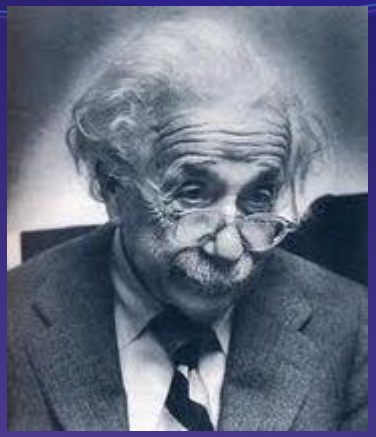
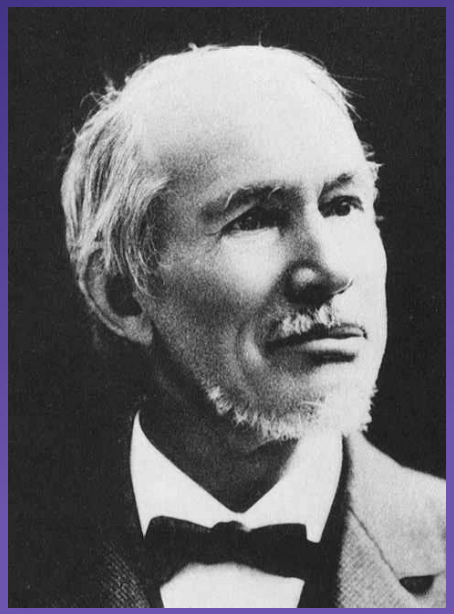
ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Модели Вселенной

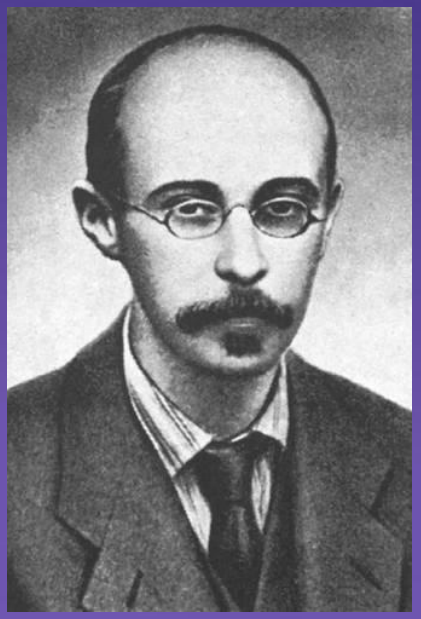
- Модель В. де Ситтера
- Модель Ж.Леметра
- Модели А.А.Фридмана
- Модель Эйнштейна-де Ситтера





В.де Ситтер

Ж.Леметр



А.Фридман

Вселенная Эйнштейна

Модель Эйнштейна – модель стационарной неевклидовой сферической Вселенной .

Эйнштейн, придерживаясь своих взглядов относительно наиболее общих черт Вселенной, решил, основываясь на своей интуиции, ввести в левую часть своего уравнения новое слагаемое лямбда-член Λ В этом случае можно получить решение, соответствующее условиям однородности и статичности Вселенной. Параметр Λ называют космологической постоянной.

Итак, Вселенная оказалась *замкнутой трехмерной сферой*.

Вселенная Эйнштейна заполнена галактиками, расстояние между которыми постоянно. Вселенная Эйнштейна бесконечна во времени (вечна), но конечна в пространстве в том смысле, что содержит большое, но ограниченное число звезд и звездных систем.

Гравитационный парадокс (силы тяготения – силы притяжения, все объекты должны собраться вместе) устранялся Эйнштейном введением "космического отталкивания", проявляющегося лишь на огромных расстояниях. . Эта сила универсальна: она зависит не от массы тел, а только от расстояния, их разделяющего. Ускорение, которое эта сила сообщает любым телам, разнесенным на расстояние, должно быть пропорционально расстоянию.

В стационарной модели Вселенной Эйнштейна ускорение, создаваемое притяжением, должно уравновешиваться ускорением,

Модель де Ситтера

Модель расширяющейся Вселенной, в которой не существует вещества или излучения (1917).

При полном отсутствии вещества (включая и гравитационные поля) пространство-время должно быть плоским. Но в уравнение ОТО Эйнштейна входил лямбда — космологический член, играющий роль источника тяготения, искривляющего пространство-время.

Пространство де Ситтера *эллиптично, со своим местным временем в любой его точке*, т.е. пространство-время статично - оно имеет не зависящие от времени 4-инварианты. Метрика де Ситтера может быть приведена к виду, при котором никакого расширения в ней нет - этот мир вечен, неизменен и идеально симметричен по своим геометрическим свойствам.

Теоретически вылетев из одной точки пространства и выдерживая прямой линию полета, путешественник должен был возвратиться не только *в ту же точку пространства, но и в то же самое время.*

Во Вселенной де Ситтера *чем дальше* взгляд земного наблюдателя проникал бы в пространство, тем *медленнее* должны были ему казаться происходящие *там процессы*, но по мере приближения к этим областям он увидел бы постепенное оживление хода времени.

Вакуум де Ситтера отличается от «пустого вакуума», его свойства , т.е. динамика вселенной, зависят от космологической постоянной.

Считается, что реальная Вселенная описывалась моделью де Ситтера на очень ранних стадиях расширения – инфляционная модель вселенной (ускоренное расширение Вселенной на ранней стадии Большого взрыва (при температуре выше 10^{28} К).

Рождение Вселенной по де Ситтеру

Стадия расширения длилась примерно 10^{-35} с вакуум как бы растягивался без изменения своих свойств. Образовавшееся состояние Вселенной было крайне неустойчивым, энергетически напряженным. В таких случаях достаточно возникновения малейших неоднородностей, играющих роль случайной затравки, чтобы вызвать переход в другое состояние - при переходе вакуума в другое состояние мгновенно выделилась колоссальная энергия за счет разности его начального и конечного состояний и за 10^{-32} с пространство раздулось в громадный раскаленный шар с размерами много большими видимой нами части Вселенной. При этом произошло рождение из вакуума реальных частиц, из которых со временем сформировалось вещество нашей Вселенной.

В первые три минуты ее существования температура снизилась до 10^{9} К. В этот момент происходил процесс первичного нуклеосинтеза - образование ядер водорода и гелия с небольшой добавкой ядер дейтерия и лития. В результате сформировалась очень плотная плазма, состоявшая из ядер водорода, гелия (с добавкой ядер дейтерия и лития), электронов и фотонов.

Подтверждением теории Большого Взрыва является обнаружение реликтового излучения, связанного с существованием первоначального сверхплотного сгустка вещества и излучения. Название «реликтовое излучение» ввел отечественный астрофизик И.С. Шкловский .

Модель Леметра

Модель вселенной, которая начинается с Большого взрыва, сменяющегося затем статической фазой и последующим бесконечным расширением (1927) - процесс расширения Вселенной от состояния "первичного атома.

Это модель мира с космологическим слагаемым, не равным нулю, т.е. нестационарная. Радиус кривизны пространства в его модели меняется со временем. Пространство Вселенной сферическое, закрытое и конечное.

Расширение приводит в равновесие силу тяготения и, таким образом, препятствует тому сжатию вещества во Вселенной в точку. Расширяющаяся Вселенная с каждым разом становится больше, когда-то очень давно Вселенная была одной-единственной точкой. Леметр назвал эту точку точкой начала Вселенной.

Леметр был первым, кто чётко заявил, что объекты, населяющие расширяющуюся Вселенную, распределение и скорости движения которых и должны быть предметом космологии — это не звёзды, а гигантские звёздные системы, галактики.

В 1933 году он отождествил космологическую постоянную с плотностью энергии вакуума.

Модели Фридмана

Модели Фридмана – модели Вселенной, которая может коллапсировать внутрь себя (1922-1924): Λ =0 и потому Вселенная не может находиться в стационарном состоянии — она должна либо расширяться, либо пульсировать.

Если распределение вещества во Вселенной в среднем равномерно, то она должна или сжиматься, или расширяться, причём в последнем случае должен наблюдаться линейный закон между расстоянием и скоростью убегания (закон Хаббла).

Три модели Фридмана (из уравнений Эйнштейна) в зависимости от средней плотности вещества во Вселенной (вклад полей незначителен):

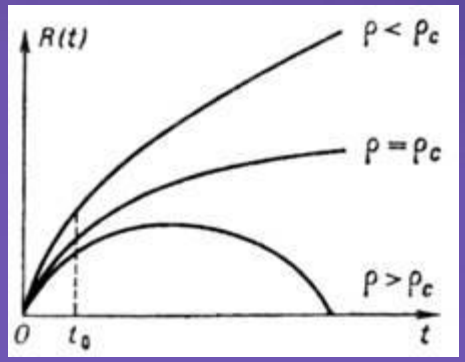
$$\rho_{\text{êð}} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

H – постоянная Хаббла (***v=Hr, в наст время H=70 км/с***),
G – постоянная всемирного тяготения.

Конечное значение плотности тормозит расширение, но с расширением плотность падает и замедление уменьшается.

В настоящее время $\rho_{кр}$ =9,31·10^{-29} г/см^3 (или 5,20·10^{-6} ГэВ/см^3) или 5,5 атома водорода на м^3), а данные измерений 3·10^{-31} г/см^3

Фридмановские космологические модели описываются зависимостью от времени масштабного фактора R(t) (относительное расстояние между телами Вселенной). Точку в момент времени *t*=0 можно назвать «началом» Вселенной.

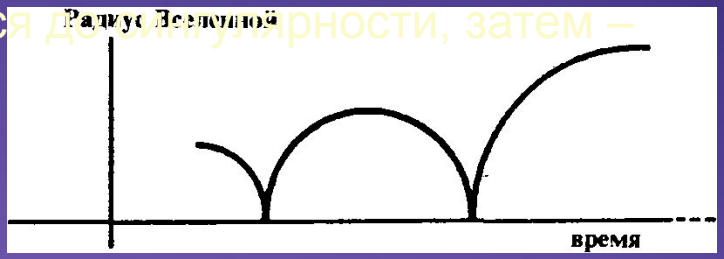


Модели Фридмана

Фридмановские космологические модели:

I – **открытая модель:** бесконечное гиперболическое расширение , пр-во отрицательной кривизны, бесконечно и безгранично, бесконечное число объектов;
II – **плоская модель** (открытая): параболическое расширение с уменьшающейся скоростью, пр-во нулевой кривизны, бесконечно и безгранично, бесконечное число объектов;
III - **закрытая модель** (замкнутая): сферическое расширение сменится сжатием, пр-во положительной кривизны, безгранично, но конечно, конечное число объектов.

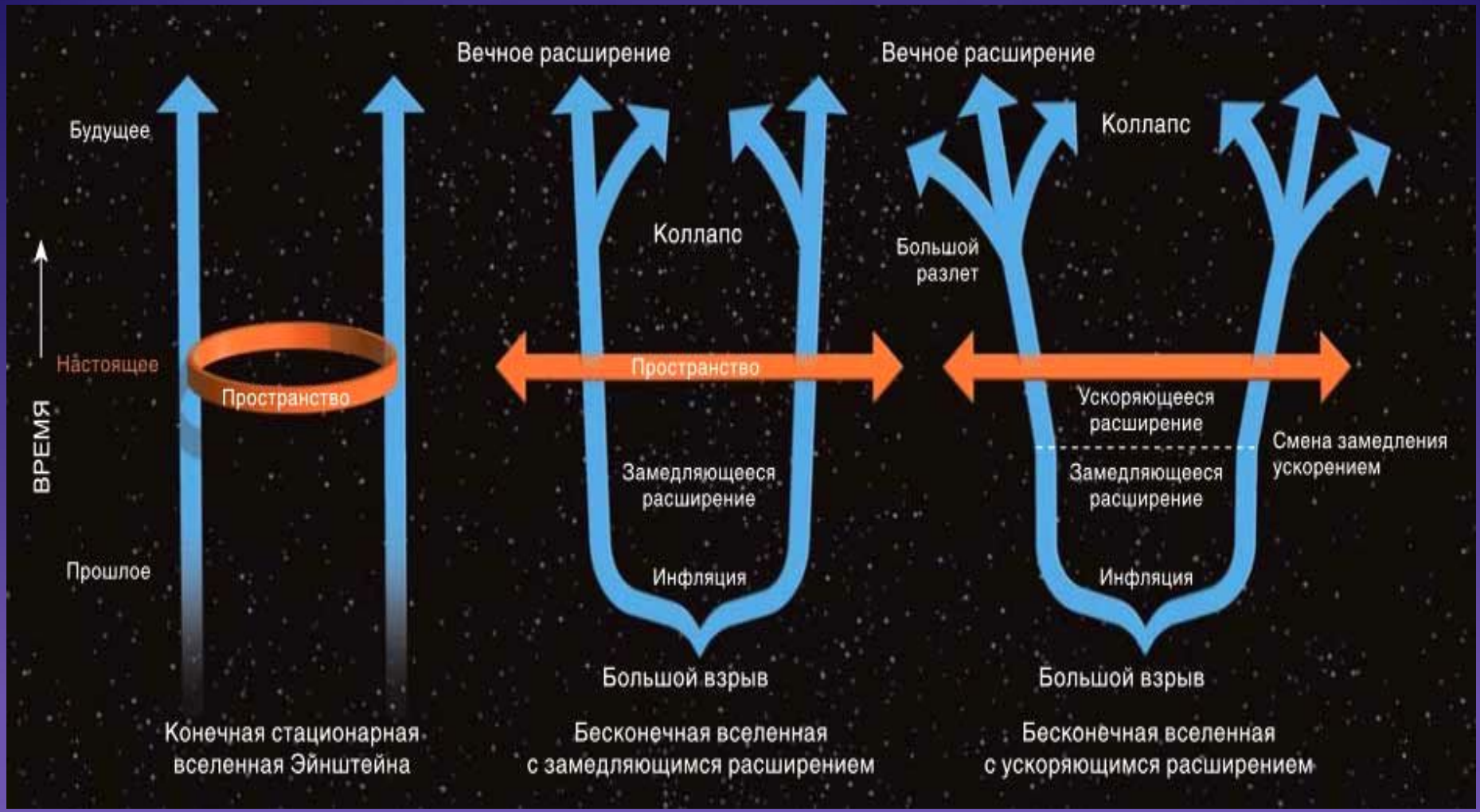
Пульсирующая модель - при $\Lambda > 0$ и $\rho > \rho_{кр}$, масштабный фактор возрастает от сингурлярности до максимума, затем уменьшается до сингулярности, затем – все повторяется.
Каждый новый цикл начинается с большей энтропией, их не более 100 в прошлое.



МОДЕЛЬ Фридмана-Леметра-**Робертсона-Уокера**
– та же модель Фридмана (описывающее однородную изотропную Вселенную с постоянной кривизной), решение уравнений повторно найдено Леметром (1927) и математически исчерпывающее описание таких пространств дано Робертсоном и Уотсоном (1935).

Решения Фридмана

Уравнение Фридмана $ds^2 = dt^2 - a(t)^2 dl^2$, где l — пространственный элемент длины в пространстве постоянной кривизны, $a(t)$ — масштаб (“размер”) Вселенной.



Расширение Вселенной

Э.Хаббл

В 1929 году Э.Хаббл экспериментально установил систематическое красное смещение спектральных линий галактик (их взаимное удаление), определил закон, по которому скорости удаления галактик от нас возрастают по мере увеличения расстояния:

$cz=H_0D$

где z — красное смещение галактики, D — расстояние до неё, H_0 — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Хаббла.

Мера красного смещения z достигает значения 1 на расстоянии

$r=c/H=5000$ *Мпк*. Это расстояние называется радиусом Хаббла. Основная часть наблюдаемой Метагалактики располагается внутри этого радиуса.

Сегодня установленный факт:

Вселенная возникла 13,73 ± 0,12 млрд лет назад из некоторого начального "сингулярного" состояния с температурой примерно 10 10 K и плотностью около 105 г/см^3, и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается.

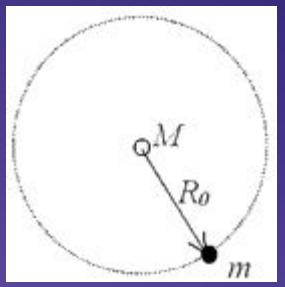
Скорость расширения:

$\upsilon=Hr$, где *H – постоянная Хаббла, r* –расстояние между галактикой и наблюдателем

Гравитационный парадокс

Гравитационный парадокс (парадокс Неймана-Зеелигера) - ньютоновская теория тяготения приводит к бесконечным значениям гравитационного потенциала и тем самым не позволяет однозначно определить абсолютные и относительные гравитационные ускорения частиц в бесконечной Вселенной, заполненной бесконечным количеством вещества (напр., однородно распределённого).

Выберем сферу радиуса R_0 так, чтобы средняя плотность была равна средней плотности Вселенной ρ . Пусть на поверхности сферы находится тело массой m, например, Галактика. Согласно теореме Гаусса о центрально-симметричном поле, сила тяготения со стороны вещества массой M, заключенного внутри сферы, будет действовать на тело так, как если бы все вещество было сосредоточено в одной точке, расположенной в центре сферы. При этом остальное вещество Вселенной никакого вклада в эту силу не вносит.



$F_T = G\frac{M \cdot m}{R_0^2}$ $g = G\frac{4}{3}\pi\rho R_0$ пусть $G\frac{4}{3}\pi\rho = b$ $g = bR_0$ - ускорение свободного падения тела к центру сферы зависит только отрадиуса сферы R_0, т.к. радиус сферы и положение центра сферы выбраны произвольно, возникает неопределенность в действии силы на массу m и направление ее движения.

Термодинамический парадокс

Термодинамический парадокс (тепловая смерть Вселенной): согласно необратимости тепловых процессов, все тела во Вселенной стремятся к тепловому равновесию – принцип возрастания энтропии (все виды энергии во Вселенной, в конце концов, должны перейти в энергию теплового движения, которая равномерно распределится по веществу вселенной, после чего в ней прекратятся все макроскопические процессы), поскольку Вселенная существует бесконечно долго, то должно было наступить тепловое равновесие (состояние с максимальной энтропией), но оно не наблюдается.

При этом Вселенная предполагается однородной - вещество должно быть равномерно распределено по всему объему Вселенной, и изотропной.

Решение гравитационного и термодинамического парадоксов

Гравитационный парадокс – не возникает в ОТО, т.к.

- потенциала тяготения запаздывает из-за конечности скорости действия тяготения *c* (поле тяготения бесконечно удаленных тел достигает данной точки только через бесконечно большое время);
- поле тяготения неаддитивно – нельзя рассматривать поля тяготения космических тел как сумму их гравитационного потенциала, т.к. принцип аддитивности применим лишь в ограниченной области, а Вселенная неограниченна.

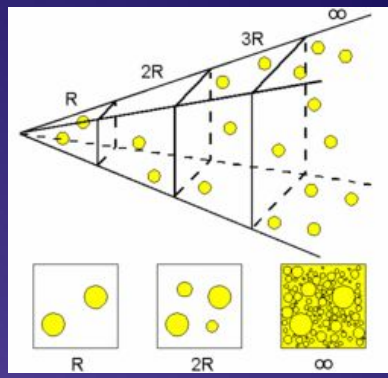
Термодинамический парадокс не возникает в ОТО, т.к.

- имеется сингулярность, временная граница в прошлом Вселенной, Вселенная рассматривается как гравитирующая система – это означает, однородное распределение не соответствует максимальной энтропии, т.е максимальная энтропия недостижима;
- при расширяющейся Вселенной и падении плотности материи на объём пространства гравитационная постоянная должна падать, но этого не происходит — Вселенная является незамкнутой, термодинамически открытой неравновесной системой, к которой неприменимы закономерности замкнутых систем (2е начало термодинамики).

Фотометрический парадокс и его решение

Фотометрический парадокс (Ж. Шезо, Г. Ольберс): В наблюдаемой Вселенной звезды расположены неравномерно и имеют разную светимость.

Но если Вселенная бесконечна, то звезд в ней бесчисленно много, при сравнительно равномерном распределении звезд в пространстве число звезд, находящихся на данном расстоянии, возрастает пропорционально квадрату расстояния до них. Поскольку блеск звезды ослабевает пропорционально квадрату расстояния до нее, то ослабление общего света звезд из-за их удаленности должно в точности компенсироваться возрастанием числа звезд, и вся небесная сфера должна равномерно и ярко светиться.



Фотометрический парадокс не возникает в ОТО, т.к.:

- конечность возраста Вселенной означает, что Вселенная, наблюдаемая на больших расстояниях, настолько молода, что звезды еще не успели в ней образоваться, значит, нет их вклада в светимость;
- красное смещение (разбегание галактик) приводит к тому, что суммарная энергия, поступающая к нам от далеких галактик, в $(1+z)^2$ раз меньше, чем если бы эта галактика не удалялась от нас вследствие космологического расширения.

Проблемы ОТО и их решения

✔ С точки зрения математической физики энергия представляет собой величину, сохраняющуюся из-за однородности времени, но в ОТО время неоднородно, оно –компонент пространства-времени, т.е в ОТО не существует такой величины, эквивалентной энергии в СТО (можно определить величину энергии для большой области, но нельзя указать, где она сосредоточена, т.е. вычислить плотность энергии гравитационного поля).

✔ **Н**евозможно построить для ОТО квантово-полевую модель.

- Локальный (для ограниченных областей) закон сохранения энергии-импульса материи и электромагнитного поля в ОТО существует; кроме того, в полную энергию, кроме энергии материи и электромагнитного поля, необходимо включать также и энергию самого гравитационного поля (она не может быть хорошо определена). Возможно, принцип эквивалентности не выполняется в отношении массы-энергии самого гравитационного поля.
- По крайней мере слабое) гравитационное поле можно рассматривать как квантовое безмассовое поле спина 2 (ведутся поиски гравитона).

Гравитационный радиус

Поле тяготения вокруг сферического невращающегося тела получило название поля Шварцшильда.

Если вторая космическая скорость окажется равна скорости света - , это соответствует гравитационному радиусу:

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

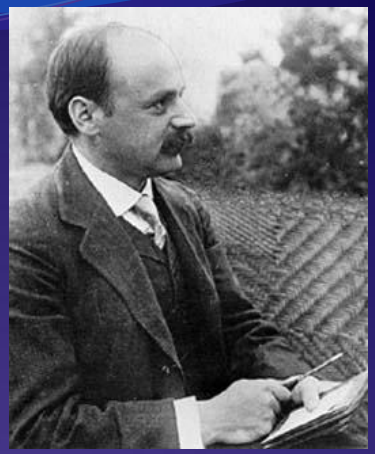
Сфера с радиусом, равным гравитационному, получила название сферы Шварцшильда. На ее поверхности сил тяготения оказалась бы бесконечной.

Сферическое тело, радиус которого равен гравитационному радиусу и меньше, не может находиться в покое, должно сжиматься к центру.

Как только радиус небесного тела становится равным его гравитационному радиусу, свет не сможет уйти с поверхности этого тела к далекому наблюдателю, то есть оно станет невидимым (черная дыра).

Нарастание гравитационной силы с приближением тела к сфере Шварцшильда: к катастрофическому, неудержимому его сжатию, т.е. релятивистскому коллапсу.

Р. Оппенгеймер и Г. Волков предсказали возможность возникновения черных дыр. Название «черная дыра» в конце 60-х годов придумал его Д.Уилер.



К.Шварцшильд

Сфера Шварцшильда

В области излучения у границы черной дыры (на сфере Шварцшильда) время как бы замирает для далекого наблюдателя. Этот наблюдатель, следя, например, за камнем, падающим к черной дыре, видит, как у самой сферы Шварцшильда он постепенно «тормозится» и приблизится к границе черной дыры лишь за бесконечно долгое время.

Нельзя обнаружить поверхность застывшей у гравитационного радиуса звезды и радиолокационным методом. Радиосигналы будут бесконечно долго двигаться к гравитационному радиусу и никогда не вернутся к пославшему их наблюдателю. Звезда для внешнего наблюдателя полностью «исчезает», и остается только ее гравитационное поле. Внешний наблюдатель никогда не увидит то, что произойдет со звездой после ее сжатия до размеров меньше гравитационного радиуса.

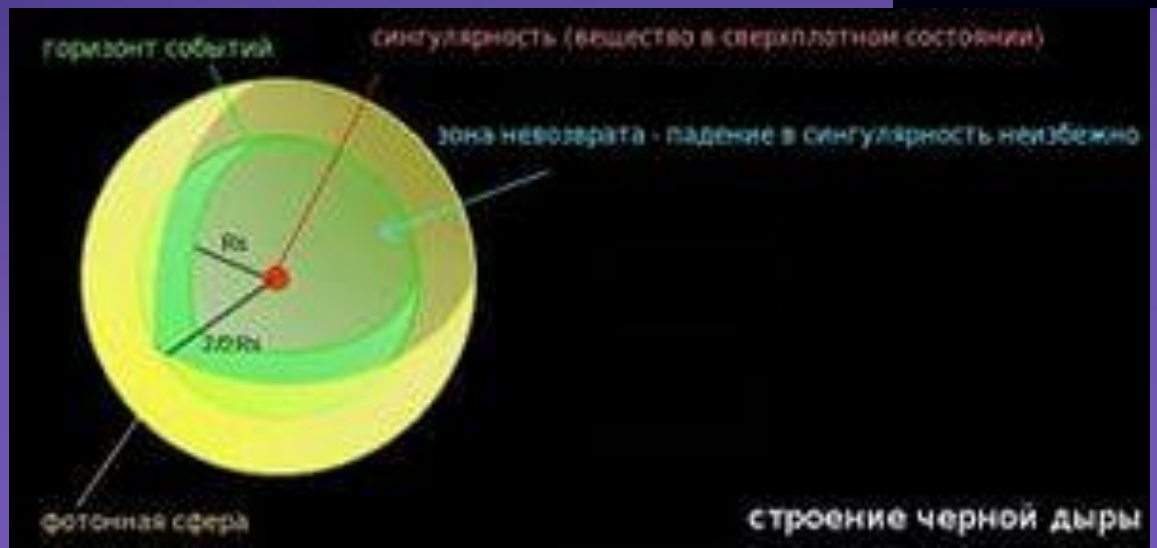
С точки зрения СТО один и тот же процесс с точки зрения разных наблюдателей имеет различную длительность , по ОТО - бесконечное время одного наблюдателя на неподвижной ракете равно конечному очень малому промежутку времени другого (на падающей ракете).

Взгляни-ка на дорогу! Кого ты там видишь?
Никого,— сказала Алиса.
Мне бы такое зрение! — заметил Король с завистью.— Увидеть Никого! Да еще на таком расстоянии!

***Л. Кэрролл* «Алиса в Зазеркалье»**

И.Д.Новиков. Черная дыра

Область некоего пространства, в которой гравитационное притяжение настолько велико, что ни излучение, ни вещество, не могут покинуть эту область, называют черной дырой (X1 Лебедя)



Член-корреспондент Российской Академии наук, профессор, зам. директора Астрокосмического центра ФИАН, доктор физико-математических наук. Директор (1994) Института теоретической астрофизики в Копенгагене

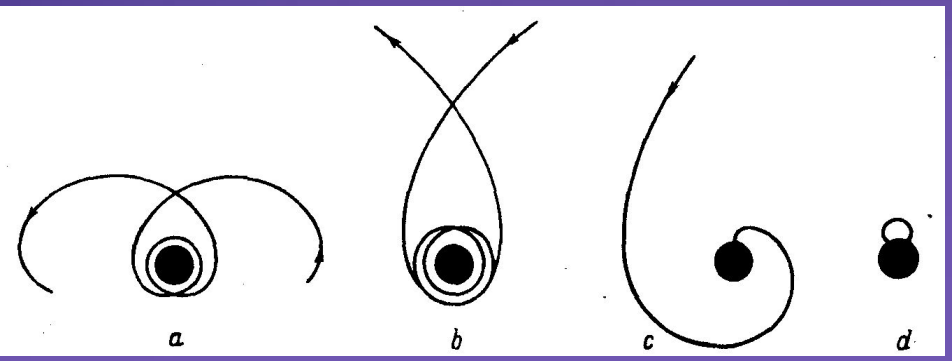
Движение в поле тяготения черной дыры

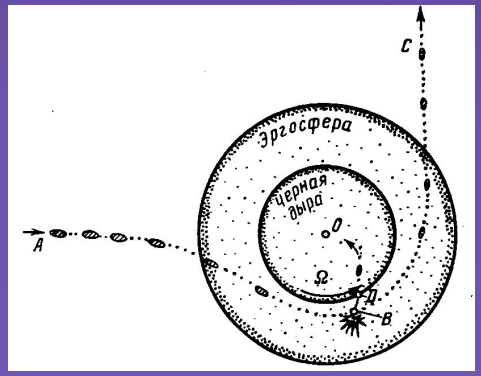
Если прилетающее тело движется на большом расстоянии от черной дыры (на расстоянии десятков гравитационных радиусов и больше), то справедливы законы механики Ньютона и оно движется почти точно по параболе или гиперболе .

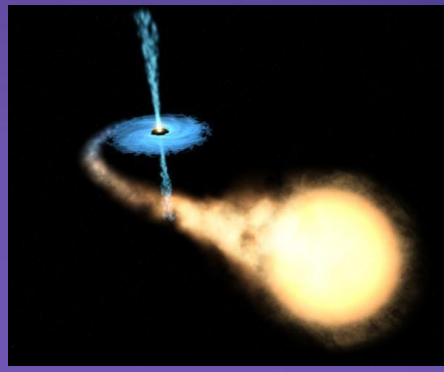
Если тело вдали от черной дыры имеет скорость много меньше световой и его орбита подходит близко к окружности с радиусом, равным двум гравитационным радиусам, то оно обернется вокруг черной дыры несколько раз и улетит.

Если вращающееся тело подойдет вплотную к указанной окружности двух гравитационных радиусов, то его орбита будет на эту окружность навиваться; тело окажется гравитационно захваченным черной дырой и никогда снова не улетит в космос (рисунок 3). Если тело подойдет еще ближе к черной дыре, оно упадет в черную дыру и также окажется гравитационно захваченным.

Процесс Пенроуза: когда черная дыра вращается или является заряженной, часть энергии, возникшей при превращении падающей в черную дыру массы в энергию, образует аккреционный диск, часть - вырывается наружу.





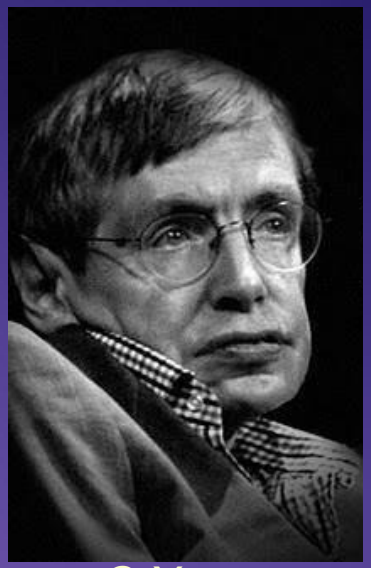


Эволюция черных дыр

Излучение С.Хокинга:

Внутри черной дыры наблюдается и спонтанное рождение частиц из вакуума в гравитационном поле. Благодаря туннелированию у частиц появляется возможность преодолевать потенциальные барьеры.

Это ведет к уменьшению массы черной дыры, она постепенно превращается в фотоны, нейтрино, гравитоны. Процесс этот чрезвычайно медленный - черная дыра с массой в 10 масс Солнца испарится за 10^{69} лет, а сверхмассивная черная дыра, масса которой 10 миллиардов масс Солнца - за 10^{96} лет.



С.Хокинг

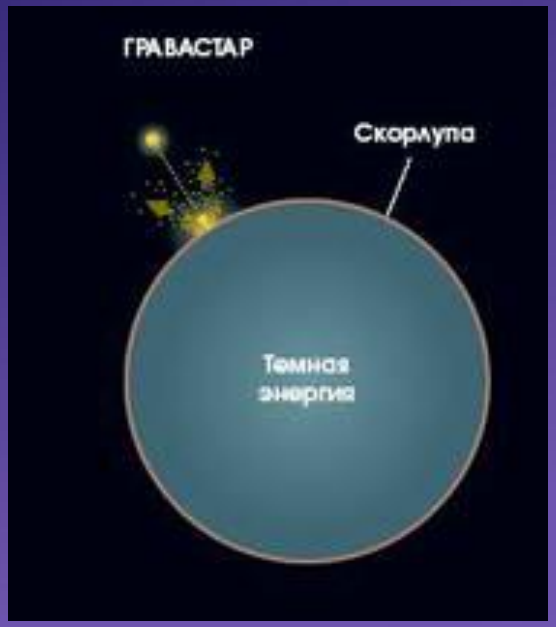
Такие процессы происходят и вблизи (но всё же снаружи) горизонта событий чёрной дыры. При этом возможно, что одна из частиц падает внутрь чёрной дыры, а другая улетает и доступна для наблюдения.

Из закона сохранения энергии следует, что такая «упавшая» за горизонт событий частица из рождённой виртуальной пары должна обладать отрицательной энергией, так как «улетевшая» частицы, доступная для удалённого наблюдателя, обладает положительной энергией.

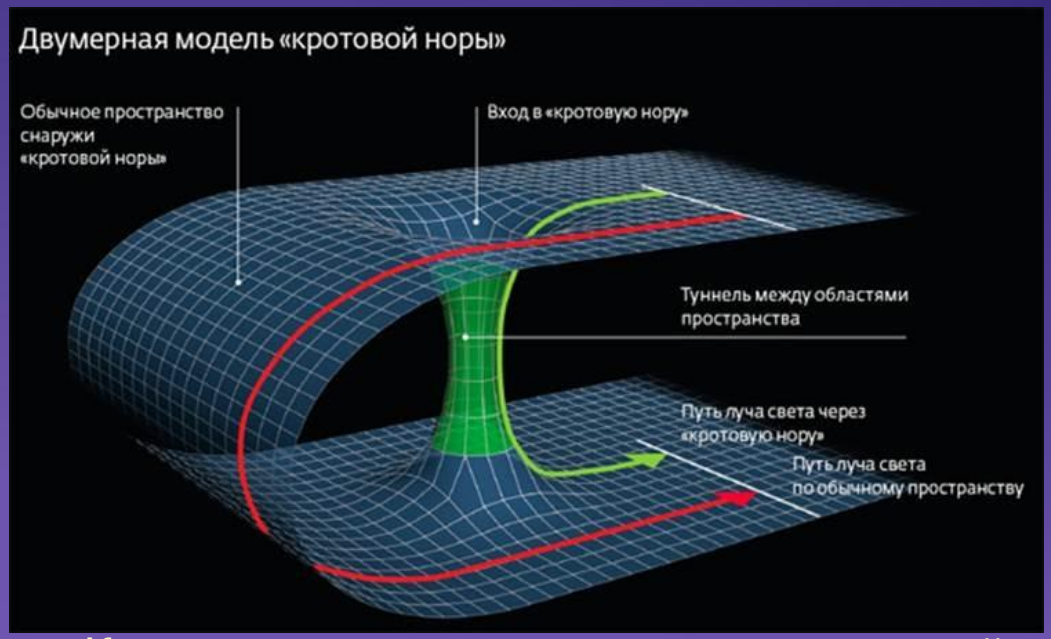
Идеи из ОТО

И.Д.Новиков: "Пока кротовые норы рассматриваются чисто теоретически, и люди часто с недоверием относятся к тому, что еще не подтверждено прямыми наблюдениями, такой скепсис понятен и очень полезен, поскольку только наблюдательные факты, подтверждающие предсказания даже глубоко математически развитой теории, доказывают ее правильность. Кротовые норы описываются исключительно сложной теорией, но она предсказывает реальные явления, которые можно наблюдать во Вселенной".

«… Мы знаем, что такие объекты в принципе существовать могут, но не знаем, есть ли они во Вселенной, и не знаем, можем ли мы их создать искусственно".



Гравастар (2002) – звезда из темной энергии, гравитационная вакуумная дыра



«Кротовая нора» - туннель, через который можно переместиться в другие Вселенные и даже в другое время

Проблемы ОТО и их решения