

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.

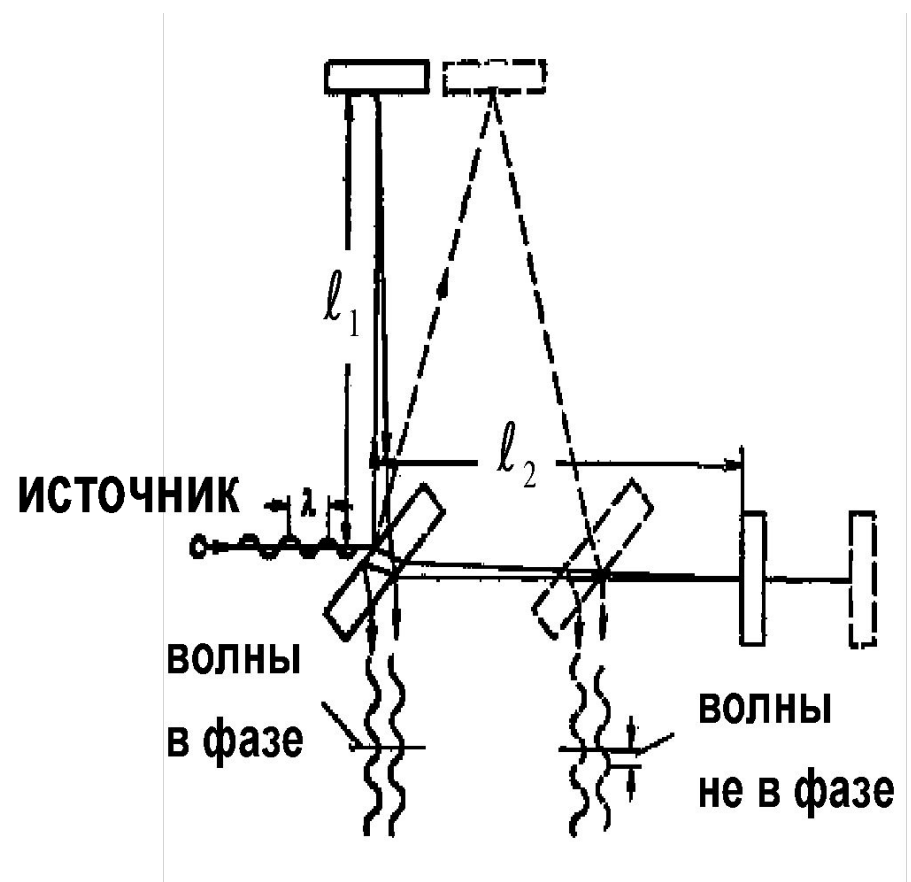
Опыты по обнаружению эфира

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

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

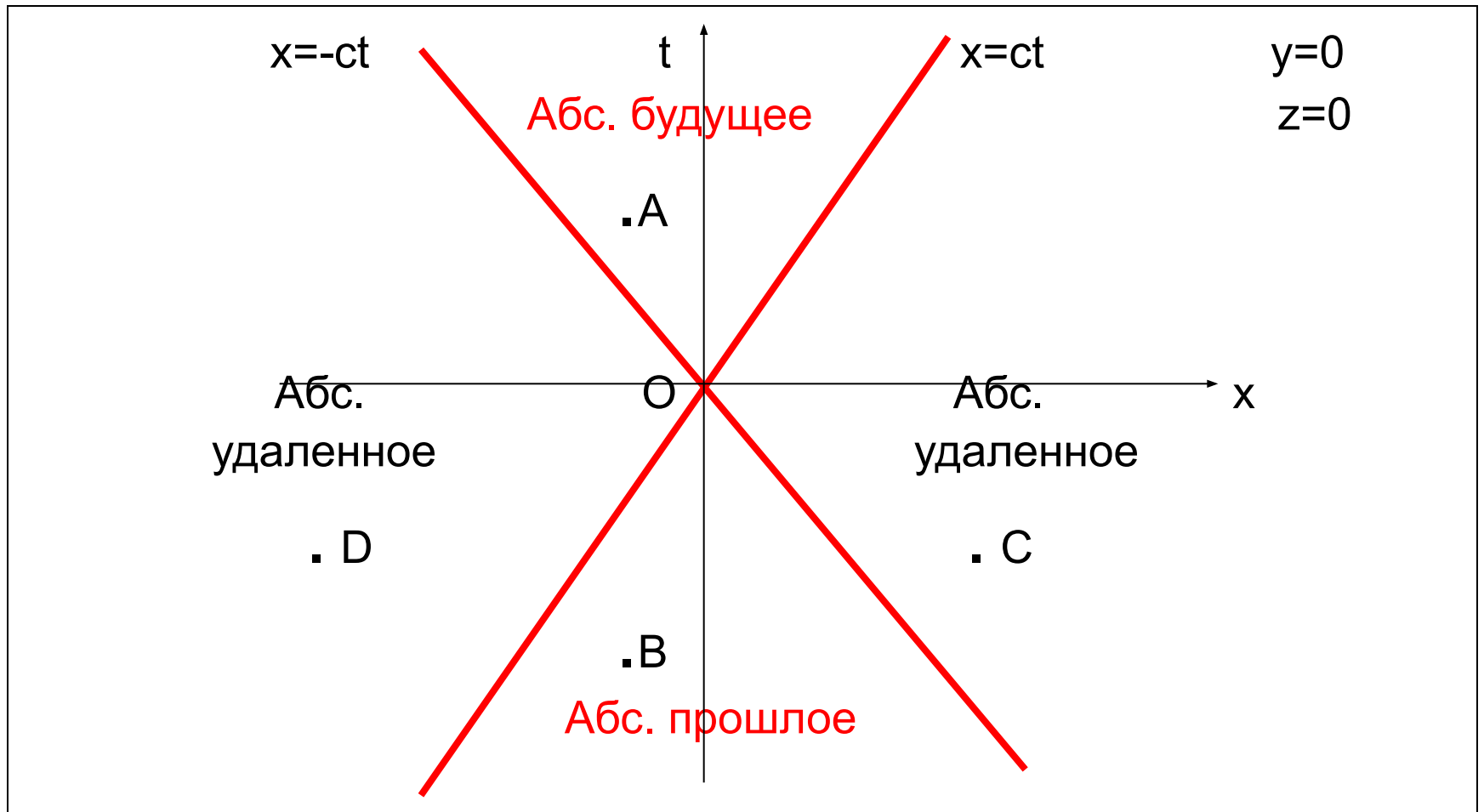
$\Delta S^2 > 0$ – времениподобный интервал

($\Delta l < c\Delta t$ – 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

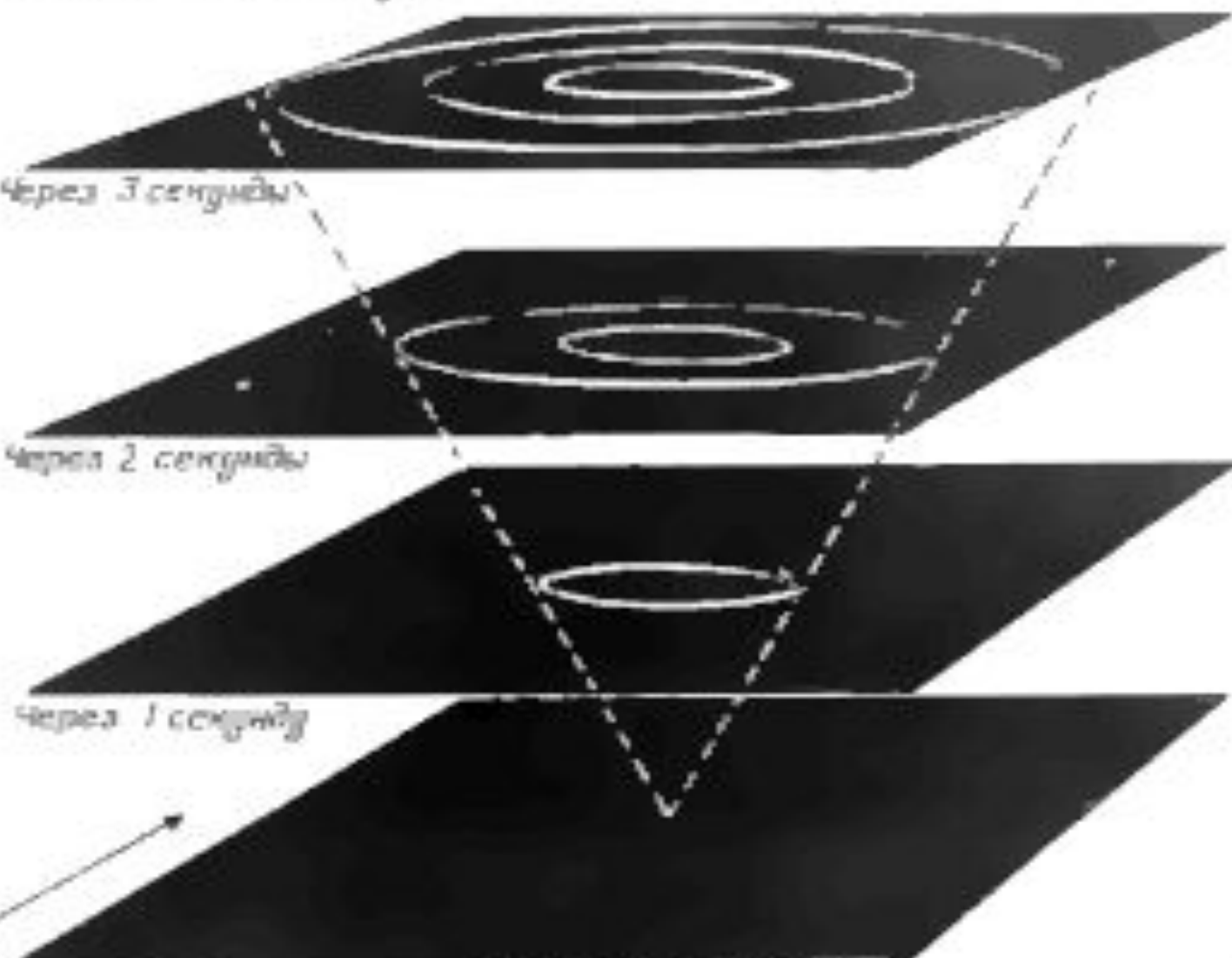
Через 2 секунды

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)

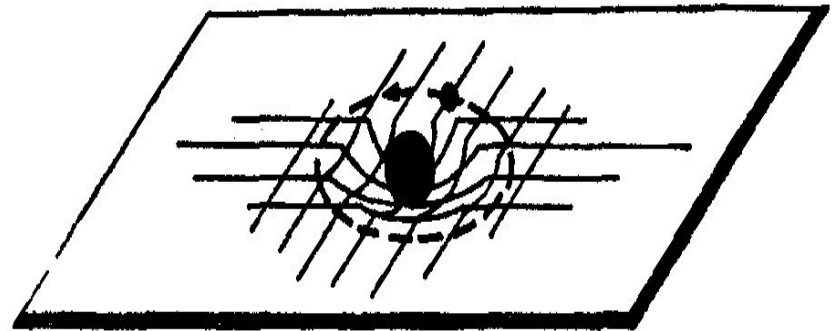
- Реальное гравитационное поле эквивалентно ускоренным СО, если пространство является искривленным (геометрия Гаусса-Римана)
- Пространство искривляется, а время замедляется в присутствии объектов, имеющих массу
- Масса Солнца так искривляет пространство-время, что, хотя Земля движется по прямой в четырехмерном 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.



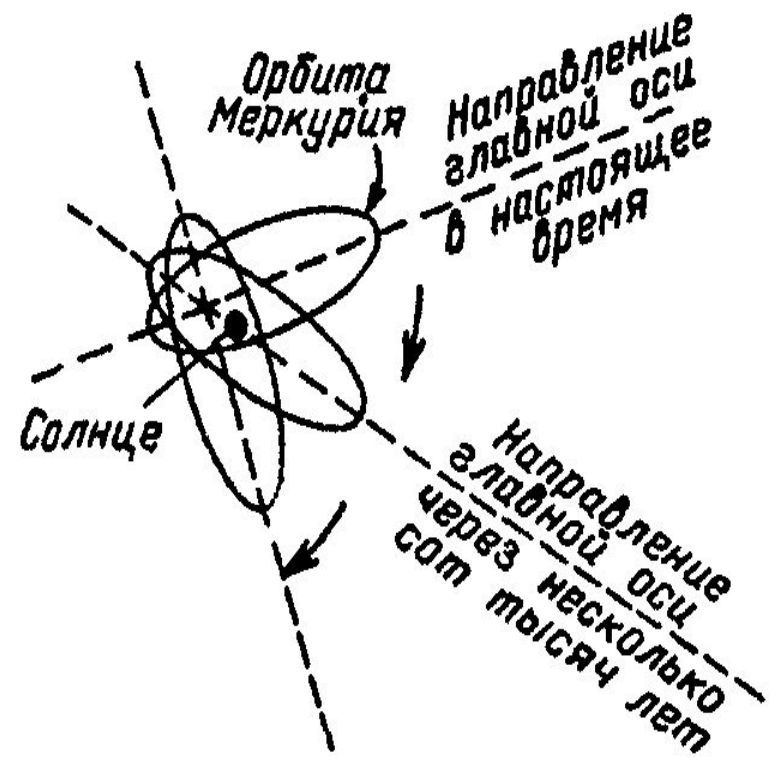
$$\text{Тензор } A = \text{Тензору } B$$

описывает кривизну пространства

описывает материю, которая вызывает это искривление

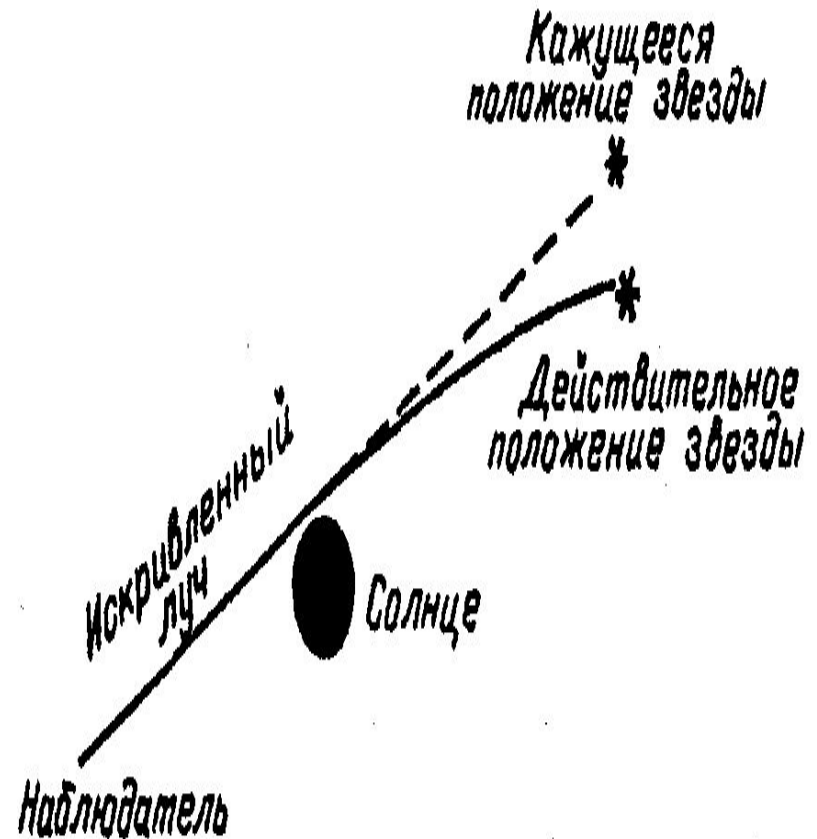
Экспериментальное подтверждение ОТО

- 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

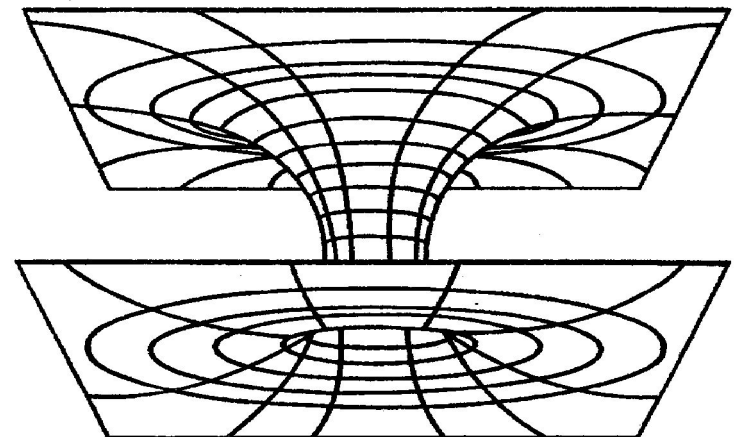
- Из уравнений ОТО следует расширение Вселенной («красное смещение»).
- Луч света обладает энергией. Тогда на луч света, проходящий вблизи планеты гравитационное поле планеты (например, Солнца) должно действовать с силой. В гравитационном поле луч света получает ускорение и искривляется.



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)