

# **А**СТРОНОМИЯ

**Дополнительные  
материалы  
к школьному курсу**

**10–11  
классы**

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
дополнительного профессионального образования  
«Нижегородский институт развития образования»  
КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

---

# **А**СТРОНОМИЯ

10—11 КЛАССЫ

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ПО ШКОЛЬНОМУ КУРСУ**



*Учебно-методическое пособие  
для учителей физики и астрономии*

---

Нижний Новгород  
Нижегородский институт развития образования  
2019

УДК 372.853  
ББК 74.262.26  
А91

**Авторский коллектив:**

**А. Ф. Беленов**, канд. физ.-мат. наук,  
доцент кафедры естественнонаучного образования  
ГБОУ ДПО НИРО;

**В. В. Новиков**, докт. физ.-мат. наук,  
профессор ННГУ им. Н. И. Лобачевского;

**Л. А. Прозаровская**, старший преподаватель  
кафедры естественнонаучного образования  
ГБОУ ДПО НИРО

**Рецензенты**

**Е. Н. Мясников**, докт. физ.-мат. наук,  
профессор, зав. кафедрой общей физики ВГУВТ;

**Б. В. Булюбаиш**, канд. физ.-мат. наук,  
доцент кафедры общей физики НГТУ им. Р. Е. Алексеева

*Рекомендовано к изданию  
научно-методическим экспертным советом  
ГБОУ ДПО НИРО*

**Астрономия.** 10—11 классы: Дополнительные материалы по школьному курсу : учебно-методическое пособие для учителей физики и астрономии / авт. колл. : А. Ф. Беленов, В. В. Новиков, Л. А. Прозаровская. — Н. Новгород : Нижегородский институт развития образования, 2019. — 76 с.

ISBN 978-5-7565-0838-3

Учебно-методическое пособие адресовано учителям астрономии и физики, совершенствующим свои знания по астрономии в рамках курсов повышения квалификации.

**УДК 372.853  
ББК 74.262.26**

© Беленов А. Ф., Новиков В. В., Прозаровская Л. А., 2019

© ГБОУ ДПО «Нижегородский институт развития образования», 2019

**ISBN 978-5-7565-0838-3**

## Введение

**М**атериал учебно-методического пособия базируется как на постановке авторских задач-оценок, так и на методических рекомендациях по преподаванию и освоению курса астрономии в старших классах. В основу построения задач положен анализ астрономических явлений, касающихся архитектуры и динамики движений небесных тел, а также физических свойств объектов ближнего и дальнего космоса. В пособии представлено решение ряда предложенных задач, однако бóльшая часть задач требует самостоятельного решения педагогами. Результаты такого решения задач являются продолжением содержания темы или раздела, к которым относится задача, что и входило в замыслы авторов.

Учебно-методическое пособие содержит дополнительный материал и методические рекомендации по изучению тем школьного курса «Астрономия», освоение которых требуется как для практики проведения уроков по предмету, так и для внеурочной деятельности учителей физики и астрономии.

Содержание пособия необходимо для прохождения курсовой подготовки в рамках целевых курсов Нижегородского института развития образования:

- «Теория и методика преподавания астрономии в условиях реализации ФГОС»;
- «Современные подходы в преподавании предметов естественнонаучного цикла»;
- «Теория и методика преподавания предметов естественнонаучного цикла в условиях реализации ФГОС».



## Геометрическая астрономия Древней Греции: оценка размеров и расстояний в Солнечной системе

Современная астрономия — это телескопы, позволяющие видеть звездное небо не только в «видимых» лучах и не только с поверхности Земли, а также богатейший арсенал математических методов обработки информации.

Перенесемся во времена Древней Греции (III в. до н. э. — II в. н. э.). На примере задач-оценок мы познакомимся с достижениями двух известных греческих астрономов — *Эратосфена* (276 до н. э. — 194 до н. э.) и *Аристарха Самосского* (ок. 310 до н. э. — ок. 230 до н. э.). Кстати, Аристарх одним из первых предложил гелиоцентрическую гипотезу движений планет в Солнечной системе. Наблюдательная астрономия существовала и ранее — в Древнем Египте, Вавилоне, Шумерском государстве. Но грекам удалось соединить *результаты наблюдений с математическим моделированием* на языке геометрии. Поэтому многие историки астрономии и физики (в частности, А. Паннекук, Ф. Розенбергер

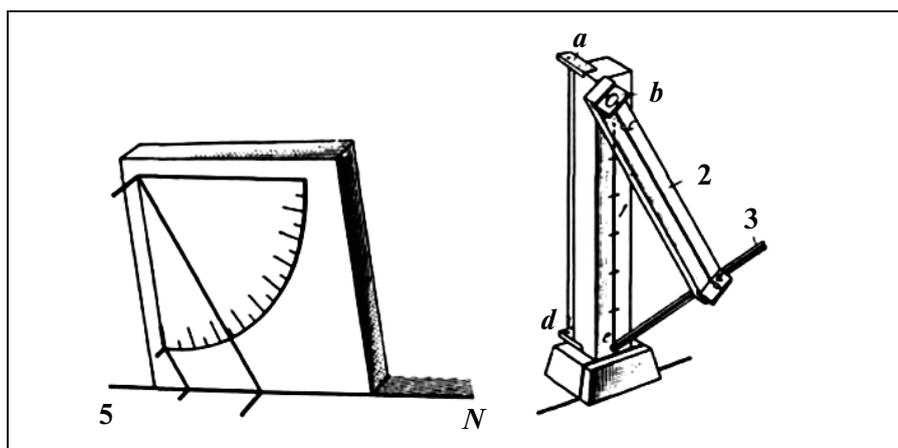


Рис. 1. Эскизы угломерных приборов, которыми могли пользоваться астрономы Древней Греции

[15; 17]) считают древнегреческих астрономов родоначальниками астрономической науки.

Познакомимся с инструментами, которые могли использовать древнегреческие астрономы в те далекие времена. Это человеческий глаз, линейка, шест и струна, помогающие определить направление на небесное светило, а также измерители углов. Для того чтобы лучше представить точность астрономических инструментов этой эпохи, приведем эскизы угломерных приборов (рис. 1 на с. 4).

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАССТОЯНИЙ «СОЛНЦЕ — ЗЕМЛЯ» И «ЛУНА — ЗЕМЛЯ» МЕТОДОМ АРИСТАРХА

Аристарху Самосскому одному из первых удалось доказать с помощью наблюдений, что Солнце находится значительно дальше от Земли, чем Луна. Он использовал довольно оригинальный способ, наблюдая Луну в фазах первой или третьей четверти, когда видна половина диска Луны (первая или третья четверть) и Солнце не за горизонтом. При этом угол между направлениями «наблюдатель — Луна» и «Луна — Солнце» равен  $90^\circ$ . Геометрическая модель, приведенная ниже, отражает условия подобных наблюдений (рис. 2).

Измерив угол  $\alpha$ , можно определить отношение расстояния «Земля — Луна» ( $r_d$ ) к расстоянию «Земля — Солнце» ( $r_c$ ). Используя формулы современной математики, мы можем записать ответ так:

$$\cos \alpha = r_d / r_c .$$

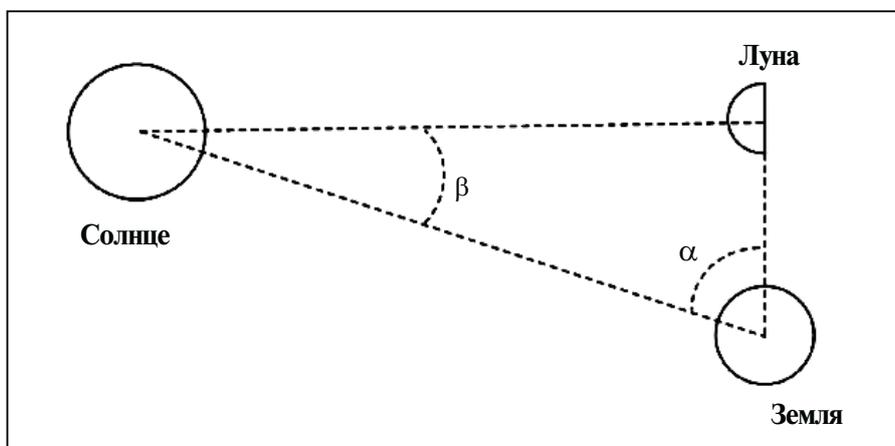


Рис. 2. Определение соотношения расстояний «Солнце — Земля» и «Луна — Земля» методом Аристарха

По измерениям Аристарха, угол  $\alpha \approx 87^\circ$ . На этом основании древнегреческий ученый сделал вывод о том, что расстояние от Земли до Солнца примерно в 20 раз больше, чем до Луны. По-видимому, он использовал свойство подобия треугольников и, построив прямоугольный треугольник с углом  $\alpha$ , нашел отношение соответствующих сторон. На самом деле расстояние от Земли до Солнца примерно в 400 раз больше, чем до Луны. В чем причина неточности оценок Аристарха?

Оценим относительную ошибку определения отношения расстояний  $r_a / r_c$ . Учтем, что  $\beta$  — малый угол и  $\sin \beta \approx \beta$  в радианах. Так как  $\cos \alpha = r_a / r_c = \sin \beta \approx \beta$ , то

$$\Delta (r_a / r_c) / (r_a / r_c) = \Delta \beta / (r_a / r_c);$$

$$\beta = \pi/2 - \alpha; \Delta \beta = \Delta \alpha;$$

$$\Delta (r_a / r_c) / (r_a / r_c) = \Delta \alpha / (r_a / r_c).$$

Примем  $\Delta \alpha$  равным  $\pi/180$  радиан ( $1^\circ$ ), что соответствует угловому разрешению угломерных приборов, изображенных на рис. 1. Подставляя  $r_a / r_c = 1/400$  (исходя из современных знаний соотношения расстояний до Луны и до Солнца), имеем:

$$\Delta (r_a / r_c) / (r_a / r_c) = 400\pi/180 \approx 7.$$

Мы получили гигантскую ошибку — порядка 700%! Более того, определить «на глаз» точно первую или третью четверть затруднительно, можно ошибиться примерно на сутки. За это время видимое угловое смещение Луны составит  $360/29,5 = 12,2$  градуса (29,5 суток — видимый с Земли период обращения Луны). То есть  $\Delta \alpha$  и, следовательно, ошибка измерений возрастает более чем на порядок! Поэтому неудивительно, что метод Аристарха, несмотря на техническую простоту и оригинальность идеи, обладал большой неточностью измерений.

Не следует, однако, думать, что такая неточность была свойственна всем астрономическим наблюдениям и измерениям той далекой эпохи. Обратимся к измерениям современника Аристарха, жившего в Александрии, — Эратосфена.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ЗЕМЛИ МЕТОДОМ ЭРАТОСФЕНА

Ниже приведены текст и эскиз, поясняющие суть метода Эратосфена в определении радиуса Земли (рис. 3).

Эратосфен заметил, что в Сиене ежегодно 21 июня в полдень Солнце находится точно над головой и вертикальные стволы

деревьев не отбрасывают теней. Позже в Александрии, расположенной на севере Египта, на одном меридиане с Сиеной, он обнаружил, что тени здесь в указанное время не исчезают. Эратосфен понял, что причина этого — кривизна поверхности Земли. Александрия севернее Сиены, и когда Солнце в зените над Сиеной, над Александрией оно должно располагаться на некотором угловом расстоянии от зенита. Этот угол  $\alpha$  можно измерить по тени вертикального ствола дерева или колонны в Александрии. Угол определялся по колонне и измеренной длине тени в Александрии в момент, когда в Сиене тень не отбрасывается (полдень 21 июня). Измеренное значение составляло  $\alpha = 7^\circ$ .

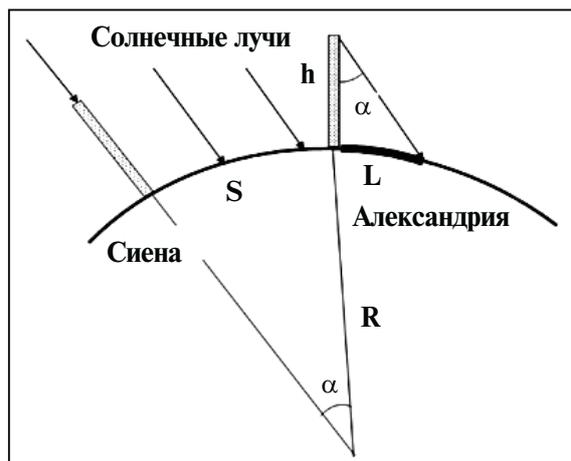


Рис. 3. Определение радиуса Земли методом Эратосфена

Оценим относительную ошибку Эратосфена в определении радиуса Земли. Прежде всего выведем формулу косвенных измерений радиуса Земли методом Эратосфена. Так как  $\alpha = S/R$ , где  $S$  — расстояние между городами,  $R$  — радиус Земли, и в то же время  $\alpha \approx L/h$  (для малых  $\alpha$ ), где  $h$  — высота колонны,  $L$  — длина тени от колонны, то  $R \approx hS/L$ .

Тогда в определении радиуса Земли методом Эратосфена:

$$\Delta R/R \approx \Delta h/h + \Delta S/S + \Delta L/L.$$

Высота колонны  $h$  Александрийской библиотеки была примерно равна 27 м, расстояние  $S$  между городами Сиена и Александрия составляет 800 км, длину тени  $L$  можно оценить как  $h\alpha$  (угол  $\alpha = 7^\circ$  — в радианах). Ошибки  $\Delta h$  и  $\Delta L$  не превышали нескольких сантиметров. Сложнее оценить возможную ошибку  $\Delta S$ .

Приведем отрывок из монографии В. А. Бронштэна: «Эратосфен нашел, что окружность земного шара равна 250 000 стадиев. Вопрос о точной длине стадия, принятого Эратосфеном, долгое время служил предметом дискуссий, поскольку существовали стадии длиной от 148 до 210 м. Большинство исследователей принимали длину стадия 157,5 м («египетский» стадий). Тогда окружность Земли равна, по Эратосфену,  $250\,000 \cdot 0,1575 = 39\,375$  км, что очень близко к действительному значению 40 008 км. Если же Эратосфен пользовался греческим («олимпийским») стадием

длиной 185,2 м, то получалась окружность Земли уже 46 300 км. ...Этот вопрос сложнее, чем может показаться. Уже одно то, что Эратосфен привел явно округленное число — 5000 стадиев (а, скажем, не 5150 или 4890), не внушает к нему доверия. А если оценка Эратосфена была завышена хотя бы на 15 %, получим, что он использовал египетский стадий в 185 м. Решить этот вопрос пока нельзя» [4, с. 137].

Таким образом, наибольшая ошибка  $\Delta R/R$ , которую мог допустить Эратосфен в определении радиуса Земли, не должна превышать 15 %. Напомним, что доказательство Эратосфена шарообразности Земли и метод измерения радиуса Земли основаны на факте изменения длины тени вертикального шеста при движении по меридиану. А как же объяснить изменение длины тени вертикального карандаша при движении по горизонтальному столу, если комната освещается одной лампочкой, подвешенной к потолку? Стол, безусловно, не шарообразный, речь идет об одном важном *допущении*, принятом Эратосфеном, — *параллельность световых лучей, идущих от Солнца* [12]. Далеко не всегда можно пользоваться данным допущением. В частности, о непараллельности солнечных лучей свидетельствует факт «размывания» тени предметов при освещении их Солнцем и удалении этих предметов от экрана. Факт, что солнечные лучи не всегда можно считать параллельными, лег в основу метода определения соотношения размеров Луны и Земли (Аристарх).

АРИСТАРХ САМОССКИЙ:

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЛУНЫ И ЗЕМЛИ

Возвращаясь к деятельности Аристарха, мы поведем речь о явлении *лунного затмения* — такого расположения Солнца, Земли и Луны, когда тень от Земли покрывает либо часть Луны, либо

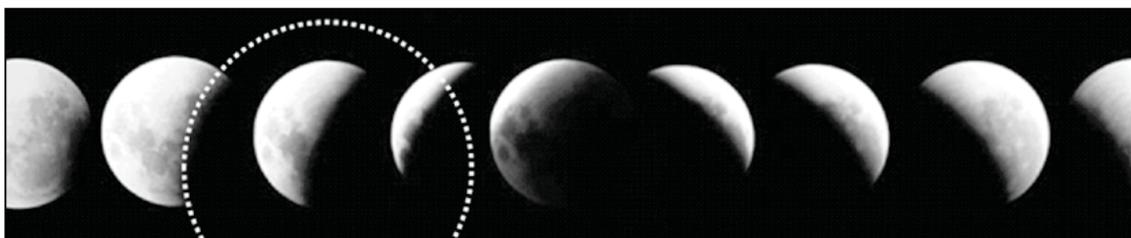


Рис. 4. Фотографии временной последовательности фаз Луны (слева направо) во время лунного затмения (белая дуга — часть мысленно достроенной окружности по тени (терминатору) Земли на Луне)



ли до Луны). С другой стороны,  $\alpha \approx D_L/r_L$  ( $D_L$  — диаметр Луны). Тогда  $\Delta \approx D_L$  и отношение истинных диаметров Луны и Земли (по Аристарху) равно  $D_L / D_T + D_L \approx 1:3,5$ .

Александрийская научная школа существовала в течение нескольких веков. Кроме успешных для того времени измерений космических расстояний и размеров, александрийские астрономы предложили ряд объяснений и математических описаний видимых движений небесных светил. Аристарх Самосский предполагал, что:

‣ Земля вращается и этим вращением объясняется суточное движение звезд;

‣ Земля движется вокруг Солнца, совершая полный оборот по орбите в течение года; другие планеты движутся подобным же образом — это объясняет видимые движения Солнца и планет относительно звезд.

Несмотря на актуальность данных предположений, ученые и философы — современники и последователи Аристарха не приняли его гипотезы. Вот как пишет об этом профессор Принстонского университета Э. Роджерс: «Эта простая схема не имела успеха: она противоречила традициям и была лишь идеей, не подкрепленной измерениями» [16, с. 64]. Гипотеза Аристарха о движении планет вряд ли может считаться *моделью*, она давала лишь качественное объяснение результатов наблюдений, но не давала *прогнозы* последующего положения планет на звездном небе.

**Клавдий Птолемей** (ок. 100 — ок. 170), работавший с 120 года н. э. в Александрии, создал гораздо более сложную *математическую модель* движений небесных тел, в которой Земля оставалась неподвижной. Идея этой модели состоит в представлении траектории каждой планеты как суммы круговых движений. Не вдаваясь в детали (более подробно мы обсудим данную модель в следующем разделе), отметим, что «эта система, работающая подобно сложному передаточному механизму, позволяла из года в год точно *предсказывать* положения планет и определять эти положения в прошлом» [там же]. Более того, как далее пишет Э. Роджерс, «добавление одного круга к другому соответствует применению гармонического ряда для анализа сложных движений. Физики применяют в настоящее время такой Фурье-анализ, исследуя периодическое движение» [там же].

Итак, изучая историю древнегреческой астрономии, можно сформулировать для учащихся ряд задач-оценок с целью более содержательного понимания начал культуры научного моделирования небесных явлений.

### **Задания для самостоятельной работы**

- ① Кроме неточности в измерении углов, какие еще причины могли привести к большой ошибке Аристарха в определении соотношения расстояний до Луны и до Солнца?
- ② Укажите географические особенности расположения городов Сиена и Александрия, важные для измерений Эратосфеном радиуса Земли.
- ③ Плоский стол, лампочка на потолке, тень вертикального карандаша меняется при его перемещении. Почему метод Эратосфена «не работает»?
- ④ Как бы вы сегодня, используя идеи Эратосфена, измерили радиус Земли, имея GPS-навигатор с возможностями измерений длины пути и географической широты и долготы?

### **Обобщающее задание**

Постройте схему наблюдений в виде последовательности ваших действий для оценки размеров Земли, Солнца и Луны и расстояний от Земли до Луны и Солнца.

**Рекомендации.** Предположим, вы знаете вертикальный размер  $h$  удаленного объекта (например, высокого дерева). Можно косвенно измерить расстояние  $L$  до дерева, если взять в руки линейку известной длины  $H$  и измерить расстояние  $l$  от линейки до глаза, при котором линейка полностью перекрывает дерево. Постройте чертеж и докажите, что  $L = h l / H$ .

# МЕХАНИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



## Инструментальные подтверждения движений Земли

### ГОДОВОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Обнаружить собственное движение не всегда просто. Современники Николая Коперника, не принимая гипотезу орбитального вращения Земли вокруг Солнца, задавали вопрос: «Почему мы не видим при таком движении смещения близких звезд на фоне более далеких?» Речь идет о явлении *годового параллакса*, которое иллюстрируется рисунком ниже (рис. 6).

В отсутствие оптических инструментов угловое разрешение человеческого глаза составляет порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  радиан (1 минута дуги). Для малых углов изменение углового положения близкой звезды на рисунке (угол  $\alpha$ ) примерно равно отношению диаметра земной орбиты к расстоянию до близкой звезды. Расстояние  $R$  до Сириуса — ближайшей к нам звезды в северном полушарии — 8 световых лет  $\approx 8 \cdot 10^{13}$  км. Диаметр земной орбиты  $D = 3 \cdot 10^8$  км.

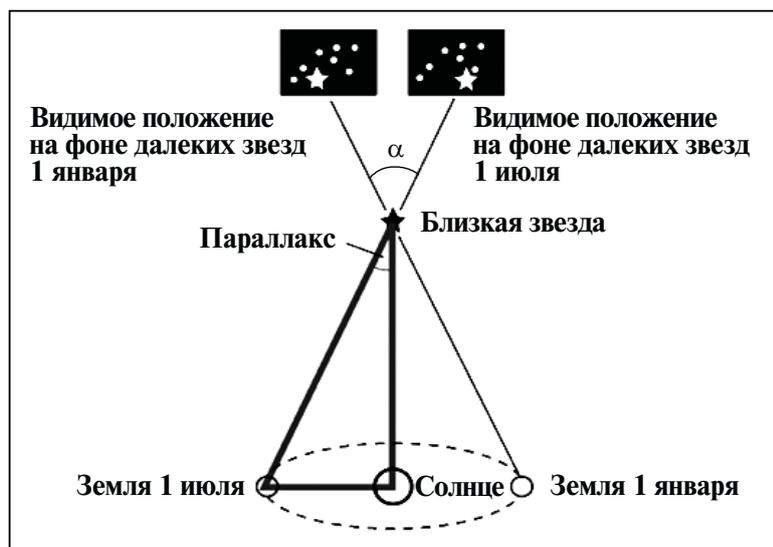


Рис. 6. Пояснение явления годового параллакса

Поставим вопрос: можно ли увидеть годовое движение Сириуса на фоне дальних звезд?

Для Сириуса угол  $\alpha$  примерно равен  $D/R \approx 4 \cdot 10^{-6}$  радиан, то есть в 75 раз меньше углового разрешения глаза! Таким образом, наблюдение годичного параллакса Сириуса невооруженным глазом невозможно.

В 20—40-х годах XIX века русский астроном и геодезист В. Я. Струве, а также немецкий астроном Ф. В. Бессель и английский астроном Т. Гендерсон с помощью телескопов не только наблюдали параллактические смещения, но и активно использовали явление параллакса для определения расстояния до звезд. При орбитальном движении Земли должен наблюдаться еще один тип смещения видимого положения звезд — *абберационное смещение* [9]. Если представить луч света, идущий от звезды, в виде потока частиц — фотонов, двигающихся со скоростью света  $C$  ( $3 \cdot 10^5$  км/с), то при движении поперек луча видимое направление на звезду будет смещено. Подобный эффект наблюдается, когда вы едете в транспорте во время дождя без ветра — следы капель на боковом стекле получаются «косыми». Рисунок 7 иллюстрирует данное явление.

Чтобы фотон, прошедший через центр объектива, попал в окуляр телескопа при движении Земли с орбитальной скоростью  $V$ , телескоп необходимо отклонить от вертикали на угол  $\sigma \approx V/C$ . Оценим возможности наблюдения абберационного смещения невооруженным глазом (то есть величину  $\sigma$ ) в упрощенной геометрии (рис. 7):  $\sigma \approx V/C = 10^{-4}$  рад, то есть примерно в три раза меньше углового разрешения человеческого глаза. Поэтому наблюде-

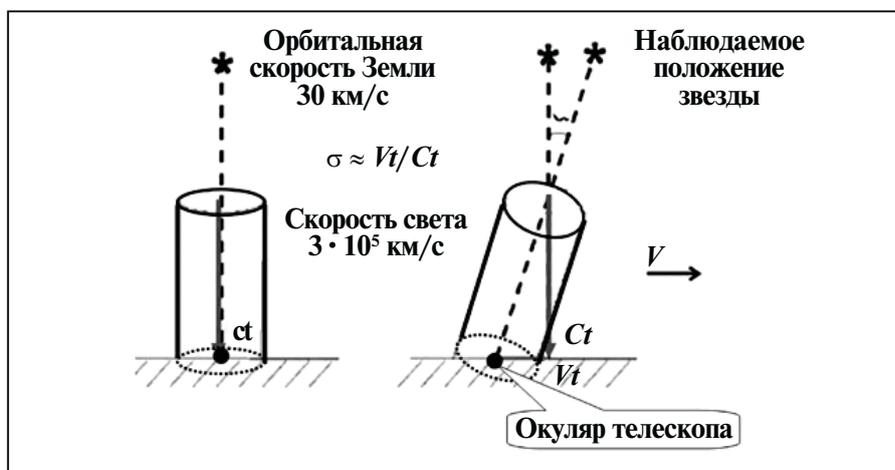


Рис. 7. Пояснение явления абберационного смещения

ние абберационного смещения невооруженным глазом практически невозможно.

Английский астроном *Джэймс Брэдли* (1692—1762) открыл данное явление в 1725 году.

### СУТОЧНОЕ (ОСЕВОЕ) ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Когда речь идет о суточном вращении Земли, как правило, в школьных учебниках астрономии приводится фотография звездного неба вблизи Полярной звезды с большой (порядка 8—12 часов) выдержкой. Виртуальная лаборатория «Живая Физика» [2; 14] позволяет произвести моделирование наблюдаемого вращения звездного неба (рис. 8). Сначала создадим картину звездного неба в системе отсчета «звезды» (А). Крупный диск — Земля, пропорции размеров и расстояний не соблюдены. Затем переместим систему отсчета на Землю (Б).

В системе отсчета «Земля» (там, где мы с вами находимся) на мониторе компьютера можно видеть вращения светил (мелкие диски) и траектории их движений (окружности, рис. 8, Б). Среди физических приборов обнаружения осевого вращения Земли можно отметить часто встречающийся в учебной литературе *маятник Фуко*. Однако, на 19 лет раньше опыта Фуко, немецкий профессор физики *Фердинанд Рейх* (1799—1882) экспериментально подтвердил идею собственного вращения Земли вокруг своей оси. Вот как описывает опыты Рейха Ф. Розенбергер: «В результате многочисленных опытов на шахте “Трех Братьев” во Фрейберге в 1831 году он (Ф. Рейх. — *Авт.*) нашел, что при высоте падения 158,8457 м

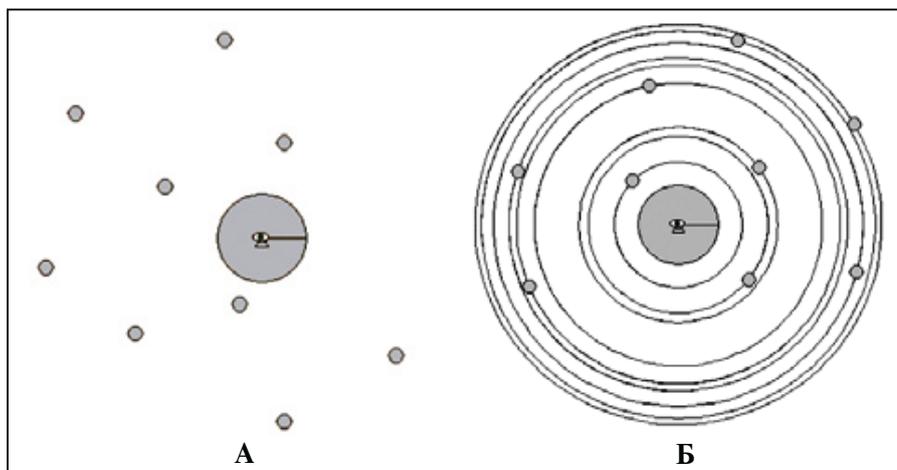


Рис. 8. Моделирование суточного вращения светил (УМК «Живая Физика»)

восточное отклонение (свинцового шарика. — *Авт.*) составило 28,396 мм» [17, с. 102].

Обсудим этот эксперимент. На рисунке ниже (рис. 9) приведена упрощенная схема опытов Ф. Рейха, предполагающая, что шахта (колодец) вырыта на экваторе (Солнце изображено в левом верхнем углу, направление вращения Земли для наблюдателя, который смотрит со стороны Северного полушария, показано белой стрелкой в виде дуги). Свинцовый шарик отпускают с нулевой (относительно поверхности Земли) начальной скоростью.

Из-за вращения Земли скорости верхней и нижней частей колодца будут разными (векторы скоростей изображены жирными черными стрелками). Поэтому относительно дна колодца у брошенного шарика будет горизонтальная скорость, что и приведет к отклонению траектории падения от вертикали.

Идеи восточного отклонения падающего тела появились ранее опыта Рейха. Еще **Исаак Ньютон** (1642—1727) указал, что падающее тело должно отклоняться к востоку. **Роберт Гук** (1635—1703) пытался доказать это экспериментально, но точность эксперимента оказалась слишком низкой. Первые достаточно точные наблюдения были проведены в 1791 году итальянским ученым Дж. Гильменини (высота падения 78,3 м, наблюдавшееся отклонение  $19 \pm 2,5$  мм).

На невращающейся Земле все тела под действием силы тяжести падали бы вертикально независимо от высоты падения. Представим мысленно вертикальную башню на экваторе (рис. 10 на с. 16). Будем наблюдать падение камня из системы отсчета,

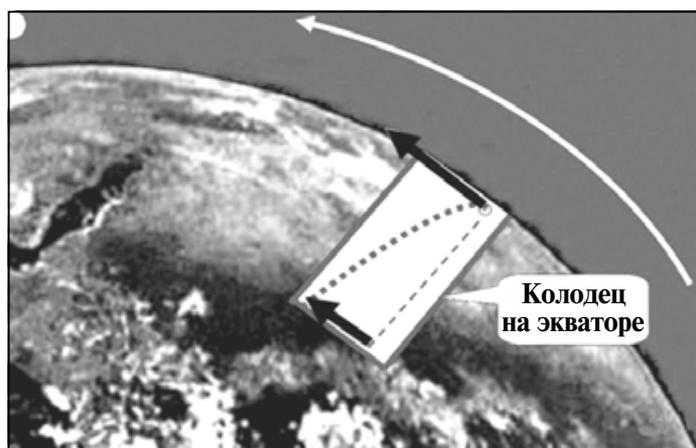


Рис. 9. Упрощенная схема опыта Рейха, поясняющая восточное отклонение падающего свинцового шарика

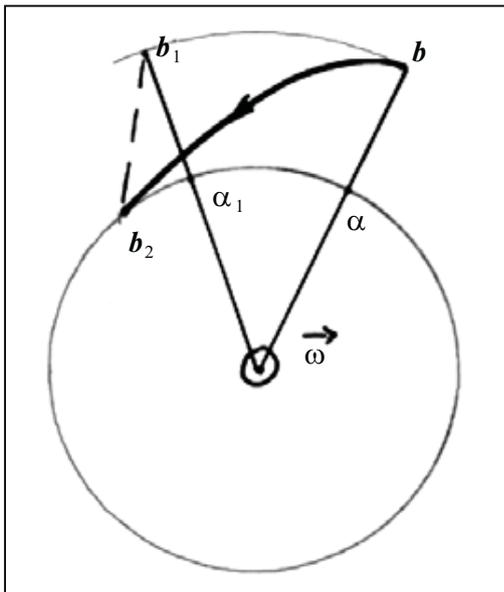


Рис. 10. Отклонение брошенных тел при вертикальном падении с башни

связанной с неподвижными звездами. Вследствие вращения Земли вершина башни описывает большую дугу, чем основание:  $bb_1 > aa_1$ .

Отпущенный в точке  $b$  камень падает под действием силы тяжести и одновременно сохраняет движение, которое он имел вместе с вершиной башни. При падении на Землю в момент времени  $t$  камень окажется в точке  $b_2$ , определяемой условием  $bb_1 > ab_2$ . За это же время основание башни, повернувшейся вместе с Землей, перейдет в точку  $a_1$ . Таким образом, наблюдатель на Земле обнаружит, что падающее тело отклонилось к востоку на расстояние  $a_1b_2 = bb_1 - aa_1$ .

Пусть высота башни  $h$ , тогда время падения камня  $t = \sqrt{2h/g}$ . Поскольку  $aa_1 = \omega R t$ , а  $bb_1 = \omega(R + h)t$ , где  $R$  — радиус Земли, отклонение камня  $a_1b_2 = \omega h t = \omega h \sqrt{2h/g}$ . При  $h = 100$  м камень отклонится на восток от основания башни на  $a_1b_2 \sim 33$  мм.

На широте  $\varphi$  отклонение камня составит  $\omega h \cos \varphi \sqrt{2h/g}$ .

### Задание для самостоятельной работы

Последнюю формулу получите самостоятельно.

### Маятник Фуко

Наглядным и убедительным экспериментом, подтвердившим вращение Земли вокруг своей оси, был опыт **Жана Бернара Леона Фуко** (1819—1868). Впервые Фуко провел наблюдения в 1851 году. Под большим куполом парижского Пантеона на тросе (70 м) подвесили тело (28 кг). Крепление позволяло маятнику свободно качаться в любом направлении. На пол под куполом насыпали ровным слоем песок. Маятник оканчивался внизу металлическим острием, которое при каждом качании прочерчивало след на песке. При длительном наблюдении было видно, что плоскость качаний маятника поворачивалась по направлению часовой стрелки (если смотреть сверху, с точки подвеса). В опыте Фуко полный оборот плоскости качаний происходил за 32 часа.

Вначале представим себе мысленно, что маятник находится на Северном полюсе. Плоскость качаний в инерциальной системе (системе, связанной с неподвижными звездами) остается неподвижной. Земля под маятником вращается, совершая один оборот за 24 часа. Если смотреть сверху (с Полярной звезды), то Земля вращается против часовой стрелки. Значит, для наблюдателя на Земле плоскости качаний поворачивается по часовой стрелке (если смотреть сверху), совершая полный оборот за 24 часа. Понятно, что маятник, подвешенный в экваториальной плоскости, сохраняет положение плоскости качаний. На широтах  $\varphi$  время оборота плоскости качаний  $t$  меняется при переходе от полюса к экватору от 24 часов до бесконечности. Выясним, как период  $t$  зависит от широты места расположения маятника  $\varphi$ .

Центр круга с песком под маятником движется вместе с Землей со скоростью  $\omega R \cos \varphi$ , где  $R$  — радиус Земли. Скорость точки на Земле под колеблющимся телом в крайнем северном положении (С):

$$v_C = \omega R \cos \varphi - \omega r \sin \varphi,$$

где  $r$  — амплитуда колебаний маятника.

Скорость точки на поверхности Земли под крайним южным положением маятника:

$$v_{Ю} = \omega R \cos \varphi + \omega r \sin \varphi.$$

Каждая из этих скоростей отличается от скорости центра круга на  $\Delta_{Ю} = \omega r \sin \varphi$ .

Выведем маятник из состояния покоя в центре круга толчком в плоскости «север — юг». Наблюдатель в системе отсчета, связанной со звездами, видит, что колеблющееся тело сохраняет начальную скорость, перпендикулярную плоскости колебаний  $\omega R \cos \varphi$ . Скорости точек С и Ю соответственно меньше и больше  $\omega R \cos \varphi$  на одинаковую величину  $\omega r \sin \varphi$ . Следовательно, для него линия, соединяющая эти точки, поворачивается против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega r \sin \varphi$ . Наблюдатель на Земле воспринимает это явление как вращение плоскости качаний маятника по часовой стрелке. Таким образом, относительно Земли маятник совершает колебания, период которых  $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$ ,  $l$  — длина троса, при этом плоскость его качаний вращается по часовой стрелке (если смотреть сверху) с периодом  $t = 2\pi/\omega \cos \varphi = 24 \text{ ч}/\sin \varphi$ .

Вращение Земли вызывает *отклонение поверхности воды в реках от горизонтального положения*. Оценим наклон поверхности воды в реке к горизонту на широте  $\varphi$ . Пусть река течет с севера на

юг. Предварим рассмотрение этого явления обсуждением следующей задачи. В горизонтальной плоскости с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вращается спица, по которой с постоянной скоростью  $v$  движется жук. Каково ускорение жука? Это ускорение определяется двумя обстоятельствами.

► Одна часть ускорения жука обусловлена увеличением составляющей скорости жука, перпендикулярной спице, из-за увеличения расстояния между жуком и осью вращения. За время  $\Delta t$  это расстояние увеличится на  $v\Delta t$ , а перпендикулярная спице составляющая скорости изменяется на  $\omega r + v\Delta t - \omega r = \omega v\Delta t$ . Разделив приращение скорости на  $\Delta t$ , получим величину ускорения  $\omega v$ . Оно перпендикулярно векторам  $\vec{\omega}$  и  $\vec{v}$ . Направление ускорения определим с помощью правила левой руки: расположим ладонь так, что пальцы ориентированы по вектору  $\vec{\omega}$ , а вектор  $\vec{v}$  «входит» в ладонь, тогда отогнутый большой палец укажет направление ускорения.

► Вторая часть ускорения обусловлена тем, что вектор скорости поворачивается за интервал времени  $\Delta t$  вместе со спицей на угол  $v\Delta t$  так, что приращение равно  $\omega v\Delta t$ . Следовательно, вклад в ускорение таков же, как в первом случае. Суммируя сказанное, заключаем, что ускорение жука равно  $2\omega v$ , оно перпендикулярно спице, по которой движется жук, и направление можно определить по сформулированному ранее правилу левой руки. Это ускорение называют *поворотным ускорением*, или *ускорением Кориолиса*.

Теперь рассмотрим «элемент» воды на поверхности реки. На него действуют сила тяжести и выталкивающая сила. В неподвижной воде выталкивающая сила равна силе тяжести и направлена по вертикали, поверхность воды занимает горизонтальное положение. В реке эти силы должны обеспечить элементу жидкости поворотное ускорение, так как он движется, находясь на вращающейся Земле. Сила тяжести всегда направлена по вертикали, а выталкивающая сила должна отклониться от вертикали (поверхность жидкости отклонится от горизонтальной поверхности). Уравнение движения «элемента» воды в проекциях на оси  $Ouz$  имеет следующий вид:

$$F_{\text{выт.}} \sin \alpha = 2m\omega \sin \varphi; \quad F_{\text{выт.}} \cos \alpha - mg = 0.$$

Ввиду малости угла  $\alpha$  в уравнениях положим  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin \alpha \approx \alpha$ .

После подстановки  $F_{\text{выт.}} \approx mg$  в первое уравнение находим, что  $\alpha = 2v\omega/g \sin \varphi$ .

Например, на широте  $\varphi = 60^\circ$  при скорости течения  $v = 10$  км/ч наклон уровня воды в реке составляет  $\alpha = 7'2''$ .

Вода прижимается к правому берегу. Из-за трения у поверхности скорость всегда больше, чем у дна. Значит, у поверхности это «прижатие» будет больше, чем у дна. В результате возникнет циркуляция воды. Почва у правого берега подмывается, у левого осаждается.

### **Задание для самостоятельной работы**

Опираясь на решение задачи о наклоне воды в реке, текущей в северном полушарии с севера на юг, рассмотрите другие возможные ситуации течения и местоположения рек на Земле.

**Карл Бэр** (1792—1876) первым объяснил закономерность подмыва берегов рек. Закон Бэра гласит:

☛ *У рек, текущих в северном полушарии, правый берег более крутой и подмытый, чем левый. В южном полушарии — наоборот.*

К. Бэр был естествоиспытателем, одним из учредителей Российского географического общества — старейшего научного общества нашей страны. С 1834 года работал в России, являлся академиком Петербургской Академии наук.

В заключение укажем, что аналогичное явление наблюдается на железной дороге. Поезд, двигаясь в направлении меридиана с севера на юг, принимает участие во вращении Земли. Правый рельс стирается больше потому, что рельсы, участвуя во вращении Земли, «уходят» из-под колеса влево и из-за этого правый рельс прижимается к реборде колеса.

### **Задание для самостоятельной работы**

Самостоятельно оцените смещение из-за вращения Земли пули от центра мишени при стрельбе в тире, расположенном вдоль меридиана. Скорость пули примите равной 300 м/с. Расстояние до мишени — порядка 10 м.

### **Контрольные вопросы и задания**

① Выполните технологически несложное практическое задание по экспериментальному определению биологического углового разрешения своего глаза. Схема эксперимента изображена ниже (рис. 11 на с. 20).

Расположите перпендикулярно лучу зрения лист бумаги (на рисунке — справа). Нарисуйте на этом листе две близкие темные точки

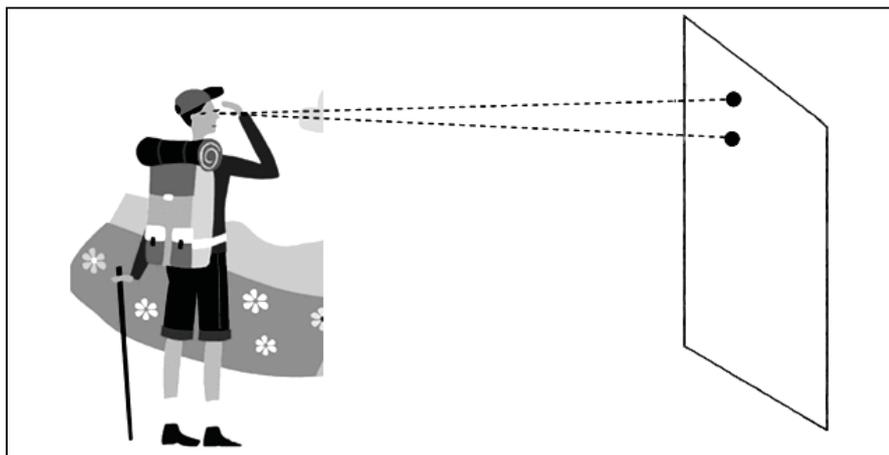


Рис. 11. Экспериментальное определение биологического углового разрешения человеческого глаза

(желательно на расстоянии 1 мм друг от друга). Постепенно удаляйтесь от листа до тех пор, пока не исчезнет «зазор» между точками. Измерив в этой ситуации кратчайшее расстояние от глаза до листа, оцените (используя приближение малых углов) угловое разрешение вашего глаза без телескопа.

- ② Каковы необходимые увеличения телескопа для наблюдения годичного параллакса и абберационного смещения?
- ③ Почему абберационное смещение было обнаружено на сто лет раньше годичного параллакса?
- ④ Используя упрощенную схему опыта Ф. Рейха, поясняющую восточное отклонение падающего свинцового шарика (рис. 9), оцените глубину колодца, чтобы заметить смещение свинцового шарика на 1 см при падении. Насколько согласуются ваши оценки с результатами экспериментов Ф. Рейха?
- ⑤ Используя рис. 9, поясните: почему смещение шарика называется «восточным»?

## **Законы Кеплера: математическое обоснование и примеры использования**

### ИСТОРИЯ ВОПРОСА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Одним из главных вопросов в истории астрономии Древнего мира и Средневековья был вопрос: «Почему планеты описывают на фоне звезд петлеобразные траектории?» Поясняя выше-

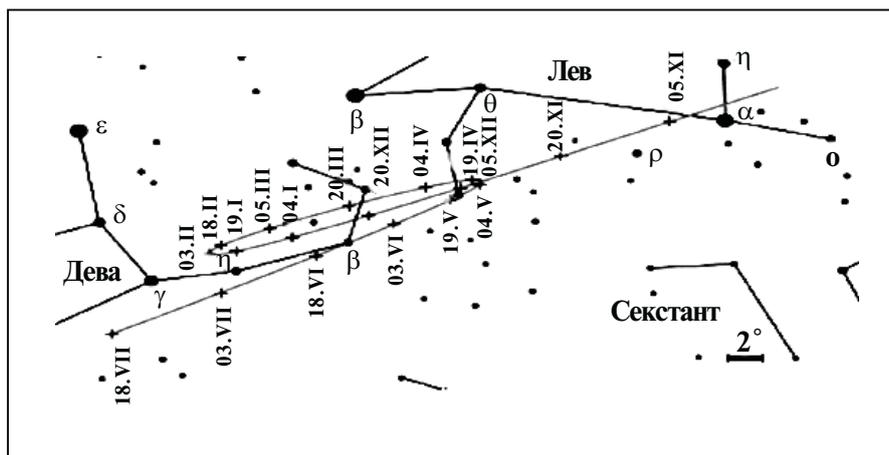


Рис. 12. Траектория движения Марса (петлеобразная кривая) на фоне созвездий с ноября 2016 года по июль 2017 года

сказанное, приведем фрагмент из школьного учебника астрономии [7], иллюстрирующий данный вопрос (рис. 12).

Для объяснения таких траекторий Клавдий Птолемей разработал уже упоминавшуюся нами модель. С современных позиций школьного курса физики можно ответить на вопрос так: «Видимые с Земли движения других планет объясняются тем, что Земля, как и другие планеты, вращается вокруг Солнца. Из-за разных периодов обращения вокруг светила мы и видим петли планет».

Программа «Живая Физика» дает возможность иллюстрировать вышесказанное. На рисунке ниже (рис. 13) приведены траектории Земли и Марса, если бы мы могли наблюдать эти планеты, находясь на Солнце (А) и на Земле (Б).

Остается открытым вопрос: а что является *причиной* движений планет вокруг Солнца?

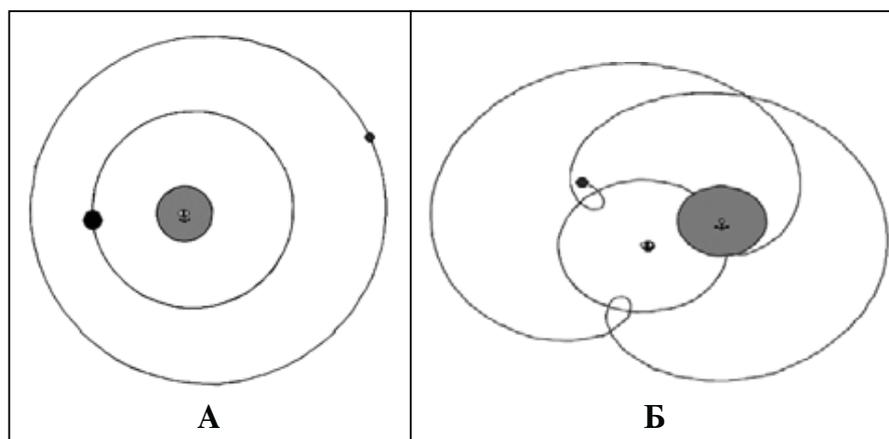


Рис. 13. Взгляд на траектории Солнца, Земли и Марса из разных систем отсчета (УМК «Живая Физика»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ КЕПЛера  
для АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

**Историческое введение  
и математические следствия**

Необычное трудолюбие и уверенность в существовании простых законов, управляющих движением планет, позволили *Иоганну Кеплеру* (1571—1630) открыть законы, которые с тех пор носят его имя. Три закона движения планет относительно Солнца получены эмпирически на основании астрономических наблюдений за движением Марса. С 1596 года Кеплер развивал учение Н. Коперника о гелиоцентрической системе мира. Два первых закона движения планет он сформулировал в работе «Новая астрономия» в 1609 году, труд «Гармония мира» (1619 г.) содержал третий закон. Эти законы положили начало небесной механике.

Заметим, что законы Кеплера установлены значительно раньше открытия закона всемирного тяготения (1687 г.) и создания теоретических оснований механики и астрономии И. Ньютоном. Познания Кеплера и его современников в механике были весьма скудными. Кеплер не только не знал, как записать уравнения движения тел, но и не имел достаточного представления о том, что такое сила. Все, чем располагал Кеплер, — это очень аккуратные дневники наблюдений *Тихо Браге* (1546—1601) — одного из последних астрономов, наблюдавших движение небесных тел невооруженным глазом (первый телескоп сконструировал Галилео Галилей в 1609 году).

А. Эйнштейн назвал Кеплера «несравненным человеком» и написал о его судьбе: «Он жил в эпоху, когда еще не было уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и не понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения! Сегодня, когда этот научный акт уже совершился, никто не может оценить полностью, сколько изобретательности, сколько тяжелого труда и терпения понадобилось, чтобы открыть эти законы и столь точно их выразить» [24, с. 121].

Законы Кеплера утверждают следующее.

1-й закон. *Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых, общем для всех планет, расположено Солнце.*

*Эллипс* — замкнутая кривая на плоскости, которую можно получить, «растягивая» окружность в одном из направлений. В эллипсе  $AB$  — его «большая ось»,  $CD$  — «малая ось». В каждом эллипсе, кроме «центра»  $O$ , есть еще две замечательные точки — «фокусы», лежащие на большой оси симметрично по обеим сторонам центра. Разыскивают фокусы так: раздвигают ножки циркуля на расстояние большой полуоси  $OB$  и, установив острие в конце  $C$  малой оси, описывают дугу, пересекающую большую ось. Точки пересечения  $F$  и  $F_1$  — фокусы эллипса. Расстояния  $OF$  и  $OF_1$  (они равны) обозначаются обыкновенно буквой  $c$ , а оси, большая и малая, через  $2a$  и  $2b$ . Расстояние  $c$ , отнесенное к длине  $a$  большой полуоси, то есть дробь  $c/a$ , служит мерой растянутости эллипса и называется *эксцентриситетом*. Чем больше эллипс отличается от круга, тем эксцентриситет его больше (рис. 14).

Эксцентриситет эллипса  $e = c/a = \sqrt{a^2 - b^2}/a$ . Площадь эллипса  $S = \pi ab$ . Эксцентриситет окружности равен нулю; чем меньше эксцентриситет, тем ближе эллипс к окружности.

*Перигелий* — ближняя к Солнцу точка орбиты Земли, находится на расстоянии 147 млн км. Через полгода после перигелия Земля проходит через наиболее удаленную от Солнца точку — *афелий*, находящуюся на расстоянии 152 млн км. Расстояния в астрономии измеряют в астрономических единицах (а. е.). 1 а. е. равна среднему расстоянию между Солнцем и Землей. 1 а. е. = 149 597 870,7 км. Часто орбиту Земли изображают в форме довольно растянутого эллипса. Это не так. Представим себе чертеж эллипса, на котором большая полуось равна 1 м, и оценим, чему равна малая полуось, если эксцентриситет эллипса равен

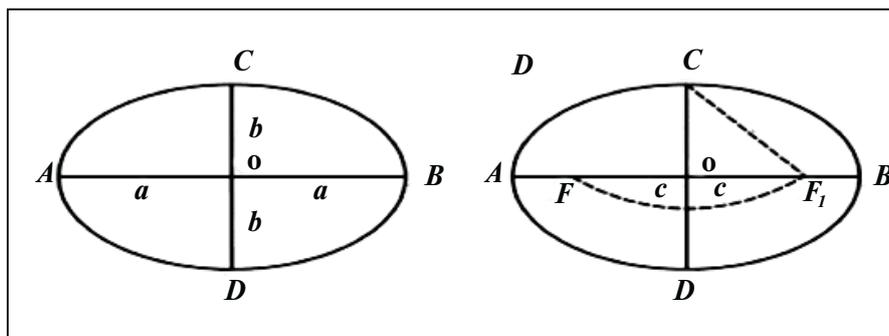


Рис. 14. Свойства эллипса

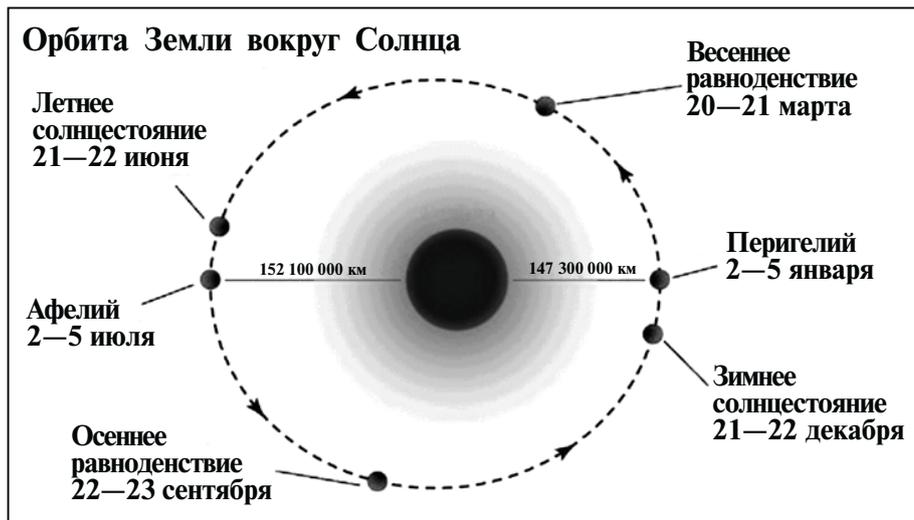


Рис. 15. Свойства орбиты Земли. Эксцентриситет земной орбиты

эксцентриситету орбиты Земли. В нашем случае ввиду малости эксцентриситета ( $e = 0,017$ ) можно приближенно считать:

$$e^2 = (a^2 - b^2)/a^2 = (a - b)(a + b)/a^2 \approx 2(a - b)/a.$$

Отсюда находим, что  $a - b \approx 1/7200$  м или  $a - b \approx 0,013$  см.

На рисунке, выполненном в этом масштабе (рис. 15), Солнце смещено от центра  $O$  на  $c = a/60 = 1/60$  м  $\approx 1,7$  см. Земная орбита отличается от окружности настолько мало, что это отличие нельзя отразить на чертеже, так как разность полуосей  $a - b$  гораздо меньше толщины следа от шарика ручки. Таким образом, при решении многих задач допустимо считать орбиту Земли окружностью.

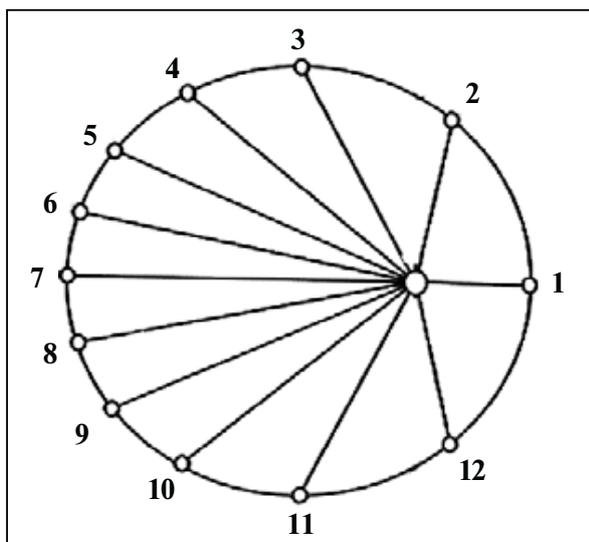


Рис. 16. Иллюстрация ко второму закону Кеплера

2-й закон. Радиус-вектор планеты описывает в равные промежутки времени равные площади.

Обратимся к рисунку ниже (рис. 16). Числа 1—12 делят путь Земли на части, пробегаемые ею в равные промежутки времени. В соответствии со 2-м законом Кеплера доли эллипса, на которые он рассекается начерченными радиус-векторами, равны по площади. В точке 1 Земля бывает 1 января, в точке 2 — 1 февраля и т. д.

Скорость движения Земли вокруг Солнца постоянно меняется. В среднем Земля летит по орбите в 36 раз быстрее пули — со скоростью 30 км/с. По земным меркам эта скорость является огромной. Однако все познается в сравнении. За час земной шар проходит путь, в 9 раз превышающий его диаметр, а черепаха — эталон медлительности движения по Земле — за один час покрывает расстояние, равное нескольким десяткам своего поперечного размера. В декабре — феврале, когда Земля значительно ближе к Солнцу, она должна двигаться по своей орбите быстрее, чем в июне — августе. Другими словами, зима на севере короче, чем лето. Продолжительность времен года: весна — 92,8 суток, лето — 93,6, осень — 89,8, зима — 89. Линии солнцестояний и равноденствий делят земную эллиптическую орбиту на четыре неравные части, для прохождения которых требуется неодинаковое время.

*3-й закон. Отношение квадратов времен обращения планет вокруг Солнца к кубам больших полуосей их орбит постоянно и для всех планет одинаково:*

$$T^2/a^3 = \text{const}, \text{ или } T_1^2/a_1^3 = T_2^2/a_2^3.$$

Если принять в качестве единиц измерения время обращения Земли  $T_1 = 1$  год и среднее гелиоцентрическое расстояние Земли (большая полуось орбиты)  $a_1 = 1$  а. е., то для любой планеты  $T_{\text{пл.}}^2/a_{\text{пл.}}^3 = 1$ . В частности, период обращения Венеры  $T = 0,723^3/2 = 0,615$  года, а период обращения Сатурна  $T = 9,539^3/2 = 29,458$  года.

### **Динамическое обоснование законов Кеплера**

Законы Кеплера стали важным этапом в понимании движения планет, но они оставались лишь эмпирическими правилами, сформулированными по астрономическим наблюдениям. Законы Кеплера получили объяснение только после открытия Ньютоном закона всемирного тяготения, согласно которому две точечные массы (два тела, линейные размеры которых много меньше расстояния между ними) притягиваются с силой  $F = G^mM/r^2$ , где  $m$  и  $M$  — массы взаимодействующих тел,  $r$  — расстояние между телами,  $G = 6,67408 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/(кг · с<sup>2</sup>) — гравитационная постоянная.

Первостепенное значение закона всемирного тяготения состоит в том, что Ньютон динамически обосновал гелиоцентрическую систему Коперника и законы Кеплера. Ньютон решал зада-

чу двух тел, вращающихся вокруг общего центра. Для простоты часто считают, что одно тело обращается вокруг другого неподвижного тела. Однако это справедливо только для случая, когда масса первого тела существенно меньше массы второго тела. В обосновании первого и второго законов Кеплера будем исходить из модели «неподвижное Солнце — планеты», так как масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли и почти в 330 раз больше массы Юпитера.

### О первом и втором законах Кеплера

► Если в любом положении тела на траектории действующая на него сила направлена в одну и ту же неподвижную точку (точку  $O$ ), то говорят, что тело находится в *центральной силовой поле*.

Важнейшим случаем центральных полей являются поля, в которых силы пропорциональны  $1/r^2$  и, соответственно, потенциальная энергия пропорциональна  $1/r$ . Сюда относятся ньютоновские поля тяготения и кулоновские электростатические поля. Первые имеют характер притяжения, а вторые могут быть полями как притяжения, так и отталкивания.

Рассмотрим поле тяготения, в котором сила  $\vec{F} = G_{mM}/r^2 \vec{e}_r$ , а потенциальная энергия  $\Pi = -G_{mM}/r$ , где  $m$  — масса движущегося тела,  $M$  — масса неподвижного тела,  $r$  — расстояние между точкой  $O$  и движущимся телом,  $\vec{e}_r$  — единичный вектор по направлению на тело из точки  $O$ . Скорость тела представим в виде двух взаимно перпендикулярных составляющих:  $\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_\varphi$ .

Угол  $\varphi$  отсчитывается от некоторого направления, принятого в качестве начального. Так как сила  $\vec{F}$  — центральная, ее момент относительно точки  $O$  равен нулю (плечо равно нулю). Момент силы определяет скорость изменения векторной величины  $\vec{K}$ , называемой моментом количества движения тела относительно той же точки:  $\Delta \vec{K} / \Delta t = \vec{M}$ .

В обращении тела вокруг точки  $O$  под действием центральной силы момент количества движения сохраняется  $\vec{K} = \text{const}$ . Подчеркнем, что сохраняются как величина, так и направление момента количества движения. Величина момента количества движения (длина вектора  $\vec{K}$ ) равна произведению количества движения (импульса) тела  $m\vec{v}$  на плечо — расстояние от точки  $O$  до линии, вдоль которой направлена скорость  $\vec{v}$ . Направление  $\vec{K}$  перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы  $\vec{p} = m\vec{v}$  и  $\vec{r}$ ,

и определяется правилом левой руки: если расположить ладонь левой руки так, чтобы вектор  $\vec{r}$  «входил» в нее, то отставленный большой палец укажет направление  $\vec{K}$ . В нашем случае величина  $K = rmv_\varphi = rmr \Delta\varphi/\Delta t$  (плечо составляющей скорости  $\vec{v}_r$  равно нулю). При движении тела под действием центральной силы с центром в точке  $O$  величина  $K$  не меняется, то есть  $r^2 \cdot \Delta\varphi/\Delta t = C$ , где  $C$  — постоянная величина. За время  $\Delta t$  тело проходит отрезок траектории, стягивающий угол  $\Delta\varphi$ .

Таким образом, равенство  $r^2 \cdot \Delta\varphi/\Delta t = C$  означает, что площадь, описываемая за единицу времени радиус-вектором тела, движущегося под действием центральной силы, постоянна и равна  $C/2$ . Момент количества движения — вектор  $\vec{K}$  — перпендикулярен плоскости, в которой находятся радиус-вектор тела  $\vec{r}$  и вектор скорости  $\vec{v}$ . Неизменность направления момента количества движения тела  $\vec{K}$  означает, что траектория тела во все время его движения остается в одной плоскости.

В результате приходим к уточненной формулировке 2-го закона Кеплера:

☛ *Каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца (плоскость перпендикулярна  $\vec{K}$ ), причем за равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, замещает собой равные площади.*

☛ Энергия  $E = E_{кин.} + \Pi$  при движении тела сохраняется, так как сила тяготения является потенциальной.

Кинетическая энергия  $E_{кин.} = \frac{1}{2} mv^2$ , где  $v^2 = v_r^2 + v_\varphi^2 = (\Delta r/\Delta t)^2 + (r\Delta\varphi/\Delta t)^2$ .

Энергия тела  $E = \frac{1}{2} m [(\Delta r/\Delta t)^2 + (r\Delta\varphi/\Delta t)^2] - G^m M/r = \text{const.}$

Воспользовавшись тем, что  $r^2 \cdot \Delta\varphi/\Delta t = C$ , исключим из выражения для  $E$  зависимость от скорости изменения угла  $\varphi$ :

$$E = \frac{1}{2} m (\Delta r/\Delta t)^2 + C^2/2mr^2 - G^m M/r = \text{const.}$$

По этому выражению для  $E$  заключаем, что движение тела можно рассматривать как одномерное (зависящее только от  $r$ ) в поле с эффективной потенциальной энергией:

$$\Pi_{\text{эффект.}} = C^2/2mr^2 - G^m M/r.$$

Конкретный вид траектории зависит от величины полной энергии тела  $E$ . При отрицательном значении  $E_1 < E < 0$  траектории движения — эллипс, ограниченная как снизу, так и сверху кривая. При  $E = 0$  тело движется по параболе. Положительным значениям  $E$  отвечает движение тела по гиперболе. При  $E \geq 0$  траектории ограничены лишь снизу.

Приведем уточненную формулировку 1-го закона Кеплера:

☛ *В невозмущенном движении орбита движущегося тела есть кривая второго порядка (эллипс, парабола, гипербола), в одном из фокусов которой находится центр силы притяжения (или центр масс системы).*

Еще раз отметим, что говорить о центре силы притяжения допустимо только в случае, когда масса первого тела существенно меньше массы второго (притягивающего центра). Если же массы тел сравнимы, то следует учитывать влияние менее массивного тела на движение более массивного.

### Движение тела, запущенного в космос на высоте $H$ над Землей

Начальная скорость направлена горизонтально. Полная энергия равна энергии тела в момент запуска:

$$E = \frac{1}{2} mv_0^2 - GmM/R + H.$$

Будем считать, что запуск тела осуществляется вблизи поверхности Земли, то есть  $H \ll R$ . В этом случае из условия  $E = 0$  находим, что параболической траектории отвечает начальная скорость:

$$v_{0 \text{ параб.}} = \sqrt{2GM/R + H} \approx \sqrt{2GM/R}.$$

Учитывая, что  $GmM/R^2 = mg$ , имеем:

$$v_0 < \sqrt{2gR} \text{ — эллипс,}$$

$$v_0 = \sqrt{2gR} \text{ — парабола,}$$

$$v_0 > \sqrt{2gR} \text{ — гипербола.}$$

При  $v_0 = \sqrt{gR}$  траектория тела — окружность. Это наименьшая скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно стало спутником Земли, ее называют *первой космической скоростью*:

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 7,9 \text{ км/с.}$$

Заметим, что  $v_1$  — абсолютная скорость, то есть скорость в системе отсчета с началом в центре Земли и неподвижными относительно звезд осями. Определим относительную горизонтальную скорость, которую необходимо сообщить спутнику, в зависимости от широты места запуска.

Переносная скорость на экваторе  $v_{\text{пер.}}^{\text{в}} = R\omega$ , а на широте  $\varphi$   $v_{\text{пер.}}^{\text{ш}} = R\omega \cos \varphi$ . При запуске с запада на восток  $v_1 = v_{\text{отн.}} + v_{\text{пер.}}$ . Относительно Земли спутнику нужно сообщить скорость

$v_{\text{отн.}} = 7,9 \text{ км/с} - R\omega \cos \varphi$ . При запуске спутника с востока на запад  
 $v_{\text{отн.}} = 7,9 \text{ км/с} + R\omega \cos \varphi$ .

Вывод: космодром должен находиться как можно ближе к экватору, запуск следует осуществлять с запада на восток. Параболическую скорость при запуске с поверхности Земли называют *второй космической скоростью*,  $v_{\text{II}} = \sqrt{2gR} \approx 11,2 \text{ км/с}$ . Спутник, имеющий такую (или бóльшую) абсолютную скорость, преодолевает земное притяжение.

*Третьей космической скоростью* называют параболическую скорость, которую необходимо сообщить телу, удаленному от Солнца на расстояние земной орбиты:  $v_{\text{III}} = \sqrt{2GM_C/R_{\text{орб.}}}$ .

Масса Солнца  $M_C = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ , радиус орбиты Земли  $R_{\text{орб.}} = 160 \cdot 10^6 \text{ км}$ . Отсюда  $v_{\text{III}} \approx 42 \text{ км/с}$ . Это — абсолютная скорость. Начав двигаться со скоростью  $v_{\text{III}}$ , тело покинет Солнечную систему.

Относительно Земли скорость тела должна быть порядка  $16,7 \text{ км/с}$ .

При определении начальных условий нужно учитывать движение Земли по орбите во время удаления тела от Земли, пока оно находится в области ее действия. УМК «Живая Физика» позволяет визуализировать траектории больших и малых планет, как принадлежащих Солнечной системе (эллиптические траектории), так и межзвездных пришельцев (параболические и гиперболические траектории). Сказанное выше иллюстрируется рисунком 17.

Обнаруженный 19 октября 2017 года астероид стал первым наблюдаемым объектом с гиперболической орбитой. Первый межзвездный астероид получил название 1I / 2017 U1 Оумуамуа (1I означает «первый межзвездный», а «оумуамуа» в переводе с гавайского — «гость»). Первыми в конце октября его смогли заметить американские астрономы во время наблюдений в телескоп Pan-STARRS 1 на Гавайях.

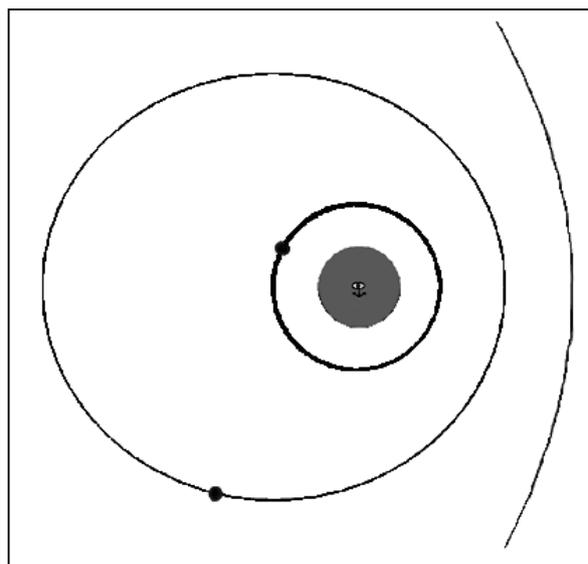


Рис. 17. Круговые, эллиптические и гиперболические траектории больших и малых планет

### Динамическое обоснование 3-го закона Кеплера

Ньютон, решая задачу двух тел, вращающихся вокруг общего центра, получил уточненный 3-й закон Кеплера с массами тел.

Рассмотрим систему двух гравитационно связанных тел. Тела обращаются вокруг центра масс с угловой скоростью  $\omega = 2\pi/T$ , где  $T$  — период обращения. В любой момент времени центр масс системы лежит на прямой, соединяющей центры тел. Массы тел  $m'$  и  $m''$ . Их расстояния до центра масс  $r_1$  и  $r_2$  связаны соотношением  $r_1/r_2 = m'/m''$ .

Сила тяготения  $F = Gm'm''/(r_1 + r_2)^2$ , действующая на каждое из тел, создает центростремительное ускорение: соответственно и  $a_1 = 4\pi^2/T^2r_1$  и  $a_2 = 4\pi^2/T^2r_2$ . Уравнения движения тел имеют следующий вид:

$$Gm'm''/(r_1 + r_2)^2 = m'4\pi^2/T^2r_1;$$

$$Gm'm''/(r_1 + r_2)^2 = m''4\pi^2/T^2r_2.$$

После сокращения первого уравнения на  $m_1$ , а второго — на  $m''$  сложим их:

$$(m' + m'')T^2/R^3 = 4\pi^2/G. \quad (*)$$

В правой части уравнения присутствуют лишь постоянные величины. Отсюда следует справедливость этого выражения для любой системы двух гравитационно взаимодействующих тел.

Уточненный 3-й закон Кеплера для планет солнечной Системы ввиду малости их масс по сравнению с массой Солнца обычно формулируют так:

☛ *Отношение квадрата периода обращения планеты вокруг Солнца к кубу большой полуоси ее орбиты — постоянная величина, равная  $4\pi^2/GM$ :  $T^2/a^3 = 4\pi^2/GM$ .*

Если 3-й закон Кеплера применяется к описанию движения спутников Земли, то в этом выражении  $M$  — масса Земли. Для двух космических систем, основываясь на полученном ранее выражении (\*), сформулируем 3-й закон Кеплера в обобщенном виде:

☛ *Произведения суммы масс небесных тел и их спутников с квадратами их сидерических периодов обращения относятся как кубы больших полуосей их орбит:*

$$T_1^2(M_1 + m_1)/T_2^2(M_2 + m_2) = a_1^3/a_2^3.$$

Здесь  $M_1, M_2$  — массы небесных тел;  $m_1, m_2$  — соответственно массы их спутников.

*Сидерический период* — промежуток времени, в течение ко-

того какое-либо небесное тело (спутник) совершает оборот вокруг главного тела. Для иллюстрации применения 3-го закона Кеплера ответим на вопрос: на какой высоте  $H$  должен обращаться спутник вокруг Земли, чтобы его период обращения был равен земному периоду? Такую орбиту спутника называют геостационарной. Спутник висит над одной и той же точкой земной поверхности на высоте  $H$ . Для начала заметим, что центр Земли должен лежать в плоскости орбиты, то есть геостационарная орбита располагается в экваториальной плоскости Земли. Спутник невозможно «подвесить» над произвольной точкой земного шара за исключением экватора.

Воспользуемся тем, что  $T^2/a^3 = 4\pi^2/GM$ .

В нашем случае  $a = R + H$ , где  $R$  — радиус Земли.

Отсюда  $H = \sqrt[3]{T^2 GM/4\pi^2} \cdot R$ .

Подставив  $G = \frac{1}{15} 10^{-9} \frac{HM^2}{\text{кг}^2}$ ,  $R = 6378$  км,  $M = 5,97 \cdot 10^{24}$  кг,  $T = 8,64 \cdot 10^4$  с, находим, что  $H = 35\,786$  км.

Заметим, что можно решать задачу, не обращаясь к 3-му закону Кеплера.

Спутник движется по окружности, необходимое для этого центростремительное ускорение создает сила тяготения

$$mv^2/R + H = GmM/(R + H)^2,$$

где  $m$  — масса спутника,  $v$  — его скорость.

После подстановки в это уравнение  $v = (R + H)\omega = 2\pi(R + H)^2/T$  приходим к полученному ранее результату  $H = \sqrt[3]{T^2 GM/4\pi^2} \cdot R$ .

### **Задания для самостоятельной работы**

- ① Определите большую полуось орбиты, период обращения и размеры крупнейшего из астероидов — Цереры, если в эпоху противостояния его параллакс составляет  $5''$ , а угловые размеры  $0,8''$ .
- ② Параллакс планеты в эпоху противостояния  $14,2''$ , а угловые размеры  $11''$ . Что это за планета? Определите большую полуось ее орбиты, размеры и период обращения вокруг Солнца. Какие видимые размеры будут у Солнца в небе этой планеты? Сравните освещенность поверхности планеты с освещенностью поверхности Земли.
- ③ Каковы расстояние до планеты, ее размеры, масса и средняя плотность, если во время противостояния с Землей ее горизонтальный параллакс  $2,09''$ , а видимый диаметр  $45''$ ? Спутник вращается вокруг планеты на расстоянии  $422\,000$  км с периодом  $1,77$  суток. О какой планете идет речь?

- ④ Определите, на каком расстоянии от звезды  $\upsilon$  Андромеды вращаются три ее планеты, если масса звезды  $1,25 M_c$  ( $M_c$  — масса Солнца), а периоды обращения планет составляют  $T_1 = 471$  сутки,  $T_2 = 241$  сутки;  $T_3 = 1266$  суток.
- ⑤ Оцените, при каком минимальном радиусе планеты она сможет удержать атмосферу, состоящую из азота и кислорода, если температура поверхности планеты  $300$  К. Средняя плотность вещества планеты  $4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.
- ⑥ Начиная с каких размеров астероидов по ним можно ходить, не опасаясь улететь в космос?
- ⑦ Исследования с борта автоматической межпланетной станции показали, что у 214-километрового астероида Евгения есть 13-километровый спутник Маленький Принц. Может ли космонавт перепрыгнуть с астероида на спутник и наоборот? Средняя плотность вещества астероида около  $3,5$  г/см<sup>3</sup>.

### Наибольшее удаление кометы Галлея

Одним из примеров использования законов Кеплера является оценка наибольшего удаления кометы Галлея от Солнца. На рисунке ниже (рис. 18) изображены орбиты тел Солнечной системы (пропорции масштабов не соблюдены).

Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости (*плоскости эклиптики*). Орбиты двух небесных тел — Плутона и кометы Галлея имеют видимые отличия — плоскости орбит наклонены к плоскости эклиптики, а орбита кометы Галлея представляет собой сильно вытянутый эллипс. Отметим, что лишь с 2006 года



Рис. 18. Орбиты больших и малых планет в Солнечной системе, а также кометы Галлея

решением комиссии по номенклатуре Международного астрономического союза в рамках XXVI Ассамблеи Союза в Праге принято решение впредь называть Плутон не «планетой», а «малой планетой». Для кометы Галлея из-за сильной вытянутости орбиты можно считать наибольшее удаление от Солнца примерно равным  $2a$  — удвоенному значению большей полуоси ее эллиптической орбиты. Оценим величину  $2a$ , используя один из законов Кеплера и данные об орбите Земли.

3-й закон Кеплера для орбит кометы и Земли можно записать так:

$$T^2/a^3 = 1/1.$$

Справа в виде дроби приведены данные о Земле:  $T_{\text{Земли}} = 1$  (в годах),  $a_{\text{Земли}} = 1$  (в астрономических единицах: а. е. =  $1,5 \cdot 10^8$  км). Слева — данные о комете Галлея:  $T = 76$  лет. Тогда наибольшее удаление кометы Галлея от Солнца равно  $2a = 2 \cdot (76)^{2/3} \approx 36$  а. е. — это область расстояний между наибольшими удалениями от Солнца Нептуна и Плутона. Данная область получила название «*кометный пояс Койпера*».

В 1992 году астроном Дэвид Девитт обнаружил объект 1992 QB1 за пределами Солнечной системы. В течение следующих пяти лет он обнаружил еще 40—50 подобных объектов. К середине 2016 года число найденных объектов составило 2000. Область обнаруженных объектов получила название «Пояс Койпера». В настоящее время активное исследование объектов пояса Койпера проводит межпланетный корабль «Новые горизонты» (НАСА).

4 октября 1957 года в 22 ч 28 мин. 3 с по московскому времени в СССР был осуществлен старт первого в мире искусственного спутника. Через 295,4 с спутник и центральный блок ракеты-носителя вышли на орбиту. Впервые была достигнута первая космическая скорость, рассчитанная основателем классической физики и закона всемирного тяготения англичанином Исааком Ньютоном. Она составляла для первого ИСЗ 7780 м/с. Наклонение орбиты спутника равнялось  $65,1^\circ$ , высота перигея — 228 км, высота апогея — 947 км.

### **Задание для самостоятельной работы**

Оцените период обращения спутника вокруг Земли, зная время полного оборота Луны вокруг Земли — 27,3 суток и большую полуось эллипса орбиты Луны — 384 400 км. Радиус Земли равен примерно 6400 км.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНОВ КЕПЛЕРА

Законы Кеплера имеют область применимости — мы не учитываем влияние планет (или спутников) друг на друга. Рассмотрим задачи, когда учет влияния «соседей» просто необходим.

### Орбита спутника SOHO

SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) — это космический аппарат для наблюдения за Солнцем. Совместный проект Европейского космического агентства и НАСА. Был запущен 2 декабря 1995 года. Особенностью орбиты этого аппарата является синхронное вместе с Землей (с одинаковым периодом  $T$ ) обращение вокруг Солнца. При этом SOHO на 1,5 млн км ближе к Солнцу, чем Земля (рис. 19).

По 3-му закону Кеплера более близкие к Солнцу объекты должны иметь меньшие периоды обращения. Но в данном конкретном случае движение SOHO регулируется притяжениями к Солнцу и к Земле. Запишем второй закон механики для SOHO и для Земли (смысл обозначений иллюстрируется рис. 19):

$$\text{SOHO: } m\omega^2(a-x) = Gm[M/(a-x)^2 - M_E/x^2];$$

$$\text{Земля: } M_E\omega^2 a = GM_E/a^2; \quad \omega = 2\pi/T.$$

$$\text{Так как } a \ll x, \text{ то } \frac{1}{(a-x)^2} \approx \frac{1}{a^2} + \frac{2}{a^3}x.$$

$$\text{Опуская алгебраические преобразования, получим: } x \approx a^3 \sqrt{\frac{M_E}{3M}}.$$

Подставляя массы Солнца  $M = 2 \cdot 10^{30}$  кг и Земли  $M_E = 6 \cdot 10^{24}$  кг, получим удаление SOHO от Земли  $x = 1,5$  млн км.

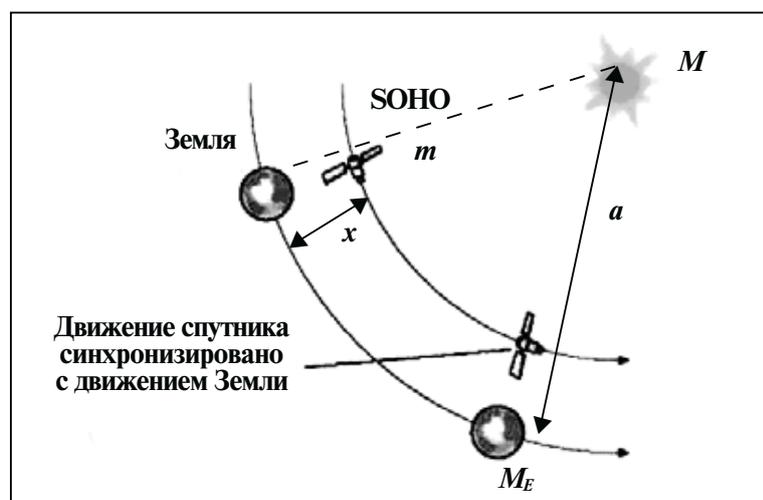


Рис. 19. Упрощенный эскиз орбиты SOHO

## Задание для самостоятельной работы

Представьте себе, что SOHO случайно сместился по траектории движения (см. рис. 19), отклонившись от пунктирной линии. Докажите неустойчивость такого смещения (неустойчивость — неспособность объекта вернуться в начальное положение после малых отклонений).

## Гравитационный маневр

Идея ускорения межпланетного космического аппарата без использования топлива за счет гравитационного взаимодействия планет была выдвинута еще на рубеже XIX—XX веков. Приведем отрывок из статьи В. Сурдина: «Опираясь на идею замечательного русского инженера Юрия Васильевича Кондратюка (1897—1941), траектории межпланетных перелетов часто прокладывают вблизи планет не только для их исследования, но и чтобы притяжение одной планеты дополнительно разогнало и развернуло космический аппарат в направлении другой, более далекой планеты. Этот “фокус” называют гравитационным или, реже, пертурбационным маневром. Его неоднократно применяли во время путешествия “Пионеров” и “Вояджеров” по маршруту Земля — Юпитер — Сатурн — Уран — Нептун. Для осмотра полярных областей Солнца аппарат “Улисс” полетел по маршруту Земля — Юпитер — Солнце. А чтобы добраться до самого Юпитера без лишних затрат горючего, аппарат “Галилей” был запущен по маршруту Земля — Венера — Земля — Юпитер» [19, с. 110].

Приведем в качестве примера траекторию межпланетного аппарата «Кассини», до 2017 года исследовавшего Сатурн и его спутники (рис. 20):

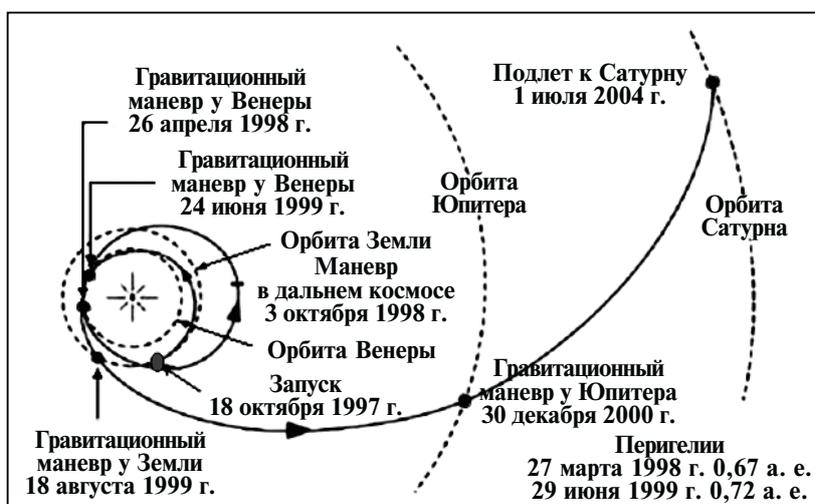


Рис. 20. Траектория межпланетного аппарата «Кассини»

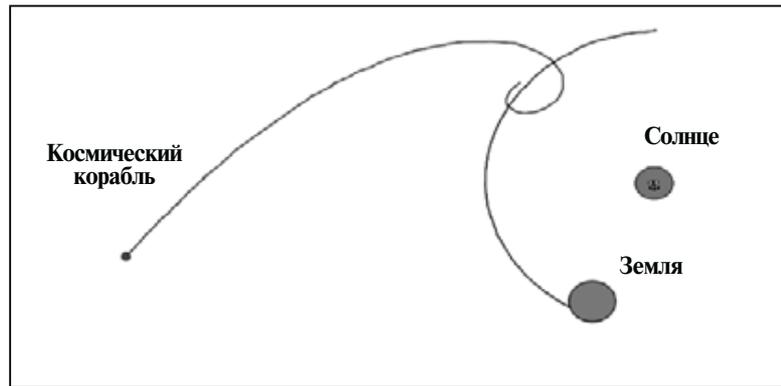


Рис. 21. Модель гравитационного ускорения космического аппарата (УМК «Живая Физика») (отрезок дуги окружности — траектория Земли; раскручивающаяся спираль — траектория межпланетного космического аппарата)

Рассмотрим задачу: «Межпланетный космический корабль движется по орбите, близкой к орбите Земли. Земля “догоняет” космический корабль. Оцените приращение скорости корабля. Начальная скорость корабля  $v_0 = 27$  км/с, орбитальная скорость Земли  $V_0 = 30$  км/с». На первый взгляд задача кажется абсурдной — корабль столкнется с Землей, и вряд ли программа исследования космоса предусматривает такую цель. Однако речь идет о *сближении* космического корабля с нашей планетой без захода в плотные слои атмосферы. В допущении *малой* (по сравнению с орбитальной скоростью Земли) относительной скорости корабля можно провести аналогию с соударением (правда, бесконтактным) двух очень неравных масс  $m$  и  $M$ : дополнительная скорость, приобретенная космическим кораблем при взаимодействии с Землей, примерно равна удвоенной *относительной скорости* космического корабля. «Живая Физика» и здесь может прийти на помощь, чтобы более наглядно представить себе ускорение космического корабля за счет гравитационного разгона с планетами (рис. 21).

### **Задание для самостоятельной работы**

На основании вышеприведенных рассуждений поясните «выброс» кометных тел из пояса Койпера.

### **Приливные явления**

В качестве предисловия к теме приведем задачу-оценку предельной высоты  $H$  гор твердотельных планет и спутников Солнечной системы [3; 5]. Используя условие равновесия для

горы конической формы, найдем давление  $P$  горы на основание конуса:

$$P = \frac{4}{9} \pi G p^2 R H,$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $p$  — средняя плотность вещества планеты,  $R$  — радиус планеты.

Из условия, что данное давление не может превышать предел прочности  $\Pi$  вещества планеты на сжатие, учащиеся выводят формулу для предельной высоты горы:

$$H = \frac{9\Pi}{4\pi G p^2 R}.$$

Ограниченность высоты горы, как следствие баланса «гравитация — прочность», можно продемонстрировать «домашним» экспериментом, насыпая манную крупу на ровную поверхность стола. Сколько бы мы ни насыпали крупы, высота горки из нее будет ограниченной. «Живая Физика» позволяет создать модель такого эксперимента (рис. 22).

Эта закономерность хорошо согласуется с данными о высотах гор на Земле, Марсе и Венере [20]. А для Меркурия [11] и Луны, несмотря на различия в плотности и пределе прочности, данные о высоте гор сильно расходятся с вышеприведенной формулой. В частности, для Меркурия высота гор не превышает 4 км, причем диаметр этой планеты составляет 0,383 диаметра Земли, а средняя плотность примерно равна плотности Земли. Таким образом, можно прийти к выводу об ограниченной области применимости формулы — оценки высоты горы, учитывающей только баланс сил притяжения к планете и предельной прочности на сжатие. Поиски общих особенностей расположения для Луны и

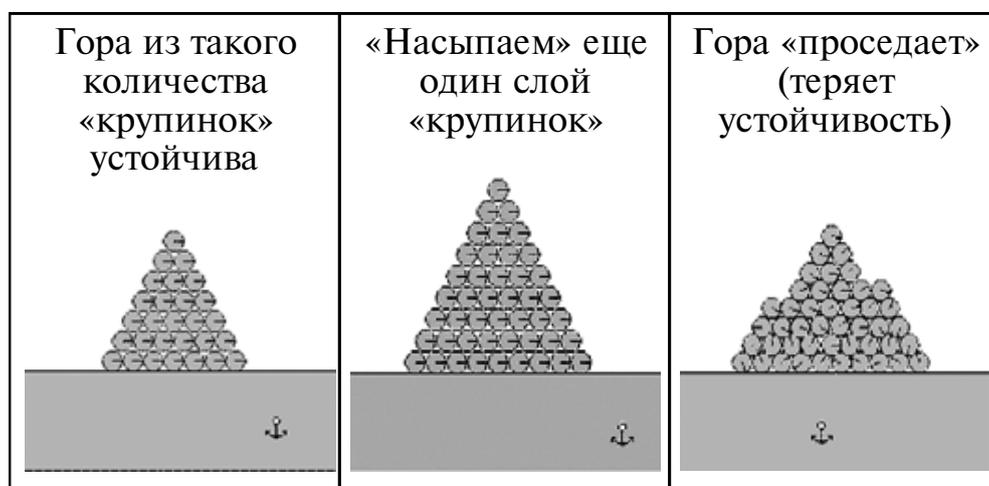


Рис. 22. Эволюция модели горы при попытке ее наращивания

Меркурия приводят к учету притяжения не только к самой планете, но и к ее «соседям» — в данном конкретном случае это, соответственно, Земля и Солнце. Таким образом, мы подходим к *моделированию приливных явлений*, вызывающих дополнительное сглаживание гор твердотельных объектов Солнечной системы.

В 12-й главе знаменитой книги И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» дается следующая формулировка закона всемирного тяготения для двух шарообразных тел: «*Два однородных или два состоящих из однородных слоев шара взаимно притягиваются с силою, прямо пропорционально произведению масс обоих шаров и обратно пропорционально квадрату расстояния их центров*».

Для того чтобы выявить ключевые факторы, вызывающие приливные деформации, рассмотрим два шара: 1 (Земля) и 2 (Луна). Мысленно разделим каждый из шаров на половинки (рис. 23).

Если бы между половинками А и В не было сил сцепления, то при свободном падении шаров друг на друга половинка А отставала бы от половинки В. Причины такого отставания — разные ускорения свободного падения половинок, в частности половинка А падает на шар 2 с меньшим ускорением, чем половинка В. Сцепление (молекулярное и гравитационное) половинок — не жесткое, поэтому в результате взаимного притяжения шары А и В должны деформироваться!

Рассмотрим более детально, от каких факторов зависят данные деформации, получившие названия *приливных явлений*. Чтобы оценить величину растягивающих сил для шара 1 (в грубой модели), заменим полушария А и В на рисунке выше шарами с массами, равными половине массы шара 1, и расстояниями между центрами шаров порядка радиуса  $R_1$  шара 1 (рис. 24 на с. 39).

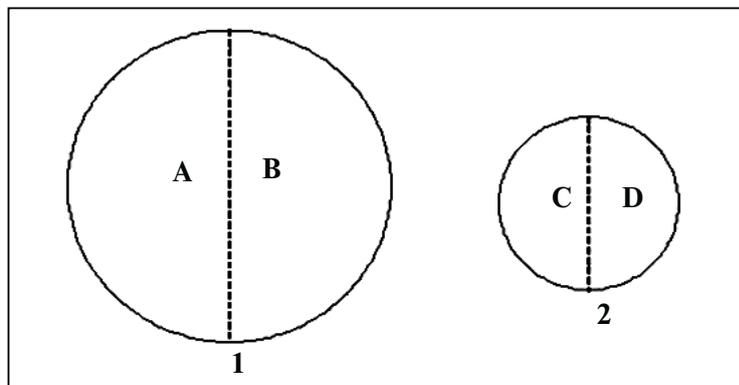


Рис. 23. К моделированию приливных сил

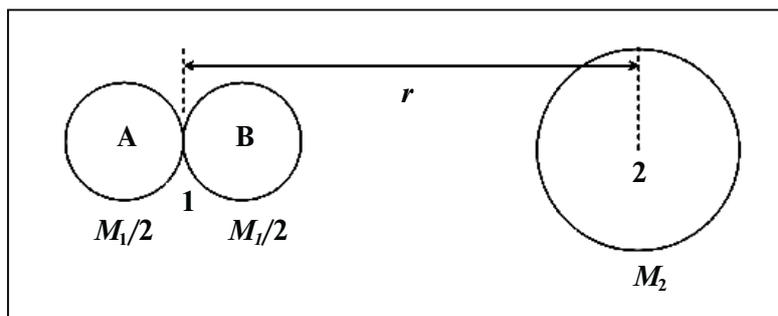


Рис. 24. К моделированию приливных сил для объекта  $M_1$

В системе отсчета с центром, совпадающим с центром шара 1 (в нашей модели это точка соединения шаров А и В — то есть центр Земли), на половинки А и В, кроме реальных сил, действует *сила инерции*, равная  $\frac{M_1}{2} \frac{GM_2}{r^2}$ , направленная от центра шара 2. Используя приближенную формулу при  $R_1 \ll r$ :

$$\frac{1}{(r \pm \frac{R_1}{2})^2} \approx 1 \pm \frac{R_1}{4r^3},$$

найдем модуль равнодействующей сил притяжения и сил инерции для половинок  $M_1/2$  (приливную силу  $F_{\text{прил.}}$ ):

$$F_{\text{прил.}} \approx \frac{GR_1 M_1 M_2}{2r^3}.$$

Последняя формула дает ключ к прогнозированию ряда явлений, вызванных приливными силами.

### Задания для самостоятельной работы

① Сравните количественно  $F_{\text{прил.}}$  от Солнца и от Луны (найдите их отношение).

Необходимые данные:

✓ масса Солнца =  $2,7 \cdot 10^7$  массы Луны;

✓ расстояние от Земли до Луны =  $2,6 \cdot 10^{-3}$  расстояния от Земли до Солнца.

② Учитывая совместное влияние Солнца и Луны, изобразите взаимные положения этих светил (и Земли) для наибольшей и наименьшей  $F_{\text{прил.}}$ . Каковы для этих случаев местное время и видимость Луны в областях наибольших и наименьших приливов)? Учитывая независимость  $F_{\text{прил.}}$  от положения  $M_2$  (справа или слева от  $M_1$ ), можно сделать прогноз наибольших приливов и отливов в новолуние и полнолуние, а также наименьших приливов и отливов, когда Луна и Солнце находятся в квадратурах (видимость Луны — первая и третья четверти).



Рис. 25. Динамика приливного разрыва

Рассмотрим более драматическую ситуацию, когда гравитационные силы могут вызвать деформации, приводящие к разрыву небесного тела (приливный разрыв). Когда мы говорим о явлении расщепления или развала, то интуитивно подразумеваем на два или, в крайнем случае, на несколько осколков. Но комета Шумейкеров — Леви 9 предстала перед нами в виде непрерывной цепочки, состоящей из 21 осколка (некоторые ученые считают, что их было 25). Это — случай, когда приливные силы, воздействующие на ядро кометы, соизмеримы с силами сцепления «половинок» кометного тела. «Живая Физика» позволяет качественно визуализировать динамику приливного разрыва на два осколка (рис. 25).

### Задания для самостоятельной работы

① Сравните силы гравитационного  $GM^2/R_K^2$  и молекулярного сцепления  $\Gamma \cdot \pi R_K^2$  «половинок» кометы.

Необходимые данные:

- ✓ радиус кометы  $R_K = 1$  км;
- ✓ гравитационная постоянная  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  (СИ);
- ✓ предел прочности  $\Gamma$  на разрыв материала кометы — порядка  $10^3$  (СИ);
- ✓ плотность  $\rho$  вещества кометы — порядка  $10^3$  (СИ).

Докажите приоритет сил «гравитационного сцепления».

② Оцените расстояние между Землей (поверхностью Земли) и кометой, при котором кометное тело начнет разрываться.

Данные о Земле: радиус = 6400 км, средняя плотность =  $6 \cdot 10^3$  (СИ).

У к а з а н и е: приравняйте приливные силы к силам гравитационного сцепления «половинок» кометы.

Если вы не ошиблись в оценках, то вам удалось показать, что предельная высота разрыва — порядка радиуса Земли. Более фантастической, но приведенной в художественной литературе выглядит посадка человека на «железную звезду». Речь идет об отрывке из известного романа И. А. Ефремова «Туманность Андромеды». Автора нельзя упрекнуть в отсутствии научной грамотности, так как теория такого типа звезд (нейтронные звезды) появилась позже. Благодаря малому размеру  $r_n$  нейтронной звезды (порядка 10 км) при массе звезды порядка массы Солнца ( $M_n \approx 2 \cdot 10^{30}$  кг) на астронавта (массой  $M_q \approx 100$  кг и размером  $R_q \approx 1,5$  м) на поверхности «железной звезды» будет действовать приливная сила:

$$F_{\text{прил. н}} \approx GM_q M_n R_q / 2r^3 n \approx 10^{10} \text{ н!}$$

Даже хром-молибденовая сталь не выдержит такой нагрузки (если принять площадь сечения астронавта порядка  $0,5 \text{ м}^2$ ). Поэтому для современных скафандров такая посадка представляется весьма экзотической.

### Приливное торможение Луны

Часто задается вопрос: «Почему Луна развернута к Земле все время одной и той же стороной?» Ответ — в свойстве приливных сил, которое называется «приливное торможение». При предположении, что при формировании Луны строение спутника Земли включало в себя твердую кору, вязкую мантию и твердое ядро,

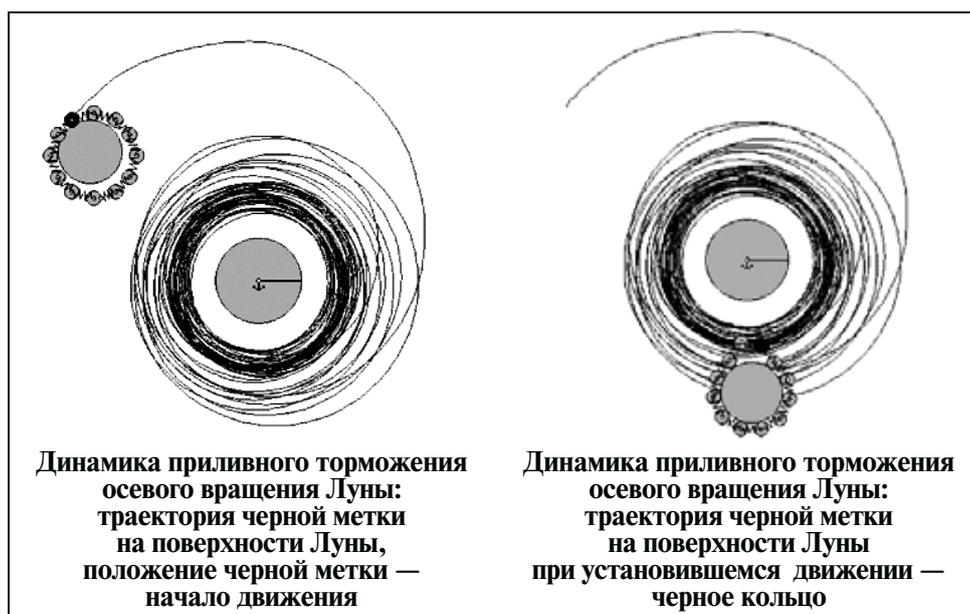


Рис. 26. Динамика приливного торможения осевого вращения Луны (УМК «Живая Физика»)

приливные деформации коры вызывают трение между слоями спутника (приливное трение). «Живая Физика» дает возможность создать качественную модель временной динамики осевого вращения Луны с учетом приливного трения. На рис. 26 на с. 41 деформация коры спутника Земли моделируется шариками, соединенными пружинами. Если проследить за траекторией черного шарика (фрагмента поверхности Луны), можно отметить, что установившаяся траектория носит характер тонкого кольца, то есть выделенный участок поверхности Луны в результате приливного трения занимает позицию, при которой практически не меняет своего кратчайшего расстояния до Земли. Модель «Живой Физики», приведенная на рис. 26, объясняет синхронное (без учета либраций) вращение нашего спутника — угловые скорости осевого и орбитального вращения Луны практически совпадают!

### **Хвосты комет: оценка воздействий солнечного ветра и светового давления**

Советский инженер Фридрих Цандлер в 1924 году подал в Комиссию по изобретениям заявку об использовании солнечного паруса для космических полетов, но эксперты назвали ее слишком фантастической и отклонили. Впоследствии идею двигателя, работающего от давления солнечного излучения, высказывал известный американский астрофизик Карл Саган. Одним из первых успешных экспериментов был эксперимент Японского аэрокосмического агентства (JAXA). Солнечный парус был изготовлен из полиамидной пленки толщиной 7,5 мкм, обеспечивал тягу в 2—4 мН.

Что же общего между технологиями солнечного паруса и физикой хвостов комет? Прежде всего это вопросы:

‣ Какие типы солнечного излучения оказывают приоритетное воздействие на частицы хвостов комет и на плоскость солнечного паруса?

‣ Как оценить предельную толщину солнечного паруса (максимальный размер частиц хвоста кометы), чтобы было «отталкивание» от Солнца?

Перед постановкой этих задач приведем сведения описательного характера о структуре кометных хвостов — *ионного* и *пылевого*. Когда комета находится далеко от Солнца (удаление более 6 а. е.), то она внешне больше похожа на астероид, с отличием физико-химических свойств. Вещество кометы, по образному выражению американского астронома Фреда Уиппла, — «грязный снежок». Более точно — это глыба замороженных газов, включающих метан, аммиак, водяной лед, а также вкрапления мелкой пыли, включающей химические элементы от кремния до железа. При сближении с Солнцем менее чем на 6 а. е. начинаются таяние и испарение «снежка» — комета обрастает газо-пылевой атмосферой (рис. 27).

Коротковолновая компонента солнечного излучения ионизирует газообразную часть кометной атмосферы, поэтому газообразная часть атмосферы комет в значительной степени состоит из заряженных частиц — ионов (*ионосфера*). Дальнейшее развитие событий связано с воздействием на атмосферу кометы солнечного излучения.

Итак, в атмосфере близкой к Солнцу кометы присутствуют две компоненты: газ ионов (*плазма*) и пыль из каменных веществ. На кометную атмосферу воздействуют две компоненты солнечного излучения:

- *электромагнитные волны* (в основном — *фотоны видимого света*);
- *потoki заряженных частиц* (*солнечный ветер*).

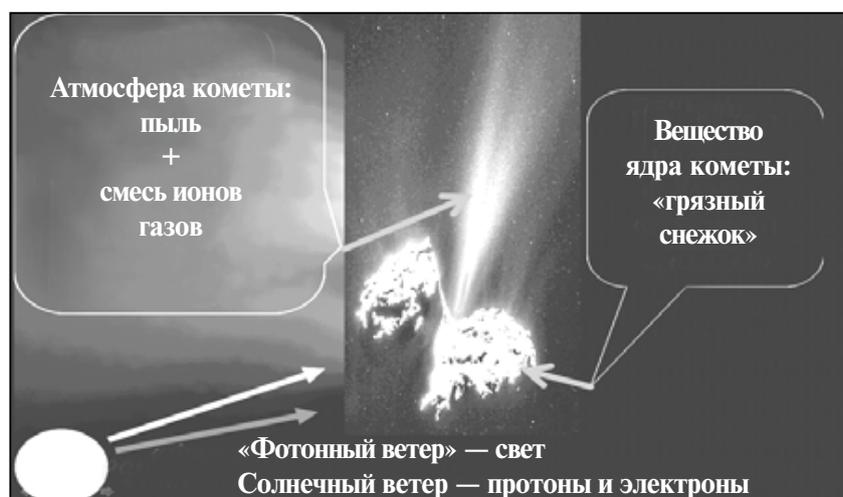


Рис. 27. Образование атмосферы кометы Чурюмова — Герасименко (снимок с космического корабля Rosetta, 2015 г.)

## Задание для самостоятельной работы

Сравните эти два воздействия Солнца по двум качествам:

- ✓ по *потокам энергии* в случае, когда комета находится вблизи Земли;
- ✓ по *энергии одной частицы* излучения.

Необходимые сведения:

- ✓ мощность солнечного светового излучения  $L \approx 4 \cdot 10^{26}$  Вт;
- ✓ средняя энергия фотона порядка  $3 \cdot 10^{-19}$  Дж;
- ✓ для солнечного ветра:
  - поток энергии вблизи Земли  $\approx 3 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>;
  - средняя скорость протона  $\approx 300$  км/с;
  - масса протона  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг;
  - расстояние от Солнца до Земли (а. е.)  $a = 1,5 \cdot 10^8$  км.

У к а з а н и е. Для оценки потока энергии светового излучения от Солнца воспользуйтесь энергетическим соотношением:

$L$  — это мощность, излучаемая Солнцем *во все стороны*. Поток энергии — это мощность, падающая на 1 м<sup>2</sup>. Окружите мысленно Солнце сферой, радиус которой равен  $a$ ; поток энергии вблизи Земли — это мощность, деленная на площадь вышеуказанной сферы.

Если вы справились с заданием, то мы с вами можем сделать вывод о приоритетных воздействиях на ионный и пылевой хвосты комет. Определяющим воздействием на ионный хвост является корпускулярное воздействие солнечного ветра, так как здесь важна *энергия отдельной частицы*. На пылевой хвост (размеры пылевой частицы мы предполагаем много больше размеров падающих от Солнца микрочастиц) важнее воздействие *многих частиц* — здесь приоритет у *потока энергии* световой компоненты солнечного излучения.

После этого вывода поставим задачу-оценку наибольшего размера частиц пылевого хвоста, при котором они еще будут отталкиваться от Солнца. Пылинка моделируется «монетой» с площадью  $S$  освещенной Солнцем грани (грань перпендикулярна падающим солнечным лучам) (рис. 28).

Сила светового давления  $F$  — это суммарный импульс фотонов  $P_{\phi S}$ , переданный грани  $S$  за одну секунду (в предположении абсолютно упругого удара, соответствующего полному отражению):

$$F = 2 \cdot P_{\phi S} / \Delta t.$$

В качестве необходимых сведений приведем соотношения

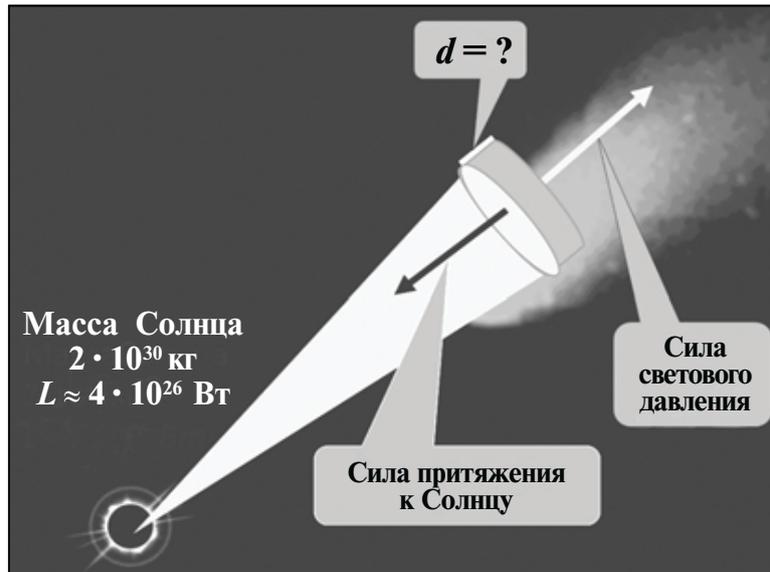


Рис. 28. Моделирование светового воздействия Солнца на «пылинку» хвоста кометы

между энергией  $E_\phi$  и импульсом  $P_\phi$  одного фотона:  $E_\phi = P_\phi \cdot c$  ( $c$  — скорость света), поэтому  $P_{\phi S} = E_{\phi S} / c$ . Учтем, что  $E_{\phi S} / \Delta t$  — это поток энергии на площадку  $S$ :  $E_{\phi S} / \Delta t = L / 4\pi a^2$ .

### Задания для самостоятельной работы

- ① Оцените величину силы  $F$  (см. данные выше) для парусника JAXA, считая площадь  $S$  равной  $200 \text{ м}^2$ , а расстояние  $a = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$ . Сравните с данными JAXA (для JAXA  $F = 7 \text{ мН}$ ).
- ② Как результат баланса силы притяжения к Солнцу:  $F_G = GdSpM/a^2$  и силы  $F$  светового давления получите оценку размера  $d$  пылинки вдоль светового луча. Используйте среднюю плотность материала пылинки  $r \approx 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , массу Солнца  $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ , гравитационную постоянную  $G = 6,67 \cdot 10^{11} \text{ (СИ)}$ . Сама численная оценка по порядку величины согласуется с приведенной выше толщиной полиамидной пленки космического парусника JAXA (см. выше).



### Почему «дует» солнечный ветер?

Тема «Солнечный ветер» уже присутствовала в предыдущем разделе при анализе воздействия Солнца на хвосты комет. Однако мы не касались вопроса: «А почему Солнце дарит Солнечной системе не только электромагнитное излучение, но и часть своего вещества?» Точный ответ на этот вопрос вряд ли может быть дан в рамках школьной программы, тем более что данная проблема — это поле для современных астрофизических исследований [21].

Попробуем воспользоваться методом исключения — точнее, опровержения гипотез. Пожалуй, наиболее простая гипотеза — это испарение Солнца как газового шара. Тем более что температура внешнего слоя Солнца — солнечной короны — весьма высока — порядка 1 млн градусов! Но дело в том, что наше светило имеет магнитное поле, индукция которого вне солнечных пятен порядка  $10^{-6}$  Тл, а в области пятен может быть в тысячи раз больше. Из курса физики мы знаем, что в магнитном поле заряженные частицы двигаются либо по окружности (если начальная скорость перпендикулярна силовым линиям магнитного поля), либо по спирали. Посмотрим, может ли магнитное поле Солнца «выпустить» частицы солнечного ветра — протоны и электроны.

#### Задание для самостоятельной работы

Оцените радиусы орбит протонов и электронов в солнечной короне в случае, когда начальные скорости перпендикулярны направлению солнечного магнитного поля ( $10^{-6}$  Тл).

Необходимые данные о солнечной короне:

✓  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг;

✓  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;

✓  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

- ✓  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;
- ✓  $T = 10^6$  К;
- ✓  $B = 10^{-6}$  Тл.

Если вы не ошиблись в расчетах, то радиусы орбит протонов и электронов оказываются много меньше радиуса Солнца  $\approx 700\,000$  км, то есть магнитное поле Солнца «не выпустит» солнечное вещество! Поэтому проблема истечения вещества из солнечной короны значительно сложнее и включает в себя связь динамики движений вещества и поведения магнитных полей Солнца. Давайте задумаемся: а почему космические тела имеют собственные магнитные поля?

## Происхождение магнитных полей Солнца и планет

Из курса физики нам известно, что источниками магнитных полей могут быть намагниченные тела или электрические токи. Может быть, намагниченность Земли сформировалась в эпоху ее зарождения и в недрах?

### Контрольный вопрос

В чем ошибочность данной гипотезы? (Используйте знания о температурном пределе намагничивания.)

Чтобы разобраться в причинах возникновения магнитных полей звезд и планет, познакомимся с известными данными о магнитных полях в Солнечной системе, которые представлены в таблице ниже (рис. 29).

Планеты	Напряженность, а/м (индукция магнитного поля в Тл, деленная на $8\pi \cdot 10^{-7}$ )		Основные параметры		
	измерение	расчет	масса, кг	период	радиус, м
Солнце	80 до $10^5$ в пятнах	4450	$1,984 \cdot 10^{30}$	25 д. 9,1 ч	$6,96 \cdot 10^9$
Меркурий	0,7	0,09	$3,31 \cdot 10^{23}$	58,644 д.	$2,5 \cdot 10^6$
Венера	менее 0,05	0,12	$4,87 \cdot 10^{24}$	243 д.	$6,2 \cdot 10^6$

Окончание табл.

Планеты	Напряженность, $a/m$ (индукция магнитного поля в $Tл$ , деленная на $8\pi \cdot 10^{-7}$ )		Основные параметры		
	измерение	расчет	масса, кг	период	радиус, м
Земля	50	37,4	$6 \cdot 10^{24}$	23 ч 56 мин.	$6,373 \cdot 10^6$
Луна	0,024 на $h = 55$ км	0,061	$7,35 \cdot 10^{22}$	27,321 д.	$1,739 \cdot 10^6$
Марс	0,052	7,34	$6,44 \cdot 10^{23}$	24 ч 37 мин.	$3,391 \cdot 10^6$
Юпитер	1140	2560	$1,89 \cdot 10^{27}$	9 ч 55 мин.	$7,14 \cdot 10^7$
Сатурн	84	880	$5,69 \cdot 10^{26}$	10 ч 14 мин.	$5,95 \cdot 10^7$
Уран	228	300	$8,77 \cdot 10^{25}$	10 ч 45 мин.	$2,507 \cdot 10^7$
Нептун	13,3	250	$1,03 \cdot 10^{26}$	15 ч 48 мин.	$2,49 \cdot 10^7$

Рис. 29. Данные о магнитных полях в Солнечной системе

### Контрольный вопрос

Сопоставьте данные о магнитных полях тел Солнечной системы с величинами, характеризующими:

- ✓ быстроту осевого вращения;
- ✓ размеры небесных тел.

Для каких объектов расхождения расчетных и измеряемых данных о магнитных полях наибольшие?

Возникает впечатление, что факторы *размеров* небесных тел и *быстроты осевого вращения* влияют на формирование магнитных полей космических тел. Проанализируем эти предположения более внимательно. В начале XX века появилась модель *однодискового динамо*, описывающая возникновение магнитных полей при *дифференциальном* (относительном) *вращении* проводящих тел. Этой модели предшествовала разработка в первой половине XIX века генератора постоянного тока, получившая название *униполярного индуктора Фарадея* — по имени изобретателя *Майкла Фарадея* (1791—1867). Ниже приведены авторская фотография модели униполярного индуктора, выполненная с использованием школьного оборудования, а также принципиальная схема индуктора (рис. 30, 31).

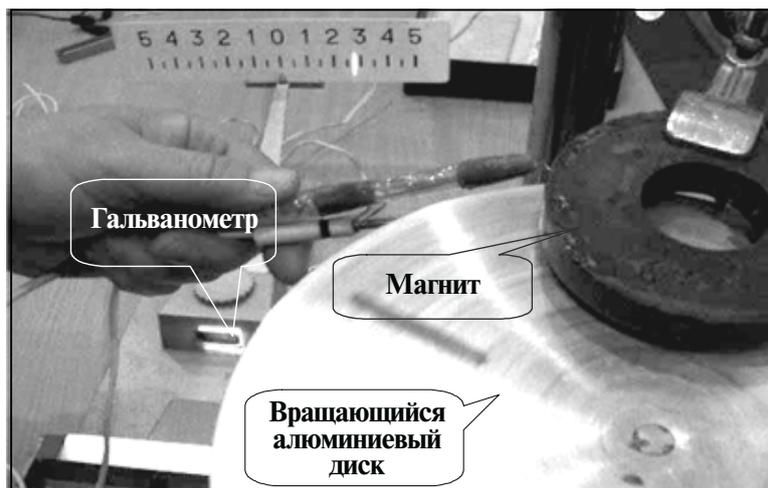


Рис. 30. Фотография модели унipoлярного индуктора Фарадея

При указанном на рис. 31 направлении вращения диска сила Лоренца увлекает электроны проводимости к краю диска, создавая тем самым э. д. с. индукции. При подключении скользящих контактов гальванометра  $G$  в цепи возникает ток (при скоростях вращения порядка 1 оборота в секунду сила тока не превышает 1 мкА). Но, как это ни парадоксально, для возникновения индукционного тока внешний магнит необязателен! Рисунок далее (рис. 32 на с. 50) иллюстрирует сказанное.

Вместо гальванометра к вращающемуся диску (верхняя часть рисунка) подсоединен круговой виток провода, плоскость которого параллельна плоскости вращающегося диска. Представим себе, что в круговом витке случайно возник малый ток (*флуктуация*

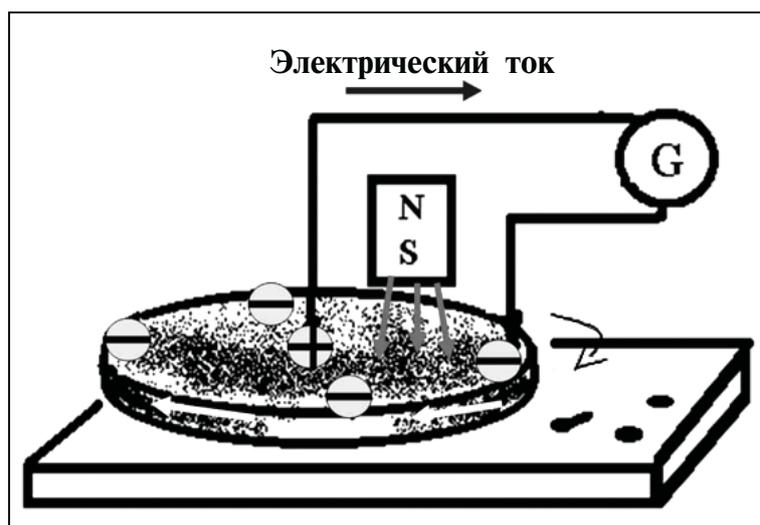


Рис. 31. Схема унipoлярного индуктора Фарадея

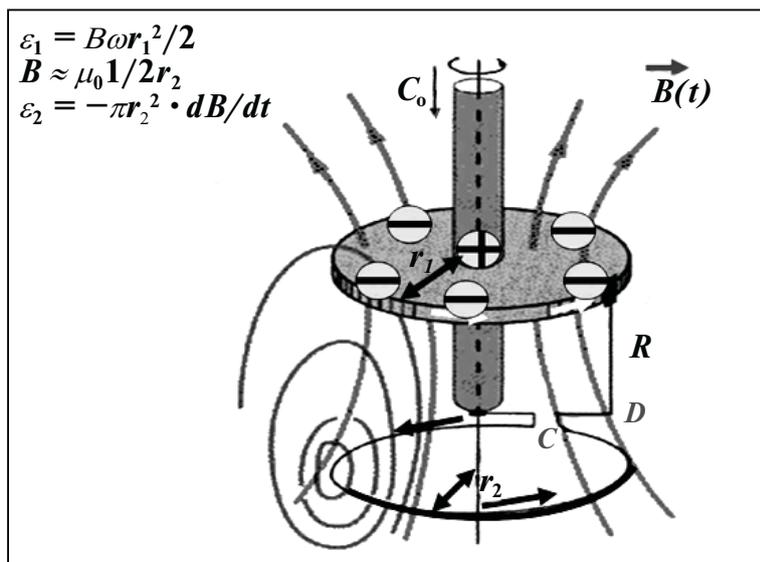


Рис. 32. Схема генератора постоянных токов и магнитных полей (однодисковое динамо)

тока) в направлении, указанном на рисунке жирными стрелками. Этот ток создаст в витке магнитное поле, индукция  $B$  которого в центре витка связана с радиусом витка  $r^2$  и силой тока  $I$  соотношением, приведенным на рисунке выше (рис. 33). Это магнитное поле способствует возникновению во вращающемся диске э. д. с. индукции  $\varepsilon_1$ , которое при данной конфигурации диска и витка усиливает первоначальную флуктуацию тока. Возникает ситуация *неустойчивости*.

### Задания для самостоятельной работы

Обозначая буквой  $R$  активное сопротивление данной замкнутой цепи:

- ① Напишите закон Ома для этой цепи.
- ② Выясните условия (в виде неравенства, в котором присутствуют величины  $r_1, r_2, R, \omega$ ), при которых ток в цепи будет нарастать.

Пояснение: постарайтесь получить уравнение типа:  $dl/dt = (A-B) \cdot I$ , где коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят от  $r_{1,2} \approx r$  — размеров небесного тела,  $\omega$  — разности угловых скоростей ядра и внешних слоев звезды или планеты и  $R$  — фактора проводимости вещества небесного тела.

У к а з а н и е. На рисунке приведены формулы для:

- ✓ э. д. с. индукции  $\varepsilon_1$ , возникающей между центром и краем диска радиуса  $r_1$ , вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ ;
- ✓ э. д. с. самоиндукции  $\varepsilon_2$ , возникающей в витке из-за изменения во времени величины индукции  $B(t)$ .

Если вы справились с последним заданием, то вам удалось показать, что для самозарождения магнитного поля космические тела должны быть достаточно проводящими и быстро вращающимися. Следует отметить, что важна не *абсолютная величина* угловой скорости, а *разность угловых скоростей ядра и внешних слоев звезды или планеты*.

### **Солнечно-земные связи: полярные сияния**

Излучения Солнца не только формируют хвосты комет — свойства земной атмосферы также обусловлены воздействиями нашего светила. Рассмотрим одно из ярких проявлений солнечно-земных связей — *полярные сияния*. На двух фотографиях ниже (рис. 33) представлены лишь небольшие фрагменты разнообразия видов сияний.

Как правило, сияния, имеющие ярко выраженные формы, относятся к *электронным* типам сияний, а расплывчатые (диффузные) светящиеся формы — к *протонным* типам. Чем оправданы такие названия и почему сияния называются «полярными» — разберемся вместе (рис. 34 на с. 52).

#### **Задание для самостоятельной работы**

Оцените радиусы круговых орбит частиц солнечного ветра в магнитном поле Земли. На основании оценок поясните видимые отличия электронных и протонных сияний.



Рис. 33. Электронные (слева) и протонные (справа) полярные сияния

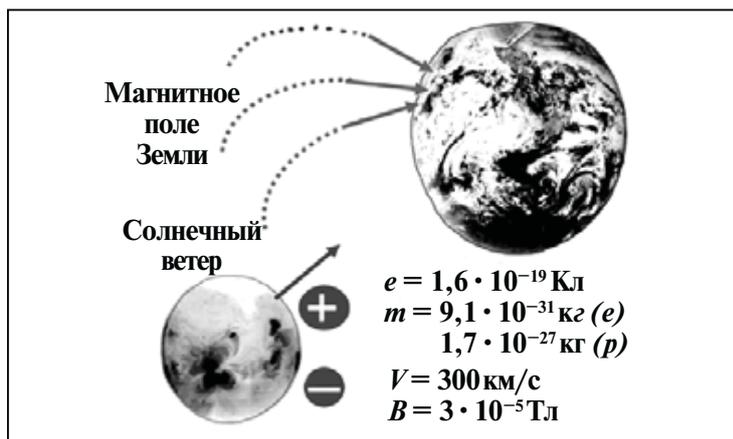


Рис. 34. Параметры солнечного ветра и данные о средней величине индукции магнитного поля Земли

Рассмотрим более детально поведение заряженной частицы солнечного ветра в магнитном поле Земли. На иллюстрации ниже (рис. 35) приведен фрагмент траектории протона в магнитном поле Земли вблизи северного геомагнитного полюса.

Учитывая, что вращающийся протон — тоже магнит, можно пояснить, почему частицы солнечного ветра замедляют движение у магнитных полюсов. Траектория движущегося протона (см. рис. 35) повторяет направление тока в соленоиде, магнитное поле которого противоположно магнитному полюсу Земли. В этом случае соленоид и Земля — два магнита, развернутые друг к другу одинаковыми полюсами и вследствие этого отталкивающиеся. Потому частицы солнечного ветра замедляют движение вблизи магнитных полюсов Земли. Свечение атмосферы связано с возбуждением атомов атмосферы при соударениях с частицами сол-

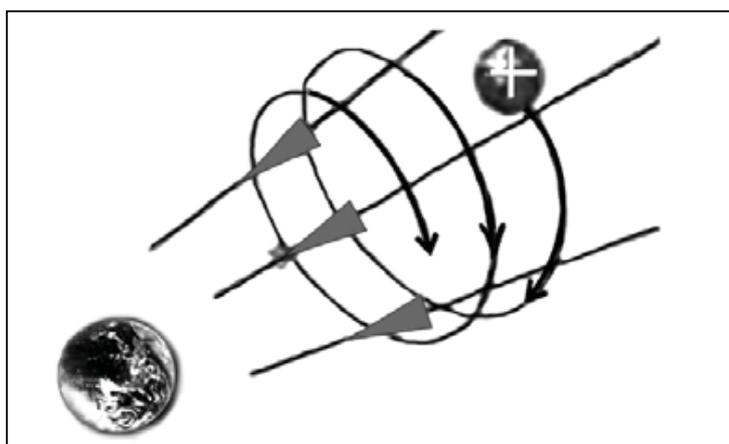


Рис. 35. Фрагмент траектории частицы солнечного ветра в магнитном поле Земли

нечного ветра. Концентрируясь вблизи магнитных полюсов, частицы солнечного ветра возбуждают атомы верхней атмосферы, вызывая их свечение — *полярные сияния*.

### Солнечно-земные связи: магнитные бури

**М**ы уже познакомились с тем, что при вторжении частиц солнечного ветра в область земного магнитного поля (*магнитосферу* Земли) электроны и протоны солнечного ветра меняют свои траектории. При этом дополнительные магнитные поля, создаваемые движущимися заряженными частицами, ослабляют магнитное поле Земли (*диамагнитный эффект*). Взаимодействие геомагнитного поля с набегающим солнечным ветром носит сложный характер — появляются дополнительные электрические токи, приводящие к колебаниям магнитного поля — *магнитным бурям*.

График, иллюстрирующий колебания магнитного поля Земли после одной из мощных вспышек на Солнце, произошедшей в начале ноября 2004 года, приведен ниже (рис. 36). Жирный вертикальный отрезок дает представление о масштабе колебаний магнитного поля Земли в системе единиц СИ.

Если у вас возникло ощущение о гигантской амплитуде колебаний индукции магнитного поля во время магнитной бури, то давайте сравним эту амплитуду колебаний с величинами откло-

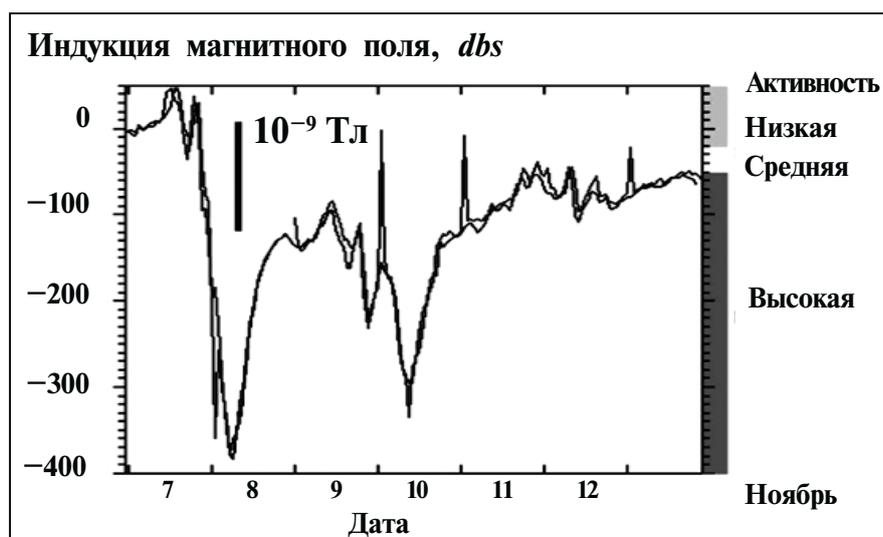


Рис. 36. Запись колебаний величины индукции магнитного поля во время сильной магнитной бури

Электропылесосы	2—20	Переменные магнитные поля, создаваемые бытовыми электроприборами. Цифрами указаны пределы амплитуд колебаний магнитных полей. Единица измерения — индукция в мкТл
Миксеры	0,6—60	
Электрофены	0,01—7	
Посудомоечные машины	0,6—3	
Стиральные машины	0,15—3	

Рис. 37. Переменные магнитные поля, создаваемые бытовыми электроприборами (искусственный электромагнитный фон)

нений индукции магнитного поля Земли от среднего значения (амплитуды колебаний) вблизи различных домашних бытовых устройств, по которым протекает электрический ток (рис. 37).

### **Задание для самостоятельной работы**

Сопоставьте амплитуду колебаний индукции магнитного поля Земли от солнечных магнитных бурь с амплитудой искусственного электромагнитного фона.

Дадим ожидаемую оценку степени возмущения геомагнитного поля во время магнитной бури. Рисунок ниже (рис. 38) иллюстрирует взаимодействие магнитосферы Земли с потоком солнечного ветра.

Возникает ощущение, что солнечный ветер «давит» на магнитосферу Земли. Результат такого воздействия зависит от соотношения «давления» магнитного поля Земли и величины давления

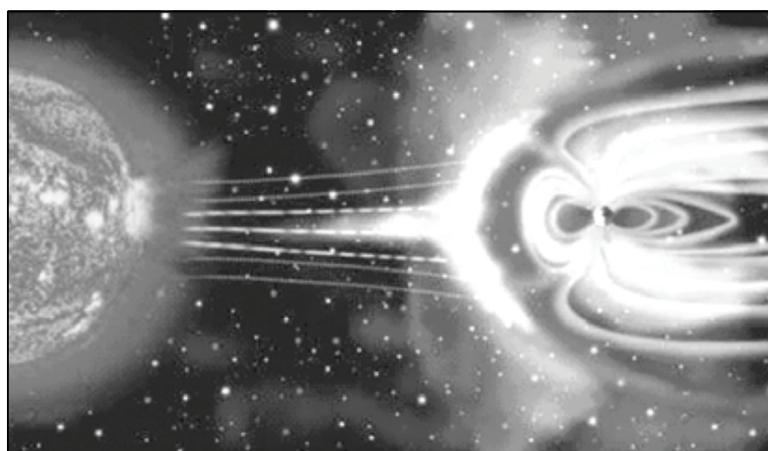


Рис. 38. Деформация картины силовых линий магнитного поля Земли солнечным ветром

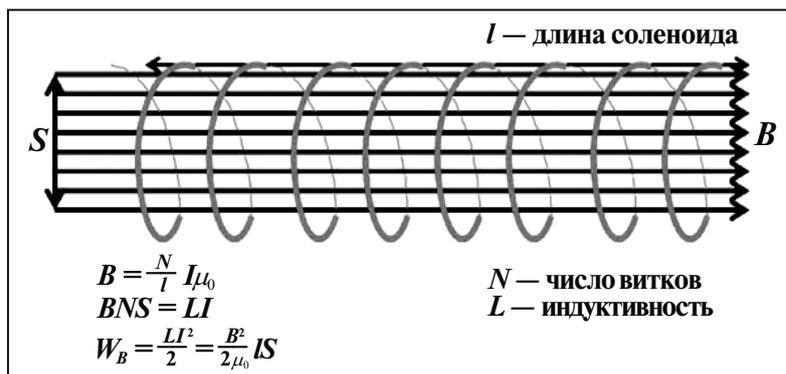


Рис. 39. К интерпретации объемной энергии магнитного поля

частиц солнечного ветра. Поясним термин «давление магнитного поля» (чаще употребляется термин «магнитное давление») на примере магнитного поля, создаваемого соленоидом, по которому течет электрический ток. Энергию магнитного поля в таком соленоиде можно представить в виде произведения величины  $B^2/2\mu_0$  ( $B$  — величина индукции магнитного поля,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума) на объем соленоида  $S \cdot l$  (в идеальной модели — объем, занимаемый магнитным полем). Обоснование приведено на рисунке (рис. 39).

Таким образом, энергия магнитного поля в соленоиде пропорциональна объему, занимаемому магнитным полем. Представим себе, что нам удалось увеличить объем магнитного поля (например, при неизменном токе и поперечном сечении  $S$ , нарастить число витков, увеличив длину соленоида на величину  $x$ ) (рис. 40). В этом случае энергия магнитного поля вырастет на величину  $(B^2/2\mu_0) \cdot S \cdot x$ . Чисто механически это можно представить как совершение работы  $F_1 \cdot x$  по «наращиванию» магнитного поля. Тогда величину  $P_b = F_1/S = B^2/2\mu_0$  можно охарактеризовать как «магнитное давление».

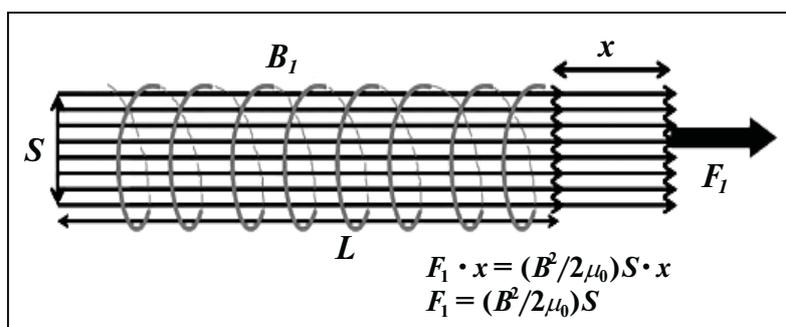


Рис. 40. Модель магнитного давления

### Задание для самостоятельной работы

Сравните величины давлений:

- ✓ магнитного поля Земли;
- ✓ потока солнечного ветра вблизи Земли с учетом концентрации частиц ветра порядка  $10$  протонов/ $\text{см}^3$ , массы протона порядка  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг, скорости частиц ветра во время вспышки порядка  $800$  км/с. Используйте аналогию с давлением газа в МКТ.

Сделайте выводы о степени возмущения геомагнитного поля (индукция «спокойного» магнитного поля Земли — порядка  $10^{-5}$  Тл) во время солнечной вспышки. Сопоставьте ваши оценки с реальными данными о возмущениях магнитного поля во время сильной магнитной бури (рис. 36). Если вы не ошиблись в оценках, то возмущение магнитного поля даже во время сильной магнитной бури — это доли процента.

### Солнечно-земные связи: ионосфера

В декабре 1901 года итальянский радиотехник и предприниматель *Гульельмо Маркони* (1874—1937), впоследствии лауреат Нобелевской премии по физике за 1909 год, впервые организовал сеанс радиосвязи через Атлантический океан, передав букву S с помощью азбуки Морзе. Так как через воду и грунт радиоволны на большие расстояния не проходят, возникло предположение об отражающем проводящем слое атмосферы (рис. 41).

Проводимость верхней атмосферы (*ионосферы*) вызвана наличием свободных зарядов — ионов и электронов. Причина сущест-

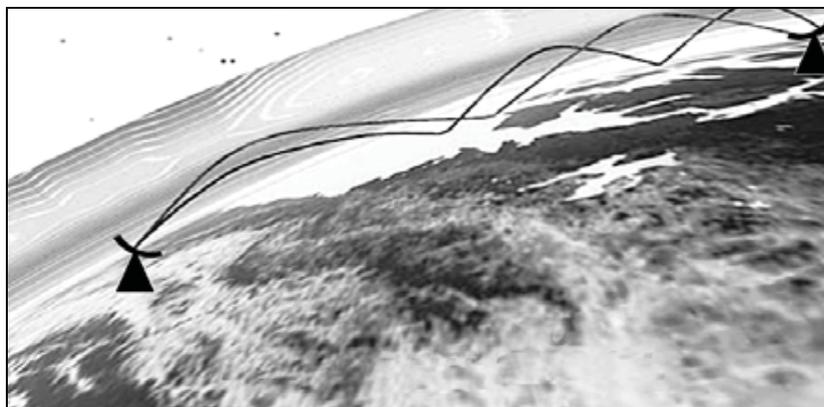


Рис. 41. Схема эксперимента Г. Маркони

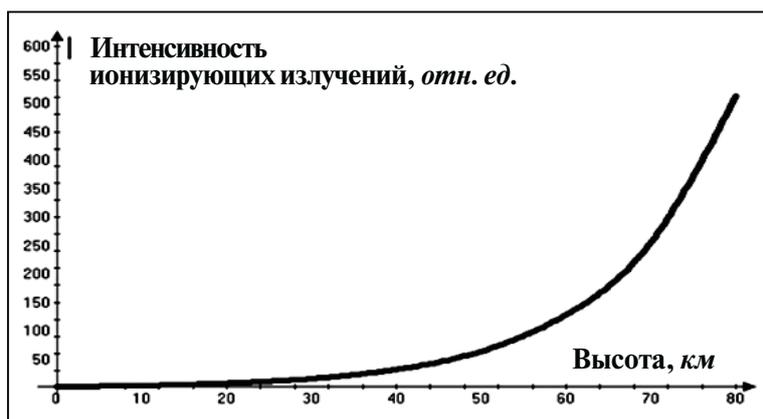


Рис. 42. Зависимость ионизирующих излучений Солнца от высоты над поверхностью Земли

вования таких зарядов в том, что газ верхних слоев атмосферы ионизируется за счет воздействия солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучений, а также частиц солнечного ветра. Почему это происходит? Интенсивность ионизирующих излучений по мере проникновения в атмосферу убывает за счет поглощения (здесь даны условные единицы интенсивности) (рис. 42).

Но для образования ионов необходимо наличие не только ионизирующих излучений, но и «мишеней» — атомов атмосферы. Плотность вещества атмосферы, наоборот, возрастает по мере приближения к Земле (единицы плотности условные) (рис. 43).

### Задание для самостоятельной работы

Используя графики рис. 42 и 43, поясните (качественно), почему под воздействием ионизирующих излучений в атмосфере Земли образуется слой с наибольшим содержанием ионов.

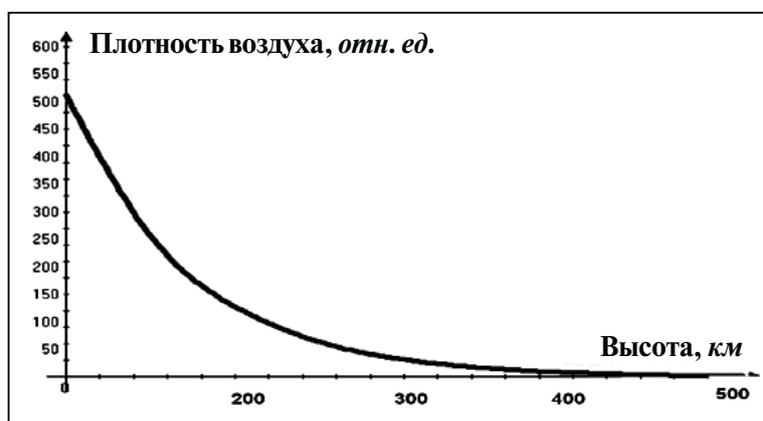


Рис. 43. Зависимость плотности воздуха от высоты над поверхностью Земли

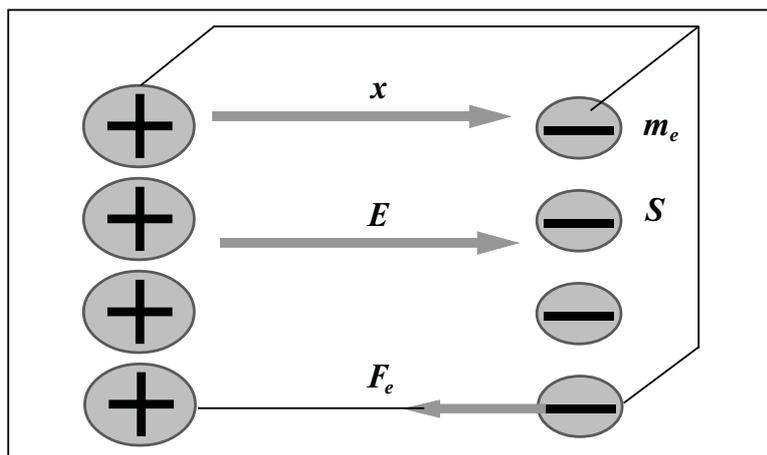


Рис. 44. Пояснение механизма колебаний вещества верхней атмосферы

Кроме свойства отражать радиоволны, вещество ионосферы способно совершать *собственные колебания*. Представим себе, что нам удалось сместить на величину  $x$  все электроны в некотором объеме  $V = S \cdot x$  плазмы в одном направлении (рис. 44).

Тогда на смещенный электрон будет действовать сила притяжения со стороны положительно заряженной «ионной пластины» (рис. 44). Напряженность поля данной пластины равна  $E = Q/2\varepsilon_0 S$ , где заряд пластины  $Q = n \cdot V \cdot e$ ,  $n$  — величина концентрации электронов.

### Задание для самостоятельной работы

Получите формулу для периода колебаний  $T$  плазмы для  $n = 10^{12} \text{ м}^{-3}$  (характерное значение наибольшей концентрации электронов в ионосфере Земли). Какому диапазону длин волн отвечает данная величина  $T$ ?

Если воздействовать на ионосферу радиоволнами данного диапазона, то электроны ионосферы можно «раскачать в резонанс» при совпадении частот волны и собственной частоты колебаний ионосферной плазмы. Установки, исследующие данное явление, в настоящее время находятся в Нижегородской области (стенд СУРА, НИРФИ), в Норвегии (Тромсё) и на севере США (Аляска, стенд HAARP).

# ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ЗВЕЗД



## Температура в недрах Солнца

Поставим вопрос: если Солнце горячее, то почему оно не разлетается? Рисунок ниже (рис. 45) иллюстрирует данную ситуацию. Звезды, у которых гигантские силы давления в ядре уравновешиваются силами гравитационного сжатия, принадлежат к звездам *главной последовательности*.

На выделенный внутри Солнца узкий цилиндр (от центра до внешней границы) действуют сила давления (выталкивающая сила, более светлая стрелка) и сила притяжения к центру Солнца (более темная стрелка). Баланс этих двух сил обеспечивает равновесие цилиндра.

### Задание для самостоятельной работы

Оцените в данной модели температуру в центре Солнца.

У к а з а н и е. Силу гравитационного притяжения цилиндра к Солнцу рассчитывайте исходя из того, что центр тяжести цилиндра находится в его средней точке. Молярную массу  $\mu$  примите равной  $10^{-3}$  кг/моль. Радиус Солнца равен  $7 \cdot 10^5$  км. Масса Солнца равна  $2 \cdot 10^{30}$  кг.

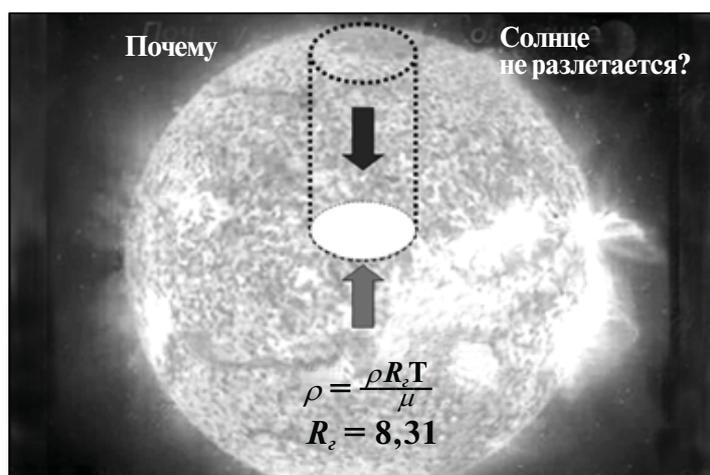
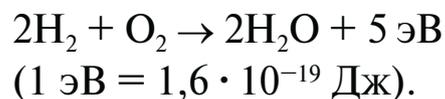


Рис. 45. Иллюстрация равновесия звезды

## Источники энергии звезд

Известный немецкий философ второй половины XVIII века Иммануил Кант, размышляя о причинах «горения» Солнца, писал: «Действительно, так как пламя, горящее над всей поверхностью Солнца, само отнимает у себя воздух, необходимый ему для горения, Солнцу грозит опасность совершенно потухнуть, когда будет поглощена большая часть его атмосферы» [8, с. 229].

Проанализируем *гипотезу химического горения Солнца*. Прежде всего для горения нужен кислород, которого на Солнце, по современным данным, крайне мало. Если бы даже на Солнце было достаточно кислорода, то при элементарной реакции горения водорода выделилось бы 5 эВ на четыре атома кислорода и два атома водорода:



### Задание для самостоятельной работы

За 1 секунду Солнце излучает  $4 \cdot 10^{26}$  Дж энергии. Зная массу протона  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг и массу Солнца  $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$  кг, оцените время, за которое водород на Солнце полностью «сгорит» (если бы количество водорода и кислорода на Солнце было сбалансировано).

Надеемся, вы доказали, что время жизни «химического Солнца» крайне мало по сравнению с данными (4,5 миллиарда лет),

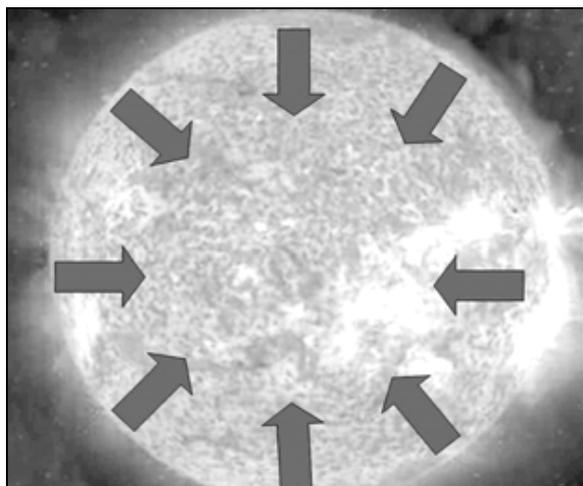


Рис. 46. Иллюстрация «дизельного» механизма горения Солнца (по Г. Гельмгольцу)

полученными *радиоизотопным методом*. Данный метод основан на исследовании процесса радиоактивного распада урана-238. Во второй половине XIX века немецкий физик и математик *Герман Гельмгольц* (1821—1894) предложил «дизельный» механизм горения Солнца. Если Солнце — не абсолютно жесткое, то под действием сил взаимного притяжения оно может сжиматься. При этом, согласно первому принципу термодина-

мики, работа сил гравитации должна увеличивать внутреннюю энергию солнечного вещества — то есть Солнце должно разогреваться! Если предположить, что работа сил гравитации полностью переходит в излучение, то запас энергии «гравитационного Солнца» можно оценить как  $GM_{\odot}^2/R_{\odot}$  — то есть как характерную величину потенциальной энергии сил гравитационного взаимодействия отдельных частей Солнца между собой (рис. 46).

### Задание для самостоятельной работы

Исходя из известной мощности излучения Солнца, оцените время жизни светила в соответствии с гипотезой гравитационного сжатия. Соотнесите полученные оценки с «радиоизотопным» возрастом — 4,5 миллиарда лет.

В 20-х годах XX века было высказано предположение о том, что энергия в звездах может выделяться при слиянии атомных ядер (*термоядерные реакции*). В начале 1940-х годов были сделаны оценки энерговыделения для конкретных типов термоядерных реакций, а в 1950—1960-х годах США и СССР продемонстрировали реальность гигантских энергий, реализуемых в ходе термоядерного синтеза, — были испытаны первые водородные бомбы. Опуская некоторые детали ступеней слияния ядер, приведем эскиз, иллюстрирующий элементарную реакцию — образования ядра гелия из четырех протонов (рис. 47).

### Задание для самостоятельной работы

Оцените время жизни «термоядерного» Солнца, используя данные рис. 47.

Поинтересуемся условиями, при которых возможно подобное слияние ядер. Для того чтобы ядерные силы «захватили» протоны (иными словами — чтобы эти силы преобладали над силами электростатического отталкивания протонов), необходимо сближение протонов на «ядерный масштаб» — на  $10^{-15}$  м (рис. 48 на с. 62).

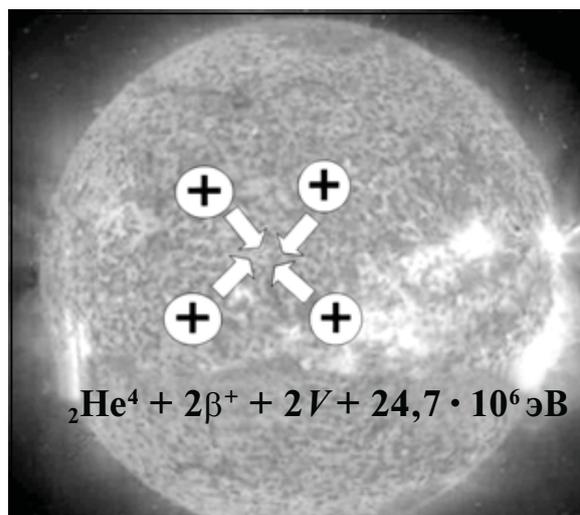


Рис. 47. К гипотезе термоядерного горения Солнца

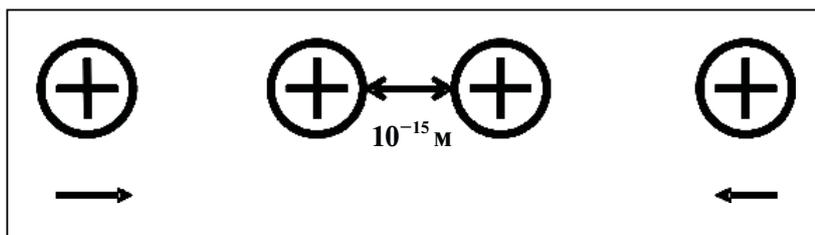


Рис. 48. К оценке температуры «слияния» ядер

### Задание для самостоятельной работы

Оцените температуры протонов, необходимые для начала термо-ядерных реакций. Начальную энергию протонов примите равной  $3kT/2$ , где  $k$  — постоянная Больцмана. Модуль работы сил электростатического поля —  $9 \cdot 10^9 e^2/r$ , где  $r = 10^{-15}$  м. Сравните с оцененной ранее температурой в недрах Солнца.

Если вы справились с этой задачей, то увидите явное несоответствие: «протонная» температура на несколько порядков превышает ранее оцененную (по рис. 45)! Дело в том, что на «ядерных» масштабах классическая механика не «работает» — нужно учитывать *неопределенность координаты и импульса*. Не вдаваясь в подробности, отметим, что из-за «размытия» координат протонов достаточно сближения на  $10^{-12}$  м для «захвата» ядерными силами (*туннельный эффект*).

## ЯРКОСТЬ НЕБЕСНЫХ СВЕТИЛ

---

Глядя на звездное небо, мы замечаем, что небесные светила видны по-разному — одни кажутся нам более яркими, чем другие. Чтобы ввести количественную меру *видимой яркости* светящихся объектов, нужно иметь представление о свойствах нашего организма при отклике на световые сигналы.

В 1860 году немецкий физик *Густав Теодор Фехнер* (1801—1887) на основании наблюдений, проведенных немецким физиологом *Эрнстом Генрихом Вебером* (1795—1878), сформулировал «основной психофизический закон», по которому сила ощущения  $p$  пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя  $S$ :

$$p = p_0 \log \frac{S}{S_0}.$$

Этот закон можно пояснить следующим образом. Вы наблюдаете компактное скопление  $N$  одинаковых звезд. Если количество таких звезд в скоплении удвоится, то вы ощутите приращение видимой вами яркости  $\Delta p_1$ . Если количество звезд еще удвоится, то новое приращение видимой вами яркости  $\Delta p_2$  будет таким же:  $\Delta p_1 = \Delta p_2$ , то есть при изменении освещенности в геометрической прогрессии наше ощущение меняется в арифметической прогрессии. Эта закономерность дает основания для введения понятия *звездной величины*  $m$ . Рисунок далее (рис. 49 на с. 64) поясняет связь величины  $m$  с энергетическими характеристиками излучения. На данном рисунке сравниваются две звезды с потоками энергий (*освещенностями*)  $E_1$  и  $E_2$  по отношению к земному наблюдателю и со светимостями (истинными мощностями излучения) соответственно  $L_1$  и  $L_2$ . Расстояния от этих звезд до Земли — соответственно  $r_1$  и  $r_2$ .

Такое разделение наблюдаемых светил по звездным величинам близко к классификации, введенной еще древнегреческим ученым *Гиппархом* (ок. 190 до н. э. — ок. 120 до н. э.). Гиппарх разбил все звезды на шесть классов, причем к первому классу он отнес самые яркие звезды, а к последнему — самые слабые ( $m_1 - m_2 = 6$ ).

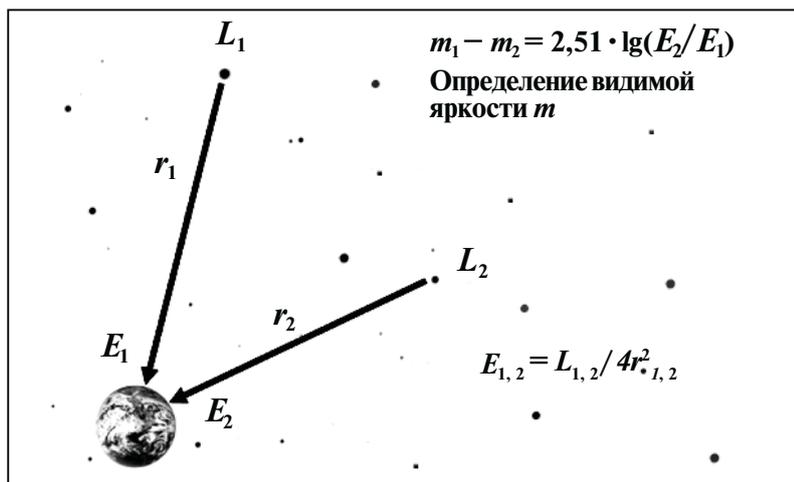


Рис. 49. Видимая яркость светил

### Задание для самостоятельной работы

Покажите, что отношение освещенности от самых ярких ( $E_2$ ) (по Гиппарху) звезд к освещенности от самых слабых ( $E_1$ ) (по Гиппарху) звезд равно примерно 100.

Данное определение звездной величины можно распространить и на сплошные протяженные объекты, такие как Солнце, Луна, некоторые компактные звездные скопления. С компактно распределенными объектами суммирование освещенностей для нахождения звездной величины не всегда уместно — если одна звезда  $\alpha$  созвездия имеет звездную величину  $1^m$ , а звездные вели-

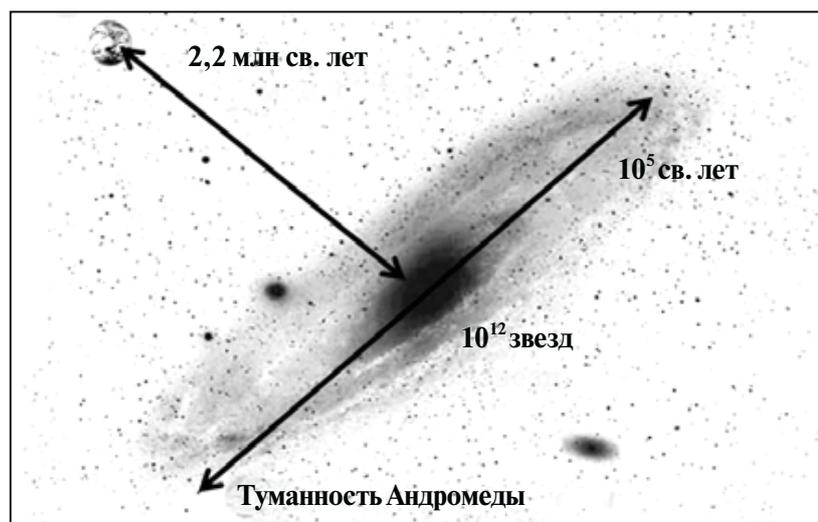


Рис. 50. К оценке звездных величин для Туманности Андромеды

чины других звезд этого созвездия меньше  $9^m$ , то вы из всех звезд созвездия увидите только звезду  $\alpha$ .

Попробуем оценить звездную величину всей галактики Туманность Андромеды — ближайшей к нам галактики. Некоторые необходимые данные приведены на рис. 50 на с. 64.

### **Задания для самостоятельной работы**

- ① Оцените видимую звездную величину звезды, похожей на Солнце, находящейся в Туманности Андромеды (рис. 50). Видимая звездная величина Солнца на Земле равна  $-26,9^m$ . 1 световой год  $\approx 10^{13}$  км. Расстояние от Земли до Солнца —  $1,5 \cdot 10^8$  км. Самый тусклый объект, доступный современному телескопу, имеет звездную величину  $+28^m$ .
- ② Оцените видимую звездную величину всех звезд Туманности Андромеды, полагая, что они похожи на Солнце. Для сравнения: наблюдаемая звездная величина Туманности Андромеды равна  $-4^m$ .

В 1924 году *Эдвин Хаббл* (1889—1953), известный американский астроном, на фотоснимках, полученных с помощью 2,5-метрового рефлектора, «разрешил» (то есть разделил) Туманность Андромеды на отдельные звезды. Исследователю предстала величественная звездная система с миллиардами солнц (точнее — порядка  $10^{12}$  Солнц. — *Авт.*) — *галактика Туманность Андромеды*.

# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД



## Протозвезды и коричневые карлики

**М**ы уже оценивали возможность «горения» Солнца, когда гравитационные силы сжимают вещество звезды и светило разогревается. Эта гипотеза не соответствовала данным о возрасте Солнечной системы, полученным радиоизотопным методом. Но разогрев вещества при сжатии гравитационными силами играет важную роль в предыстории «термоядерной» звезды (*в протозвездах*) [18]. Оказывается, некоторые звезды способны за свою долгую жизнь вообще обойтись без термоядерных реакций [19]!

Обратимся к известным характеристикам *коричневого карлика* Gliese 229B, фотографии которого приведены нами ниже (рис. 51).

На фотографиях данный объект обведен белым кружком. Своё название коричневые карлики получили из-за особенностей спектра излучения — эти звезды большую часть энергии излучают в инфракрасном диапазоне, имея при этом размеры, сопоставимые с размерами Юпитера. На рисунке приведены масса, температура



Рис. 51. Коричневый карлик Gliese 229B (фотографии)

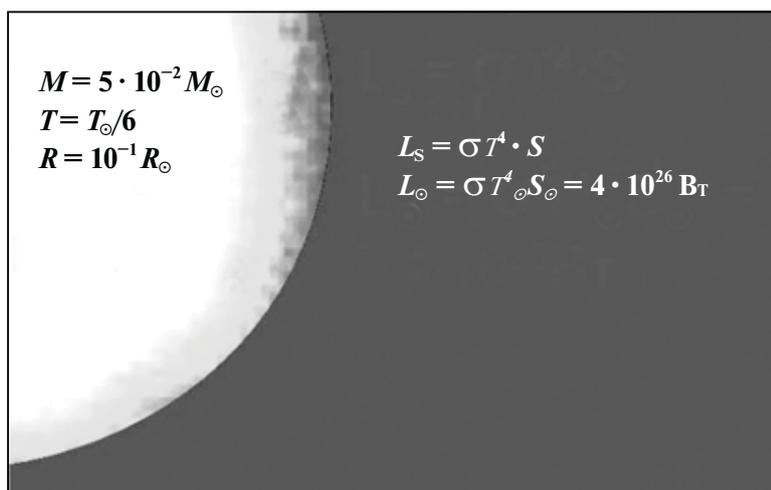


Рис. 52. Характеристики коричневого карлика Gliese 229B

поверхности и радиус Gliese 229B, выраженные в соответствующих характеристиках Солнца (рис. 52).

На этом же рисунке приведен закон Стефана — Больцмана, отражающий зависимость мощности излучения звезды от абсолютной температуры поверхности  $T$  и площади поверхности звезды (в модели абсолютно черного тела).

### **Задание для самостоятельной работы**

В рамках гипотезы гравитационного сжатия оцените время жизни коричневого карлика Gliese 221. Используйте полученные вами подобные оценки для времени жизни Солнца. Оценив время жизни коричневого карлика, вы убедились, что такой тип звезд за время возраста Вселенной способен поддерживать свое излучение за счет гравитационного сжатия.

## **Нейтронные звезды и их свойства**

**К**огда все возможное термоядерное топливо у звезд главной последовательности «выгорает», светило теряет устойчивость и начинает сжиматься. Моделирование последующих стадий эволюции звезды — сложная задача. Остановимся на одном из возможных решений, когда сжимающееся ядро превращается в *нейтронную звезду* — объект массой более 1,4 массы Солнца. Попробуем оценить размер такой звезды. В обычной звезде средняя плотность вещества порядка  $10^3 \text{ кг/м}^3$ . При такой плотности бóльшая часть

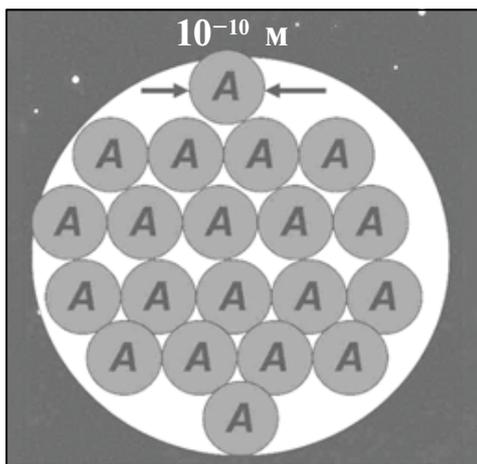


Рис. 53. Модель структуры обычной звезды

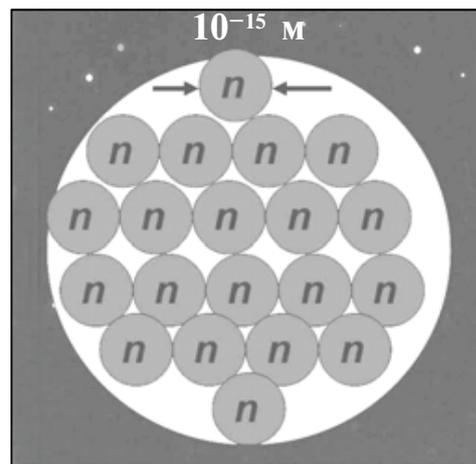


Рис. 54. Модель структуры нейтронной звезды

светила находится в состоянии, когда атомы вещества плотно прижаты друг к другу (рис. 53).

При переходе в стадию нейтронной звезды достигается почти предельная «упаковка» структурных единиц атомного ядра — нейтронов (рис. 54).

### Задания для самостоятельной работы

- ① Оцените характерный радиус нейтронной звезды, эволюционирующей из звезды главной последовательности с массой порядка 1,4 массы Солнца и имеющей радиус порядка  $2 \cdot 10^6$  км. Потерями массы пренебрегите.
- ② Оцените скорость падения вещества из бесконечности (пользуясь классической механикой) на такую нейтронную звезду.

В результате оценок вы получили, что весьма компактная нейтронная звезда способна разгонять падающее вещество до *почти световых скоростей!* Если в результате неупругого удара бóльшая часть механической энергии перейдет в излучение, то это будет поистине гигантское энерговыделение!

Мы уже рассматривали возможности механизма гравитационного сжатия для поддержания свечения звезд. В данном случае речь идет о весьма кратковременном по космическим масштабам явлении, получившем название *коллапсирующей сверхновой звезды второго типа* [13]. Заметим, что в случае термоядерных реакций менее 1 % массы переходит в энергию излучения. В случае падения на нейтронную звезду выделившаяся энергия может составлять порядка 10 % от массы звездного ядра.

## АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ — ИСТОЧНИКИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

---



В общеобразовательных организациях Нижегородской области астрономия с 2017 года введена как отдельный учебный предмет, направленный на изучение достижений современной науки и техники, формирование основ знаний о методах и результатах научных исследований, фундаментальных законах природы небесных тел и Вселенной в целом. На федеральном уровне подготовлены и опубликованы нормативные документы, внесены изменения в примерную основную образовательную программу среднего общего образования, идет общественное обсуждение проектов Концепции астрономического образования в контексте модернизации российского образования с целью повышения его качества.

Обязательный минимум содержания основных образовательных программ, включенный в федеральный компонент государственного образовательного стандарта по астрономии и на уровне среднего (полного) общего образования, содержит по теме «Методы астрономических исследований» следующие позиции: «Электромагнитное излучение, космические лучи и *гравитационные волны* как источник информации о природе и свойствах небесных тел».

В 2018 году на сайтах ведущих российских издательств появились образовательные ресурсы в виде дополнительных материалов к учебникам [10; 23]. Поэтому достижение цели изучения астрономии на базовом уровне направлено и на формирование навыков использования естественнонаучных и особенно физико-математических знаний для объективного анализа устройства окружающего мира на примере достижений современной астрофизики, астрономии и космонавтики, для оценивания информации, содержащейся в сообщениях СМИ, Интернете, научно-популярных статьях.

В данном разделе предпринята попытка представить данную (и весьма сложную) тему как системное изучение материалов об определении источников гравитационных волн в космосе, теоретических основ физического явления гравитации, сравнение гравитационного и электрического полей, вклада физиков разных стран в открытие доказательств существования гравитационных волн для подготовки педагогов к занятиям по астрономии.

В 2016 году появились первые сообщения о нахождении доказательств существования гравитационных волн. Эпохальное открытие сделали члены международного проекта LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), объединяющего более тысячи ученых из 15 стран.

Этот проект был предложен в 1980-х годах профессорами Калифорнийского технологического института Кипом Торном (Kip Thorne) и Рональдом Древером (Ronald Drever) и профессором Массачусетского технологического института Райнером Вайссом (Rainer Weiss).

Открытие гравитационных волн произошло ровно через сто лет после публикации статьи Альберта Эйнштейна «Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation (1916) [25], где было предсказано их существование.

Важную роль в реализации проекта сыграли советские и российские физики. В 1992 году началась работа над проектом LIGO в России. Основателем школы гравитационно-волновых исследований являлся доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН В. Б. Брагинский. Активное участие в реализации проекта принимала группа сотрудников кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (соавторы научного открытия — профессора И. А. Биленко, С. П. Вятчанин, М. Л. Городецкий, В. П. Митрофанов, Ф. Я. Халили, доцент С. Е. Стрыгин, ассистент Л. Г. Прохоров); позже к коллаборации присоединилась группа ученых Института прикладной физики РАН из Нижнего Новгорода под руководством ныне президента РАН А. М. Сергеева.

Гравитация является универсальным фундаментальным взаимодействием между всеми материальными телами, обладающими массами. Волны искривления пространства, или гравитационные волны, могут существовать самостоятельно. Такие известные тео-

рии XX века, как общая теория относительности Эйнштейна и квантовая теория поля, а именно их несовместимость, вдохновили ученых на проведение исследований в области изучения гравитации, результатом которых и стало открытие гравитационных волн.

Гравитационные волны — это распространяющиеся в пространстве возмущения поля тяготения. Такое определение правильно, но не полно. Ведь, согласно общей теории относительности, тяготение возникает из-за искривления пространственно-временного континуума, а волны тяготения — это всего лишь колебания гравитационного поля, поэтому их часто образно называют «пространственно-временной рябью». Таким образом, гравитационные волны — это колебания ткани пространства — времени, которые разбегаются от массивных объектов, движущихся с переменным ускорением.

Источником гравитационных волн служат любые движения материальных тел, приводящие к неоднородному изменению силы тяготения в окружающем пространстве. Движущееся с постоянной скоростью тело ничего не излучает, поскольку характер его поля тяготения не изменяется.

Для испускания волн тяготения необходимы ускорения, но не любые. Цилиндр, который вращается вокруг своей оси симметрии, испытывает ускорение, однако его гравитационное поле остается однородным, и волны тяготения не возникают. А вот если раскрутить этот цилиндр вокруг другой оси, то поле станет осциллировать и от цилиндра во все стороны побегут гравитационные волны.

Этот вывод относится к любому телу (или системе тел), несимметричному относительно оси вращения (в таких случаях говорят, что тело имеет квадрупольный момент). Система масс, квадрупольный момент которой меняется со временем, всегда излучает гравитационные волны.

Источниками гравитационных волн являются: двойные звезды или черные дыры, вращающиеся друг относительно друга, и вращающиеся несимметричные нейтронные звезды, в частности пульсары (непрерывные гравитационные волны), а также взрывы сверхновых звезд, и неизвестные, неподвижные источники малой длительности (всплески гравитационного излучения).

## **Особенности гравитационного взаимодействия**

Гравитация (от лат. *gravitas* — «тяжесть») — это всемирное тяготение, притяжение. Гравитационные волны являются подтверждением общей теории относительности А. Эйнштейна, созданной в 1916 году, и являются ее прямым доказательством. Согласно закону всемирного тяготения, открытого И. Ньютоном, любые материальные объекты во Вселенной связаны между собой гравитационными силами. Благодаря этим силам всемирного тяготения формируются и существуют небесные тела — планеты, звезды, галактики и Метагалактика в целом. Форма, структура этих тел и материальных систем, а также их относительное движение для планет в нашей Солнечной системе и взаимодействие определяются классическими законами И. Ньютона, Р. Гука, Н. Коперника, И. Кеплера.

К особенностям гравитационного взаимодействия относится то, что ускорение тела в гравитационном поле не зависит от его массы. Поэтому все тела движутся в гравитационном поле в одной и той же точке с одинаковым ускорением.

С одной стороны, ускорение тела пропорционально действующей на него силе и, следовательно, пропорционально его гравитационной массе. Но, с другой стороны, ускорение тела обратно пропорционально его инертной массе. Вспомним хотя бы о рекордных по точности экспериментах, проведенных под руководством В. Б. Брагинского в МГУ им. М. В. Ломоносова. Эти опыты, в которых была получена точность порядка  $10^{-12}$ , еще раз подтвердили равенство тяжелой и инертной масс.

Существенной особенностью гравитации является и ее универсальный характер: все, что существует в природе, участвует в гравитационном взаимодействии.

### **Земля как детектор гравитационных волн**

Амплитуда возмущений материальных тел под действием гравитационной волны такова, что чем больше само тело, тем больше будет величина деформации тестового объекта. Самый большой объект на Земле — это и есть наша планета. Деформацию

всей Земли с высокой точностью измерить трудно, однако можно измерять локальные колебания земной поверхности. В распоряжении ученых уже давно имеются приборы, регистрирующие такие колебания, — сейсмографы.

В 1970-х годах были сделаны первые попытки если не зарегистрировать гравитационные волны, то хотя бы получить ограничения сверху на их интенсивность. Однако оказалось, что специализированные детекторы справляются с задачей лучше, чем любой сейсмограф. Специализированный детектор (в частности, LIGO) максимально экранирован от сейсмичности и измеряет собственную деформацию трубы интерферометра.

Сейсмографы регистрируют деформацию Земли, но не могут отличить гравитационную волну от естественной сейсмичности. На помощь пришли лазерные технологии, способные с помощью когерентного накопления обнаружить деформацию измерительной трубы LIGO, равную  $10^{-19}$  м — миллиардной части размера атома водорода! И это — при длине измерительной трубы порядка 4 км!

## **Космические источники гравитационных волн**

Самыми мощными и довольно частыми (происходят раз в несколько десятков лет) являются взрывы сверхновых звезд, или, что наблюдалось в решающем эксперименте, — слияние двух черных дыр. Коллапс продолжается тысячную долю секунды — характерный временной масштаб гравитационного импульса. Похожая ситуация возникает при взрыве сверхновых второго типа. Но в случае «падения» черных дыр друг на друга энерговыделение возрастает на порядки. Следовательно, мощность излучения максимальна у наиболее компактных систем, в частности у наиболее компактных звезд — нейтронных звезд или черных дыр.

В 1994 году американские радиоастрономы Рассел Халс и Джозеф Тейлор открыли первый двойной радиопульсар. Открыть гравитационные волны позволила регистрация слияния двух черных дыр массой около 30 солнечных — к настоящему времени это регистрация самых мощных гравитационных возмущений.

## Литература

1. *Беленов, А. Ф.* Естествознание и окружающая среда : методическое пособие для элективного курса / А. Ф. Беленов. — Н. Новгород : ГОУ ДПО НИРО, 2007. — 49 с.
2. *Беленов, А. Ф.* Использование виртуальной физической лаборатории «Живая Физика» на уроках физики и астрономии / А. Ф. Беленов // Естественнаучное образование: информационные технологии в высшей и средней школе : методический ежегодник химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. — М. : МГУ, 2019. — Т. 15. — С. 208—223.
3. *Беленов, А. Ф.* Приливные явления в авторском курсе «Астрофизика» [Электронный ресурс] / А. Ф. Беленов. — URL: [http://вф-река-море.рф/2018/v2018\\_sek11.htm](http://вф-река-море.рф/2018/v2018_sek11.htm).
4. *Бронштэн, В. А.* Клавдий Птолемей / В. А. Бронштэн. — М. : Наука, 1988. — 241 с.
5. *Вайскопф, В.* Современная физика в элементарном изложении / В. Вайскопф // Успехи физических наук. — 1971. — Т. 103. — Вып. 1. — С. 155—179.
6. *Веселовский, И. Н.* Аристарх Самосский — Коперник античного мира / И. Н. Веселовский // Историко-астрономические исследования. — Вып. VII. — 1961. — С. 17—70.
7. *Воронцов-Вельяминов, Б. А.* Астрономия. Базовый уровень. 11 класс : учебник / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. — М. : Дрофа, 2018. — 239 с.
8. *Кант, И.* Всеобщая естественная история и теория неба / И. Кант // Кант, И. Собрание сочинений : в 6 т. — М., 1964. — Т. 1. — 324 с.
9. *Кононович, Э. В.* Общий курс астрономии / Э. В. Кононович, В. И. Мороз. — М. : Книжный дом «Либроком», 2010. — 544 с.
10. *Королев, М. Ю.* Долгожданное открытие — обнаружены гравитационные волны / М. Ю. Королев // Физика в школе. — 2016. — № 3. — С. 59—62.

11. *Ксанфомалити, Л. В.* Неизвестный Меркурий / Л. В. Ксанфомалити // В мире науки. — 2008. — № 2. — С. 64—73.
12. *Миннарт, М.* Свет и цвет в природе / М. Миннарт ; пер. с англ. — М. : Наука, 1969. — 360 с.
13. *Надежин, Д. К.* Сверхновая в Большом Магеллановом Облаке / Д. К. Надежин // Наука и Человечество. — 1991. — С. 288—317.
14. *Некрасов, А. Г.* Применение лаборатории «Живая Физика» для моделирования решения задач по физике [Электронный ресурс] / А. Г. Некрасов. — URL: <https://открытыйурок.рф/639816/>.
15. *Паннекук, А.* История астрономии / А. Паннекук ; пер. с англ. — 2-е изд. — М. : URSS, 2010. — 592 с.
16. *Роджерс, Э.* Физика для любознательных. Т. 2 / Э. Роджерс ; пер. с англ. — М. : Мир, 1970. — 628 с.
17. *Розенбергер, Ф.* История физики. Часть первая / Ф. Розенбергер ; пер. с нем. — Л.: ОНТИ Техоргиз, 1934. — 147 с.
18. *Сурдин, В. Г.* Звезды / В. Г. Сурдин. — М. : Физматлит, 2008. — 428 с.
19. *Сурдин, В. Г.* От звезды к звезде / В. Г. Сурдин // Наука и жизнь. — 2004. — № 5. — С. 110—114.
20. *Уиппл, Ф. Л.* Земля, Луна и планеты / Ф. Л. Уиппл ; пер. с англ. — М. : Наука, 1967. — 127 с.
21. *Хундхаузен, А.* Расширение короны и солнечный ветер / А. Хундхаузен ; пер. с англ. — М. : Мир, 1976. — 302 с.
22. *Чаругин, В. М.* Астрономия. 10—11 классы : учебник / В. М. Чаругин. — М. : Просвещение, 2018. — 144 с.
23. *Черепашук, А. М.* Открытие гравитационных волн во Вселенной / А. М. Черепашук // В защиту науки. — 2016. — № 17. — С. 7—13.
24. *Эйнштейн, А.* Иоганн Кеплер / А. Эйнштейн // Эйнштейн, А. Собрание научных трудов : в 4 т. / под ред. И. Е. Тамма [и др.]. — Т. IV. — М. : Наука, 1967. — С. 121—124.
25. *Einstein, A.* Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation / A. Einstein // Sitzungsberichte der Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin. — 1916. — Juni (part 1). — S. 688—696.

## Содержание

<i>Введение</i> .....	3
История астрономии .....	4
Геометрическая астрономия Древней Греции: оценка размеров и расстояний в Солнечной системе .....	4
Механика Солнечной системы .....	12
Инструментальные подтверждения движений Земли ...	12
Законы Кеплера: математическое обоснование и примеры использования .....	20
Хвосты комет: оценка воздействий солнечного ветра и светового давления .....	42
Солнечно-земные связи .....	46
Почему «дует» солнечный ветер? .....	46
Происхождение магнитных полей Солнца и планет .....	47
Солнечно-земные связи: полярные сияния .....	51
Солнечно-земные связи: магнитные бури .....	53
Солнечно-земные связи: ионосфера .....	56
Тепловые свойства звезд .....	59
Температура в недрах Солнца .....	59
Источники энергии звезд .....	60
Яркость небесных светил .....	63
Эволюция звезд .....	66
Протозвезды и коричневые карлики .....	66
Нейтронные звезды и их свойства .....	67
Астрономические объекты — источники гравитационных волн .....	69
Особенности гравитационного взаимодействия .....	72
Земля как детектор гравитационных волн .....	72
Космические источники гравитационных волн .....	73
<i>Литература</i> .....	74

# **А**СТРОНОМИЯ

10—11 КЛАССЫ

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ПО ШКОЛЬНОМУ КУРСУ**



*Учебно-методическое пособие  
для учителей физики и астрономии*

Редактор *Н. Ю. Андреева*  
Компьютерная верстка *О. Н. Барабаш*

*В оформлении обложки использована фотография,  
полученная А. Ф. Беленовым 22 февраля 2010 года  
в результате наблюдений взаимодействия галактик  
с помощью робота-телескопа Фолкеса (Гавайи, США)*

Оригинал-макет подписан в печать 04.09.2019 г.  
Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Бумага офсетная. Гарнитура «Times ET».  
Печать офсетная. Усл.-печ. л. 4,65. Тираж 100 экз. Заказ 2566.

Нижегородский институт развития образования,  
603122, Н. Новгород, ул. Ванеева, 203.  
[www.niro.nnov.ru](http://www.niro.nnov.ru)

Отпечатано в издательском центре учебной  
и учебно-методической литературы ГБОУ ДПО НИРО





# АСТРОНОМИЯ

Дополнительные  
материалы  
к школьному курсу



10–11 классы

