

Неклассическое естествознание

Теория относительности

Механистическая картина мира

- Первой теорией, которая объясняла все существующие к моменту ее создания явления природы, была **механика Ньютона** в основе которой лежали

- **Принцип относительности Галилея.**

Во всех ИСО механические процессы протекают одинаково.

- **Преобразования координат и скорости Галилея.**

$$\Delta l = \Delta l' \quad \Delta t = \Delta t' \quad a = a'$$

- инвариантность длины, времени и ускорения относительно преобразований Галилея.

Механистическая картина мира

Ньютон ввел в науку понятие **теории**

- теория должна основываться на небольшом числе постулатов;
- на базе этих постулатов (законов) можно делать различные выводы и предположения.
- теория должна допускать **проверку опытом**.
- Теория существует до тех пор, пока не находятся такие явления, которые невозможно объяснить с помощью её системы постулатов. Тогда создается новая система постулатов, объясняющая все явления природы. Старая система постулатов остается лишь частным случаем новой.

Проблемы Механистической КМ

- распространение электромагнитных волн (света). Гипотеза **эфира** – материальная среда, заполняет все пространство, частицы эфира переносят свет.
- Проблема: эфир оказывается избранной системой отсчета для всей Вселенной (противоречит принципу относительности Галилея).
- Эфир не обнаружен экспериментально.

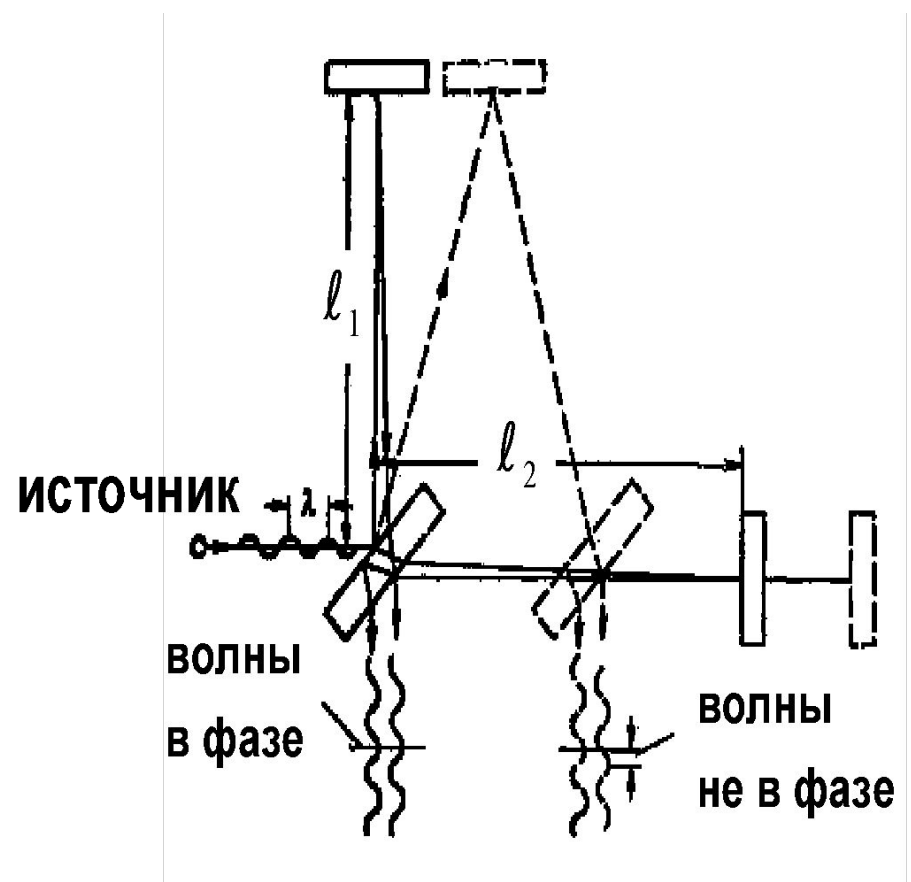
Опыты по обнаружению эфира

- Земля движется вокруг Солнца со скоростью 30 км/с в «эфирном море».
- В направлении движения Земли скорость распространения света должна быть $c-v$, а в противоположном направлении $c+v$. Так как $c=300000$ км/с, то эффект изменения скорости очень мал.
- В 1887 году Майкельсон и Морли предложили следующую схему эксперимента. В большой чаше с ртутью плавают бетонная плита, на которой смонтирована установка, состоящая из источника света, плоскопараллельной пластины и двух зеркал.
- Наблюдая интерференционную картину, можно было зафиксировать изменение разности хода в половину длины волны.

Опыт Майкельсона-Морли (1887)

- Если скорости распространения света по направлению движения Земли и перпендикулярно ему различны, то и времена прохождения этих одинаковых расстояний будут различны. Интерференционная картина изменится при повороте установки относительно направления движения Земли.

Интерферометр



Объяснения результатов опыта Майкельсона-Морли

- Земля неподвижна
- Эфир увлекается Землей (эфирный ветер)—опровергнуто экспериментально
- длина предмета уменьшается в направлении движения (Фитцджеральд)
- время тоже изменяется, при движении замедляется ход часов (Лоренц)

Проблемы Механистической КМ

- несостоятельность гипотезы эфира
- уравнения Максвелла не инвариантны относительно преобразований Галилея
- вращение орбиты Меркурия вокруг Солнца (на $38''$ за 100 лет, по современным данным – на $43''$).

необходимость в пересмотре
классической механики Ньютона и
создании новой теории

Специальная теория относительности

- Альберт Эйнштейн
(1879 -1955)
- «К электродинамике
движущихся тел»
1905 г.
- «Воображение
важнее, чем знание».



Постулаты Специальной теории относительности (СТО)

- **Принцип относительности.** Все инерциальные системы отсчета равноправны. Во всех инерциальных системах отсчета не только механические, но и другие явления природы протекают одинаково.
- **Принцип постоянства скорости света** (*порождает принцип причинности*). Во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и равна $3 \cdot 10^8$ м/с.

Специальная теория относительности

Преобразования Лоренца $K \square K'$

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{\left(t - \frac{x \cdot v}{c^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y \quad z' = z$$

Специальная теория относительности

- В классической механике:
пространство пустое и абсолютное, время абсолютное.
- В СТО:
время и пространство не являются независимыми понятиями, а образуют единый пространственно-временной континуум (четырёхмерный).
- СТО описывает ИСО, движущиеся с любыми скоростями (в том числе со скоростями, близкими к скорости света).

Следствия из преобразований Лоренца

- Сокращение длин
движущихся отрезков

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- Замедление хода
движущихся часов

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Релятивистский закон сложения
скоростей

$$\vec{u} = \frac{\vec{u}' + \vec{v}}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}$$

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}$$

Инварианты СТО

- Четырехмерный вектор Минковского

$\{ict, x, y, z\}$

Интервал
$$\Delta S = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2} = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2}$$

$\Delta S^2 = \text{const}$

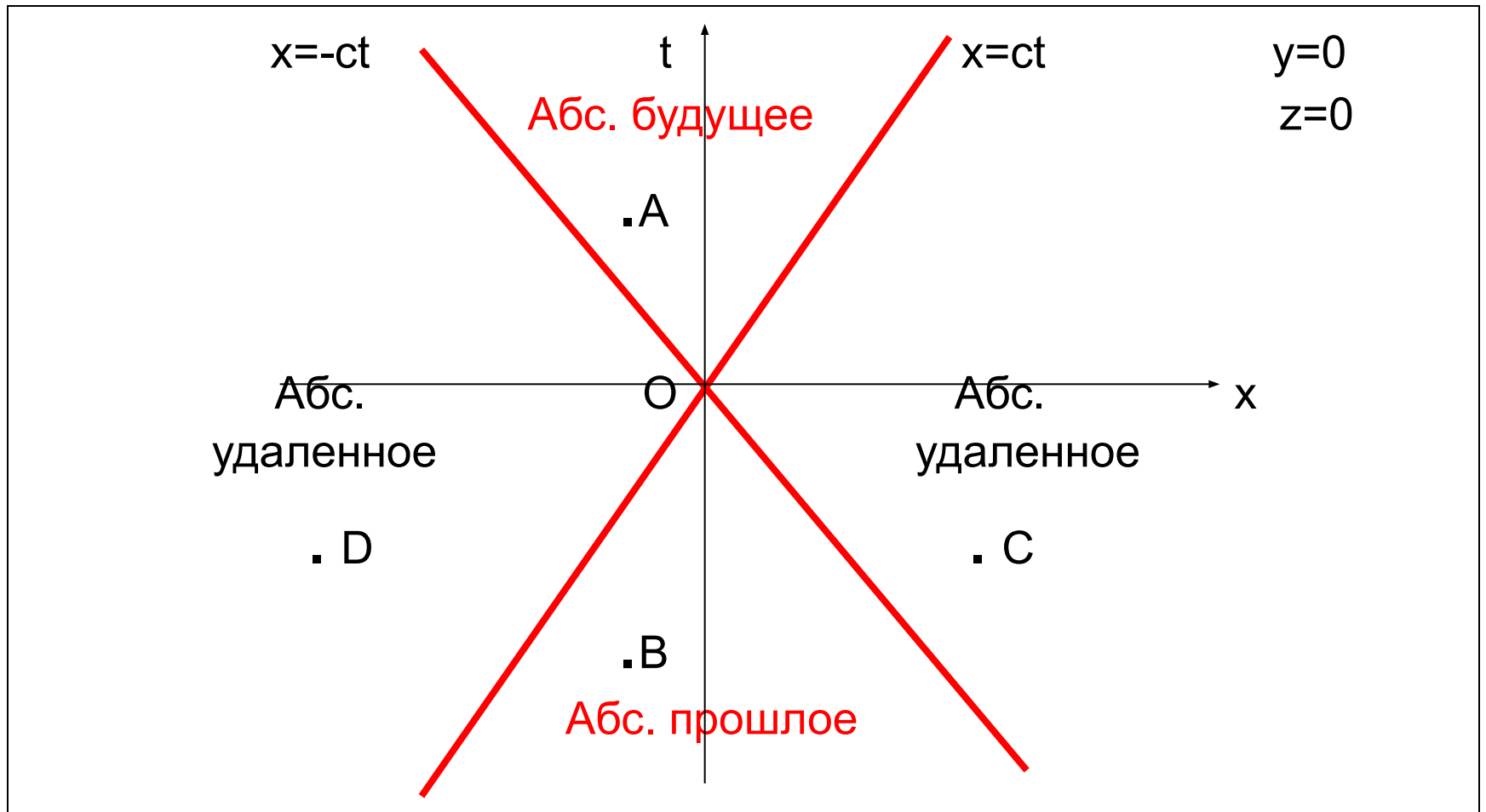
$\Delta S^2 > 0$ – времениподобный интервал

($\Delta l < c\Delta t$ – события могут быть связаны причинно-следственной связью)

$\Delta S^2 < 0$ – пространственноподобный интервал

($\Delta l > c\Delta t$ – события не могут быть связаны причинно-следственной связью)

Специальная теория относительности



Расходящиеся круги

Через 3 секунды

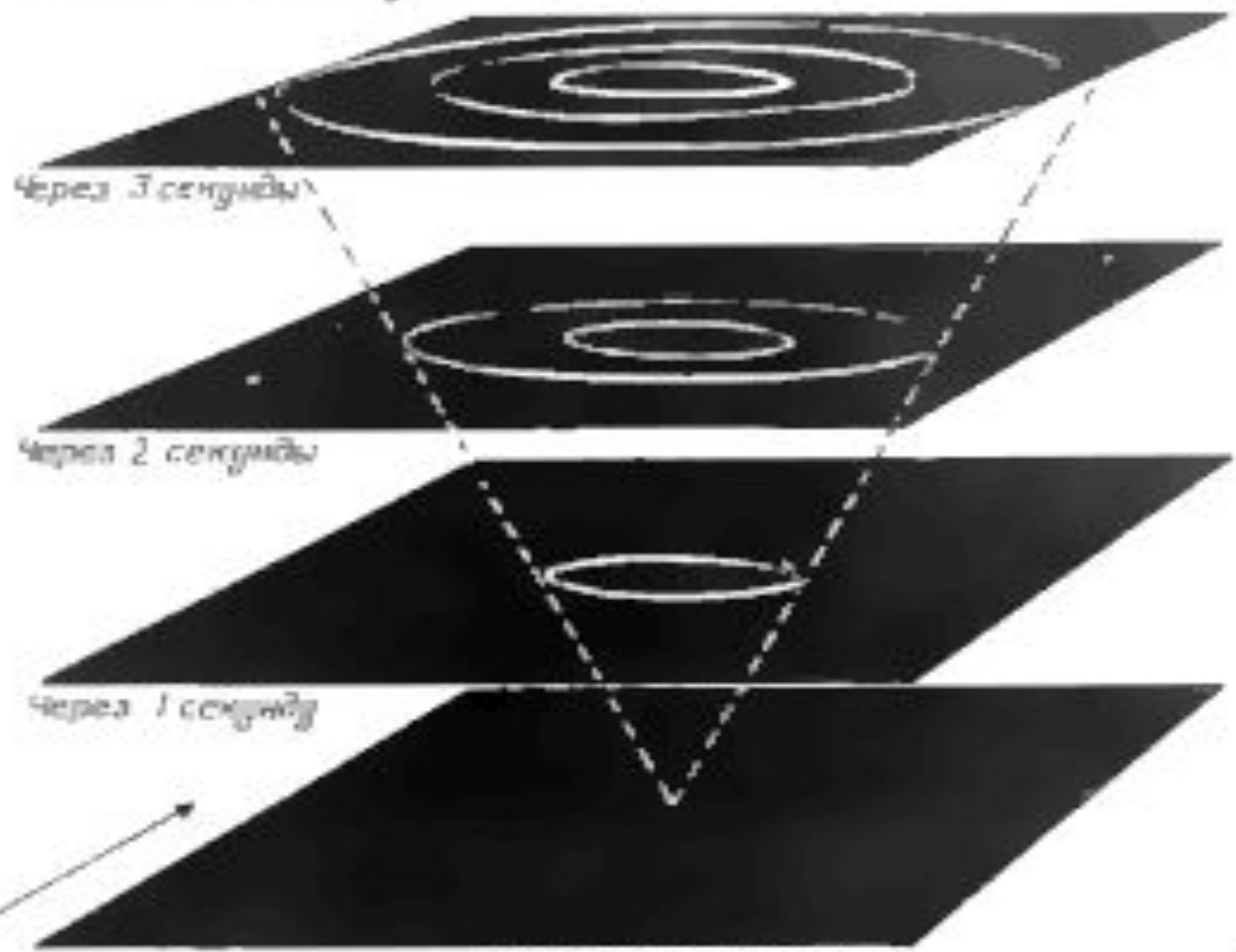
Через 2 секунды

Через 1 секунду

Точка падения камня
в воду

Время

Протяженность



Инварианты СТО

- выражения для импульса и энергии, при которых законы сохранения инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- релятивистским инвариантом является модуль вектора энергии-импульса, $\{iE/c, p_x, p_y, p_z\}$

$$E^2/c^2 - p^2 = const$$

Масса в СТО

- В СТО возникает дополнительная (кроме кинетической и потенциальной) энергия, называемая ***энергией покоя***
$$E = mc^2$$
- Масса и энергия непосредственно связаны друг с другом (образование и аннигиляция электрон-позитронной пары, дефект масс).
- Существование частицы с нулевой массой возможно, если она движется со скоростью света (фотон).

Общая теория относительности (ОТО)

- **принцип эквивалентности** (сильный): Никакой эксперимент – ни механический, ни какой-либо другой – не дает возможность отличить инертную массу от гравитационной
- СО неразличимы, если одна движется равноускоренно, а другая покоится в однородном гравитационном поле
- Ни один физический процесс не позволяет отличить эффект гравитации от эффекта ускорения

Общая теория относительности (ОТО)

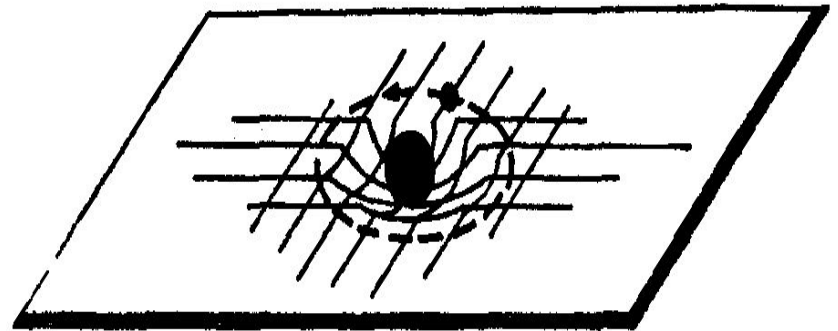
- Реальное гравитационное поле эквивалентно ускоренным СО, если пространство является искривленным (геометрия Гаусса-Римана)
- Пространство искривляется, а время замедляется в присутствии объектов, имеющих массу
- Масса Солнца так искривляет пространство-время, что, хотя Земля движется по прямой в четырехмерном пространстве, мы видим, что в нашем трехмерном пространстве она движется по круговой орбите. Орбиты планет, предсказываемые общей теорией относительности, почти совпадают с предсказаниями ньютоновской теории тяготения.

Общая теория относительности (ОТО)

- Тела всегда перемещаются по прямым в четырехмерном пространстве-времени, но мы видим, что в нашем трехмерном пространстве они движутся по искривленным траекториям.
- Поверхность Земли есть искривленное двумерное пространство. Геодезическая на Земле является самым коротким путем между двумя точками
- Гравитационное взаимодействие передается искривлением пространства-времени
- Гравитационные волны создаются переменным гравитационным полем и неравномерным движением масс; распространяются со скоростью света.

Общая теория относительности (ОТО)

- ОТО объединяет тяготение, искривление пространство и замедление времени в одну последовательную непротиворечивую теорию. Уравнения ОТО позволяют определить, как искривлено пространство около данной массы.



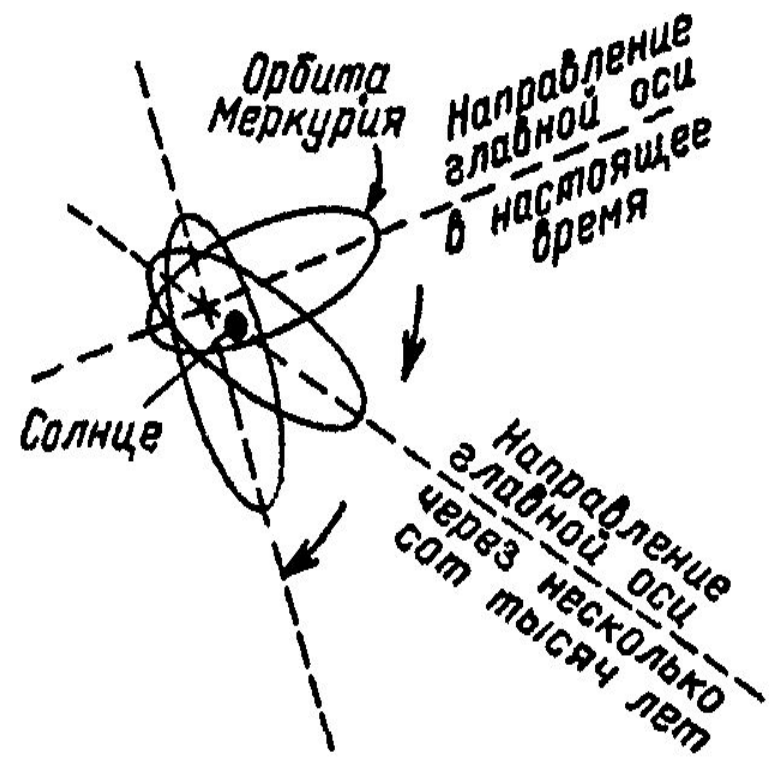
$$\text{Тензор } A = \text{Тензору } B$$

описывает кривизну пространства

описывает материю, которая вызывает это искривление

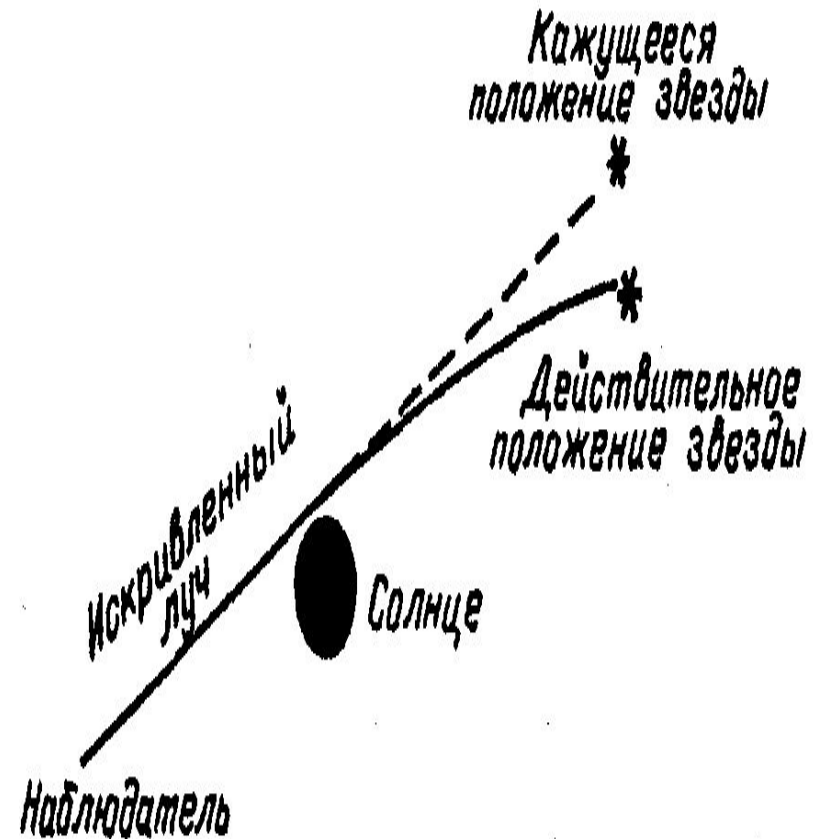
Экспериментальное подтверждение ОТО

- С помощью ОТО Эйнштейн рассчитал прецессию орбиты Меркурия. Угол поворота орбиты, предсказанный Эйнштейном, и измеренный совпали с точностью до погрешности результата измерения.



Экспериментальное подтверждение ОТО

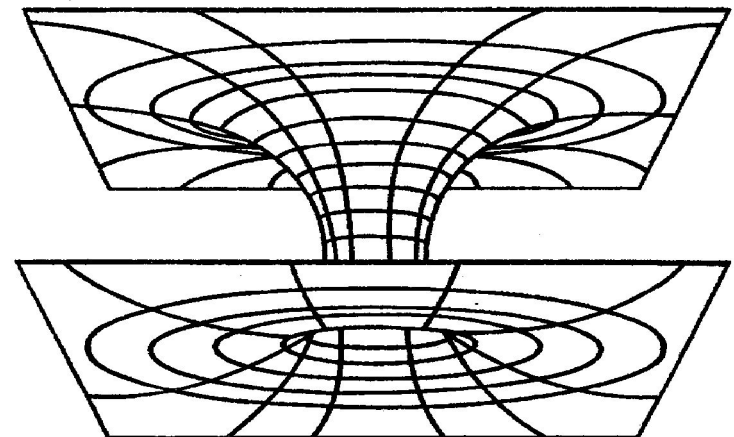
- Из уравнений ОТО следует расширение Вселенной («красное смещение»).
- Луч света обладает энергией. Тогда на луч света, проходящий вблизи планеты гравитационное поле планеты (например, Солнца) должно действовать с силой. В гравитационном поле луч света получает ускорение и искривляется.



Экспериментальное подтверждение ОТО

- Решения своих уравнений Эйнштейн не нашел, но показал, что при малых скоростях они сводятся к уравнениям Ньютона.
- В 1915-1916 годах немецкий астроном Карл Шварцшильд решил уравнение Эйнштейна для сферического распределения масс. При большой плотности материи

пространство искривляется так сильно, что становится похожим на воронку, для прохождения по тоннелю нужны скорости больше скорости света.



Единая теория поля

- В течение 30 лет Эйнштейн пытался объединить гравитационное и электромагнитное взаимодействия в единую теорию
- Открытие новых фундаментальных взаимодействий
- Развитие геометродинамики – в мире нет ничего, кроме искривленного пространства
- Развитие топологии пространства (многомерные пространства, содержащие как протяженные так и свернутые измерения)