил Миша.

— О, это очень хороший вопрос, — ответил Леонид Андреевич. — Я даже могу тебе показать, что получается.

Леонид Андреевич порылся в коробочках на столе, достал струну, надел на нее большую бусинку и затем закрепил струну в вертикальном положении. Он поднял бусинку вверх по струне, затем отпустил ее, и бусинка начала скользить по ней, как в замедленном фильме: она опускалась равноускоренно, но гораздо медленнее, чем обычно падают тела.

— Постараемся понять, в чем тут дело, — сказал Леонид Андреевич.

Пусть вектор магнитного поля \mathbf{B} составляет угол α со струной. Бусинка с сильно анизотропной массой опять захотела бы падать вдоль силовой линии, но ей мешает пронизывающая ее струна: со стороны струны возникает некоторая сила \mathbf{N} , направленная перпендикулярно струне. В результате бусинка сможет падать лишь вдоль струны с некоторым ускорением a . Чтобы найти ускорение a , нужно воспользоваться законом Ньютона и решить простейшую задачу механики — найти ускорение по заданным силам. Правда, в нашем случае известна только одна из сил, а именно, сила тяжести. Что же касается силы \mathbf{N} , то она пока неизвестна.

Обратимся к рис. 3. Поскольку $F_{\parallel} = F \cos \alpha$, $F_{\perp} = F \sin \alpha$, $N_{\parallel} = -N \sin \alpha$, $N_{\perp} = N \cos \alpha$, то $a_{\parallel} = \frac{1}{m_{\parallel}}(F \cos \alpha - N \sin \alpha)$, $a_{\perp} = \frac{1}{m_{\perp}}(F \sin \alpha + N \cos \alpha)$. Ускорение по горизонтали, т. е. величина $a_{\parallel} \sin \alpha - a_{\perp} \cos \alpha$, равно нулю. Из этого условия находим N :

$$N = F \frac{\cos \alpha \sin \alpha (m_{\perp} - m_{\parallel})}{m_{\parallel} \cos^2 \alpha + m_{\perp} \sin^2 \alpha}.$$

Учитывая, что ускорение a направлено вертикально, после несложных преобразований получаем:

$$a = a_{\parallel} \cos \alpha + a_{\perp} \sin \alpha = \frac{F}{m_{\parallel} \cos^2 \alpha + m_{\perp} \sin^2 \alpha}.$$

Осталось вспомнить, что $F = mg$. Таким образом, имеем

$$(m_{\parallel} \cos^2 \alpha + m_{\perp} \sin^2 \alpha)a = mg.$$

Бусинка как бы утяжеляется: ее эффективная инерционная масса равна $m_* = m_{\parallel} \cos^2 \alpha + m_{\perp} \sin^2 \alpha$. В интересующем нас случае очень сильной анизотропии, $m_{\perp} \gg m_{\parallel}$, масса m_* оказывается значительно больше m_{\parallel} (если только угол α не очень мал). Поэтому бусинка будет падать вдоль струны с ускорением, значительно меньшим g : вся картина падения как бы замедляется во времени.

Вроде бы, мы нигде не ошиблись. Но на всякий случай проверим еще выполнимость закона сохранения энергии. Скорость равноускоренного движения равна $v = at$, где t — время, прошедшее от начала падения с нулевой начальной скоростью. Пусть S — путь, пройденный за время t . Тогда $S = at^2/2$. Если тело упало с высоты h , то $S = h = at^2/2$. Величину h можно выразить через скорость: $h = v^2/2a$. Так как $a = \frac{m}{m_*}g$, то отсюда получается: $\frac{m_* v^2}{2} = mgh$. Как мы видим, кинетическая энергия в конце пути равна той потенциальной энергии, которой обладало тело, находящееся на высоте h .

Ну, а теперь мы подготовлены к тому, чтобы описать движение бусинки по струне, натянутой под произвольным углом к горизонту. Разложим силу F на две составляющие — вдоль и поперек струны. Поперечная составляющая сложится с силой N реакции струны, а продольная будет играть роль силы тяжести в предыдущем опыте. Поскольку величина m_* зависит только от взаимной ориентации струны и магнитного поля, то ее можно использовать и для наклонной струны, имея в виду под α угол между струной и магнитным полем. А составляющая силы тяжести вдоль наклонной струны будет, конечно, меньше, как это хорошо известно из задачи движения тела по наклонной плоскости. Дальнейшие рассуждения достаточно просты, и их можно продолжить самому.

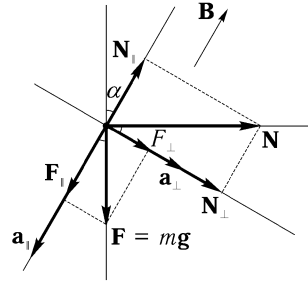


Рис. 3. Бусинка движется по вертикальной струне под действием силы тяжести $F = mg$. Магнитное поле B направлено под углом α к вертикали.

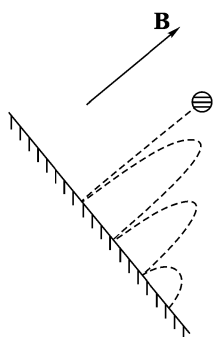


Рис. 4. Прыжки мячика с сильно анизотропной массой, вызванной присутствием сверхсильного магнитного поля.

— А сейчас мы проведем еще один эксперимент, — продолжил Леонид Андреевич.

Возьмем опять мячик и отпустим его не на горизонтальную плоскость, а на плоскость, направленную под прямым углом к магнитному полю. Как мы видим на рис. 4, мячик, прыгая, смещается вдоль плоскости.

Этот случай совсем прост, поскольку движения вдоль и поперек магнитного поля не связаны между собой: вдоль поля шарик прыгает с массой m_{\parallel} под действием составляющей силы тяжести вдоль магнитного поля, а поперек поля осуществляется свободное падение тела с массой m_{\perp} под действием поперечной компоненты силы тяжести. Поскольку $m_{\parallel} \ll m_{\perp}$, мячик прыгает достаточно часто, а смещается вдоль пластины медленно.

— Да, это просто, — согласился Миша, который хотя и с трудом, но все же успевал следить за рассуждениями Леонида Андреевича.

— А теперь сделаем вот что, — сказал Леонид Андреевич.

Возьмем две пластины, положим одну горизонтально, а другую поставим на нее вертикально так, чтобы они составляли прямой угол. А затем возьмем мячик и отпустим его таким образом, чтобы он сначала упал на вертикальную пластину. Мячик, отпущенный Леонидом Андреевичем, полетел вдоль силовой линии к вертикальной стенке, затем, подпрыгивая, сполз вдоль нее вниз и опять скачками побежал вдоль горизонтальной пластины (рис. 5).

— При столкновении с вертикальной стенкой мячик получает горизонтальный импульс. При этом часть кинетической энергии продольного движения переходит в энергию поперечного (по отношению к направлению магнитного поля) движения, так что даже в идеальном случае упругого столкновения амплитуда подскоков вдоль магнитного поля постепенно, от удара к удару, уменьшается. В конце концов мелкими скачками мячик спускается вдоль стенки, так что его усредненное падение выглядит, как движение бусинки по вертикальной струне. Спустившись до горизонтальной пластины, мячик имеет довольно большой горизонтальный импульс. Он начинает прыгать, как если бы он был брошен с начальным горизонтальным толчком.

— Ну вот, мы познакомились с простейшими случаями движения тела с сильно анизотропной массой. Именно так должны двигаться тела в сверхсильном магнитном поле пульсара.

— А разве мы в самом деле на пульсаре? — удивился Миша.

— Конечно, нет, — ответил с улыбкой Леонид Андреевич. Мы находимся в лаборатории, которая имеет возможность моделировать условия на Пульсаре. Зал, в котором мы находимся, создан для изучения адаптации, т.е. приспособления человека к необычным внешним условиям. Купол и пол зала устланы мозаикой из телевизионных экранов. Эти телевизоры получают сигналы от очень мощного компьютера, который имеет широкие возможности воспроизведения на экранах согласованной картины большого числа изображений.

— Вот, смотри, например.

Леонид Андреевич опять стал манипулировать с компьютером, и вдруг Миша чуть не вскрикнул от неожиданности: он оказался на берегу тропического острова. На песчаную отмель накатывались волны, на берегу покачивались от ветра пальмы, и все это было наполнено звуками джунглей.

— А теперь вернемся в Россию, — сказал Леонид Андреевич, и через несколько мгновений они оказались на лужайке привычного леса Подмосковья.

— А этот круглый стол, — продолжал Леонид Андреевич, — тоже необычный.

Внутри него находится сложная система катушек с током, создающая переменные магнитные поля. Компьютер автоматически управляет этим полем, благодаря чему бросаемые мной мячики, тоже с внутренней структурой, могут совершать довольно сложные движения. В частности, легко удастся имитировать движение тел с анизотропной массой. Мы имитируем часть из тех условий, которые имеют место на Пульсаре, что и дает возможность мне говорить о путешествии на Пульсар. В дальнейшем мы еще больше разнообразим наши эксперименты. Твоя задача будет заключать-

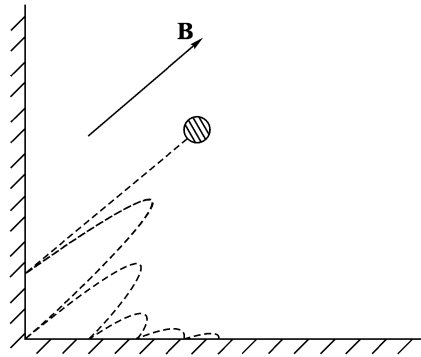


Рис. 5. Прыгающий в углу мячик с сильно анизотропной массой.

ся в том, чтобы внимательно за всем наблюдать, задавать вопросы и стараться понять, что происходит.

— Ну, на сегодня достаточно, — добавил Леонид Андреевич. Приходи ко мне в это же время через неделю. А чтобы тебе не было скучно, я прошу тебя выполнить домашнее задание. И академик протянул Мише несколько исписанных листков бумаги. На первом из них было написано «Задача №1» и затем шел текст с формулами и рисунками.

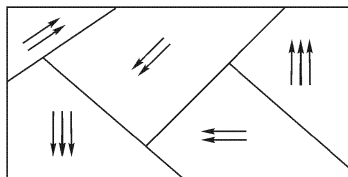
Миша попрощался и быстро пошел домой.

4. Миша и Саша

Вернувшись домой, Миша побежал к своему другу Саше. Саша казался ему очень умным — ведь он учился на третьем курсе физического факультета Московского университета. Саша был всегда готов ответить на любой вопрос по физике и математике. Миша думал, что Саша знает абсолютно все, что касается физики. Поэтому и в рассказе о встрече с академиком Петровым Миша почти мимоходом сказал об анизотропии массы в сильном магнитном поле. Но Саша прореагировал на это очень резко.

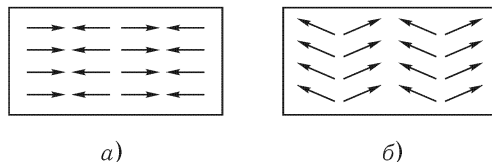
— Миша, — сказал он, — ты явно что-то напутал. Никакой анизотропии масс нет. Я только что познакомился с физикой магнитных явлений и довольно хорошо знаю эту область.

Большая часть веществ принадлежит к одному из трех классов магнетиков — диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Диамагнетики и парамагнетики не имеют начального магнитного момента и намагничиваются только в магнитном поле. У диамагнетиков магнитное поле возбуждает магнитный момент, направленный против поля, а у парамагнетиков — по полю. Парамагнетики состоят как бы из множества элементарных магнетиков, которые без магнитного поля ориентированы совершенно хаотически, так что их суммарный момент равен нулю. В магнитном поле они начинают ориентироваться вдоль поля и появляется суммарный магнитный момент, тем больший, чем сильнее само поле. Элементарный магнитный момент одиночного атома называют иногда спином. Точнее говоря, спин — это механический момент электронной оболочки атома, но связанный с ним магнитный момент тоже называют иногда спином. Впрочем, кроме электронной оболочки магнитный момент есть и у атомного ядра, но он гораздо меньше электронного момента.



Ферромагнетики состоят из магнитных доменов, каждый из которых намагничен до насыщения.

У диамагнетиков, исходно немагнитных, сами атомы немагнитны, но магнитное поле как бы «наводит» у них магнитный момент посредством влияния на орбитальное движение электронов атома.



Антиферромагнетики (а) и ферримагнетики (б) имеют две эквивалентные противоположно ориентированные магнитные подрешетки, которые направлены либо строго антипараллельно (а), либо под небольшим углом друг к другу.

У диамагнетиков и парамагнетиков намагниченность обычно мала. Поэтому в технике наиболее широкое применение нашли ферромагнетики. К числу ферромагнетиков относится обычное железо. Именно от слова «феррум» — железо — и получили они свое название.

Ферромагнетики сильно намагничиваются уже в сравнительно небольших магнитных полях. Достаточно, например, оставить на ночь прутки из мягкого железа ориентированным с севера на юг, и утром он окажется уже слабо намагниченным. Это можно проверить с помощью компаса. Ферромагнетики так легко намагничиваются лишь потому, что они исходно обладают большим магнитным моментом. Каждый кусок железа, например, состоит из множества маленьких сильно намагниченных областей: как бы очень малых магнитов. Каждая такая область называется магнитным доменом. Обычно моменты этих доменов ориентированы хаотически, так что средний магнитный момент равен нулю.

Но как только прикладывается внешнее магнитное поле, домены начинают поворачиваться и появляется суммарный магнитный момент. При увеличении поля все домены поворачиваются вдоль поля, так что ферромагнетик оказывается намагниченным до насыщения.

Кроме этих трех простейших классов магнетиков, т. е. диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков, имеются вещества с более сложными магнитными свойствами. У этих веществ имеется не один сорт магнитных атомов, а два или более; так что в кристалле твердого тела могут образовываться две или более магнитных решеток. Если две подрешетки имеют одинаковые по

абсолютной величине моменты и они ориентированы навстречу друг другу, то такое вещество называется антиферромагнетиком. Если подрешетки антиферромагнетика не в точности одинаковы, то возникает разностный магнитный момент. Такое вещество называется ферримагнетиком. У некоторых веществ, похожих на антиферромагнетики, кристаллическая симметрия позволяет двум подрешеткам быть не в точности антипараллельными, а чуть-чуть повернутыми друг относительно друга. Такие вещества называются слабыми ферромагнетиками.

Могут быть и более сложные магнитные структуры. Например, в магнитной подрешетке определенный слой магнетиков может не в точности повторять соседний слой, а быть немного повернутым относительно предыдущего слоя. В этом случае говорят о «зонтичной» симметрии. И, наконец, самый сложный магнитный материал — это так называемое спиновое стекло. В спиновом стекле каждый элементарный магнетик сложным образом взаимодействует со своими соседями. По отношению к одним спином он стремится установиться параллельно, а по отношению к другим — антипараллельно. В результате возникает состояние с хаотическим расположением направлений отдельных спинов именно из-за их взаимодействия друг с другом, а не за счет теплового движения. Оказывается, что спиновое стекло представляет собой простейший пример нейронной сети, т. е. примитивный аналог нейронной сети мозга.

— А почему магнитные структуры столь разнообразны, — спросил Миша. — Разве отдельные магнитные моменты не взаимодействуют между собой просто как магнитные стрелки, т. е. их одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются друг к другу?

— Нет, — ответил Саша. — Магнитными моментами обладают атомы, спрятанные внутрь кристалла. Их поведением управляет не классическая, а квантовая механика. Согласно квантовой механике поворот каждого спина приводит к деформации электронной плотности кристалла, т. е. сопровождается дополнительным изменением коллективной энергии всех электронов. Поэтому и взаимодействие спинов усложняется за счет «шевеления» электронной компоненты кристалла.

Итак, магнитные свойства веществ могут быть весьма разнообразны. Однако ничего похожего на анизотропию массы они не обнаруживают. Так что ты, Миша, либо чего-то не понял, либо нужно прямо задать вопрос академику, как это магнитное поле может приводить к анизотропии масс.

Впрочем, сама анизотропия массы — это довольно любопытное физическое явление. Я даже догадался, как его можно смоделировать. У меня есть дома игрушка — маленький автомобиль с инерционным двигателем. Внутри него имеется маховичок, связанный с помощью шестереночной передачи с колесами. Если этот автомобильчик поставить на пол и покатить, то маховичок раскручивается и его энергии хватает на то, чтобы автомобильчик мог долго катиться в свободном движении. Можно также попытаться сначала разогнать, а затем останавливать игрушку, соответственно разгоняя и тормозя маховик. При этом явно возникает ощущение, что вам в руки попал очень массивный предмет, который трудно ускорить или замедлить. Если теперь представить, что эта игрушка при продольном движении обязательно должна раскручивать маховик, а при боковом движении она просто смещается как целое, то это и будет модель тела с анизотропной массой. Чтобы достигнуть этого эффекта, можно, например, сделать вместо колес шестеренки, а пол сделать в виде рифленой поверхности. Тогда при качении игрушки поперек рифленки шестеренки-колеса будут сцеплены с полом, и маховик будет раскручиваться. Ну, а вдоль бороздок при малой силе трения игрушка будет двигаться свободно со своей обычной массой. Таким образом, мы получаем тело с анизотропной массой, причем направление анизотропии задано извне.

— Ну, а теперь покажи-ка мне, что за задачи тебе дали на дом.
И Миша развернул листки с задачами и решениями.

Задача №1

Описать, как происходит упругое отражение материальной точки с анизотропной массой от твердой поверхности.

Для изотропной массы закон отражения очень прост: абсолютная скорость частицы сохраняется, а угол отражения равен углу падения. Для анизотропной массы это не так. Введем систему координат (x, y) , совмещая ось абсцисс с плоскостью отражения и осью y , направленной по нормали к этой плоскости (рис. 6). Обозначим через α угол между нормалью и направлением магнитного поля.

Импульс частицы \mathbf{p} можно разложить на продольную и поперечную компоненты: $\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\parallel} + \mathbf{p}_{\perp} = m_{\parallel} \mathbf{v}_{\parallel} + m_{\perp} \mathbf{v}_{\perp}$.

Напомним еще раз, что продольную массу m мы обозначаем

через m_{\parallel} . Кроме того введем компоненты импульса p_x, p_y :

$$p_x = p_{\parallel} \sin \alpha - p_{\perp} \cos \alpha;$$

$$p_y = p_{\parallel} \cos \alpha + p_{\perp} \sin \alpha.$$

Введем еще в рассмотрение энергию частицы:

$$\varepsilon = \frac{p_{\parallel}^2}{2m_{\parallel}} + \frac{p_{\perp}^2}{2m_{\perp}}.$$

При рассмотрении отражения частицы от плоскости в случае изотропной массы поступают обычно следующим образом. Поскольку плоскость может оказывать воздействие только по нормали, т. е. вдоль оси y , то x -составляющая импульса сохраняется, а y -составляющая просто меняет знак после удара о плоскость. При этом условии энергия сохраняется, и угол отражения оказывается равным углу падения.

При анизотропной массе этот рецепт не годится. А именно, если просто заменить p_y на $-p_y$, сохраняя величину $p_x \neq 0$, то энергия частицы не сохранится. Это можно проверить прямым вычислением, которого мы воспроизводить не будем. Таким образом, такое простое преобразование не соответствует упругому отражению.

Что же нужно, чтобы отражение было упругим? Условие $p_x = \text{const}$ является непрерывным, так как вдоль плоскости отражения никакие силы не действуют. Что же касается y -составляющей движения, то в отношении его допустимо следующее рассуждение. При столкновении частицы с упругой плоскостью движение должно быть полностью обратимым: частица сначала деформирует плоскость, несколько смещая ее ниже уровня $y = 0$, а затем совершает обратное движение, приобретая y -компоненту скорости в обратном направлении. Таким образом, условие упругого отражения состоит в том, что p_x сохраняется, а y -компонента скорости v_y меняет знак. С помощью приведенных выше соотношений для энергии и импульса нетрудно выразить энергию частицы через p_x и v_y :

$$\varepsilon = (p_x^2 + m_{\parallel} m_{\perp} v_y^2) / 2m_*,$$

где $m_* = m_{\perp} \cos^2 \alpha + m_{\parallel} \sin^2 \alpha$. Как мы видим, энергия частицы является четной функцией v_y , так что при $p_x = \text{const}$ и замене v_y на $-v_y$

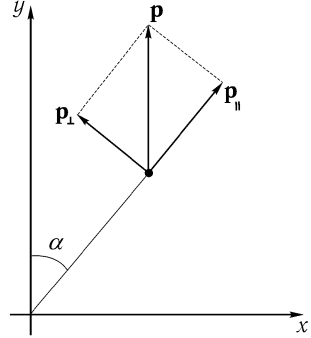


Рис. 6. Разложение полного импульса \mathbf{p} материальной точки с анизотропной массой на продольную и поперечную составляющую.

энергия действительно сохраняется. Итак, мы нашли формальные условия упругого отражения частицы от плоскости.

Рассмотрим теперь некоторые частные случаи. Наиболее прост случай $p_x = 0$, когда частица не имеет касательной составляющей импульса. Импульс при этом направлен вдоль оси y , и именно вдоль этого направления двигалась бы частица с изотропной массой. А если анизотропия велика, $m_\perp \gg m_\parallel$, то при сравнимых величинах p_\parallel и p_\perp частица будет двигаться вдоль магнитного поля, поскольку продольная компонента скорости $v = p_\parallel/m_\parallel$ оказывается значительно больше поперечной компоненты $v_\perp = p_\perp/m_\perp$. Именно так двигался свободно отпущенный мячик в эксперименте «на пульсаре»: $m_\perp \gg m_\parallel$. Можно показать, что при $p_x = 0$ имеет место соотношение $p_y = m_\parallel m_\perp v_y / m_*$. Поэтому в данном случае упругое отражение со сменой знака у v_y автоматически означает смену знака у p_y . Закон сохранения энергии при этом не нарушается. Таким образом, если, например, ударить мяч ракеткой в направлении y , то он отскочит с удвоенной скоростью ракетки вдоль оси y , но при $m_\perp \gg m_\parallel$ мячик полетит почти вдоль направления магнитного поля. Именно в этом случае суммарный импульс может быть действительно направлен вдоль оси y .

Рассмотрим теперь пример, когда $p_x \neq 0$. Удобно опять выбрать такой случай отражения, который бы очень сильно отличался от привычного нам при изотропной массе. Пусть, например, перед ударом $v_x = 0$, так что частица падает вертикально вниз на горизонтальную плоскость $x = 0$. До удара о пластину имеем $v_\perp^0/v_\parallel^0 = \operatorname{tg} \alpha$; $v_y^0 = v_\parallel^0/\cos \alpha$; $p_x^0 = -v_\perp^0(m_\perp - m_\parallel)\cos \alpha$. После удара величина p_x сохраняется, а v_y меняет знак. Постараемся теперь найти выражение для величины v_\perp/v_\parallel после удара. Для этого нужно выразить v_\perp и v_\parallel через величины p_x , v_y и затем подставить в полученные выражения величины p_x и v_y после удара. После несложных выкладок можно получить выражение, которое при $m_\perp \gg m_\parallel$ сводится к простому соотношению $v_\perp/v_\parallel \cong -\operatorname{ctg} \alpha$. После удара о стенку частица почти скользит вдоль плоскости $y = 0$: вертикальная компонента скорости частицы оказывается значительно меньше горизонтальной скорости. Таким образом, упругое отражение частицы от плоскости при $p_x \neq 0$ и $m_\perp \gg m_\parallel$ совершенно не похоже на отражение частицы с изотропной массой.

Задача №2

Задачу об упругом ударе о плоскость материальной точки с анизотропной массой привести к задаче об упругом ударе точки

с изотропной массой с помощью перехода к новой системе координат с разными масштабами по осям.

Идея здесь заключается в следующем. Если $m_{\perp} \gg m_{\parallel}$, то частица гораздо более подвижна в продольном направлении по сравнению с поперечным направлением. Но если в продольном направлении ввести новый, более крупный масштаб длины, то можно постараться устранить эту разницу в поведении. Пусть z_{\parallel} представляет собой координату вдоль \mathbf{V} . Введем новую координату $z' = \beta z_{\parallel}$ и соответственно, новую продольную скорость $v'_{\parallel} = \beta v_{\parallel}$. Если β мало, то большим смещением по z_{\parallel} будут соответствовать малые смещения по z' с пропорционально уменьшенной продольной компонентой скорости. Постараемся теперь подобрать величину параметра β таким образом, чтобы в новой продольной и прежней поперечной координатах частица вела себя как обладающая изотропной массой.

Начнем с простейшего случая $p_x = 0$, когда при отражении частица повторяет свою траекторию в обратном порядке. В этом случае $p_{\parallel} = m_{\parallel} v_{\parallel} = p \cos \alpha$, $p_{\perp} = m_{\perp} v_{\perp} = p \sin \alpha$ (рис. 7), откуда $v_{\parallel} = \frac{p}{m_{\parallel}} \cos \alpha$, $v_{\perp} = \frac{p}{m_{\perp}} \sin \alpha$. Мы хотим, чтобы в новых координатах частица двигалась перпендикулярно к плоскости отражения. Поскольку при переходе к новой системе координат векторы $\mathbf{v} = \{v_{\parallel}; v_{\perp}\}$, $\mathbf{e}_x = \{\sin \alpha; -\cos \alpha\}$ и $\mathbf{e}_y = \{\cos \alpha; \sin \alpha\}$ превращаются в векторы $\mathbf{v}' = \{\beta v_{\parallel}; v_{\perp}\}$, $\mathbf{e}'_x = \{\beta \sin \alpha; -\cos \alpha\}$ и $\mathbf{e}'_y = \{\beta \cos \alpha; \sin \alpha\}$, то указанное условие перпендикулярности принимает вид: $\beta^2 v_{\parallel} \sin \alpha - v_{\perp} \cos \alpha = 0$. Подставляя сюда выражения для v_{\parallel} и v_{\perp} , находим

$$\beta^2 = \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}}.$$

Обратим внимание на то, что при этом значении β угол между векторами \mathbf{e}'_x и \mathbf{e}'_y оказывается тупым.

Итак, если сжать всю плоскость вдоль направления \mathbf{V} в $\beta = \sqrt{m_{\parallel}/m_{\perp}}$ раз, то удар о плоскость x' анизотропной частицы с $p_x = 0$ выглядит просто как нормальное падение на плоскость x' частицы с изотропной массой.

Нетрудно видеть, что аналогичное утверждение справедливо и в общем случае $p_x \neq 0$. В самом деле, если в преобразованной системе координаты соударяется частица с изотропной массой, то для нее условия отражения можно сформулировать как сохранение тангенциальной компоненты скорости и смену знака у нормальной компоненты скорости. Пользуясь нашими формулами, нетрудно проверить (сделайте это самостоятельно), что

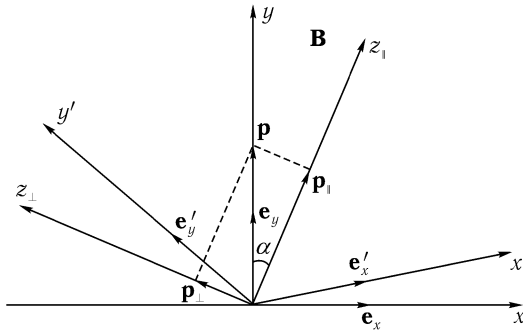


Рис. 7. Преобразование осей координат (x, y) в новую систему координат (x', y') при сжатии пространства вдоль направления магнитного поля \mathbf{B} .

тангенциальная компонента скорости пропорциональна величине $m_{\parallel} v_{\parallel} \cos \alpha - m_{\perp} v_{\perp} \sin \alpha$, т.е. тангенциальной компоненте импульса в старых координатах, а нормальная — величине $v_{\parallel} \cos \alpha + v_{\perp} \sin \alpha$, т.е. нормальной компоненте скорости в старых координатах. Таким образом, мы получаем условия упругого отражения частицы с анизотропной массой.

Задача №3

С помощью преобразования координат привести задачу о движении частицы с анизотропной массой в поле силы тяжести к движению изотропной частицы.

Эта задача лишь немного сложнее предыдущей. А именно, допустим, что на частицу действует сила тяжести $\mathbf{F} = m_{\parallel} \mathbf{g}$, где \mathbf{g} — ускорение силы тяжести. Теперь оси (x, y) удобно выбрать таким образом, чтобы ось x была ориентирована по горизонтали, а ось y — по вертикали. Тогда ускорение \mathbf{g} будет иметь только y -компоненту: $g_y = -g$. Движение частицы можно разложить на компоненты поперек и вдоль магнитного поля:

$$m_{\perp} a_{\perp} = m_{\parallel} g_{\perp}; \quad m_{\parallel} a_{\parallel} = m_{\parallel} g_{\parallel}.$$

Здесь a — ускорение частицы, а индексы \perp и \parallel — соответственные проекции на поперечное и продольное направление.

Произведем опять преобразования сжатия плоскости вдоль \mathbf{B} . При этом $v_{\parallel} = v'_{\parallel} / \beta$, так что уравнения движения с учетом соотно-

шения $m/m_{\perp} = \beta^2$ можно записать в виде:

$$m_{\perp} \dot{v}_{\perp} = m_{\parallel} g_{\perp}; \quad m_{\perp} v'_{\parallel} = \beta^{-1} m_{\parallel} g_{\parallel}.$$

Отсюда видно, что если мы введем новое ускорение силы тяжести с компонентами $g'_{\perp} = g_{\perp}$; $g'_{\parallel} = g_{\parallel} \beta^{-1}$, то в этом новом гравитационном поле изотропная «утяжеленная» частица с массой m_{\perp} будет в точности моделировать движение исходной анизотропной частицы.

Нетрудно проверить, что в новой системе отсчета «горизонт» совпадает с осью x' . Другими словами, x' -компонента ускорения \mathbf{g}' равна нулю. Это следует из того, что векторы $\mathbf{g}' = \left\{ \frac{g_{\parallel}}{\beta}; g_{\perp} \right\} = \left\{ \frac{g \cos \alpha}{\beta}; g \sin \alpha \right\}$ и $\mathbf{e}'_x = \{\beta \sin \alpha; -\cos \alpha\}$ взаимно перпендикулярны.

Таким образом, если штрихованную плоскость рис. 7 повернуть таким образом, чтобы ось x' стала горизонтальной, то мы смоделируем изотропной частицей поведение сильно неизотропной частицы в поле силы тяжести. Теперь понятно, почему мячик (см. рис. 5), падая на ось y' , скатывается по ней скачками, а затем продолжает скакать по горизонтальной плоскости.

5. Игра в бильярд

Через неделю Миша был опять в том же зале.

— Сегодня мы с тобой сыграем в бильярд, — сказал Леонид Андреевич. Только это не обычный бильярд, а бильярд на пульсаре. Все его шары имеют сильно анизотропную массу, т. е. их поперечная масса m_{\perp} значительно превышает продольную m_{\parallel} . Для удобства мы направим магнитное поле горизонтально и точно вдоль бильярда, так что шарики будут легкими вдоль и тяжелыми поперек бильярда.

Сначала научимся ударять шары кием. Если ударить шар под произвольным углом, то он полетит почти вдоль бильярда. В самом деле, если шару сообщить произвольный импульс \mathbf{p} , то разлагая его на продольную и поперечную компоненты, будем иметь

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\parallel} + \mathbf{p}_{\perp} = m_{\parallel}\mathbf{v}_{\parallel} + m_{\perp}\mathbf{v}_{\perp}.$$

Так как $m_{\perp} \gg m_{\parallel}$, то поперечная скорость будет мала по сравнению с продольной, т. е. $v_{\perp} \sim v_{\parallel}m_{\parallel}/m_{\perp}$.

Чтобы шарик направить в произвольном направлении, т. е. получить $v_{\perp} \sim v_{\parallel}$, нужно ударить так, чтобы продольный импульс был мал, т. е. $p_{\parallel} \sim \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}}p_{\perp} \ll p_{\perp}$. Другими словами, шар нужно ударять поперек бильярда, отклоняя кий от строго поперечного направления лишь в пределах малого угла $\sim m_{\parallel}/m_{\perp}$. Это не так легко, но все же осуществимо. Теперь рассмотрим, что происходит при столкновении движущегося шара с неподвижным. Начнем опять с обычных шаров на Земле. При лобовом ударе налетающий шар после удара останавливается, а покоившийся шар движется со скоростью налетающего шара. Это есть простое следствие законов сохранения энергии и импульса: только при полной передаче энергии и импульса суммарные энергии и импульс сохраняются. Рассмотрим теперь нелобовой удар (рис. 8). Пусть линия, соединяющая точку соприкосновения шаров с центром второго шара, составляет угол γ с направлением скорости первого шара. Разложим эту скорость на две составляющие: нормальную к касательной плоскости в точке удара v_n и касательную v_t . По отношению

к нормальной скорости мы имеем как бы лобовой удар: после удара она исчезнет у первого шара и появится у второго. Касательный импульс (т. е. произведения массы шарика на v_t) не может быть передан второму, так как касательная сила отсутствует. Поэтому он остается у первого шара. Таким образом, после удара шары разлетаются под углом 90° : первый шар отскакивает со скоростью v_t , а второй движется со скоростью v_n .

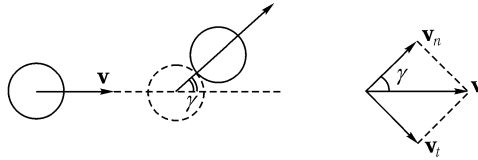


Рис. 8. Разложение относительной скорости мячика v на тангенциальную v_t и нормальную v_n составляющие.

А теперь вернемся к нашему необычному бильярду с шарами, имеющими очень сильную анизотропию масс вдоль и поперек бильярда. Начнем опять с лобового удара, когда после соударения первый шар останавливается, а второй летит с импульсом, равным импульсу первого шара. В нашем случае только при точном расположении шаров вдоль или поперек магнитного поля лобовой удар геометрически выглядит привычным для нас образом. При произвольном расположении шаров возникает необычная особенность.

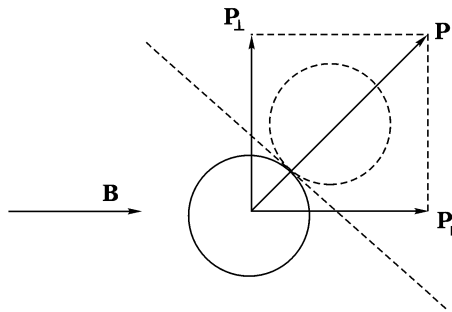


Рис. 9. Импульс \mathbf{p} бильярдного шара при его «лобовом столкновении» с другим бильярдным шаром (изображен штриховой линией) может быть разложен на две составляющие: продольную и поперечную.

Дело в том, что при лобовом ударе касательная плоскость в точке удара должна быть перпендикулярна импульсу (см. рис. 9).

При этом импульс налетающего шара может быть полностью передан ударяемому шару, так что после удара первый шар останавливается, а второй как бы продолжает его движение. Но импульс связан со скоростью соотношением $\mathbf{p} = m_{\parallel}\mathbf{v}_{\parallel} + m_{\perp}\mathbf{v}_{\perp}$. Так как $m_{\parallel} \ll m_{\perp}$, то v_{\perp} , при не очень малом p_{\parallel} , оказывается значительно меньше v_{\parallel} . Другими словами, большая часть лобовых столкновений соответствует шарам, движущимся под малым углом к магнитному полю. Можно сказать и по-другому: если первый шар послать в направлении, близком к направлению магнитного поля, то даже при неточном прицеливании, когда переданный импульс не вполне совпадает с импульсом первого шара, второй шар все равно будет двигаться под малым углом к магнитному полю (чтобы он начал двигаться под заметным углом к магнитному полю, его поперечный импульс должен быть много больше продольного, что возможно только при касательном ударе).

Теперь рассмотрим общий случай произвольного соударения. Опять импульс \mathbf{p} можно разложить на нормальную, \mathbf{p}_n , и касательную, \mathbf{p}_t , компоненты. При упругом ударе нормальная компонента передается второму шару, а касательная остается у первого шара. Таким образом, после удара импульсы шаров будут опять перпендикулярны друг другу, причем импульс второго шара будет направлен от точки соударения к центру второго шара. С точки зрения импульсов все выглядит так же, как и в бильярде с изотропными шарами. Но мы видим не импульсы, а скорости. И если мы хотим управлять скоростью второго шара, т.е. хотим, чтобы после удара у нас v_{\parallel} и v_{\perp} второго шара были величинами одного порядка, нам нужно, чтобы после соударения второй шар имел очень малую составляющую импульса вдоль магнитного поля. Для этого его нужно ударять первым шаром так, чтобы после удара он получил поперечный импульс. Итак, игра сводится к тому, чтобы ударять кием шар почти поперек магнитного поля (т.е. поперек прямоугольного стола бильярда). Кроме того, и второму шару нужно стремиться сообщить импульс, близкий к поперечному.

Разумеется, если захочется забить «свояка», то нужно, чтобы и первый шар получил импульс, близкий к поперечному. Как видно, эта игра значительно труднее игры с изотропными шарами. Поэтому в нашем бильярде пришлось сделать лузы значительно шире, чем в обычном.

— Ну, начнем, — сказал Леонид Андреевич, приглашая Мишу к игре.

Они сыграли в бильярд несколько раз, и Миша понял, что и эту игру можно освоить: нужно только не ударять кием по шару,

а осторожно раскатывать его, стараясь малыми уточненными положениями кия направить его на второй шар так, чтобы он ударял его в поперечном направлении.

— А сейчас я тебя познакомлю с игрой, — сказал Леонид Андреевич, — проще, чем бильярд, но которая возможна только с шарами с анизотропной массой. Кстати, мы обсудим еще один вид движения тела с анизотропной массой. Дело в том, что созданная нами система управления движением «мячиков» позволяет имитировать не только однородное магнитное поле, но и не однородные поля сложной формы. В частности, можно имитировать магнитное поле прямого проводника с током (рис. 10).

Магнитное поле такого тока направлено в азимутальном направлении, так что силовые линии представляют собой концентрические окружности. Магнитное поле тока убывает с удалением от проводника обратно пропорционально расстоянию. Поэтому поперечная масса частицы в сверхсильном магнитном поле рассматриваемой геометрии выглядит как $m_{\perp} = m_{\parallel}(1 + a^2/r^2)$, где r — расстояние от проводника, а величина « a » характеризует радиус, где $m_{\perp} = 2m_{\parallel}$. Грубо говоря, вне цилиндра радиуса $r = a$ частица ведет себя, как бы обладая изотропной массой, а внутри цилиндра $r = a$ начинает сказываться анизотропия, притом тем сильнее, чем ближе частица подходит к проводнику с током.

А теперь бросим шарик так, чтобы он пролетел через область сверхсильного магнитного поля.

Леонид Андреевич поднял небольшой шарик над столом, где на небольшом штативе был укреплен горизонтальный «стержень с током», и отпустил шарик так, что он должен был бы пролететь вблизи проводника. К изумлению Миши произошло совсем другое. Шарик неожиданно облетел проводник, как бы привязанный к нему невидимой нитью, затем вновь от него оторвался и полетел вниз по привычной, параболической траектории (рис. 11).

— Как это ни странно, — сказал Леонид Андреевич, — то, что мы видим, это просто «свободное» падение тела с анизотропной массой. «Свободное» — в кавычках, потому что вдоль траектории

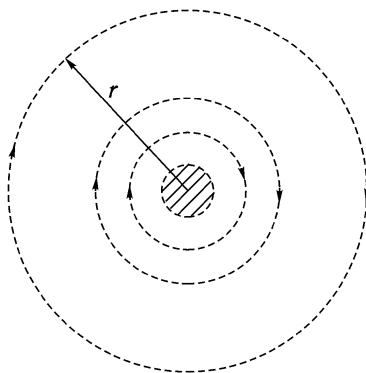


Рис. 10. Силовые линии магнитного поля в прямом проводнике с током.

меняется поперечная масса тела. Впрочем, прямого силового воздействия на шарик не производится. Итак, как все это объяснить?

Для этого удобно рассмотреть движение шарика в полярной системе координат r, φ .

Так как мы бросили шарик с довольно большой высоты, и его скорость велика, то вблизи проводника с током изменением скорости за счет силы тяжести можно пренебречь, т.е. движение можно считать свободным. В поле рассматриваемого нами вида масса азимутального движения сохраняет свою величину. При наличии симметрии, т.е. в отсутствие сил, действующих в азимутальном направлении, должен сохраняться момент количества движения $M = m_{\parallel} v_{\varphi} r$, где v_{φ} — азимутальная скорость, равная ωr , ω — угловая скорость (скорость изменения угла φ). Чем меньше r , тем больше v_{φ} , т.е. тем больше

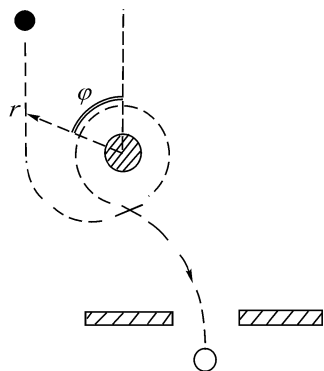


Рис. 11. Падение мяча с анизотропной массой через область с азимутальным магнитным полем.

центробежная сила, действующая в направлении r . Говорят, что на тело действует сила от центробежного потенциала. Поэтому радиальное движение состоит в том, что тело летит к центру, но под действием центробежного потенциала отталкивается, отражается и летит обратно. В случае частицы с изотропной массой азимутальное и радиальное движения согласованы таким образом, что в результате получается прямолинейная траектория. Если же $m_{\parallel} \neq m_{\perp}$, да к тому же m_{\perp} увеличивается по мере уменьшения r , то вблизи от проводника с током радиальное движение замедляется. В результате тело начинает двигаться по свертывающейся спирали. Под действием центробежного потенциала шарик «останавливается» в своем движении по радиусу, затем выталкивается, так что образуется развертывающаяся спираль. Совершив движение сначала по свертывающейся, а затем по развертывающейся спирали, шарик вылетает из области сверхсильного магнитного поля. В зависимости от того, насколько близко от проводника должен был бы пролететь шарик, т.е. в зависимости от так называемого прицельного расстояния, будет меняться и угол отлета шарика из области существенной анизотропии массы.

Игра состоит в том, чтобы попасть шариком в расположенное ниже проводника с током отверстие (см. рис. 11).

Миша довольно быстро освоился с новой игрой. После окончания очередного сеанса он рассказал своим друзьям, и прежде всего Саше, о необычных причудах движения тел с анизотропной массой. Саша был поражен рассказом Миши и никак не мог понять, что бы это могло означать. Ни в одном из учебников по физике он не видел ничего подобного.

— А нельзя ли мне познакомиться с академиком Петровым? — спросил Саша.

— Он очень добрый человек, — ответил Миша, — и в следующий раз я его попрошу об этом.

6. Своенравные фонтаны

— Как ты думаешь, — спросил при следующей встрече Леонид Андреевич, — какой из двух одинаковых по размеру пузырьков в воде будет подниматься быстрее — воздушный или наполненный водородом?

— Конечно, водородный, — не задумываясь, выпалил Миша, — он ведь легче.

— На этот раз ты слишком поспешил с ответом, — мягко улыбаясь, сказал Леонид Андреевич. Давай-ка порассуждаем более обстоятельно.

На пузырек в жидкости по закону Архимеда действует выталкивающая сила $F_A = \rho g V$, где ρ — плотность жидкости, а V — объем пузырька. Запишем для пузырька закон Ньютона:

$$ma = F_A - F_D.$$

Здесь a — ускорение пузырька, а величина F_D есть сила сопротивления при движении пузырька в жидкости. Сила сопротивления возрастет со скоростью, поэтому движение пузырька можно описать следующим образом. В момент отрыва пузырька от точки его образования (например, если он образуется на дне чайника или медленно выталкивается из тонкой трубки в аквариуме), его скорость близка к нулю, так что сила трения мала, и пузырек движется с ускорением. По мере возрастания скорости сила F_D растет, и наконец, устанавливается равновесие между F_D и F_A : пузырек после этого поднимается с постоянной скоростью. Величина F_D и, соответственно, скорость равномерно поднимающегося шарика зависят от вязкости жидкости: шарик в меде, например, поднимается гораздо медленнее, чем в воде. Кроме того, эта сила, как и сила Архимеда, зависит от размера пузырька.

Но допустим, для простоты, что вязкость исчезающе мала. Чем же тогда будет определяться закон движения пузырька? Рассмотрим начало его движения. Спрашивается, что такое масса m ? Кажется бы, $m = \rho' V$, где ρ' — плотность газа, заполняющего пузырек. Но это не так. Это предположение противоречит и нашим обыденным наблюдениям. Ведь плотность воздуха в тысячу раз меньше

плотности воды, поэтому воздушный пузырек в воде при отрыве «подпрыгивал» бы с ускорением в тысячу g , чего, конечно, на самом деле нет. Чтобы понять, чему равна масса m , рассмотрим, как поднимается пузырек. Если пузырек движется со скоростью v , то его обтекает жидкость, причем скорость обтекания пропорциональна v (рис. 12). Стало быть, сила Архимеда, поднимая пузырек, должна приводить в движение жидкость вокруг пузырька.

Для дальнейших рассуждений удобно пользоваться энергией, поскольку энергия сохраняется и этот способ рассуждений не подведет (если учитывать также переход энергии в тепло из-за сил вязкости).

Ясно, что жидкость, обтекающая пузырек, имеет определенную кинетическую энергию E тем большую, чем больше скорость пузырька. Чтобы найти E , нужно найти кинетическую энергию отдельных небольших порций жидкости, и затем сложить эти энергии. Но результат и так ясен: поскольку объем обтекающей жидкости пропорционален объему пузырька V , а ее скорость пропорциональна скорости пузырька, то

$$E = \frac{1}{2} A \rho V \cdot v^2.$$

Здесь A — некоторый коэффициент пропорциональности. Но ведь кинетическая энергия тела равна $mv^2/2$, где m — его масса. Стало быть, в качестве массы в закон Ньютона для пузырька мы должны подставить величину

$$m = A \rho V.$$

Здесь ρ — плотность жидкости. При желании к этой массе можно было бы добавить массу газа $m' = \rho'V$, но поскольку она ничтожно мала по сравнению с $A\rho V$, то ею можно пренебречь. Соответственно, можно пренебречь и силой тяжести газа, и с этой точностью разницы между воздушным и водородным пузырьками нет. Величину $m = A\rho V$ принято называть присоединенной массой. Итак, начальное ускорение пузырька $a_0 = F_A/m = g/A$, т.е. оно оказывается масштаба g .

— А как быть, если это не пузырек, а дробинка? — спросил Миша.

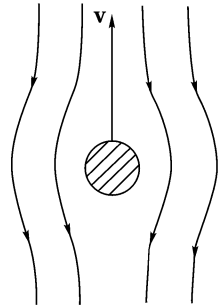


Рис. 12. Поток воды вокруг воздушного пузырька.

— У дробинки, разумеется, кроме присоединенной массы нужно учесть ее собственную массу, да и кроме силы Архимеда следует не забывать о силе тяжести для дробинки. Но вернемся к нашим рассуждениям. При возрастании скорости пузырька даже при исчезающе малой вязкости все равно рано или поздно вступит в игру сопротивление жидкости его движению. Сила сопротивления кроме вязкости может быть связана с образованием вихрей, отрывающихся, точнее, остающихся позади шарика. Шарик позади себя оставляет «дорожку» с вихревым движением. На это тоже требуется энергия. Скорость жидкости в этой дорожке пропорциональна v , а ее поперечный размер пропорционален радиусу пузырька r . Если пузырек прошел путь L , то он оставляет после себя кинетическую энергию дорожки

$$E_w = Cr^2Lv^2\rho.$$

Здесь C — некоторый численный коэффициент, ρ — плотность жидкости. На создание этой энергии требуется затратить работу. Она равна, очевидно, величине LF_D , поскольку сила сопротивления F_D как раз и связана с вихревым движением жидкости. Значит,

$$F_D = Cr^2v^2\rho.$$

Приравнивая эту величину силе Архимеда, мы найдем установившуюся скорость пузырька в жидкости с очень малой вязкостью:

$$v = \text{const}(gr)^{1/2}.$$

Здесь const — некоторая константа, которую можно выразить через C . Соотношение $v \sim \sqrt{gr}$ можно было бы получить и сразу из так называемых размерностных соображений. В самом деле, если вязкость и плотность газа в пузырьке исчезающе малы, то установившаяся скорость пузырька может выражаться только через величины g и r , а из них однозначным образом можно сконструировать выражение с размерностью скорости: \sqrt{gr} . Пузырек движется с ускорением только на пути в несколько своих диаметров, а затем он достигает стационарной скорости и поднимается равномерно.

— Я не случайно затратил так много времени на рассмотрение движения пузырька, поскольку мы сейчас перейдем к знакомству с жидкостью, имеющей анизотропную массу, и все эти рассуждения нам будут очень кстати.

— А все же, какой пузырек движется быстрее — воздушный или водородный? — спросил Миша.

— Я и сам точно не знаю, — ответил Леонид Андреевич. Я только хотел рассказать тебе, что плотность газа практически не влияет на скорость движения пузырька. Значительно большее влияние оказывает состояние поверхности раздела жидкость–газ. Изменение физических свойств поверхностной пленки (из-за различия химического состава газа) действительно может оказать воздействие на движение пузырька, но этот вопрос уведет нас далеко от того, что нам сейчас интересно.

А теперь начнем знакомиться с жидкостью, у которой массовая плотность поперек магнитного поля ρ_{\perp} значительно больше ее обычной плотности ρ_{\parallel} . Будем считать, что величина $\sqrt{\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}} = \sqrt{1+b^2} = \beta^{-1} \cong b$ значительно больше единицы. Пусть пузырек поднимается в такой сильно анизотропной жидкости, причем магнитное поле направлено под некоторым углом α к вертикали (рис. 13).

В силу того, что жидкость является легко инерционной вдоль магнитного поля, обтекание пузырька жидкостью будет происходить таким образом, что линии тока будут прижиматься к направлению силовых линий магнитного поля и пузырьку будет легче двигаться вдоль направления магнитного поля, как показано на рис. 11. Но нельзя ли поточнее определить все характеристики течения?

Оказывается, это вполне возможно. Дело в том, что движение жидкости хотя и сложнее движения твердых тел, но является механическим движением и поэтому оказывается легко доступным для теоретического описания. Для этого жидкость нужно разбить на множество жидких частиц и написать для них уравнения Ньютона с учетом силы тяжести и сил взаимодействия между частицами. В результате получается так называемое уравнение Эйлера. А с учетом вязкости его несколько более сложное обобщение называется уравнением Навье–Стокса. Так вот, оказывается, что с помощью уравнения Эйлера задачу о движении жидкости с анизотропной массой можно привести к задаче о течении жидкости с изотропной массой. Для этого достаточно вместо координаты z вдоль магнитного поля ввести новую

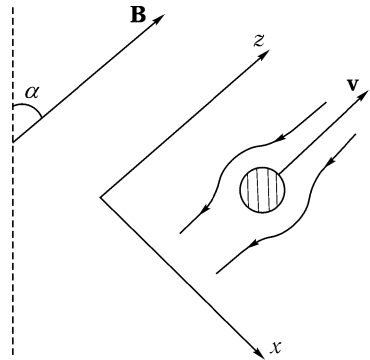


Рис. 13. Движение пузырька в жидкости, обладающей сильной анизотропией массы.

координату $z' = z\beta$, так что сравнительно большим изменениям z соответствуют умеренные изменения z' . Другими словами, при переходе от z к z' масштаб вдоль магнитного поля уменьшается. Соответственно, нужно изменить масштаб и для скорости: $v'_{\parallel} = v_{\parallel}\beta$. В переменных z' и v'_{\parallel} уравнение становится обычным (т.е. для изотропной жидкости с плотностью ρ_{\perp}), но при этом меняется выражение для силы тяжести, а именно, новая сила $\rho_{\parallel}g'_{\parallel}$ равна $\rho_{\parallel}bg_{\parallel} = \rho_{\perp}g_{\parallel}\beta$. Так как $\beta \ll 1$, то в новых переменных ускорение $\mathbf{g}' = b\rho_{\parallel}\mathbf{g}_{\parallel} + \rho_{\parallel}\mathbf{g}_{\perp}$ близко к направлению магнитного поля. Пузырек в новых переменных тоже меняет свою геометрию: он становится похожим на плоскую лепешечку, ориентированную так, что ее ось симметрии направлена вдоль магнитного поля. Теперь мы можем полностью описать движение пузырька в анизотропной жидкости. Для этого рассмотрим сначала движение пузырька в координатах x, z' , и для того, чтобы «танцевать от привычной печки», повернем систему координат так, чтобы эффективная сила тяжести была направлена вниз (рис. 14). Можно показать, что при этом

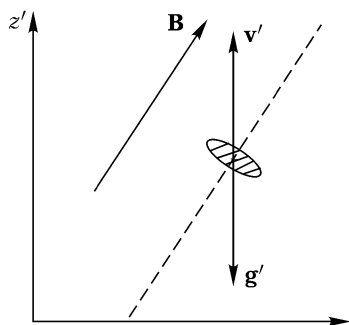


Рис. 14. Воздушный пузырек в преобразованной системе координат (x', y') .

горизонтальная плоскость в повернутых координатах x, z' совпадает с горизонтальной плоскостью в координатах x, y . Пузырек в координатах x, z' выглядит как лепешечка, ориентированная поперек магнитного поля. По этой причине он будет подниматься не точно вверх, а будет немного уходить в сторону, но этот уход мал, поскольку в координатах x, z' магнитное поле имеет направление, близкое к вертикальному. Далее можно опять воспользоваться законом Ньютона:

$$ma = F_A - F_D,$$

где по-прежнему a — ускорение, m — присоединенная масса, F_A — сила Архимеда, F_D — сила сопротивления. Присоединенная масса пропорциональна ρ_{\perp} , а не ρ , так как моделирующая изотропная жидкость имеет плотность ρ_{\perp} . Так как эта масса образуется за счет кинетической энергии жидкости, обтекающей тело, то она должна быть пропорциональна объему обтекающей жидкости. Этот объем, конечно, больше объема тела, потому что обтекается тонкий диск толщиной $r\beta \ll r$, а обтекающий объем $\sim r^3$. Поэтому если выразить присоединенную массу в прежнем виде через объем

и скорость пузырька, то для учета указанного обстоятельства нужно написать

$$m = A' \rho_{\perp} V b,$$

где коэффициент A' несколько отличается по величине от A из-за изменения геометрии, но остается порядка A . Сила Архимеда во вспомогательной системе координат равна $F_A = \rho_{\parallel} g^J V \cong \rho_{\perp} g_{\parallel} V \beta$. Отсюда видно, что в нашей вспомогательной системе координат ускорение пузырька без учета силы сопротивления равно примерно $g_{\parallel} \beta^2$. Сила сопротивления F_D также содержит плотность ρ_{\perp} , т. е. $F_D = C' r^2 (v)^2 \rho_{\perp}$, где $C' \cong C$. Приравнивая силы Архимеда и сопротивления и учитывая, что объем диска в β^{-1} раз меньше объема шара, мы найдем величину установившейся скорости пузырька вдали от точки его отрыва в нашей вспомогательной системе координат

$$v' \sim \sqrt{g_{\parallel} r} \beta.$$

Теперь вернемся к исходной системе координат, т. е. к анизотропной жидкости. Для этого рис. 14 нужно повернуть так, чтобы направление магнитного поля вернулось в свое прежнее положение, а затем полученную картину нужно растянуть вдоль магнитного поля в β^{-1} раз. При этом во столько же раз возрастут скорость и ускорение пузырька (рис. 15). Умножив найденные выше вспомогательные величины a' и v' на β^{-1} , мы увидим, что пузырек в анизотропной жидкости в момент отрыва имеет гораздо меньшее ускорение $a_{\parallel} \sim g_{\parallel} \beta$, а установившаяся скорость сохраняет прежний порядок величины $v \sim \sqrt{g_{\parallel} r}$. Заметим, что $a_{\perp} \sim g_{\perp} \beta^2$ значительно меньше a_{\parallel} , если только магнитное поле не «прилегает» к горизонтальному направлению.

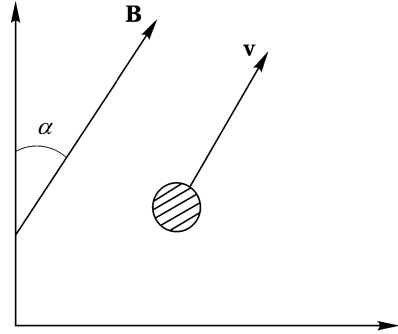


Рис. 15. Воздушный пузырек в обычной системе координат.

Разумеется, наши рассуждения очень грубы, но они все же схватывают главный эффект анизотропии. Пузырьки начинают подниматься не вертикально вверх, а наклонно, почти вдоль силовых линий магнитного поля. Увеличение поперечной массовой плотности приводит к тому, что начальное ускорение пузырька становится значительно меньше, а установившаяся скорость

примерно сохраняет свое значение. Происходит это потому, что для величины ускорения действительно важна массовая плотность жидкости, так что возрастание поперечной массы замедляет весь процесс.

А почему установившаяся скорость слабо зависит от анизотропии? Потому что меняется характер обтекания вокруг пузырька: область обтекания становится вытянутой вдоль магнитного поля, так что ее продольный размер оказывается в β^{-1} раз больше поперечного размера. Возмущение скорости обтекания, соответственно, уменьшается, и поэтому сила сопротивления не испытывает существенного увеличения.

Таким образом, в анизотропной жидкости пузырьки поднимаются «косо», почти вдоль направления магнитного поля.

А что происходит с дождевыми каплями? Их ускорение, конечно, не очень сильно чувствует анизотропию воздуха, так как воздух на три порядка легче воды. Если сами капли имеют анизотропную массу, то они будут падать с ускорением вдоль магнитного поля, как знакомые нам мячики, а затем установится скорость равномерного падения капель из-за сопротивления воздуха. Скорость опять будет направлена почти вдоль магнитного поля, если $\beta \ll 1$. Действительно, при заданной скорости капли сила сопротивления в продольном направлении будет значительно меньше поперечного сопротивления. Поэтому капля будет двигаться, в основном, вдоль поля, медленно сползая в поперечном направлении.

— Ну вот, Миша, — сказал Леонид Андреевич, — мы теперь знаем очень много о жидкостях и газах с анизотропной массой. Пора от слов перейти к реальной жизни. Я, разумеется, не собираюсь показывать тебе пузырьки в анизотропной жидкости — они ведут себя так, как и полагается согласно нашим рассуждениям.

Давай лучше познакомимся с фонтанами. Компьютер, который управляет нашими телевизионными экранами, имеет в своей памяти много различных видовых видеофильмов. В частности, один из них снят в Петродворце и демонстрирует его знаменитые фонтаны. В память компьютера можно заложить программу, которая вместо течения обычной воды покажет потоки воды сильно анизотропной. Леонид Андреевич немного поколдовал с клавиатурой компьютера и вдруг зал, в котором они находились, засверкал яркими красками летнего парка Петродворца, а воздух наполнился звуками падающей воды многочисленных фонтанов.

— Теперь «включаем магнитное поле», — сказал Леонид Андреевич и набрал ряд знаков на клавиатуре компьютера.

Еще мгновение, и все фонтаны разом перекосятся, а падающие струи так резко повернулись, что Миша даже ухватился за ручки кресла — ему показалось, что пол наклонился.

— То, что повернулись падающие струи воды — это понятно, — сказал Леонид Андреевич. — Ведь свободно падающие тела при сильной анизотропии массы двигаются почти вдоль пола. Примерно в том же направлении падают и мелкие брызги в своем установившемся движении в воздухе с анизотропной массовой плотностью. Разберемся лучше с восходящей частью фонтанов.

Рассмотрим сначала вертикальный, точнее, бывший ранее вертикальным, фонтан. Вода с анизотропной массой, поднимающаяся сначала в трубе, похожа на ряд бусинок, нанизанных на струну и двигающихся одна вслед за другой. С движением каждой из таких бусинок мы уже знакомы. Вспомним, что при этом скорость направлена по вертикали, однако импульс при произвольном наклоне магнитного поля направлен не вертикально, а почти вдоль магнитного поля, поскольку по предположению $\rho_{\perp} \gg \rho_{\parallel}$. Поэтому, хотя вылетающая из вертикальной трубы жидкость движется первое время по вертикали, она не может подняться высоко вверх: ее импульс вдоль магнитного поля мал.

По этой причине при включении анизотропии вертикальный фонтан резко уменьшается по высоте, а его струи начинают уходить в сторону из-за того, что вылетающая вверх жидкость имеет большую составляющую поперечного импульса.

Если до включения поля фонтаны были косыми, то после включения поля с ними происходит вот что. Тот фонтан, который оказался направленным поперек магнитного поля, укорачивается, а направленный вдоль поля становится даже длиннее и выше, чем это было в отсутствие магнитного поля, как показано на рис. 16 а, б. Картину образования фонтанов можно построить и более точно, чем согласно этим качественным рассуждениям. Для этого нужно опять преобразовать систему координат и перейти к изотропной жидкости, т. е., как мы знаем, масштаб вдоль магнитного поля нужно уменьшить в $\beta^{-1} \cong b$ раз, а продольную компоненту ускорения силы тяжести увеличить в β^{-1} раз. При этом трубы повернутся, несколько наклонится плоскость горизонта, но сила тяжести по-прежнему будет направлена перпендикулярно преобразованной горизонтальной плоскости (рис. 17).

Теперь из труб «выбросим» фонтаны жидкости с плотностью ρ_{\perp} . Как мы видим, трубы 1, 2 очень сильно наклонены к новому горизонту, из них будут выбрасываться наклонные фонтаны. Труба 3 почти «вертикальна» в новой системе координат, т. е.

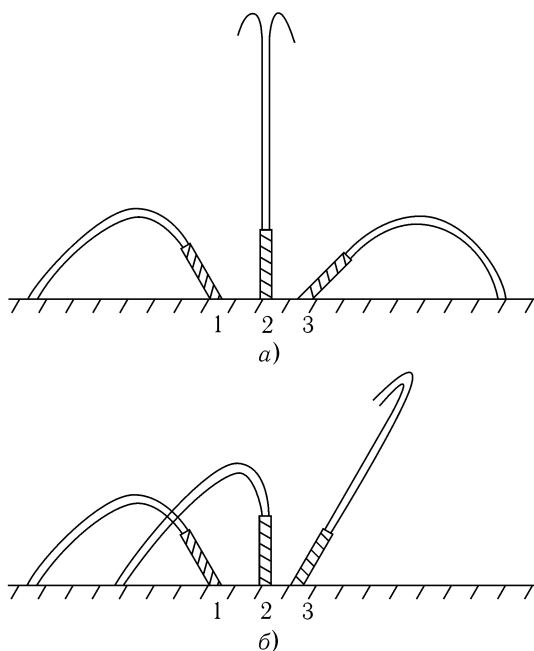


Рис. 16. Образование фонтанов в случае обычной жидкости (а) и в случае сильно анизотропной жидкости (б).

направлена примерно перпендикулярно к новой горизонтальной плоскости. Если теперь «растянуть» полученную картину в β раз вдоль направления магнитного поля, то «горизонт» и трубы повернутся в свои прежние положения, а фонтаны окажутся такими, как на рис. 16 б.

— Хороший компьютер, — сказал Леонид Андреевич, — легко может произвести эти преобразования с потоками и показать имитацию влияния анизотропии плотности.

— А сейчас, — добавил он, — мы увидим еще что-то интересное.

Он опять поколдовал на клавиатуре компьютера и на экранах зала вспыхнула уже знакомая Мише картина прибора на берегу тропического моря. Впереди Миши к берегу бежали волны, а позади него шумели пальмы.

— А теперь давай-ка включим сильное магнитное поле, — сказал Леонид Андреевич, и через мгновение произошло чудо: мор-

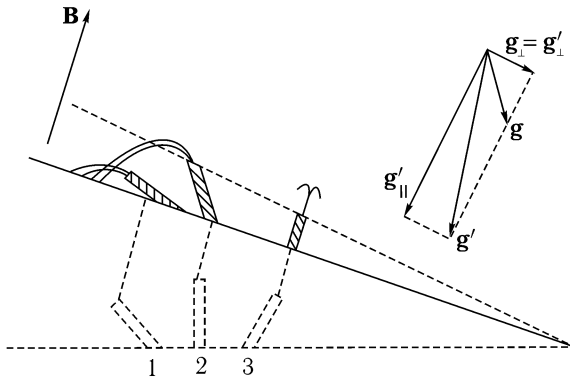


Рис. 17. Изображение фонтанов с анизотропной массой в преобразованной системе координат.

ские волны вдруг полностью преобразились. Они стали значительно выше. И, выстроившись в тесную очередь, как люди, медленно двинулись чередой, чтобы плавно разрушиться на побережье.

— Что это такое? — спросил от неожиданности Миша.

— Да, все то же самое, — ответил Леонид Андреевич. Это опять результат проявления сильной анизотропии масс, и мы легко можем сообразить, чем новая картина волн отличается от привычного нам морского прибора. Воспользуемся опять переходом к вспомогательной системе координат, или, лучше сказать, построим картину волн в анизотропной жидкости с помощью привычных нам обычных волн.

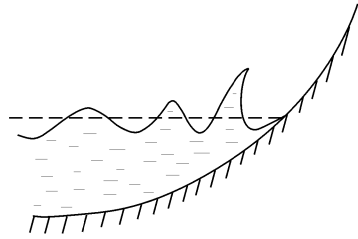


Рис. 18. Волны в обычном море.

Итак, пусть волны, накатывающиеся на берег моря, выглядят как на рис. 18. Это привычные нам волны в изотропной воде. Теперь включим сильное магнитное поле и перейдем к вспомогательной системе координат, вначале просто для спокойного моря. Для этого всю картину сжимаем вдоль направления магнитного поля в β^{-1} раз, а продольную компоненту ускорения силы тяжести увеличиваем в β^{-1} раз (рис. 19). Для удобства еще повернем картинку, чтобы море опять стало горизонтальным (рис. 20).

Теперь на новом «тяжелом» море с плотностью жидкости в β^{-1} раз тяжелее обычной создадим волны (см. пунктир на рис. 20).

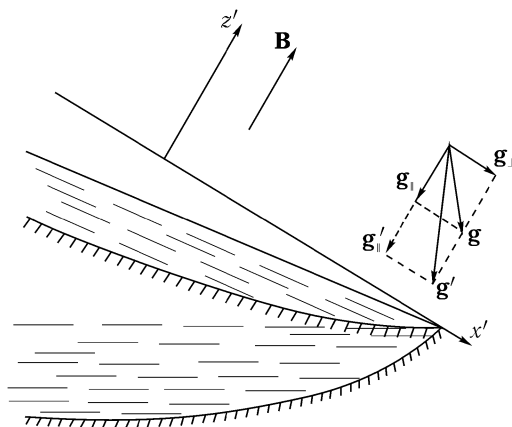


Рис. 19. Преобразование схемы для определения формы волн в сильно анизотропной жидкости.



Рис. 20. Форма волн в сильно анизотропном море в преобразованной системе координат (x', y') .

«Тяжелое море», как мы видим на рис. 20, очень мелкое. Поэтому и набегающие на берег волны, высота которых сравнима с глубиной воды, гораздо меньше по абсолютной амплитуде. Если представить себе естественное масштабирование морских волн, то разумно допустить, что и расстояние между гребешками уменьшится.

Если принять, что продольный масштаб, т. е. расстояние между гребешками, уменьшается также примерно в β^{-1} раз, то период колебаний волн в искусственном «тяжелом» море будет примерно тем же самым, что и в обычном море, но фазовая скорость волн очень сильно замедлится: волны не спеша будут шествовать к берегу.

Теперь совершим обратное преобразование к обычной системе координат, для чего картину рис. 18 опять повернем в наклонное положение, как на рис. 19, а затем произведем растяжение вдоль магнитного поля в $\beta^{-1} \cong b$ раз. То, что мы после этого увидим, изображено на рис. 21.

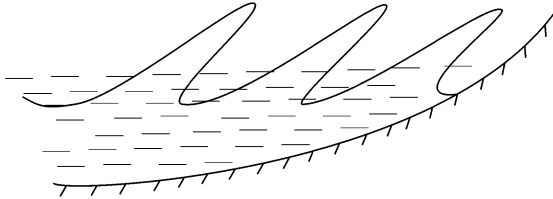


Рис. 21. Волны в сильно анизотропном море.

Как мы видим, все волны наклонились вперед. Это произошло только потому, что мы так выбрали направление магнитного поля. Поворотом поля против часовой стрелки эти волны можно сначала установить вертикально, а затем даже наклонить назад, но гребешки у разрушающихся волн при этом все равно будут образовываться спереди. Фазовая скорость волн сильно замедляется: высокие и наклонные вперед или назад волны будут медленно продвигаться к берегу, а затем разрушаться так, что падающие перед волной струи воды будут скользить вдоль направления магнитного поля.

— Ну, на сегодня хватит, — сказал Леонид Андреевич. — В следующий раз приходи через неделю.

— Леонид Андреевич, — вежливо обратился к академику Миша. — У меня есть друг Саша, он учится на физическом факультете университета и очень интересуется физикой. Можно ему прийти со мной?

— А на каком он курсе?

— Он учится на третьем курсе.

— Тогда передай ему вот эту задачу и в следующий раз приходите вместе.

Он протянул Мише исписанные листки, из которых Миша мало что понял. Но к его удивлению, когда он отдал листки Саше, тот довольно быстро в них разобрался и даже стал пытаться объяснять Мише, что он увидел у академика.

Задача №4

Уравнения идеальной гидродинамики для жидкости с анизотропной массой в поле силы тяжести привести к изотропному виду с помощью соответствующего преобразования координат.

Пусть жидкость является анизотропной, так что $\rho_{\perp} \gg \rho_{\parallel}$, где индексы \perp, \parallel указывают на направления движения поперек и вдоль магнитного поля, соответственно. Введем координату z вдоль направления магнитного поля. Тогда уравнения Эйлера и уравнение несжимаемости можно записать в виде:

$$\begin{aligned}\rho_{\parallel} \frac{d}{dt} v_z &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_{\parallel} g_z, \\ \rho_{\perp} \frac{d}{dt} \mathbf{v}_{\perp} &= -\mathbf{v}_{\perp} p - \rho_{\parallel} \mathbf{g}_{\perp}, \\ \frac{\partial v_{\parallel}}{\partial z} + \mathbf{v}_{\perp} \mathbf{v}_{\perp} &= 0.\end{aligned}$$

Здесь производная $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_z \frac{\partial}{\partial z} + \mathbf{v}_{\perp} \mathbf{v}_{\perp}$. Мы считаем, что сила тяжести определяется величиной $\rho = \rho_{\parallel}$.

Идея сведения уравнений к уравнениям изотропной жидкости заключается в том, чтобы путем введения нового масштаба вдоль направления z устранить разницу в поведении жидкости вдоль и поперек магнитного поля. Пусть $v'_z = \beta v_z$; $z' = \beta z$, где штрихом обозначены вспомогательные скорость и координаты. Если $\beta \ll 1$, то большим изменениям v_z и z будут отвечать малые изменения штриховых переменных. Другими словами, в штрихованных переменных появляется возможность замедления процесса. При подходящем подборе величины β можно добиться, чтобы продольные и поперечные движения протекали с одинаковой скоростью, т. е. чтобы в этих переменных жидкость стала изотропной. Итак, заменим z, v_z , соответственно, на z', v'_z . Нетрудно видеть, что при этом полная производная по времени $\frac{d}{dt}$ свой вид не меняет, уравнение несжимаемости также остается прежним, а компоненты уравнения Эйлера видоизменяются:

$$\begin{aligned}\rho_{\parallel} \beta^{-2} \frac{d}{dt} v'_z &= -\frac{\partial p}{\partial z'} - \beta^{-1} \rho_{\parallel} g_z, \\ \rho_{\perp} \frac{d}{dt} \mathbf{v}_{\perp} &= -\mathbf{v}_{\perp} p - \rho_{\parallel} \mathbf{g}_{\perp}.\end{aligned}$$

Если выбрать $\beta^2 = \rho_{\parallel}/\rho_{\perp}$ и ввести новое ускорение силы тяжести с продольной компонентой $g'_z = g_z \sqrt{\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}}$, то полученное уравнение становится полностью изотропным. В новых координатах оно описывает течение изотропной жидкости с массовой плотностью ρ_{\perp} и это течение в точности соответствует течению анизотропной жидкости в исходной системе координат. Если отношение $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel} = \beta^{-2}$, то $z' = z\beta$, $v'_z = v_z\beta$, т. е. мы получаем именно то преобразование, которое было рассмотрено в основном тексте. По тексту было также видно, как им следует пользоваться. А именно, жидкость вместе с ее границами, т. е. сосудом, дном водоема, свободной поверхностью и т. д., следует сначала сжать вдоль направления магнитного поля \mathbf{B} , уменьшив масштаб в β^{-1} раз, затем нужно увеличить продольную компоненту ускорения силы тяжести в β^{-1} раз. После этого удобно повернуть полученную картину, чтобы сила тяжести была направлена вниз. Поведение «утяжеленной» жидкости с плотностью $\rho_{\perp} = \beta^2\rho$ в этой новой геометрии моделирует поведение анизотропной жидкости.

7. В стране неизотропных масс

На следующую встречу с академиком Миша пришел с Сашей. Леонид Андреевич очень любезно познакомился с Сашей, а затем в мягкой манере разговора сказал:

— Ну, вот что, профессора. Я хочу пригласить вас совершить со мной небольшое путешествие. Прошу вас следовать за мной.

Он подошел к двери, также расположенной внутри кабинета, но которую Миша как-то не успел заметить раньше. Ребята вслед за академиком вошли в комнату сравнительно небольшого размера, но устроенную так же, как тот зал, где Леонид Андреевич показывал опыты Мише. Сама комната была круглая, а стены и потолок объединялись в купол белого цвета. Посредине комнаты стояли три кресла и перед средним креслом был расположен штурвал, как на самолете, с небольшим числом приборов на приборной доске, располагавшейся перед всеми тремя креслами.

— Миша, ты умеешь водить машину? — спросил Леонид Андреевич.

— Только немного, — ответил Миша, и сразу покраснел. На самом деле он не умел и не хотел уметь водить машину. Ему были противны шумные городские улицы, заполненные бездушными машинами хищного вида, которые, как ему казалось, только и норовят кого-нибудь задавить. Насколько приятнее быть за городом, где нет ни шума, ни машин, ни суеты.

— Это неплохо, — сказал Леонид Андреевич. — Садись за штурвал и будешь хозяином нашего путешествия. А мы с Сашей будем внимательно наблюдать за всем происходящим. Управлять нашим экипажем будет гораздо проще, чем самолетом и автомобилем.

Мы с вами находимся под куполом, составленным из телевизионных экранов, которые управляются большим суперкомпьютером. Телевизоры создают стереоскопическое изображение, так что у вас будет полное ощущение того, что мы действительно перемещаемся в открытой платформе. Не бойтесь, если вам покажется, что мы падаем в яму или налетаем на дерево — это только иллюзия и реальной опасности нет.

Миша сел за штурвал в центральное кресло, Леонид Андреевич — справа от него, а Саша — слева. Перед Леонидом Андреевичем оказалась расположенная клавиатура компьютера, а перед Сашей — огромный бинокль. Леонид Андреевич поколдовал с клавиатурой, и вдруг все вокруг них резко изменилось — они оказались на зеленом лугу с типичной природой Подмоскovie: в километре от них паслись коровы, за ними виднелась голубая река и лес за рекой, а километрах в двух на крутом берегу реки — небольшая деревня с церквушкой. Погода была хоть и немного облачная, но ясная и светлая. Мише показалось даже, что он погрузился в запахи луговых трав.

— Миша, — сказал Леонид Андреевич, — теперь ты можешь начать наше путешествие. Круглый пол нашей бывшей комнаты будет казаться нам открытой платформой, которая может перемещаться в любом направлении. Ногами ты можешь регулировать скорость или тормозить с помощью двух педалей, а штурвалом — управлять движением, как рулем машины. Если ты не будешь тянуть штурвал на себя или отжимать его от себя, то мы будем перемещаться по грунту или воде, если выедем на воду. При отжатии штурвала от себя, мы можем углубиться либо в грунт, либо в воду, а если потянешь штурвал на себя — мы взмоем в небо.

Саша и Миша, прошу вас не вставать с ваших кресел, что бы ни случилось. Помните, что это всего лишь стереоскопическое кино. Правда, в ваши годы, когда я первый раз попал в стереоскопическое кино, я чуть не спрятался под стул, увидев, что прямо на меня из экрана поехала пожарная машина, обрушившая на зрителей мощные струи воды. Итак, Миша, ты перемещай наш экипаж, как тебе нравится, а мы с Сашей будем внимательно наблюдать.

Да, ведь я забыл вам сказать самое главное. Мы с вами будем путешествовать не в обычной стране, а в анизотропной. Нашему суперкомпьютеру было дано задание просчитать, что произойдет со всеми природными явлениями, если масса всех тел станет анизотропной. Точнее, если продольная и гравитационная массы сохраняют свое значение, а поперечная увеличится в несколько раз. Компьютеру было дано задание выбрать направление магнитного поля Земли в качестве направления анизотропии.

Как вы знаете, стрелка компаса всегда показывает направление с юга на север. Но это направление соответствует лишь горизонтальной составляющей магнитного поля. На Земле магнитное поле направлено по горизонтали только на экваторе, а на остальных широтах оно имеет вертикальную компоненту. На полюсах

именно вертикальная компонента доминирует, а горизонтальная — равна нулю. На широте Москвы, где мы с вами сейчас находимся, магнитное поле направлено под углом к горизонту примерно в 20° . Именно вдоль этого направления и сохраняется прежнее значение инерционной массы, а в поперечном направлении масса всех материальных тел и веществ предполагается существенно больше, чем в продольном.

Суперкомпьютер только недавно закончил все вычисления, и сегодня мы в первый раз можем познакомиться с результатами компьютерного моделирования.

Миша и Саша внимательно слушали академика, но еще более внимательно осматривались вокруг, пытаясь заметить что-нибудь необычное. Но на первый взгляд все выглядело абсолютно привычным. Где-то высоко в небе кружил коршун. На лугу мирно паслись коровы, слышалось стрекотанье кузнечиков и где-то далеко жужжал самолет.

Вдруг все трое невольно вскинули головы вверх: навстречу, как им показалось, довольно низко летел самолет. Но не успел он пролететь над их головами, как звук моторов стал затихать, как если бы самолет стал удаляться. Миша знал, что когда летят реактивные самолеты, то сначала появляется сам самолет и лишь затем со значительным отставанием перемещается слышимый источник звука, т. е. как бы его звуковое изображение. Но здесь было все наоборот: источник звука, казалось, летел впереди самолета. Озадаченные Миша и Саша одновременно посмотрели на академика, как бы задавая ему немой вопрос.

Леонид Андреевич немного задумался, а затем сказал: «Кажется, я понял, что нас удивило в этом самолете».

— В том мире, в каком мы оказались, все массы анизотропны, включая массы молекул воздуха. В направлении поперек магнитного поля масса любой молекулы значительно превышает ее продольную массу. Следовательно, в своем тепловом движении молекулы гораздо быстрее двигаются в продольном направлении по сравнению с поперечным. А это значит, что скорость звука имеет разное значение для продольного и поперечного направлений: их отношение обратно пропорционально корню квадратному из отношения соответствующих масс: $C_{s\parallel}/C_{s\perp} = \sqrt{m_{\perp}/m_{\parallel}}$. Здесь через C_s обозначена скорость звука, а индексы \parallel и \perp относятся, соответственно, к продольному и поперечному направлениям. Пусть в точке A находится самолет; и академик нарисовал на бумаге точку A , а затем направление магнитного поля \mathbf{B} (рис. 22).

Если $m_{\perp} \gg m_{\parallel}$, то звук будет распространяться не в виде сферических волн, а в виде эллипсоидальных волн (см. рис. 22). Вдоль поля он распространяется быстрее, а поперек — медленнее.

В результате возникает два эффекта. Один из них типа «слуховой трубки», которыми в прошлом веке пользовались старички и старушки, страдавшие глухотой. Они прикладывали к уху трубку и направляли ее в сторону говорящего. Из рис. 22 видно, что звуковая энергия распространяется преимущественно вдоль поля, как в слуховой трубке. Поэтому в поперечном направлении звук будет более глухим. Второй эффект — это несферичность волн, приводящая к кажущемуся смещению источника звука. Когда мы пытаемся определить направление, откуда пришел звук, мы поворачиваем голову так, чтобы звук одновременно попадал в оба уха. Другими словами, мы находим направление нормали к фронту распространяющейся звуковой волны.

Допустим, что мы находимся в точке C (см. рис. 22). Определяя на слух положение источника звука по нормали к волновому фронту, мы припишем ему точку A' вместо A . Если это, например, самолет, летящий на рис. 22 справа налево, то источник звука нам покажется летящим с опережением по отношению к самолету. На широте Москвы магнитное поле направлено наклонно к горизонту, и опережение звука будет, если самолет летит с севера на юг. Напротив, если самолет летит с юга на север, т.е. слева направо на рис. 22, то мы припишем источнику звука точку A' , которая будет отставать от реального положения самолета в точке A .

Итак, в анизотропной атмосфере ориентироваться по звукам гораздо труднее — каждый раз нужно ориентироваться еще и в том, куда направлено магнитное поле. Говорят, что у птиц есть свой внутренний компас. Может быть, им это будет легче, но нам с вами нужно будет всегда следить за показаниями компаса, который, к счастью, имеется у нас на приборной доске.

— Ну, а теперь, — обратился он к Мише, — попробуем немного попутешествовать. Поедем, например, к ближайшей деревне.

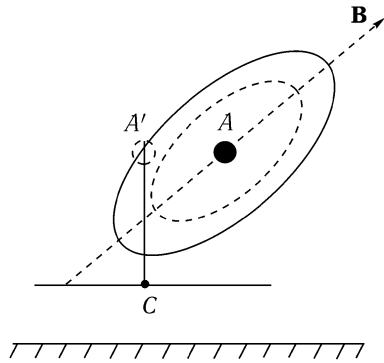


Рис. 22. Распространение звука в сильно анизотропной атмосфере.

Миша нажал педаль акселератора и, медленно выправив руль, направил экипаж-платформу к деревне. Они не спеша продвигались по зеленому лугу.

— Леонид Андреевич, — обратился Саша к академику, — ведь если воздух имеет анизотропную плотность, то и форма самолета должна быть так видоизменена, чтобы учесть этот эффект. Разве не так?

— Ты совершенно прав, — сказал Леонид Андреевич, естественным образом перейдя на «ты». — Правда, многого на этом не выиграть. Когда пролетает самолет, он оставляет после себя струи воздуха, направленные вниз. Самолет передает им вертикальный импульс, за счет которого и создается подъемная сила на крыльях.

В воздухе, с анизотропной плотностью эти струи будут, в основном, направлены вдоль поля, т. е. под углом к вертикали. Но передаваемый импульс будет опять иметь вертикальное направление. Вспомним, как падал мячик с анизотропной массой под действием силы тяжести: он тоже падал под углом, но приобретал только вертикальную компоненту импульса. Таким образом, у самолета в анизотропном воздухе подъемная сила по-прежнему направлена вертикально и создается, в основном, за счет струй воздуха вдоль магнитного поля, т. е. с прежней величиной плотности.

На чем можно немного выиграть — это на форме крыла. Вихревое течение вокруг крыла в анизотропном газе несколько отличается от вихревых потоков изотропного газа. Поэтому форму крыла нужно оптимизировать под новую вихревую картину.

За разговорами они незаметно продвинулись вплотную к деревне.

— Посмотрите! — воскликнул Миша. — Здесь у всех домов какие-то крыши кособокие — как будто их кто-то сдвинул набежень.

— Это вполне понятно, — откликнулся Леонид Андреевич. — Ведь мы с вами знаем, что в стране анизотропных масс дождевые капли должны падать косо, вдоль направления магнитного поля даже в отсутствие ветра. Ветер, разумеется, может вносить свои отклонения, но в основном направление дождя задается вектором \mathbf{V} . А как бы вы стали строить дом, зная, что дожди всегда будут косые с направлением с севера на юг? Вы, очевидно, сделали бы северный склон крыши гораздо шире — с более широким козырьком или даже навесом. Именно так и построены эти дома.

Да, действительно, как теперь заметили молодые люди, все дома были ориентированы таким образом, что северный скат крыши был значительно шире южного.

— Более того, — продолжал Леонид Андреевич, — я уверен, что и внутренняя планировка у них почти одинакова. Вспомните, что струи воды из водопроводных кранов должны тоже падать вдоль магнитного поля, т. е. достаточно косо. Ясно, что гораздо удобнее иметь кран, из которого вода струится косо наружу, а не вовнутрь — так и умываться удобнее и на кухне удобнее пользоваться водопроводом. Значит, в этих домах кухни и ванны, если они есть, должны располагаться в северной части дома.

— Посмотрите, — сказал Миша, — а вон там огородник поливает свои грядки.

Все посмотрели в ту сторону, куда указал Миша, и увидели типичного сельского жителя, который поливал грядки с помощью шланга. Однако, в отличие от обычного полива с помощью струи, крестьянин пользовался длинной трубкой. Одним концом она была соединена со шлангом, а на другом конце была приделана сеточка, как на лейке. Человек то поднимал трубу вверх, то водил ею на более низком уровне.

Теперь всем было ясно и без разъяснений, почему пришлось так действовать. Струйки и капли воды из сетки следовали точно по направлению поля и выливались на землю там, куда они падали из огромной лейки, следуя вдоль **В**.

— Обратите внимание, как бегают маленькая собачка, — раздался опять голос Миши.

Собачка действительно бежала как-то кособоко, опуская свои лапы под углом к поверхности дорожки.

— Она тоже чувствует анизотропию масс своих ног, — разъяснил Леонид Андреевич. Обратите внимание: она несколько медленнее обычного переносит лапу вперед, а затем быстро опускает ее, но не отвесно, а в большей мере вдоль поля. Ей так легче быстро бежать, она просто ногами чувствует, в каком направлении ее лапы менее массивны. Впрочем, давайте двинемся дальше, например, на реку.

Миша аккуратно вырулил экипаж к берегу реки и потом также не спеша опустил его прямо на воду. Зеркально чистая поверхность воды окружала их со всех сторон.

— Странно, — как бы размышляя вслух, сказал Саша. Река здесь совсем неширокая, а вода течет очень медленно.

— Да, — подтвердил Леонид Андреевич, — течение здесь дей-

ствительно очень слабое. Впрочем, должен сразу заметить, что течение реки не зависит от ее ширины, а определяется ее глубиной.

— Разве так? — спросил Саша.

— Да, — ответил Леонид Андреевич. — Сейчас я вам объясню.

Обозначим через ℓ глубину реки, а через h — ее ширину. Обычно глубина реки гораздо меньше ее ширины, т.е. $\ell \ll h$. Поэтому влияние берегов на течение воды в реке практически несущественно. Попробуем теперь найти зависимость скорости течения от глубины реки и ее уклона γ (рис. 23).

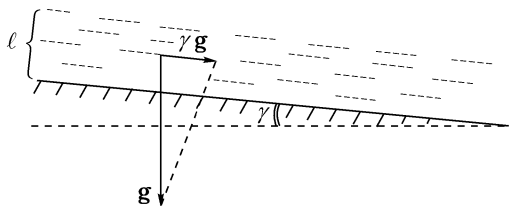


Рис. 23. Течение реки под действием горизонтальной составляющей силы тяжести.

Нетрудно видеть, что скорость течения воды определяется уклоном: только компонента γg ускорения вдоль поверхности реки служит движущей силой для ее течения.

Как же найти зависимость скорости течения от γg ? Для этого можно использовать очень общий и продуктивный метод теории размерности. Величина γg имеет размерность см·сек⁻². Если мы хотим построить величину с размерностью скорости, т.е. см·сек⁻¹, то мы можем поступить следующим образом. Умножим γg на величину с размерностью длины и мы получим в результате новую величину с размерностью квадрата скорости. Следуя этому рецепту, конструируем величину

$$v = C\sqrt{\gamma g \ell},$$

где C — безразмерная константа, а ℓ — глубина реки. Как мы видим, величина v имеет размерность скорости. При подходящем выборе величины константы C это и будет скорость реки. Ведь других размерных величин в рассматриваемой плоскости у нас нет.

Итак, скорость реки при заданном уклоне пропорциональна корню квадратному из ее глубины, а при увеличении уклона она

меняется как корень квадратный от уклона. Почему же довольно часто мы связываем скорость реки с ее шириной? Дело в том, что это впечатление создается, когда мы наблюдаем одну и ту же реку на ее узких и широких участках. Полный поток воды в единицу времени (его называют дебет) равен, очевидно, $P = v\ell h$, где h — ширина реки. На ограниченном участке реки, на котором она не становится полноводнее за счет ее притоков, величину P можно считать постоянной. Поэтому там, где ширина реки больше, глубина реки и ее скорость должны быть меньше. И хотя скорость реки определяется исключительно ее глубиной и уклоном, косвенная зависимость глубины от ширины создает иллюзию того, что скорость реки зависит от ее ширины.

До сих пор все наши рассуждения относились к обычной реке с изотропной массой. Если, как мы условились, масса неизотропна и поперечная масса во много раз больше гравитационной, то и скорость реки станет много меньше. Она пропорциональна корню квадратному из отношения продольной массы к эффективной, с которой мы познакомились при рассмотрении падения бусинки. Ясно, что в стране неизотропных масс скорость реки гораздо меньше, чем в изотропном случае.

— Посмотрите, какой отвесный берег! — воскликнул Миша.

— Сейчас сверимся по компасу, — откликнулся Леонид Андреевич. Так и есть — это северный склон. Поэтому он и оказался таким крутым. Обычно у крутых берегов склоны, кроме самого верхнего отвесного участка, выглядят как осыпи. Их наклон определяется углом, под которым легко скатываются комочки земли и песчинки. А здесь у нас северный склон в стране анизотропных масс. Как мы знаем, любые тела в случае достаточно большой анизотропии масс падают здесь не вертикально, а под углом к вертикали, почти вдоль направления магнитного поля. У северного склона силовые линии наклонены так, что нижний край силовой линии смещен в сторону реки. Поэтому сползание грунта невозможно — камешки и комочки земли при обвале кручи сразу улетают далеко вниз. Этим и объясняется крутой склон.

— Я обратил внимание на то, что здесь очень медленно перемещаются облака. Обычно они как бы плывут, а здесь их расположение практически не меняется в течение очень длительного времени.

— Да, действительно, здесь очень медленно дуют ветры, опять же из-за эффекта увеличения поперечной массы молекул воздуха, — сказал Леонид Андреевич. — Впрочем, я еще не понял, в чем здесь эффект, — добавил он.

— А почему дует ветер? — спросил Миша.

— Почему дует ветер? — повторил в задумчивости Леонид Андреевич. — Это вопрос непростой, но давайте попробуем в нем разобраться. В конечном счете ветры рождаются за счет тепловой конвекции воздуха. Поверхность Земли прогревается Солнцем, так что в слое сравнительно небольшой толщины масштаба ста метров происходит как бы перегрев атмосферы: этот слой оказывается легче вышележащих слоев атмосферы. Такое расположение легкого слоя газа под тяжелым неустойчиво, и время от времени возникает конвекционный подъем воздуха вверх. Это явление удобно наблюдать в утренние часы в поле, когда начинается процесс рождения облаков. Если вы будете внимательны, то сможете заметить, что облачко рождается внезапно, как бы из ничего. Каждый прогретый объем воздуха, поднимаясь вверх, попадает последовательно в слои воздуха все с меньшим и меньшим давлением. Этот объем расширяется, и при этом его температура уменьшается. На некоторой высоте температура воздуха достигает точки росы, когда водяные пары начинают конденсироваться в мельчайшие капельки тумана. На этой высоте и начинает образовываться облако. Все кучевые облака имеют гладкое основание, будучи как бы подрезанными снизу: это они опираются на плоскость с точкой росы.

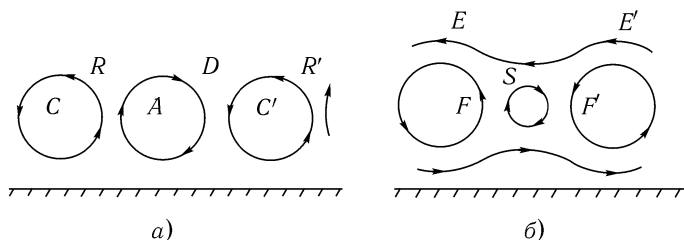


Рис. 24. Конвективные потоки в атмосфере (а) и их слияние (б), приводящие к образованию ветра.

А теперь рассмотрим эти потоки воздуха в вертикальном сечении. На рис. 24 а мы видим два восходящих потока R , R' , а между ними нисходящий поток D , который вытесняется вниз восходящими потоками. В потоках R , R' могли бы образовываться первичные облачка, но сейчас мы сосредоточим свое внимание не на облаках, а на структуре потоков. Как мы видим, они выглядят, как цепочка вихрей переменного знака: в областях C , C' воздух вращается

против часовой стрелки, а в области A — по часовой стрелке. Соответственно и в самом верхнем слое мы имеем знакопеременный поток газа, направленный то в одну, то в другую сторону, в зависимости от точки наблюдения.

Оказывается, однако, что такая периодическая структура неустойчива — она стремится превратиться в однонаправленный ветер.

В самом деле, пусть центральный вихрь оказался немного менее интенсивным по сравнению с соседними вихрями (рис. 24 б). При этом часть потока в верхней части вихрей, т. е. по линии EE' перекинется с одного крайнего вихря на другой крайний вихрь. В результате в точке S окажутся по соседству встречные потоки. Это значит, что внутренний вихрь за счет вязкости будет тормозиться, и его интенсивность будет уменьшаться. Но если центральный вихрь полностью исчезнет, то встретятся потоки в точках F, F' . Они также будут тормозить друг друга, или, как иногда говорят, будут перезамыкаться: вместо того, чтобы существовать в виде вихрей, течение воздуха разобьется на два потока. Нижний, приземный поток, направленный на рис. 24 б направо, имеет тенденцию затухать из-за вязкого трения о неподвижный грунт, а верхний слой EE' , движущийся налево, образует ветер.

Итак, конвекция исправно создает ветровое движение на некоторой высоте, более одного-двух километров. Если смотреть из космоса, то эти ветровые потоки выглядят сначала как вихри небольших размеров. Но оказывается, что вихри имеют тенденцию к слиянию, и тогда образуются крупномасштабные вихри, хорошо видимые из космоса. Эти гигантские вихри образуют циклоны и антициклоны. В циклонах воздух вращается в сторону вращения Земли, а в антициклонах — в противоположную сторону.

Основной ветер, который определяет перенос воздушных масс атмосферы, называют геострофическим ветром. Любопытно, что ветер дует не из области высокого давления в сторону меньшего атмосферного давления, а почти поперек градиента давления. (Градиент давления — это вектор, пропорциональный скорости возрастания давления на единице длины и направленный в сторону наибольшего возрастания давления.)

Это происходит потому, что градиент давления уравновешивается так называемой силой Кориолиса. Сила Кориолиса пропорциональна скорости и направлена перпендикулярно скорости в северном полушарии вправо, а в южном — влево. Именно сила Кориолиса уравновешивает градиент давления, так что ветер дует почти вдоль изобар — линий постоянного давления.

Теперь мы можем порассуждать, какие изменения в эти процессы вносит неизотропия масс. Прежде всего меняется картина конвекции: восходящие и нисходящие потоки будут направлены, в основном, вдоль \mathbf{V} , т. е. под углом к поверхности Земли. Кроме того, поперечный масштаб конвекции уменьшается из-за того, что поперечная масса увеличена. Это приводит к тому, что при почти прежнем значении продольной скорости в конвекционной ячейке поперечная скорость заметно уменьшается. Следовательно, и ветер, генерируемый этими ячейками, становится слабее. Соответственно, уменьшится величина геострофического ветра, ответственного за крупномасштабные изменения погодных условий. Сила Кориолиса испытывает два изменения противоположного знака: за счет уменьшения скорости она уменьшается, а за счет увеличения поперечной массы — возрастает. Соответственно, под новый режим ветровой картины подстроится и распределение давления в атмосфере. Главное, что произойдет, это сильное уменьшение скорости ветра. Впрочем, разрушительная сила бурнов и ураганов может и не измениться — ведь поперечная масса становится больше.

— Леонид Андреевич, можно задать вопрос? — спросил Саша.

— Да, конечно.

— Я недавно летел в самолете, и стюардесса объявила, что за бортом самолета минус сорок пять градусов. Как это может быть? Ведь холодный воздух должен опуститься вниз, а вместо него вверх должны подняться теплые массы воздуха.

— Вас понял, — ответил Леонид Андреевич. — В своем рассказе, как я вижу, я упустил одну важную деталь. Когда теплый воздух в виде большого объема поднимается снизу вверх, он расширяется, поскольку чем выше от уровня моря, тем меньше атмосферное давление. При расширении большого объема воздуха, в котором не успевают происходить процессы переноса тепла за счет теплопроводности, воздух охлаждается. Такой процесс расширения называется адиабатическим, т. е. без обмена теплом с окружением. Поэтому, если мысленно взять большой объем воздуха и начать переносить его по высоте, то он будет иметь разные температуры на разных высотах: чем выше, тем ниже температура. Такое распределение температур называют изоэнтропийным. Атмосфера с таким распределением температур нейтральна по отношению к возникновению конвекции. А если температура чуть быстрее возрастает с убыванием высоты, то тогда и начинается конвекция. Но и при наличии небольшой конвекции температура атмосферы все же тем ниже, чем больше высота. Этим объясняется, в част-

ности, тот факт, что все высокие горы покрыты вечными снегами и ледниками. Миша, а теперь давай передвинемся к лесу.

Миша достаточно ловко и уверенно вывел платформу с реки и направил ее к лесу. На опушке леса они остановились. Это был обычный лес Подмосковья, и ничего необычного он на первый взгляд не обнаруживал.

— Посмотрите-ка, — сказал Саша, первым обративший внимание на листву. — Листья качаются на ветру очень медленно и не слышно никакого звука. А почему вообще дрожат листья?

— То, что их не слышно, вполне понятно, — раздался голос Леонида Андреевича. Ведь мы приблизились к лесу с северной стороны, так что в анизотропном воздухе звук, в основном, поднимается вверх и распространяется над нами из-за анизотропии распространения звука. А вот листья колеблются медленно и потому, что ветер тише, и потому, что у них поперечная масса больше, чем привычная нам изотропная. Поэтому если упругость ножки листа сохранилась, собственная частота колебаний листа уменьшится. Дрожание листочка на ветру называется флаттером. Я сейчас вам объясню, из-за чего он происходит. Пусть листочек колеблется, как показано на рис. 25 а, а ветер пронесется мимо него влево.

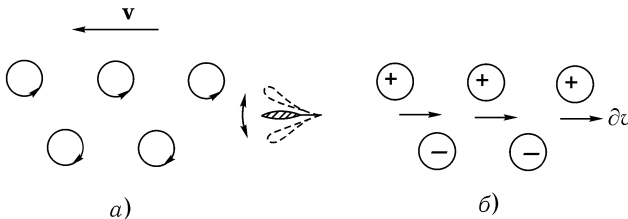


Рис. 25. Трепетание листа (а) и серия вихрей (б), образованных благодаря такому движению листа.

При каждой отмашке листок возбуждает небольшой вихрь, так что влево от него бежит двойная вихревая цепочка: по два вихрька на каждое полное колебание листка. Верхняя и нижняя цепочки вихрей на рис. 25 а имеют разные знаки. Поэтому, как изображено схематически на рис. 25 б, между двумя вихревыми цепочками образуется небольшой противопоток со скоростью dv . Разумеется, вся картина рис. 25 б уносится ветром влево. Из-за того, что скорость ветра становится несколько меньше в области между двумя разноименными вихревыми цепочками, суммарная кинетическая

энергия ветра с вихрями становится немного меньше, чем до их возникновения. Можно сказать, что в неподвижной системе координат двойная вихревая цепочка имеет отрицательную энергию. Здесь важно подчеркнуть, что речь идет о кинетической энергии именно в неподвижной системе координат. Если бы мы перешли в систему координат, связанную с невозмущенным ветром, то мы увидели бы, что до появления вихрей кинетическая энергия равна нулю, а с их возникновением энергия получает положительное приращение.

Пусть ε есть положительная энергия вихревой цепочки, рассчитанная на единицу ее длины, в системе координат, связанной с невозмущенным ветром. В этой же системе координат вихревая цепочка имеет импульс P , рассчитанный на единицу длины. Как видно из рис. 25 б, этот импульс связан с потоком dv и направлен направо. Энергия вихревой цепочки ε_0 в неподвижной системе координат равна

$$\varepsilon_0 = \varepsilon - P_v.$$

Второе слагаемое справа здесь имеет отрицательный знак, потому что скорость ветра и импульс вихревой цепочки направлены в разные стороны. Если скорость ветра достаточно велика, то энергия ε_0 становится отрицательной. В этом случае для возбуждения вихревой цепочки нужно не сообщать, а отнимать энергию от ветра. При этом и возникает флаттер: древесный листок, возбуждая вихревую цепочку, сам получает энергию от ветра, идущую на поддержание его колебаний.

Явление флаттера довольно широко распространено в природе. С ним приходится считаться и в технике: ни одна новая конструкция самолета не может быть принята для эксплуатации, не будучи тщательно исследована на невозможность развития флаттера крыльев. Надеюсь, вам теперь стало яснее, почему дрожат листья деревьев на ветру.

Кстати, мы с вами довольно долго пропутешествовали, а у меня еще много дел на сегодня.

И Леонид Андреевич резко выключил все экраны. Вместо любопытной новой страны они вдруг опять оказались в небольшой лабораторной комнате с полусферическим куполом.

— Надеюсь, вам теперь самим стало более ясным, что такое анизотропия масс.

— Да, конечно, — ответил за обоих Саша. — Но мне все же совершенно непонятно, как это магнитное поле может приводить к анизотропии масс. Я об этом не читал ни в одной книге.

— Хорошо, — сказал Леонид Андреевич. — Приходите ко мне ровно через неделю в то же время, и я расскажу вам о свойствах вещества в сверхсильном магнитном поле и об анизотропии масс.

Миша и Саша попрощались с академиком и пошли домой, обмениваясь впечатлениями обо всем увиденном.

8. Вещество в сверхсильном магнитном поле

— Сегодня мы с вами познакомимся с поведением вещества в сверхсильном магнитном поле, — начал свой рассказ Леонид Андреевич, когда Миша и Саша пришли к нему в кабинет через неделю после предыдущего визита.

Леонид Андреевич подошел к большой пластиковой доске, взял цветные фломастеры и приготовился читать лекцию.

— Начинать нужно, естественно, с самых простых объектов. Так что давайте рассмотрим сначала просто одиночный электрон. В классической механике электрон — это просто заряженная точка с зарядом e и массой m . Заряд равен примерно $4,8 \times 10^{-10}$ в единицах CGSE, а масса $m = 0,9 \times 10^{-27}$ г. Свободный электрон в классической механике движется равномерно по прямой линии или покоится, если его скорость точно равна нулю. Леонид Андреевич взял синий фломастер и нарисовал на доске точку и стрелку, указывающую направление движения электрона.

— Леонид Андреевич, — вдруг неожиданно и, как показалось Мише, довольно бестактно произнес Саша, — а какого цвета электрон? Вот Вы нарисовали его синим, а где-то я видел его нарисованным оранжевым. Какой же настоящий цвет у электрона?

— Я охотно отвечу на твой вопрос, — достаточно мягко начал отвечать Леонид Андреевич. — Вообще не стесняйтесь задавать вопросы и можете перебивать меня в любом самом неподходящем месте: ведь я для того и пригласил вас, чтобы вы задавали мне ехидные вопросы. Итак, что такое цвет? Начнем с белого и черного цветов. Белый цвет мы видим, когда имеется матовая, но хорошо рассеивающая свет поверхность, практически ничего не поглощающая. Так, самым белым для нас кажется снег. Если, напротив, поверхность тела поглощает весь падающий на нее свет, то эта поверхность кажется нам черной. И, наконец имеется огромное количество оттенков серого света, когда поверхность поглощает часть падающего на него света, а оставшуюся долю рассеивает равномерно по спектру, т. е. без выделения какого-либо цвета. Цвет возникает тогда, когда отраженный спектр отличается от падающего. Как вы знаете, естественный солнечный или рассеянный облаками белый свет состоит на самом деле из многих цветов,

которые условно можно представить в виде ряда: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Существует хорошо известная фраза: «Каждый охотник желает знать, где сидят фазаны». По первым буквам этой фразы легко запоминается последовательность цветов радуги. На самом деле, разложение белого цвета только на семь цветов радуги является приближенным, но всех более или менее устраивающим. Если поверхность тела рассеивает свет неравномерно по спектру, то эта поверхность кажется нам цветной. Например, если лепестки розы поглощают все цвета радуги, кроме красного, то мы видим красный цветок. Или, если чистый воздух рассеивает, в основном, коротковолновую часть спектра, то мы видим голубое небо.

Вернемся теперь к электрону. Оказывается, что электрон равномерно рассеивает все составные цвета видимой части солнечного спектра. В этом отношении он похож на маленькие капельки тумана, составляющего обычное облачко. Поэтому мы можем утверждать, что электрон имеет белый цвет: облако из многих электронов выглядело бы при освещении его солнцем, как обычное облачко на небе.

Итак, электрон имеет белый цвет, и нарисовать его на моей белой доске я не могу. Только поэтому я взял синий фломастер, который точно так же не имеет отношения к цвету электрона, как и оранжевый фломастер.

Раз уж мы начали обсуждать проблему цвета, то я добавлю еще несколько слов о цвете сильно нагретых тел. Вскоре я вас познакомлю с физикой пульсара, и вы узнаете, что поверхность пульсара имеет температуру в тысячи раз больше, чем температура Солнца. Спрашивается, какого же цвета пульсар?

Нужно учесть, что наш глаз не видит всего спектра: мы не видим его инфракрасной и ультрафиолетовой части. Если температуру тела понижать, то начинает преобладать инфракрасное излучение, а видимая часть спектра быстро уменьшается, а затем просто исчезает. Поэтому мы не видим, например, горячего утюга. А вот змеи его видят. Более того, они могут видеть тепловое существо на окружающем более низкотемпературном фоне.

Напротив, если температуру тела повышать (по сравнению с температурой поверхности Солнца), то начинает преобладать ультрафиолетовая часть спектра, которую мы тоже не видим. Если мы просто закранируем ультрафиолетовую или даже более коротковолновую рентгеновскую часть спектра специальным свинцовым стеклом, то, начиная с некоторой температуры, дальнейшее ее повышение никак не сказывается на цвете: все изменения

в спектре происходят в невидимой нам области. Если при этом еще не увеличивать полной мощности излучения (например, с помощью серого поглотителя), то будет просто падать мощность излучения в видимой области спектра. Например, в токамаках, т. е. устройствах для получения плазмы с температурой в сотни миллионов градусов, центральная область плазмы кажется темной, хотя она нагрета до гораздо больших температур, чем ее светящаяся оболочка.

Итак, цвет у пульсара такой же, как и у горячих звезд, а именно, голубой. Вот почему в зале, в котором я показывал Мише опыты с мячиками как бы на пульсаре, пол светился голубым светом.

Но давайте вернемся опять к веществу в сверхсильном поле. Как я уже сказал, классический электрон представляет собой материальную заряженную точку. Согласно закону Ньютона, такая точка движется равномерно, пока на нее не подействует внешняя сила. Пусть эта сила создается магнитным полем.

Известно, что в магнитном поле на заряженную частицу с зарядом e действует сила Лоренца

$$F_L = \frac{e}{c} v_{\perp} B.$$

Здесь v_{\perp} — поперечная по отношению к магнитному полю скорость частиц, c — скорость света, B — напряженность магнитного поля. Сила Лоренца действует в направлении, перпендикулярном скорости частицы и вектора магнитного поля. Таким образом, она подобна центростремительной силе при движении точки по круговой орбите. Соответственно, и результатом действия силы Лоренца является движение частицы по окружности с радиусом ρ_{\perp} . Он называется ларморовским радиусом. Центробежная сила равна, как известно, величине $m\omega v_{\perp}$, где ω — угловая частота вращения. Ее принято называть циклотронной частотой. Если учесть, что в качестве центробежной силы выступает сила Лоренца, то, приравняв обе силы, получим:

$$\omega = eB/mc.$$

Соответственно, величина $\rho_{\perp} = v_{\perp}/\omega = mv_{\perp}c/eB$. Как мы видим, при заданной скорости v_{\perp} величина ларморовского радиуса убывает с магнитным полем. Вдоль поля частица движется свободно.

Так происходит с классической частицей. Но электрон — не просто заряженная точка, он обладает волновыми свойствами. Эти свойства не допускают возможности существования неподвижного или равномерно движущегося электрона сколь угодно малых

размеров. Грубо говоря, в силу волновых свойств электрон представляет собой заряженное облачко, имеющее тенденцию к расширению (рис. 26 б).

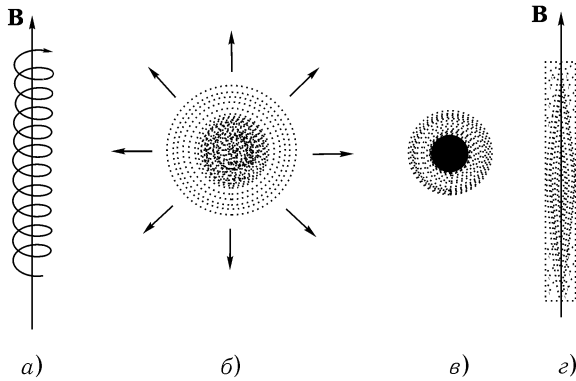


Рис. 26. Электрон в обычных условиях и в магнитном поле: (а) заряженная классическая частица движется в магнитном поле \mathbf{B} по винтовой линии, шаг винтовой линии зависит от скорости вдоль магнитного поля, а радиус ее — от поперечной составляющей скорости и силы поля \mathbf{B} ; (б) свободный электрон, который представляет собой отрицательно заряженное облачко, расширяющееся во все стороны; (в) в атоме водорода электрон притягивается к протону и образует компактное облачко масштабом 10 см (он и называется размером атома водорода); (г) в магнитном поле облачко свободного электрона расширяется только вдоль поля, а в поперечном направлении оно локализовано в трубочке.

В атоме электрон притягивается к ядру, и его тенденция к расширению компенсируется этим притяжением к ядру (рис. 26 в). Естественным масштабom размеров атомов служит радиус атома водорода, именуемый обычно боровским радиусом — $a_0 = 0,5 \times 10^{-8}$ см. При переходе к более тяжелым элементам сила притяжения электронов к ядру возрастает и размеры ближайших к ядру электронных облачков уменьшаются, но зато снаружи добавляются новые электроны, так что в целом размеры атома изменяются слабо.

При наличии очень сильного магнитного поля строение атомов и молекул может значительно измениться. Классическая заряженная частица в магнитном поле движется по винтовой линии — она не может смещаться поперек магнитного поля на большие расстояния (рис. 26 а). Аналогично и электронное облачко в сильном

магнитном поле может свободно расширяться только вдоль поля, а поперек поля оно локализовано в трубочке (рис. 26 г).

Начиная с каких магнитных полей можно считать поле сверхсильным? Очевидно, это будет тогда, когда силы со стороны магнитного поля становятся преобладающими по сравнению с электрическими силами взаимодействия электрона с ядром. При этом радиус вращения электрона вокруг направления магнитного поля (ларморовский радиус) становится меньше боровского радиуса. Элементарные оценки показывают, что это происходит при поле $B_1 = 2,35 \times 10^9$ гаусс. Магнитные поля с напряжением $B > B_1$ мы и будем называть сверхсильными.

Поместим атомы в сверхсильное магнитное поле. Самый простой атом — атом водорода, состоящий из одного протона и одного электрона. Протон, как тяжелая частица, представляет собой заряженную точку, а электрон — вытянутое вдоль магнитного поля облачко (рис. 27 а).

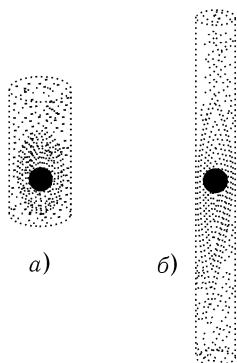


Рис. 27. Атом водорода в основном состоянии в сверхсильном магнитном поле при $B \gg B_0$: (а) при $B = 10^{12}$ гаусс отношение длины к толщине облачка $\delta \cong 3$; (б) при $B = 10^{13}$ гаусс отношение длины к толщине $\delta \cong 8$; точка в центре — ядро.

Сила притяжения к ядру не дает этому облачку разлетаться вдоль магнитного поля. Но эта сила меньше, чем действие магнитного поля, и поэтому вдоль магнитного поля локализация электронного облачка гораздо слабее, т. е. его размер поперек магнитного поля гораздо меньше продольного.

В сверхсильном магнитном поле электроны имеют тенденцию двигаться только вдоль силовых линий. Чем больше поле, тем меньше радиус трубочки, изображенной на рис. 27. Например, при $B = 10^{12}$ гаусс атом водорода в основном состоянии должен представлять собой вытянутую вдоль магнитного поля «палочку» с отношением длины к толщине $\delta \cong 3$ (рис. 27 а). При увеличении B атом будет становиться все меньше и тоньше. Так, например, при $B = 10^{13}$ гаусс $\delta \cong 8$, т. е. это уже довольно тонкая «игла» (рис. 27 б). При увеличении магнитного поля электрон и протон сближаются. Следовательно, растет энергия связи атома (рис. 28). При обычных условиях энергия основного состояния атома водорода $E_0 = 13,6$ эв. При $B = 10^{12}$ гаусс E

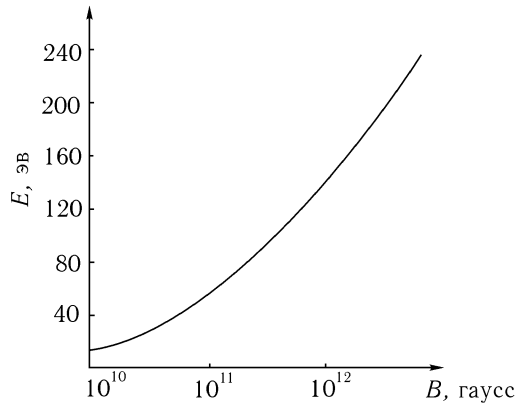


Рис. 28. Энергия связи атома водорода E в магнитном поле. Приближенно она дается формулой $E = E_0 \left(\ln \frac{B}{B_0} \right)^2$, где $E_0 = 13,6$ эВ — энергия основного состояния атома при обычных условиях.

почти в 20 раз больше ε_0 , а при $B = 10^{13}$ гаусс — в 35 раз больше E_0 .

Совсем по-другому выглядят в сверхсильном магнитном поле и возбужденные уровни энергии атома водорода. Ввиду очень сильной анизотропии уровни возбуждения продольного и поперечного движения электрона совершенно различны. Легче всего возбудить уровни, связанные с квантованием движения в поперечном направлении. Основной уровень энергии (рис. 29а) соответствует низшему состоянию атома. В этом основном состоянии электронное облачко «нанизано» на силовую линию, проходящую через ядро. Но, кроме того, существуют состояния, когда электронное облачко, вытянутое вдоль магнитного поля, сдвинуто в поперечном направлении от ядра. Вращаясь вокруг ядра с так называемой дрейфовой скоростью, облачко заполняет трубочку, как показано на рис. 29б. Радиус трубочки растет с увеличением энергии возбуждения (рис. 29в). Энергия возбуждения таких уровней сравнительно невелика, поскольку в данном случае сохраняется основной характер конфигурации электронного облака — его сильная вытянутость вдоль магнитного поля и увеличение плотности заряда по мере приближения к ядру при его движении в продольном направлении.

Кроме того, можно создать возбуждение, связанное с изменением распределения электронной плотности только в продоль-

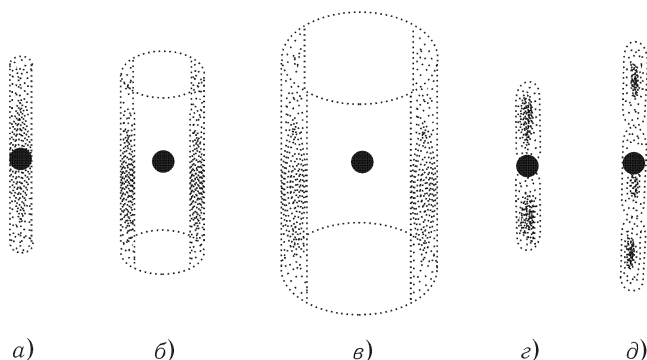


Рис. 29. В сверхсильном магнитном поле возбужденные состояния атома водорода можно получить либо увеличением радиуса электронного облачка при почти постоянной длине, либо изменением распределения электронной плотности вдоль поля: (а) основное состояние при $B \gg B_0$; (б) первый возбужденный уровень атома при $B \gg B_0$; (в) второй возбужденный уровень атома водорода при $B \gg B_0$ (г, д) возбужденные уровни продольного движения электрона при $B \gg B_0$.

ном направлении. Первый возбужденный уровень, в котором электронная плотность равна нулю в точке ядра (рис. 29 г), оказывается, имеет энергию, очень близкую к энергии основного состояния атома водорода ε_0 в отсутствие магнитного поля. Для возбуждения этого уровня в сверхсильном магнитном поле требуется, следовательно, довольно большая энергия. Следующие продольные уровни для своего возбуждения требуют уже энергии меньше ε_0 .

Наряду с этими уровнями возбуждения поперечного и продольного движения существуют еще уровни с очень большой энергией возбуждения, связанные с квантованием движения свободно-го электрона в магнитном поле — так называемые уровни Ландау, но они пока нас не интересуют.

Теперь можно перейти к рассмотрению структуры более тяжелых атомов. Оболочечная структура тяжелых атомов в сверхсильных полях существенно изменяется. Удобно строить эти атомы, добавляя мысленно к ядру один электрон за другим так, чтобы энергия была минимальна, т. е. чтобы атом находился в основном состоянии. Итак, возьмем ядро с атомным номером z и посадим первый электрон на самый нижний уровень. Этот уровень соответствует основному состоянию электрона, изображенному на рис. 27. Мы получаем водородоподобную систему, но с тем отличием, что теперь за счет большего заряда ядра продольный размер

оказывается в z раз меньше. Добавим теперь следующий электрон. Известно, что в обычных условиях на каждый энергетический уровень можно помещать два электрона с противоположными спинами (магнитными моментами). В сверхсильном магнитном поле все магнитные моменты повернуты по полю, поэтому на оболочку можно помещать только один электрон. Поскольку ниже всего расположены уровни квантования поперечного так называемого дрейфового движения, то второй электрон следует поместить на уровень, изображенный на рис. 29 б, следующий, как на рис. 29 в и т. д. . . .

При таком построении происходит «разбухание» атома в поперечном направлении (рис. 30) и поэтому нужно проверить, сможем ли мы таким образом заполнить все z уровней и дойти до нейтрального атома; при этом атом должен сохранить вытянутую вдоль магнитного поля форму. Оказывается, мы можем представлять себе атом в виде «палочки», ориентированной вдоль магнитного поля, при условии $B \gg z^3 B_1$. Чем больше заряд ядра, тем толще такая «палочка».

Обратимся теперь к случаю очень тяжелого атома, когда $z^3 B_1 \gg B$. В этом случае, заполняя последовательно уровни поперечного движения, мы, не «израсходовав» еще всех электронов, вскоре достигнем радиуса, сравнимого по величине с высотой цилиндра. Дальше заполнять эти уровни становится невыгодным, соответствующие оболочки расположены слишком далеко от ядра. Более выгодно поместить следующий электрон на первый возбужденный уровень продольного движения. При больших номерах заполнения оказывается, что центральная часть атома сохраняет почти сферическую симметрию. Влияние сверхсильного магнитного поля в этом случае состоит в том, что размеры атома уменьшаются с магнитным полем, а его внешние оболочки несколько вытягиваются вдоль поля. Соответственно, возрастает энергия связи атома. Впрочем, даже почти сферически симметрич-

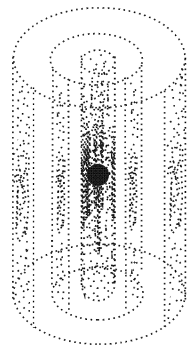


Рис. 30. Заполнение оболочек атома при $B \gg z^3 B_0$. Атом с тремя электронами можно представить как вложенные одна в другую три последовательные электронные оболочки, изображенные на рис. 29 а–в. При $B < z^3 B_0$ последующие электроны будут достраивать оболочки типа рис. 29 г.

ные тяжелые атомы все же заметно удлинены вдоль магнитного поля.

Итак, предположим, что все атомы в сверхсильном магнитном поле сильно вытянуты вдоль поля, но разные атомы — в разной мере. Напомним, что с увеличением z поперечный радиус увеличивается, а продольный размер уменьшается. Другими словами, очень легкие атомы представляют собой тонкие длинные «иголочки», а более тяжелые — короткие толстенькие «палочки» (рис. 31 а).

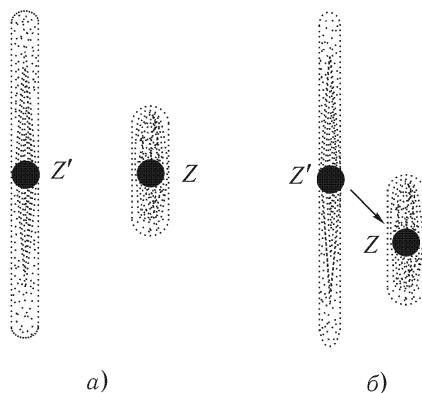


Рис. 31. Образование молекул в сверхсильном поле: (а) атомы с разными атомными номерами в поле $B \gg z^3 B_0$; (б) взаимодействие легкого атома Z' с тяжелым Z и образование молекул.

Нетрудно видеть, что такие атомы должны очень сильно взаимодействовать между собой, гораздо сильнее, чем атомы в обычных условиях. В самом деле, в обычных сферически симметричных атомах положительно заряженное ядро «упрятано» внутри электронного облака, поэтому силы взаимодействия возникают лишь за счет слабой поляризации — деформации электронного облака. В атомах, показанных на рис. 31 а, ядра практически «голенькие» — с боков электронное облако их почти не прикрывает. Поэтому если мы поднесем очень легкий атом z' к тяжелому, то ядро z' , почти как свободное (т. е. с далеко удаленной электронной системой), будет с огромной силой вытягиваться в очень плотное электронное облако атома z . В результате образуется молекула: легкое ядро z' расположится вблизи ядра z на таком расстоянии, чтобы сила отталкивания ядер компенсировала силу вытягивания ядра z' в электронное облако, а электроны ядра z' сядут на внешние уровни молекулы (рис. 31 б).

Тяжелое ядро сможет поглотить и несколько, скажем n , очень легких атомов с образованием молекулы. Захват легких ядер прекратится при $nz' \approx z$, когда отталкивание легких ядер друг от друга станет преобладать над их втягиванием в электронное облако. Энергия связи таких молекул сравнима с полной энергией связи атома с атомным номером $z + nz' \cong 2z$. Например, при $z = 5$ и $B = 10^{13}$ гаусс энергия связи составляет около 4 кэВ. Это, конечно, очень большая величина.

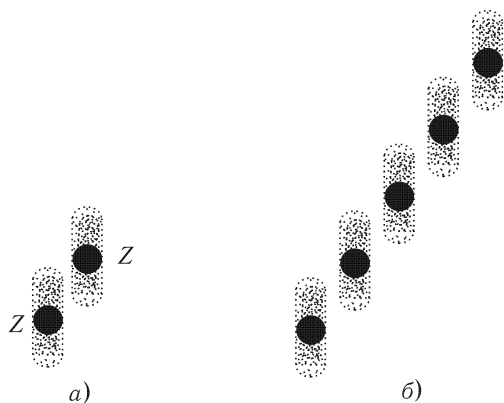


Рис. 32. В сверхсильном магнитном поле полимерная цепочка энергетически выгоднее объемного кристалла: (а) слипание двух одинаковых атомов; (б) образование полимерной цепочки из одинаковых атомов.

Рассмотрим теперь одинаковые атомы. И в этом случае «слабо прикрытые» электронной оболочкой ядра будут сильно взаимодействовать с электронными «палочками» соседних атомов (рис. 32 а). Два атома будут сближаться таким образом, чтобы ядро одного атома входило в довольно плотную часть электронного облака другого, но при этом за счет электростатического отталкивания ядер они остаются раздвинутыми вдоль магнитного поля.

У двух одинаковых атомов полного обобщения электронных оболочек не происходит — только электроны на внешних орбитах становятся общими. Можно сказать, что атомы сохраняют свою индивидуальность (расчет показывает, что полное обобщение электронов также может иметь место, но только при очень сильных полях).

Если к молекуле из двух атомов (рис. 32 а) поднести еще один атом, то он прилипнет либо к верхнему, либо к нижне-

му атому. То же самое будет происходить с каждым последующим добавленным атомом: такому атому выгодно присоединиться либо к крайнему верхнему, либо к крайнему нижнему атому, поскольку при этом вновь добавляемое ядро близко проходит к электронной оболочке молекулы, но все же остается на достаточно большом расстоянии от других ядер. В результате мы получим длинную полимерную цепочку (рис. 32 б). Эта цепочка будет несколько наклонена по отношению к магнитному полю, причем с ростом магнитного поля наклон будет уменьшаться. Рисунок 32, разумеется, дает весьма схематичное представление о полимерной молекуле. Исключительно ради простоты мы изобразили ее лежащей в плоскости рисунка с атомами, находящимися в той же плоскости. Однако это еще не самая выгодная конфигурация с энергетической точки зрения. В самом деле, если мы все атомы, например, нечетные, выдвинем из плоскости рисунка к нам, а четные сдвинем за плоскость рисунка, а затем несколько «подождем» молекулу поперек магнитного поля так, чтобы расстояния между соседними атомами остались неизменными, то при этом произойдет эффективное сближение четных и нечетных атомов между собой. Но эти атомы, расположенные через один, также притягиваются друг к другу. Поэтому энергетически это выгодно, т.е. выгоднее иметь не просто линейную цепочку, как на рис. 32, а более «толстую» полимерную цепочку. Впрочем, в энергию связи такой цепочки по-прежнему основной вклад вносят ближайшие соседи, так что ее энергия связи ненамного отличается от энергии связи простой линейной цепочки, изображенной на рис. 32.

Теперь рассмотрим, как ведет себя твердое тело в сверхсильном поле. Мы привыкли к тому, что наиболее типичной структурой твердого тела является кристаллическая. Можно было бы предположить, что и в сверхсильном магнитном поле атомы одного сорта при низких температурах должны образовать кристалл. Однако это не так: кристаллическая структура оказывается энергетически невыгодной. Впрочем, это ясно уже из рис. 32 б, где мы добавляли атом за атомом и видели, что последующим атомам выгодно прилипать к крайним атомам длинной цепочки. Другими словами, в первую очередь образуются полимерные цепочки, а уже затем, в результате значительно более слабых сил взаимодействия, эти полимерные цепочки будут слипаться в твердое тело. Таким образом, в сверхсильном магнитном поле твердое тело должно быть полимером.

Но это не совсем обычный или, лучше сказать, совсем необычный полимер. Молекулы в таком полимере укладываются под определенным, довольно малым, углом к силовым линиям магнитного поля; они сильно вытянуты вдоль поля. Это должно приводить к целому ряду необычных свойств тела. Легко видеть, например, что такое твердое тело очень трудно или, точнее, невозможно повернуть вокруг оси, перпендикулярной магнитному полю, поскольку при этом должна была бы произойти перестройка всех молекул в теле на полимерные нити, вытянутые вдоль нового направления поля. По всей вероятности, в случае приложения внешнего механического момента к такому телу в нем скорее произойдет разлом, чем поворот по отношению к полю (рис. 33 а).

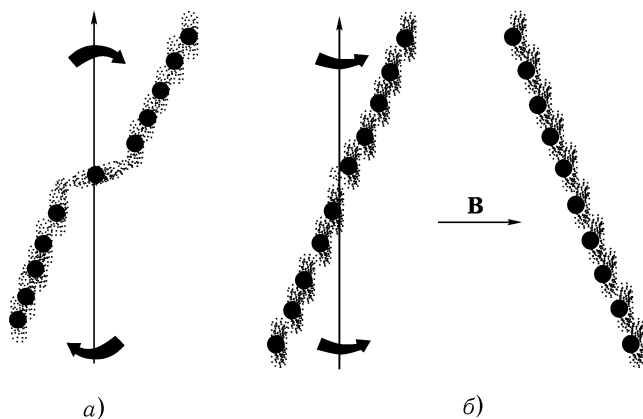


Рис. 33. Сила, удерживающая полимерную цепочку вдоль поля, выше прочности самой цепочки: (а) излом полимерной цепочки при наложении внешнего магнитного момента вокруг оси, перпендикулярной магнитному полю \mathbf{B} ; (б) полимерная цепочка легко поворачивается без деформации вокруг направления магнитного поля.

С другой стороны, такое тело ничего не стоит повернуть вокруг оси, параллельной магнитному полю (рис. 33 б).

Если магнитное поле очень сильное, значительно больше 10^{12} гаусс, то у такого макроскопического тела появляется еще одна любопытная особенность в механических свойствах, связанная с соответствующей особенностью в свойствах составляющих его атомов. Речь идет об анизотропии массы. Рассмотрим сначала изолированный атом, к которому мы мысленно прило-

жим силу и начнем ускорять. При ускорении вдоль магнитного поля с ним ничего особенного не происходит. Но если мы станем перемещать его поперек поля, то конфигурация атома будет изменяться. Дело в том, что для движущегося со скоростью v_{\perp} поперек магнитного поля атома движение в его системе координат эквивалентно появлению поперечного электрического поля, равного $v_{\perp}B/c$. Это поле деформирует электронные оболочки — электронное «веретенце» несколько смещается от ядра поперек поля. При этом увеличивается энергия связи атома. Такая добавка к энергии пропорциональна квадрату скорости, т. е. ее можно рассматривать как увеличение поперечной массы атома. Появляется как бы «присоединенная масса». Соответственно и у макроскопического тела масса поперек магнитного поля должна быть больше продольной: такое тело вдоль поля ускорить легче, чем поперек. Следовательно, и в более сложном магнитном поле с искривленными силовыми линиями тело «предпочло» бы скользить вдоль силовых линий, а не двигаться поперек них.

Кроме механических, должны претерпеть существенное изменение и другие физические свойства вещества в сверхсильном поле. Например, мы привыкли к тому, что при повышении температуры твердое тело сначала плавится, затем жидкость испаряется, а при дальнейшем повышении температуры газа (пара) происходит диссоциация молекул, возбуждение и ионизация атомов, т. е. образование плазмы.

В сверхсильном магнитном поле все это может носить иной характер. Так, для вещества с достаточно тяжелыми атомами энергия связи атомов в молекуле значительно больше (примерно в z раз) энергии ионизации и уж давно больше энергии возбуждения низких электронных уровней. Поэтому при нагревании тела сначала может происходить возбуждение электронных уровней и «разбухание» атомов и молекул, а затем уж будут разрушаться межатомные связи в молекулах. Соответственно, и условия существования молекул и атомов могут быть совсем другими.

Если говорить о пульсарах, то на их поверхности, где вещество не сдавлено огромными силами тяготения и могли бы существовать свободные атомы и молекулы, температура оценивается в 1 млн градусов, т. е. около 100 эв. Это огромная температура для привычных нам условий. Однако при поле более 10^{13} гаусс даже при такой температуре могут существовать молекулы, образованные атомами с не очень малыми номерами z . Не исключены и более сложные объекты типа полимеров.

Таким образом, сверхсильное магнитное поле должно сильно влиять на строение атомов и молекул. Соответственно, это должно сказаться и в свойствах «поверхности» пульсара, точнее самой внешней его корочки. Прежде всего из-за существенного увеличения энергии связи атомов и молекул, а также сил сцепления в твердом теле поверхностный слой не обязательно должен представлять собой горячую плазму, как это имеет место в обычных звездах. Это может быть «горячий нейтральный газ» или даже твердая кора. Итак, в сверхсильном магнитном поле происходят поразительно необычные изменения физических свойств вещества, — закончил свою лекцию академик.

— А теперь я предлагаю Саше познакомиться дома еще с двумя задачами и рассказать их содержание Мише.

Леонид Андреевич попрощался с ребятами, пригласив их прийти через неделю.

Задача №5

Учитывая волновые свойства электрона, оценить размер атома водорода, диаметр «палочки» электронного облака в магнитном поле и величину напряженности магнитного поля B_1 , начиная с которой магнитное поле можно считать сверхсильным.

Волновые свойства частицы проявляются в том, что ее импульс p оказывается связанным с волной де Бройля с длиной волны $\lambda = h/p$. Здесь h — это так называемая постоянная Планка. Если попытаться локализовать частицу в пределах интервала Δx , то возможная длина волны будет не больше Δx , и поэтому у частицы появляется разброс по импульсам Δp . В результате имеет место знаменитое соотношение неопределенности

$$\Delta p \Delta x > \hbar,$$

где $\hbar = h/2\pi$.

С помощью этого соотношения и удастся оценить все интересующие нас величины.

В атоме водорода электрон находится в электрическом поле протона с потенциалом $U = -e^2/r$, где r — расстояние до протона. Если характерный размер атома равен a_0 , то потенциальная энергия приближенно равна $U \cong -e^2/a_0$. А кинетическую энергию $K = p^2/2m$ можно оценить с помощью соотношения неопределенности:

$$K \cong \hbar^2/2ma_0^2.$$

Известно, что в кулоновском поле кинетическая энергия составляет половину потенциальной энергии с противоположным знаком, так что $e^2/a_0 \cong \hbar^2 m a_0^2$. Отсюда находим радиус атома водорода:

$$a_0 = \hbar^2/m e^2 \cong 0,53 * 10^{-8} \text{ см.}$$

Определим теперь поперечный размер электронного облака в магнитном поле B . Для этого вспомним, что ларморовский радиус ρ_{\perp} равен

$$\rho_{\perp} = m v_{\perp} c / e B = p c / e B.$$

Величину импульса можно оценить с помощью соотношения неопределенности:

$$p \approx \hbar / \rho_{\perp}.$$

Из этих двух соотношений находим:

$$\rho_{\perp}^2 \cong \hbar c / e B.$$

Чем сильнее магнитное поле, тем меньше радиус ρ_{\perp} электронного облачка. Когда он становится меньше размера атома водорода, магнитное поле можно считать сверхсильным. Таким образом, из соотношения

$$\rho_{\perp}^2 = \hbar c / e B = a_0^2 = \hbar^4 / m^2 e^4$$

находим величину B_1 , выше которой магнитное поле можно считать сверхсильным:

$$B_1 = m^2 e^3 c \hbar^{-3} = 2,35 \times 10^9 \text{ гаусс.}$$

В земных условиях такие поля пока недостижимы, а вот на пульсарах они легко превосходятся.

Задача №6

Оценить поперечную массу атома в сверхсильном магнитном поле. Пусть продольная, т. е. обычная масса атома равна M , а его порядковый номер равен z . Это значит, что заряд ядра равен ze и вокруг него «вращается» z электронов. Допустим для простоты, что атом имеет тот же размер a , что и атом водорода. Если атом движется поперек магнитного поля со скоростью v_{\perp} , то на каждый электрон атома действует сила Лоренца $e v_{\perp} B / c$. Эта сила приводит к деформации электронного облака и увеличению его потенциальной энергии за счет среднего удаления электронов от

притягивающего их ядра. Найдем скорость v_{\perp}^0 , при которой оболочка сместится на расстояние масштаба первоначального размера атома. Это произойдет, когда сила Лоренца станет сравнимой с силой притяжения электрона к ядру, т. е.

$$ev_{\perp}^0 B/c \cong ze^2/a^2.$$

При такой скорости потенциальная энергия всех электронов увеличится на ε_z , где величина ε_z — находится из соотношения:

$$\varepsilon_z \cong z^2 e^2/a.$$

Если теперь скорость уменьшать, то соответствующая энергия будет убывать с v_{\perp} по квадратичному закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_z (v_{\perp}/v_{\perp}^0)^2.$$

Подставляя сюда выражения для ε_z , a и v_{\perp}^0 , получим следующую величину для «избыточной энергии»:

$$\varepsilon \cong mv_{\perp}^2 \left(\frac{B}{B_1} \right)^2.$$

Это выражение нужно сравнить с кинетической «изотропной» энергией:

$$K = \frac{M}{2} v_{\perp}^2.$$

Суммируя кинетическую энергию с «присоединенной» энергией ε , также квадратичной по скорости, находим выражение для эффективной поперечной массы

$$M_{\perp} \cong M \left\{ 1 + \frac{2m}{M} \left(\frac{B}{B_1} \right)^2 \right\}.$$

Как мы видим, при $B \sim B_0$ эффект неанизотропии масс очень мал. Однако при $B > B_0 \sim \sqrt{\frac{M}{m}} B_1 \sim 10^2 B_1$ масса приобретает достаточно большую анизотропию.

Приведенная грубая оценка, конечно, не учитывает всех деталей перестройки энергии связи электронов при одновременном наложении магнитного поля B и возникающего вследствие движения атома поперек силовых линий B эффективного электрического поля $v_{\perp} \frac{B}{c}$ (сила Лоренца). Тем не менее она позволяет найти те типичные значения $B \sim B_0 \sim 10^{11}$ гаусс, при которых анизотропия масс становится существенной.

9. Нейтронная звезда

— Сегодня я расскажу вам о нейтронных звездах, — сказал Леонид Андреевич при следующей встрече.

Все звезды, включая Солнце, — это огромные газовые шары. Лучше было бы сказать плазменные шары, поскольку они содержат не обычный атомарный газ, а плазму, т. е. атомы, рассыпавшиеся при высокой температуре на их составные части — ядра и электроны. Ядра выглядят как положительно заряженные ионы, погруженные в газ электронов. Впрочем, с точки зрения тенденции к тепловому расширению плазма похожа на обычный газ: такой газ разлетелся бы, не будь силы гравитационного притяжения. Итак, звезда — это газовый шар, удерживаемый силами гравитации.

Горячее состояние этого шара поддерживается за счет реакций термоядерного синтеза, т. е. слияния легких ядер в более тяжелые с выделением избыточной энергии.

На Солнце основная термоядерная реакция — это «сгорание» водорода в гелий. Можно сказать, что Солнце — это огромный термоядерный реактор с гравитационным удержанием плазмы.

Звезда автоматически поддерживает свои температуру и плотность на таком уровне, чтобы реакция протекала стационарно. А именно, если плотность, например, несколько повысится по сравнению с оптимальной, то скорость реакции повысится, звезда несколько «подразогреется» и за счет этого расширится. В результате и темп реакций несколько понизится. Не исключена, разумеется, возможность перейти при определенных условиях в режим автоколебаний, когда звезда периодически сжимается и расширяется по радиусу. Очень малые радиальные колебания наблюдаются даже на Солнце.

Звезды, более старые, чем Солнце, успевают сжечь весь свой водород, и в них протекают реакции синтеза ядер более тяжелых, чем гелий.

А нельзя ли себе представить такой экзотический случай, когда все атомные ядра можно считать слившимися в одно гигантское ядро? Оказывается, можно. Именно такая вот звезда и называется нейтронной звездой. Почему же именно нейтронной, а не нейтронно-протонной, как обычные ядра?

Дело в том, что даже обычные ядра становятся нейтронно-обогатенными по мере увеличения атомного веса. Например, ядро урана с атомным весом 238 имеет 146 нейтронов и только 92 протона. Это происходит потому, что энергетически выгодно избыточному протону слиться с электроном атомной оболочки и превратиться в нейтрон. В большом объеме ядерного вещества протонов (и соответственно электронов) ничтожно мало, так что можно рассматривать его как чисто нейтронное ядерное вещество. Это огромное по масштабам вещество удерживается силами гравитации.

Впервые теоретическая модель нейтронной звезды была предложена академиком Л. Д. Ландау. Подробно мы рассматривать ее не будем, но кое-какие суждения можно составить «на глазок».

Например, можно очень грубо оценить размеры нейтронной звезды. Ведь нейтронная звезда — это аналог атомного ядра, а обычная звезда — это аналог атома. Атомное ядро имеет размер масштаба 10^{-13} см, а типичный атом — масштабы 10^{-8} см. Таким образом, их размеры отличаются в 10^5 раз. Соответственно и размер нейтронной звезды примерно в 10^5 раз меньше размера обычной звезды. Если размер Солнца масштаба 10^6 км, то размер нейтронной звезды ~ 10 км.

Далее, можно попытаться оценить период вращения нейтронной звезды, опять же по аналогии с Солнцем. Период вращения Солнца равен примерно 2×10^6 сек. Если бы Солнце сжалось до радиуса в 10^5 раз меньше, чем сейчас, то и период вращения в силу сокращения вращательного момента уменьшился бы в 10^5 раз.

Таким образом, в этом случае можно было бы ожидать период масштаба 10 с. На самом же деле периоды вращения нейтронных звезд меньше: от десятков миллисекунд до нескольких секунд. Это означает лишь, что наша оценка слишком груба: нейтронные звезды рождаются звездами с вращательным моментом большим, чем у Солнца.

Нейтронная звезда состоит, в основном, из нейтронов. Однако она содержит некоторое количество протонов — это как бы их разбавленный раствор в нейтронном растворителе. Относительная плотность протонов очень мала: она составляет примерно 10^{-2} долю от плотности нейтронов. В нейтронной звезде имеются также электроны, плотность которых с большой точностью равна плотности протонов. Таким образом, в каждом небольшом объеме вещества нейтронной звезды число протонов и число электронов одинаковы. Другими словами, положительный заряд протонов ра-

вен отрицательному заряду электронов. В этом случае говорят, что вещество является квазинейтральным.

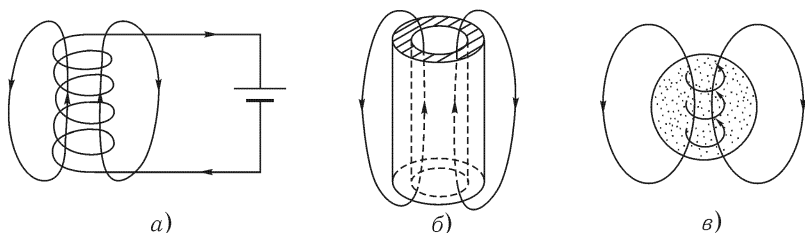


Рис. 34. Если подпитывать соленоид из внешнего источника (а), а затем разомкнуть цепь, то электрический ток будет продолжать течь по соленоиду некоторое время. Такое время протекания тока после размыкания цепи будет несколько больше в проводящем цилиндре (б) и существенно больше в случае нейтронной звезды (в).

Квазинейтральность не препятствует тому, чтобы в нейтронной звезде протекали токи: достаточно лишь, чтобы эти токи замыкались внутри самой звезды. Самый простой пример замкнутого контура с током представляет собой обычный соленоид, присоединенный к гальваническому источнику тока. Если проводник имеет очень хорошую проводимость, то в течение ограниченного времени ток в соленоиде может протекать, если его накоротко замкнуть, отсоединив от внешнего источника тока. Если вместо соленоида взять проводящий цилиндр с полостью (рис. 34 б), то ток будет протекать даже дольше, чем в первом случае, поскольку электрическое сопротивление цилиндрической трубы меньше, чем сопротивление соленоида. Оказывается, что если замкнутый ток протекает внутри нейтронной звезды (рис. 34 в), то он может протекать много миллионов лет, а может быть, и дольше, если вещество нейтронной звезды является сверхпроводящим.

Возникает вопрос: а как и какой величины ток может появиться в нейтронной звезде?

Для ответа на этот вопрос нужно знать, откуда берутся нейтронные звезды. В настоящее время общепринята точка зрения, что нейтронные звезды рождаются естественным образом в результате эволюции определенного класса звезд: не слишком больших и не слишком малых. Такие звезды постепенно, подобно Солнцу, сжигают сначала водород в гелий, а затем термоядерные реакции приводят к созданию все более тяжелых ядер. Этот процесс идет до тех пор, пока большая часть вещества не окажется

состоящей из ядер железа и электронов. Ядра железа имеют наибольшую энергию связи, так что их слияние в еще более тяжелые ядра энергетически невыгодно. Термоядерные реакции замирают, и тогда звезда начинает сжиматься, поскольку нет энерговыделения, которое приводило бы к ее расширению. Поджатие звезды приводит к повышению энергии электронов, и в какой-то момент энергетически выгодным становится слияние протонов с электронами и их превращение в нейтроны. Избыточная энергия реакции уносится частицами нейтрино, которые легко пронизывают всю толщу звезды. Грубо говоря, реакция приводит к охлаждению вещества и под действием силы тяжести происходит падение вещества к центру звезды. Возникает катастрофа колоссального масштаба. Большая часть вещества схлопывается в очень компактный сгусток, а оболочка звезды сбрасывается и с огромной скоростью расширяется во все стороны. Внешне это явление наблюдается как рождение сверхновой звезды.

Сверхновые звезды время от времени вспыхивают в нашей Галактике, а также и в других Галактиках. Например, самая последняя сверхновая вспыхнула 23 февраля 1982 года. А наиболее известная сверхновая находится в Крабовидной туманности. По Китайским летописям она вспыхнула в 1054 году и в течение некоторого времени светила как луна. Сейчас на месте сверхновой находится Крабовидная туманность. Это огромное светящееся облако плазмы — смеси электронов и ионов. Оказывается, что облако светится за счет излучения электромагнитных волн электронами, ускоренными до очень высоких энергий. Они называются ультрарелятивистскими электронами. Электроны создают это излучение в результате искривления их траекторий в магнитных полях, созданных самим облаком.

Современная астрофизика в состоянии объяснять многие явления Космоса на базе тех знаний, которые добыты физиками с помощью многочисленных установок на Земле. В частности, хорошо объясняются и процессы взрыва сверхновых звезд, и свойства тех оболочек, которые получают вследствие таких взрывов. Много стало ясно и в физике Крабовидной туманности еще до того, как были открыты нейтронные звезды в виде Пульсаров. А после открытия первого, а затем и последующих пульсаров и по мере формирования убеждения, что пульсары — это нейтронные звезды, начались поиски пульсара в центре Крабовидной туманности. Эти поиски увенчались полным успехом: американские ученые в 1968 г. обнаружили периодический источник радиоизлучения в центре Крабовидной туманности. Любопытно,

что источник радиоизлучения совпал с источником оптического излучения, т. е. звездой вблизи центра Крабовидной туманности. Период пульсара Крабовидной туманности составляет 0,033 секунды — скорость вращения соответствующей нейтронной звезды поистине огромна.

Итак, нейтронная звезда образуется вслед за вспышкой сверхновой, когда центральная часть звезды схлопывается до очень малых размеров. Теперь мы можем обсудить вопрос о том, как у нейтронной звезды может оказаться магнитное поле.

Для этого следует учесть, что и обычные звезды имеют магнитные поля. Например, на Солнце имеются магнитные пятна с магнитным полем в несколько килогаусс. А кроме того, Солнце имеет среднее магнитное поле в несколько гаусс. Если вспомнить, что магнитное поле Земли составляет величину около пол-гаусса, то станет понятно, что среднее магнитное поле Солнца сравнительно невелико. Однако имеются звезды с магнитным полем в несколько килогаусс — речь идет об «обычных» звездах, т. е. не нейтронных сверхплотных звездах.

Что же произойдет, если такая звезда вдруг быстро сожмется до размеров нейтронной звезды?

Вернемся к рис. 34. На рисунке 34в показано схематически, как создается магнитное поле звезды кольцевым током. Этот ток очень похож на кольцевой ток проводящего цилиндра (рис. 34б), поэтому для упрощения дальнейших рассуждений мы будем исходить из этой модели.

Пусть B_0 — среднее значение магнитного поля внутри трубчатого проводника (рис. 34б). Будем считать, что сопротивление этого проводника очень мало. Грубо говоря, примем, что это — сверхпроводник, и ток по нему течет вечно. Нетрудно видеть, что внутри такого замкнутого сверхпроводника нельзя изменить величину потока магнитного поля. В самом деле, как установил Фарадей, изменение магнитного потока внутри замкнутого контура приводит к генерации в этом контуре вихревого электрического поля. Но ведь это — сверхпроводник, и внутри него электрическое поле всегда равно нулю: малейшие следы электрического поля мгновенно устраняются соответствующим смещением сверхпроводящих электронов.

Допустим теперь, что проводник (рис. 34б) не очень жесткий, и внешними силами его можно деформировать, как показано на рис. 35а, б.

Допустим, что кольцо с током (рис. 35а) сжимается в радиальном направлении и превращается в трубочку (рис. 35б). Магнит-

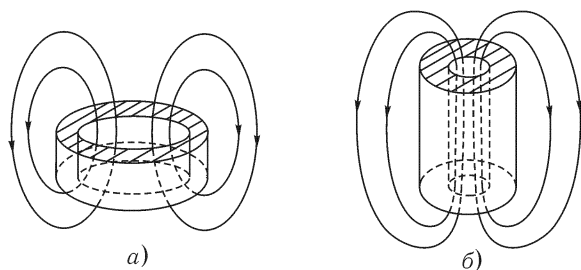


Рис. 35. Если идеально проводящее кольцо с током (а) сжимается по радиусу (уменьшает свой радиус), то магнитное поле будет увеличиваться (б) благодаря закону сохранения магнитного потока.

ный поток при этом сохраняется, так что магнитное поле в трубке (рис. 35 б) окажется значительно больше, чем в исходном кольце. Пусть B_0 и S_0 — начальные значения, соответственно, магнитного поля и внутреннего поперечного сечения кольца с током, а B , S — аналогичные величины для конечного состояния. Магнитный поток, равный произведению величины магнитного поля на площадь поперечного сечения, остается постоянным. Поэтому значение магнитного поля в конечном состоянии оказывается равным:

$$B = B_0 S_0 / S.$$

Если S много меньше S_0 , то магнитное поле B усиливается во много раз по сравнению с начальным значением поля B_0 .

— И что, таким образом в самом деле можно усиливать магнитное поле? — неожиданно спросил Саша.

— Да, это вполне реальная вещь, — ответил Леонид Андреевич. Изобрел такой способ генерации поля наш выдающийся соотечественник Андрей Дмитриевич Сахаров. На базе основополагающей идеи он разработал несколько конкретных схем взрывомагнитных генераторов. Их главный принцип проиллюстрирован рис. 36 а, б.

Начать удобно с кольцевого соленоида, чтобы магнитные силовые линии не уходили далеко за пределы области внутри проводящей оболочки. На рис. 36 а каждый виток такого соленоида проходит сначала вдоль оси, а затем возвращается по периферии в исходную точку. В результате получается многovitковая проводящая оболочка с осевой симметрией. Затем вокруг соленоида располагается взрывчатое вещество в виде полого цилиндра

дра. Если теперь запитать соленоид от внешнего источника тока, а затем инициировать взрыв в левом участке взрывчатки, то произойдет следующее. Сначала взрывчатка замкнет витки у нижнего конца соленоида: витки с током от последовательного соединения перейдут к параллельному соединению. Затем волна детонации станет передвигаться вверх по оси соленоида, поджимая витки и перемещая все выше и выше точку их замыкания. Поперечное сечение соленоида будет уменьшаться, а магнитное поле увеличиваться. Наконец, взрывная волна дойдет до верхнего конца соленоида, а магнитное поле достигнет максимума. Взрывчатку можно укладывать не до самого конца, создавая таким образом полость с сильным магнитным полем (рис. 36 б). Поскольку взрывные процессы протекают очень быстро, то даже обычные медные обмотки можно в течение этого времени считать сверхпроводящими.

Взрывомагнитные генераторы позволили получить максимальное достижимое пока в земных условиях магнитное поле — вплоть до 25 мегагаусс.

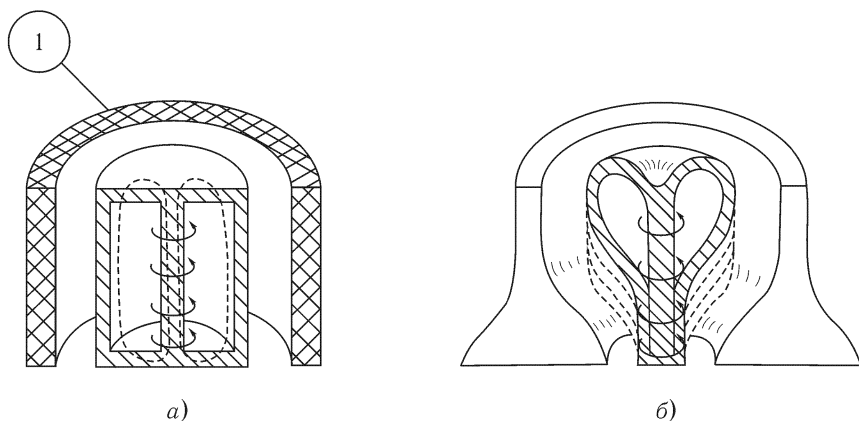


Рис. 36. Идея А. Д. Сахарова создания сверхсильных магнитных полей с помощью взрыва: (а) исходная ячейка с током, окруженная взрывчаткой (1); (б) распространение взрывной волны по трубе и сжатие ячейки с током.

Вернемся опять к звездам. При сжатии звезды в нейтронную звезду магнитный поток также сохраняется. Поэтому магнитное поле усиливается во столько раз, во сколько раз уменьшается квадрат размера звезды. Выше мы оценили отношение размеров обыч-

ной и нейтронной звезд величиной 10^5 . Таким образом, магнитное поле нейтронной звезды должно быть в 10^{10} раз больше, чем магнитное поле исходной звезды до ее сжатия. Если исходная звезда, подобно Солнцу, имела поле в несколько, скажем 10 гаусс, то у нейтронной звезды поле достигнет величины 10^{11} гаусс. А если исходное поле составляло несколько килогаусс, то конечная величина поля может достигать значений 10^{13} – 10^{14} гаусс.

Итак, нейтронная звезда совершенно естественным образом приобретает магнитное поле масштаба 10^{11} – 10^{13} , а в экстремальных случаях и до 10^{14} гаусс.

Процесс сжатия ядра сверхновой звезды в нейтронную звезду протекает очень быстро, поэтому магнитное поле можно считать как бы «вмороженным» в вещество, т. е. годится приближение сверхпроводимости. После сжатия магнитное поле может постепенно затухать из-за конечной электрической проводимости. Оценки показывают, что поле может затухнуть за несколько миллионов лет.

Итак, на нейтронной звезде имеется сверхсильное магнитное поле, которое существенно влияет на свойства вещества. Пульсар плюс к тому же вращается с огромной скоростью, так что и снаружи пульсара возникают многие интересные и необычные процессы.

Задача №7

Оценить процентное содержание протонов в нейтронной звезде.

В отличие от атомного ядра нейтронная звезда не может иметь большого положительного заряда. Она, как говорят, квазинейтральна — если в ней имеются протоны, то почти столько должно быть и электронов: иначе образовалось бы электрическое поле с огромной энергией. Итак, если n_p — плотность протонов, n_e — плотность электронов, то приближенно $n_p = n_e$. Заряд у звезды может появиться только за счет небольшой раскомплексации зарядов: положительного у протонов и отрицательного у электронов.

Пусть n — плотность нейтронов (все плотности мы измеряем в числах частиц на один кубический сантиметр). Мы увидим сейчас, что $n_p/n \ll 1$. Причина этого соотношения — опять знаменитое соотношение неопределенностей. В нейтронной звезде среднее расстояние между нейтронами составляет величину $\Delta x = n^{-1/3}$. Поэтому в силу соотношения неопределенности нейтроны

обладают импульсами масштаба $p \sim \hbar/\Delta x \sim \hbar n^{1/3}$. Отсюда можно оценить среднюю кинетическую энергию нейтронов:

$$\varepsilon = p^2/2m_n \sim \hbar^2 m_n^{-1} n^{2/3},$$

где m_n — масса нейтрона (мы опустили множитель $1/2$ для упрощения оценок).

Аналогичное рассуждение применимо и к протонам, и если их плотность много меньше нейтронной плотности, то их кинетическая энергия мала. Что касается электронов, то их импульс p_e можно оценить с помощью тех же соображений, основанных на соотношении неопределенностей:

$$p_e \sim \hbar n_e^{1/3},$$

где n_e — плотность электронов. Этот импульс в ядерном веществе нейтронной звезды достаточно велик, поэтому электроны становятся сильно релятивистскими. Это значит, что их энергию нужно оценивать с помощью соотношения

$$\varepsilon_e = p_e c,$$

где c — скорость света.

Энергия электронов высока, и им энергетически невыгодно находиться в ядерном веществе, другими словами, их плотность должна быть много меньше плотности нейтронов. Но в силу квазинейтральности плотность протонов n_p в точности равна плотности электронов. Стало быть и плотность протонов должна составлять только малую долю от плотности нейтронов.

Баланс энергий достигается, когда энергия электрона оказывается масштаба кинетической энергии нейтрона: при этом реакция превращения нейтрона в пару электрон-протон (с испусканием антинейтрино) находится на пороге запрета. (Заметим, что в балансе энергий величина энергии покоя электрона и кинетической энергии протона не играют роли будучи малыми.)

Итак, из условия $\varepsilon \sim \varepsilon_e$ находим:

$$(n_p/n)^{1/3} = (n_e/n)^{1/3} \cong \frac{\hbar}{m_n c} n^{1/3},$$

где $m_n = 1,6 \times 10^{-24}$ — величина массы нейтрона, $c = 3 \times 10^{10}$ см·сек⁻¹ — скорость света, а постоянная Планка $\hbar \cong 10^{-27}$ в системе CGS. При плотности нейтронов масштаба плотности

ядерного вещества, $n^{1/3} \cong 10^{13}$, приведенная выше оценка дает $(n_e/n)^{1/3} \cong 0,2$. Таким образом, плотность протонов в ядерном веществе нейтронной звезды на два порядка меньше плотности нейтронов.

10. Физика пульсара

— Я постараюсь рассказать вам как можно больше о пульсаре, — сказал Леонид Андреевич. — Почти столько же, сколько знаю сам. И при этом я, разумеется, изложу вам свои представления в том виде, как они сложились у меня самого. Не исключено, что они в чем-то отличаются от представлений моих коллег, более искушенных в этой области — ведь я-то совсем не специалист в области астрофизики.

Итак, начнем с самого главного, благодаря чему и появился термин пульсар, — с периодического радиоизлучения. Пульсар — это просто аббревиатура английского словосочетания «pulsating star»: звезда, излучающая импульсные радиосигналы. Именно благодаря этому излучению и были открыты пульсары. Впрочем, впоследствии было обнаружено, что вспышки излучения наблюдаются во всех областях электромагнитного спектра: периодически повторяющиеся излучения были обнаружены не только в радио-, но и в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Самое удивительное, что эти вспышки повторяются с удивительно высокой точностью периодичности: во Вселенной как бы рассыпано множество космических часов. Впрочем, во всех случаях, когда проводились более точные измерения, было найдено, что периоды пульсаров медленно возрастают со временем (если не считать отдельных «сбоев»). Если обозначать через P период пульсара, то производные периода оказались масштаба $P' \sim 10^{-15}$ сек/сек.

Наиболее заметные нерегулярные изменения периодов у пульсаров — это внезапные возрастания скорости вращения — «сбои».

Заметим, что число открытых к настоящему времени пульсаров огромно (только в 1993 году было открыто 558 пульсаров), а их периоды составляют величины от полутора миллисекунд до нескольких секунд. Уже из самого этого факта следует, что пульсары представляют собой очень компактные объекты. В самом деле, за полторы миллисекунды световой сигнал распространяется всего лишь на 450 км. А ведь скорость света — это максимальная скорость, с которой могут передаваться сигналы, т. е. устанавливаться причинная связь с различными точками пространства. Таким

образом, пульсар, как излучатель сигналов, должен быть маленьким — не более сотни километров.

Высокая периодичность сигналов и малые размеры излучателя привели к установившемуся представлению, что пульсар — это быстро вращающаяся нейтронная звезда. Ее диаметр, даже при массе порядка массы Солнца, не должен превышать 30 км. А периодичность сигналов связана с неоднородностью излучающей поверхности и быстрым вращением звезды вместе с излучающим пятном — своего рода антенны.

Итак, пульсар — это нейтронная звезда с размерами в 10^5 раз меньше размеров Солнца. Так как ее наиболее вероятное происхождение — это коллапсирование ядра сверхновой звезды, то у нейтронной звезды следует ожидать наличия очень большого магнитного поля. У обычной звезды, как, например, у Солнца, магнитное поле составляет величину масштаба одного-двух гаусс, а у массивных звезд магнитное поле может составлять несколько сотен гаусс и доходить до десятков килогаусс. Так как магнитный поток сохраняется, то при сжатии в 10^5 раз магнитное поле увеличивается в 10^{10} раз. Если, например, исходное поле звезды до сжатия составляло 100 гаусс, то у нейтронной звезды оно достигает 10^{12} гаусс.

Итак, с точки зрения космических масштабов пульсар — это «крошечная» нейтронная звезда, вращающаяся с огромной скоростью и обладающая сверхсильным магнитным полем на своей поверхности. Мягкое рентгеновское излучение пульсара свидетельствует о том, что его поверхность имеет температуру в несколько миллионов градусов, т.е. на три порядка выше температуры поверхности Солнца. Пульсар — это совершенно необычный член Космического Семейства — не правда ли? Попробуем теперь понять, что происходит снаружи от пульсара, т.е. быстро вращающегося магнитного диполя. Допустим для простоты, что ось вращения пульсара совпадает с осью диполя (рис. 37).

Пусть R_0 — радиус светового цилиндра, т.е. такого цилиндра, который, вращаясь вместе с нейтронной звездой, имел бы скорость вращения $v = \omega R_0$, равную скорости света $c = 3 \times 10^5$ км/сек. Здесь $\omega = 2\pi/p$ — угловая скорость пульсара, а P — период пульсара, который мы считаем совпадающим с периодом его вращения. Итак, радиус $R_0 = c/\omega \cong 5 \times 10^4 P$ км. Если, например, P составляет величину 10 мсек, то радиус R_0 равен 500 км. Заштрихуем теперь ту область, где магнитные силовые линии целиком лежат внутри светового конуса (см. рис. 37).

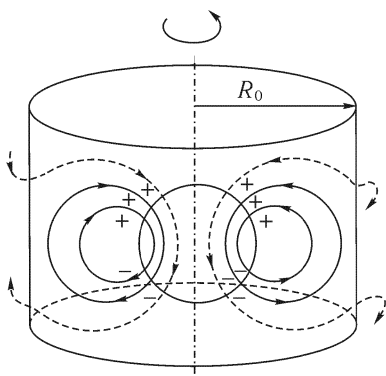


Рис. 37. Силовые линии магнитного поля вращающейся нейтронной звезды находятся внутри цилиндра с радиусом R_0 , который вращается со скоростью света $c = R_0/\omega$ вместе с нейтронной звездой. Силовые линии магнитного поля вне цилиндра расходятся спирально.

Эта область может быть названа магнитосферой пульсара — она, как целое, вращается вместе с пульсаром. Чтобы понять, почему это так, рассмотрим некоторую заряженную частицу, находящуюся в заштрихованной области. Пусть эта частица находится на расстоянии R от оси вращения, и для простоты рассуждений мы допустим, что она находится в меридианной плоскости $z = 0$. Если точка вращается с линейной скоростью v по окружности, то на нее действует со стороны магнитного поля сила Лоренца $F_B = eBv/c$, направленная по радиусу. Пусть имеется еще некоторое электрическое поле E . В силу симметрии на плоскости $z = 0$ оно может быть направлено только в радиальном направлении, так что полная сила равна

$$F = eBv/c + eE.$$

Если частица вращается вместе с силовыми линиями магнитного поля, то эта сила должна равняться нулю.

Можно сказать и наоборот: если в заштрихованной области имеется электрическое поле, компенсирующее силу Лоренца, то вся область вращается как жесткое тело со всеми своими заряженными частицами и силовыми линиями. Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно к магнитному полю, то и электрическое поле направлено перпендикулярно к силовым линиям. Другими словами, силовые линии внутри магнитосферы эквипотенциальны, так как продольная к полю компонента электрического поля равна нулю. Чтобы существовало электрическое поле, магнитосфера должна быть заполнена заряженными частицами, т. е. плазмой. Поверхность пульсара также должна иметь заряды — отрицательный ближе к меридианной плоскости и положительный — ближе к полюсам. Электрические поля на пульсаре достигают фантастических величин, поскольку и скорость вращения, и величина магнитного поля исключительно высоки. Но внутри магнитосферы

это не очень-то сильно влияет на движение частиц — ведь вдоль магнитного поля силы на заряженные частицы не действуют.

Картина резко меняется за пределами магнитосферы. Силовые линии здесь не могут замкнуться — ведь они протыкают световой цилиндр и за его пределами они становятся спиральными подобно струйкам Сегнерова колеса. Это значит, что в области вне магнитосферы появляется радиальная компонента электрического поля, которая вырывает заряженные частицы из поверхности пульсара и ускоряет их до огромных энергий. Вылетая на границу светового конуса, они порождают мощное радиоизлучение, которое и воспринимается земными антеннами.

Если ось диполя не совпадает с осью вращения пульсара, то картина становится еще сложнее. Впрочем, давайте спустимся с небес на поверхность пульсара и попытаемся понять, а что же из себя представляет нейтронная звезда.

Оказывается, что нейтронная звезда в чем-то похожа на Землю (рис. 38). Если не вдаваться в детали строения глубинных слоев пульсара, то упрощенно можно сказать, что у пульсара имеется твердая кора (2), выше которой расположена атмосфера (1), а ниже коры располагаются слои ядерного вещества, плотность и состав которого изменяется по мере углубления. Начнем снаружи. Ясно, что самый верхний слой (1) является и самым легким. Если он может быть в газообразном состоянии, то это — аналог нашей атмосферы. Затем следует твердая оболочка, плотность которой возрастает по мере углубления. Эта оболочка составлена, в основном, из ядер железа, плавающих в «растворителе» — смеси электронов и нейтронов. Поскольку вещество сильно сжато, то оно должно быть твердым, т. е. кристаллическим. Если углубляться внутрь пульсара, то вещество, подвергаясь сильному сжатию, будет все больше и больше походить на ядерную материю, из которой составлены ядра наших атомов. Давайте немного порассуждаем о верхних слоях пульсара.

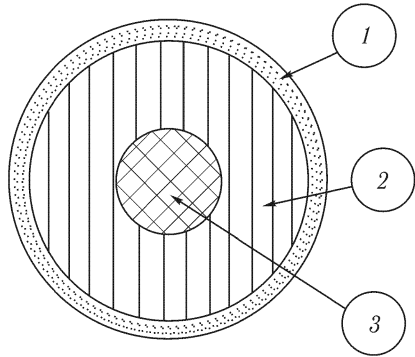


Рис. 38. Схематическое изображение нейтронной звезды: 1 — сверхплотное ядро, окруженное твердой корой — 2, над которыми находится атмосфера 3.

Прежде всего, оценим величину g ускорения свободного падения в поле силы тяжести на поверхности пульсара. Для этого можно поступить следующим образом. Найдем сначала ускорение Земли при его вращении вокруг Солнца:

$$g_E = \omega_E^2 R_E = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 R_E.$$

Здесь g_E — ускорение Земли, $T \cong 3 \times 10^7$ сек — период вращения Земли, т. е. один год, $R_E \cong 150$ млн км — расстояние Земли от Солнца. Приблизительно находим: $g_E \cong 6 \times 10^{-3}$ см·сек $^{-2}$.

Радиус пульсара $r_0 \approx 15$ км в 10^7 раз меньше радиуса орбиты Земли R_E . Поэтому для пульсара с массой Солнца ускорение g должно быть в 10^{14} раз больше, чем величина g_E . Обычно считается, что масса пульсара несколько меньше массы Солнца, но приближенно примем для величины g значение

$$g \cong 6 \times 10^{11} \text{ см·сек}^{-2}.$$

Эта величина в 6×10^8 раз больше, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли.

Теперь мы можем приближенно оценить толщину атмосферы на Пульсаре, пользуясь аналогией с Землей. На Земле толщина атмосферы составляет 10 км, т. е. 10^6 см. На пульсаре она была бы в 6×10^8 раз тоньше при комнатной температуре. Но поскольку температура пульсара на четыре порядка больше комнатной, то по порядку величины толщина атмосферы на пульсаре составляет 10 см. По абсолютной величине она мала, но по отношению к радиусу пульсара она составляет долю $\sim 10^{-3}$, т. е. как и на Земле.

Рассмотрим теперь кору. На толщинах в два-три километра это твердое вещество, состоящее из кристаллов, построенных из смеси ядер железа, нейтронов и электронов. Эта кора также может быть похожа на земную кору. Под действием силы тяжести и магнитного поля в такой коре, если она не пришла к полной однородности и равновесной стратификации, могут происходить разломы — звездотрясения. Такого типа звездотрясение — одна из причин «сбоев» во вращении пульсаров. (Впрочем, существуют гипотезы, что звездотрясения вызваны перераспределением вращательного момента в более глубоких слоях, где может существовать сверхтекучесть ядерного вещества.) При разломах могут появляться гейзеры или вулканы — совсем как на нашей Земле. И наконец, давайте обсудим, что может происходить в самом верхнем слое твердой коры, т. е. на самой поверхности пульсара.

Здесь нужно учесть наличие сверхсильного поля, которое может существенно изменить форму атомов. При поле в 10^{12} гаусс, т. е. на три порядка выше критической величины B_1 , атомы сильно вытягиваются вдоль магнитного поля. При этом «обнажаются» положительно заряженные ядра, которые могут притягиваться к электронным облакам соседних атомов. Образуются полимерные структуры. Сцепление атомов в таких структурах может быть гораздо больше, чем в привычных нам структурах на Земле. Если на Земле энергия связи имеет величину масштаба электрон-вольта, то атомы пульсара с умеренными зарядовыми числами могут иметь энергии связи на три порядка больше. Это значит, что на пульсаре структуры могут существовать без разрушения даже при температуре в миллионы градусов.

Таким образом, в самых верхних слоях можно представлять себе существование газовой атмосферы и тонких слоев жидкости, а под ними находится твердая кора из элементов с атомами среднего атомного веса, например, того же железа.

Можно спросить, а насколько поверхность пульсара может быть неровной: есть ли там горы, равнины и ямы? Для ответа на этот вопрос опять можно воспользоваться аналогией с Землей. На Земле масштаб гор — это километры, а масштаб более хрупких образований, например, деревьев — это десятки метров. На пульсаре ускорение силы тяжести в 6×10^8 раз больше, но зато и прочность материалов на три порядка больше. Таким образом, характерные размеры соответствующих структур должны быть по крайней мере в 10^5 раз меньше: «горы» — масштаба сантиметра, а более хрупкие структуры типа деревьев не должны превышать одного миллиметра.

Эти малые структуры могут, тем не менее, заметно влиять на механизм вырывания заряженных частиц из поверхности пульсара. Там, где существуют мелкие шероховатости с острыми вершинками, условия для вырывания зарядов существенно облегчаются. Поэтому и инжекция частиц высокой энергии в верхние слои магнитного поля пульсара может быть весьма неоднородной: могут существовать условно «горячие» пятна с облегченными условиями для выброса пучков заряженных частиц.

Таким образом, излучение пульсара может определяться сложной игрой поверхностных и объемных процессов в плазме пульсара.

— Леонид Андреевич, — сказал Миша. — Вы так интересно рассказали про пульсар, что я ясно представил себе, что там могут быть малые горы, моря, реки и равнины. А может ли там быть

жизнь? Может быть, там бегают малюсенькие слоники и бегемотики, а по травинкам-пальмам прыгают обезьянки величиной с комара?

— Ну, это-то уж ниоткуда не следует, — серьезно ответил Леонид Андреевич. — Впрочем, вопрос о том, до какого уровня может пойти развитие пульсара, вовсе не праздный. Но чтобы понять, что такое развитие и что такое жизнь, нам с вами нужно еще раз подробно побеседовать.

И Леонид Андреевич пригласил ребят прийти к нему через неделю.

11. Нелинейность и самоорганизация

— Что такое жизнь? Это сложный вопрос, — начал свою лекцию Леонид Андреевич при следующей встрече. — Но мы будем приближаться к ответу на него постепенно, шаг за шагом, начиная с наиболее простого. Самый простой подход к объяснению Мира и его сущности основан на утверждении, что Мир был создан Всевышним. Я не хотел бы сейчас углубляться в обсуждение роли Всевышнего, но лишь хотел бы сразу заметить, что нет оснований предполагать, что Всевышний начал бы создание Мира с нарушения всех законов, им самим установленных. Поэтому лучше встать на точку зрения, что Мир, как бы он ни был создан, развивается по тем же самым законам, которые мы — люди — шаг за шагом открываем и познаем. Поэтому Развитие Мира, а стало быть, и Разума следует обсуждать на базе тех представлений, которые у нас имеются, и на базе знания тех Законов, которые считаются нами твердо установленными.

Тот сложный Мир, который мы видим вокруг себя, сформировался не сразу, а в результате долгой эволюции. Эта эволюция началась с образования простых структур, которые порождали затем более сложные образования, и, наконец, сформировался тот удивительный Мир, которым не перестают восхищаться поэты и художники, а вместе с ними и мы с вами.

Самые простые пути образования новых структур хорошо описываются законами физики. Появление и дальнейшее развитие таких структур называется самоорганизацией. Чтобы понять, как протекают процессы самоорганизации, нам придется начать с еще более простых вещей. А именно, давайте познакомимся сначала с так называемыми нелинейными явлениями. Чтобы понять, что такое нелинейность, нужно, естественно, сначала определить, а что такое линейность.

Линейными называются такие физические процессы, в которых все характерные физические переменные оказываются связанными между собой линейными соотношениями. Самый простой пример линейного процесса — это гармонические колебания материальной точки под действием квазиупругой силы.

Пусть x — координаты частицы. Квазиупругой называется сила, величина которой пропорциональна отклонению от равновесия x :

$$F = -kx; k = \text{const.}$$

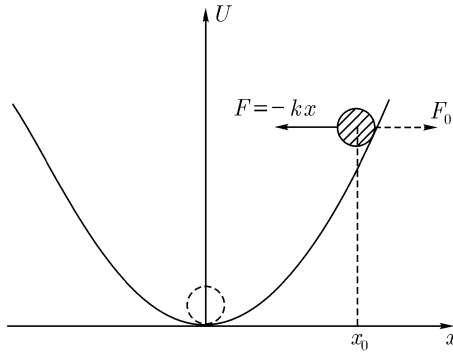


Рис. 39. Частица в параболической потенциальной яме, образованной квазиупругой силой $F = -kx$.

Потенциальная энергия частицы в поле действия такой силы имеет вид параболы (рис. 39). Если трения нет, то выведенная из положения равновесия точка испытывает гармонические колебания: ее координата зависит от времени по закону синуса или косинуса. Если имеется трение, то амплитуда колебаний уменьшается со временем, и частица в конце концов «успокаивается» в точке $x = 0$, отвечающей минимуму потенциальной энергии.

Если к материальной точке приложить внешнюю силу F_0 , то положение равновесия смещается в точку $x_0 = F_0/k$ (см. рис. 39). Как мы видим, координата x_0 связана с F_0 простым линейным соотношением. Поэтому если на точку действует несколько сил, то и координата точки равновесия просто пропорциональна сумме сил. Можно сказать, что для смещения имеет место принцип суперпозиции: силы не мешают друг другу, и элементарные смещения от отдельных компонент сил никак не чувствуют наличия других сил.

Несколько более сложное линейное явление — это распространение волн малой амплитуды в квазиупругих средах. Гармонические волны в таких средах имеют не только временную, но и пространственную зависимость в виде синусоиды. Для линейных волн опять справедлив принцип суперпозиции: разные волны не меша-

ют друг другу и каждая из них распространяется так, как будто других волн нет. Это справедливо, например, для обычного звука и света небольшой амплитуды, к которым мы привыкли в нашем обиходе.

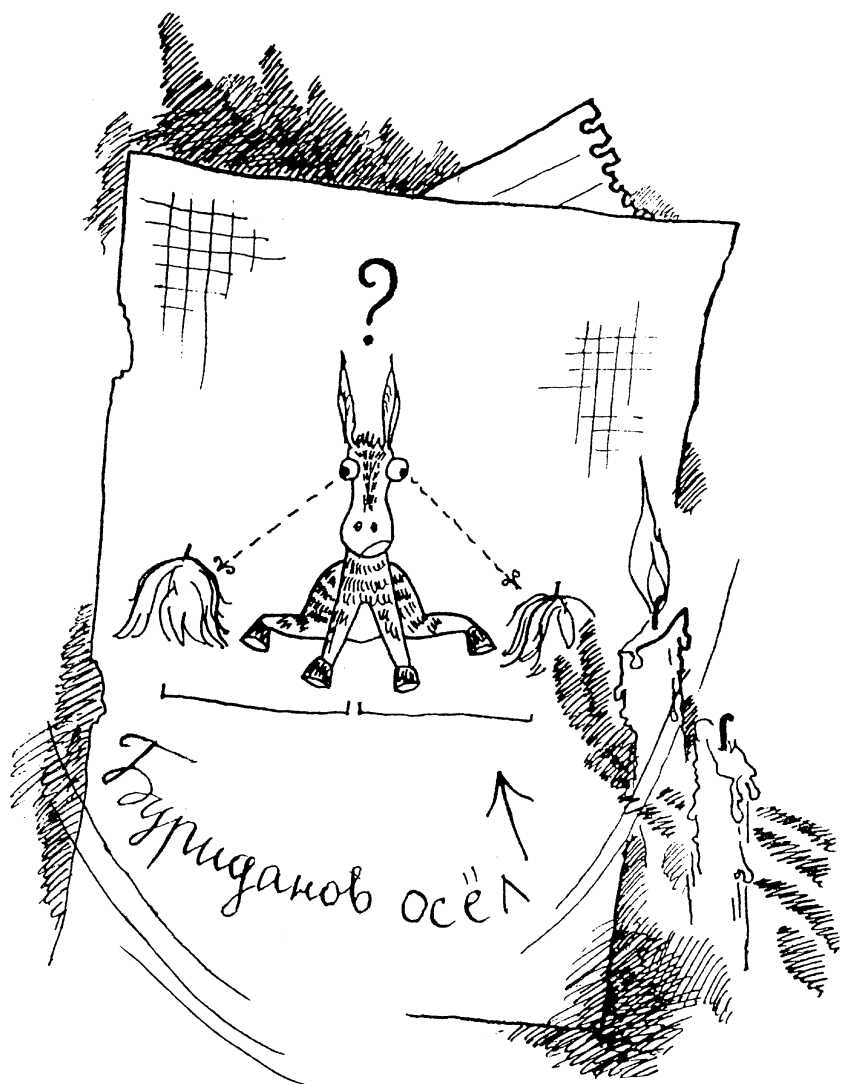
Нелинейные явления гораздо более сложны. Интуитивно это чувствовали еще древние греки. Философ-схоласт Буридан, живший в XIV веке, сформулировал известную с античных времен проблему (ее теперь называют «Парадокс Буриданова осла») следующим образом.

Пусть осел стоит в точности посередине между двумя копнами сена. Осел хочет есть. Но поскольку он находится в точности посередине, то у него нет никакой причины выбрать одну из эквивалентных копен сена. Стало быть, ему суждено умереть от голода, так и не начав свою трапезу.

Любому нефилософу ясно, что это не так: голодный осел быстро шагнет к одной из кучек сена и, быстро справившись с ней, примется за вторую. В чем же парадокс? Он в том, что исходное состояние осла между двумя копнами — неустойчиво. Поэтому оно не может существовать вечно. Малого возмущения достаточно, чтобы осел повернулся вправо или влево. При этом для внешнего наблюдателя не так уж важно, сделал ли осел свой выбор в результате случайного ветерка, донесшего до него запах душистого сена с одной из сторон, или он совершил свое действие как акт волевого решения. В любом случае исходное симметричное состояние будет нарушено. Соответствующее разрушение исходного симметричного состояния принято называть спонтанным нарушением симметрии.

Этот же процесс можно проиллюстрировать более простым физическим примером. Рассмотрим материальную точку в поле сил с потенциальной энергией, имеющей два минимума (рис. 40). Пусть кривая потенциальной энергии вполне симметрична, а материальная точка находится вначале на локальной вершине потенциального горба при $x = 0$. Это состояние неустойчиво: достаточно небольшого начального возмущения, чтобы частица скатилась в один из минимумов. Если есть трение, то частица после нескольких колебаний успокоится в конце концов на доньшке потенциальной ямы. Это то же самое, что и переход к завтраку у Буриданова осла.

Итак, в конечном состоянии частица окажется либо в левом, либо в правом минимуме потенциальной энергии (см. рис. 40). Происходит спонтанное нарушение симметрии. Как видно из рис. 40, потенциальная энергия совсем не похожа на параболу,



а сила, действующая на частицу, никак не является линейной. Напротив, процесс спонтанного нарушения симметрии является существенно нелинейным. А результат этого нелинейного процесса — достижение нового состояния, сильно отличающегося от исходного даже с точки зрения такого фундаментального свойства, как симметрия.

Спонтанное нарушение симметрии — это широко распространенный класс нелинейных явлений в природе. Самый грандиозный процесс спонтанного нарушения симметрии произошел в начальные моменты эволюции нашей Вселенной. Как мы знаем, наша Вселенная состоит из частиц — нейтронов, протонов, электронов, а не из античастиц: антинейтронов, антипротонов, позитронов. Хотя ничто не мешало нашей Вселенной выбрать второй вариант — оба они вполне симметричны. Выбор произошел путем спонтанного нарушения симметрии — в полной аналогии с рис. 40.

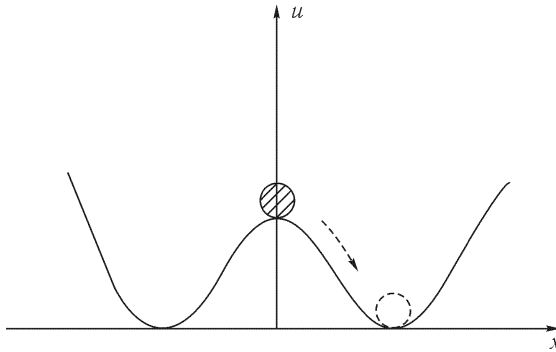


Рис. 40. Ангармоническая потенциальная яма с двумя минимумами и соответствующие бифуркации.

Можно привести массу других примеров спонтанного нарушения симметрии. Для обсуждаемых нами проблем интересен пример появления магнитного поля. Например, каждый домен ферромагнетика достигает минимума энергии, когда он намагничен. Однако направление этого намагничивания выбирается случайно — путем спонтанного нарушения симметрии. Другой пример — магнитное поле Земли или пульсара. Если даже допустить, что ось магнитного момента каким-то образом устанавливается вдоль оси вращения, то направление намагниченности, т. е. вдоль или против вращательного момента, выбирается спонтанно.

Рассмотрим теперь более подробно переход от состояния (см. рис. 39) с одной устойчивой точкой равновесия к состоянию (см. рис. 40) с двумя положениями устойчивого равновесия. Для этого мы возьмем потенциальную энергию в таком виде, чтобы она допускала наличие «горба» на фоне обычной параболы, отвечающей квазиупругой силе. Например, пусть потенциальная энергия равна:

$$U(x) = x^2 + P^2(1 + x^2)^{-1}.$$

Второе слагаемое описывает потенциальный «холм», а первое — потенциальную «яму». Если изменять P , то можно менять форму ямы, другими словами, управлять кривой потенциальной энергии. Поэтому P называют управляющим параметром. Написанную выше функцию потенциальной энергии можно представить в виде:

$$U(x) = \left(\sqrt{1 + x^2} - \frac{P}{\sqrt{1 + x^2}} \right)^2 + 2P - 1.$$

Если $P < 1$, то у этой функции имеется только один минимум в точке $x = 0$. Но если P становится больше единицы, то у функции $U(x)$ появляется два минимума: в точках, где выражение в скобках обращается в нуль. Таким образом, точки минимума потенциальной энергии определяются соотношением:

$$1 + x^2 = P.$$

Наряду с параметром P иногда вводят величину $P_c = P - 1$ такую, что при $P_c < 0$ имеется только один минимум, а при $P_c > 0$ — два минимума. Величину P_c называют параметром порядка или параметром упорядочения.

Итак, при $P_c > 0$ кривая потенциальной энергии имеет два минимума, в то время как при $P_c < 0$ — только один минимум. Точку $P_c = 0$ принято называть точкой бифуркации, т. е. точкой, где начинаются «зубцы» вилки с двумя зубцами.

В русских сказках существует часто повторяемый эпизод, представляющий собой типичный пример бифуркации. Русский богатырь едет верхом на коне и подъезжает к развилке дорог с большим камнем, на котором написано: «налево пойдешь — коня потеряешь; направо пойдешь — голову потеряешь». Русский богатырь, любящий своего коня — верного друга богатырских подвигов, выбирает правую дорогу и выходит победителем в сражении со Змеем Горынычем.

Теперь мы с Вами знаем, что бифуркация — это типично нелинейный процесс. И не только Буриданов осел не раздумывая решил сложную загадку нелинейной бифуркации. Бифуркации в физике встречаются на каждом шагу и разрешаются столь же эффективно.

В качестве параметра порядка могут выступать самые различные величины. Если, например, упорядочение происходит при понижении температуры, как в случае ферромагнетика, то разность $T_c - T$, где T_c — температура упорядочения, является скрытым параметром упорядочения. А явными параметрами порядка могут служить величина и направление магнитного момента.

В неравновесных системах со сложными структурами параметры порядка могут либо задаваться извне, либо создаваться одними частями структур по отношению к другим их частям. Впрочем, состояние на рис. 40 само является неравновесным в термодинамическом смысле этого слова. Я поясню вам, в чем тут дело.

Существует раздел физики, который называется термодинамикой. В нем изучаются процессы, которые являются равновесными, т. е. с полностью установившимся тепловым равновесием. Это означает не только установление одной и той же температуры во всех участках тела, но и равновероятное распределение тех параметров, которые могут принимать несколько значений. Если бы частица на рис. 40 имела два положения равновесия в микроскопических масштабах, то она из-за теплового движения могла бы время от времени перескакивать из одной ямки в другую. Поэтому в среднем никакого нарушения симметрии не происходило бы: с вероятностью $1/2$ частица находилась бы либо в левой, либо в правой ямке. Но если температура невысока, то время между последовательными перескоками из одного минимума в другой может быть настолько большим, что пребывание частицы в данной ямке можно считать вечным.

В этом случае систему, изображенную на рис. 40, можно считать ячейкой памяти: частица будет вечно находиться в той половине потенциала, в которую ее поместили вначале. Это элементарная ячейка памяти только с двумя позициями. Принято говорить, что такая ячейка хранит один бит информации и она термодинамически неравновесна.

Если мы создадим много идентичных ячеек информации, то величина хранимой информации возрастет. Если имеется N ячеек, то система памяти может хранить N бит информации.

Нетрудно подсчитать, что такая система имеет 2^N различных состояний, а вероятность одного из них равна $p_N = 1/2^N = 2^{-N}$.

Стало быть, полное количество информации I в одном из состояний равно

$$I = N = -\log_2 p_N.$$

Здесь \log_2 — это логарифм по основанию 2. Чем больше ячеек памяти, тем больший объем информации можно запомнить. И, соответственно, чем менее вероятно данное состояние среди множества идентичных состояний, тем большее количество информации хранится в данном состоянии. Когда мы говорим о количестве информации, мы имеем в виду просто количество бит информации безотносительно к содержанию этой информации.

Например, текст данной страницы книги содержит определенное количество смысловой информации, которую можно было бы поместить в магнитную память компьютера или переписать на дискетку. Мы получили бы при этом уплотненную запись смысловой информации. Однако к странице текста можно было бы подойти и с более простых позиций. А именно, разобьем эту страницу на множество строк с набором большого количества точек в каждой строке. Именно так часто и поступают, например, на телевидении. Теперь мы можем зачернить те точки, которые попали на буквы текста, и оставить светлыми все точки в промежутках между буквами и знаками препинаний. Мы снова будем иметь память с огромным количеством ячеек, а наш текст — это информация, хранимая в памяти. Число бит, которое может хранить страница, зависит от числа точек, получившихся от разбиения листа на ячейки. Другими словами, чем больше ячеек разбиения, тем более четким становится текст, а соответственно, тем больше объем информации. В данном случае текст запоминается не по смыслу, а просто как картинка на листке бумаги.

Пусть каждая буква составлена из множества крохотных точек, одинаковых по своему размеру. Пусть белое поле также разбито на такие же точки, так что полное число точек, черных и белых, равно N . Будем считать, что каждая точка может быть в двух состояниях — черном и белом. Именно так устроены большие табло в аэропортах, сообщающие информацию о прилете или отлете самолетов. Очевидно, что полное число состояний точек такого табло равно 2^N , а вероятность некоторого определенного текста (картинки) равна 2^{-N} (одно состояние на 2^N возможностей). Если N велико, т. е. изображение четкое, то вероятность данного состояния очень мала.

Допустим теперь, что эти точки настолько малы, что они подвергнуты тепловым флуктуациям: рано или поздно цвет точки ме-

няется. Ясно, что со временем изображение постепенно размывается, превращаясь в конце концов в равномерно серый фон (в среднем). Это конечное состояние и соответствует термодинамическому равновесию. Очевидно также, что из этого серого фона мы никогда не получим исходного текста за счет последующих случайных флуктуаций. Это явление называется необратимостью.

Мы с вами привыкли к необратимости вокруг нас. «Жизнь невозможно повернуть назад», — поется в одной из популярных песен. И это правда. Все вокруг нас протекает необратимым образом.

Известный английский физик Стивен Хокинг любит показывать простой видеосюжет. На чайном столике стоит чашечка с кофе, а затем она соскальзывает по поверхности стола, падает на пол и разбивается на множество осколков. Кофе разбрызгивается и растекается по полу. «Мы с вами привыкли к такому течению событий», — говорит Хокинг.

Затем он показывает тот же сюжет в обратном порядке: осколки фарфора соединяются в чашечку, лужица кофе снова собирается внутрь чашечки. Затем чашка с кофе прыгает на стол и там успокаивается.

«Такой сценарий никто из вас не видел», — говорит Хокинг.

Этот сюжет — очень наглядная демонстрация необратимости. Казалось бы, именно так и протекают все события — от более упорядоченного состояния к менее упорядоченному. Впрочем, . . . вопрос этот не так прост: ведь мы начали с того, что на столе находится чашечка кофе. Но ведь этой чашечки не существовало всего лишь несколько лет тому назад. Значит, существовал процесс, который привел к созданию чашечки из простой глины. Этот процесс также необратим, но он создал произведение искусства из аморфной глины, т. е. тонкую и сложную структуру из однородной массы глины. Мы с вами не можем представить себе, что такой процесс мог существовать без человека. Но ведь и человек появился как результат эволюции Природы, причем без нарушения принципа необратимости. Так что необратимость необратимости — рознь. Давайте попробуем разобраться в этом вопросе более подробно.

Вернемся опять к нашему табло. Пусть $\Gamma = 2^N$ есть полное число состояний системы, состоящей из N точек, которые могут иметь либо черный, либо белый цвет. Если исходный текст отвечал изначально только одному состоянию, то по мере размывания текста из-за тепловых флуктуаций число возможных состояний возрастает. В пределе оно стремится к $\Gamma = 2^N$, когда все равновероятные

состояния реализуются во времени как результат тепловых флуктуаций.

В статистической физике, являющейся более общей ветвью физики, чем термодинамика, существует свое понятие — «энтропия». Она определяется известным соотношением Больцмана:

$$S = k \ln \Gamma.$$

Здесь S — энтропия, k — постоянная Больцмана, \ln — натуральный логарифм, а Γ — число возможных реализаций данного макроскопического состояния. Постоянная Больцмана появилась здесь только потому, что в выражении ST , имеющем размерность энергии, температура измеряется в градусах. Если температуру измерять в энергетических единицах, то постоянную Больцмана можно опустить. Таким образом, можно написать просто:

$$S^* = \ln \Gamma,$$

если температура измеряется в энергетических единицах. Индексом * мы и отметили, что температура измеряется в энергетических единицах.

Итак, энтропия равна логарифму числа различных микроскопических состояний, реализующих одно и то же макроскопическое состояние. Если вначале, например, мы имеем на табло только одно состояние, то энтропия равна нулю. А по мере размытия изображения и стремления числа возможных реализаций к $\Gamma = 2^N$ энтропия растет и достигает своего максимума. Таким образом, необратимость замкнутой системы связана с ростом ее энтропии. Параллельно с ростом энтропии происходит разрушение информации. Эти два процесса идут как бы в противоположных направлениях. Следовательно, должна существовать определенная связь между энтропией и информацией.

Чтобы упростить количественную связь между информацией и энтропией, нам удобнее ввести некоторое изменение в определение информации. Оно связано просто с выбором единицы измерения для количества информации. Выше мы условились измерять информацию в битах, так что полное количество информации, которое можно размещать в N ячейках по одному биту, равно просто N . Но информацию вовсе не обязательно выражать в битах. Известно, например, что для характеристики магнитной памяти компьютера пользуются величиной мегабайт, равной миллиону байтов, а каждый байт равен восьми битам. И для выяснения

связи между энтропией и информацией удобно пользоваться единицей информации, которая слегка отличается от бита. А именно, возьмем вместо логарифма по основанию два натуральный логарифм. Тогда для табло с N двоичными ячейками и полным числом состояний 2^N информация некоторой определенной выборки определяется как

$$I^* = \ln 2^N = N \ln 2.$$

Как мы видим, новое определение информации таково: $I^* = I \ln 2$, где I — просто число бит. Это новое определение для величины I^* было введено Шенноном.

Итак, теперь мы подготовлены к тому, чтобы установить связь между информацией I^* и энтропией S^* . Для этого рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть в начальный момент на табло с N ячейками появилась совершенно определенная «чистая» запись. Ее объем информации

$$I^* = N \ln 2.$$

А энтропия этого состояния, не имеющего никаких флуктуаций, равна нулю: $S^* = \ln 1 = 0$. Пусть теперь начинает происходить процесс тепловых флуктуаций, который захватывает все большую и большую область в виде расплывающегося пятна. Пусть число ячеек в таком пятне равно n . Тогда из всей области табло с записью текста как бы изымается пятно с n ячейками, в которых черный и белый цвета попеременно сменяют друг друга. В среднем это пятно имеет серый цвет и не может хранить никакой информации. Стало быть, информация такого «поврежденного» табло равна

$$I^* = (N - n) \ln 2.$$

А энтропия табло «с изъяном» становится выше: число состояний, испытывающих тепловые флуктуации, равно $\Gamma = 2^n$. Таким образом,

$$S^* = \ln \Gamma = n \ln 2.$$

Как мы видим, имеет место соотношение:

$$S^* + I^* = \text{const.}$$

Насколько увеличивается энтропия S^* , ровно настолько же уменьшается количество информации.

В термодинамике доказывается, что энтропия замкнутой системы монотонно возрастает, пока не достигнет своего максимума. Этим и выражается свойство необратимости в терминах физических величин. Если мы имеем вначале какую-то структуризованную физическую систему, например, чашечку с кофе, то она обладает высокой степенью упорядоченности, которую можно выразить в терминах информации. Необратимый процесс, когда чашечка падает и разбивается, приводит к разрушению структуры и уменьшению соответствующей информации. А энтропия при таком необратимом процессе возрастает.

Таким образом, информация выступает в роли меры порядка, а энтропия — меры беспорядка. Другими словами, мерой порядка служит энтропия с обратным знаком. Именно поэтому французский физик Бриллюэн ввел понятия негэнтропии — энтропии с обратным знаком, как меры упорядоченности системы. Можно сказать, что чем больше негэнтропия, тем добротнее и упорядоченнее система. А по мере деградации этой системы вследствие необратимости негэнтропия уменьшается, и в любой замкнутой системе именно в этом направлении и идет процесс. Другими словами, то, что чашечка с кофе разбивается, это вполне естественно и соответствует направлению стрелы времени в необратимых процессах.

Но опять возникает вопрос, а как же чашечка с кофе могла возникнуть, если все необратимые процессы приводят к монотонному возрастанию энтропии, т. е. в конце концов к мертвому тепловому равновесию? И другой вопрос: а как же возникла первоначальная запись на табло, если любой процесс необратим и необратимость ведет к разрушению текста? Ответ напрашивается сам собой — и в том, и в другом случае упорядоченные структуры появляются извне, откуда-то из-за пределов рассматриваемой системы.

Чтобы описывать эти процессы, физики придумали понятие открытой системы. Открытая система имеет возможность постоянно обмениваться с внешней средой энергией и негэнтропией. Она как бы получает «питание» извне, чтобы избежать необратимого приближения к равновесию.

Понятие открытой системы частично снимает поставленный выше вопрос, но побуждает поставить новый вопрос. Ведь если мы к данной открытой системе присоединим внешнюю среду, то мы снова получим замкнутую систему. А в замкнутой системе энтропия может только возрастать. Возникает парадокс.

Впрочем, этот парадокс только кажущийся, и для его разрешения можно привести следующую аналогию. Вы согласитесь, наверно, что вода всегда течет вниз. Но еще в древности было известно, что систему орошения можно устроить по следующей схеме. К водяной мельнице можно присоединить насос вместо жерновов, и тогда малая часть потока реки может накачиваться насосом на большую высоту. Основная часть потока по-прежнему устремляется вниз, но какое-то количество воды из этого же самого потока может подниматься на большую высоту.

Аналогичный процесс может осуществляться при неравновесном переходе системы к состоянию с максимальной энтропией. В целом по системе энтропия возрастает, но в отдельных ее малых частях энтропия может убывать. Именно эту часть системы можно назвать открытой системой, и притом системой с самоорганизацией, т. е. с возрастанием ее упорядоченности. Внутри такой системы качество энергии может повышаться — ее неэнтропия будет возрастать, а энтропия уменьшаться. Но при этом такая система должна порождать в себе и выбрасывать наружу избыточную энтропию. Другими словами, эта открытая система должна потреблять энергию хорошего качества, с малой удельной энтропией, т. е. с высокой степенью порядка, а выбрасывать она должна «отходы». Только в этом случае открытая система может поддерживать свою упорядоченную структуру или даже усложнять ее и развивать. Как вы видите, мы с вами шаг за шагом приближаемся к пониманию жизни. Чтобы сделать следующий шаг, рассмотрим еще один крайне упрощенный пример.

На рисунке 41 изображено пламя свечи, которое мы можем рассматривать как открытую систему. К пламени, которое мы считаем находящимся в стационарном состоянии, непрерывно по мере сгорания пододвигается стержень воска с фитилем внутри, а снаружи — кислород из окружающего воздуха. Вверх от пламени поднимается струя углекислого газа — продукта сгорания воска.

Пламя является самоорганизующейся системой — его размеры автоматически подстраиваются таким образом, чтобы согласовать их со скоростью подъема жидкого воска по капиллярам фитиля. Исходные продукты для поддержания пламени — воск и кислород — имеют гораздо меньшую удельную энтропию, чем CO_2 — продукт реакции. Таким образом, перед нами явно неравновесный процесс повышения энтропии системы. Однако само пламя не разрушается необратимым образом. Напротив, оно поддерживается в устойчивом стационарном состоянии с постоянным обновлением вещества, из которого оно состоит. Пламя — это упрощенная

модель живого существа, которое поддерживает свою жизнь питанием и дыханием.

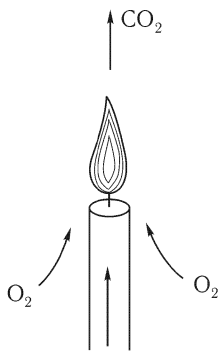


Рис. 41. Пламя свечи, как самоорганизующаяся открытая система.

А с другой стороны, для пламени свечи мы можем воспользоваться упрощенной моделью (см. рис. 40), которая описывает бифуркацию. В самом деле, у свечи имеется два устойчивых состояния: горящая и потухшая свеча. Пламя горящей свечи довольно-таки устойчиво по отношению к небольшим возмущениям, например, к небольшим дуновениям ветерка. Однако сильным потоком воздуха свечу легко задуть. А чтобы она снова загорелась, ее нужно зажечь — сама по себе свеча устойчиво находится в потухшем состоянии. Таким образом, пламя, подобно шарикку в потенциальном рельефе (см. рис. 40), имеет только два устойчивых состояния. Стало быть, его также можно рассматривать как элементарную ячейку памяти, которая может хранить один бит информации. В одном из состояний, а именно, зажженном, свеча находится как

бы в возбужденном самоорганизованном состоянии. Итак, пламя свечи — это открытая самоорганизованная система, которая устойчиво сохраняет свою внутреннюю структуру за счет внешней подпитки энергией и метаболизма — обмена веществ.

Именно так и устроены все сложные открытые системы. Их общая схема представлена на рис. 42. Как мы видим, открытая система потребляет извне энергию с малым удельным содержанием энтропии и вещество. За счет этих потоков энергии и негэнтропии открытая система может устойчиво поддерживать свою внутреннюю структуру. Потребляемая системой негэнтропия превращается в энтропию и выбрасывается наружу вместе с энергией в виде тепла. Потребляемое извне структурированное вещество (3), которое также является носителем негэнтропии, перерабатывается внутри системы и выбрасывается затем наружу в виде отходов. Система «живет» за счет потребления «свежей и калорийной пищи».

По принципу рис. 42 устроены практически все сложные самоорганизованные системы. Возьмем, к примеру, атмосферу Земли. Она представляет собой сложную открытую самоорганизованную систему. Падающие на поверхность Земли лучи Солнца подогревают и саму поверхность, и нижние слои атмосферы. За счет теплообмена и прогрева нижних слоев воздуха начинается верти-

кальная конвекция воздуха. Эта конвекция, казалось бы, приводит просто к большей скорости вертикального теплопереноса и более быстрому прогреву верхних слоев воздушной массы. Но на самом деле процесс конвекции этим не ограничивается, он становится как бы усилителем горизонтальных потоков. За счет эффекта «отрицательной вязкости», возникающей при вертикальной конвекции, происходит усиление слабых горизонтальных ветровых потоков. Образуется сложная система крупномасштабных потоков из циклонов, антициклонов и переходных течений между ними. Атмосфера в целом переходит в сложное самоорганизованное движение.

Крупномасштабные потоки воздуха сопровождаются переносом больших масс воды: над океанами вода испаряется, а глубоко внутри материков она конденсируется сначала в облака и тучи, а затем выпадает в виде дождя. По мере накопления влаги происходит ее собирание в ручьи и реки, и циркуляция воды опять заканчивается в морях и океанах. Вся эта сложная картина движения воздушных и водных масс регулируется за счет сложных нелинейных связей между отдельными компонентами — участниками всего этого сложно организованного механизма.

Процесс этот достаточно сложен. Однако его принципы опять могут быть представлены в виде простой картины (см. рис. 42).

Атмосфера приходит в движение за счет энергии Солнца. Но одной энергии для этого еще недостаточно: нужно, чтобы энергия приходила с потоком негэнтропии. Солнечный свет действительно имеет удельную энтропию гораздо ниже, чем энтропия тепловой энергии с температурой около 300° Кельвина. В самом деле, температура поверхности Солнца в 20 раз выше, а кроме того, лучистая энергия Солнца сильно анизотропна, т.е. она не рассеяна по углам. Именно за счет высокой организации Солнечной энергии и возможна сложно организованная жизнь атмосферы. А перенос паров воды с последующим выпадением осадков — это метаболизм атмосферы. Атмосфера усваивает воду в виде паров, а выделяет ее в виде дождя, снега и града. Обмен веществ у атмосферы является гарантом снабжения водой всей Биосферы Земли.

Биосфера сама построена по схеме рис. 42. В ту же схему укладываются и ее составные элементы — растения и животные. Растение — это тоже открытая система. Оно использует лучи Солнца как источник питания энергией и негэнтропией. Потребляя воду, углекислый газ и кислород воздуха, растения синтезируют сложные органические вещества, расходуя при этом множество дру-

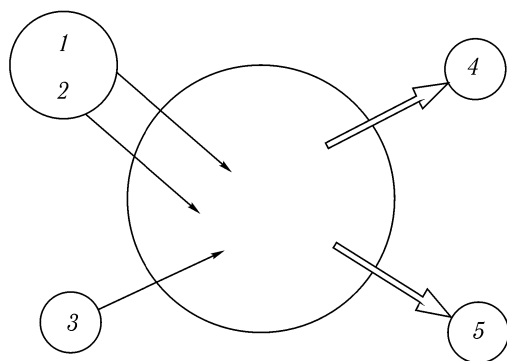


Рис. 42. Общая схема открытой системы: 1+2 — поток энергии и негэнтропии, 3 — потребление вещества, 4 — тепловой поток, 5 — материальные отходы.

гих элементов и соединений из почвы земли. А главным источником энергии и негэнтропии для них служит энергия лучей Солнца. Животные не умеют потреблять и использовать энергию Солнца напрямую. Но косвенно они ее потребляют, питаясь биомассой, наловленной растениями. С точки зрения первичности и вторичности потребления энергии Солнца, разница между травоядными животными и хищниками не так уж велика — и те, и другие пользуются уже усвоенной и переработанной энергией и негэнтропией Солнца.

Биосфера Земли, вместе с животным и растительным мирами, вместе с атмосферой и водными ресурсами, образует очень сложную самоорганизованную открытую систему со множеством нелинейных связей между ее составными элементами. Человек представляет собой лишь высшее звено в этой внутренне согласованной картине.

— А зачем же нужен человек? — неожиданно спросил Миша.

Леонид Андреевич ненадолго приостановился в своем рассказе, а затем в задумчивости стал отвечать Мише.

— Твой вопрос, Миша, очень правильный. На самом деле в нем даже два вопроса: есть ли у развития Природы цель, а если есть, то какова роль человека при движении к этой цели?

— Как вы понимаете, это вечный вопрос. Он переходит из поколения в поколение, так и не находя окончательного ответа. Поэтому и я вынужден ограничиться только некоторыми комментариями. Самый простой ответ на вопрос, зачем нужен человек,

существует у некоторых индейских племен. Исходя из того, что любым растением или животным кто-то питается, они полагают, что мыслями людей тоже кто-то питается. Стало быть люди с их мышлением существуют только для того, чтобы породить мысли и развивать Разум. А еще выше по развитию существует некто, кто может питаться мыслями, вероятно, используя их для своего развития. Это сверхсущество они называют Большим Орлом. Вряд ли мы узнаем когда-нибудь, существует ли Большой Орел на самом деле или нет. Но мысль о том, что человек может и не быть высшей ступенью в развитии Природы, скорее всего правильна. Лично мне больше импонирует высказывание русского философа В. С. Соловьева: «Вселенная — это не механизм. Вселенная — это организм, и этот организм есть Бог». Согласно этой точке зрения вся Вселенная в целом находится в развитии, причем движущей силой этого развития является Дух, если угодно — Бог. Поэтому человек — это составная часть, некоторый эпизод в общем сценарии развития Духа.

— А как устроен мозг человека, и почему человек может думать? — спросил Саша.

— Мозг — очень сложный объект, — ответил Леонид Андреевич, — физики начали разрабатывать подступы к его пониманию только в самое последнее время. Естественно, что они начали изучение принципов работы мозга с очень упрощенных его моделей. Эти упрощенные модели получили название нейронных сетей.

Естественно, что термин «нейронная сеть» возник не случайно: ведь мозг тоже состоит из огромного числа (порядка 10^{10}) нейронов. Нейрон — это клетка мозга, которая может находиться в двух состояниях: заторможенном или возбужденном. Таким образом, нейрон — это как бы живая ячейка памяти с емкостью в один бит.

Нейроны соединены между собой множеством нервных волокон-аксонов. Посредством аксонов они могут передавать друг другу сигналы, под действием которых нейроны могут переходить из заторможенного состояния в возбужденное и обратно. Таким образом, возникает очень сложный нелинейный объект.

Физическая нейронная сеть — это крайне упрощенная модель настоящей, живонейронной сети. Простейшую физическую нейронную сеть можно представить себе в виде набора множества элементов, каждый из которых может иметь только два устойчивых состояния. Эти элементы могут взаимодействовать между собой, и притом не только с ближайшими соседями, но и с более

далекими элементами. Это как бы табло, о котором мы говорили выше, но усложненное наличием связей между элементами.

Еще более простая аналогия строится следующим образом. Пусть каждый из элементов представляет собой крошечный магнитик, или спин.

Пусть каждый спин имеет только два направления — положительное и отрицательное. Тогда такой спин представляет собой элементарную ячейку памяти емкостью в один бит. Сам по себе такой объект из большого числа двоичных ячеек не представляет из себя ничего сложного. Сложность появляется, если спины взаимодействуют между собой, причем взаимодействие не ограничивается ближайшими соседями и взаимодействие может быть как положительным, так и отрицательным. Другими словами, часть взаимодействий стремится установить спины параллельно, а часть — антипараллельно друг другу.

Под действием такого взаимодействия возникает сложное упорядоченное состояние, которое называется спиновым стеклом. Ясно, что вся система стремится к некоторому минимуму энергии. Соответствующее состояние с минимумом энергии называется аттрактором — притягивающим множеством.

У спиновой системы может быть очень много аттракторов. Каждый такой аттрактор можно опять рассматривать как некоторый элемент памяти — ведь аттрактор, отвечающий минимуму энергии, должен быть устойчив по отношению к малым возмущениям. А при больших возмущениях спиновая система может пере скакивать в другой аттрактор. Картина опять становится похожей на рис. 40, но с огромным количеством минимумов.

Нетрудно понять, что такая нейронная сеть может очень избирательно реагировать на приложенные к ней извне возмущения. Ведь если возмущение согласованно действует на много спинов сразу, то оно довольно легко может перебросить эту систему из одного аттрактора в другой. Другими словами, нейронная сеть очень избирательно откликается на внешний сигнал с хорошо организованной структурой.

А простой шум только немного смещает систему около положения равновесия, так что такая система оказывается очень устойчивой к случайному шуму. Если к тому же в спиновой системе величина взаимодействий между спинами может сама меняться, например, под действием повторяющихся сигналов одной и той же формы, то положение аттракторов будет перестраиваться. Такая система начинает адаптироваться по отношению к восприятию внешнего мира. Теперь остался только один шаг — модификация

системы под действием сигналов, циркулирующих внутри системы, и мы получим что-то вроде «размышлений».

Разумеется, эта схема слишком упрощена и она еще крайне далека от Разума, но в ней открываются подступы к пониманию, что такое мышление. Вам, молодым, казалось бы и следует углубиться в эту область, — так закончил Леонид Андреевич свою лекцию.

12. На пульсаре¹

— Сегодня мы с вами совершим необычное путешествие, — сказал Леонид Андреевич Мише и Саше при следующей встрече. — Мы с вами побываем на пульсаре.

— Как так? — непроизвольно вырвалось у Миши.

— Я вам сейчас все подробно объясню. Но мне придется начать издалека. Вероятно, вы знаете, что до сих пор не прекращаются споры о том, для чего человеку и животным нужен сон. Самое простое объяснение состоит в том, что мозгу якобы нужен отдых: за день мозг переполняется впечатлениями, и поэтому, дескать, требуется сон, чтобы мозг несколько успокоился от впечатлений, обработал их, передвинул в более далекие ячейки памяти и стал снова восприимчив к новым впечатлениям. Как вы, наверное, уже убедились на своем жизненном опыте, простые и примитивные объяснения редко бывают близки к истине. В особенности, они довольно часто приводят к ошибке, если речь идет о сложных явлениях. А мышление — это одно из самых сложных явлений.

Я, и не только я, но и многие ученые, больше симпатизирую той точке зрения, что сон жизненно необходим человеку и является очень важной составной частью мышления. Если сформулировать намеренно очень упрощенно, то сон — это фаза общения человека с духовной сущностью мира. Можно сказать, что день используется человеком для общения с материальной частью мира, а ночь с ее сном — для общения с духовной сущностью мира. Разумеется, если это общение есть реальный факт, то его можно пытаться перевести на язык материальных сил, но на первых порах это не обязательно. Ведь все мы знаем, что мысль — это не простой продукт жизнедеятельности человека.

Итак, я предлагаю вам встать на ту точку зрения, что сон также представляет собой одну из форм познания человеком внешнего мира, но только не с помощью органов чувств, а путем более

¹В отличие от предыдущих разделов книги, имеющих научно-популярный характер, данный раздел следовало бы отнести к жанру научной фантастики или даже просто фантастики. Он включен в книгу лишь для того, чтобы побудить молодых читателей мечтать и фантазировать, ибо только так можно натолкнуться на новые идеи и мысли.

глубокого общения с миром. Если так, то и сновидения — это не просто результат «очистки» мозга от «наслоившихся» ненужных впечатлений, а своеобразная форма ощущения внешнего мира. Неудивительно поэтому, что существуют пророческие сны, сны — откровения, сны — предчувствия и т. д. Реальность мира состоит не только в том, что мы можем постичь ее с помощью наших непосредственных восприятий. Она гораздо глубже, и наша мыслительная деятельность — это только малая составная часть духовной активности Мира. Опираясь на эти представления, я еще несколько лет тому назад начал исследования, нацеленные на использование сна для активного познания мира. Я не буду вам рассказывать о всех трудностях на пути этих исследований, а покажу только их результат. Прошу вас перейти в экспериментальный зал.

Леонид Андреевич вместе с Мишей и Сашей вышли из кабинета, и пройдя немного по коридору, вошли в экспериментальный зал. Он представлял собой большую комнату, плотно заполненную самыми разнообразными приборами.

В отличие от полусферических залов, поражавших своей опрятностью и элегантностью, этот зал казался предельно безобразным. Приборы соединялись между собой хаотически раскиданными проводами. Казалось, что либо их еще не успели привести в порядок, либо их продолжают пересоединять каждый день.

— Прошу вас сюда к этим креслам, — сказал Леонид Андреевич. Миша только теперь заметил три кресла, тоже оббитые проводами, как и приборы. «Похожи на зубоврачебные кресла», — подумал Миша.

— Точь-в-точь, как электрический стул, — произнес вслух Саша.

— Не бойтесь, — сказал Леонид Андреевич. Он размашисто сел в среднее кресло и предложил сесть Мише по левую, а Саше по правую руку от себя.

— Вы, вероятно, знаете, — продолжал объяснять Леонид Андреевич, — что на Востоке существует ритуал погружения в состояние медитации. Человек путем самогипноза погружается в состояние, в котором, как ему кажется, он получает возможность познания высших миров.

В этом зале можно осуществить что-то аналогичное. С помощью имеющейся здесь аппаратуры можно спокойно и без всяких опасностей для здоровья вводить человека в состояние медитации, а затем выводить из него. Более того, аппаратура позволяет осуществлять целевую медитацию, т. е. медитацию для получения определенной информации, характер которой задается заранее с помо-

щью тех же приборов. Я не буду раскрывать вам все возможности этого оборудования, а расскажу лишь о предстоящем эксперименте.

Я предлагаю вам и надеюсь, что вы примете мое предложение, принять участие в путешествии на пульсар. Оно будет протекать следующим образом. Мы все вместе будем полулежать в тех самых креслах, в которых сейчас сидим. На нас наклеят множество датчиков и электродов, которые будут присоединены к окружающим нас приборам. Все эти приборы вместе с суперкомпьютерами, расположенными в соседних залах, образуют единую интегральную информационную систему. Самые главные компоненты этой системы находятся вне здания. Это крупный оптический телескоп и очень чувствительный радиотелескоп с большим параболическим зеркалом. Оба телескопа направлены на пульсар и принимают его излучение. Они устроены так, что позволяют принимать не только само излучение, но и те корреляции между квантами оптического радиодиапазона, которые переносятся вместе с излучением. Оказывается, что именно в этих корреляциях и сосредоточена основная информация об объекте. Мы еще не умеем преобразовывать эту информацию в текст, который можно было бы затем прочитать. Однако, если человек переводится в состояние медитации, то его мозг напрямую воспринимает эту корреляционную информацию. Человек как бы погружается в сон, а его сновидение управляется той информацией, которая приносится в виде корреляционных связей квантов излучения.

Все это выглядит как сновидение, индуцированное извне. И если вы согласитесь на участие в этом эксперименте, то мы все втроем как бы перенесемся на поверхность пульсара, пребывая во сне или в полусне.

— А что мы надеемся там увидеть? — спросил Саша.

— Это зависит от того, что там есть, — ответил Леонид Андреевич. — Более точно, это зависит от меры организации, или, если угодно, «духовности» пульсара. Если поверхность пульсара — это только безжизненная пустыня, то этим наши наблюдения и будут исчерпаны. А если там существует очень сложная организация, т. е. что-то вроде жизни, то мы сможем ее воспринять и попытаться понять.

— А если эта «жизнь» связана с такими мелкими структурами, что мы не сможем ее заметить? — спросил Миша. — Ведь до Левенгука никто не знал, что существует мир микроорганизмов.

— Дело в том, — ответил Леонид Андреевич, — что мы будем ощущать и познавать жизнь пульсара не органами чувств, а посред-

ством духовного общения. Поэтому физические границы, связанные с размерами объектов, для нас несущественны. Ну, а теперь слово за вами. Вы должны либо с полной готовностью решиться на эксперимент, либо, не задумываясь, от него отказаться. Успех эксперимента во многом зависит от вашей безоглядной готовности на участие в нем. Малейшие колебания могут все испортить. Если угодно, ваша смелость — это ваша вера. Еще раз хочу подчеркнуть — эксперимент не причинит ни малейшего ущерба вашему здоровью, если вы отважитесь на него в состоянии безоговорочной готовности и безоглядной веры.

— Я готов и хочу принять участие в эксперименте, — громко и твердым голосом сказал Саша.

— Я, безусловно, хочу и готов немедленно включиться в эксперимент, — не долго думая отчеканил Миша.

— Тогда начинаем, — чеканными словами подытожил Леонид Андреевич.

Тотчас откуда-то бесшумно появились ассистенты в белых халатах. Они начали довольно длинную процедуру прикрепления множества небольших металлических пластинок к различным участкам тела и головы. Кресла были установлены в такое положение, чтобы все три пациента приняли полулежачее положение.

— Все готово, — произнес наконец старший ассистент. — Прошу вас всех полностью успокоиться, расслабиться и не о чем не думать. Желательно также закрыть глаза.

Миша закрыл глаза и спокойно погрузился в мягкую поверхность кресла. Все было тихо... Но вот на фоне этой тишины начало появляться какое-то гудение. Затем оно стало усиливаться, и Мише показалось, что он уже где-то раньше слышал этот низкочастотный ровный звук, который становился все громче и громче. Вместе с гудением перед глазами Миши стали возникать какие-то образы. Сначала это были как бы всполохи яркого красного света. Затем центральная часть переменного по яркости красного сияния стала светлеть, а его периферия темнеть и одновременно стал утихать гул. И вот уже остался один светлый круг впереди, а вокруг него — темнота. «Свет в конце тоннеля», — мелькнуло в сознании Миши.

— «Да ведь это же тот самый тоннель, который нарисован на известной картине Иеронима Босха и по которому якобы устремляются на тот свет души умерших», — подумал Миша. Но он еще не успел или не смог в полусне осознать, что происходит, и проявить беспокойство, как услышал ровный голос Леонида Андреевича, оказавшегося где-то совсем рядом.

— Мы с вами движемся по направлению к пульсару, — сказал академик. — Яркий круг впереди — это и есть пульсар, т.е. нейтронная звезда.

Яркий светлый круг стал увеличиваться в размерах, приобретая голубоватый оттенок. Наконец, он занял все поле зрения, и Миша увидел твердую светящуюся поверхность голубого цвета.

— Как вы видите, поверхность пульсара оказалась твердой, — раздался голос Леонида Андреевича.

— Да, но ведь она абсолютно гладкая, и блестит так, как будто была отполирована, — это произнес где-то рядом Саша. Действительно, ровная и лишь слегка матовая поверхность выглядела как искусственный лед, равномерно подсвечиваемый снизу голубым светом.

— Не спешите с выводами, — раздался опять голос Леонида Андреевича.

— Давайте-ка повнимательнее разглядим поверхность и, пожалуйста, высказывайте вслух ваши суждения и наблюдения.

Мише показалось, что он пододвигает свое лицо все ближе и ближе к гладкой поверхности.

— Мы начали адаптировать свои размеры к размерам возможных неоднородностей на поверхности. Мы как бы уменьшаемся в своих размерах, — послышался голос Леонида Андреевича.

Поверхность продолжала приближаться и увеличиваться в размерах. Вдруг Мише показалось, что он начал различать какие-то детали. Они казались полупрозрачными и поэтому были еле-еле различимыми. Но вот он смог различать все больше и больше деталей. И вдруг он разом охватил взглядом удивительно тонкий узор поверхности.

— Я увидел какой-то замечательный узор, — воскликнул Миша.

— Да, я тоже начал его различать, — сказал Леонид Андреевич.

— Оказывается, вся поверхность представляет собой как бы сплошное сложное кружево, — это присоединился к разговору Саша.

— Я прошу вас очень внимательно вглядываться в структуру и рассказывать вслух все, что вы видите, — произнес Леонид Андреевич.

— Я вижу узор, — сказал Саша, — состоящий из множества комочков, соединенных между собой большим количеством нитей. Вся эта сложная картина напоминает мне нейронную сеть, изображение которой я недавно видел в книге по физике упрощенных нейронных сетей. Неужели на звезде может существовать такая структура? Ведь это что-то похожее на жизнь?

— Не исключено, что мы встретимся с новой формой жизни, — ответил Леонид Андреевич. Ведь главное, что требуется для жизни, — это поток энергии с достаточно высокой степенью упорядоченности. Если эту упорядоченность характеризовать негэнтропией — отрицательной энтропией, то поток энергии должен обладать просто высокой негэнтропией. На пульсаре такой поток энергии есть — это поток тепла изнутри пульсара. Температура пульсара очень высока, так что энтропия этого потока невелика. Поток тепловой энергии излучается в космическое пространство, и часть этого потока может «перехватываться» сложно организованными структурами для поддержания самих структур и их развития. Если солнечной энергии оказывается достаточно для поддержания жизни на Земле, то почему же теплового потока пульсара не хватит для создания структур?

— Но ведь на Земле температура всего лишь 300 градусов Кельвина, а температура Солнца в 20 раз выше, — сказал Саша. Поэтому энергию Солнца действительно можно считать высокоупорядоченной.

— Это верно, — ответил Леонид Андреевич. У Земной жизни контраст в негэнтропиях у потребляемой и отдаваемой энергии очень велик, если учесть, что потребление энергии начинается с фотосинтеза в хлорофилле растений.

Но жизнь может существовать и при меньшем контрасте энтропий. Известно, например, что вблизи горячих источников на дне океанов существуют определенного вида бактерии, которые поддерживают свою жизнь только за счет потока тепла от горячего источника. Этой небольшой неравновесности оказывается достаточно для синтеза сложно организованных бактерий. Я думаю, что контраст между очень горячей поверхностью пульсара и холодным космическим пространством также может быть достаточным для поддержания какой-то необычной жизни.

— Но я должен заметить, — добавил Леонид Андреевич, — что любая жизнь — это постоянное движение. Живой организм — это ступок высокоорганизованной структуры, которая поддерживает свое существование только за счет непрерывного обмена, точнее, постоянной замены вещества и восстановления всех нарушений структуры. Как только кончается «питание», прекращается и жизнь. Поэтому, если мы действительно встретились с новой формой жизни, то нужно постараться понять, какой формой движения она поддерживается.

— Я заметил движение! — воскликнул Миша.

— Посмотрите, над каждым комочком, который можно назвать

нейроном, имеется небольшое туманное облачко, которое порождает капельки. Эти капельки осаждаются на бугорке и потом жидкость стекает вниз. Что-то вроде микрождя.

— Вот это да! — возбужденно воскликнул Леонид Андреевич. — У нас с вами существует специально созданная кровеносная система, которая прокачивает кровь и тем самым создает возможность для обмена веществ. На нашей планете Земля те же функции выполняет атмосфера: именно она создает облака и, перенося их на большее расстояние, орошает Землю дождем, а реки, подобно венам человека, отводят загрязненную воду далеко в море. А здесь каждый микроорганизм, назовем его так для определенности, создает себе маленький дождик. Такой вариант «кровоснабжения» может осуществляться только при исключительных физических обстоятельствах. А именно, должно найтись такое вещество, которое конденсировалось бы в жидкость при температуре, лишь чуть-чуть меньше температуры «голой» поверхности пульсара. Каждый комочек — нейрон — немного экранирует поток тепла изнутри пульсара, и малого уменьшения температуры из-за этой экранировки оказывается достаточно для конденсации паров. Все это похоже на «птичку Хоттабыча» — детскую игрушку в виде стеклянной птички, которая все время наклоняется, чтобы «попить воду» из стакана. Внутри стеклянной запаянной колбы — теле птички — находится эфир, который конденсируется в холодном клювике птички, когда она, качаясь, охлаждает его за счет испарения воды. Птичка с утяжеленной головкой опускает клювик в стакан с водой, эфир из клювика испаряется и переносится в основное тело птички. После этого птичка выпрямляется и начинает качаться по инерции. Клювик опять охлаждается, и птичка снова «пьет» воду. А здесь все то же самое происходит локально над каждым «нейроном» — если только это действительно нейрон.

— А разве здесь не может идти обычный дождь? — спросил Саша.

— Конечно, может, — ответил Леонид Андреевич. — Ведь я объяснял вам, что ветры на Земле возникают благодаря локальной конвекции, которая приводит к эффекту отрицательной вязкости у крупномасштабных потоков. Именно поэтому и дуют ветры на Земле. Они переносят пары воды на большое расстояние. Конденсируясь, пары воды образуют облака, а затем тучи с дождем. То же самое может происходить и здесь на пульсаре. Атмосфера здесь есть, условия для локальной конвекции тоже выполнены — ведь сам пульсар создает постоянный поток тепла из внутренних слоев к поверхности. Условия для образования дождя из какого-то

вещества также существуют — локальные дожди мы с вами обнаружили. Значит, могут быть и обычные облака, и дождевые тучи, переносимые ветром.

Рассмотрим теперь повнимательнее структуру. Если сложная паутина соединений между нейронами позволяет распространяться электрическим сигналам между нейронами, то это действительно настоящая нейронная сеть. Лучше сказать, это огромный супермозг, покрывающий всю поверхность пульсара. Давайте постараемся понять, над чем такой супермозг «думает» и вообще, как он функционирует. Постарайтесь опять заметить какие-нибудь детали.

— Я заметил какие-то небольшие искорки, — сказал Миша. — Я читал, что так выглядят огни Святого Эльма, но откуда они здесь могли взяться?

— Они, скорее всего, имеют то же самое происхождение, что и земные огни Святого Эльма, т.е. коронный разряд. На Земле такое свечение появляется перед грозой, когда грозовое облако создает электрическое поле большой напряженности. Кстати сказать, коронный разряд хорошо слышен, а иногда его можно и увидеть на линиях электропередачи высокого напряжения. А на пульсаре электрическое поле образуется в результате вращения пульсара вместе с вмороженным в него сверхсильным магнитным полем. Искорки, что мы видим, это электронные пучки, которые вытягиваются из поверхности пульсара.

— Посмотрите, какую странную структуру я обнаружил, — раздался опять голос Миши. Она выглядит как множество решеток, расположенных в шахматном порядке. Кто их здесь построил?

— Удивительно, — откликнулся Леонид Андреевич. — Такое может быть создано только при участии Разума. И скорее всего — это разум самого пульсара. Кстати, это множество решеток очень похоже на тот самый радиотелескоп, который обнаружил в 1967 году первый пульсар. Напомню, что он состоял из множества сфазированных между собой антенн. А зачем здесь такое сооружение?

Не исключено, что у пульсара совсем по-другому функционирует его «нервная система». Ведь с помощью управляемых электронных пучков можно возбуждать электромагнитные волны в плазме, окружающей пульсар, а антенны могут воспринимать эти волны. Это значит, что связь между «нейронами» может быть не «проводной», как у нас с вами, а электромагнитной. Такая связь может быть намного эффективнее — ведь электромагнитные волны распространяются со скоростью света.

Кроме того, сфазированные антенны могут принимать и далекие сигналы из космоса. Это могут быть, например, отраженные сигналы, первоначально испущенные пульсаром. В этом случае пульсар является как бы огромным радаром. А могут приходить также очень слабые сигналы от далеких источников радиоволн в Космосе.

— Может быть, пульсар наблюдает за другими пульсарами или даже «переговаривается» с ними? — в шутку спросил Саша.

— Дайте немного подумать, — сказал Леонид Андреевич и начал размышлять вслух. — Ты, Саша, может быть и не так далек от истины. Действительно, если пульсар — это супермозг, что похоже на правду, то у него есть какие-то цели в его «размышлениях». И у него, безусловно, есть потребность общаться с внешним Миром. Такому пульсару требуется «говорить» и «слышать». Говорить, т.е. сообщать или испускать информацию, он может как раз с помощью того излучения, которое принимается на Земле. Те искорки, которые мы видим, могут появляться совсем не случайно, а в результате «сознательного» управления электрической проводимостью отдельных участков поверхности пульсара. Супермозг может таким образом «произносить фразы». При наличии очень сложной корреляции между испускаемыми пучками электронов и возбуждаемыми ими квантами излучения не исключена возможность передачи огромного количества информации просто самим излучением пульсара. Ведь мы с вами смогли организовать наше путешествие только благодаря такой информации. Итак, «говорить» пульсар, скорее всего, может. А как ему «слушать»?

Если эти решетки действительно представляют собой сфазированные антенны, то пульсар может воспринимать ту же информацию, которую мы смогли воспринимать в нашей лаборатории на Земле. Эта информация «записана» в корреляционных связях между квантами радиации. Если так, то пульсар — это Сверхразум, который может напрямую общаться с другими разумными объектами Вселенной.

— Но разве существует Разум помимо человека? — наивно спросил Миша.

— Ну, конечно, — ответил Леонид Андреевич. — Думать, что человек — это высшее создание Природы или Бога, безусловно, крайне недалекновидно. Природа гораздо богаче человека, и ее Разум, как целого, намного превосходит сравнительно скромные мыслительные возможности человека.

— Но тогда какое же соотношение между человеком и пульсаром? Может быть, пульсар и есть тот самый Большой Орел, который питается мыслями человека?

— Как это ни странно, но такая возможность не исключена, — ответил Леонид Андреевич.

— В самом деле, если пульсар — это колоссальный супермозг с огромной жаждой Познания, то он должен попытаться овладеть как можно большим объемом информации. Для него мыслящие существа, подобные человеку — это дополнительная возможность расширения своих мыслительных способностей. Ясно, что имманентная Духу жажда Познания должна вызывать у него информационный голод. Даже мы, простые смертные, и то требуем «хлеба и зрелищ», т. е. питания как материального, так и информационного. Ясно, что у Суперразума информационный голод еще больше, и он «как пчелка» должен собирать «нектар знаний», где только может. А при более активной позиции он даже может способствовать тому, чтобы другие разумные существа пополняли его копилку знаний еще быстрее.

— Так что же выходит, Земля — это просто инкубатор для выращивания знаний для Суперразума? — спросил Саша.

— А почему бы и нет? — ответил Леонид Андреевич. — Разумеется, мы, люди, сильно зазнались и иногда считаем себя вершиной Вселенной. Но ясно же, что это не так: у Вселенной должны быть задачи и цели, не доступные нашему пониманию. Так что станем поскромнее и будем счастливы тем, что нам и так много дано. . .

— Леонид Андреевич! — раздался громкий голос ассистента. — К сожалению, мы вынуждены были разбудить Вас и Ваших учеников: Вы так глубоко уснули, что мы начали беспокоиться за Ваше здоровье.

— Как досадно, что всегда, сны кончаются на самом интересном месте, — воскликнул Леонид Андреевич. — Но не унывайте, ребята, мы с вами совершим еще много увлекательных путешествий!

Борис Борисович Кадомцев

НА ПУЛЬСАРЕ

*Зав. редакцией УФН М. С. Аксентьева
Эскиз обложки В. Я. Батищев
Художник М. В. Ботя
Технический редактор А. В. Ширококов
Корректор М. А. Ложкина
Литературный редактор Т. С. Вайсберг
Рисунки О. А. Кублашвили*

Подписано в печать 24.09.01. Формат 60 × 84¹/₁₆.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,44. Уч. изд. л. 7,53.
Гарнитура Балтика. Бумага офсетная №1.
Тираж 1000 экз. Заказ №

Издание подготовлено совместно
редакцией журнала «Успехи физических наук»
117071 Москва, Ленинский просп., 15
Тел. (095) 236-30-54, 190-42-44, 955-03-25
E-mail: ufn@ufn.ru <http://www.ufn.ru>

Лицензия на издательскую деятельность №040522 от 12.09.97
и научно-издательским центром «Регулярная и хаотическая динамика»
426057, г. Ижевск, ул. Пастухова, 13.
Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.
E-mail: borisov@rcd.ru <http://rcd.ru>

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ГИПП «Вятка».
610033, г. Киров, ул. Московская, 122.
