

П. Бергман

Загадка гравитации

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 50
ББК 22
П11

П11 **П. Бергман**
Загадка гравитации / П. Бергман – М.: Книга по Требованию, 2013. – 216 с.

ISBN 978-5-458-29404-1

Мне было очень приятно узнать, что моя книга, излагающая теорию тяготения, вместе с последними достижениями космологии и астрономии, углубляющими наше понимание природы тяготения, переведена на русский язык и станет доступной советским читателям. Цель моей книги изложена в предисловии к английскому изданию, воспроизведенному в русском переводе, и я не стану повторяться. Открытия в астрономии в наши дни следуют одно за другим в быстром темпе, и уже после выхода английского издания этой книги (март 1968 г.) стали известны новые экзотические объекты — пульсары. Естественно, что о них не было речи в английском издании; я думаю, что писать о них в книге для неспециалистов еще рано. В. А. Угаров, выполнивший перевод книги на русский язык, исправил отдельные неточности английского оригинала и внес отдельные изменения в «Литературу для дальнейшего чтения», указав некоторые книги на русском языке. Я хотел бы выразить ему и академику В. Л. Гинзбургу, принявшему участие в организации русского издания, свою искреннюю благодарность. П. Бергман

ISBN 978-5-458-29404-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Предисловие автора к английскому изданию

В течение последних пятидесяти лет теория тяготения Эйнштейна, которую часто называют «общей теорией относительности», воспринималась всеми как логически наиболее удовлетворительная теория, охватывающая все то, что нам известно о тяготении. Как физики, так и философы обсуждали следствия общей теории относительности, касающиеся наших представлений о пространстве и времени и природе физической Вселенной. Как физики, так и философы пытались сделать общую теорию относительности доступной широкой публике, но даже тридцать лет спустя после ее выхода «Эволюция физики»*) написанная Эйнштейном и Инфельдом, остается классическим научным сочинением, предназначенным для неспециалистов.

В предлагаемой вниманию читателя книге я пытался дать свежее изложение общей теории относительности. Новая техника астрономических наблюдений необыкновенно увеличила возможности человека для проникновения в глубины Вселенной. Астроном старого времени наблюдал в неземные объекты только через толщу атмосферы и только в лучах видимого света, вооруженный, естественно, телескопами и спектроскопами. Современный астроном имеет возможность поднимать свои инструменты над земной атмосферой; он может использовать радиоизлучение, исходящее от небесных объектов, космические лучи и рентгеновские лучи. Новая техника уже принесла свои плоды — квазизвездные источники (квазары) и рентгеновские источники, большинство из которых до сих пор не отождествлено с видимыми объектами. Уже сами по себе эти экзотические объекты представляют значительный интерес, но вместе с тем есть надежды, что их исследование в конце концов даст существенный вклад в наше понимание строения и истории развития Вселенной.

Именно появление этих новых горизонтов вселило в меня уверенность в том, что неспециалисты нуждаются во введении в общую теорию относительности, написанном по-новому, потому что общая теория относительности представляет собой один из подлинно фундаментальных подходов к сокровенной природе физической Вселенной. В этой книге я пытался познакомить читателя с принципиальными основами как ньютоновской, так и эйнштейновской теории тяготения, избегая введения технического

*) А. Эйнштейн, Л. Инфельд, *Эволюция физики*, изд. третье, исправленное, «Наука», 1965. (Прим. перев.)

аппарата математики, неизбежного на рабочем уровне рассмотрения. Понимание общей теории относительности требует предварительного ознакомления с идеями специальной теории относительности (которая сама по себе не имеет отношения к гравитации); поэтому первая часть книги посвящена в основном специальной теории относительности.

Мне хотелось изложить теорию относительности как конструктивный ответ на все те вопросы, которые встают перед нами в связи с известными фактами, касающимися тяготения. В заключительных главах книги я хотел высказать свои соображения о том, как может развиваться теория в ближайшие десятилетия. Физики умеют предсказывать будущее ничем не лучше, чем историки, и я вполне отдаю себе отчет в том, что совсем не исключено, что физика будет развиваться совсем не так, как я это себе представляю. Я хотел подчеркнуть, что даже «точные науки» не способны дать в настоящее время исчерпывающую картину; очень мало надежд на то, что исчерпывающие ответы будут получены и в ближайшем будущем. Но если полная картина еще неясна, это не мешает нам последовательно продвигаться вперед, расширяя наше понимание природы. Напротив, продвигаясь в области знания, недоступные нашим предшественникам, мы раздвигаем ощутимые границы нашего познания. Деятельность, успех которой не может принести людям вред, а каждый шаг вперед может оказаться триумфом всего человечества, не может никого оставить равнодушным.

Введение. Значение теории гравитации

Все весомые тела взаимно испытывают тяготение, эта сила обуславливает движение планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет. Теория гравитации — теория тяготения, *) — созданная Ньютоном, стояла у колыбели современной точной науки. Другая теория гравитации, разработанная Эйнштейном, является величайшим достижением теоретической физики двадцатого века. В течение столетий и даже тысячелетий развития человеческого общества люди наблюдали явление взаимного притяжения тел и измеряли его величину; они пытались поставить это явление себе на службу, превзойти его влияние и, наконец, уже в самое последнее время рассчитывать его с чрезвычайной точностью во время первых, не совсем уверенных шагов в глубины Вселенной.

Пытливый ум человека в своих непрерывных устремлениях к познанию и пониманию окружающей природы требует мобилизации всех физических и интеллектуальных сил человечества и заставляет непрерывно их совершенствовать, чтобы, с одной стороны, защитить себя от окружающей природы, а с другой — взять ее под свой контроль. Последовательное исследование природы привело к возникновению различных отраслей естествознания, в том числе и физики. Небесполезно попытаться дать формальное разграничение области применения той или иной частной науки. «Физика — это то, чем занимаются физики»; то же самое можно сказать о химии, биологии, астрономии и об остальных естественных науках. Стремясь понять поведение вещества, физики узнали, что оно состоит из атомов и молекул и что поведение конкретных веществ, например кристаллических тел или газов, можно

*) В русской литературе слова «тяготение» и «гравитация» практически равноправны. Пользоваться только одним из этих терминов при переводе не удается. Но в этом и нет особой необходимости (*Прим. перев.*)

понять, рассматривая движение и взаимодействие входящих в их состав атомов. В свою очередь атомы представляют собой сложные системы, состоящие из ядер и отрицательно заряженных частиц — *электронов*. И, наконец, атомные ядра образуются кирпичиками двух сортов — *протонами*, обладающими положительным зарядом, и *нейтронами*, у которых заряда вообще нет.

Необозримая сложность окружающих нас тел обусловлена прежде всего такой многоступенчатой структурой, конечные элементы которой — элементарные частицы — обладают сравнительно небольшим числом видов взаимодействия. Но эти виды взаимодействия резко отличаются по своей силе. Частицы, образующие атомные ядра, связаны между собой самыми могучими из всех известных нам сил; для того чтобы отделить эти частицы друг от друга, необходимо затратить колоссальное количество энергии. Такие энергии могут быть получены в специальных устройствах, мощность которого исчисляется миллионами и миллиардами вольт *). Электроны в атоме связаны с ядром электромагнитными силами; достаточно сообщить им весьма скромную энергию в несколько вольт — энергиями такой величины, как правило, характеризуются химические реакции, — как электроны уже отделяются от ядра. Если говорить об элементарных частицах и атомах, то для них самым слабым взаимодействием является гравитационное взаимодействие **).

Чтобы составить себе представление об относительной величине электрических и гравитационных сил, рассмотрим взаимодействие между двумя электронами, теми самыми частицами, движение которых создает ток в электрических цепях и батареях.

Для того чтобы сила притяжения двух электронов, расположенных на расстоянии в один сантиметр друг от друга, за счет их гравитационного взаимодействия стала бы равна силе отталкивания между ними за счет электрического взаимодействия, придется раздвинуть электроны на расстояние порядка пятидесяти световых лет, что, грубо говоря, превышает в десять раз расстояние между

*) Читателя не должно удивлять, что энергия выражается в вольтах. Здесь подразумевается *электрон-вольт* — единица энергии, равная $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг. (Прим. перев.)

**) То есть то взаимодействие, которое у макроскопических тел мы называем всемирным тяготением. (Прим. перев.)

звездами, расположенными по соседству с нами, и составляет около 10^{15} км (см. единицы в Дополнении 6).

При сопоставлении с взаимодействием элементарных частиц гравитационные силы настолько слабы, что это трудно себе представить. Тем не менее они и только они полностью регулируют движение небесных тел. Это происходит потому, что тяготение сочетает в себе две особенности, из-за которых его действие усиливается, когда мы переходим к крупным телам. В отличие от сил, действующих внутри атомных ядер и простирающих свое влияние лишь на расстояние порядка размера атома, силы гравитационного притяжения ощутимы и на больших удалениях от создающих их тел. Кроме того, если электрические силы, действующие внутри атомов и между ними, могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания и во всех больших электрически нейтральных телах имеют тенденцию компенсироваться, гравитационные силы — это всегда силы притяжения; это означает, что все тела всегда притягиваются друг к другу. Именно поэтому и оказывается, что только гравитационные силы и действия, вызываемые ими, играют роль для определения орбит, по которым движутся вокруг Солнца планеты, входящие в нашу солнечную систему.

Небесные тела движутся в глубоком вакууме мирового пространства в условиях, когда на них не действуют усложняющие движение тел многочисленные факторы, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Небесные тела не испытывают ни трения (тогда как все тела на Земле испытывают трение), ни влияния сопротивления атмосферы (которое на Земле действует на все движущиеся тела). Взаимное влияние небесных тел проявляется на очень большом удалении друг от друга. Эти причины и обусловили тот факт, что динамика небесных тел была понята на самой ранней стадии развития современной науки. Имея предшественниками двух блестящих астрономов — Галилея и Кеплера, подготовивших своими трудами почву для новых открытий, Ньютон сумел придумать целостную теорию и придать ей математическую форму. Его теория вполне удовлетворила желание людей объяснить рациональным путем видимые траектории небесных тел и дала возможность астрономам с высокой степенью точности предсказывать положения небесных тел в будущем.

Усовершенствование техники наблюдений и нарастающие возможности вычислительной техники делали с каждым годом ньютоновскую теорию тяготения все более успешной. Так продолжалось около трехсот лет. Работы Ньютона являлись тем стандартом, по которому оценивались значение и успех тех или иных физических теорий. Около пятидесяти лет назад творение Ньютона было подправлено и отчасти заменено новой теорией тяготения. Эта новая теория была создана Эйнштейном и называлась общей теорией относительности. Новая теория тяготения понадобилась не потому, что ньютоновская теория тяготения оказалась вдруг несостоятельной, а потому что возникли противоречия между ней и требованиями электромагнитной теории. Эти противоречия были подробно исследованы Эйнштейном, когда он создавал специальную теорию относительности.

Хотя общая теория относительности дала объяснение лишь очень небольшому числу расхождений между данными астрономических наблюдений и ньютоновской теорией, ее основной вклад в современную науку состоит в том, что она произвела подлинную революцию в наших представлениях о пространстве и времени, революцию, которая все еще не завершена. Сразу же после того, как теория Эйнштейна была опубликована, а это произошло в 1916 г., она привлекла к себе всеобщее внимание. Особенное усиление интереса произошло тогда, когда астрономические наблюдения как будто подтвердили справедливость основных положений Эйнштейна. Затем разработка общей теории относительности активно производилась лишь очень немногочисленной группой физиков и математиков, сохранивших веру в возможности новой теории. Эти люди продолжали исследовать и разрабатывать следствия теории. Так продолжалось несколько десятилетий. С 1960 г. число лиц, активно работающих в области общей теории относительности, быстро возрастает. Новая вспышка интереса к теории связана с осознанием идейной мощи теории, с пониманием ее возможностей при применении в других областях физики, с возможностями, открывающимися перед теорией в связи с новыми экспериментальными результатами и новыми данными наблюдений. Не последнюю роль среди этих причин играет и возможное значение общей теории относительности для космических исследований и космических путешествий.

I. Ньютоновская физика и специальная теория относительности

1. Предшественники Ньютона

Из самых древних исторических записей, дошедших до нас, следует, что людям давно было известно о небольшой группе небесных объектов, которые передвигаются по небу совсем не так, как остальные звезды, перемещающиеся по периодически повторяющимся орбитам как единое целое. Не считая Солнца и Луны, двигались по своим собственным орбитам планеты Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Движение этих небесных тел вызывало живой интерес у мореплавателей и составителей календарей; планеты связывались с религиозными и мистическими идеями, известны попытки построить схемы для предсказания их движения. Согласно воззрениям александрийского астронома Клавдия Птолемея (II век) Земля находится в центре Вселенной. До сих пор, пока придерживались схемы Птолемея, видимое движение планет по небу рассматривалось как истинные орбиты планет; объяснение движения планет по наблюдаемым орбитам требовало участия сфер, приводимых во вращение зубчатыми передачами — шестеренками, для того чтобы получить наблюдаемые узлы и петли.

В XVII в. немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571—1630) провел тщательнейшую обработку наблюдений датского астронома Тихо Браге (1546—1601), исходя из представлений Николая Коперника (1473—1543). Польский астроном утверждал, что скорее Солнце, а не Земля является центром, вокруг которого движутся планеты. Кеплеру удалось показать, что планеты движутся по эллиптическим орбитам и что Солнце находится в одном из *фокусов* такого *эллипса* (рис. 1). Движение всех планет происходит таким образом, что прямая, соединяющая Солнце с планетой, описывает равные

площади за равные промежутки времени. Планета, изображенная на рис. 2, проходит путь от точки *C* к *D* за то же самое время, что и путь от *A* к *B*. Наконец, периоды обращения различных планет пропорциональны корню квадратному из наибольшего диаметра каждой орбиты, возведенному в третью степень. На рис. 3 на графике

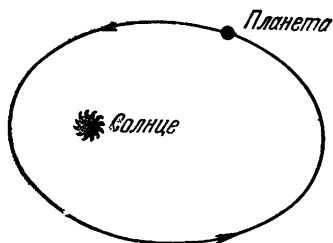


Рис. 1. Орбита планеты; в фокусе эллипса — Солнце.

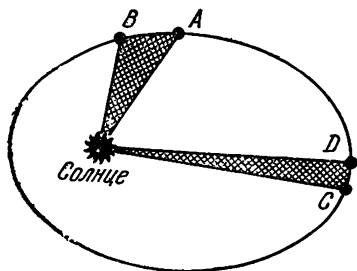


Рис. 2. Закон площадей.

изображен этот закон. На обеих осях — наибольших диаметров и периодов обращения — величины отложены в логарифмическом масштабе, чтобы на графике уместились все нужные данные: от периода обращения Меркурия, равного 88 дням, до Плутона — 91 000 дней. Прямая линия соответствует закону $3/2$. Данные, относящиеся к отдельным планетам, указаны черными кружками.

Законы, открытые Кеплером, позволили Ньютону сформулировать законы механики вообще и закон всемирного тяготения в частности. Мы едва ли в состоянии оценить в полной мере гений английского физика и математика Исаака Ньютона (1642—1717). Он смог превратить законы Кеплера во всеобъемлющую физическую теорию только потому, что сумел создать необходимый математический аппарат: Ньютон изобрел *дифференциальное* и *интегральное исчисление*, важнейшую математическую технику, необходимую для обращения с переменными величинами, такими, например, как перемещение тел с течением времени. С помощью аппарата дифференциального исчисления он сумел из законов Кеплера, найденных на основе наблюдений, получить основные принципы движения, которые справедливы в лю-

бой момент времени и заставляют планеты двигаться по замкнутым орбитам.

Если скорость движения, или просто *скорость* планеты, известна в любой момент времени, то с помощью дифференциального исчисления можно подсчитать в каждый момент времени ту скорость, с которой изменяется сама скорость, т. е. *ускорение*. Обратно, с помощью интегрального исчисления, зная скорость планеты, можно вычислить расстояние, проходимое планетой за любой заданный промежуток времени. Ньютон понял, что закон Кеплера, утверждающий, что прямая, соединяющая планету и Солнце, описывает равные площади за равные промежутки времени, указывает на то, что любое изменение скорости планеты может быть направлено только прямо к Солнцу, но вовсе не под прямым углом к этому направлению (см. Дополнение 1).

Ньютон пришел к трем выводам, один из которых был уже предугадан итальянским ученым Галилео Галилеем (1564—1642); два других принадлежат полностью Ньютону. Согласно первому из них влияние Солнца заставляет планеты непрерывным образом изменять свою скорость и это изменение скорости — ускорение (куда в большей степени, чем сама скорость, положение частицы или вся траектория в целом) — должно подчиняться сравнительно простым законам. В этом отношении Ньютон преодолел средневековые представления о том, что всякое тело занимает собственное *положение* во Вселенной, а действие других тел вызывает *смещение*. Согласно представлениям Ньютона тело, на которое не действуют другие тела, будет продолжать двигаться со скоростью, которую оно приобрело раньше; результатом действия других тел на данное тело будет изменение скорости тела, т. е. ускорение.

Второй вывод, о котором уже шла речь, следовал из закона равных площадей Кеплера. Ньютон понял, что сила, действующая со стороны Солнца на любую из пла-

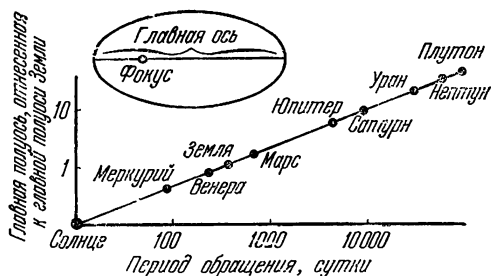


Рис. 3. Третий закон Кеплера.

нет, направлена к Солнцу и что эта сила — *сила притяжения*. Это хорошо видно на рис. 4. Когда планета переходит из положения P_1 в положение P_2 , ее скорость меняется от значения v_1 до значения v_2 . Приращение скорости $\Delta v = v_2 - v_1$ направлено прямо к источнику силы, к Солнцу. Надо помнить, что скорости v_1 и

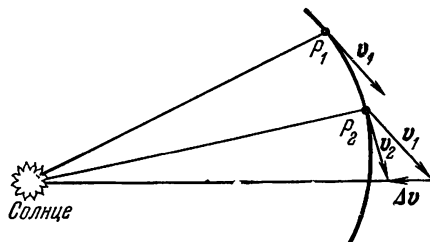


Рис. 4. Гравитационные силы — силы притяжения.

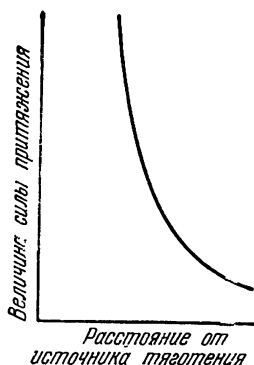


Рис. 5. Гравитационные силы убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между телами.

v_2 представляют собой *векторы* (величины, обладающие направлением). Приращение Δv представляет собой также вектор, идущий от конца вектора (стрелки) v_1 к концу стрелки v_2 . Начала векторов v_1 и v_2 сведены в одну точку.

Наконец, форма орбит, по которым движутся планеты, и закон $3/2$, определяющий периоды движения планет по орбитам, привели Ньютона к заключению о том, что сила притяжения между двумя телами зависит от расстояния между этими телами; Ньютон установил, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами (рис. 5). Если измерить силу взаимного тяготения двух тел, отстоящих друг от друга на расстоянии в миллион километров, и затем еще раз измерить такую же силу, если тела поместить на удалении в два миллиона километров, то окажется, что на большем удалении друг от друга сила уменьшится в четыре раза по сравнению с ее значением при первом измерении (см. Дополнение 2).

Во времена Ньютона лишь два типа сил могли быть исследованы количественно. Одной из этих сил была сила тяжести; другой тип сил — это силы тяги или толка-