

естественную ширину. Поэтому ядра кристаллической решетки могут поглотить лишь электромагнитные колебания (гамма - кванты) определенной частоты - резонансной частоты. На этом свойстве эффекта Мёссбауэра основан метод проверки рассматриваемого предсказания ОТО. Два американских физика Паунд и Ребекка поставили следующий опыт. На высоте около 20 м помещался источник квантов - возбужденные ядра атомов железа, расположенных в узлах кристаллической решетки. Кванты регистрировались на поверхности Земли поглощением обычными атомами железа. Но ОТО предсказывала, что “падающие” на Землю гамма -кванты должны изменять свою частоту (в данном опыте частота должна увеличиваться) и они не должны восприниматься нормальными атомами. Несмотря на ничтожно малую величину относительного изменения частоты (всего на  $2,5 \cdot 10^{-15}$ ), опыт подтвердил предсказание ОТО, ядра детектора на Земле не воспринимали гамма -кванты.

### **§10. “Парадоксы” ОТО**

Как и в специальной теории относительности, в ОТО “парадоксы” позволяют не только опровергнуть рассуждения, основанные на так называемом “здравом смысле”(обыденном, житейском опыте), но и дать правильное, научное объяснение “парадоксу”, который, как правило, является проявлением более глубокого понимания природы. И это новое понимание дается новой теорией - ОТО.

#### **“Парадокс близнецов”**

При изучении СТО указывается, что “парадокс близнецов” не может быть объяснен в рамках этой теории. Напомним суть этого “парадокса”. Один из братьев - близнецов улетает на космическом корабле и, совершив путешествие, возвращается на Землю. В зависимости от величин ускорений, которые космонавт будет испытывать при старте, развороте и посадке, его часы могут существенно отстать от земных часов. Возможен и такой вариант, что он не найдет на Земле ни своего брата, ни

то поколение, которое оставил на Земле при начале полета, так как на Земле пройдет не один десяток (сотен) лет. Этот парадокс не может быть разрешен в рамках СТО, так как рассматриваемые СО не равноправны (как это требуется в СТО): космический корабль не может рассматриваться ИСО, так как движется на отдельных участках траектории неравномерно.

Только в рамках ОТО мы можем понять и объяснить “парадокс близнецов” естественным образом, опираясь на положения ОТО. Выше мы уже касались этой проблемы, установив уменьшение темпа хода часов в движущейся НСО (или в эквивалентном гравитационном поле) (см. §8).

Пусть два наблюдателя - “близнеца” находятся первоначально на Земле, которую мы будем считать инерциальной СО. Пусть наблюдатель “А” остается на Земле, а второй наблюдатель- “близнец” “В” стартует на космическом корабле, улетает в неведомые просторы Космоса, разворачивает свой корабль и возвращается на Землю. Если движение в Космосе и может быть равномерным (при выключенных двигателях), то при взлете, развороте и посадке близнец “В” испытывает перегрузки, так как движется с ускорением. Эти неравномерные движения космонавта “В” можно уподобить его состоянию в некоторых эквивалентных гравитационных полях. Но в §8 было показано, что в этих условиях (в НСО без гравитационного поля или в эквивалентном гравитационном поле) происходит динамическое (а не кинематическое, как в СТО) замедление темпа хода часов. В указанном параграфе была получена формула (8.3), которая в §9 получила конкретное выражение через гравитационный потенциал

$$t = t \left( 1 + \frac{j}{c^2} \right) \text{ при } \varphi < 0, \quad (9.15)$$

из которой ясно видно, что темп хода часов замедляется в гравитационном поле с потенциалом  $\varphi$  (то же справедливо и для эквивалентной ускоренно движущейся СО, каковой в нашей задаче является космический корабль с “близнецом” “В”).

Таким образом, часы на Земле покажут больший промежуток времени, чем часы на космическом корабле при его возвращении на Землю.

Повторим еще раз, что “парадокс близнецов” не имеет никакого объяснения в специальной теории относительности, в которой используются только равноправные инерциальные СО. По СТО “близнец” “В” должен вечно равномерно и прямолинейно удаляться от наблюдателя “А” (по сути дела, он не должен взлетать с Земли, именно поэтому мы берем слово “близнец” в кавычки). В популярной литературе часто обходят “острый” момент в объяснении этого парадокса, заменяя физически длящийся разворот космического корабля “назад к Земле” его мгновенным разворотом, что невозможно. Этим “обманным маневром” в рассуждениях устраняют ускоренное движение корабля на развороте и тогда обе СО (“Земля” и “Корабль”) оказываются равноправными и инерциальными, в которых можно применять положения СТО. Но такой прием нельзя считать научным.

В заключение следует отметить, что “парадокс близнецов” является, по сути дела, разновидностью того эффекта, который был разобран в §9 и назывался изменением частоты излучения в гравитационном поле.

### **Отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца**

Таким образом, результаты нашей экспедиции оставляют мало сомнений в том, что лучи света отклоняются вблизи Солнца и что отклонение, если приписать его действию гравитационного поля Солнца, по величине соответствуют требованиям общей теории относительности Эйнштейна.

*Ф. Дайсон, А. Эддингтон, К. Девидсон* 1920 г.

Выше приведена цитата из отчета ученых, наблюдавших 9 мая 1919 г. полное солнечное затмение с целью обнаружить предсказанный ОТО эффект отклонения световых лучей при

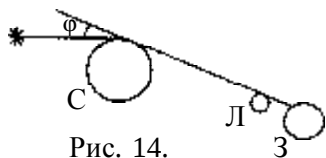


Рис. 14.

прохождении их вблизи тяготеющих тел. Но коснемся немного истории этого вопроса. Как известно, благодаря непререкаемому авторитету великого Ньютона, в XVIII в. восторжествовало

его учение о природе света: в отличие от своего современника и не менее известного голландского физика Гюйгенса, рассматривавшего свет как волновой процесс, Ньютон исходил из корпускулярной модели, согласно которой частицы света, подобно материальным (вещественным) частицам, взаимодействуют со средой, в которой движутся и притягиваются телами по законам гравитации, построенной самим Ньютоном. Поэтому световые корпскулы должны вблизи тяготеющих тел отклоняться от своего прямолинейного движения.

Задача Ньютона была теоретически решена в 1801 г. немецким ученым Зельднером. Количественный расчет предсказывал угол отклонения лучей света при прохождении вблизи Солнца на величину  $0,87''$ .

В ОТО также предсказывается подобный эффект, однако природа его предполагается иной. Уже с СТО частицы света - фотоны - считаются без массовыми, поэтому ньютоновское объяснение совершенно непригодно. Эйнштейн подошел к этой задаче с общих представлений о том, что гравитирующее тело изменяет геометрию окружающего пространства, делая его неевклидовым. В искривленном пространстве-времени свободное движение (каковым будет движение света) происходит по геодезическим линиям, которые являются не прямыми в евклидовом смысле, а будут кратчайшими линиями в искривленном пространстве-времени. Теоретические расчеты давали результат в два раза больший, чем получалось по гипотезе Ньютона. Так что экспериментальное наблюдение отклонения световых лучей вблизи поверхности Солнца могло решить вопрос и о физической достоверности всей ОТО.

Проверить эффект ОТО по отклонению световых лучей полем тяготения можно лишь в том случае, когда свет от звезды проходит вблизи поверхности Солнца, где это поле достаточно велико, чтобы существенно повлиять на геометрию пространства-времени. Но в обычных условиях наблюдать звезду вблизи диска

Солнца невозможно из-за более яркого света от Солнца. Вот почему ученые использовали явление полного солнечного затмения, когда диск Солнца закрывается диском Луны. Эйнштейн предлагал в минуты полного солнечного затмения сфотографировать околосолнечное пространство. Затем этот же участок небосклона сфотографировать еще раз, когда Солнце будет далеко от него. Сравнение обеих фотографий позволит обнаружить смещение положения звезд (см. рис.14) на угол  $\varphi$ . Теория Эйнштейна дает для величины этого угла следующее выражение:

$$j = \frac{4GM}{Rc^2},$$

где  $M$  - масса Солнца.  $R$  - радиус Солнца.

Уже первые наблюдения данного эффекта (1919 г.) дали вполне удовлетворительный результат: при погрешности в 20% угол  $\varphi$  оказался равным 1,75". Требовалось все же увеличить точность результата. Но ведь полное солнечное затмение нельзя повторить тогда, когда мы хотим. Несмотря на то, что затмения бывают несколько раз в году, но не всегда там, где есть условия для наблюдения, да и погода (облака) не всегда благоприятствовала ученым. К тому же на точность наблюдений влияла дифракция света, что искажало изображение звезды. И все же удалось повысить точность и уменьшить погрешность до 10%. Ситуация существенно изменилась, когда были созданы радиоинтерферометры, благодаря использованию которых погрешность наблюдений уменьшилась до 0,01" (т.е. 0,5% от 1,75").

В 70-х гг. было измерено отклонение радиолучей квазарами (звездных образований, природа которых изучена недостаточно), зарегистрированных под №№ ЗС273 и ЗС279. Измерения дали значения  $1'',82 \pm 0'',26$  и  $1'',77 \pm 0'',20$ , что хорошо соответствует предсказаниям ОТО.

Итак, наблюдение отклонения световых (электромагнитных) волн от прямолинейности (в смысле евклидовой геометрии) при прохождении вблизи массивных небесных тел однозначно свидетельствует в пользу физической достоверности ОТО.

## Вращение перигелия Меркурия

А. Эйнштейн, разрабатывая ОТО, рассмотрел три эффекта, объяснение которых и количественные оценки их либо не совпадали с тем, что можно было получить на основе теории тяготения Ньютона, либо вообще не были известны ученым. Два из этих эффектов (красное смещение спектральных линий, испущенных массивными звездами, и отклонение световых лучей при прохождении вблизи поверхности Солнца и других небесных светил) рассмотрены выше. Рассмотрим и третий предсказанный Эйнштейном гравитационный эффект - вращение перигелия планет солнечной системы. На основе наблюдений Тихо Браге и законов Кеплера Ньютон установил, что планеты вращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Теория Эйнштейна позволила обнаружить более тонкий эффект - вращение эллипсов орбит в их плоскости.

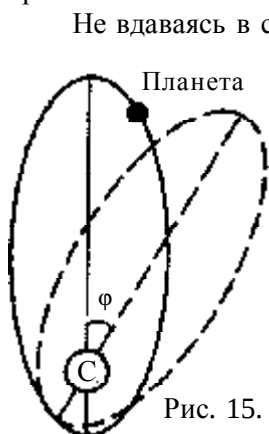


Рис. 15.

Не вдаваясь в строгие математические расчеты, покажем, как можно оценить ожидаемые величины поворотов орбит. Для этого применим так называемый метод размерностей. В этом методе на основании теоретических соображений или данных эксперимента устанавливаются величины, определяющие рассматриваемый процесс. Из этих величин составляется алгебраическое выражение, имеющее размерность искомой величины, к которому последняя приравнивается. В нашей задаче в качестве определяющих величин выберем:

1) Так называемый гравитационный радиус Солнца, который для Солнца (и других небесных тел) вычисляется по формуле:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Солнечный гравитационный радиус равен  $r_g = 3 \cdot 10^5$  см. (в ньютоновской теории гравитационный радиус совпадает с радиусом звезды массы  $M$ , на которую вещественное тело будет падать со скоростью света

$$\frac{mc^2}{2} = G \frac{mM}{r_g} \Rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

2) Среднее расстояние планеты до Солнца. Для Меркурия оно равно  $0,58 \cdot 10^{13}$  см, для Венеры -  $1,05 \cdot 10^{13}$  см, для Земли  $1,5 \cdot 10^{13}$  см.

3) Среднюю угловую скорость обращения планеты вокруг Солнца:

$$w = \left( \frac{GM}{R^3} \right)^{1/2} \quad (v = \omega R, \quad w = \frac{v}{R}, \quad \frac{mv^2}{2} = G \frac{mM}{R}, \quad v^2 \approx \frac{mM}{R}),$$

где  $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$  - масса Солнца.

По методу размерностей составим следующую величину (следует заметить, что метод размерностей в данном применении требует интуиции исследователя, хорошего понимания физики, что, как правило, дается многократной тренировкой и решением подобных задач):

$$w_n = w \frac{r_g}{R},$$

где величина  $w_n$  определяет угловую скорость перемещения перигелия орбиты планеты. Для угла поворота перигелия за 100 лет получим следующее выражение (предварительно необходимо умножить  $w_n$  на число секунд в 100 лет  $3,16 \cdot 10^9 \text{ с} / 100 \text{ лет}$ , перевести

радианы в угловые секунды  $2'',06 \cdot 10^5 \frac{\text{y}2\pi.c}{\text{рад}}$ ):

$$j = 6'',5 \cdot 10^{14} \frac{w r_g}{R}.$$

Для Меркурия  $\phi = 39''$ , Венеры  $\phi = 8''$ , Земли  $\phi = 4''$ . Чтобы представить величину  $\phi$ , напомним, что угловая секунда - это угол, под которым копейка “видна” с расстояния в 2 км!

Приведенные выше числовые оценки угла  $\phi$  получены методом размерностей, точная теория эффекта в ОТО дает несколько другую формулу для угла  $\phi$  и, естественно, несколько другие числовые значения:

$$j = \frac{24p^2 a^2}{c^2 T^2 (1 - e^2)},$$

где  $a$  - большая полуось эллипса-орбиты,  $T$  - период обращения

планеты,  $e$  - эксцентриситет эллипса  $e = \frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a} < 1$ ,  $b$  - малая

полуось эллипса. Расчет угла поворота перигелия планеты за 100 лет дает следующие значения:

для Меркурия  $42'',9$  (из наблюдений  $42'',56 \pm 0'',91$ ),

для Венеры  $8'',6$  (из наблюдений  $8'',4 \pm 4'',8$ ),

для Земли  $3'',8$  (из наблюдений  $4'',6 \pm 2'',7$ ).

Перемещение перигелия планеты Меркурий впервые наблюдал еще задолго до создания ОТО французский астроном Леверье (XIX в.), но только теория Эйнштейна дала непротиворечивое объяснение этому эффекту. Интересно, что это небесное явление ученым удалось “воспроизвести”, наблюдая движение искусственных спутников Земли. Так как угол поворота перигелия пропорционален большой полуоси орбиты спутника, ее эксцентриситету и обратно пропорционален периоду обращения спутника, то, подбирая соответствующие значения этих величин, можно сделать  $\phi = 1500''$  за 100 лет, а это более чем в 30 раз превышает угол поворота орбиты для Меркурия. Однако задача существенно усложняется, так как на движение искусственного спутника оказывает влияние сопротивление воздуха, не сферичность и не однородность Земли, притяжение к Луне и т.д. И все же наблюдения над тысячами искусственных спутников, запущенных в околоземное пространство за последние более чем 30 лет, однозначно подтверждают предсказания ОТО.

### Расчет “радиуса” Вселенной

Среди различных моделей Вселенной, рассматриваемых в ОТО, есть так называемая модель стационарной Вселенной, впервые предложенной еще самим А. Эйнштейном. В этой модели Мир оказывается конечным (но безграничным!), его можно представить в виде шара (у шара нет границы!). Тогда возникает

возможность определить “радиус” такой Вселенной. Для этого предположим, что полная энергия шарообразной Вселенной обусловлена исключительно гравитационным взаимодействием частиц, атомов, звезд, галактик, звездных образований. Согласно СТО полная энергия неподвижного тела равна  $E_0 = Mc^2$ , где  $M$  - масса Вселенной, которую можно связать с ее “радиусом” так  $M = 4/3 \pi R_0^3 \rho$ ,  $\rho$  - средняя плотность вещества, распределенного равномерно в объеме Мира. Гравитационная энергия шарообразного тела радиуса  $R_0$  может быть рассчитана элементарно и равна

$$E = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R_0}.$$

Пренебрегая числовым коэффициентом порядка единицы, приравняем оба выражения для энергии

$$Mc^2 = GM^2 / R_0.$$

Полагая  $M \sim \rho R_0^3$ , получаем для “радиуса” Вселенной следующее выражение

$$R_0 \sim \frac{c}{(G \rho)^{1/2}}.$$

Принимая (что соответствует наблюдениям)  $\rho \sim 10^{-25} \text{ кг/м}^3$  и

$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н м}^2}{\text{кг}^2}$ , получаем для “радиуса” следующее значение  $R_0 \approx 10^{26} \text{ м}$ .

Эта величина определяет видимый “горизонт” Мира. За пределами этой сферы нет вещества и электромагнитного поля. Но тотчас же возникают новые проблемы: а как быть с пространством и временем вне сферы, где нет материи? Подобные вопросы, возникающие в данной модели Вселенной не решены, наука не знает однозначного ответа на подобные вопросы.

Но “конечность” Вселенной в рассматриваемой модели снимает так называемый “фотометрический парадокс”: ночное небо не может быть ярким (как должно было бы быть, если

Вселенная бесконечна и число звезд также бесконечно), так как число звезд (по рассматриваемой модели) конечно в силу конечности объема Мира, а из-за поглощения энергии электромагнитных волн в межзвездном пространстве освещенность неба становится малой.

Модель стационарной Вселенной - это самая первая модель Мира, как указывалось выше, предложенная самим создателем ОТО. Однако уже в начале 20-х гг. советский физик и математик А. А. Фридман дал другое решение уравнений Эйнштейна в ОТО и получил два варианта развития для так называемой нестационарной Вселенной. Через несколько лет американский ученый Хаббл подтвердил решения Фридмана, обнаружив расширение Вселенной. По Фридману, в зависимости от величины средней плотности материи во Вселенной, наблюдаемое в настоящее время расширение или будет продолжаться вечно, или после замедления и остановки галактических образований начнется процесс сжатия Мира. В рамках данной книги мы не можем далее обсуждать эту тему и отсылаем любознательных читателей к дополнительной литературе, указанной в конце пособия. Мы же коснулись этого вопроса потому, что и модель расширяющейся Вселенной позволяет устранить рассмотренный выше фотометрический парадокс, опираясь при этом на другие основания. Благодаря расширению Вселенной и удалению звезд от Земли должен наблюдаться эффект Доплера (в данном случае уменьшение частоты приходящего света) - так называемое красное смещение частоты света (не путать с подобным эффектом, связанным не с движением источника света, а с его гравитационным полем). В результате эффекта Доплера энергия светового потока существенно ослабляется и вклад звезд, находящихся за пределами некоторого расстояния от Земли, практически равен нулю. В настоящее время обще признано, что Вселенная не может быть стационарной, но мы воспользовались такой моделью из-за ее "простоты", а полученный "радиус" Мира не противоречит современным наблюдениям.

## “Черные дыры”

Скажем сразу, что “черные дыры” во Вселенной экспериментально еще не обнаружены, но имеется убежденность в их существовании (насчитывается около 100 кандидатов в нашей Метагалактике на такой экзотический объект). Это связано с тем, что звезда, превратившаяся в “черную дыру”, не может быть обнаружена по своему излучению (отсюда и название “черная дыра”), так как, обладая гигантским полем тяготения, не дает ни элементарным частицам, ни электромагнитным волнам покинуть поверхность. Написано множество теоретических исследований, посвященных “черным дырам”, их физика может быть объяснена только на основе ОТО. Такие объекты могут возникнуть на заключительной стадии эволюции звезды, когда (при определенной массе, не меньше 2-3 солнечных масс) световое давление излучения не может противодействовать гравитационному сжатию и звезда “коллапсирует”, т.е. превращается в экзотический объект - “черную дыру”. Подсчитаем минимальный радиус звезды, начиная с которого возможен ее “коллапс”. Чтобы вещественное тело могло покинуть поверхность звезды, оно должно преодолеть ее притяжение. Это возможно, если собственная энергия тела (энергия покоя) превосходит потенциальную энергию гравитации, что требуется по закону сохранения и превращения энергии. Можно составить неравенство:

$$mc^2 > \frac{GmM}{R_{зв}}.$$

На основании принципа эквивалентности, слева и справа стоит одна и та же масса тела. Поэтому с точностью до постоянного множителя получаем радиус звезды, которая может превратиться в “черную дыру”:

$$R_{зв} \sim \frac{GM}{c^2} = R_{ш}$$

Впервые эту величину рассчитал немецкий физик Шварцшильд еще в 1916 г, в честь него эту величину называют радиусом Шварцшильда, или гравитационным радиусом. Солнце

могло бы превратиться в “черную дыру” при той же массе, имея радиус всего 3 км; для небесного тела, равного по массе Земле, этот радиус равен всего лишь 0,44 см.

Так как в формулу для  $R_{III}$  входит скорость света, то этот небесный объект имеет чисто релятивистскую природу. В частности, так как в ОТО утверждается физическое замедление хода часов в сильном гравитационном поле, то этот эффект особенно должен быть замечен вблизи “черной дыры”. Так, для наблюдателя, находящегося вне гравитационного поля “черной дыры”, камень, свободно падающий на “черную дыру”, достигнет шварцшильдовской сферы за бесконечно большой промежуток времени. В то время как часы “наблюдателя”, падающего вместе с камнем, покажут конечное время. Расчеты, основанные на положениях ОТО, показывают, что гравитационное поле “черной дыры” не только способно искривить траекторию светового луча, но и захватить световой поток и заставить его двигаться вокруг “черной дыры” (это возможно, если луч света пройдет на расстоянии около  $1,5R_{III}$ , но такое движение неустойчиво).

Если звезда, испытавшая коллапс, обладала угловым моментом, т.е. вращалась, то и “черная дыра” должна сохранить этот вращательный момент. Но тогда вокруг этой звезды и гравитационное поле должно иметь вихревой характер, что проявится в своеобразии свойств пространства-времени. Этот эффект может позволить обнаружить “черную дыру”.

В последние годы обсуждается возможность “испарения” “черных дыр”. Это связано с взаимодействием гравитационного поля такой звезды с физическим вакуумом. В этом процессе уже должны сказаться квантовые эффекты, т.е. ОТО оказывается связанной с физикой микромира. Как видим, экзотический объект, предсказанный ОТО, - “черная дыра” оказывается связующим звеном, казалось бы, далеких друг от друга объектов - микромира и Вселенной.

## **§11. Загадки “Большого взрыва” (ОТО и космология)**

Ученые установили, что нашей Вселенной 15 млрд. лет. Её появление связано со взрывом, получившим название “Большого взрыва”.

Но откуда известно, что Вселенная взорвалась и что взорвалось? И что было до этого, и что последовало после этого? Эти и многие другие вопросы возникли перед учеными во второй половине XX века и остались в науке XXI века.

Вспомним немного историю. В 1916г. великий физик Альберт Эйнштейн создал новую физическую теорию - Общую теорию относительности, ставшую основой космологии - науки о происхождении и развития мира. Согласно первоначальному решению проблемы, данному самим Эйнштейном, Вселенная стационарна и конечна в своих размерах. Однако в 1922 г. российский ученый А. А. Фридман рассмотрел более сложный сценарий развития Мира. Один из вариантов его решения предполагал расширение Вселенной. Американский астроном Э. Хаббл, наблюдая движение далеких звезд, подтвердил факт расширения: звезды удалялись от нас и друг от друга. Снова возникали вопросы: почему Вселенная расширяется, ведь по закону Всемирного тяготения, открытого еще Ньютоном, звезды должны притягиваться друг к другу? И как долго это расширение будет продолжаться?

Ученые, в том числе и наши российские, ищут ответы на все поставленные выше вопросы. И уже есть факты, которые позволяют восстановить сценарий Взрыва, дать возможные варианты ответов.

Около 40 лет назад было обнаружено слабое электромагнитное излучение (радиоволны), которое равномерно заполняет все мировое пространство. Его называли “реликтовым”, то есть сохранившимся от момента начала расширения Вселенной. Занимая все большее пространство, реликтовое излучение остывало, имея вначале очень высокую температуру. Такую же высокую температуру имело и вещество – Вселенная была горячей. Анализ свойств реликтового излучения позволяет понять, почему Вселенная в больших масштабах была и остается однородной, средняя плотность вещества постоянна. Дело в том, что только в этом случае сегодня мы и наблюдаем, что со всех сторон на Землю приходит однородное реликтовое излучение: оно проходит через однородно заполненное материей про-

странство, Но сразу возникает другой вопрос: почему в диаметрально противоположных точках Вселенной одинаковое состояние материи, что и определяет упомянутую выше однородность излучения, приходящего со всех сторон. Эта загадка Вселенной называется “Проблемой горизонта”.

Согласно расчетам А. Фридмана, основанным на положениях Общей теории относительности Эйнштейна, в момент Большого взрыва средняя плотность вещества была близка к так называемой “критической плотности”. От критической плотности зависит сценарий развития Вселенной: либо она будет всегда расширяться, либо наступит момент, когда расширение закончится и начнется сжатие. Ученые не могут сейчас определить массу всего Мира. Помимо других причин есть еще одна: для объяснения наблюдаемых явлений предполагается существование “скрытой”, невидимой массы, природа которой еще не определена. Поэтому не ясно, какова же критическая плотность вещества Вселенной, каков будущий сценарий развития Мира. Эта загадка получила название “Проблемы критической плотности”.

В начале Большого взрыва материя состояла из горячей плазмы, частицы которой обладали зарядами разных знаков. В момент времени, отстоящий на  $10^{-33}$  секунды от начала взрыва, началось объединение разноименно заряженных частиц. Эта “эпоха Великого объединения” поставила перед учеными новую загадку: почему сегодняшний мир состоит преимущественно из частиц, куда исчезли античастицы в нашей Вселенной? Куда исчезли и другие свидетели Большого взрыва, так называемые магнитные монополи, предсказанные теоретически, “на кончике пера” английским физиком Дираком еще в 1928г? Возникла новая загадка развития Вселенной - “загадка монополей”.

До сих пор не решена загадка рождения звезд и планет. Одно достоверно, ясно, что в стационарной Вселенной Эйнштейна (см. выше) они образоваться не могли.

Все упомянутые выше загадки - это последствия Большого взрыва. Теория тяготения, построенная великим Ньютоном, не может объяснить это явление. По закону всемирного

тяготения Ньютона материальные образования могут только сближаться благодаря взаимному притяжению. Мы это ощущаем постоянно, находясь как на Земле, так и в ближнем космосе. Но в 1972 г. советские физики Э. Глинер, Д. Киржниц и А. Линде, исходя из Общей теории относительности Эйнштейна, подсчитали, что в момент взрыва плотность вещества была фантастической -  $10^{94}$  г/см<sup>3</sup> (для сравнения - плотность вещества в ядрах -  $10^{16}$  г/см<sup>3</sup>). Оказывается, что при этих состояниях материи в ней возникают не только силы притяжения, но и во много раз более мощные силы отталкивания. Именно эти силы отталкивания, по мнению упомянутых ученых, и вызывают расширение Вселенной. Эти выводы получили дальнейшее развитие и сейчас считаются вполне правдоподобными.

Вещество расширяющейся Вселенной меняло свои свойства в процессе раздувания, такие переходы материи из одного состояния в другое называют фазовыми переходами (в нашей обыденной жизни такими фазовыми переходами являются, например, кипение воды и превращение ее в пар). Расчеты показывают, что известные нам элементарные частицы-электроны, протоны, нейтроны и т.д. возникли через время  $10^{-25}$  секунды после Взрыва в результате перехода материи в новое фазовое состояние.

Модель расширяющейся Вселенной позволяет дать предварительные ответы на некоторые поставленные выше вопросы. Расположенное сегодня на краю горизонта видимости в противоположных его точках вещество когда-то находилось “совсем рядом”, практически совпадало, находилось в одинаковых условиях. И разлетаясь, развивалось одинаково. Поэтому со всех сторон к нам на Землю и приходит однородное реликтовое излучение.

Выше говорилось, что расширяющаяся Вселенная испытывала фазовые переходы. Но в тех условиях “действовали” не классические, а квантовые законы. Не во всем пространстве одновременно происходили эти переходы, что благоприятствовало образованию “сгустков” материи, из которых и могли образоваться

ся звезды и планеты. Такую гипотезу предложили английский астрофизик, человек удивительной судьбы, С. Хокинг и упомянутые выше наши ученые.

Относительно отсутствия монополей в сегодняшней Вселенной предлагается такой “простой” ответ: для рождения монополей необходимы условия, которые были только лишь в первые мгновения Большого взрыва. Затем они уже больше не возникали. А разбросанные по всей расширяющейся Вселенной первые монополи становятся практически ненаблюдаемыми. Значительно сложнее объяснить асимметрию частиц и античастиц в нашем мире. Напрашивается такой выход: может быть, в один из фазовых переходов материн (см. выше) устойчивость античастиц уменьшилась по сравнению с частицами и они исчезли...

Попробуем “ответить” на вопрос: а что было до Большого взрыва, исходя из гипотезы наших ученых А. Линде и А. Старобинского, высказанной ими еще в 1986г. В основе новой гипотезы положена определяющая роль квантовых процессов, которые должны происходить при гигантских плотностях материи. Вселенная находилась (и, возможно, еще находится) в состоянии с отрицательным давлением и поэтому раздувается. В разных местах возникают квантовые неустойчивости при одинаковых начальных условиях. Пусть первоначальный элемент объема увеличился (из-за раздувания) в поперечнике вдвое. Тогда сам объем увеличился в 8 раз, вместо одного элемента объема будет 8 раздувающихся “мини-Вселенных”, которые будут “жить” независимо друг от друга. Это первое (с момента нашего рассмотрения) поколение мини-Вселенных. Процесс “размножения” должен продолжаться, так как каждая мини-Вселенная по-прежнему находится в состоянии с отрицательным давлением (именно оно и вызывает раздувание мини-Вселенных). Согласно этой гипотезе Вселенная вечно воспроизводит саму себя. У такой Вселенной нет ни начала, ни конца. В таком мире постоянно происходят “Большие взрывы”. В одной из таких Вселенных живут земляне...

## **§12. Краткое изложение основ общей теории относительности Эйнштейна**

Как только речь заходит о происхождении окружающего нас мира, вспоминают не только Библию, но и эту физическую теорию, созданную ровно 90 лет назад великим ученым XX в. Альбертом Эйнштейном и получившую название ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО).

Значение этой теории возросло после открытия “свидетеля” того, что произошло около 15 миллиардов лет назад - так называемого Большого взрыва, за которым последовало расширение Вселенной.

В данной небольшой статье мы надеемся заинтересовать читателя и указать ему доступную научную и научно-популярную литературу, в которой он найдет еще много удивительного, связанного с содержанием и следствиями Общей теории относительности (в дальнейшем для краткости будем называть ее аббревиатурой - ОТО).

Начнем с общего определения: что такое ОТО? Обычно ее рассматривают как физическое учение о свойствах пространства, времени и природе тяготения.

Еще в 1687 г. основоположником классической физики И.Ньютоном был установлен закон Всемирного тяготения: два точечных тела притягивают друг друга с силой прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Этому закону взаимодействия подчиняются все вещественные (обладающие массой) тела Вселенной, именно поэтому закон и получил название закона Всемирного тяготения. Однако ни сам И.Ньютон, ни другие физики не могли объяснить природу тяготения. Неразрешимость для него этой задачи И. Ньютон выразил следующей фразой: “Гипотез я не выдвигаю”.

Благодаря закону тяготения Ньютона удалось объяснить движение планет солнечной системы, Луны вокруг Земли, падение тел на поверхности Земли и движение комет в межзвездном пространстве, определить массу Земли, Луны. и других небесных

тел. Вершиной торжества закона Всемирного тяготения было открытие “на кончике пера” (за письменным столом) ученым Леверье (1846 г.) новой не известной до того планеты солнечной системы - Нептуна, которая тотчас же была обнаружена на небосводе в указанном месте.

И все же природа тяготения не поддавалась объяснению. Было обнаружено новое явление: поворот оси орбиты самой близкой к Солнцу планеты - Меркурия. За 100 лет наблюдения ось эллипса орбиты повернулась на угол 43" (сорок три угловых секунды, угловая секунда - это угол, под которым 1 см “виден” с расстояния в 2 км). Из закона тяготения Ньютона такой поворот орбиты не следовал. Все попытки уточнить закон не приводили к устранению загадки. А в науке есть правило: если хотя бы один опыт противоречит теории, ее нужно изменять.

В представленном выше небольшом историческом очерке мы показали необходимость построения новой теории тяготения. И хотя сам А. Эйнштейн подходил к решению этой задачи несколько иначе, но его теория смогла не только объяснить все то, что объясняла теория И. Ньютона, но и разрешить загадку поворота орбиты Меркурия (вообще оказалось, что орбиты всех планет поворачиваются, но чем дальше они от Солнца, тем меньше угол поворота за те же 100 лет). Кроме того, теория А. Эйнштейна предсказала новые явления, например, отклонение светового луча от прямолинейности при прохождении вблизи большого тяготеющего тела. Это предсказание было убедительно подтверждено уже через три года после создания ОТО (в 1919 г.) при наблюдении полного солнечного затмения: на фотографиях закрытого Луной светила вблизи края ученые обнаружили изображения тех звезд, которые должны были находиться в области геометрической “тени” за Солнцем. Теория А.Эйнштейна предсказывала и другие явления, например, уменьшение частоты света, излученного звездой. Подобное явление было известно в оптике (эффект Доплера), но там изменение частоты было связано с движением источника или наблюдателя. В случае же явления, рассматриваемого в ОТО, оно не было связано с движением источника (приемника), а обус-

ловлено исключительно изменением свойств пространства по мере удаления от звезды. Ниже мы остановимся и на других выводах ОТО А. Эйнштейна, благодаря которым ОТО оказалась связанной с космологией, наукой, объясняющей происхождение и развитие Вселенной.

На построение ОТО А. Эйнштейну потребовалось около 10 лет. В 1916 г. вышла последняя статья, в которой был завершен научный подвиг ученого. В основу своих рассуждений А.Эйнштейн положил совпадение двух масс, с которыми встречаются физики, решая разные задачи. С одной стороны, масса характеризует инертные свойства тел, способность их противодействовать силам, пытающимся изменить состояние тел. С другой стороны, как говорилось выше, масса определяет гравитационные свойства тел, способность их притягивать другие тела. До А. Эйнштейна эти массы не различали, их совпадение считалось само собой очевидным. Эйнштейн же придал этому совпадению характер закона, его часто называют принципом эквивалентности инертной и гравитационной масс.

Еще Галилей в XVI в. установил, что все тела, падая свободно в поле тяжести Земли, приобретают одно и то же ускорение. В этом проявляет себя гравитационная масса падающих тел. При резкой остановке транспорта пассажиры подаются вперед, при ускоренном же движении того же транспорта пассажиры прижимаются к сидению. В обоих случаях возникающий эффект можно объяснить появлением сил инерции. При этом все тела, находящиеся в транспорте, независимо от их массы, приобретают одинаковое ускорение. В этом примере проявляет себя инертная масса. Из рассмотренных примеров, в которых по отдельности проявляют себя либо гравитационная, либо инертная массы, и исходя из эквивалентности этих масс, Эйнштейн делает следующий вывод, который обычно и называют принципом эквивалентности: свободное движение в поле тяготения и ускоренное движение в отсутствии этого поля происходят совершенно одинаково, другими словами, явление тяготения и ускоренное движение имеют одну и ту же физическую сущность, это два проявления одного и того же физического процесса. Это главное

утверждение ОТО и на первый взгляд оно кажется невероятным. Но именно в этом утверждении проявилась гениальность А.Эйнштейна, позволившая ему нетрадиционно подойти к повседневным явлениям и создать удивительную по красоте и следствиям физическую теорию - ОТО.

Теперь посмотрим, к каким следствиям приводит сформулированный выше принцип эквивалентности. При взлете с ускорением космического корабля космонавты испытывают перегрузки. Это эквивалентно тому, что космонавты как бы оказываются в более сильном гравитационном поле, чем поле Земли. Ускоренное движение приводит к тем же следствиям, что и гравитационное поле. С другой стороны, при свободном движении ракеты (двигатели отключены) вокруг Земли все тела в кабине становятся невесомыми. Их свободное падение (вместе с космическим кораблем), находясь внутри корабля, невозможно отличить от свободного движения (движения по инерции, когда на тело не действует внешняя сила) в отсутствии поля тяготения (в малом объеме корабля - это очень важное условие - устраняется поле тяготения). Все, о чем рассказано выше, мы неоднократно видели при телевизионных передачах с борта космических кораблей. Таким образом, не существует возможности отличить состояние свободного движения от состояния свободного падения. Свободное падение и свободное движение - утверждает Эйнштейн своим принципом эквивалентности - это одно и то же!

Мы знаем, что свободное движение (движение по инерции) происходит прямолинейно. Но прямая - это простейшее понятие геометрии. Тем самым мы естественным образом устанавливаем связь между физикой и геометрией. В нашем мире справедлива так называемая геометрия Евклида, в которой пространство трехмерно (право - лево, верх-низ, вперед-назад), существует только одна прямая, соединяющая две точки, сумма углов треугольника всегда равна 180 градуса и т. д.) По прямой, которая является кратчайшим расстоянием между двумя точками, распространяется световой луч (в этом мы снова обнаруживаем связь физики и геометрии).

Но помимо евклидовой геометрии существуют и другие, неевклидовы геометрии. Первым такую неевклидову геометрию построил русский математик ректор Казанского университета Н.Лобачевский (1829г.). В качестве наглядного примера “мира”, где геометрия неевклидова, можно привести кривой мир поверхности шара. Двухмерные существа в этом мире (у них не было бы высоты) под “прямой” (кратчайшей) линией между двумя точками понимали бы дугу большого круга, сумма углов треугольника, лежащего на поверхности шара, уже не была бы равна 180 градусам и т.д. Эти представления о геометрии на поверхности шара можно обобщить на более сложные поверхности. Но главным в наших рассуждениях является то, что геометрия Евклида - это лишь одна из возможных геометрий. А так как геометрия связана с физикой, то следовательно, могут существовать иные миры, где действуют более сложные физические законы.

И снова первым, кто пытался выяснить, какой геометрии подчиняется наш мир, был Н. Лобачевский. Неточность измерений не позволила ему найти правильный ответ. Основную идею Н. Лобачевского (связь геометрии мира и физики) трансформировал в своей теории А. Эйнштейн. Неоднородность гравитационного поля, изменение его от точки к точке Эйнштейн объяснил парадоксально: геометрия физического мира не евклидова и такого физического объекта - гравитационного поля - не существует, нет и никаких сил тяготения. И движение, которое мы до сих пор называем свободным падением, фактически является свободным движением по кратчайшей (геодезической) линии в этом неевклидовом мире.

В этом месте наших рассуждений следует сказать, что для описания любого физического процесса, в том числе и свободного движения, нужно задавать не только пространственные координаты, но и время. С этой точки зрения наш мир является не трех-, а четырехмерным. Правда, время, в отличие от пространственных координат, может изменяться только от прошлого к будущему. Связь физики с геометрией проявляется и в том, что не только пространственный мир может быть

неевклидовым, но и ход времени в разных точках пространства может быть разным.

Теперь установим, от чего зависит геометрия мира. Для этого совершим краткое путешествие с физическими представлениями о пространстве и времени. В том, что эти понятия трудны для человеческого сознания, мы убеждаемся на многочисленных примерах, например, путаница с понятиями “вчера” и “завтра” в детском возрасте, трудности ориентировки в пространстве, которой лишены и многие взрослые (когда - то к рукавам одежды неграмотных новобранцев привязывали пучки сена и соломы и для поворота направо и налево отдавались команды “на сено!” или “на солому!”). Не правда ли, смешно, а вспомним, что происходит в строю школьников, когда подается одна из команд поворота...). Опуская “страницу” наивных представлений о пространстве и времени в древние времена, начнем путешествие с научных представлений И. Ньютона. Пространство, по Ньютону, - это “ящик”,местилище всего бытия, оно существует независимо от тел и явлений, происходящих в “ящике”. Время - это длительность процессов (явлений), во всем мире существует единое (мировое) время, его ход не зависит ни от места нахождения часов, ни от характера процессов. Пространство и время не связаны друг с другом, не влияют друг на друга, они - самостоятельные сущности.

Не касаясь причины эволюции наших представлений о пространстве и времени (интересующихся этим вопросом отсылаем к книге автора статьи, указанной ниже в списке литературы), сформулируем кратко то новое, что внес в данную проблему А. Эйнштейн в своей специальной теории относительности. Оказалось, что нельзя отрывать пространственное описание явления от временного момента, именно тогда фактически в физику было введено представление о том, что наш мир имеет четыре измерения (три пространственных и одно временное). А так как в основу специальной теории относительности был положен постулат о постоянстве скорости света в однородной и изотропной среде (одинаковой во всех точках и по всем направлениям), его макси-

мальности (предельности) в вакууме и независимости от скорости движения источника света и наблюдателя, то отсюда непосредственно следовало, что в разных точках пространства время течет по-разному (по определению, скорость численно равна отношению пройденного расстояния к промежутку времени прохождения этого расстояния, если меняется расстояние между событиями для разных наблюдателей, то и промежутки времени также должны изменяться, только в этом случае скорость света в вакууме может быть всегда одной и той же величиной). В специальной теории относительности, как и в теории Ньютона, пространство однородно и изотропно, и время равномерно течет от прошлого к будущему. При этом Эйнштейн не учитывает, что в действительности вблизи тяготеющих масс свойства пространства (и времени) не обладают указанными свойствами. Направления в горизонтальной плоскости и по вертикали не равноценны (вспомните ходьбу по ровному месту и в гору!), часы-ходики, ход которых определяется притяжением к Земле, на равнине и высоко в горах имеют разный ритм. В рассматриваемом вопросе можно говорить, что специальная теория относительности, созданная Эйнштейном за 10 лет до ОТО - в 1905 году, - является приближенной теорией. Но это не умаляет ее значения в познании природы и в жизни человеческого общества.

Итак, чтобы учесть влияние на свойства пространства и времени гравитирующих масс, Эйнштейн и построил общую теорию относительности. Вот мы и пришли к ответу на поставленный выше вопрос: от чего зависит геометрия мира. Геометрия мира, и, следовательно, свойства пространства и времени, зависят от наличия и движения в пространстве и времени материи. Именно там, где имеется “сгусток” материи, геометрия мира отличается от той геометрии, которую мы наблюдаем в пределах малого участка земной поверхности и которую обычно называем плоской геометрией, или геометрией Евклида. Вблизи же массивных звезд (плотность их вещества достигает многих млн. тонн в 1 куб. см, средняя плотность Земли - 5,5 г/куб. см) свойства пространства и времени существенно отличаются от того, что мы

обнаруживаем вокруг нас на Земле. Говорят, что вблизи массивных тел геометрия не Евклидова, “кривая”. Последним словом хотят отметить отличие наблюдаемой геометрии от Евклидовой. В таком пространстве (по сути дела, нужно говорить о едином пространстве - времени) кратчайшим расстоянием между двумя точками будет не евклидова прямая, а кривая, подобная тому, как в двухмерном “кривом” мире поверхности шара кратчайшим расстоянием между двумя точками будет дуга большого круга. Именно по этой “кривой” (геодезической) будет распространяться световой луч, по такой геодезической линии будет происходить свободное движение тела.

Все изложенное выше следует из сложнейших уравнений, которые Эйнштейн получил в своей теории. (Сложность математического аппарата ОТО ограничивает круг ученых, которые занимаются разработкой проблем ОТО. Из сотен тысяч физиков и математиков на земном шаре только несколько сотен ученых посвятили себя этой теории. Данное замечание сделано для тех молодых людей, которые ищут область приложения своих способностей и осуществления мечтаний).

В 1922 году ленинградский математик А. А. Фридман решил эти уравнения и получил поразительный результат: наш обозримый мир не может находиться в статическом, равновесном состоянии, он должен либо расширяться, либо сжиматься. Все зависит от средней плотности вещества во Вселенной: если эта плотность меньше, чем  $10^{-29}$  г/куб. см, то мир будет вечно расширяться; если же эта плотность превышает  $10^{-29}$  г/куб. см, то Вселенная должна сжиматься. В настоящее время нет достоверных данных о средней плотности вещества в мире. Но вот в 1929 году американский астроном Хаббл обнаружил, что далекие звезды от нас “убегают”, мир расширяется, что предсказывало одно из решений Фридмана. Что будет со Вселенной потом (через много млрд. лет), будет она и дальше расширяться или наступит конец расширению и начнется сжатие (это другой вариант решения Фридмана) зависит от средней плотности вещества в мире.

Однако если мир сейчас расширяется, то можно рассчитать, сколько времени назад началось это расширение, когда материя была сконцентрирована в относительно малом объеме, когда произошло то, что получило название “Большой взрыв”. Эту идею первым высказал наш соотечественник Г. Гамов. Ученые обнаружили и восточку от этого “взрыва”, так называемое “реликтовое” (остаточное от древности) излучение, которое сопровождало “взрыв” и затем, расширяясь, заполнило все мировое пространство. Если ученые установят, что средняя плотность материи во Вселенной больше  $10^{-29}$  г/куб. см, то наблюдаемое сейчас расширение должно остановиться и начнется сжатие. Все этапы жизни Вселенной продолжаются десятки млрд. лет. Поэтому достоверно говорить о “Большом взрыве” как об акте творения мира не следует. Существуют и другие модели развития Вселенной. Например, Вселенная подобна маятнику и периоды расширения сменяются периодами сжатия, и эти процессы повторяются бесконечное число раз. Конечно, мир непрерывно обновляется, одни звезды сгорают, другие рождаются. Но для такой модели развития не требуется какого-либо первоначального толчка. В этой модели развития Вселенной “Большой взрыв” - это тот момент, когда гравитационное притяжение всех тел Вселенной оказалось слабее того противодействующего светового давления, которое создают миллиарды звезд при своем сближении.

Уравнения Эйнштейна предсказывают существование “гравитационных волн” - распространяющихся изменений свойств пространства-времени, возникающих из-за мощных нестационарных процессов во Вселенной. До сих пор экспериментально гравитационные волны не обнаружены. В ОТО были предсказаны так называемые нейтронные звезды, в которых из-за мощных гравитационных взаимодействий атомы были “раздавлены”, электроны “вдвинуты” в ядра и, соединяясь с положительно заряженными протонами, входящими в состав ядер, превращали их в нейтральные частицы-нейтроны (отсюда и название этих звезд).

Дальнейшее сжатие звезды может привести ее к “коллапсу” - катастрофическому уменьшению размеров и превращению в так называемую “черную дыру”. Такое название возникло потому, что вокруг “черной дыры” пространство-время приобрели такие свойства, такую “кривизну”, что ни один сигнал не может покинуть такую звезду, она действительно становится невидимой - “черной дырой” во Вселенной. И все же “черную дыру” можно обнаружить по ее мощному влиянию на движение других небесных тел. У “черной дыры” есть и другие экзотические свойства...

Завершая рассказ об ОТО, мы отсылаем читателя к указываемой ниже литературе (она есть, например, в областной научной библиотеке), в которой можно еще раз проследить логику построения ОТО и познакомиться с другими решенными и нерешенными задачами ОТО.

### ***Заключение***

Автор выполнил поставленную задачу - написать Введение в удивительный мир общей теории относительности - релятивистской теории тяготения. И все же он с сожалением расстается с теми читателями, которые дочитали Введение до последней страницы. Сожаление связано с тем, что мы только начали знакомиться с красивейшей теорией, созданной гением человечества - Альбертом Эйнштейном. Теория еще не завершила своего развития и представляет большие творческие возможности для тех, кто хочет связать свою будущую жизнь с ФИЗИКОЙ. Но сначала нужно познакомиться с тем, что уже сделано дальше того, о чем рассказано во Введении. Именно для таких любознательных автор составил краткий список дополнительной литературы.