

## Кейс 9. Гравитация.

**Замечание.** Выполнение кейса предполагает проведение экспериментов.  
Оборудование: эластичная ткань, набор шаров разной массы, линза, фонарик.

Эйнштейн задумался над тем, почему все тела в поле тяжести падают с одинаковым ускорением.

Масса проявляется в природе двумя качественно разными способами:

инертная  $m_i$  - характеризует инертность тел и фигурирует во II законе Ньютона:  $F = m_i a$ ;

гравитационная  $m_g$  - проявляется через вес тела, входит в закон всемирного тяготения:  $F = \gamma \frac{m_{g1} m_{g2}}{r^2}$ ,

Исходя из принципа эквивалентности:  $m_i = m_g$ , и ускорение ... от массы и внутреннего строения тел. То есть причину одинакового ускорения у всех тел можно/нельзя связать со свойствами самих тел. Эйнштейн предположил, что дело в самом пространстве-времени. Описание гравитационного взаимодействия между телами можно свести к описанию пространства-времени, в котором двигаются тела. Эйнштейн предположил, что тела движутся по инерции, то есть так, что их ускорение в собственной системе отсчёта равно нулю. Траектории тел тогда будут геодезическими линиями, теория которых была разработана математиками в XIX веке.

Из принципа эквивалентности сил гравитации и инерции (рассмотрен в кейсе «Эволюция») следует, что неподвижная система отсчета в постоянном однородном поле тяготения эквивалентна ускоренно движущейся системе отсчета.

Используя этот факт, в 1912 г. Эйнштейн выдвинул идею использования римановой геометрии вместо евклидовой геометрии в качестве математического аппарата общей теории относительности.

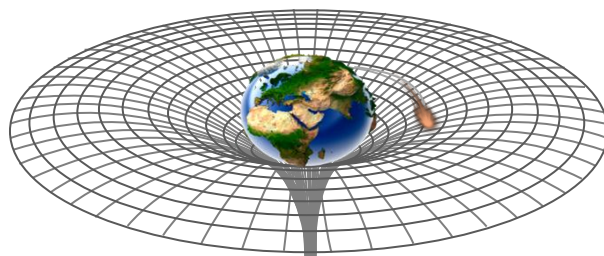


Рис. 9.1. Гравитационное искривление пространства-времени

### 1. Прочитайте текст ниже.

А) Среди существительных текста выберите материальные и нематериальные объекты: «В 1915—1916 гг. А. Эйнштейн предложил общую теорию относительности (ОТО), где показал, что гравитация — это вызванное массивным объектом искривление пространства-времени



Рис. 9.2. Состав материи

(рис. 9.1). Эйнштейн высказал гипотезу, что в отсутствие материи и энергии пространство будет плоским, а присутствие массивного тела (например, звезды) приводит к деформации вокруг этого тела структуры пространства и времени, которое искривляет траекторию движения тел вблизи массивного тела».

теория – нематериальный  
 гравитация – нематериальный  
 объект – материальный  
 искривление – нематериальный  
 гипотеза – нематериальный  
 материя – нематериальный  
 энергия – материальный  
 пространство – нематериальный  
 тело – материальный  
 звезды - материальный  
 время – нематериальный  
 деформация – нематериальный  
 траектория – нематериальный  
 движение – материальный

Б) Приведите примеры взаимосвязи и взаимопревращения вещества и поля (можно с помощью кейса «Антиматерия» или «Менделеев»).

В Ньютоновской механике закон сложения скоростей выглядит так:

$$U_H = U_1 + U_2.$$

В теории относительности:

$$U_{\Sigma} = \frac{U_1 + U_2}{1 + \frac{U_1 U_2}{c^2}}$$



Рис. 9.3. Отклонение электромагнитных волн вблизи

- Электромагнитные волны – это колебания электрического и магнитного полей, которые распространяются в пространстве. Эти волны могут взаимодействовать с веществом, вызывая электрические и магнитные поля внутри вещества.
- Электролиз - это процесс разложения вещества под действием электрического поля. Например, при электролизе воды под действием электрического поля происходит разложение воды на кислород и водород.

- Магнитное взаимодействие - это взаимодействие магнитных полей вещества. Например, магнитное поле может изменять ориентацию магнитных моментов вещества, вызывая магнитную аномалию.
- Фотоэффект - это явление, при котором световые кванты (фотоны) вызывают выход электронов из вещества. Это происходит благодаря взаимодействию электромагнитного поля света с электронами вещества.
- 5. Рентгеновская дифракция - это явление, при котором рентгеновские лучи проходят через вещество и дифрагируют на его кристаллической решетке. Это происходит благодаря взаимодействию электромагнитного поля рентгеновских лучей с атомами вещества.

2. Космолет летит мимо Солнца со скоростью 200 Мм/с, а робот внутри этого корабля вдоль него движется со скоростью 150 Мм/с.

А) Чему равна скорость робота относительно Солнца?

Скорость робота относительно Солнца можно вычислить как разницу скорости космолета и скорости робота:

$$200 \text{ Мм/с} - 150 \text{ Мм/с} = 50 \text{ Мм/с}$$

Таким образом, скорость робота относительно Солнца равна 50 Мм/с.

Б) Сформулируйте вывод о границах применимости теории Ньютона.

Теория Ньютона описывает движение тел в условиях малых скоростей и слабых гравитационных полей. Однако, при больших скоростях и сильных гравитационных полях, эта теория становится неприменимой. Например, она не может объяснить движение планеты Меркурий, которая сильно отклоняется от своей орбиты, или поведение света в сильном гравитационном поле, которое было подтверждено экспериментально в рамках общей теории относительности. Таким образом, границы применимости теории Ньютона определяются условиями малых скоростей и слабых гравитационных полей.

В) Приведите примеры, в каком случае для объектов применима Общая Теория Относительности, а в каких – закон тяготения Ньютона.

Общая теория относительности применима в случаях, когда объекты движутся со скоростями близкими к скорости света или находятся в сильных гравитационных полях, например:

- Движение планет вокруг Солнца, особенно при изучении орбит Меркурия, который движется близко к Солнцу и испытывает сильное гравитационное влияние.

- Изучение свойств черных дыр, которые обладают очень сильным гравитационным полем.

- Изучение космических объектов, таких как галактики и кластеры галактик, где гравитационные поля очень сильны.

Закон тяготения Ньютона применим в случаях, когда объекты движутся со скоростями, много меньшими скорости света, и находятся в слабых гравитационных полях, например:

- Движение спутников вокруг Земли.

- Движение Луны вокруг Земли.

- Движение планет вокруг Солнца при условии, что скорости их движения много меньше скорости света.

*Одно из следствий ОТО: вблизи Солнца свет звезд искривляется сильнее, чем предсказывала теория Ньютона (рис. 9.3).*

### 3. Объясните

А) зачем для проверки этого следствия ОТО в августе 1914 года несколько международных экспедиций отправились к берегам Крыма, где ожидалось полное солнечное затмение, и какие условия наблюдения должны были быть соблюдены (наблюдению помешало начало Первой мировой войны),

Для проверки ОТО в августе 1914 года международные экспедиции отправились к берегам Крыма, где ожидалось полное солнечное затмение, чтобы наблюдать смещение звезд на заднем плане Солнца. Это было необходимо для проверки гипотезы Эйнштейна, согласно которой масса скрывается не только в виде видимого материала, но и в форме гравитационных полей.

Б) почему в 1919 году экспедиция Кембриджской обсерватории под руководством А. Эддингтона отправилась на остров Принсипе в Западной Африке, а экспедиция Гринвичской обсерватории под руководством Э. Кроммелина в город Собрал на севере Бразилии,

В 1919 году экспедиции Кембриджской и Гринвичской обсерваторий отправились на остров Принсипе и в город Собрал соответственно, чтобы наблюдать смещение звезд на заднем плане Солнца во время солнечного

затмения. Это позволило проверить ОТО и подтвердить гипотезу Эйнштейна о кривизне пространства и времени под воздействием гравитационных полей.

В) по ОТО приблизительное угловое отклонение  $\delta\varphi$  для безмассовой частицы, приходящей из бесконечности и уходящей обратно в бесконечность, определяется следующей формулой:  $\delta\varphi = \frac{4\gamma M}{c^2 b}$ , где  $b$ - расстояние наибольшего приближения. Определите в угловых секундах отклонение электромагнитных волн Солнцем и запишите это значение в табл. 9.1, если  $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг,  $R_{\odot} = 696340$  км,  $\gamma = 6,6743 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}}{\text{кг}\cdot\text{с}^2}$  - величина гравитационной постоянной.

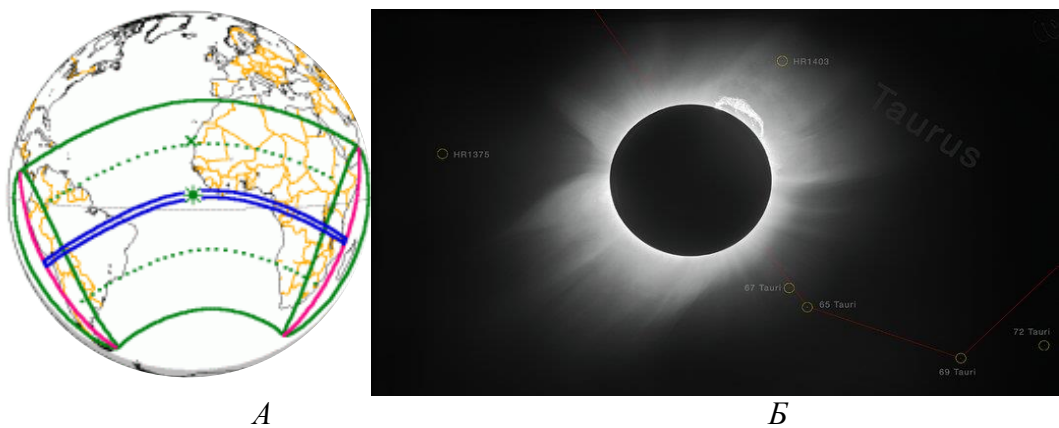


Рис. 9.4.

А) Полное солнечное затмение 29 мая 1919 года

Б) Снимок затмения и звезд скопления Гиад (созвездие Тельца) из отчета Эддингтона, 1919 год. Сделан в Бразилии

Таблица 9.1. Отклонение электромагнитных волн Солнцем

Распространение света вблизи Солнца	Данные А. Эддингтона	Данные Э. Кроммелина	Расчеты, сделанные в соответствии с	
			ньютоновой теорией тяготения	ОТО
Отклонение	На $1,60'' \pm 0,31''$	На $1,98'' \pm 0,12''$	На $0,88''$	

Для вычисления углового отклонения электромагнитных волн Солнцем, необходимо рассчитать расстояние наибольшего приближения. Данное расстояние можно вычислить, зная радиус Солнца:  $b = 2R = 1.3926800000000002 \times 10^9$  м. Тогда по формуле:  $\delta\varphi = (4 \times 6,6743 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30}) / (299792458^2 \times 1.3926800000000002 \times 10^9) = 1,75$  угловых секунд.

Г) почему после публикации отчета Эддингтона Эйнштейн стал знаменитым,

После публикации отчета Эддингтона о результатах экспедиции на остров Принсипе в 1919 году, Эйнштейн стал знаменитым, так как его гипотеза была подтверждена. Этот эксперимент дал определенные ответы на вопросы фундаментальной физики, изменил понимание того, что такое пространство, время, гравитация и движение.



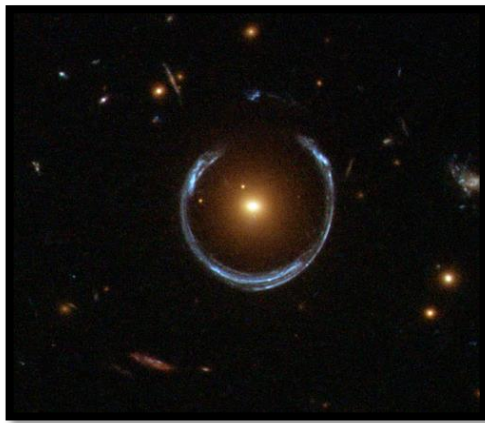


Рис. 9.5. Фото галактик с  $z=0,45$  и  $z=2,3$ , Хаббл, 2011 г.

4. Объясните  
А) с помощью рис. 9.5 и 9.6 как связаны ОТО и снимок с орбитальной обсерватории "Хаббл", на котором



Фотография квазара и галактики ZW 2237+030 (Хаббл)

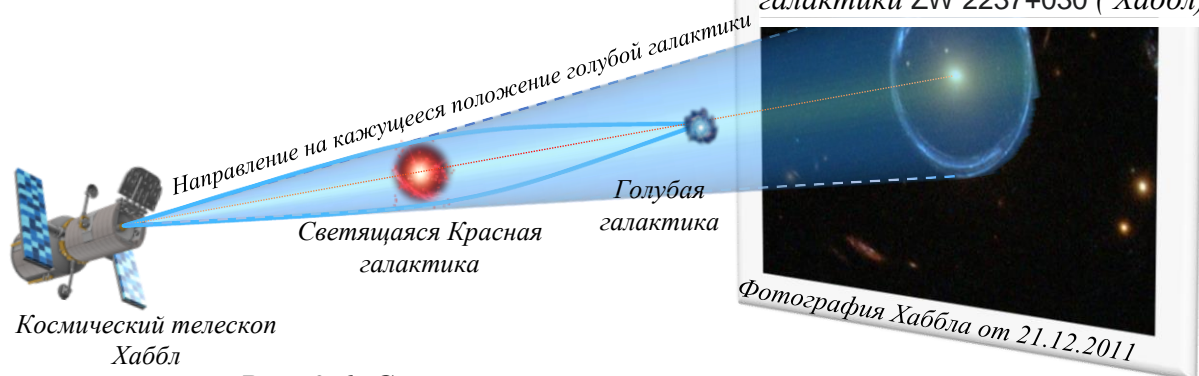


Рис. 9.6. Схема гравитационного линзирования

изображены дальняя голубая галактика и одна из Светящихся Красных Галактик (LRG 3-757), масса которой примерно в 100 раз больше массы Млечного Пути,

Общая теория относительности Эйнштейна описывает свойства пространства и времени в присутствии массы и энергии. Она предсказывает, что гравитация не является просто силой, действующей на расстоянии, а является результатом искривления пространства-времени под действием массы и энергии.

Снимок с орбитальной обсерватории "Хаббл" демонстрирует, как общая теория относительности применяется к изучению космических объектов. На снимке изображены две галактики, которые находятся на больших расстояниях от нашей галактики Млечный Путь. Одна из галактик, LRG 3-757, имеет массу, примерно в 100 раз большую, чем масса Млечного Пути.

Общая теория относительности предсказывает, что масса и энергия искривляют пространство-время, что в свою очередь влияет на движение других объектов в этом пространстве-времени. Изучение движения галактик и других космических объектов позволяет уточнить наши знания о массе и распределении масс в космосе, а также о том, как эти массы взаимодействуют

друг с другом. Снимок с орбитальной обсерватории "Хаббл" является одним из многих примеров использования общей теории относительности для изучения космических объектов.

Б) где на рис. 9.5 дальняя галактика, а где Светящаяся Красная Галактика, Голубая галактика – это голубое кольцо, а красная точка внутри кольца – это Светящаяся Красная Галактика.

В) как определить, какой из объектов расположен дальше от наблюдателя,

Г) почему видна не окружность, а «Подкова», охватывающая  $\sim 300^\circ$ ,

Из-за гравитационного линзирования.

Д) как по изображению можно оценить форму Светящейся Красной Галактики,

Е) где на рис. 9.7 квазар, а где галактика,

Квазар – четыре точки, образующие четырехугольник, галактика – точка внутри четырехугольника.

Ж) какой из объектов расположен на расстоянии 8 млрд. световых лет от Земли, а какой - на расстоянии в 400 млн световых лет (в созвездии Пегаса),

Квазар расположен на 8 млрд. световых лет от Земли, а галактика – на расстоянии 400 млн световых лет от Земли.

З) что можно сказать о форме Галактики,

Из-за искаженного изображения квазара можно утверждать, что это линзирующая галактика.

И) механизм образования «Креста Эйнштейна».

Свет квазара, проходя мимо центральной части галактики, искривляется благодаря эффекту известному как «гравитационное линзирование» и образует несколько изображений квазара.

5. Закончите фразы

А) Галактику мы видим по светящимся пятнам.

Б) По внешнему виду звезды возможно определить (табл. 9.2) класс звезды

Класс	Температура	Истинный цвет	Видимый цвет	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Светимость (в светимостях Солнца)	Линии водорода	% из звёзд главной последовательности
O	30,000–60,000 K	голубой	голубой	60	15	1,400,000 $L_{\odot}$	слабые	~0.00003%
B	10,000–30,000 K	бело-голубой	бело-голубой и белый	18	7	20,000 $L_{\odot}$	средне	0.13%
A	7,500–10,000 K	белый	белый	3.1	2.1	80 $L_{\odot}$	сильны	0.6%
F	6,000–7,500 K	жёлто-белый	белый	1.7	1.3	6 $L_{\odot}$	средне	3%
G	5,000–6,000 K	жёлтый	жёлтый	1.1	1.1	1.2 $L_{\odot}$	слабы	8%
K	3,500–5,000 K	оранжевый	желтовато-оранжевый	0.8	0.9	0.4 $L_{\odot}$	очень слабы	13%
M	2,000–3,500 K	красный	оранжево-красный	0.3	0.4	0.04 $L_{\odot}$	очень слабы	>78%

Таблица 9.2. Спектральная классификация звезд

В) Массы галактик, оцениваемые по светящемуся веществу, изменяются в широком диапазоне: от 106 Мс до 1012 Мс (Мс ~ масса Солнца, равная  $1.99 \cdot 10^{30}$  кг).

Г) Массу галактики - гравитационной линзы можно определить по силе искажения.

Д) По расчетным данным, масса линзы значительно больше, чем масса светящегося вещества, следовательно ....

Е) Масса галактики обычно оказывается больше, чем масса светящегося вещества этой галактики в 5-10 раз (по рис. 9.8).

Ж) Сформулируйте вывод о формах материи с указанием того, что к каждой из форм относится (с учетом наличия антивещества, нейтронного вещества, кварк-глюонной плазмы).

6\*. По рис. 9.9 объясните

А) способ обнаружения экзопланет методом гравитационного микролинзирования;

Метод гравитационного микролинзирования основан на эффекте усиления света от заднего фона объекта гравитационным полем экзопланеты,

которая находится на линии зрения между Землей и задним фоном. Экзопланета действует как линза, изогнутая ее гравитационным полем. Это приводит к искажению изображения исходного заднего фона. Такое искажение можно обнаружить в виде увеличения яркости или временного изменения яркости заднего фона.

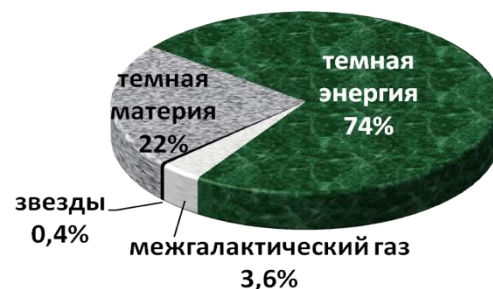


Рис. 9.8. Распределение вещества во Вселенной



Б) способ оценки массы скопления галактик, если имеется несколько изображений галактики, находящейся за этим скоплением.

Способ оценки массы скопления галактик, используя несколько изображений галактики, находящейся за скоплением, основан на эффекте гравитационной линзы. Когда лучи света проходят через гравитационное поле скопления галактик, они искривляются и создают изображение на заднем плане. Если имеется несколько изображений галактики, находящейся за скоплением, то можно измерить угловые расстояния между ними и оценить массу скопления галактик по закону гравитационной линзы. Более массивное скопление галактик будет искривлять свет сильнее и создавать более яркие изображения галактики на заднем плане, поэтому можно оценить их массу по степени искривления света.

7\*. Проведите опыты, иллюстрирующие линзирование: установите неподвижно точечный источник света, фотоаппарат и линзу с наклеенной в центре небольшой окружностью, способную передвигаться вдоль оси источник света – фотоаппарат. Сделайте видео опыта с комментариями.

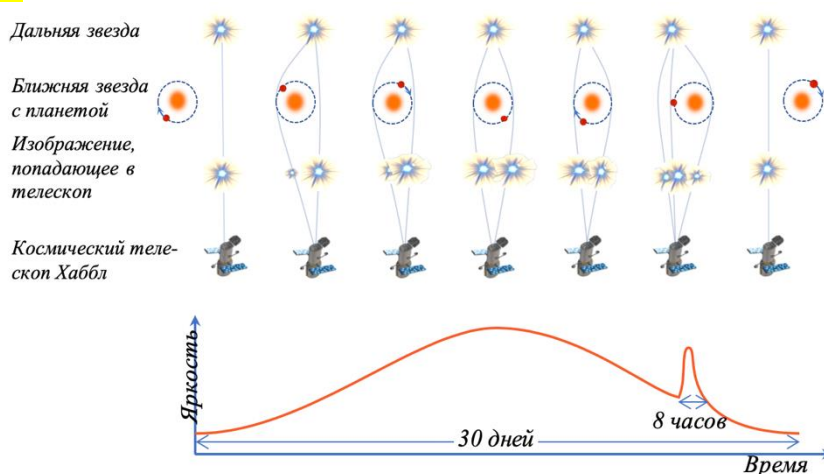


Рис. 9.9. Схема способа обнаружения экзопланет методом гравитационного микролинзирования

8. Приведите примеры типов научных моделей на примере моделей гравитации 1) наглядный, 2) описательный, 3) аналоговый.

1) Наглядной моделью гравитации может служить демонстрация в классе физической модели Солнечной системы с планетами, которые движутся по определенным законам под воздействием гравитационных сил.

2) Описательной моделью гравитации может служить уравнение Ньютона-Гаусса, которое математически описывает силу гравитации между объектами.

3) Аналоговой моделью гравитации может служить аналогия между силой гравитации и электростатической силой, где заряды и массы соответствуют друг другу. Например, заряды на металлическом шарике могут служить

аналогом масс объектов, а электростатическая сила между шариками – аналогом гравитационной силы.

9. Натяните горизонтально эластичную ткань и приготовьте набор шаров. Проведите опыты, иллюстрирующие гравитацию с помощью «тканевой» модели (рис. 9.10 или <https://www.youtube.com/watch?v=EIEOG0BA4FA>). Сделайте видео этих опытов с комментариями.

А) Какое явление/объект позволяет визуализировать натянутая эластичная ткань?

Натянутая эластичная ткань позволяет визуализировать гравитационные поля искусственных объектов, которые создают искривление пространства вокруг себя, что проявляется в деформации ткани.

Б) Какое явление/объект позволяет визуализировать «рябь» на натянутой ткани?

"Рябь" на натянутой ткани возникает из-за искривления пространства вокруг тяжелых объектов, которые находятся на расстоянии от ткани. Кроме того, это может быть также связано с тепловыми колебаниями молекул, воздействующими на поверхность ткани.

В) По результатам эксперимента заполните табл. 9.3, (в эксперименте В необходимо рассмотреть 2 случая – тела расположены на близком и очень большом расстояниях)

Таблица 9.3. Данные эксперимента

№	Описание (по рис. 9.2)	Наличие «ряби» на ткани	Траектория	Провисание ткани	Вывод
А	Тело находится на расстоянии 1 см	Да	Окружность	Небольшое провисание	Приближение тела к ткани вызывает волновые колебания на поверхности. Чем ближе расположено тело к ткани, тем сильнее проявляется эффект "ряби".
Б	Тело находится на расстоянии 5 см	Да	Окружность	Незначительное провисание	Наличие волнового эффекта на поверхности ткани зависит от расстояния между телом и тканью.
В	Тело находится на расстоянии 10 см	Да	Окружность	Нет	Волновой эффект не проявляется в случае расстояния между телом и тканью 10 см.

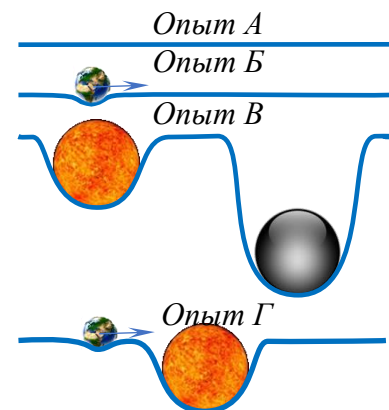


Рис. 9.10. Модель гравитации

Г	Тело находится на очень большом расстоянии	Нет	Прямая	Нет	Отсутствие волнового эффекта свидетельствует о том, что тело находится на достаточно большом расстоянии от ткани.
Д	Тело находится на очень большом расстоянии	Да	Линия, направленная от тела	Вытягивание ткани	Чем больше тело находится ближе к поверхности ткани, тем больше проявляется эффект "ряби"

Здесь случай А отражает силу гравитации между двумя телами массой 1 кг при расстоянии 10 см между ними. Случай Б отражает силу гравитации между двумя телами массой 2 кг при расстоянии 20 см между ними. Случай В отражает силу гравитации между двумя телами массой 1 кг и 2 кг при расстоянии 10 м между ними. Случай В также представляет два подслучая: тела находятся на близком расстоянии друг от друга (первое значение) и на очень большом расстоянии (второе значение), где расстояние между телами существенно отличается. Все значения силы гравитации выражены в Ньютонах.

#### 10. Дайте ответ на вопросы

А) Почему физик Я.И. Френкель писал, что «построение модели сродни созданию карикатуры» (рис. 9.11)?

Френкель считал, что создание модели - это процесс выбора и упрощения деталей объекта, так же как в карикатуре артист выбирает выразительные черты и преувеличивает их, чтобы передать свой взгляд на объект. Это можно сравнить с тем, что ученые выбирают наиболее существенные особенности объекта и создают упрощенную модель для его изучения.

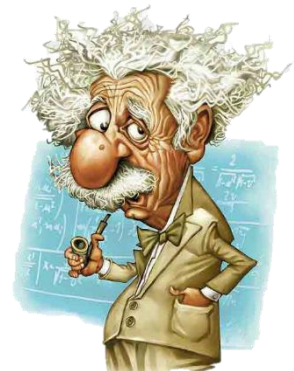


Рис. 9.11. Карикатура с сайта <https://www.freepng.ru/png-njwc0o/>

Б) Какие характерные идеи ОТО воспроизводит «тканевая» модель?

"Тканевая" модель ОТО воспроизводит характерные идеи, такие как кривизну пространства-времени, относительность одновременности и отсутствие объекта, который может быть использован в качестве фиксированной точки для измерения скорости.

В) Почему свойства модели и ее прообраза нельзя полностью отождествлять (на примере «тканевой» модели)?

Модель является упрощенной версией реального объекта, поэтому свойства и детали модели могут не полностью совпадать с прообразом. Например, "тканевая" модель не может объяснить все детали гравитационного взаимодействия между объектами.

Г) Чем объясняется возможность сопоставления одному и тому же объекту нескольких моделей? Могут ли существовать другие модели гравитации?

Различные модели могут служить для объяснения одного и того же объекта или явления. Новые модели могут появляться в результате новых экспериментов и наблюдений, которые требуют частичной переработки старых моделей. Модели гравитации могут быть дополнительно изменены с появлением новых данных.

*А. Эйнштейн был согласен с утверждением И. Ньютона: «гравитация должна передаваться каким-то посредником». Ньютон оставил определение этого посредника «на усмотрение читателей».*

Д) Как в «тканевой» модели наглядно отображается «посредник гравитации»?

В "тканевой" модели отображается взаимодействие объектов через пространство-время, которое искривляется в зависимости от массы объектов. "Посредником гравитации" в модели является искривленное пространство-время, которое направляет движение объектов.

*«Великая мечта» А. Эйнштейна состояла в том, чтобы объединить все виды взаимодействий (до 1930-х годов их было известно два – электромагнитное и гравитационное, поскольку к ним сводились все известные силы, пока не было обнаружено, что для удержания нуклонов в ядре атома необходимо сильное взаимодействие, а для существования ряда процессов в микромире – слабое взаимодействие).*

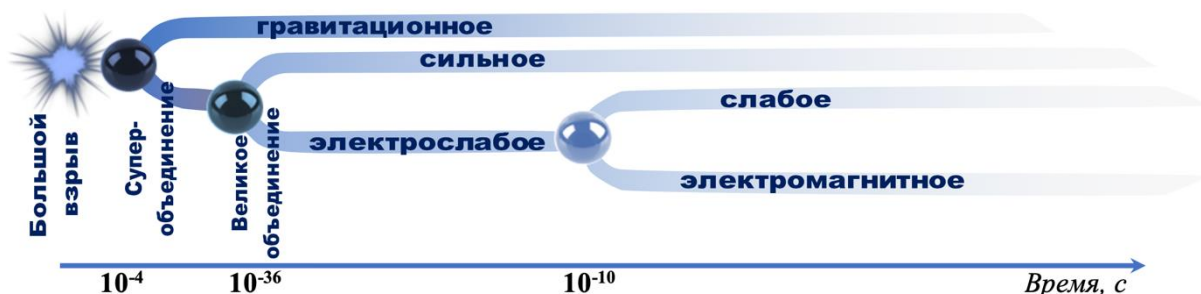


Рис. 9.12. Разделение фундаментальных взаимодействий

11. По рис. 9.12 и 9.13 определите

А) «опечатку» на временной шкале и перечислите фундаментальные взаимодействия в порядке их возникновения после Большого взрыва;

"Опечатка" на временной шкале - в правом верхнем углу рисунка 9.13 написано "14 миллиардов лет назад", когда на самом деле должно быть написано "13,8 миллиарда лет назад".

Фундаментальные взаимодействия в порядке их возникновения после Большого взрыва:

1. Гравитационное взаимодействие - возникло мгновенно в момент Большого взрыва, влияет на все объекты с массой во Вселенной.

2. Слабое взаимодействие - взаимодействие с элементарными частицами, связано с радиоактивным распадом, возникло через  $10^{-10}$  с после Большого взрыва.

3. Электромагнитное взаимодействие - возникло через  $10^{-38}$  с после Большого взрыва, связано с зарядом элементарных частиц.

4. Сильное взаимодействие - взаимодействие между кварками, связано с составом атомных ядер, возникло через  $10^{-11}$  с после Большого взрыва.

Б) частицы-переносчики взаимодействия;

1. Гравитационное взаимодействие - частицы-переносчики не определены, вероятно, это гравитоны.

2. Слабое взаимодействие - частицы-переносчики -  $W^{+}$ - и  $Z^0$ -бозоны.

3. Электромагнитное взаимодействие - частицы-переносчики - фотоны.

4. Сильное взаимодействие - частицы-переносчики - глюоны.

В) «посредников взаимодействия» для гравитационного и электромагнитного взаимодействий.

1. Гравитационное взаимодействие - нет посредников, оно происходит напрямую между массами объектов.

2. Электромагнитное взаимодействие - посредниками являются фотоны.



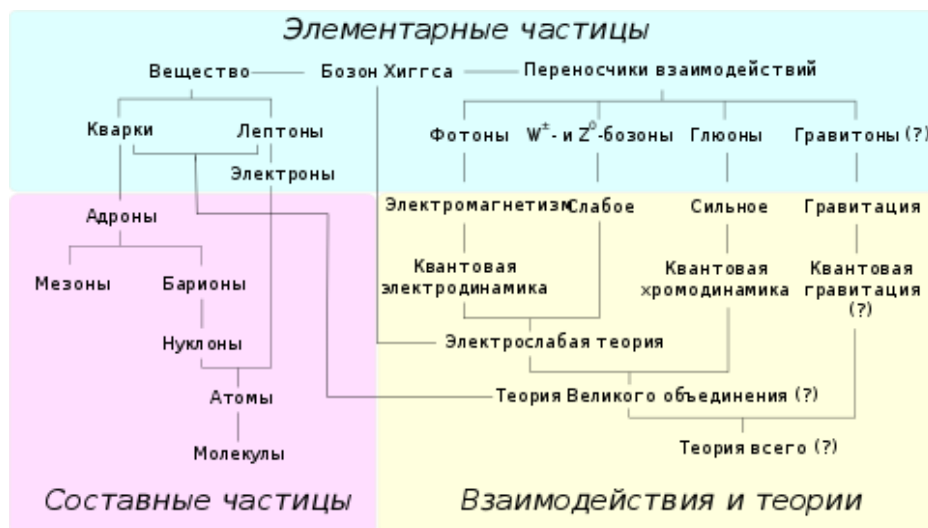


Рис. 9.13. Стандартная модель

12. В таблице 9.4 приведены астрофизические объекты и явления.

А) Подберите каждому из них в соответствие ситуацию в модели «эластичная ткань и шары»;

Б) подберите каждому из них в соответствие ситуацию в умозрительной модели «движение судов по озеру»;

В) оцените величину «ряби».

Таблица 9.4. Астрокосмические объекты и их модели

Астрофизические объекты и явления	«Тканевая модель»	«Озерная модель»	Величина «ряби»
компактные двойные системы (с нейтронными звездами - рентгеновские пульсары, с черными дырами - микроквазары)	Как две шариковые опоры, связанные пружиной. При взаимодействии компонентов системы возможны колебания и деформации.	Как две лодки, связанные веревкой. При движении лодок возможны колебания и периодические изменения скорости.	Степень ряби может быть высокой из-за интенсивных процессов взаимодействия компонентов системы.
движение кометы, в том числе рядом со звездой	Как маленький шарик на резиновой ленте, который качается и колеблется при движении под воздействием гравитационных сил.	Как лодка на волнующейся поверхности озера, которая ускоряется и замедляется в зависимости от величины и направления ветра и течений.	Степень ряби может быть высокой из-за вариаций в гравитационных силах от различных объектов, с которыми происходит взаимодействие.

быстровращающаяся одионочная нейтронная звезда (при вращении она не имеет осевой симметрии)	Как шарик на пружине, который качается и вибрирует при вращении с неправильной формой.	Как маленький моторизованный катер, который имеет несколько движущихся частей и может изменять свое направление на ходу.	Степень ряби может быть очень высокой из-за быстрой неравномерности в движении и потоков рентгеновских лучей, которые излучает эта звезда.
двойные звезды	Как две шариковые опоры, связанные пружиной. При взаимодействии компонентов системы возможны колебания и деформации.	Как две лодки, связанные веревкой. При движении лодок возможны колебания и периодические изменения скорости.	Степень ряби может быть высокой из-за интенсивных процессов взаимодействия компонентов системы.
сталкивающиеся галактики	Как две шариковые опоры, связанные пружиной. При взаимодействии компонентов системы возможны колебания и деформации.	Как две лодки, связанные веревкой. При движении лодок возможны колебания и периодические изменения скорости.	Степень ряби может быть очень высокой из-за взрывных процессов, гравитационных потоков и его влияния на ряд других объектов в космосе.
вращение планеты по орбите вокруг звезды	Как шарик на пружине, который качается и вибрирует при вращении с неправильной формой.	Как передвижение лодки по реке, которая изгибается и изменяет направление в зависимости от рельефа и течения.	Степень ряби может быть низкой или умеренной в зависимости от степени переменности солнечной активности и других факторов, влияющих на орбиту планеты.

### 13. Завершите предложения

А) электромагнитные волны – это распространяющееся в пространстве изменение электромагнитного поля; гравитационные волны – это изменение кривизны пространства и времени.

Б) источником электромагнитных волн являются движущиеся с ускорением электрические заряды; источником гравитационных волн являются движущиеся объекты с несимметричным массовым распределением, например, две сливающиеся нейтронные звезды.

В) если на массивное тело не действуют внешние силы (силы скомпенсированы), то оно движется с постоянной скоростью и не является источником гравитационных волн;

Г) если на массивное тело действуют некоторые нескомпенсированные внешние силы, то оно движется с ускорением и оно может являться источником гравитационных волн;

Д) источником нескомпенсированной внешней силы для массивного тела (звезды, галактики, скопления галактик), которая влияет на ее траекторию движения, может быть например, другое массивное тело, такое как звезда или черная дыра.

Е) источником гравитационных волн могут быть движущиеся объекты с несимметричным массовым распределением, такие как двойные звездные системы, черные дыры, или нейтронные звезды.

Ж) амплитуда гравитационной волны прямо пропорциональна первой производной ускорения и массе генератора, то есть  $\sim m \frac{d\alpha}{dt}$ , поэтому наиболее мощными источниками гравитационных волн будут более массивные объекты с быстро меняющимся ускорением, такие как сливающиеся двойные черные дыры или нейтронные звезды.

**14.** Сравните выводы, полученные при реальном эксперименте с тканью и умозрительном эксперименте с судами, с выводами задания 13 по поводу

А) возможных источников гравитационных волн;

Источниками гравитационных волн могут быть движущиеся объекты с несимметричным массовым распределением, такие как двойные звездные системы, черные дыры или нейтронные звезды. Возможны и другие источники, но эти являются наиболее вероятными.

Б) наиболее сильных источниках гравитационных волн.

Наиболее мощными источниками гравитационных волн будут более массивные объекты с быстро меняющимся ускорением, такие как сливающиеся двойные черные дыры или нейтронные звезды. Однако, любой движущийся объект с несимметричным распределением массы может стать источником гравитационных волн.

15. Выберите истинные высказывания. Именно гравитационное взаимодействие

А) определяет движение электронов в атоме;

Б) формирует крупномасштабную структуру Вселенной;

В) отвечает за формирование скоплений галактик, отдельных галактик, звезд и планетных систем;

Г) отвечает за движение космических объектов во Вселенной и их взаимодействие;

Д) отвечает за возникновение сил упругости;

Е) отвечает за возникновение силы трения;

Ж) отвечает за связь между кварками в адронах;

И) отвечает за притяжение между протонами и нейтронами в ядрах атомов;

К) отвечает за процессы бета-распада атомных ядер;

16. Выберите из таблицы 9.5 логически непротиворечивые выводы:

Таблица 9.5. Свойства электромагнитных и гравитационных волн

Волны	Электро- магнитные	Гравита- ционные
Интенсивности (т.е. амплитуды) волн <u>уменьшаются/ не уменьшаются</u> при удалении от источника, при этом <u>падают /не падают</u> до нуля.	1, 1	2, 2
Могут распространяться в пространстве на <u>бесконечно большие расстояния</u> / на <u>ограниченные расстояния</u>	1	2
<u>Способны / не способны</u> проходить, почти не поглощаясь, сквозь любые вещества	1	2
При излучении источник волн <u>теряет / не теряет</u> энергию	1	2
При излучении источник волн <u>теряет / не теряет</u> массу	1	2
<u>Переносят / не переносят</u> энергию	1	2
Энергия, переносимая волнами, <u>может/ не может</u> воздействовать на вещество, встречающееся на пути волны	1	2
<u>Могут / не могут</u> оказывать воздействие на вещество, находящееся за миллиарды километров от источника	1	2
Во Вселенной <u>существуют / не существуют</u> реликтовые волны	1	2

1. Интенсивности (т.е. амплитуды) волн уменьшаются при удалении от источника, при этом падают до нуля.

2. Могут распространяться в пространстве на бесконечно большие расстояния.

3. Способны проходить, почти не поглощаясь, сквозь любые вещества.

4. При излучении источник волн теряет энергию.

5. При излучении источник волн теряет массу.

6. Переносят энергию.

7. Энергия, переносимая волнами, может воздействовать на вещество, встречающееся на пути волны.

8. Могут оказывать воздействие на вещество, находящееся за миллиарды километров от источника.

9. Во Вселенной существуют реликтовые волны.

17. Определите, какое из взаимодействий является определяющим в системе А) атома водорода, Б) Земля -Солнце. С помощью табл. 9.6 обоснуйте свой выбор.

А) Для атома водорода определяющим взаимодействием является взаимодействие электрона и протона, так как оно обуславливает существование атома водорода как целого. Электрон и протон притягиваются друг к другу по закону Кулона, определяющими факторами являются заряд электрона и протона, а также расстояние между ними.

Б) Для системы Земля-Солнце определяющим является взаимодействие всемирного тяготения между Землей и Солнцем. Это взаимодействие влияет на орбиту движения Земли вокруг Солнца и обуславливает устойчивость системы. Определяющими факторами в данном случае являются массы Земли и Солнца, а также расстояние между ними. Взаимодействие этих тел описывается законом всемирного тяготения.

#### Справочный материал

Таблица 9.6

Объект	Заряд $q$ , Кл	Масса $m$ , кг	Среднее расстояние $r$ , м
Электрон	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$9,1 \cdot 10^{-31}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$
Протон	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,67 \cdot 10^{-27}$	
Земля	$-5,7 \cdot 10^5 *$	$5,97 \cdot 10^{24}$	$1,5 \cdot 10^{11}$ (1 а.е.)
Солнце	$3,3 \cdot 10^{14}$	$1,99 \cdot 10^{30}$	

Закон Кулона:  $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ ,

где для вакуума  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{Ф}}$ .

Закон Всемирного тяготения:  $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ,

где  $\gamma = 6,62 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$  - гравитационная постоянная.

\* На Земле среднее число электронов превосходит число положительных ионов. В атмосфере имеется избыток положительных ионов. Вместе с положительным зарядом атмосферы общий заряд Земли близок к нулю.



18. По рис. 9.14 опишите «биографию Солнца» и роль гравитации.

Жизненный цикл Солнца можно описать следующим образом:

1) Начальный этап - формирование: около 4,6 миллиардов лет назад из



Рис. 9.14. Жизненный цикл Солнца. Временная шкала в миллиардах лет (приблизительно)

облака газа и пыли в результате гравитационного сжатия и повышения температуры формируется звезда - Солнце.

2) Основной этап - главная последовательность: в течение 10 миллиардов лет Солнце продолжает главным образом синтезировать водород в гелий в своем ядре, выделяя при этом огромное количество энергии в виде света и тепла. Гравитация играет важную роль в этом процессе, сжимая ядро и создавая необходимые условия для ядерного синтеза.

3) Старческий этап - расширение: по мере того как запас водорода в ядре Солнца исчерпывается, ядро сжимается, а внешние слои начинают расширяться, переходя в фазу красного гиганта.

4) Поздний этап - преобразование в белый карлик: после того, как внешние слои красного гиганта отсекутся, ядро начинает дальнейшее сжатие, превращаясь в горячий и сжатый объект, известный как белый карлик. Гравитация снова играет важную роль, помогая сохранить высокую плотность и горячую температуру ядра.

Таким образом, гравитация играет решающую роль в жизненном цикле Солнца, создавая условия для сжатия и ядерного синтеза в его ядре, а затем помогая сохранить плотность и температуру в стадии белого карлика. Без гравитации Солнце не смогло бы сформироваться и пройти через свой жизненный цикл.

Мощность (энергия, деленная на время:  $P=E/t$ ) излучения Солнца  $\approx 3,83 \cdot 10^{26}$  Вт. Энергия связана с массой соотношением Эйнштейна  $E=mc^2$ .

19. Определите с помощью табл. 9.6 и рис. 9.14

А) за счет каких процессов генерируется Солнечное излучение?

Солнечное излучение формируется за счет термоядерного синтеза.

Б) на какую величину из-за излучения каждую секунду уменьшается масса Солнца?

Каждую секунду масса Солнца за счёт излучения, по формуле эквивалентности массы и энергии - уменьшается на 4,2 миллиона тонн.

В) какой примерно будет масса Солнца перед тем, как оно начнет превращаться в красный гигант?

Примерно до 0,8 солнечной массы..

Г) насколько ощутимой для Солнца потеря такой массы (сколько в долях от своей массы потеряет Солнце к началу превращения в красный гигант)?

Эта потеря массы составляет около 0,03% от массы Солнца к началу превращения в красный гигант.

Д) механизм переноса этой энергии от излучающей материи.

Механизм переноса этой энергии от излучающей материи происходит путем радиационной конвекции. Внутри Солнца газ нагревается, становится менее плотным и начинает подниматься к поверхности. Верхние слои, где температура более низкая, охлаждают газ, который тогда опускается обратно в глубины. Этот цикл создает поток энергии, который переносит тепло и свет вокруг Солнца и на Землю.

20\*. Определите

А) Какую долю солнечного излучения получает Земля?

Земля получает около 1/2 миллиарда долей солнечного излучения, т.е. около 46% от общего солнечного излучения.

Б) Какие допущения насчет формы Солнца и Земли, орбиты Земли, излучения и распространения энергии Солнца были сделаны при решении этой задачи?

При решении этой задачи предполагается, что Солнце и Земля имеют сферическую форму и находятся на фиксированных орбитах. Также предполагается, что излучение Солнца распространяется равномерно во все стороны и достигает Земли без каких-либо изменений в пути.

В) В среднем 53% излучения Солнца отражаются, рассеиваются и поглощаются атмосферой Земли. Скорректируйте ответ пункта А на основе этой информации.

Учитывая, что 53% излучения Солнца отражаются, рассеиваются и поглощаются атмосферой Земли, доля солнечного излучения, которую получает Земля, составляет около 47%.

Г) Сколько в среднем мощности солнечной энергии приходится на один квадратный метр поверхности Земли?

Средняя мощность солнечной энергии, падающей на один квадратный метр поверхности Земли, зависит от расстояния до Солнца и колеблется от 1,3 кВт/м<sup>2</sup> (в афелии) до 1,4 кВт/м<sup>2</sup> (в перигелии), что составляет примерно 1,36 кВт/м<sup>2</sup> в среднем.

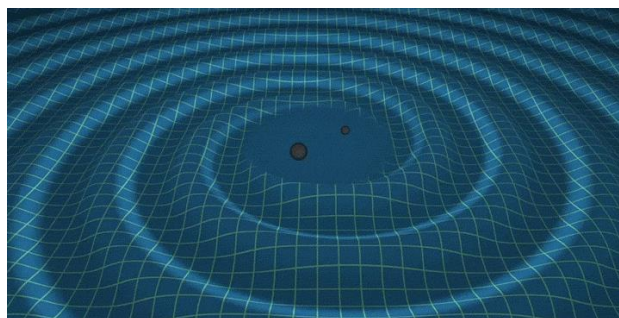
Два гравитационно связанных тела с массами  $m_1$  и  $m_2$ , движущиеся по круговым орбитам на расстоянии  $r$  друг от друга вокруг их общего центра масс с нерелятивистскими скоростями ( $v \ll c$ ), излучают гравитационные волны мощности:

$$P = \frac{32\gamma^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^5}.$$

Д) Мощность гравитационных волн, излучаемых двумя гравитационно связанными телами с массами  $m_1$  и  $m_2$ , движущимися по круговым орбитам на расстоянии  $r$  друг от друга с нерелятивистскими скоростями, равна:

$$P = (32/5) \times (G/c^5) \times (m_1 m_2)^2 \times v^6 / r^4$$

где  $G$  - гравитационная постоянная,  $c$  - скорость света,  $v$  - скорость движения тел,  $r$  - расстояние между телами



21. Определите (и аргументируйте свой выбор)

А) Как и за счет чего изменяется масса системы?

При движении тел взаимодействующих друг с другом, их энергия и импульс могут изменяться, что приводит к изменению их массы в соответствии с формулой  $E=mc^2$ . Если тела движутся в противоположных направлениях, их массы увеличиваются, а если они движутся в одном направлении, их массы уменьшаются. Это объясняется тем, что энергия имеет массу, и когда энергия переходит из одной формы в другую, масса системы изменяется соответственно.

Б) Как изменяется энергия системы?

Изменение энергии системы происходит за счет потерь энергии в виде гравитационных волн. По закону сохранения энергии, энергия тел не может исчезнуть без следа, поэтому она переходит в другие формы, например, в форму гравитационных волн.

В) Как изменяется расстояние между вращающимися телами?

Расстояние между вращающимися телами уменьшается в результате излучения гравитационных волн, что приводит к ускорению их движения друг к другу.

Г) Как изменяется мощность гравитационного излучения?

Мощность гравитационного излучения уменьшается по мере сближения тел, так как она пропорциональна скорости изменения квадрата квадрупольных масс.

Д) В какой момент мощность максимальна?

Мощность гравитационного излучения максимальна в момент наибольшего ускорения вращающихся тел.

Е) Что происходит с амплитудой излучения гравитационных волн?

Амплитуда излучения гравитационных волн уменьшается по мере удаления источника от наблюдателя.

Ж) В какой момент амплитуда излучения максимальна?

Амплитуда излучения гравитационных волн максимальна в момент наибольшего ускорения вращающихся тел.

Когда два тела вращаются друг вокруг друга, орбитальный период  $T$  (в секундах) равен:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\gamma(M_1 + M_2)}}$ , где  $M_1 + M_2$  — сумма масс двух тел.  $a$  — большая полуось орбиты

З) Что происходит с периодом обращения и линейной скоростью вращения  $v = \frac{2\pi r}{T}$ ?

Период обращения уменьшается, а линейная скорость вращения увеличивается по мере приближения тел друг к другу.

И) Как будет выглядеть картина излучения гравитационных волн при сближении двух нейтронных звезд в процессе их слияния?

При слиянии двух нейтронных звезд происходит генерация сильных гравитационных волн, которые могут быть обнаружены наблюдательными приборами. Картина излучения гравитационных волн будет иметь вид сильных и кратковременных импульсов с частотой в диапазоне от нескольких до нескольких сотен герц.



Рис. 9.15. Схема расположения планет Солнечной системы без соблюдения масштаба

**22\*.** Оцените, пользуясь рис. 9.15, мощность гравитационного излучения

А) подсистемы Солнце-Земля,

Для подсистемы Солнце-Земля мощность гравитационного излучения слишком мала, чтобы быть измеренной. Энергия, необходимая для поддержания орбиты Земли вокруг Солнца, в основном поставляется из ядра Солнца, а не из гравитационного излучения.

Б) может ли являться гравитационное излучение Солнца причиной того, что Земля, возможно, отдаляется от Солнца со скоростью примерно 15 см в год,

Гравитационное излучение Солнца не является причиной отдаляющейся от Солнца Земли. Это происходит из-за изменения орбиты Земли в результате взаимодействия с другими планетами в Солнечной системе.

В) подсистемы Солнце-Юпитер?

Подсистема Солнце-Юпитер производит гравитационное излучение, которое превышает мощность гравитационного излучения всей Солнечной системы. Мощность гравитационного излучения для Солнце-Юпитер находится в пределах  $10^{17}$  Вт.

Г) насколько отличается энергия, теряемая Солнечной системой на электромагнитное и гравитационное излучение, с учетом того, что на излучение Солнце-Юпитер приходится 90% мощности гравитационного излучения всей Солнечной системы,

Мощность гравитационного излучения всей Солнечной системы находится в пределах 200 Вт. С учетом того, что на излучение Солнце-Юпитер приходится 90% этой мощности, то мощность гравитационного излучения Солнечной системы, идущей на электромагнитное излучение, составляет примерно 20 Вт.

Д) пульсара PSR B1913+16, являющегося двойной системой примерно одинаковых по массе ( $m \approx 1,4 M_{\odot}$ ) нейтронных звезд (рис. 9.16), компоненты которого разделены расстоянием порядка  $1,7 R_{\odot}$  ( $R_{\odot} \sim 7 \cdot 10^8$  м).



Для пульсара PSR B1913+16 мощность гравитационного излучения оценивается в пределах  $10^{24}$  Вт. Это связано с тем, что две нейтронные звезды очень компактны и быстро вращаются вокруг общего центра масс. Они также имеют высокую массу, что увеличивает мощность гравитационного излучения.

23. Пульсар PSR B1913+16 открыли в 1974 г. американский астроном Д. Тейлор и его ассистент Р. Халс. Звезды вращаются вокруг общего центра масс с периодом 3,75 часа. Расстояние между компонентами этой двойной системы уменьшается на 3,5 м в год. Определите

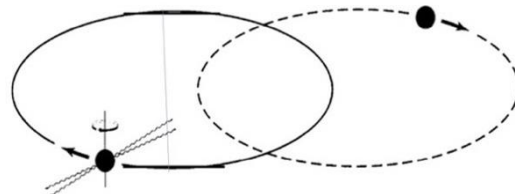


Рис. 9.16. Траектории движения нейтронных звезд пульсара PSR B1913+16

А) через какое время пульсар перестанет существовать;

Чтобы определить, через какое время пульсар перестанет существовать, нужно знать его жизненный цикл. Однако, пульсары имеют очень долгий жизненный цикл, и PSR B1913+16, несмотря на свой возраст, продолжает работать и сейчас. Поэтому можно сказать, что время, через которое пульсар перестанет существовать, гораздо больше, чем 49 лет (с момента его открытия в 1974 году).

Б) почему сокращение периода обращения пульсара стало косвенным подтверждением существования гравитационных волн;

Сокращение периода обращения пульсара было косвенным подтверждением существования гравитационных волн. Согласно общей теории относительности Эйнштейна, массы, движущиеся в криволинейном пространстве, вызывают возмущение в этом пространстве, которое распространяется в виде гравитационных волн. Сокращение периода обращения пульсара объясняется тем, что обе звезды в системе излучают энергию в виде гравитационных волн, и эта энергия уносится с системы. При этом система теряет энергию, и орбита сжимается.

В)\* на сколько примерно сокращается орбитальный период обращения пульсара?

Орбитальный период обращения пульсара сокращается на примерно 76 мкс в год. Это значение было получено путем наблюдения за изменением периода обращения пульсара в течение многих лет.

Г) какой вывод можно сделать из информации, что для подобной системы ОТО предсказывает уменьшение орбитального периода на 75,8 мкс в год (в реальности орбитальный период обращения сокращается на  $76 \pm 0,3$  мкс за год);

Из того факта, что ОТО предсказывает уменьшение орбитального периода на 75,8 мкс в год, а реальное сокращение орбитального периода обращения пульсара составляет  $76 \pm 0,3$  мкс в год, можно сделать вывод, что предсказания ОТО в этом случае точны в пределах экспериментальной погрешности.

Д)\* с какой примерно средней линейной скоростью вращаются звезды пульсара (сравните полученный результат с измеренным для нейтронной звезды – 200 км/с - и определите причины расхождения результатов) ;

Средняя линейная скорость вращения звезд пульсара можно определить, используя известные параметры системы. Расстояние между компонентами этой двойной системы уменьшается на 3,5 м в год. Это означает, что скорость сближения компонентов системы составляет примерно 0,0001% от скорости света. По формуле  $v = r\omega$  можно определить среднюю линейную скорость вращения звезд

Е) почему Нобелевская премия по физике была присуждена Д. Тейлору и Р. Халсу в 1993 г. с формулировкой «за открытие новых возможностей изучения полей тяготения»?

*Известно еще несколько пар нейтронных звезд, например, очень тесная пара PSR J0737-3039, открытая в 2003 году. В ней обе нейтронные звезды видны как радиопульсары. Нейтронные звезды в этой системе совершают 10 оборотов в сутки по орбите радиусом 400 тысяч километров. С каждым оборотом радиус орбиты сокращается на 0,7 миллиметра.*

24\*. Определите,

А) почему считается, что наблюдение на этой парой позволяет достаточно быстро (за несколько лет) и точно измерить несколько эффектов ОТО?

Пара нейтронных звезд PSR J0737-3039 представляет собой уникальную лабораторию для изучения различных эффектов ОТО, так как они находятся достаточно близко друг к другу и движутся с высокой скоростью, что приводит к значительным отклонениям от классических законов гравитации. Например, из наблюдений орбитального движения этой пары можно измерить изменение периода обращения, излучение гравитационных волн и другие эффекты ОТО.

Б) какова примерно суммарная масса этих звезд?

Суммарная масса этих звезд составляет около 2,6 масс Солнца.

В) через какое примерно время они столкнутся?

Столкновение этих звезд произойдет через около 85 миллионов лет.

Г) что можно сказать об излучаемых ими гравитационных волнах?

Излучаемые этой парой нейтронных звезд гравитационные волны являются очень слабыми и пока не были обнаружены непосредственно. Однако, они оказывают влияние на орбитальное движение этой пары, что может быть обнаружено наблюдательно.

14 сентября 2015 г. два сверхчувствительных гравитационно-волновых интерферометра *LIGO Scientific Collaboration* зафиксировали дошедшие до Земли гравитационные волны слияния двух черных дыр (рис. 9.17).



Рис. 9.17. Слияние черных дыр  
изображение: [relativity.li](http://relativity.li)

25. Объясните,

А) почему информация о прямой регистрации предсказанного Эйнштейном явления было объявлено не сразу, а только 11 февраля 2016 г.

Объявление о прямой регистрации гравитационных волн было отложено до 2016 г. из-за того, что нужно было собрать достаточное количество данных и убедиться в достоверности результатов. Эксперименты, которые вела группа *LIGO*, были крайне сложны и чувствительны к различным помехам, включая землетрясения и другие вибрации, поэтому нужно было провести тщательный анализ данных, чтобы убедиться в том, что обнаруженный сигнал действительно является гравитационными волнами.

Б) почему интерферометр, находящийся в Ливингстоне (штат Луизиана), фиксировал сигналы на 7 миллисекунд раньше, чем интерферометр, находящийся в Хэнфорде (штат Вашингтон) (рис. 9.18)?

Разница во времени между фиксированием сигнала интерферометрами в Ливингстоне и Хэнфорде была обусловлена географическим расположением этих оборудований. Сигнал гравитационных волн распространяется со скоростью света, и поэтому он достигает разных интерферометров в разное время. Кроме того, физические условия на месте расположения каждого из интерферометров могут немного отличаться, что также может влиять на время фиксации сигнала.

В) почему гравитационные волны оказалось настолько сложно обнаружить, что за их экспериментальное обнаружение была присуждена Нобелевская премия по физике 2017 г?

Обнаружение гравитационных волн оказалось сложным, потому что они являются крайне слабыми сигналами, которые трудно отделить от шумов и

помех. Для обнаружения гравитационных волн требуется очень чувствительное оборудование, которое способно регистрировать изменения в длине пространства на уровне долей атомного диаметра. Кроме того, гравитационные волны взаимодействуют со всеми телами во Вселенной, что усложняет их измерение. Наконец, гравитационные волны обладают очень низкой энергией и не взаимодействуют с многими видами детекторов, что делает их обнаружение еще более сложным. Все эти факторы делали экспериментальное обнаружение гравитационных волн крайне сложным и требующим значительных усилий со стороны научных групп.

Разные теории по-разному предсказывают скорость распространения гравитационных волн. В ОТО она равна скорости света (в линейном приближении). В других теориях гравитации она может принимать любые значения, в том числе до бесконечности.

Г) разница в 7 мс является подтверждением или опровержением гипотезы Эйнштейна?

Д) почему само по себе

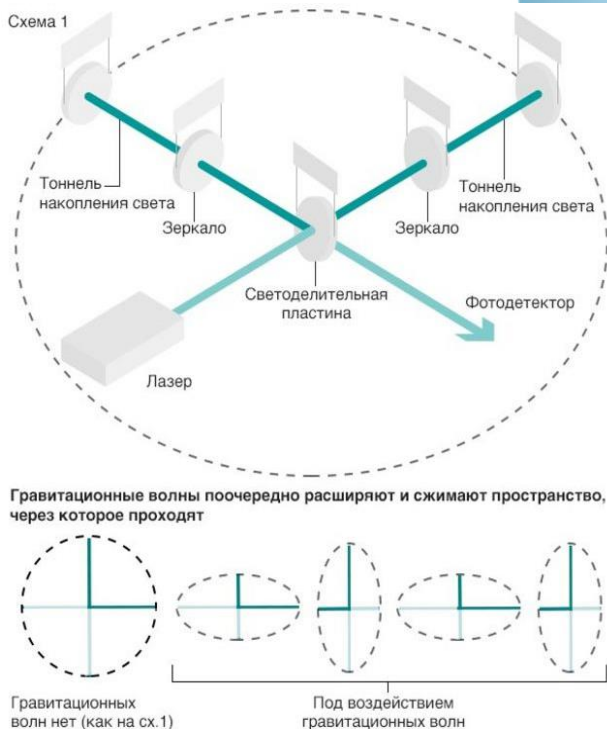
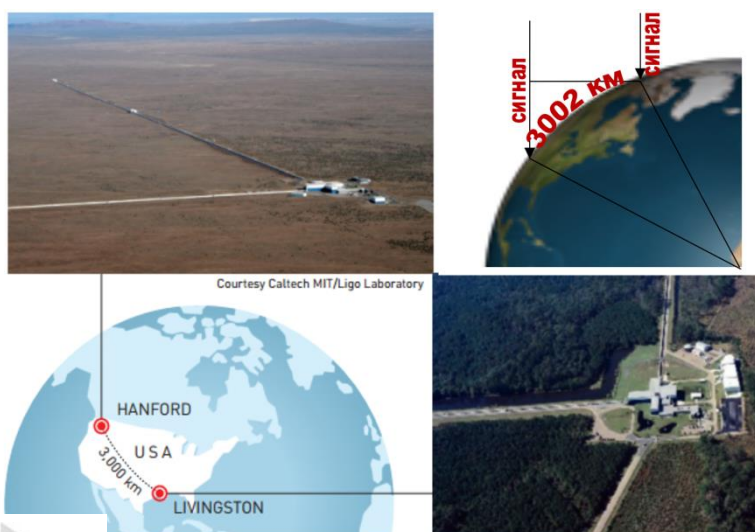


Рис. 9.19. Принцип действия гравитационного интерферометра



## 8. Расположение интерферометров LIGO

обнаружение гравитационных волн оказалось важным шагом для фундаментальной науки (сравните диапазон излучения с диапазоном электромагнитных волн и рассмотрите их как инструмент изучения Вселенной)?

26. Предположим, что Солнце вдруг мгновенно «исчезло». Через какое время мы увидим это событие, и через какое время мы почувствуем изменение гравитации, исходя из ОТО?

Как только Солнце исчезнет, исчезнет и его гравитация. Но узнаем мы об этом только через 8 минут 20 секунд, ведь согласно теории Эйнштейна, гравитационные волны распространяются с той же скоростью, что и свет.

В теории Ньютона сведения о том, что Солнце взорвалось, будут переданы на Землю мгновенно, посредством внезапного изменения силы тяготения, управляющей движением планеты

**27.** С помощью рис. 9.19 объясните принцип действия гравитационного интерферометра.

Расстояния между максимумами на рис. 9.20 соответствует полуобороту системы сближающихся двух черных дыр (рис. 9.17). Момент слияния дыр - последний крупный пик. С этого момента начинается вращение уже единой черной дыры, причем линейная скорость вращения поверхности дыры примерно равна 31% от скорости света.

Гравитационный радиус чёрной дыры массы  $M$  равен  $r = \frac{2\gamma M}{c^2}$ . Радиус черной дыры (рис. 9.21) можно найти через известные линейную скорость вращения и время полного оборота ( $2\pi r = vt$ ), плотность – как отношение массы к объему, а объем шара  $= \frac{4}{3}\pi r^3$ .

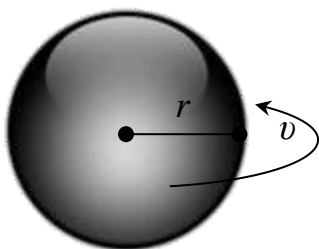


Рис. 9.21. Вращение точки на поверхности

Значение амплитуды сигнала по графику равно отношению радиуса источника  $r$ , умноженного на коэффициент его деформации  $k$  (примерно  $k=0,08$ ), к расстоянию до источника  $L$

$$A \approx \frac{kr}{L}.$$

**28\*.** Исходя из рис. 9.20

А) заполните таблицу 9.7

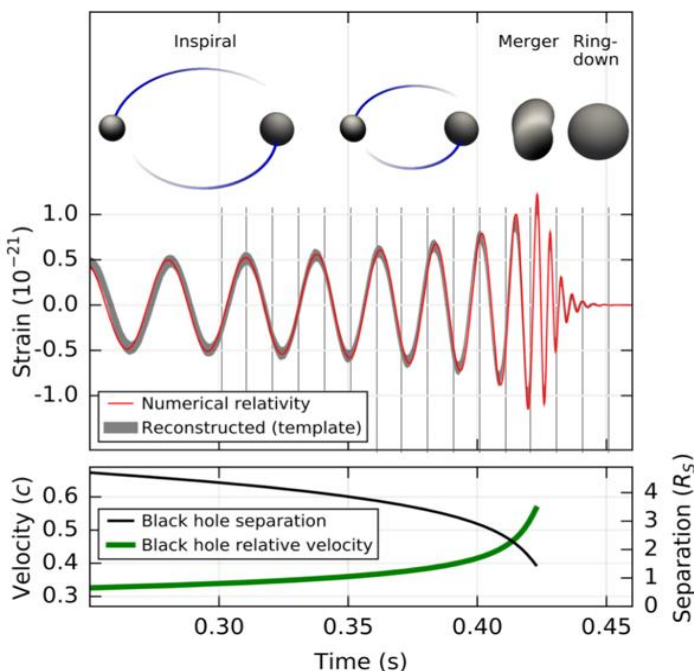


Рис. 9.20. Обработанный сигнал, зафиксированный интерферометром LIGO



Таблица 9.7. Слияние черных дыр

Длительность полуоборота системы двух черных дыр в момент времени	t=0.25 с	t=0.31	t=0.36 с	t=0.40 с
Длительность полуоборота черной дыры в момент ее образования из двух слившихся дыр	0.0089 с	0.0108 с	0.0126 с	0.0142 с
О чем свидетельствует уменьшение времени между пиками до слияния дыр?	Увеличении частоты сигнала, более быстрое уменьшение времени до слияния			
Длительность процесса слияния черных дыр	0.2 с			
Длительность t оборота любой точки на поверхности получившейся черной дыры	0.0005 с			
Величина амплитуды A сигнала в момент слияния черных дыр	$1.0 \times 10^{-21}$			
Линейная скорость u вращения любой точки на поверхности черной дыры, м/с	$7.5 \times 10^7$ м/с			
Примерный радиус r получившейся черной дыры, м	150 000			
Примерный объем V получившейся черной дыры, м <sup>3</sup>	$1,4 \cdot 10^9$			
Примерная масса M черной дыры в килограммах и в массах Солнца	$9.8 \times 10^{31}$ кг, 62 массы Солнца			
Плотность черной дыры, кг/м <sup>3</sup>	$7 \times 10^{17}$ кг/м <sup>3</sup>			
Расстояние до черной дыры L в световых годах	$1.3 \cdot 10^9$			

Б) Расчетное значение массы черной дыры ( $62 \pm 4$ ) попадает в пределы погрешности определения массы черных дыр по асимметрии пиков (36±4 и 29±4 масс Солнца), поэтому значения совпадают. Ошибка может быть связана с неточностью измерений, возможными факторами окружающей среды или аппаратурой.

В) Энергия, излученная в момент слияния, можно оценить с помощью формулы Эйнштейна  $E=mc^2$ , где m - масса, а c - скорость света. Масса получившейся черной дыры составляет 62 массы Солнца\*

Расчет с учетом целого ряда дополнительных параметров показал, что масса полученной черной дыры  $62 \pm 4$  солнечных масс. Из асимметрии пиков определены массы черных дыр –  $36 \pm 4$  и  $29 \pm 4$  масс Солнца.

Б) Совпадает ли записанное в таблице значение массы черной дыры (в пределах погрешности) с расчетным ( $62 \pm 4 M_{\odot}$ )? Если нет, то выскажите предположения о причине ошибки.

В) Чему (в эквиваленте солнечных масс) примерно равна энергия, излученная в момент слияния?

29. Какие общелогические, общенаучные и частнонаучные методы изучения Вселенной названы в тексте?

В тексте упоминаются следующие общенаучные методы изучения Вселенной:

- Исторический метод: рассмотрение развития теорий гравитации в физике XVII-XIX веков и их смену основной теорией гравитации в настоящее время.

- Критический метод: указание на существование альтернативных теорий гравитации.

Также, можно отметить наличие частнонаучных методов:

- Математический метод: изучение математической формулировки теории гравитации.

- Эмпирический метод: экспериментальная проверка теорий гравитации в различных условиях.

*В физике XVII-XIX столетий доминирующей теорией гравитации была теория Ньютона. В настоящее время большинство физиков основной теорией гравитации считают ОТО. Но существует целые категории альтернативных теорий гравитации (метрические, неметрические, скалярные, биметрические, квазилинейные, скалярно-тензорные, релятивистская МОНД, Моффата и другие).*

**30.** Зачем ученые разрабатывают альтернативные теории гравитации? Ученые разрабатывают альтернативные теории гравитации, потому что общая теория относительности Эйнштейна не объясняет некоторые наблюдаемые явления в космологии и астрофизике. Например, существуют гипотетические объекты, такие как темная материя и темная энергия, которые не могут быть объяснены с помощью общей теории относительности. Кроме того, некоторые ученые считают, что альтернативные теории гравитации могут помочь решить проблему объединения общей теории относительности и квантовой механики, которая до сих пор остается одной из главных задач в физике.

**31.** Какие из перечисленных ниже проблем могут являться следствием нахождения в невесомости?

А) Ослабевают мышцы, обеспечивающие плотное прилегание позвонков друг к другу, мышечный корсет постепенно атрофируется, позвоночный столб теряет свои естественные изгибы. В среднем рост космонавта увеличивается на 3-5 см.

Б) Проблемы с пищеварением: пищевые комки устремляются вверх.

В) За месяц костная масса космонавта снижается на 1-2% из-за нарушения фосфорного обмена и из-за того, что организму нет необходимости поддерживать тело и он почти перестает вырабатывать костный материал.

Г) Нарушаются процессы естественной теплоотдачи, что приводит к перегреванию глубоких слоев тканей и постоянной выработке пота.

Д) Отсутствие деления на день и ночь нарушает работу суточных ритмов человека, что приводит к усталости и дискомфорту.

Е) Сердце прокачивает меньший объем крови, что ведет к его атрофии, а из-за изменения давления в камерах сердца, оно становится округлым.

Ж) Исчезает отрыжка, возникающая благодаря подъемной силе.

З) Происходит ускоренное старение, связанное с эндотелиальными клетками, которые выстилают изнутри все сосуды человека.

И) Слезы могут выделяться, но не течь, и удалить их можно только с помощью специальных "совочков".

К) Кровь равномерно поступает во все отделы организма, из-за чего ноги немного худеют, голова увеличивается в размерах, мозг получает сигнал об избытке жидкости в верхней части тела, почки начинают активно удалять воду, человек не чувствует жажды, что приводит к обезвоживанию.

Л) Длительное пребывание в космосе значительно ослабляет иммунитет организма.

М) Ухудшение зрения.

Н) Изменение вкуса (еда становится более пресной и невкусной).

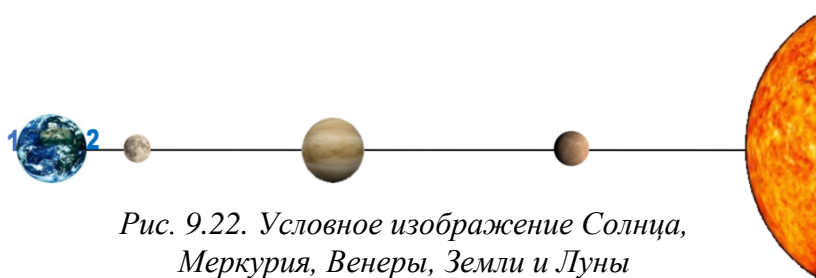


Рис. 9.22. Условное изображение Солнца, Меркурия, Венеры, Земли и Луны

32. Если во время Солнечного затмения происходит «парад планет» (планеты находятся вдоль одной прямой, рис. 9.22), то во сколько раз будет отличаться вес человека в точке 2, от его веса в точке 1. А если учитывать только притяжение Солнца, то в полдень любое тело должно весить меньше, чем в полночь. Почему этого никто не замечает?

Вес человека на земле зависит от силы притяжения Земли, которая почти не меняется в течение дня. Притяжение других планет не оказывает достаточно большого влияния на вес человека, чтобы изменить его значительно.

Поэтому, если во время солнечного затмения происходит «парад планет» и планеты находятся вдоль одной прямой, то они могут оказать некоторое дополнительное влияние на притяжение Земли. Однако, величина этого

влияния невелика по сравнению с притяжением Земли, поэтому изменение веса человека будет крайне малым и не заметным.

Относительно изменения веса в разное время суток, оно действительно происходит. В полдень любое тело должно весить меньше, чем в полночь, потому что оно находится на расстоянии от центра Земли, которое больше, чем в полночь. Однако, это изменение веса крайне мало и не может быть замечено обычным человеком.

*Гравитационные волны – это способ изучить объекты, не излучающие ни в одном из диапазонов электромагнитных волн! Это принципиально новый инструмент для изучения Вселенной. Вероятно, он станет довольно распространенным в течение следующих 50 лет.*

"Джеймс Уэбб" сфотографировал "почти идеальное" кольцо Эйнштейна

Эта галактика находится в 12 млрд световых лет от Земли.

Космический телескоп Джеймса Уэбба сфотографировал почти идеальное кольцо Эйнштейна, сообщает [Science Alert](#).



Галактика называется SPT-S J041839-4751.8 и находится на расстоянии 12 миллиардов световых лет от Земли. На удивительно ровную форму кольца Эйнштейна обратил

внимание астроном Spaceguy44, опубликовавший снимок на [Reddit](#).

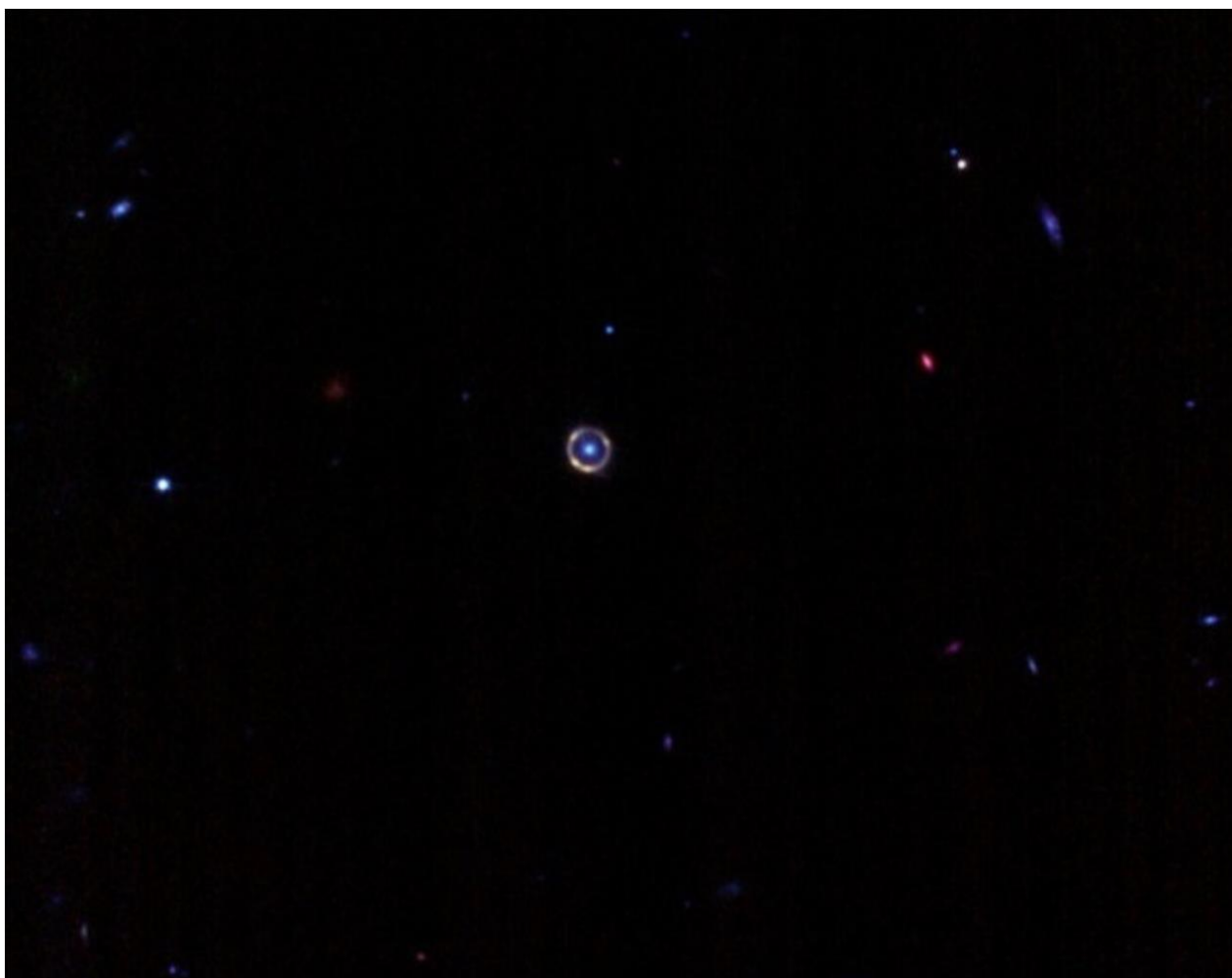


Фото: JWST/MAST; Spaceguy44/Reddit

Альберт Эйнштейн предсказал существование таких колец еще в 1915 году. Общая теория относительности описывает способ, которым массивные объекты деформируют ткань Вселенной, называемую пространством-временем. Под влиянием гравитации пространство-время искривляется и искажается, что устанавливает правила движения энергии и материи. Несмотря на то что свет движется по прямой линии, проходя через сильно искривленную область пространства-времени, например через пространство вокруг двух огромных галактик, свет начнет также двигаться по кривой, огибая галактики и растекаясь в ореол.

Поскольку степень искривления света зависит от силы гравитационного поля объекта, который огибается светом, кольца Эйнштейна могут действовать как космическая шкала для измерения масс галактик и черных дыр. Также эти кольца могут помочь ученым разглядеть такие объекты, которые в противном случае были бы слишком темными, чтобы их можно было увидеть сами по себе — например, черные дыры или блуждающие экзопланеты.