

Как работает Вселенная

Введение в современную космологию

С.Л. Парновский

Как работает Вселенная

Введение в современную космологию



ТРАЕКТОРИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва
2018

УДК 524.8
ББК 22.632
П18

Научный редактор Анатолий Засов
Редактор Антон Никольский

Парновский С. Л.

П18 Как работает Вселенная: Введение в современную космологию. — М. : Альпина нон-фикшн, 2018. — 277 с.

ISBN 978-5-91671-802-7

Эта книга посвящена космологии — науке, недавно отпраздновавшей свое столетие. Она объясняет, почему мы уверены, что у Вселенной есть начало, где и когда произошел Большой взрыв, что означает разбегание галактик, как образовалось все, что нас окружает, от атомов до галактик, каково будущее Вселенной, существуют ли миры с другими физическими законами, что такое черные дыры и многое другое. Подробно рассказывается про то, что нам известно и что неизвестно про две таинственные сущности, которые вместе составляют более 95% содержания Вселенной — темную материю и темную энергию. Кроме того, показаны физические основы общей теории относительности и предсказанные ею эффекты.

Книга ориентирована на широкий круг читателей, но некоторые ее разделы, в которых излагаются элементы нерелятивистской космологии, требуют знания математики на уровне начальных курсов университета. Эту часть можно рассматривать как своеобразный учебник, в котором основные космологические решения получены без использования математического аппарата общей теории относительности.

УДК 524.8
ББК 22.632

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжнова).



ТРАЕКТОРИЯ

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traectoriafdn.ru) создан в 2015 г. Программы Фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу lib@alpinabook.ru

© Парновский С., 2017
© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

ISBN 978-5-91671-802-7

Оглавление

Предисловие	9
Глава 1. Законы Вселенной	
1.1. Истоки космологии	11
1.2. Принципы общей теории относительности	16
1.2.1. Прецессия перигелия	16
1.2.2. Отклонение света	18
1.2.3. Гравитационное красное смещение	19
1.2.4. Другие эффекты и проверки	22
1.2.5. Выделенная система отсчета	23
1.2.6. Гравитация, инерция и приливные силы	26
1.2.7. Лунные приливы и отливы	29
1.2.8. Пространство, время и пространство-время	32
1.2.9. Искривленное пространство-время	37
1.3. Сколько весит свет?	38
1.3.1. Барионная материя	40
1.3.2. Излучение	42
1.3.3. Темная энергия и антигравитация	42
Глава 2. Расширяющаяся Вселенная	
2.1. Статическая Вселенная Эйнштейна	45
2.2. Расширение Вселенной и красное смещение	47
2.2.1. Другие галактики и их разбегание	47
2.2.2. Расширение	49
2.2.3. Красное смещение	52
2.3. Закон Хаббла*	54

2.4. Модели Фридмана	58
2.4.1. Стрела времени	64
2.5. Геометрия Вселенной	67
2.6. Масштабный фактор	72
2.6.1. Параметр замедления	73
2.7. Нерелятивистские решения Фридмана *	74
2.7.1. Космологическая эволюция без космологической постоянной*	74
2.7.2. Исследование решений *	79
2.7.3. Параметр замедления*	83
2.7.4. Материя с ненулевым давлением в расширяющейся Вселенной*	85
2.8. Современная модификация модели	87
2.8.1. Космологическая постоянная наносит ответный удар	87
2.8.2. Стандартная космологическая модель	89
2.9. Расстояния в астрономии	94

Глава 3. Ранняя Вселенная

3.1. Большой взрыв	97
3.2. Реликтовое излучение: эхо Большого взрыва	104
3.2.1. Открытие реликтового излучения	105
3.2.2. Анизотропия реликтового излучения	107
3.2.3. Космология выходит в космос	109
3.2.4. Наземные наблюдения реликтового излучения	113
3.2.5. Спектр флуктуаций реликтового излучения	114
3.2.6. Сохранение энергии	117
3.2.7. Нездоровые сенсации	119
3.3. Эволюция ранней Вселенной*	122
3.4. Космологический горизонт	123
3.5. Расстояние до космологического горизонта*	126
3.6. Инфляционное расширение Вселенной	127

3.6.1. Модели инфляции	134
3.7. Поливерсум и антропный принцип	141
3.7.1. Кому во Вселенной жить хорошо?	146
3.7.2. Что же утверждает антропный принцип?	148
3.7.3. Пульсирующая Вселенная	153
3.8. На пути к таблице Менделеева	156
3.8.1. Первичный нуклеосинтез	156
3.8.2. Звездный нуклеосинтез	162
3.8.3. Проблема антиматерии	165

Глава 4. Темная материя

4.1. Революция приближается	169
4.2. Свидетельства существования темной материи	173
4.2.1. Вириальная масса	173
4.2.2. Кривые вращения галактик	175
4.2.3. Отношение масса — светимость	180
4.2.4. Слияния галактик	182
4.2.5. Космические потоки	184
4.2.6. Темпы роста флуктуаций плотности	187
4.2.7. Гравитационное линзирование	194
4.3. Из чего состоит темная материя?	199
4.4. Альтернативные модели	209

Глава 5. Темная энергия

5.1. Космологические свидетельства существования темной материи и темной энергии	211
5.1.1. Сверхновые типа Ia	215
5.1.2. Барийонные акустические колебания	220
5.1.3. Спектр флуктуаций реликтового излучения	222
5.2. Темная энергия	224
5.3. Время до Большого разрыва*	232
5.4. Другие виды материи	233

Глава 6. Черные дыры и другие экзотические объекты

6.1. Черные дыры	235
6.1.1. Шварцшильдовские черные дыры	239
6.1.2. Черная дыра Райсснера — Нордстрёма	246
6.1.3. Вращающаяся черная дыра Керра	248
6.2. Голые сингулярности	251
6.3. Кротовые норы	253
Выводы	256

Приложение А

Космологическая эволюция	
с космологической постоянной*	261
А1. Решение де Ситтера*	262
А.2. Λ CDM-модель*	263
А.3. Плоская Λ CDM-модель*	267
Литература	274
Для дальнейшего чтения	275
Записи лекций	276

Предисловие

В книге описана история и современное состояние космологии — науки о Вселенной в целом. Она посвящена описаниям основных идей космологии: расширяющейся Вселенной, ее возникновению в ходе Большого взрыва, эволюции, характерным величинам и т. д. Мы попытались ответить на многие часто задаваемые вопросы на эти темы. Мы подробно рассказываем про две загадки современной науки, имеющие непосредственное отношение к космологии, — темную материю и темную энергию.

Эта книга отличается от большинства научно-популярных книг. Золотое правило их написания гласит: каждая формула в тексте уполонививает число потенциальных читателей. Тем не менее мы рискнули и используем уравнения, но только там, где они необходимы. Мы постарались свести количество формул до минимума и сделать их настолько простыми, насколько это возможно, понятными для всех, кто изучал математику или физику в институте. Формулы собраны в особые разделы, отмеченные в оглавлении звездочками как «Расширенный материал», и они должны рассматриваться именно так. Кроме того, в тексте они отмечены изображением Альберта Эйнштейна.



Если вы их пропустите, это не ухудшит понимание материала, однако в основном тексте есть несколько ссылок на эти разделы, поэтому советуем хотя бы просмотреть их. Каждая

такая часть начинается с краткого резюме. Эти разделы составляют своеобразный простой учебник по космологии для тех, кто не знаком с математическим аппаратом общей теории относительности (далее ОТО), но хотел бы понять, откуда берутся законы космологии.

Остальная часть книги рассчитана на широкую аудиторию, хотя и предполагает некоторый минимальный уровень знания математики и физики. Тем, у кого нет даже базовых знаний в области астрономии, мы настоятельно рекомендуем прочитать несколько популярных книг по астрономии. В качестве первой мы предлагаем вышедшую в 1969 г. работу Айзека Азимова «Вселенная: от плоской Земли до квазаров», которая, впрочем, несколько устарела, но это с лихвой компенсируется легкостью и доходчивостью текста. Другие предложения для чтения перечислены в конце раздела «Выводы».

Мы старались излагать материал без упрощений, собственных научно-популярной литературе, и объяснять, на каких основаниях делаются те или иные предположения или оценки в космологии. В тех вопросах, где современная космология сталкивается с проблемами, мы не только их не скрывали, но, наоборот, уделяли им повышенное внимание. То же самое относится к ситуациям, относительно которых у ученых нет однозначного мнения. Мы не пытались выдавать гипотезы за устоявшиеся теории, как это нередко бывает. В некотором смысле эта книга находится где-то между научно-популярной книгой и учебником, являясь своего рода мостом через ущелье, отделяющее популярную науку от истинной науки.

Книга основана на монографии «Введение в современную космологию» [Парновский, Парновский, 2013], которая была хорошо принята гораздо более широкой аудиторией, чем мы ожидали. Мы переработали материал с учетом вопросов и пожеланий читателей и попытались объяснить все научные термины, которые используем.

Глава 1

Законы Вселенной

1.1. Истоки космологии

Эта книга посвящена космологии — науке о структуре и эволюции Вселенной в целом, ее прошлом и будущем. Космология — не просто молодая, а очень молодая наука; ей исполнилось всего 100 лет. Ее появление связано с публикацией в 1917 г. работы Альберта Эйнштейна «*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*»*. В ней впервые законы физики были применены ко всей Вселенной сразу. Конкретно речь шла об уравнениях недавно открытой Эйнштейном ОТО.

В принципе ничто не мешало этой науке появиться на 250 лет раньше, сразу после открытия Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения. Физики XVII–XIX вв. рассуждали о бесконечной Вселенной, заполненной звездами, вокруг которых обращаются планеты. Такая Вселенная существовала вечно и все, что нужно было для предсказания ее будущего состояния, — это знание законов механики и текущего положения всех объектов. Однако сила всемирного тяготения в классической механике имеет одну особенность: это всегда сила притяжения, которая никогда не становится силой отталкивания.

* Русский перевод опубликован под названием «Вопросы космологии и общая теория относительности» в книге: Эйнштейн А. Собрание сочинений в 4-х т. Т. 1. — М.: Наука, 1965. С. 601–612.

Поэтому отдельные звезды в бесконечной Вселенной под действием силы взаимного притяжения должны были бы в конце концов собраться вместе. Вопрос о взаимном притяжении решался с помощью простого, но неверного рассуждения: раз Вселенная бесконечна, то на каждую частицу действует сила притяжения бесконечного числа других частиц. Если считать, что частицы заполняют Вселенную с постоянной плотностью, можно сделать вывод, что суммарная сила компенсируется, следовательно, гравитационным притяжением при рассмотрении динамики Вселенной в целом можно пренебречь.

Эта идея подобна попыткам поставить карандаш на кончик грифеля. В обоих случаях причиной проблем является неустойчивость равновесия. Даже если мы как-то умудримся поставить карандаш вертикально на острый конец грифеля, то любое сколь угодно малое отклонение от вертикали вызывает момент силы, отклоняющий карандаш в том же направлении, увеличивающий отклонение и полностью нарушающий исходное равновесие. В технике это называется положительной обратной связью.

Еще более близкая аналогия связана с водой в перевернутом стакане. Многие знакомы с классическим опытом, в котором стакан с водой, накрытый открыткой или плотной картонкой, переворачивают верх дном и вода удерживается в стакане атмосферным давлением, эквивалентным давлению 10,3 м воды. Но немногие задумываются, зачем для этого опыта необходима картонка. Причина связана с неустойчивостью Рэля — Тейлора: когда более плотная жидкость (вода) помещена над менее плотной (воздух*), любое отклонение поверхности от плоской будет экспоненциально расти со временем, разрушая границу очень быстро. Процесс обычно называется выливанием жидкости. Вот почему для демонстрации необходима картонка: она никак не влияет на давление воздуха, не создает никаких сил,

* В гидродинамике газы часто тоже называют жидкостями.

но фиксирует форму границы раздела между водой и воздухом, препятствуя развитию неустойчивости Рэлея — Тейлора.

Аналогично, в неустойчивой Вселенной случайным образом образуются области повышенной плотности, к которым начинают двигаться соседние звезды и области пониженной плотности, называемые войдами. Заметим, что взаимное притяжение звезд, заполняющих бесконечную Вселенную, приводит не только к росту возмущений плотности, но и к ускоренному сжатию всей Вселенной, т. е. к уменьшению расстояний между звездами.

Естественно, ученым было известно, что отклонения от однородного распределения плотности материи приводили к тому, что неоднородности начинали нарастать со временем, но в тот период этот механизм рассматривался только на масштабах, не превышающих размеры Солнечной системы. Согласно гипотезе Лапласа, планеты Солнечной системы образовались из исходной газопылевой туманности именно под влиянием взаимного гравитационного притяжения. К большим масштабам подобные рассуждения не применяли. В рассматриваемой картине мира рост неоднородностей плотности материи приводил к образованию планет, которые не падали на Солнце только потому, что обращались вокруг него. На расстояниях, сравнимых с расстоянием до ближайших звезд, Вселенная уже рассматривалась как нечто однородное, и считалось, что сила притяжения какого-либо тела к разным звездам полностью компенсируется.

Эту радужную картину нарушал так называемый парадокс Ольберса, сформулированный в 1823 г. немецким астрономом-любителем Хайнрихом Ольберсом, врачом по профессии. Суть его состояла в том, что в бесконечной неизменной Вселенной вместо ночного неба мы видели бы раскаленную небесную сферу, светящуюся, как поверхность Солнца. Объясняется это следующим образом: если мы разделим Вселенную на концентрические сферические оболочки постоянной тол-

щины с Землей в центре, то поток света, падающий на Землю от каждой из оболочек, будет одинаков, поскольку число звезд в них будет расти пропорционально квадрату расстояния, что скомпенсирует аналогичный множитель в формуле для освещенности. Поскольку число слоев бесконечно, то и общая сумма будет бесконечна. Единственная причина, по которой освещенность будет все же конечной, это то, что более близкие звезды будут закрывать собой далекие. Другими словами, в каком бы направлении мы ни посмотрели, рано или поздно луч нашего зрения должен наткнуться на какую-то звезду.

Тем не менее каждый из нас прекрасно знает, что ночью наблюдается совсем другая картина. В качестве простого решения парадокса Ольберса предлагали вариант, при котором свет далеких звезд поглощается облаками межзвездной пыли, но это решение звучит убедительно только для тех, кто не знает физику. За продолжительное время эта пыль, поглощая излучение, нагрелась бы до температуры окружающих звезд и сама стала бы светящимся объектом.

Со временем прогресс в астрономии привел к модели Вселенной, предложенной Уильямом Гершелем в конце XVIII в. В ней звезды не заполняли всю Вселенную, а образовывали единственное звездное скопление, называемое Галактикой и имеющее линзовидную форму. В связи с этим возник вопрос: почему звезды не падают на центр Галактики? Ответ был столь же прост, как и ответ на вопрос, почему планеты не падают на Солнце: они обращаются вокруг него. Точно так же и отдельные звезды Галактики обращаются вокруг ее центра. Движение Солнца относительно центра Галактики было обнаружено все тем же Гершелем в 1783 г. С незначительными уточнениями эта картина мироздания считалась общепринятой до начала XX в. Идея Галактики решала парадокс Ольберса, поскольку материя теперь занимала конечный объем во Вселенной. Однако, после того как были открыты другие галактики, парадокс Ольберса опять стал актуальным.

Таким образом, космология, которая потенциально могла появиться еще в конце XVII в., появилась лишь в начале XX в. и недавно отпраздновала свой столетний юбилей. Возникновение космологии связано с одним удивительным обстоятельством: обычно новые науки появляются в простейшей постановке и затем, в процессе своего развития, переходят к более сложным моделям, расчетам и используют все более современные физические теории. Например, физика твердого тела столетиями получала результаты, основываясь на классической физике, и только потом стала успешно использовать квантовую механику.

Космология же появилась сразу в своем самом сложном варианте — в виде релятивистской космологии, основанной на ОТО. И лишь спустя десятилетия космологи к немалому удивлению обнаружили, что можно рассматривать куда более простую нерелятивистскую космологию. Дело в том, что однородная Вселенная развивается одинаково во всех своих частях, и для изучения развития ее как целого достаточно изучить развитие небольшой области пространства, например 1 см^3 . А при изучении 1 см^3 уже не важны кривизна пространства-времени и другие сложные вопросы ОТО.

Но это справедливо только в случае однородной и изотропной Вселенной. В подобном мире нет избранного места или предпочтительного направления, каждая точка не может быть лучше или хуже, чем любая другая, и каждое направление не лучше или хуже любого другого. Эта идея известна как принцип Коперника. Хотя не все результаты релятивистской космологии могут быть получены в рамках нерелятивистской, но основные понятия выводятся довольно просто. Для их вывода, понимания и анализа достаточно знания физики на уровне младших курсов университета. Поэтому в книге в случаях, когда мы просто не могли отказать себе в желании написать некоторые формулы, мы ограничились нерелятивистской космологией.

Вопрос: Чем космология принципиально отличается от других наук?

Ответ: Тем, что она изучает уникальный, существующий в единственном экземпляре, изменяющийся во времени объект, частью которого мы являемся. В результате не может идти речи ни о повторяемости, ни о воспроизводимости, ни, тем более, об активных экспериментах. В связи с этим к космологическим теориям очень сложно применить критерий фальсифицируемости, выполнение которого требуется от любых научных теорий. Аналогичная ситуация встречается и в некоторых других научных дисциплинах, таких как история и эволюционная биология.

1.2. Принципы общей теории относительности

Появлению науки космологии предшествовало появление ОТО, окончательно сформулированной Эйнштейном в 1916 г. Эта теория является одной из вершин современной физики. Так как ее идеи и терминология широко используются в космологии, мы решили описать основы ОТО, которые достаточно просты для понимания и могут быть объяснены без использования сложного математического аппарата. Мы начнем с трех классических эффектов ОТО.

1.2.1. Прецессия перигелия

Первый эффект был обнаружен астрономами еще задолго до появления ОТО. Это прецессия* перигелия** Меркурия, которая

* Прецессией перигелия называется весьма медленное вращение гелиоцентрической орбиты (орбиты вокруг Солнца) в ее плоскости.

** Перигелий — точка гелиоцентрической орбиты, которая ближе всего к Солнцу.

проявляется как вращение орбиты Меркурия как целого во- круг Солнца с очень малой угловой скоростью — менее 6 угло- вых секунд в год. Это было не первое обнаруженное отклоне- ние от простейших законов небесной механики с момента их открытия Иоганном Кеплером. Ранее, в середине XIX в., ана- логичное поведение орбиты Урана было успешно объяснено гравитационным влиянием неизвестной тогда планеты, позже получивший название Нептун.

Один из предсказателей существования Нептуна, Урбен Леверье, применил тот же подход к орбите Меркурия, предпо- ложив существование новой планеты Вулкан, которая должна быть расположена очень близко к Солнцу и скрываться на фо- не его света. После этого предсказания в течение нескольких десятилетий как профессиональные астрономы, так и астро- номы-любители сообщали о наблюдении прохождения этой гипотетической планеты по солнечному диску, но затем, после усовершенствования телескопов, эти сообщения были при- знаны ошибочными. Теперь мы знаем, что планеты Вулкан не существует, и это было известно почти наверняка еще 100 лет назад. Таким образом, вращение орбиты Меркурия надо было как-то объяснить.

ОТО не только объяснила прецессию перигелия Меркурия, но и обеспечила точное количественное согласие теории с на- блюдаемой скоростью прецессии. После дальнейшего улучше- ния точности наблюдений была обнаружена подобная прецес- сия перигелия Венеры, которая вместе с другими описанными ниже эффектами подтверждает правильность ОТО. В результа- те Международный астрономический союз (МАС) — высший мировой авторитет в астрономии — издал постановление об обязательном рассмотрении эффектов ОТО при точных расче- тах орбит небесных тел в Солнечной системе.

Еще более впечатляющее проявление прецессии, в данном случае периастра (точки орбиты, которая ближе всего к звез-

де), наблюдается в системах двойных пульсаров*. Два массивных тела в этом случае вращаются с периодом в несколько дней на небольшом расстоянии друг от друга. ОТО описывает их движение с точностью до 0,01%, при этом наблюдаются потери энергии из-за излучения гравитационных волн. За обнаружение таких систем Рассел Алан Халс и Джозеф Хотон Тейлор-младший получили Нобелевскую премию по физике за 1993 г.

1.2.2. Отклонение света

Второй эффект заключается в искривлении световых лучей в гравитационном поле массивных объектов. Это искривление само по себе не было неожиданностью и вполне объяснимо в рамках ньютоновской механики. Но предсказанный ОТО угол отклонения света был в два раза больше по сравнению с ньютоновским. Причина, по которой появился этот коэффициент, будет обсуждена ниже, в подразделе 1.3.2.

В то время явление было чисто умозрительным, но упомянутое различие углов отклонения позволяло узнать, какая из теорий правильно описывает этот эффект, и заставило астрономов измерить его величину. Для этого нужно было измерить положение звезды, свет которой распространялся вблизи Солнца и отклонялся в его гравитационном поле, смещая видимое положение звезды на небе. С современной точностью этот эффект можно измерить даже в перпендикулярном по отношению к Солнцу направлении, используя радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ), но в начале XX в. он мог быть измерен только на очень небольшом участке неба вокруг Солнца.

* Пульсар — сильно намагниченная вращающаяся нейтронная звезда, которая испускает пучок электромагнитного излучения в направлении, которое вращается вместе со звездой. Испущенное излучение может наблюдаться только тогда, когда луч направлен в сторону Земли и, таким образом, регистрируется в виде серии импульсов.

Это было сделано экспедицией сэра Артура Эддингтона, которая измерила положения звезд во время полного солнечного затмения 1919 г. Полное солнечное затмение было необходимо, так как в то время астрономы могли производить наблюдения только в видимом свете, и свет Солнца сделал бы невозможным наблюдения звезд возле его диска. Эддингтон и его коллеги проводили наблюдения в Бразилии и на западном побережье Африки. Сравнив фотографии неба вблизи Солнца во время затмения и той же области неба вдали от Солнца, они измерили угол отклонения, который соответствовал предсказанию Эйнштейна. Эти наблюдения все же были недостаточно точны, но ситуация существенно улучшилось после появления радиотелескопов.

Эффект отклонения света является основой для так называемого гравитационного линзирования, при котором наблюдаются несколько изображений одного и того же объекта. Оно активно изучается и даже используется в качестве инструмента для нестандартного наблюдения чрезвычайно удаленных объектов. Мы обсудим это в подразделе 4.2.7.

1.2.3. Гравитационное красное смещение

Третий эффект называется гравитационным красным смещением* и описывает разницу в скорости течения времени в точках с различными гравитационными потенциалами**. Гру-

* Красное смещение возникает при увеличении длины волны. Противоположный эффект называется синим смещением. Названия происходят от того, что красный свет имеет более длинные волны, чем синий свет, хотя оба термина применяются к любой области частот электромагнитного излучения, не обязательно видимого света.

** Гравитационный потенциал — это потенциальная энергия компактного тела в гравитационном поле в пересчете на единицу его массы. Именно эта величина определяет скорость течения времени в слабых гравитационных полях.

бо говоря, время течет быстрее на верхнем этаже здания, чем в его подвале. Это и является причиной изменения частоты. Пусть источник в подвале передает, скажем, 1000 сигналов в секунду. Они ловятся приемником на крыше, но для приемника секунды имеют другую продолжительность, так что в течение своей секунды он получает не 1000, а, например, 999 сигналов. Другими словами, частота в приемнике смещается относительно частоты источника.

Астрономы наблюдали гравитационное красное смещение в спектрах излучения белых карликов, в частности у Сириуса В, который приблизительно содержит массу Солнца в объеме Земли. В результате гравитационный потенциал на его поверхности значительно превосходит максимальные значения, наблюдаемые в Солнечной системе.

Этот эффект был также продемонстрирован в лабораторных условиях Робертом Паундом и Гленом Ребкой в 1959 г. Они построили свой эксперимент вокруг основополагающей идеи квантовой механики о том, что для возбуждения атома из основного состояния* он должен поглотить фотон с точно такой же энергией или длиной волны, какой возбужденный атом излучает при переходе в основное состояние**. Если что-то (в нашем случае гравитационное красное смещение) изменит пусть даже совсем незначительно энергию или длину волны фотона, пока тот перемещается от одного атома к другому, то фотон не будет поглощаться. Тем не менее он все еще может быть поглощен, если атом-приемник движется таким образом, что изменение длины волны из-за эффекта Допле-

* Основное состояние — состояние атома с минимальной энергией. Любое другое состояние, отличное от основного, называется возбужденным.

** Этому препятствует энергия отдачи атома, излучающего фотон, но в эксперименте она отсутствовала из-за использования открытого незадолго перед этими опытами эффекта Месбауэра.

ра* компенсирует изменение длины волны из-за гравитационного красного смещения.

Итак, Паунд и Ребка положили одну железную пластину в подвале, присоединили другую к конусу громкоговорителя на крыше и измерили фазу динамика, при которой гамма-поток, создаваемый возбужденными атомами железа в подвале, сильнее всего поглощается атомами железа на крыше. Это дало им возможность вычислить изменение энергии фотона из-за разницы в гравитационном потенциале или скорости течения времени на крыше и в подвале. Их результаты соответствовали предсказанию ОТО в пределах 10% погрешности.

Дальнейшая проверка этого эффекта была произведена в ходе эксперимента Gravity Probe A в 1976 г., когда на ракету был помещен водородный мазер, используемый в качестве чрезвычайно стабильного генератора частоты. Идентичный мазер покоился на земле. Этот эксперимент подтвердил существование и соответствие ОТО гравитационного красного смещения в пределах погрешности 0,01%. Сегодня гравитационное красное смещение обычно учитывается, когда требуются точные измерения времени: например, при использовании GPS и других навигационных спутников. Оно также принимается во внимание астрономами при определении земного времени, времени в геоцентрической системе координат и времени в барицентрических координатах, введенных МАС в 1991 г., которые представляют собой, соответственно, время

* Эффект Доплера — сдвиг частоты периодических сигналов, вызванный движением источника или приемника или их обоих и конечностью скорости распространения сигнала. Вопреки распространенному мнению это относится не только к волнам, но и к любым периодическим сигналам. Когда источник и приемник движутся по направлению друг к другу, частота, регистрируемая приемником, увеличивается, а когда они удаляются друг от друга, уменьшается.

на уровне моря, в центре Земли и в барицентре* Солнечной системы.

1.2.4. Другие эффекты и проверки

Эксперимент Gravity Probe A подтвердил также еще один важный эффект ОТО — принцип эквивалентности, в соответствии с которым объект ведет себя одинаково, независимо от того, равномерно ли он ускорен или помещен в однородное гравитационное поле.

С тех пор все предсказания ОТО были подтверждены экспериментально. Одним из наиболее широко известных предсказаний было существование черных дыр (см. раздел 6.1) — массивных компактных объектов, из которых не может вылететь ничто, даже свет. Несмотря на то что в течение достаточно долгого времени их косвенно наблюдали (например, путем отслеживания собственных движений близлежащих звезд), первое прямое наблюдение вспышки, исходящей из так называемого аккреционного диска**, окружающего черную дыру, было проведено в июне 2015 г. [Kimura et al., 2016].

Недавним подтвержденным предсказанием стало открытие гравитационных волн с помощью детектора Advanced LIGO в сентябре 2015 г. [Аббот и др., 2016a], подтвержденное в декабре 2015 г. [Аббот и др., 2016b] и завершившееся при-

* Барицентром называется общий центр масс гравитационно связанной системы.

** Аккреционным диском называется область вокруг звезды, черной дыры или другого массивного объекта, заполненная падающим вращающимся вокруг них веществом. Из-за гравитации эта материя разогревается и начинает излучать. Аккреционные диски черных дыр излучают рентгеновские лучи. Черную дыру, не имеющую аккреционного диска, невозможно увидеть в телескоп. Поэтому наблюдения явлений, связанных с этим диском, косвенно подтверждают и существование черных дыр.

суждением Нобелевской премии по физике за 2017 г. Райнеру Вайссу, Барри Баришу и Кипу Торну. Естественно, что экспериментальные проверки ОТО продолжаются со все более высокой точностью.

Теперь расскажем и о других принципах ОТО.

1.2.5. Выделенная система отсчета

Ньютоновская механика построена вокруг идеи инерциальной системы отсчета. Первый закон Ньютона справедлив только в таких системах. Инерциальная система связана с телом, которое не взаимодействует с остальной частью Вселенной. Возможно ли это? На любое тело можно воздействовать с помощью механических сил, таких как сила натяжения привязанной к телу веревки*, и четырех фундаментальных сил: электромагнитных, слабых**, сильных*** и гравитационных. Электромагнитные, слабые и сильные силы действуют лишь на некоторые из частиц, которые имеют ненулевые заряды соответствующего типа. Гравитационная сила, с другой стороны, является универсальной; она действует на все тела во Вселенной. Даже безмассовые частицы, такие как фотоны, подвержены силе гравитационного притяжения. Поэтому не

* Строго говоря, сила натяжения веревки представляет собой сложную комбинацию электромагнитных и сильных сил. Тем не менее объяснение этого увело бы нас в глубь квантовой механики, поэтому мы просим читателя принять это как данность.

** Слабое взаимодействие является одним из четырех фундаментальных взаимодействий (помимо электромагнитного, гравитационного и сильного), которое работает на субатомных масштабах и отвечает за радиоактивный распад. В настоящее время рассматривается вместе с электромагнитным взаимодействием как часть более общего электрослабого взаимодействия.

*** Сильное взаимодействие отвечает за удержание частиц атомных ядер вместе. Оно действует на очень малых масштабах около 10^{-15} м на элементарные частицы, называемые адронами, состоящие из кварков.

ясно, каким образом можно обеспечить инерциальную систему отсчета в присутствии гравитационного поля.

ОТО тоже выделяет некоторые системы отсчета, но, в отличие от ньютоновской механики, они не должны быть подвержены действию никаких сил, кроме гравитационных. В таких системах отсчета справедливы все физические законы, в том числе законы специальной теории относительности (СТО). Чтобы ускорить тело в такой системе, на него надо воздействовать с помощью любой внешней силы, кроме силы тяжести. Другими словами, это системы, в которых наблюдатель свободно падает. Проиллюстрируем это на двух простых примерах.

Человек спит в своей постели. Для вящей точности укажем, что кровать неподвижна относительно земли, т. е. ее географические координаты постоянны. С ньютоновской точки зрения человек находится в состоянии покоя в приблизительно инерциальной системе отсчета. Это не совсем инерциальная система, потому что этот человек вращается (вместе с его кроватью) вокруг центра Земли, вокруг Солнца (вместе с Землей), вокруг центра Млечного Пути (вместе с Солнечной системой), падает по направлению к скоплению в созвездии Дева (вместе с галактикой Млечный Путь), к Великому аттрактору (вместе со скоплением в Деве) и т. д.* Но давайте не будем слишком придирчивы и назовем эту систему инерциальной. Человек находится под воздействием двух основных сил (и множества незначительных): гравитационного притяжения Земли, известного как вес, а также силы давления со стороны кровати из-за сил упругости. Эти силы компенсируют друг друга, в результате чего человек находится в состоянии покоя.

Рассмотрим ту же ситуацию с точки зрения ОТО. В этом случае выделенная система довольно сильно отличается: это система отсчета свободно падающего наблюдателя. Человек,

* К сожалению, в наши дни довольно трудно найти подлинный покой.

1.2. Принципы общей теории относительности

который спит в постели, не пребывает в состоянии покоя в этой системе из-за силы давления со стороны кровати.

Второй случай — это космонавт на орбите вокруг Земли. С ньютоновской точки зрения его система никаким образом не выделенная, так как он находится под воздействием силы тяжести и его траектория искривлена. Это может быть описано двумя способами. В системе отсчета, связанной с Землей, гравитационная сила действует как центростремительная сила, в результате чего его траектория изгибается. В неинерциальной системе отсчета, связанной с космическим кораблем, сила тяготения компенсируется так называемой центробежной силой, что заставляет космонавта ощущать себя в состоянии невесомости.

Эта ситуация выглядит намного проще в рамках выделенной системы отсчета ОТО. На космонавта действует только сила тяжести, т. е. не действуют никакие негравитационные силы, и он, таким образом, покоится в данной системе отсчета. Космический корабль на орбите свободно падает на Землю, но постоянно промахивается из-за тангенциальной скорости*. Это основной принцип, который делает возможным полеты в космос.

Космонавт, покоясь в выделенной системе, испытывает невесомость. Тем не менее, если на него воздействовать некоторой негравитационной силой (пихнуть палкой, притянуть веревкой, дать космонавту достаточно сильный магнит и т. д.), этот космонавт будет двигаться, согласно второму закону Ньютона.

Проиллюстрируем силы, действующие в обоих подходах, на рис. 1.1 и 1.2.

* Тангенциальное направление является направлением в плоскости вращения, перпендикулярным радиусу. При применении к орбитальному движению это направление полета или противоположное (ретроградное).

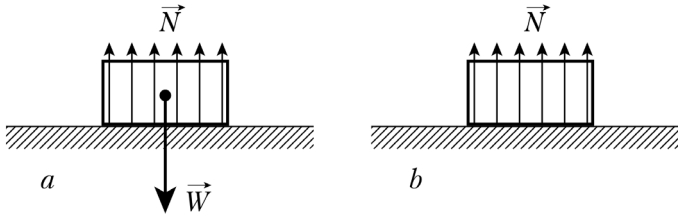


Рис. 1.1. Силы, действующие на тело, покоящееся на поверхности Земли, в ньютоновской инерциальной системе отсчета (а) и системе отсчета, выделенной в ОТО (б). Здесь N — это сила реакции опоры (она же сила давления) и W — сила тяжести (она же вес)

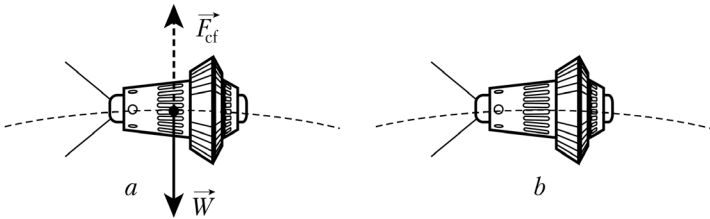


Рис. 1.2. Силы, действующие на космический корабль на орбите в ньютоновской инерциальной системе отсчета (а) и системе отсчета, выделенной в ОТО (б). Здесь W — сила тяжести, а F_{cf} — центробежная сила

1.2.6. Гравитация, инерция и приливные силы

Легко жить в мире с однородной силой тяжести. Ее просто подделать с помощью ускорения, например, ракеты или даже лифта. Внутри замкнутой ракеты или лифта никакие эксперименты не могут обнаружить различия между гравитацией и инерцией. Тем не менее этот трюк возможен только в фантастических книгах, например у Терри Пратчетта, но не в реальной жизни. В реальном мире гравитационное поле можно

считать однородным лишь на очень малых масштабах, таких как ваш дом. Проблема заключается в том, что на крупных масштабах гравитационное поле Земли гораздо больше похоже на поле точечной массы, чем на однородное поле, что проявляется в виде двух эффектов: уменьшении ускорения свободного падения по мере увеличения высоты и разницы в направлениях гравитационной силы в двух разных точках на поверхности Земли. В двух диаметрально противоположных точках на Земле, например в Великобритании и в Австралии, направления гравитационных сил почти противоположны. При меньших расстояниях, например между Китаем и Японией, гравитационные силы направлены под гораздо меньшим, но все же значительным углом между ними. Второй эффект может быть имитирован с помощью расширяющейся сферической оболочки, но было бы почти невозможно имитировать различие ускорений свободного падения у пола и у потолка.

В ОТО термин «гравитация» понимается, скорее, не как притяжение к некоторым массивным телам (это обеспечивается движением выделенной системы отсчета), а как небольшие различия в направлении и величине гравитационного поля в близких точках, называемые приливными силами. Название происходит от давно известного факта, что эти силы вызывают приливы в морях и океанах Земли.

Для иллюстрации рассмотрим свободно падающий лифт — пример, придуманный самим Эйнштейном из-за отсутствия ракет в то время — с семью почти невесомыми шарами, которые исходно неподвижны относительно лифта и друг друга. Один из шаров находится в центре масс, другой — ближе к потолку прямо над первым, третий — у пола прямо под ними, а остальные четыре — у стен на высоте первого, как показано на рис. 1.3. Мы предполагаем, что стенки лифта имеют незначительный вес и их единственное назначение — защита шаров от набегающего потока воздуха и поддержка жесткости конструкции.

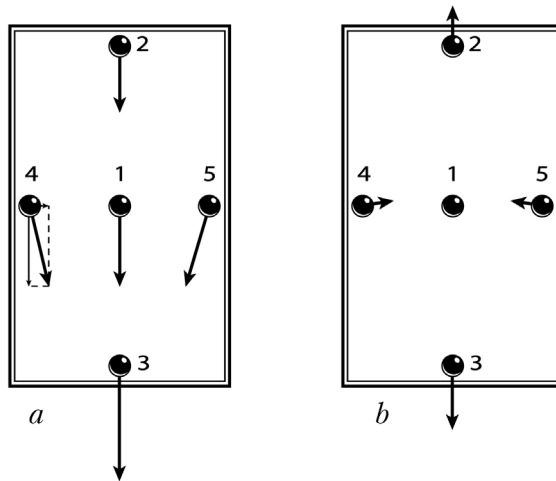


Рис. 1.3. Силы, действующие на шары в свободно падающем лифте (а) и соответствующие им приливные силы (б).
Масштабы приливных сил сильно преувеличены

Каждый из шаров свободно падает вместе с лифтом, но из-за разницы в начальных положениях их движение будет несколько отличаться. Это хорошо видно в системе отсчета, привязанной к лифту. В этой системе шар 1 неподвижен; шар 2, который всегда находится в районе с немного меньшим ускорением свободного падения, дрейфует вверх; аналогичным образом шар 3 дрейфует вниз; шары от 4 до 7 имеют небольшой компонент гравитационной силы, направленной к центру*, и дрейфуют в сторону шара 1. Следует отметить, что масштаб приливных сил на рис. 1.3 в значительной степени преувеличен.

Если мы теперь добавим взаимное гравитационное притяжение между шарами в лифте, мы получаем модель прилив-

* По этой же причине отвес, висящий возле стенки, будет слегка отклонен по сравнению с отвесом в центре.

ных сил на Земле. На самом деле приливы на Земле вызваны притяжением Луны и Солнца, но для простоты мы будем рассматривать только лунные приливы и отливы. Приливы будут происходить, когда наблюдатель, Луна и центр Земли находятся на одной прямой, а отливы — когда направления на наблюдателя и Луну из центра Земли будут перпендикулярны.

Приливные силы могут быть довольно сильными и играть важную роль в астрономии. Например, в 1992 г. комета Шумейкера — Леви 9 была разорвана приливными силами в гравитационном поле Юпитера. Другим примером могут служить Магеллановы Облака — два спутника нашей Галактики, которые деформированы ее приливными силами. Особенно сильные приливные силы встречаются в непосредственной близости от компактных объектов, таких как нейтронные звезды или черные дыры (см. раздел 6.1).

С ньютоновской точки зрения падающий лифт — это неинерциальная система отсчета с однородным полем сил инерции, точно компенсирующих силы притяжения в центре масс. Однако во всех других местах этот баланс нарушается и образуется суммарное поле приливных сил, показанное на рис. 1.3. Эти силы заменяют силы тяжести в космическом корабле на орбите*. По этой причине ученые и инженеры, связанные с космосом, используют термин «микрогравитация» вместо невесомости.

1.2.7. Лунные приливы и отливы

Для объяснения лунных приливов на Земле в рамках ньютоновского подхода мы рассмотрим сначала гравитационное поле неподвижной Луны. Рассматривая ее как точечную массу,

* В реальном космическом корабле есть много других сил, действие которых гораздо существенней.

мы видим, что силовые линии ее гравитационного поля, т. е. направления ускорения свободного падения на Луну, радиальные. Таким образом, суммарная сила, действующая на любую частицу на Земле, является суммой притяжения к остальной части Земли и силы, действующей в направлении Луны (мы не рассматриваем другие небесные тела, чтобы избежать путаницы). Для перехода к системе отсчета, связанной с Землей, мы должны вычесть ускорение свободного падения в центре масс Земли из ускорения свободного падения, действующего на каждую точку, как показано на рис. 1.4. В результате мы получаем знакомую картину: приливы в направлении к и от Луны и отливы в перпендикулярных направлениях.

Таким образом, с ньютоновской точки зрения приливная сила — это просто разница ускорений свободного падения между произвольной точкой и некоторой опорной точкой, например центром Земли. С релятивистской точки зрения приливная сила — это то, что отличает гравитацию от сил инерции, вызванных, например, ускорением ракеты.

Переходя в систему свободно падающего наблюдателя, вы можете обнулить силу, действующую в одной точке, как правило, в центре масс, но в любой другой точке имеется ненулевая разность — приливная сила. В ОТО приливные силы являются проявлением кривизны пространства-времени.

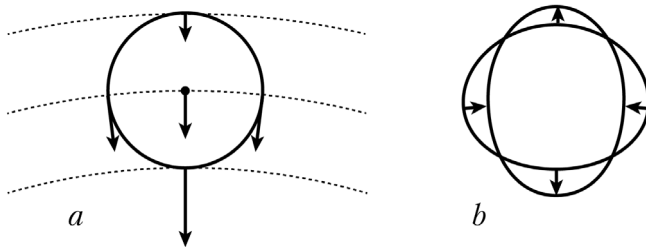


Рис. 1.4. Лунные приливы и отливы на Земле в ньютоновской (а) и релятивистской (b) системах отсчета