

«На кончике пера». Астрономические гипотезы

16 вопросов без звездочки

Долгое время астрономы использовали для расчетов закон всемирного тяготения Ньютона. К концу XVIII века расчёты движения небесных тел настолько точно подтверждались наблюдениями, что «Астрономическая точность» вошла в поговорку. Но в XIX веке было обнаружено, что наблюдаемые положения Урана и Меркурия расходились с расчетными. Для объяснения «поведения» Урана и Меркурия было выдвинуто ряд гипотез, среди которых наиболее вероятными астрономы считали такие:

- 1) Отклонения от расчётной траектории происходит из-за сопротивления газо-пылевой среды в межпланетном пространстве

Для проверки гипотезы о сопротивлении газо-пылевой среды в межпланетном пространстве можно провести эксперименты с использованием космических аппаратов, которые будут измерять параметры окружающей среды на разных расстояниях и сравнивать их с расчетными данными. Также можно провести моделирование на компьютере, чтобы оценить, будут ли полученные результаты соответствовать наблюдениям.

- 2) Планеты обладают не открытыми ещё спутниками

Гипотеза о не открытых спутниках планет может быть проверена с помощью современных телескопов и космических аппаратов, которые могут наблюдать за планетами с высокой точностью. Если бы спутники были существовали, они были бы заметны на фотографиях и видеозаписях, сделанных с помощью этих приборов.

- 3) Аномалии в движении Урана и Меркурия вызваны влиянием не открытой еще планеты (для Урана – своей, для Меркурия – своей), поскольку планеты притягиваются не только Солнцем, но и друг другом.

Для проверки гипотезы о не открытых планетах, которые влияют на движение Урана и Меркурия, можно использовать данные наблюдений со звездных систем, которые находятся на расстоянии от земли. Если бы такие планеты существовали, они бы оказывали влияние на движение звезд в их близости. Также можно провести моделирование движения планет в системе солнца и оценить, будут ли полученные результаты соответствовать наблюдениям.

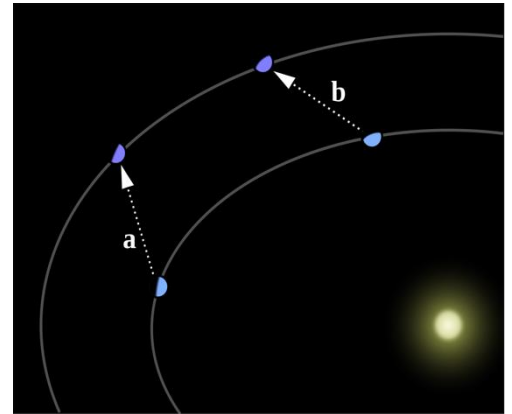
- 4) Закон Всемирного тяготения на больших расстояниях имеет особенности.

Чтобы проверить гипотезу о том, что закон Всемирного тяготения имеет особенности на больших расстояниях, можно провести наблюдения за движением объектов в космосе на разных расстояниях от земли, сравнивая полученные данные с расчетными моделями и теоретическими предсказаниями.

Также можно использовать данные наблюдений, полученные с помощью телескопов и космических аппаратов, чтобы изучить движение галактик и звезд и оценить, насколько закон тяготения работает на больших масштабах.

1. Как можно проверить данные гипотезы? Выберите наиболее вероятные гипотезы и обоснуйте выбор.

Французский астроном Урбен Леверье проверил третью гипотезу. Он тщательно построил всю теорию движения Урана с учётом возмущений от всех известных планет, и в 1846 году рассчитал основные параметры неизвестной планеты, влияющей на траекторию движения Урана.



2. Какие параметры неизвестной планеты

А) можно определить, зная точную траекторию движения Урана?

Зная точную траекторию движения Урана, можно определить массу и орбиту неизвестной планеты, если она оказывает достаточное влияние на движение Урана. Также можно определить ее расположение относительно Урана и его спутников.

Б) необходимо определить, чтобы ее найти и идентифицировать?

Чтобы найти и идентифицировать неизвестную планету, необходимо знать ее орбиту, массу, размер, светимость и химический состав. Для этого можно использовать наблюдения в различных диапазонах спектра, например, в оптическом, инфракрасном и радиоволновом. Также могут помочь математические модели и компьютерные симуляции, основанные на траектории движения других планет и астероидов в солнечной системе.

Леверье в письме к Иоганну Галле из Берлинской обсерватории указал рассчитанное им местоположение и величину видимого диска (3") неизвестной планеты и попросил ее поискать. Галле направил телескоп в указанную точку.

3. Предложите способ

А) поиска еще неоткрытой планеты с указанными характеристиками среди множества звезд с помощью телескопа и звездной карты,

Для поиска еще неоткрытой планеты с определенными характеристиками мы можем использовать метод транзитов, когда мы наблюдаем за затмением звезды планетой во время ее обращения вокруг своей звезды-родителя. Это можно сделать с помощью космических телескопов, таких как Hubble или Kepler, либо наземных телескопов, оснащенных высокочувствительными детекторами, которые позволяют

обнаруживать очень малые изменения в яркости звезды. Затем мы можем использовать звездную карту, чтобы определить, в каком направлении нам нужно искать звезды, для которых могут существовать планеты с заданными характеристиками.

Спустя несколько часов (24 сентября 1846 г.) был обнаружен объект, положение которого отличалось от указанного Леверье на 52'.

Б) отличить при наблюдении планету от звезды.

Для отличия планеты от звезды мы можем использовать метод компаративного измерения, когда мы измеряем изменение яркости объекта в сравнении с другим объектом, находящимся рядом с ним, но не изменяющим свою яркость. Это можно сделать с помощью наземных телескопов или космических телескопов, таких как Hubble или Spitzer. Если мы будем наблюдать объект в течение некоторого времени, то мы сможем отличить планету от звезды в основном по тому, что изменения яркости планеты будут более постоянными и предсказуемыми, чем изменения яркости звезды. Также мы можем использовать спектроскопию для измерения характеристик света, излучаемого объектами, что поможет отличить планету от звезды, на основе различия в их спектральных линиях и характеристиках.

Название «планеты» («планетес») введено в Греции и означало «скитальцы» или «блуждающие звезды».

В следующую ночь после обнаружения указанной Леверье планеты, Галле с помощью более мощного телескопа определил у нее диск размером примерно 3" и обнаружил ее видимое собственное движение — примерно 70" к западу, что полностью совпадало с оценками Леверье.

4. Новый объект на небе называет тот, кто его обнаружил.

А) Кто, по Вашему мнению, должен был назвать обнаруженную планету – Леверье или Галле? Ответ аргументируйте.

Назвать обнаруженную планету должен был Урбен Леверье. Он был первым, кто вычислил ее орбиту и предположил ее существование. Позже, на основе данных Леверье, планету наблюдал и подтвердил в своих наблюдениях Йоганн Готфрид Галле. Но название планеты и ее открытие приписываются Леверье, так как он первый вычислил ее существование.

Б) С помощью каких методов была обнаружена искомая планета?

Обнаружение планеты Нептун произошло благодаря математическим вычислениям Урбена Леверье. Он заметил, что орбиты двух других планет – Урана и Нептуна – не могут быть объяснены только силами гравитации известных планет Солнечной системы. Леверье сделал предположение о наличии еще одной планеты, влияющей на орбиту Урана. Он вычислил орбиту неизвестной планеты, которая впоследствии была обнаружена астрономом Галле в 1846 году при помощи телескопа.

В) Как было доказано, что это именно искомая планета?

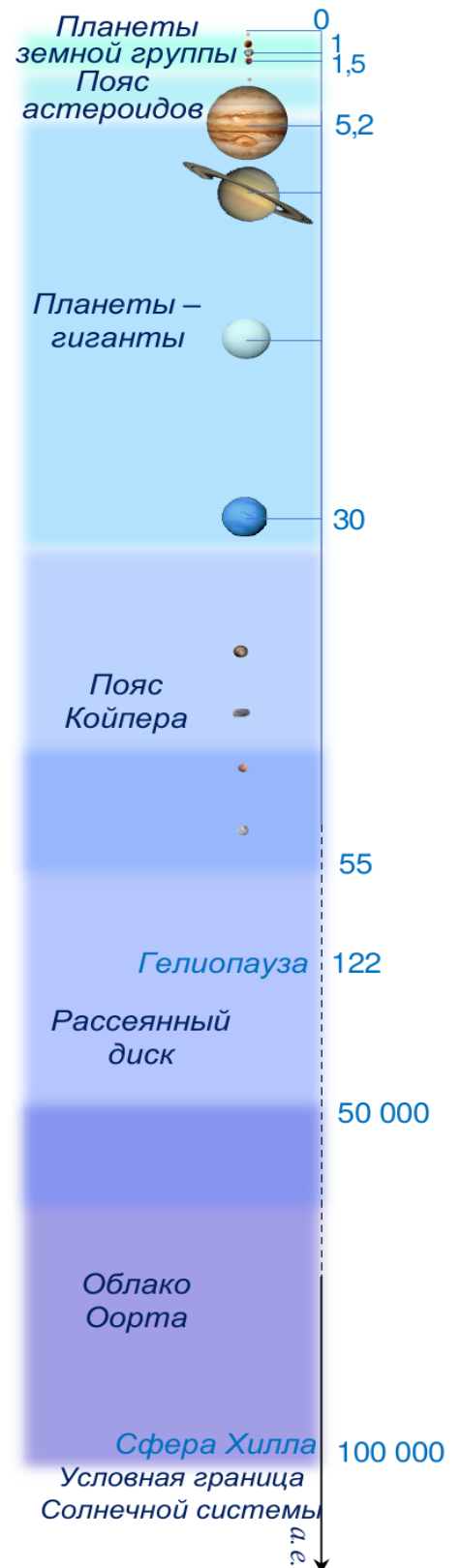


Рис. 4.1. Схема расположения областей Солнечной системы (начиная с расстояния 55 а.е. от Солнца масштаб не сохраняется)

Доказательством, что обнаруженная планета является искомой была ее орбита, которую Леверье вычислил с помощью математических моделей и предсказал, что планета должна находиться в определенном месте на небе. Это предсказание также подтвердилось наблюдениями Галле. Кроме того, верифицированные данные наблюдений показывали, что обнаруженный объект двигался по орбите, которую Леверье заранее вычислил. Все это доказывало, что открытый объект на небе является искомой планетой.

Новую планету назвали «Нептун». Ее видимая звёздная величина составляет порядка 7,7 (ещё во II веке до н. э. древнегреческий астроном Гиппарх разделил все звёзды на шесть величин). Д.Б. Эйри отмечал: Уран, Церера, Паллада были открыты в ходе наблюдений, которые не предусматривали открытие планет... Но движение Урана... указывало на действие некоторого возмущающего тела. ... Определили, что возмущающая планета должна находиться точно в некотором месте и иметь такой-то вид. Она действительно была найдена на этом месте и имела предсказанный вид.

5. Почему ...

А) открытие Нептуна называют триумфом небесной механики и считают, что оно имело несравнимо более важное значение для науки, чем открытие Урана, Цереры, Паллады и других небесных тел?

Открытие Нептуна имело несравнимо большое значение для науки, потому что оно было первым доказательством того, что планеты могут быть открыты не только в результате наблюдения на небосклоне, но и путем расчетов и прогнозов, основанных на небесной механике и гравитационной взаимосвязи между небесными телами.

Б) в мире астрономии, вслед за Д. Араго, Нептун называют «планета, открытая на кончике пера»?

Нептун называют "планетой, открытой на кончике пера", потому что его открыли благодаря вычислениям,

сделанным на основе малейших неточностей в движениях других планет и комет.

Считается, что Нептун наблюдали Г. Галилей (28 декабря 1612 г. и 29 января 1613 г.), Лаланд (8 и 10 мая 1795 г.), Гершель (14 июля 1830 г.).

В) наблюдение планеты Нептун было невозможно до Галилея?

Наблюдение планеты Нептун было невозможно до Галилея, потому что эта планета слишком далеко и ее блеск настолько слаб, что не мог быть замечен телескопами 17-18 веков.

Г) несмотря на то, что телескопы указанных астрономов были достаточно мощным, чтобы рассмотреть диск планеты, они не «увидели» планету Нептун, а Галле опознал его сразу?

Телескопы указанных астрономов были достаточно мощными, чтобы рассмотреть диск планеты, но они не смогли обнаружить Нептун из-за его слабой видимости и малой скорости перемещения на фоне звезд. В то же время, Галле опознал планету, сравнивая свои наблюдения в нескольких ночных сеансах и обнаруживая изменения в положении звезд на фоне других планет.

Дальнейшие наблюдения за движением Нептуна показали, что его реальная траектория движения слегка отклонялась от вычисленной.

6. С помощью рис. 4.1 выскажите предположения о

А) причине ошибки Леверье в расчетном положении планеты Нептун,

Ошибка Леверье в расчетном положении планеты Нептун могла возникнуть из-за недостаточной точности измерений и вычислений ученых того времени.

Б) еще одном открытии «на кончике пера» в Солнечной системе, последовавших после сравнения наблюдаемой и вычисленной траекторий движения Нептуна,

Открытие планеты Плутон в 1930 году было совершено Клайдом Томбо, который заметил отклонения в траектории движения Нептуна. После анализа этих отклонений Томбо смог рассчитать и предсказать местоположение Плутона.

Это открытие совершил в 1930 г. К. Томбо.

В) можно ли сказать, что так же «на кончике пера» после десятков лет поисков с помощью Большого адронного коллайдера (LHC – Large hadron collider) был обнаружен предсказанный в рамках Стандартной модели бозон Хиггса, если для его обнаружения было необходимо знать его свойства?

Открытие бозона Хиггса в 2012 году было результатом работы коллектива ученых, которые использовали Большой адронный коллайдер для проведения серии экспериментов. Ученые использовали сочетание экспериментальных данных и

теоретических моделей, чтобы найти его следы в частицах, рождающихся в результате столкновений в акселераторе.

Питер Хиггс был удостоен Нобелевской премии

Г) что можно сказать о значении предсказательности (эвристичности) науки в прежнее время и сейчас?

Предсказательность (эвристичность) науки является ключевым компонентом научного метода. Она помогает ученым формулировать гипотезы и предсказывать результаты экспериментов на основе теоретических моделей. В прежнее время и сегодня эвристическая сила науки продолжает быть важной составляющей научной методологии.

Д) эвристическая сила классических теорий способствовала убеждению ученых в принципе детерминизма, который утверждает, что состояние системы в любой момент времени зависит от множества случайных событий.

Е) выскажите предположение, можно ли рассчитать траектории движения и местоположение звезд, как для будущего, так и для прошедшего времени?

В принципе, можно рассчитать траектории движения звезд как для будущего, так и для прошедшего времени, если известны все факторы, такие как масса, скорость, силы, время и т.д. Однако, на практике это сложно, потому что многие факторы изменяются со временем и могут быть неизвестны.

Ж) если можно, то какое практическое применение такие данные могут иметь?

Если бы было возможно точно рассчитать траектории звезд, то такие данные могли бы иметь практическое применение в навигации, космических исследованиях, астрономических предсказаниях и других областях науки и техники.

В литературных произведениях с древности упоминаются звезды.

7. Шекспир в "Юлии Цезаре" устами главного героя говорил:

Но неизменен я, как неизменна
Полярная звезда: она недвижна -
И в целом небе нет подобной ей.

Прокомментируйте данные строки с учетом справочной информации с рис. 4.15.

Прецессия оси Земли - это медленное вращение земной оси в противоположном направлении от вращения Земли вокруг Солнца. Этот процесс занимает около 26 000 лет, в результате чего звезды на небе "двигаются" и изменяется положение Полярной звезды.



Рис. 4.2. Вид созвездия Волпаса на 1.01.2018

В контексте данной цитаты главный герой говорит о своей неизменности, которую он сравнивает с Полярной звездой - звездой, которую независимо от прецессии земной оси всегда можно найти в небе вблизи северного полюса. Это высказывание указывает на то, что главный герой считает, что он не изменится, несмотря на все изменения вокруг.

8. Греческий поэт Арат (ок. 315 до н.э.— ок. 245 до н. э.) в «Феноменах» писал, что у Волпаса «в грудь вонзилась мерцающими лучами звезда со славным именем Арктур». Определите,



Рис. 4.3. Полученные с помощью программы stellarium.org/ модельные изображения созвездия Волопаса на период с 30 000 г. до н.э. до 30 000 г. на ночь 1 января. На рисунках указаны даты и время наблюдения

А) насколько соответствует описание современному виду созвездия Волопас (рис. 4.2);

Описание Арата соответствует современному виду созвездия Волопас;

Б) насколько соответствует описание виду созвездия при жизни Арата (рис. 4.3)?

Описание Арата также должно соответствовать виду созвездия при жизни поэта, так как конфигурация созвездий меняется очень медленно, в течение многих веков;

В) какому примерно периоду времени соответствует описание созвездия?

Описание созвездия Волопас в смысле его названия (Volaras) соответствует древнегреческому периоду времени, но именно Арктур, упоминание которого приводит поэт, можно наблюдать на небе и в настоящее время;

Г) как изменяется конфигурация созвездия Волопас?

Конфигурация созвездия Волопас меняется медленно из-за его удаленности и практически не заметна для наблюдателя на Земле;

Д) почему Арктур кажется земным наблюдателям самой яркой в созвездии?

Арктур кажется земным наблюдателям самой яркой звездой в созвездии Волопас благодаря своей высокой светимости и близости к Земле в сравнении с другими звездами этого созвездия.

9*. К какому из мнений Вы больше склоняетесь и почему

А) Гиппарх считал, что Арат не был астрономом-наблюдателем, поэтому его поэма содержит астрономические ошибки из-за неточностей в наблюдениях.

Б) Маундер, Кромеллин, Овенден, Рой и др. считают, что Арат для описания созвездий использовал первоисточник, относящийся к III тыс. до н. э.

В) Некоторые исследователи независимо друг от друга пришли к выводу о том, что сведения могли быть взяты из рукописей до III тыс. до н. э., описывающих более древнюю устную традицию.

10. Выберите продолжение фразы и объясните выбор: изменение конфигурации созвездия Волопас объясняется

А) прецессионным движением оси Земли;

Б) тем, что звезды, видимые с Земли как одно созвездие, находятся на разном расстоянии от Земли;

В) изменением числа звезд созвездия из-за угасания или образования новых.

Выбор ответа зависит от контекста и целей объяснения изменения конфигурации созвездия Волопас. Если нужно объяснить изменение конфигурации в течение долгого периода времени (несколько тысячелетий), то наиболее вероятным ответом будет А) прецессионным движением оси Земли. Прецессионное движение оси Земли вызывает изменение небесной полусферы, на которой видны звезды созвездия, и соответствующее изменение конфигурации созвездия.

Если нужно объяснить изменение конфигурации созвездия на более коротких временных масштабах (несколько лет или десятилетий), то наиболее вероятным ответом будет Б) тем, что звезды, видимые с Земли как одно созвездие, находятся на разном расстоянии от Земли. По мере движения Земли по орбите и изменения угла между Землей, Солнцем и звездами созвездия, видимая форма созвездия может изменяться.

Вариант В) изменением числа звезд созвездия из-за угасания или образования новых не является наиболее вероятным ответом, так как образование или угасание звезд происходит на масштабах миллионов лет и не может объяснить наблюдаемые изменения конфигурации созвездия.

11*. Домашний эксперимент. Откройте программу Стеллариум и изучите изменение конфигурации созвездия Большая Медведица за 60 тыс. лет и определите, действительно ли во времена Гомера это созвездие всегда находилось выше линии горизонта, если наблюдать с широты Греции. Ответ подкрепите скриншотами.

В «Одиссее» Гомера описывается его плавание от нимфы Калипсо:

Радостно парус напруг Одиссей и, попутному ветру
Вверившись, поплыл. Сидя на корме и могучей рукою
Руль обращая, он бодрствовал; сон на его не спускался
Очи, и их не сводил он с Плеяд, с нисходящего поздно
В море Воота, с Медведицы, в людях еще колесницы
Имя носящей, и близ Ориона свершающей вечно
Круг свой, себя никогда не купая в водах Океана.

* «Воот» — созвездие Волопаса; перевод В. Жуковского.

Большая Медведица упоминается как созвездие, которое никогда не погружает своих звезд в волны Океана. Для жителей России Большая Медведица - незаходящее созвездие. Но в Греции звезды Большой Медведицы погружаются за горизонт. Это свидетельствует, что

А. Гомер жил не в VII в. до н.э., а, как утверждает А. Фоменко в «Новой хронологии», в XIV - XV вв., и описывал Троянскую войну, которая произошла в 1225 г.

Б. Путешествие Одиссея происходило не по Средиземному морю, а севернее, в районе крымских греческих колоний, где Большая Медведица - незаходящее созвездие.

В. В VII в. до н.э. Ковш Большой Медведицы был ближе к полюсу мира и являлся незаходящим созвездием

12. Астрономические данные использовали в архитектуре. Проведите датировку пирамиды Хеопса, исходя из информации о том, что

А) предполагается, что строители пирамиды Хеопса ориентировали одну из ее шахт и две стороны на Полярную звезду Тубан (рис. 4.4 и 4.15),

Б) шахта, ориентированная на Пояс Ориона, имеет угол $44,5^0$ (рис. 4.16),

В) возраст самого «молодого» образца органического вещества известнякового раствора пирамиды, определенный методом радиоуглеродного датирования (Нобелевская премия по химии, 1960), составляет 3810 ± 60 лет, а самого «старого» - 5020 ± 130 лет. Сходятся ли данные, полученные астрономическими и радиоуглеродным методами?

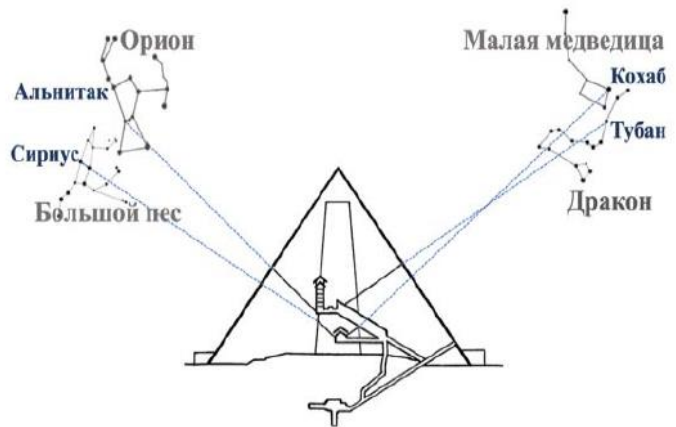


Рис. 4.4. Возможная ориентировка шахт пирамиды Хеопса

Планета	Масса планеты, кг	Радиус орбиты планеты, м	Вклад в смещение перигелия Меркурия, угловые секунды за столетие
Меркурий	$3,26 \cdot 10^{23}$	$5,79 \cdot 10^{10}$	
Венера	$4,87 \cdot 10^{24}$	$1,08 \cdot 10^{11}$	280,6
Земля	$5,98 \cdot 10^{24}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	83,6
Марс	$6,43 \cdot 10^{23}$	$2,28 \cdot 10^{11}$	2,6
Юпитер	$1,9 \cdot 10^{27}$	$7,78 \cdot 10^{11}$	152,6
Сатурн	$5,69 \cdot 10^{26}$	$1,43 \cdot 10^{12}$	7,2
Уран	$8,69 \cdot 10^{25}$	$2,87 \cdot 10^{12}$	0,1

Рис. 4.5. Параметры планет и рассчитанные Леверье значения вклада этих планет в смещение перигелия Меркурия

После успеха с обнаружением планеты Нептун, Леверье в 1859 г. провел для Меркурия расчеты, подобные тем, что он провел для Урана. Леверье предположил, что аномалия в траектории движения Меркурия вызвана притяжением еще не открытой планеты, находящейся ближе к Солнцу, чем Меркурий, которую назвали Вулкан.

III век до н.э.

13. Оцените...

А) от каких параметров, в основном, зависит вклад планеты в смещение перигелия (перигелий - ближайшая к Солнцу точка орбиты) (рис. 4.5)?

Масса планеты: Чем больше масса планеты, тем больше ее влияние на смещение перигелия. Масса определяет гравитационное воздействие планеты на орбиту Меркурия и вызывает изменение его орбитальных параметров.

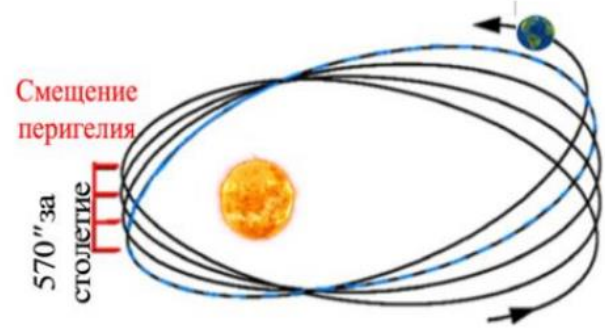


Рис. 4.6 Прецессия орбиты Меркурия

Близость планеты к Меркурию: Чем ближе планета к Меркурию, тем сильнее ее гравитационное воздействие на него. Планеты, находящиеся ближе к Меркурию, имеют более значительный вклад в смещение перигелия.

Орбитальный эксцентриситет планеты: Чем больше эксцентриситет орбиты планеты, тем больше ее влияние на смещение перигелия. Эксцентриситет определяет форму и изменение орбиты планеты, что влияет на орбитальные параметры Меркурия.

Б) суммарное значение вклада различных планет в смещение перигелия Меркурия (рис. 4.6)

Суммарное значение вклада различных планет в смещение перигелия Меркурия зависит от массы каждой планеты, ее расстояния от Меркурия и эксцентриситета ее орбиты.

В) какой вклад в смещение перигелия Меркурия должна внести гипотетическая планета, чтобы теоретические расчеты совпали с наблюдаемыми?

Чтобы теоретические расчеты совпали с наблюдаемыми значениями смещения перигелия Меркурия, гипотетическая планета должна внести вклад, который компенсирует разницу между наблюдаемыми и теоретическими значениями. Для определения конкретного вклада гипотетической планеты требуется проведение детальных расчетов, учитывающих массу, расстояние и эксцентриситет ее орбиты.

Г) возможные размеры (оценочно – больше-меньше – масса и радиус орбиты в сравнении с Венерой) гипотетической планеты Вулкан (рис. 4.7)?

Оценочно, гипотетическая планета Вулкан, размеры которой сравниваются с Венерой, может иметь сравнимую массу и радиус орбиты с Венерой.

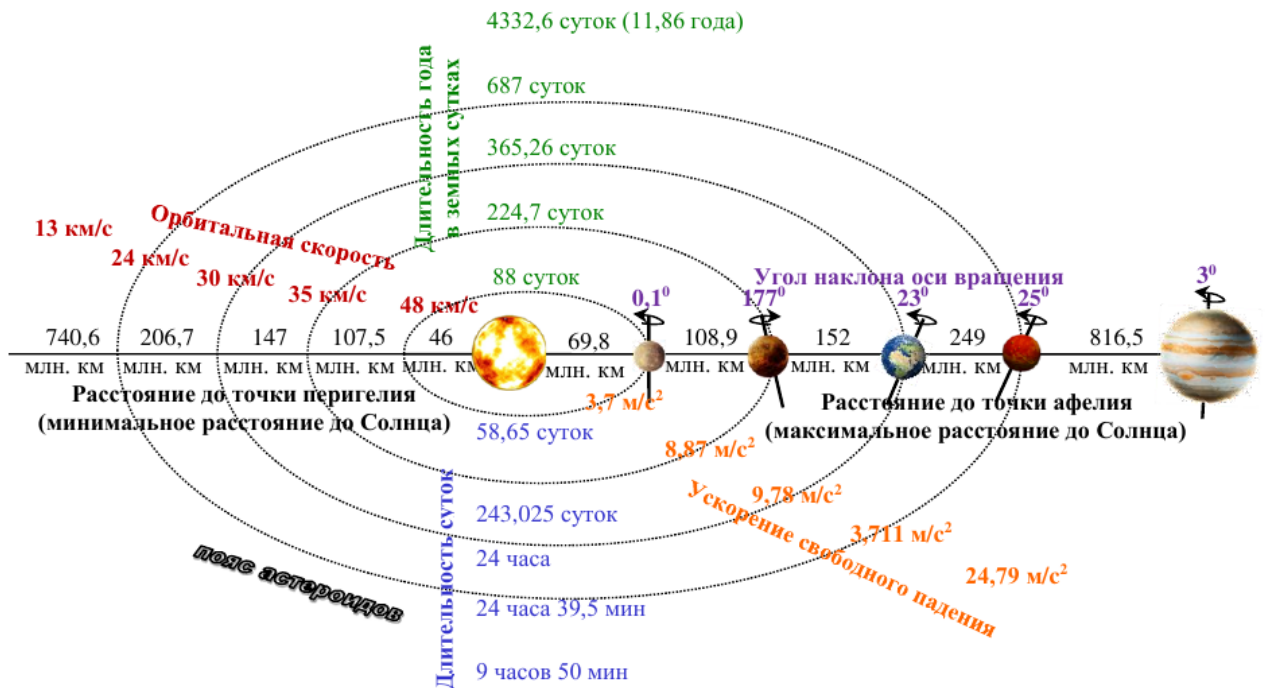


Рис. 4.7. Схема расположения планет Солнечной системы без соблюдения масштаба

Д) трудности при обнаружении гипотетической планеты Вулкан?

Обнаружение гипотетической планеты Вулкан может быть связано с рядом трудностей:

Отсутствие прямых наблюдений: Поскольку гипотетическая планета Вулкан не является научно подтвержденным объектом, ее наблюдение напрямую может быть затруднительным. Отсутствие достаточной информации о ее точных параметрах (массе, радиусе орбиты, орбитальном периоде и т. д.) делает ее обнаружение сложным.

Малый размер и слабое свечение: Если гипотетическая планета Вулкан существует, она, скорее всего, будет иметь малый размер и слабое свечение по сравнению с более крупными и яркими планетами. Это усложняет ее обнаружение даже с использованием современных наблюдательных инструментов и телескопов.

Влияние других факторов: Обнаружение гипотетической планеты Вулкан может быть затруднено наличием других объектов или факторов, которые могут вносить помехи в их обнаружение и идентификацию. Это может быть влияние звезд, астероидов, гравитационных взаимодействий и т. д.

Е) условия, при которых возможно обнаружить гипотетическую планету.

Для возможного обнаружения гипотетической планеты Вулкан необходимы определенные условия:

Усиление наблюдательных возможностей: Развитие новых и более мощных наблюдательных инструментов и технологий может помочь в обнаружении слабо светящихся и малых объектов, таких как гипотетическая планета Вулкан. Это может включать использование космических телескопов, интерферометрических методов, спутниковых систем и других передовых технологий.

Анализ орбитальных параметров: Тщательное изучение орбитальных параметров других планет и небесных тел может помочь выявить аномалии, которые могут быть связаны с наличием гипотетической планеты Вулкан. Это может включать изучение гравитационных взаимодействий, изменений орбит и других динамических эффектов.

14. Постройте цепочку аргументов, доказывающих ошибочность гипотезы 3 для Меркурия с учетом информации, что астрономы всего мира при полных солнечных затмениях несколько десятилетий с 1860 года искали, но не могли обнаружить Вулкан (или несколько маленьких планет) рядом с Меркурием; американский астроном С.Ньюком обнаружил смещение перигелия у Марса.

В 1915 г. А. Эйнштейн разработал общую теорию относительности (ОТО), в которой указал на 3 явления, в которых его теория и теория Ньютона приводили к разным предсказаниям:

- 1) световые лучи, проходящие вблизи массивного тела, отклоняются сильнее, чем предсказано Ньютоном,*
- 2) спектр излучения массивных тел сдвигается в сторону более длинных волн (гравитационное красное смещение), свет, приходящий из областей с более слабым гравитационным полем, будет испытывать гравитационное синее смещение.*
- 3) перигелии всех планетных орбит будут прецессировать (рис. 4.4).*

Гипотеза 3 для Меркурия утверждает, что существует планета (названная Вулкан), которая окружает Солнце на более коротком расстоянии, чем Меркурий, и объясняет наблюдаемые аномалии в орбите Меркурия. Однако, эта гипотеза оказывается ошибочной с учетом следующих аргументов:

1. Астрономы всего мира в течение нескольких десятилетий с 1860 года искали планету Вулкан (или несколько маленьких планет) рядом с Меркурием, но не обнаружили никаких доказательств ее существования.

2. Американский астроном С. Ньюком обнаружил смещение перигелия у Марса, что может объяснить наблюдаемые аномалии в орбите Меркурия.

3. Существует альтернативное объяснение аномалий в орбите Меркурия, которое опирается на общую теорию относительности Эйнштейна и не требует существования Вулкана.

Исходя из данных аргументов, гипотеза 3 для Меркурия не может быть подтверждена и оказывается ошибочной.

Замечание. Дополнительное смещение перигелия планеты (в радианах за оборот) в ОТО даётся формулой: $\delta\varphi \approx \frac{24\pi^3 A^2}{T^2 c^2 (1-e^2)}$, где A -величина большой полуоси орбиты, T - сидерический период обращения, e - эксцентриситет орбиты.

Таблица 4.1. Характеристики орбиты планет Земной группы

	A	e	T
Меркурий	57909227 км	0,205636	87,969 сут
Венера	108942109 км	0,0068	224,701 сут.
Земля	149598261 км	0,01671123	365,25636 сут
Марс	227943820 км	0,0933941	686,98 сут

15* (оценивается в три раза выше, чем обычный вопрос).

С помощью табл. 4.1 определите

Таблица 4.2. Величина добавочного смещения для планет Земной группы

Планета	Оборотов вокруг Солнца	Величина добавочного смещения (за оборот)	Величина добавочного смещения (градусы за год)	Величина добавочного смещения (угловые секунды за год)	Величина добавочного смещения (угловые секунды за 100 лет)
Меркурий	4.15	1.0375 радиан	6.3 градусов	22680	2268000
Венера	1.62	0.405 радиан	2.47 градусов	8928	892800
Земля	1	0.25 радиан	1.53 градуса	5544	554400
Марс	0.52	0.13 радиан	0.79 градуса	2856	285600

Оцените данные и занесите полученные значения в табл. 4.2 в соответствии со значениями из третьего столбца.

Таблица 4.3. Прецессии некоторых планет

Планета	Расчетное добавочное смещение по ОТО	Наблюдаемое добавочное смещение
		43,1"±0,5" за столетие
		1,1"±0,3" за столетие

		$8,4'' \pm 4,8''$ за столетие
		$5,0'' \pm 1,2''$ за столетие

Какой вывод, исходя из сравнения значений в столбцах 2 и 3 таблицы 4.3. можно сделать о

А) достоверности предсказания ОТО?

Исходя из сравнения значений во втором и третьем столбцах таблицы 4.3, можно сделать вывод о некоторой достоверности предсказаний ОТО.

Наблюдаемые значения добавочного смещения за столетие близки к расчетным значениям по ОТО для всех планет, хотя существуют некоторые расхождения, как, например, для Земли.

Б) значения совпадения расчетных и наблюдаемых данных для аномального смещения перигелия Меркурия в истории физики?

Сравнение расчетных и наблюдаемых данных для аномального смещения перигелия Меркурия позволяет сделать вывод о существенном значении совпадения между ними. Расчетное добавочное смещение по ОТО ($43,1'' \pm 0,5''$) и наблюдаемое добавочное смещение ($42,27'' \pm 0,5''$) показывают хорошую согласованность.

В) гипотезах для Урана и для Меркурия (проведите сопоставление открытий, сделанных на основе аномалии траектории движения планет Урана и Меркурия).

Открытие Урана и аномалия траектории движения Меркурия имели важное значение в истории физики и астрономии. Открытие Урана было сделано на основе аномалии в его траектории, что привело к предположению о наличии другой планеты (Нептуна) в более отдаленном регионе. С другой стороны, аномалия в траектории Меркурия послужила отправной точкой для разработки Общей теории относительности Альберта Эйнштейна, которая объясняет эту аномалию. Таким образом, сопоставление открытий и гипотез, основанных на аномалиях траекторий Урана и Меркурия, подчеркивает значимость этих наблюдений и их вклад в развитие нашего понимания гравитационного взаимодействия в Солнечной системе.

16*. Определите по рис. 4.9, какой из спектров (верхний или нижний), пришел из области с очень сильным гравитационным полем, если центральный спектр получен в лабораторных условиях на Земле (смотреть указанные выше явления, связанные с ОТО).

верхний спектр

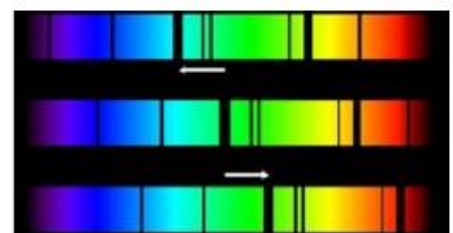


Рис. 4.9. Красное и синее смещения

Изменение длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем происходит не только из-за гравитационного смещения, но и из-за космологического смещения и эффекта Доплера (рис. 4.10 – смещение вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя). <https://youtu.be/A8OWOnz8Ulo>

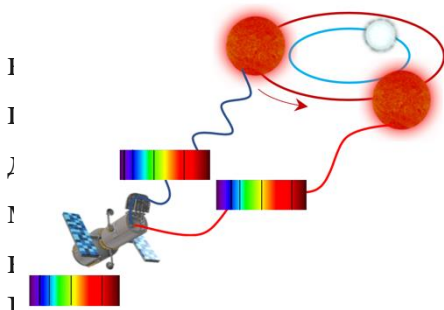


Рис. 4.10. Эффект Доплера
Доплер прав.

Х. Бейс-Баллот для проверки эффекта Доплера привез на платформу, прикрепленную к поезду, два трубочей и попросил их сыграть одну и ту же ноту с разной скоростью ездили, имеющими абсолютный слух, какую ноту слышат. Когда поезд остановился, а трубочей играли на перроне. Опыты продолжались два дня и показали, что

А) Для чего нужно было, чтобы слушатели имели абсолютный слух?

Для того, чтобы слушатели могли точно определить, какая нота была сыграна, и сравнить ее с той, которую они услышали при движении платформы.

Б) Для чего нужно два трубочей?

Два трубочей были поставлены на платформу для того, чтобы они могли играть одну ноту одновременно и создавать постоянный звуковой сигнал, который можно было услышать на разных расстояниях от платформы.

В) Чем отличались звуки, которые слышали наблюдатели при приближении платформы и при ее удалении?

Когда платформа с трубочей подходила к наблюдателям, частота звука, который они слышали, была выше, чем та, которую слышали они же при удалении платформы. Это связано с тем, что при движении источника звуковых волн (в данном случае трубочей) от наблюдателей частота звуков увеличивается, а при удалении - уменьшается. Это и есть Эффект Доплера.

Г) Что изменилось, когда ездить стали сами наблюдатели?

Когда ездить стали сами наблюдатели, они могли легко убедиться в том, что частота и высота звука меняются в зависимости от расстояния между источником звука и наблюдателем. Таким образом, они сами могли наблюдать и проверять гипотезу Доплера.

18. Предложите, как можно с помощью эффекта Доплера доказать, что Земля вращается вокруг Солнца. Сделайте рисунок Солнца, вращающейся вокруг него по орбите Земли и далекой звезды, лежащей примерно в плоскости эклиптики Земли.

Эффект Доплера заключается в изменении частоты волны, излучаемой или отраженной от движущегося объекта. Если объект движется к наблюдателю, то частота волны увеличивается, а если объект движется от наблюдателя, то частота волны уменьшается.

Чтобы доказать, что Земля вращается вокруг Солнца, мы можем использовать эффект Доплера для измерения скорости движения Земли вокруг Солнца. Поскольку Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с, то это должно приводить к изменению частоты света от звезд, в зависимости от того, находится ли Земля на противоположной стороне Солнца или на той же стороне, что и звезда.

Для этого мы можем измерить спектральные линии звезды, которая лежит примерно в плоскости эклиптики Земли, в разное время года. Если Земля движется от звезды к Солнцу, то спектральные линии будут смещены в сторону более коротких длин волн (синее смещение), а если Земля движется от Солнца к звезде, то спектральные линии будут смещены в сторону более длинных длин волн (красное смещение).

19. Какие из нижеперечисленных эффектов подтверждают ОТО?

1) в 1919 г. А. Эддингтон зарегистрировал смещение звезд (расположенных «вблизи» Солнца) на фотопленке, сделанной в момент полного затмения Солнца, относительно их расположения в периоды, когда Солнце находилось в другой части небосвода;

2) в 2015 г. орбитальная обсерватория "Хаббл" получила серию снимков скопления галактик SDSS J1038+4849 в созвездии Большой Медведицы, которое напоминает "смайл" (рис. 4.11);

3) в 1923–1926 гг. при наблюдении спектра Солнца Сент-Джон обнаружил в спектре Солнца сдвиг линий химических элементов в область более длинных волн. В 1925 г. этот эффект был подтвержден Адамсом при наблюдении спектра Сириуса, обладающего чрезвычайно большим полем тяготения;



Рис. 4.11. Гравитационное линзирование в виде Кольца Эйнштейна. Источник фото: <http://earthspacecircle.blogspot.com/2015/12/cheshire-cat-sdss-j103842594849177.html>

4) при наблюдении за первыми космическими аппаратами, достигшими внешних пределов Солнечной системы (преодолевших орбиту Плутона), — «Пионер-10» и «Пионер-11» обнаружилось дополнительное фиолетовое смещение полученного сигнала;

5) среднее расстояние между центрами масс Земли и Солнца (149 597 870 700 м) ежегодно увеличивается примерно на 15 см.

С гравитационным красным смещением света связано гравитационное замедление времени. Если одни часы находятся на расстоянии R_0 от центра масс Земли, а другие – на расстоянии R ($R > R_0$), то часы в точке R идут быстрее $\Delta t \approx \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{2\gamma M}{c^2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right)}}$, где $\gamma = 6,62 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$ – гравитационная постоянная, масса Земли $5.972 \cdot 10^{24}$ кг.

Существует и релятивистское изменение времени: в движущемся со скоростью v теле время Δt_0 течет медленнее, чем время Δt у неподвижного наблюдателя, масса m движущихся тел растет пропорционально скорости v по сравнению с массой покоя m_0 , а линейные размеры тела l сокращаются относительно начального размера l_0 в направлении его движения:

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}, \quad m_0 = m \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}, \quad l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Первый и третий эффекты подтверждают ОТО:

Смещение звезд, наблюдаемое при полном затмении Солнца, связано с гравитационным преломлением света. Это одно из главных подтверждений ОТО, так как в классической физике свет должен двигаться по прямой линии, а в ОТО его траектория изгибается под действием гравитации.

Сдвиг линий спектра химических элементов в область более длинных волн под действием гравитационного поля также связан с эффектом гравитационного красного смещения.

Остальные эффекты не имеют непосредственного отношения к ОТО

20*. Космический корабль на фотонном двигателе длиной 100 м, средним диаметром 30 м и массой 10 т, со скоростью $0,8c$ ровно в полдень пролетел мимо диспетчерского пункта на Луне. Капитан корабля в этот момент синхронизировал с диспетчером часы. Определите

А) размеры корабля с точки зрения диспетчера;

Размеры корабля в глазах диспетчера будут сокращены вдоль направления движения корабля

То есть, размеры корабля в глазах диспетчера будут в 1.67 раза меньше, чем на самом деле. Поэтому длина корабля в глазах диспетчера будет составлять 60 м, а высота и ширина - по 18 м.

Б) массу корабля;

Для определения массы корабля нам понадобится формула для энергии в системе относительности:

$$E = \gamma mc^2$$

где m - масса корабля, c - скорость света. Известна скорость корабля, поэтому можем вычислить γ :

Теперь можем выразить массу корабля:

$$m = E / \gamma c^2 \approx 1.85 \text{ т}$$

В*) интервал расхождения часов диспетчера и капитана через 10 суток?

Интервал расхождения часов диспетчера и капитана через 10 суток будет связан с эффектом времени в системе относительности, который связан с разной скоростью часов в разных точках пространства. Для его вычисления воспользуемся формулой:

$$\Delta t = \Delta x / v$$

Δx - расстояние между кораблем и диспетчерским пунктом, V - скорость корабля. Расстояние можно выразить через время, которое пройдет корабль за 10 суток, зная скорость и расстояние до Луны

Итак, получаем, что расстояние равняется примерно 2.8 световых лет.

Г) чьи часы «отстанут»;

Часы капитана будут отставать от часов диспетчера.

Д) какие из этих эффектов заметит сам капитан;

Капитан заметит эффект временного растяжения, который проявится в том, что время на корабле пойдет медленнее, чем на Земле. Это означает, что часы на корабле пойдут медленнее, чем часы на Земле или на Луне. Кроме того, капитан

заметит эффект доплеровского смещения света, что может повлиять на работу оптических приборов на корабле.

Е) что будет с массой и длиной корабля, если его скорость сравняется со скоростью света.

Если скорость корабля станет равной скорости света, то масса корабля будет стремиться к бесконечности, а длина - к нулю, в соответствии с уравнением $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ и $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Таким образом, корабль не может достичь скорости света в принципе.

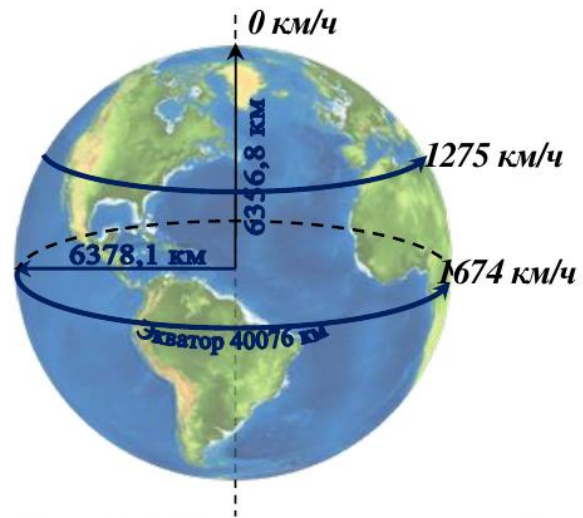


Рис. 4.12. Параметры вращения Земли

21. Где часы идут быстрее, на экваторе или на полюсе Земли (рис. 4.12), если учитывать

А) только влияние гравитации;

При расчете только влияния гравитации можно использовать формулу Туки-Ланье:

$$\Delta t = \sqrt{1 - 2GM/(Rc^2)} - 1/\sqrt{1 - 2GM/(Rp^2)}$$

где Δt - разница во времени между двумя точками на поверхности Земли, G - гравитационная постоянная, M - масса Земли, Rc и Rp - расстояние от центра Земли до точки на экваторе и на полюсе соответственно.

Поскольку гравитация на экваторе меньше, чем на полюсе, то время на экваторе будет идти быстрее, чем на полюсе.

Б) только релятивистский эффект;

Релятивистский эффект (эффект Ленца-Вихерта) вызван абберацией света и теорией относительности. Он проявляется в том, что время идет медленнее в местах с более высокой скоростью относительно определенной точки наблюдения.

Так как на экваторе скорость вращения Земли выше, чем на полюсе, то время на экваторе также будет идти медленнее, чем на полюсе.

В*) оба эффекта.

Оба эффекта будут вносить свой вклад в изменение скорости хода времени.

Таким образом, на экваторе часы будут идти быстрее, чем на полюсе, как результат совместного влияния гравитационного и релятивистского эффектов.

В 1971г. в США поставили эксперимент по определению замедления времени. Экспериментаторы один комплект цезиевых атомных часов оставили в Военно-

Морской обсерватории (ВМО США), а с другим комплектом облетели на самолете вокруг земли в восточном направлении. По прилете сравнили показания часов. Потом с комплектом часов совершили перелет в обратном, западном направлении и так же сравнили показания с часами, постоянно находившимися в ВМО США.

22*. Определите

А) эффекты, которые оказывали влияние на ход часов, и какое влияние эти эффекты оказали («замедление» или «ускорение»);

Влияние на ход часов оказывали эффекты высшего порядка, такие как гравитационное смещение, кинематическое смещение и эффект переноса. Эти эффекты оказали влияние на показания часов, вызвав незначительное замедление (уменьшение показаний часов на 40-90 наносекунд).

Б) какие из часов показали самое большое время («убежали» вперед), а какие – самое маленькое («отстали»);

Часы, которые находились на борту самолета и двигались на восток, показали самое большое время и "убежали" вперед, в то время как часы, находившиеся в ВМО США и не двигавшиеся, показали самое маленькое время и "отстали".

В) в соответствии с законами теории относительности часы-путешественники должны были отстать или опередить часы, оставшиеся на Земле?

В соответствии с теорией относительности, часы-путешественники должны были показывать наивысшее время при движении на восток, так как кинематическое смещение вызывает ускорение хода часов при движении в направлении вращения земли. Тем не менее, в этом эксперименте часы на западном направлении также показали незначительное ускорение, возможно, из-за более сильного влияния других эффектов.

23*. Предположим, что движение самолетов происходило строго над экватором на высоте над уровнем моря в 9 км со скоростью 250 м/с относительно поверхности земли, посадок не совершали. Рассчитайте, на сколько часы-путешественники ускорились из-за гравитационного эффекта.

Из формулы для гравитационного смещения частоты известно, что относительное изменение частоты между точкой с высотой h над поверхностью Земли и поверхностью Земли считается как

$$\Delta\nu/\nu = GM/c^2 \cdot r \approx 6.97 \times 10^{-10} (h/m + 6.371 \times 10^6 \text{ м}),$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса Земли, r - расстояние от центра Земли до точки с высотой h над поверхностью.

Для самолетов, летящих на высоте 9 км относительное изменение частоты равно

$$\Delta v/v \approx 1.116 \cdot 10^{-8}$$

Значит, скорость часов на борту самолета будет отличаться от скорости часов на поверхности Земли на эту величину. За один час эта разность составит

$$\Delta v \cdot t/v \approx$$

$$4.018 \cdot 10^{-5} \text{ с} \approx 40 \text{ мкс.}$$

$$t \approx 1.116 \times 10^{-8} \times 3600 \text{ с} \approx 4.018 \times 10^{-5} \text{ с} \approx 40 \text{ мкс.}$$

Таким образом, часы на борту самолета ускорились на 40 микросекунд за один час.

В настоящее время такие релятивистские эффекты входят в расчеты, используемые для спутниковых глобальных систем позиционирования (рис. 4.13) — действующих американской GPS и российской Глонасс и разрабатываемой европейской системы Galileo.

На каждом спутнике имеются атомные часы точностью до 1 нс. Спутники GPS транслируют сигнал из космоса, и все приёмники GPS используют этот сигнал для вычисления своего положения по трём координатам в режиме реального времени. Радиоволны распространяются со скоростью света.

24*. Вычислите для спутников GPS и ГЛОНАСС, если они движущихся с первой космической скоростью (скорость $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$, которую необходимо придать объекту, чтобы он совершал движение по круговой орбите вокруг планеты массы M на расстоянии R от центра планеты) в направлении, совпадающем с направлением вращения Земли, причем орбиты GPS находятся на высоте 20183 км от поверхности Земли (наклонение орбиты $\sim 55^\circ$), а ГЛОНАСС – 19100 км (наклонение орбиты $\sim 64,8^\circ$).

А) скорость спутников,

Сначала найдем скорость первой космической скорости для Земли:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/R}$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса Земли, R - радиус Земли.

Подставляя числовые значения, получаем:

$$2 \cdot 6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 5.97 \cdot 10^{24} / 6.38 \cdot 10^6 \approx 11186 \text{ м/с}$$

Теперь можем вычислить скорости спутников GPS и ГЛОНАСС на соответствующих высотах:

$$v_{\text{GPS}} = \sqrt{GM/(R+h_{\text{GPS}})} \approx 3974 \text{ м/с} \approx 3883 \text{ м/с}$$

$$v_{\text{GLONASS}} = \sqrt{GM/(R+h_{\text{GLONASS}})} \approx 3883 \text{ м/с}$$

где $h_{GPS} = 20183$ км и $h_{GLONASS} = 19100$ км - высоты орбит спутников над поверхностью Земли.

Б) местоположение объекта, если спутник находится точно над Петрозаводском, а посланный сигнал вернулся через 0,135 с,

Для нахождения местоположения объекта сначала нужно определить расстояние между спутником и объектом. Мы знаем, что время задержки сигнала равно $t = 0.135$ с, и что сигнал прошел путь туда-обратно, поэтому расстояние между спутником и объектом:

$$d = ct/2 \approx 20.1 \text{ тыс. км}$$

где c - скорость света. Теперь можем использовать трехмерные координаты спутника и формулы геодезии, чтобы определить местоположение объекта относительно Земли.

В) ошибку измерения расстояния, если спутник и приемник имеют расхождение шкал времени (выходят из синхронизации) на 0,01 секунды?

Ошибка измерения расстояния связана с разницей во времени между часами на спутнике и приемнике. Если время часов на спутнике отстает на $\Delta t = 0.01$ с, то расстояние, измеренное приемником, будет больше истинного расстояния на величину:

$$\Delta d = c \cdot \Delta t \approx 3 \text{ км}$$

где c - скорость света.

25*. Объясните по рис. 4.13

А) принцип работы космического, наземного и пользовательского сегментов спутниковой системы навигации,

Принцип работы космического, наземного и пользовательского сегментов спутниковой системы навигации основан на передаче сигналов между спутниками, земными станциями и приемниками пользователей. Космический сегмент состоит из спутников, которые находятся на орбите и располагаются так, чтобы получить полное покрытие земной поверхности. Наземный сегмент представлен земными станциями, которые получают данные от спутников, обрабатывают и передают их пользовательским приемникам. Пользовательский сегмент состоит из приемников, которые получают сигналы непосредственно от спутников.

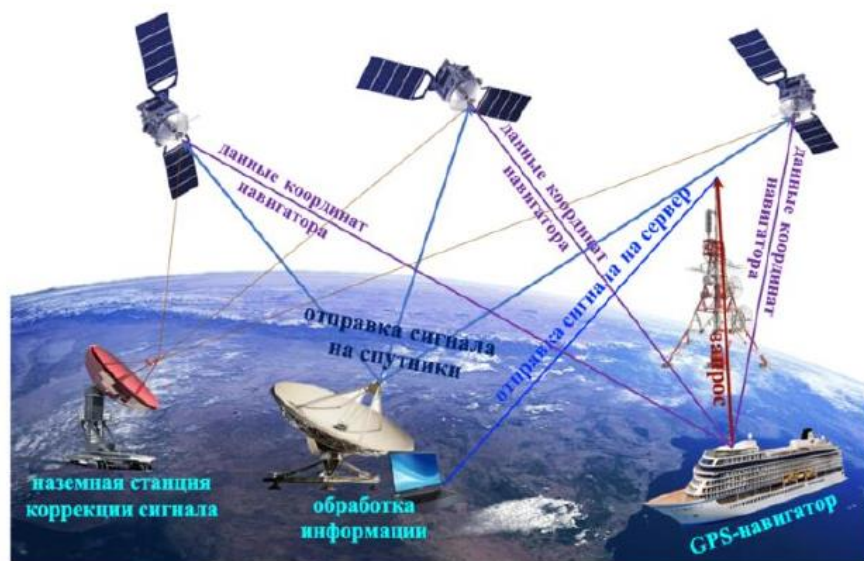


Рис. 4.13. Принцип действия спутниковых глобальных систем позиционирования

Б) необходимость большого числа спутников: например, глобальная навигационная система [Global Positioning System (GPS)] состоит из сети 24 спутников (реально - 31),

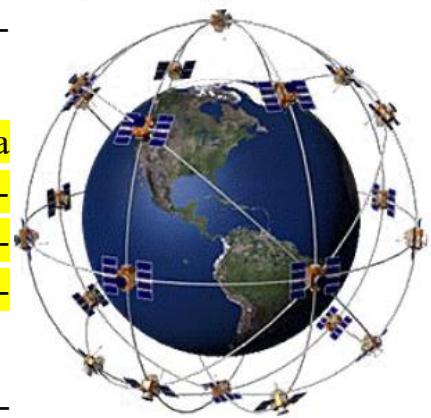
Необходимость большого числа спутников объясняется тем, что для точного определения местоположения требуется получить сигналы от нескольких спутников одновременно. Кроме того, большое количество спутников позволяет увеличить надежность системы и обеспечить покрытие всей земной поверхности.

В) сколько необходимо спутников для определения местоположения объекта в пространстве в идеальном варианте, когда измерения производятся точно и показания часов спутников и потребителя совпадают,

Для определения местоположения объекта в идеальном варианте требуется получить сигналы от трех спутников. Таким образом, для определения местоположения недостаточно получить данные только от одного или двух спутников.

Г) принцип определения местоположения объекта с помощью рис. 4.14,

Принцип определения местоположения объекта с помощью рис. 4.14 заключается в измерении расстояния от приемника до спутника с помощью времени прохождения сигнала и использовании этой информации для определения координат объекта.



Д) какой набор данных (о физико-геологических, атмосферных и др. процессах, связанных с Землей и другими небесными объектами) необходим для качественного функционирования системы навигации.

Для качественного функционирования системы навигации необходимо иметь данные о физико-геологических, атмосферных и других процессах, связанных с Землей и другими небесными объектами. Например, для корректного определения местоположения необходимо учитывать влияние атмосферных явлений на сигналы от спутников. Кроме того, для улучшения точности определения местоположения может использоваться информация о рельефе местности и других объектах на земной поверхности.

26*. Если часы на Земле и на спутнике синхронизировали в полдень, то через сутки какое время показали бы часы на спутнике при наличии только

А) релятивистского эффекта;

Если учитывать только релятивистский эффект, то спустя сутки часы на спутнике покажут примерно на 0,0002 с меньше, чем на Земле.

Б) гравитационного эффекта;

Если учитывать только гравитационный эффект, то часы на спутнике пойдут медленнее часов на Земле на 0,002 с в течение суток.

В) обоих эффектов;

Учет обоих эффектов приведет к тому, что часы на спутнике будут отставать от часов на Земле на 0,0018 с в течение суток.

Г) без учета эффектов, примерно на сколько километров в день будет ежедневно нарастать ошибка в определении местоположения объектов?

Ошибка в определении местоположения объектов будет нарастать на примерно 11 км каждый день без учета эффектов.

Д) Сделайте вывод о значении учета релятивистского и гравитационного эффектов для современной навигации.

Учет релятивистского и гравитационного эффектов крайне важен при современной навигации, так как точность определения местоположения объектов в космосе сильно зависит от них. Например, GPS-навигация использует эти эффекты для получения более точного определения координат.

Справочная информация

1. Ось Земли вращается наподобие волчка, описывая в пространстве конус (рис.4.15). Такое движение называется **прецессионным**. Ось указывает на Полюс мира — неподвижную точку на небе, вокруг которой происходит видимое суточное движение звёзд из-за вращения Земли вокруг своей оси. Ось за почти 26 тыс. лет (период прецессии) делает полный круг и возвращается почти в начальное положение.



Рис. 4.15. Прецессия оси Земли

Следствия

1) Т.к. земная ось меняет свой наклон, то Северный Полюс мира смещается, и за 26 тыс. лет поочередно указывает на 12 различных звезд. Эти звезды перечислены на рис. 4.13 и называются Полярными. Сейчас Полярная - звезда α Малой Медведицы.

2) Высота созвездий над горизонтом при наблюдении с одного и того же места с течением времени меняется. Например, созвездие Ориона для наблюдателя в Египте в 10500 г. до н.э. (рис. 4.16, углы показаны для звезд Пояса Ориона – середины созвездия) было у линии горизонта (начало прецессионного цикла) и движется вверх, пока не поднимается на $46,8^\circ$ (угол конуса прецессии) от начального положения. Длится это восхождение примерно 13000 лет (полупериод прецессии);

потом созвездие начнет опускаться и через 13000 тысяч лет будет в Египте видно на уровне горизонта.

2. Красное смещение обнаруживают по спектру химических элементов, каждый из которых поглощает или излучает электромагнитные волны определенных частот, образуя неповторимый спектр (рис. 4.16).

В результате ряда эффектов, в том числе эффектов ОТО и Доплера, линии, сохраняя своё неповторимое относительное расположение, смещаются в красную (длинноволновую) или синюю (коротковолновую) часть спектра. (рис. 4.7).

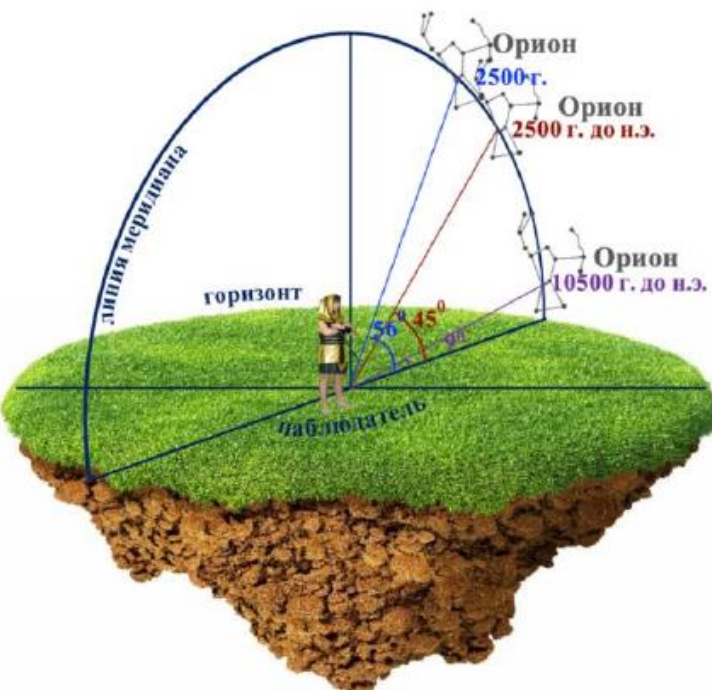


Рис. 4.16. Движение созвездия Орион

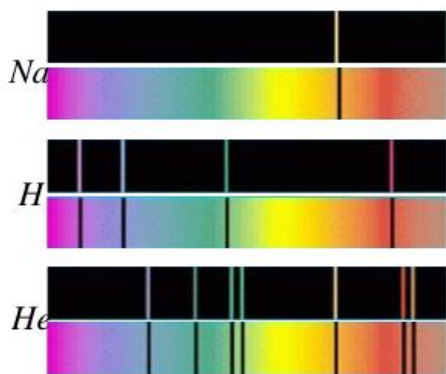


Рис. 4.16. Спектры
испускания (выше) и