

Лекция 3

Пространство и время в теории относительности. Космология

План лекции

1. Эволюция представлений о пространстве и времени.
2. Постулаты и следствия специальной теории относительности.
3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна.
4. Основные положения общей теории относительности (релятивистской теории тяготения).
5. Наука космология.
6. Космологические модели Вселенной.



1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Механика Ньютона

Принцип дальнодействия

Гравитация
взаимодействует
с **бесконечной**
скоростью

Теория Максвелла

Принцип близкодействия

Электромагнитная
волна взаимодействует
с **конечной** скоростью
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с

1. Эволюция представлений о пространстве и времени



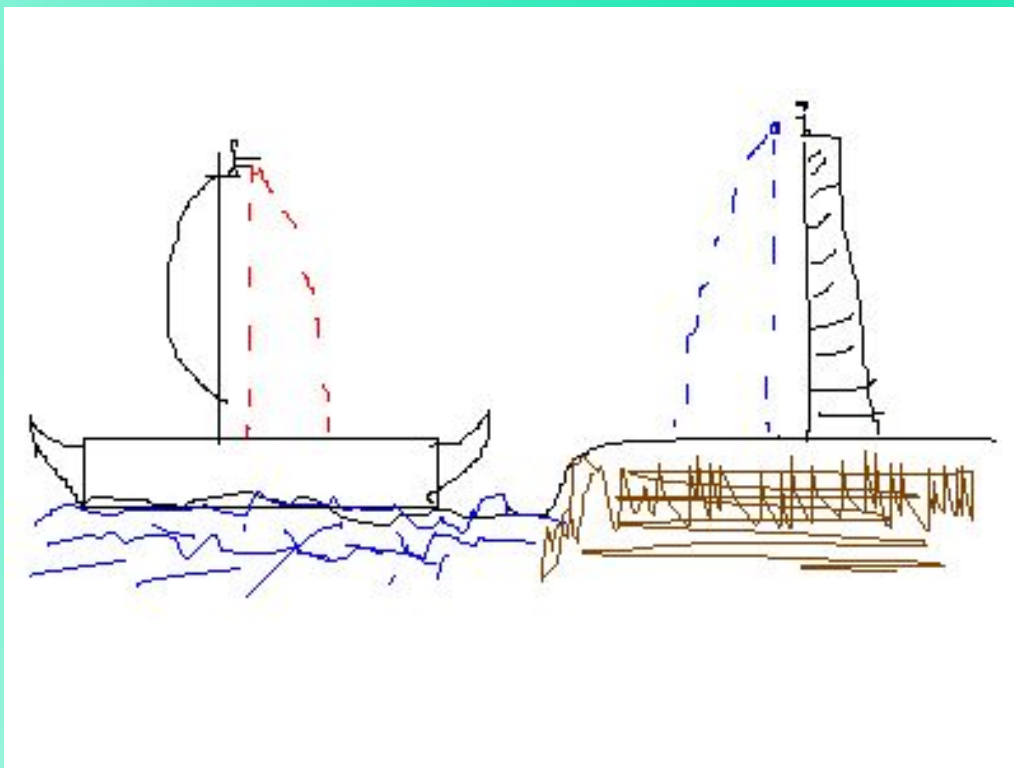
Принцип относительности Галилея

Внутри равномерно движущейся лаборатории (системы отсчета) все механические процессы протекают **так же**, как и внутри покоящейся.

Равномерное движение лаборатории (системы отсчета, связанной с телом отсчета – лабораторией) невозможно обнаружить **никакими механическими опытами**, проводимыми внутри нее.

1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Принцип относительности Галилея



В то время как
описание событий
зависит от
наблюдателя,
законы механики
от него не зависят,
т. е. являются
инвариантными.

1. Эволюция представлений о пространстве и времени



Принцип относительности Галилея

Инерциальными называются системы отсчета, относительно которых материальная точка (тело) без внешних воздействий (или если внешние воздействия компенсируются):

- **покоится,**
- **движется равномерно и прямолинейно.**

Всякая система отсчета, движущаяся относительно **инерциальной системы отсчета** (ИСО) равномерно и прямолинейно, также является **ИСО**.

1. Эволюция представлений о пространстве и времени



Принцип относительности Галилея

Во всех **инерциальных системах отсчета** законы классической динамики имеют **одинаковую форму**.

Динамика – раздел механики, изучающий движение и причины движения тел.

Принцип относительности Галилея сформулирован только для механических процессов (т. е. **только для классической механики – механики Ньютона**).

1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Механика Ньютона

Принцип
относительности

Во всех ИСО законы
классической механики
инвариантны (имеют
одинаковую форму)

Теория Максвелла

Законы меняют
свой вид
в разных СО

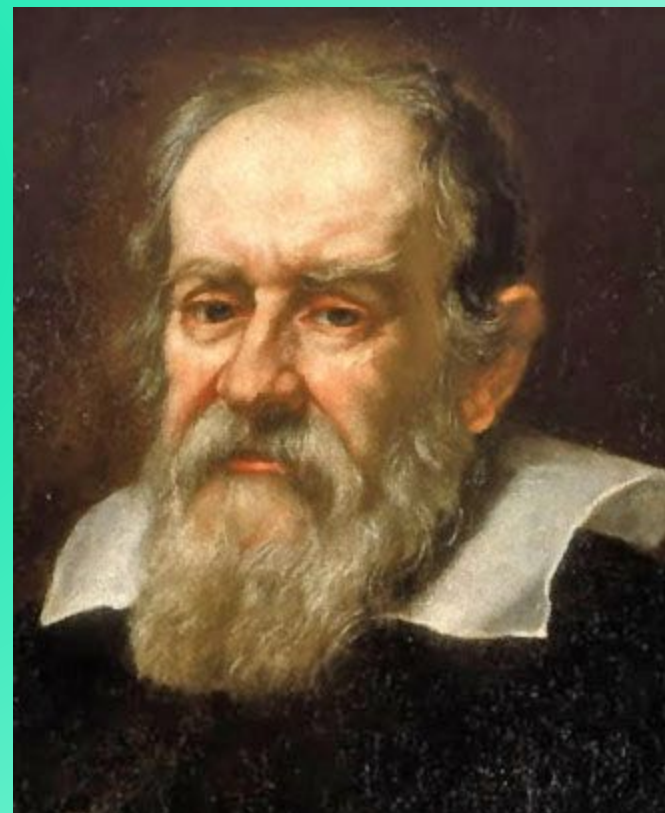
Законы классической
электродинамики
неинвариантны

1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Преобразования Галилея

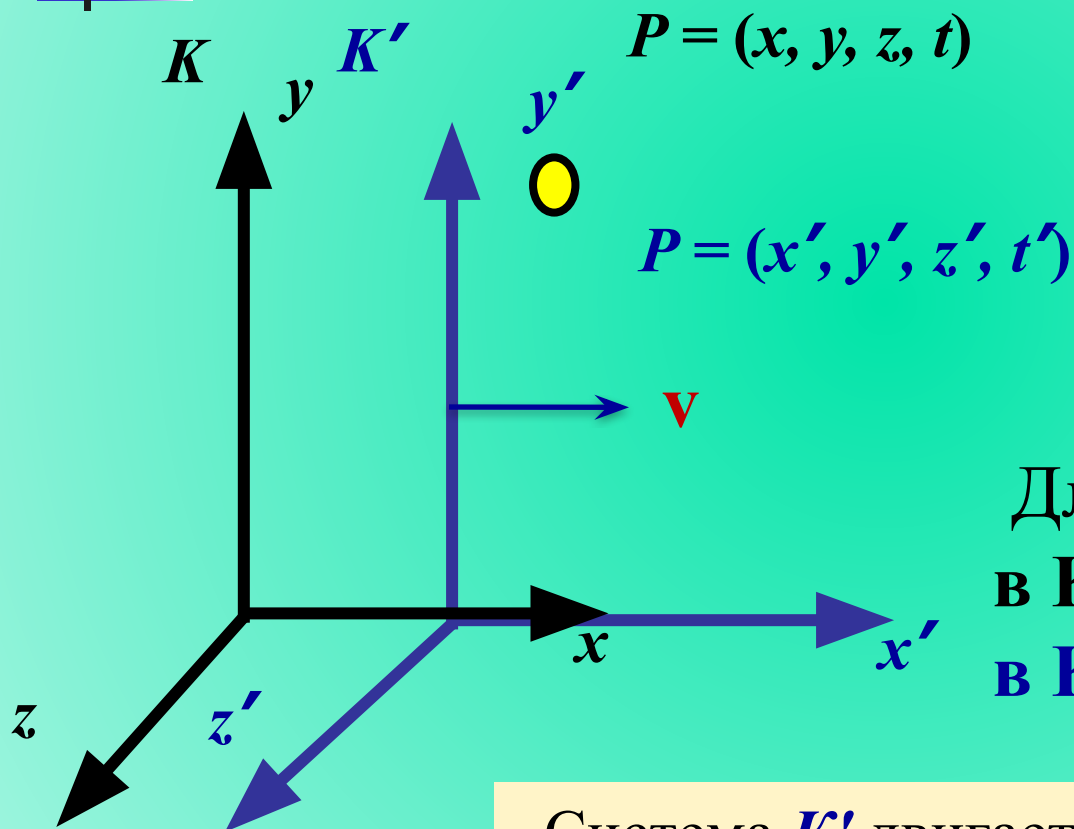
Законь классической механики инвариантны относительно **перехода из одной ИСО отсчета в другую**, проводимого с помощью **преобразований Галилея**.

Галиле́о Галиле́й (1564–1642) – итальянский физик, механик, астроном, философ и математик



1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Преобразования Галилея



Для **события** в точке P :
 в K $P = (x, y, z, t)$
 в K' $P = (x', y', z', t')$

Система K' движется с постоянной скоростью \mathbf{v} в направлении оси x .

1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Преобразования Галилея

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Прямое

$$x = x' + vt'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

Обратное

1. Эволюция представлений о пространстве и времени

Преобразования Галилея

Из преобразований Галилея (т. е. из классической механики) следует, что при переходе от одной ИСО к другой **неизменными** (инвариантными) остаются:

□ время

□ размеры тела

□ масса тела

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

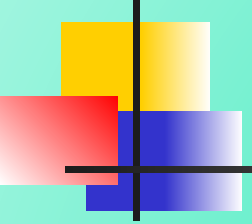
Специальная теория относительности (СТО)

исходит из **двух постулатов**:

1. Постулат **относительности**
(= принцип относительности Галилея).
2. Постулат **постоянства скорости света**.

Эйнштейн сделал принцип относительности Галилея **более общим** – распространил его и на **электромагнитное взаимодействие**.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



Откуда взялся постулат о постоянстве **скорости света?**

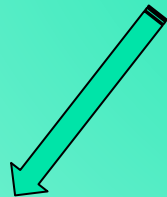
- Из теории – уравнений Максвелла
- Из проверки экспериментами
 - Физо, 1851
 - Майкельсона – Морли, 1887

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Для выдвижения второго постулата было два основания – **теоретическое** и **экспериментальное**.

Теоретическое основание для выдвижения второго постулата:

Уравнения Максвелла **неинвариантны** относительно преобразований Галилея



Принцип
относительности



Преобразования
Галилея

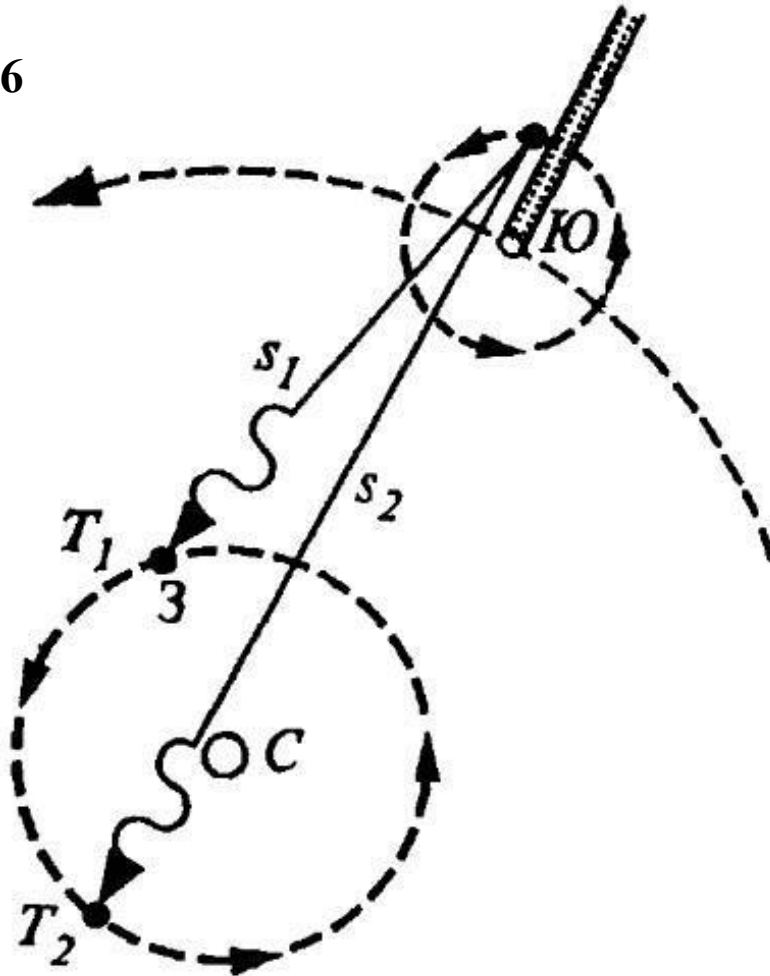
2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

15

Экспериментальное основание для выдвигения **второго постулата**

1676

г.



Оле Кристенсен
Рёмер
(1644–1710) –
датский астроном



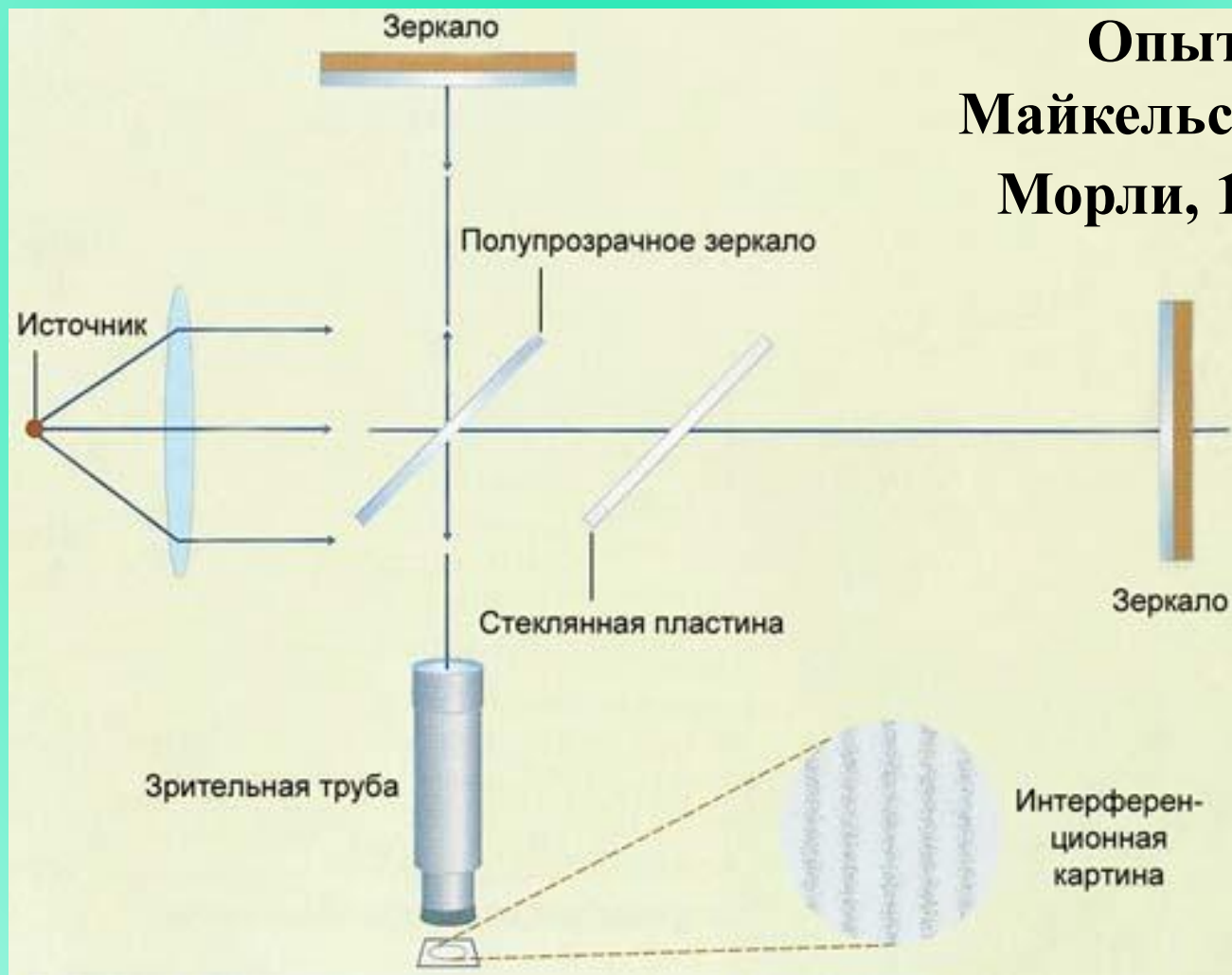
Время между затмениями лун Юпитера длиннее, когда Земля дальше



скорость света **конечна**
214 300 км/с

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Экспериментальное основание для
выдвижения **второго постулата**:



**Опыт
Майкельсона –
Морли, 1887**

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



Основу **СТО** составляют **два постулата**
(принципа) Эйнштейна:

1. **Принцип относительности** (обобщение принципа Галилея на все физические процессы):

все физические процессы во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково,

ИЛИ

законы природы инвариантны во всех инерциальных системах отсчета.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



Основу **СТО** составляют **два постулата** (принципа) Эйнштейна:

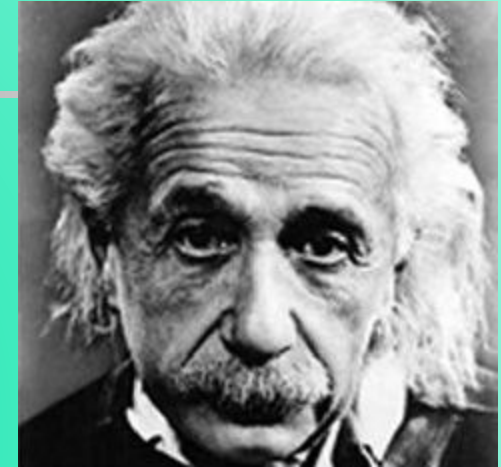
2. Принцип инвариантности (постоянства) скорости света:

скорость света в вакууме постоянна во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от движения источников и приемников света.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Специальная теория

относительности предполагает, что в одной **отдельно взятой ИСО** метрические свойства пространства и времени такие же, как в классической механике.



Альберт Эйнштейн (1879 – 1955) – один из основателей современной теоретической физики

Пространство:

- евклидовое,
- трехмерное,
- однородное,
- изотропное,
- непрерывное.

Время:

- одномерное,
- однородное,
- непрерывное,
- однонаправленное.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Преобразования Лоренца

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$y' = y$$

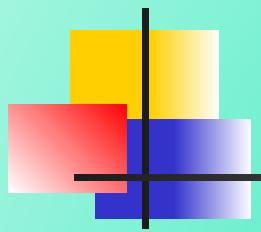
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - vx / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Релятивистский коэффициент γ всегда > 1 .

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - vx / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

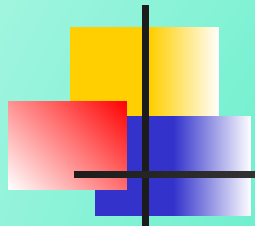
$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + vx' / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

3. Преобразования Лоренца



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



$$v < c$$

Иначе γ будет мнимым, что лишено физического смысла

Таким образом, вывод о том, что любая скорость меньше скорости света, – **следствие** преобразований Лоренца.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Замедление времени

Между «тиками» свету в K' надо пройти большее расстояние \rightarrow тикать часы будут реже.

Их показания будут меньше, чем у часов K .

$$\tau = \gamma \tau_0$$

Для наблюдателя, летящего в K' , то же будет казаться относительно часов, неподвижно установленных в K : что они идут медленнее, чем его собственные.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Замедление времени.

Экспериментальное подтверждение

В 1935 году во вторичных космических лучах, рождающихся при столкновении первичных космических частиц с молекулами воздуха на высоте порядка **6 км**, были обнаружены новые элементарные частицы, получившие название мю-мезоны (мюоны).

В лабораторных условиях удалось определить время их собственной жизни – порядка **10^{-6} с**.

Продукты распада мю-мезонов, родившихся на высоте **6 км**, обнаруживаются экспериментально у Земли. Но возникала проблема: как за время жизни в **10^{-6} с**, даже двигаясь **со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с**, мюоны могут преодолеть расстояние в 6 км. Элементарный расчет давал лишь **300 м!**

2. Постулаты и следствия специальной

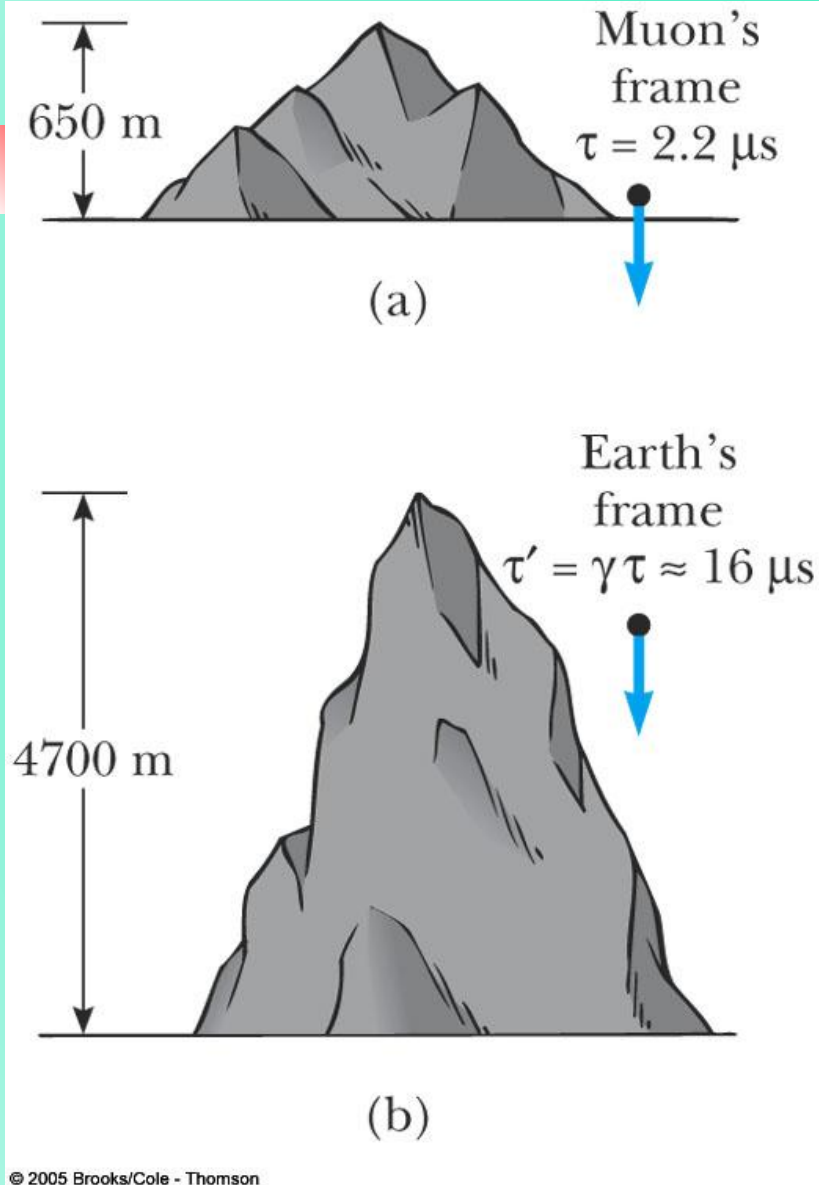
теории относительности СО мюона

Земля «сокращается».

**Замедление времени.
Экспериментальное
подтверждение**

СО Земли

Время на мюоне течет
медленнее – по земным
часам он живет дольше.



2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

Укорочение отрезков

Собственная длина L_0 – длина, измеренная линейкой в системе отсчета, где отрезок неподвижен.

$$L' = L_0 / \gamma = L_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Тот же отрезок, измеренный из движущейся относительно него со скоростью V системы отсчета.

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



Относительность одновременности и причинность

События, одновременные в одной системе отсчета, оказываются неодновременными в другой, если между ними **отсутствуют причинно-следственные связи**.

Причинно связанные события ни в одной системе отсчета не будут одновременными. **Во всех ИСО событие, являющееся причиной, будет предшествовать следствию.**

2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

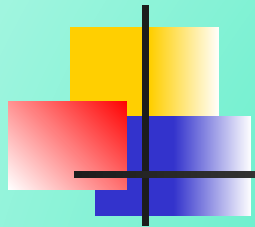
Масса движущихся релятивистских частиц зависит от их скорости:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

m – масса покоя частицы, измеренная в той инерциальной системе отсчета, относительно которой частица находится в покое;

m' – масса частицы в системе отсчета, относительно которой она движется со скоростью v .

3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна



Проблемы, которые оставались нерешенными в СТО:

Как передается гравитация?

В чем природа гравитации?

Почему ускоренное движение выделено?

3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна

Гениальная идея Эйнштейна

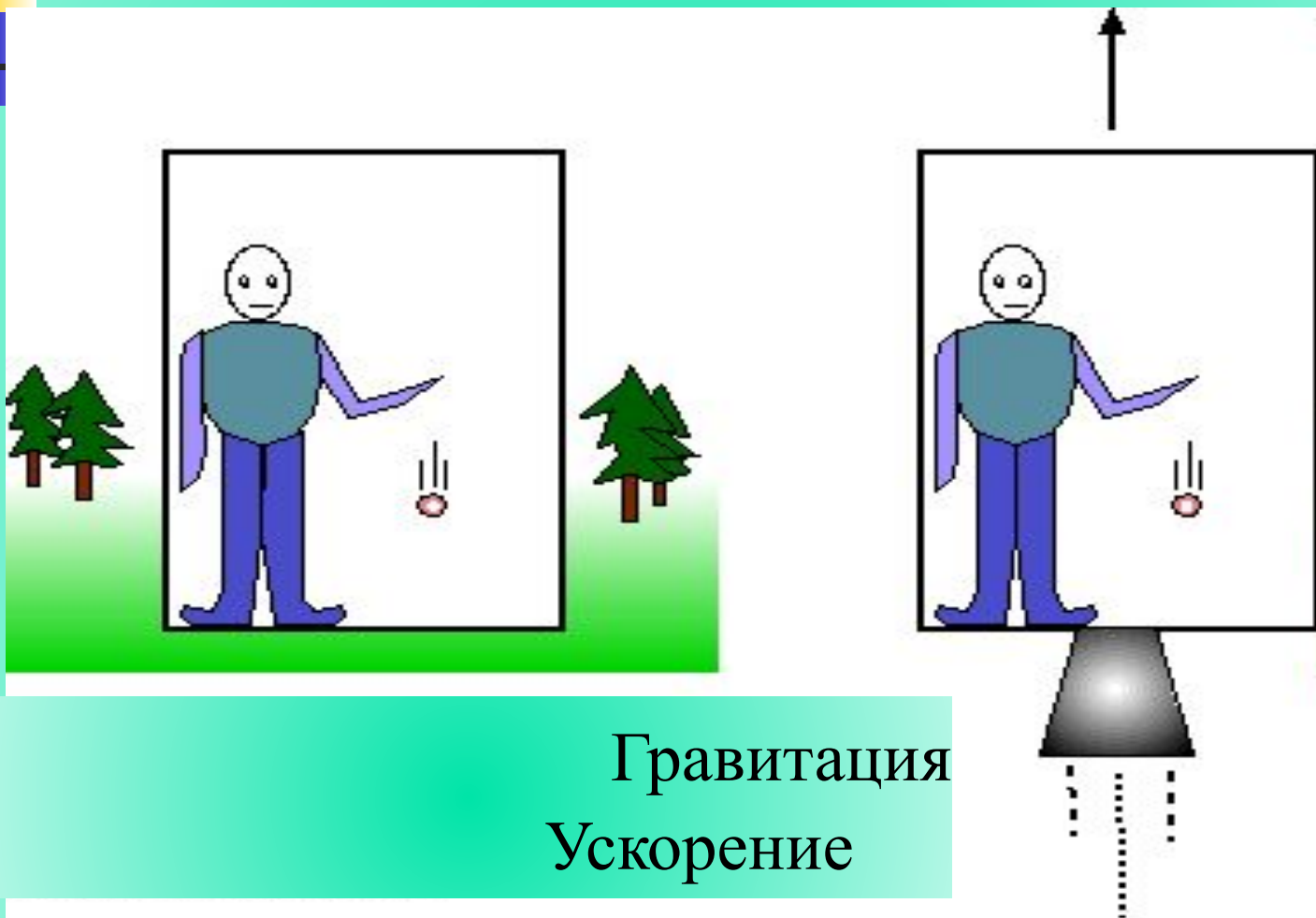
Гравитация = Ускорение



Принцип эквивалентности:

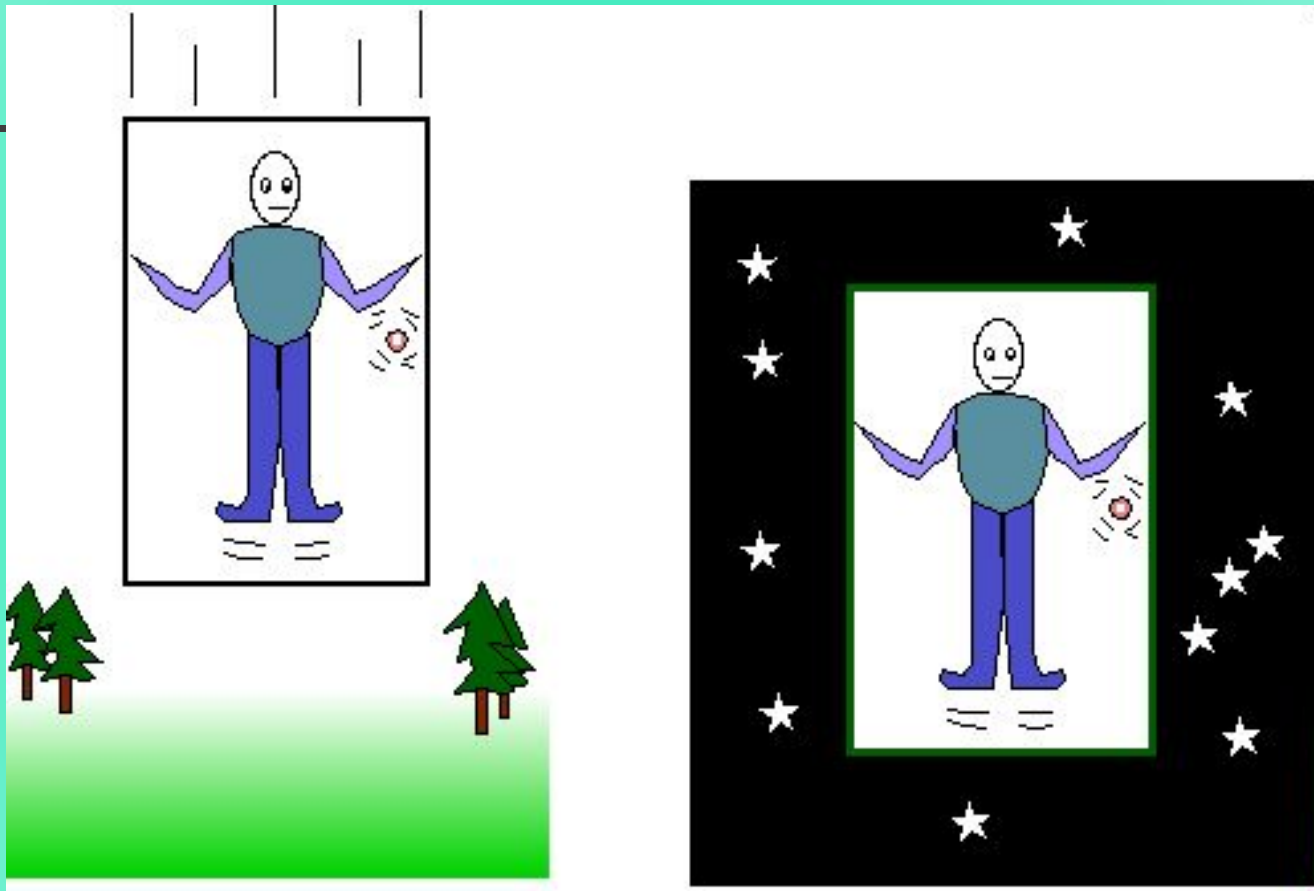
в поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве **без тяготения**, если в нем вместо инерциальной системы отсчета ввести систему, **ускоренную** относительно нее.

3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна



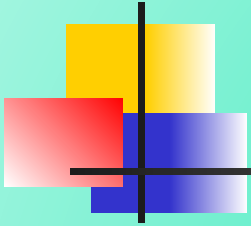
Гравитация
Ускорение

3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна



Движение с ускорением в гравитационном поле = невесомость (инерциальная система)

4. Основные положения общей теории относительности



Основная идея общей теории относительности

Ускорение = **гравитация** =
искривление 4-мерного
пространства-времени

4. Основные положения общей теории относительности



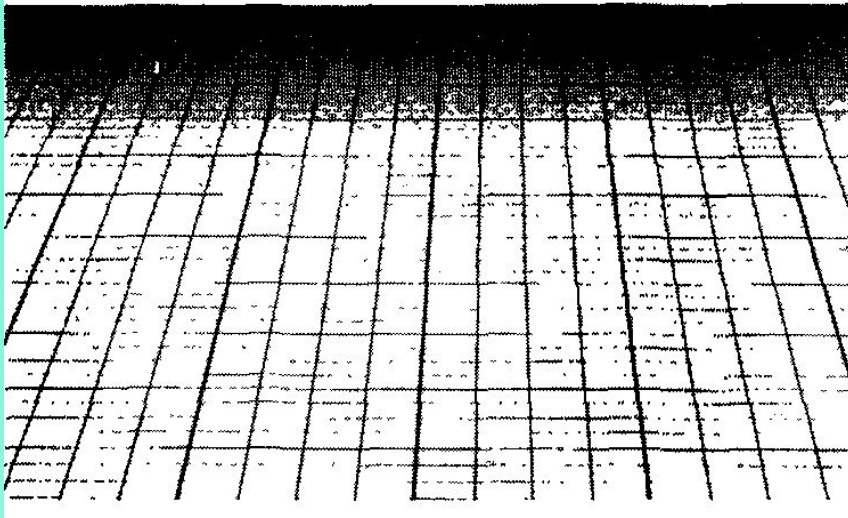
Гравитация и ускорение – это изменение **геометрических** свойств **пространства-времени**.

Гравитация – это **не сила**,
а изменение свойств пространства.

Геодезическая линия определяется как кратчайший путь между двумя точками.

4. Основные положения общей теории относительности

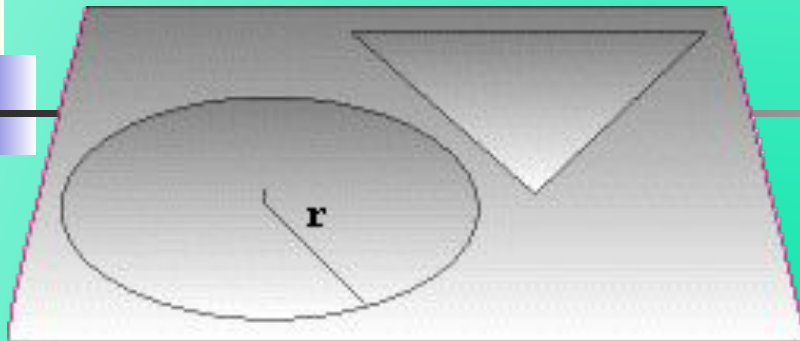
Плоское **евклидово** пространство (нулевая кривизна) **однородно**:



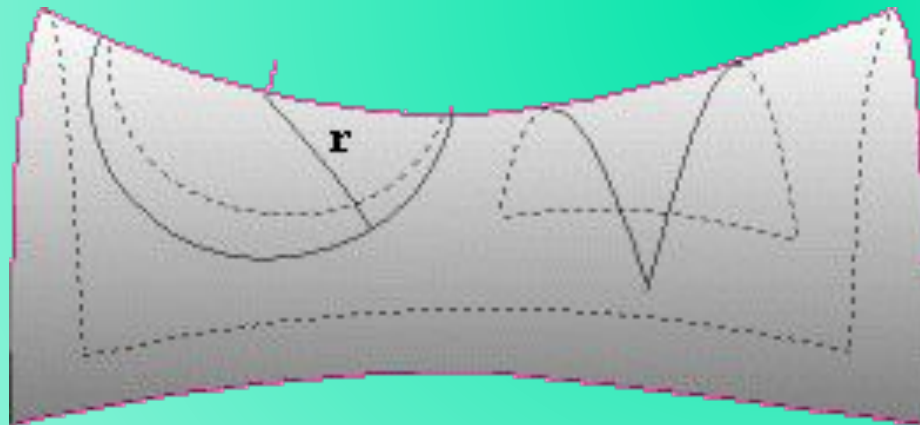
кратчайшее расстояние между точками – **геодезическая линия** – не меняется в разных местах СО и является **прямой**.

Плоское пространство может быть **евклидовым** и **псевдоевклидовым** (Минковского).

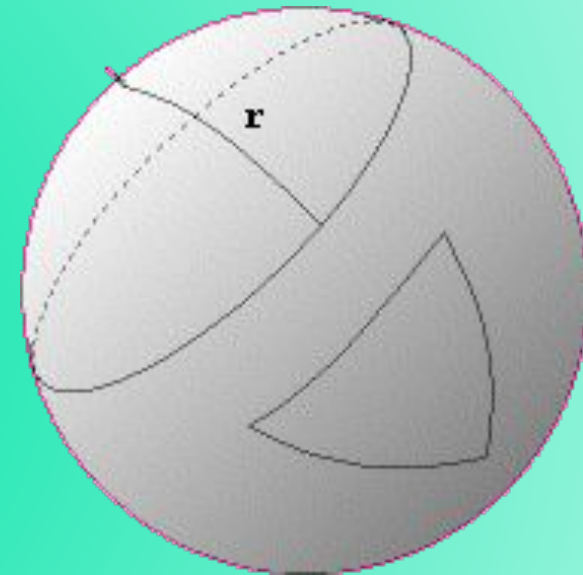
4. Основные положения общей теории относительности



Плоское евклидово

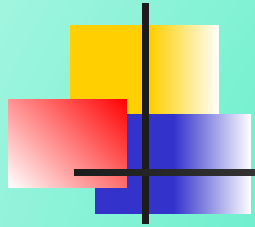


Пространство Лобачевского
(-) кривизна



Пространство
Римана
(+) кривизна

4. Основные положения общей теории относительности



Плоскость	Поверхность с положительной кривизной (сфера)	Поверхность с отрицательной кривизной (например, вращения параболы)
Геометрия Евклида	Геометрия Римана	Геометрия Лобачевского
Длина окружности $l = 2\pi r$	Длина окружности $l < 2\pi r$	Длина окружности $l > 2\pi r$
Сумма углов треугольника 2π	Сумма углов треугольника $> 2\pi$	Сумма углов треугольника $< 2\pi$

4. Основные положения общей теории относительности



Геодезическая линия на искривленной поверхности **не является прямой!**

4. Основные положения общей теории относительности

Согласно ОТО

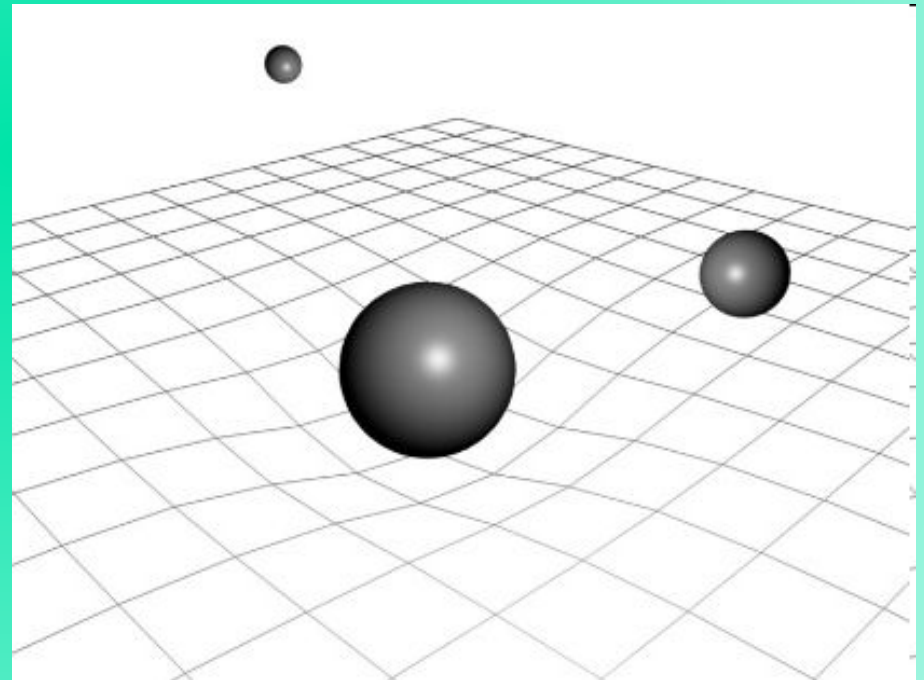
искривление

пространства-времени

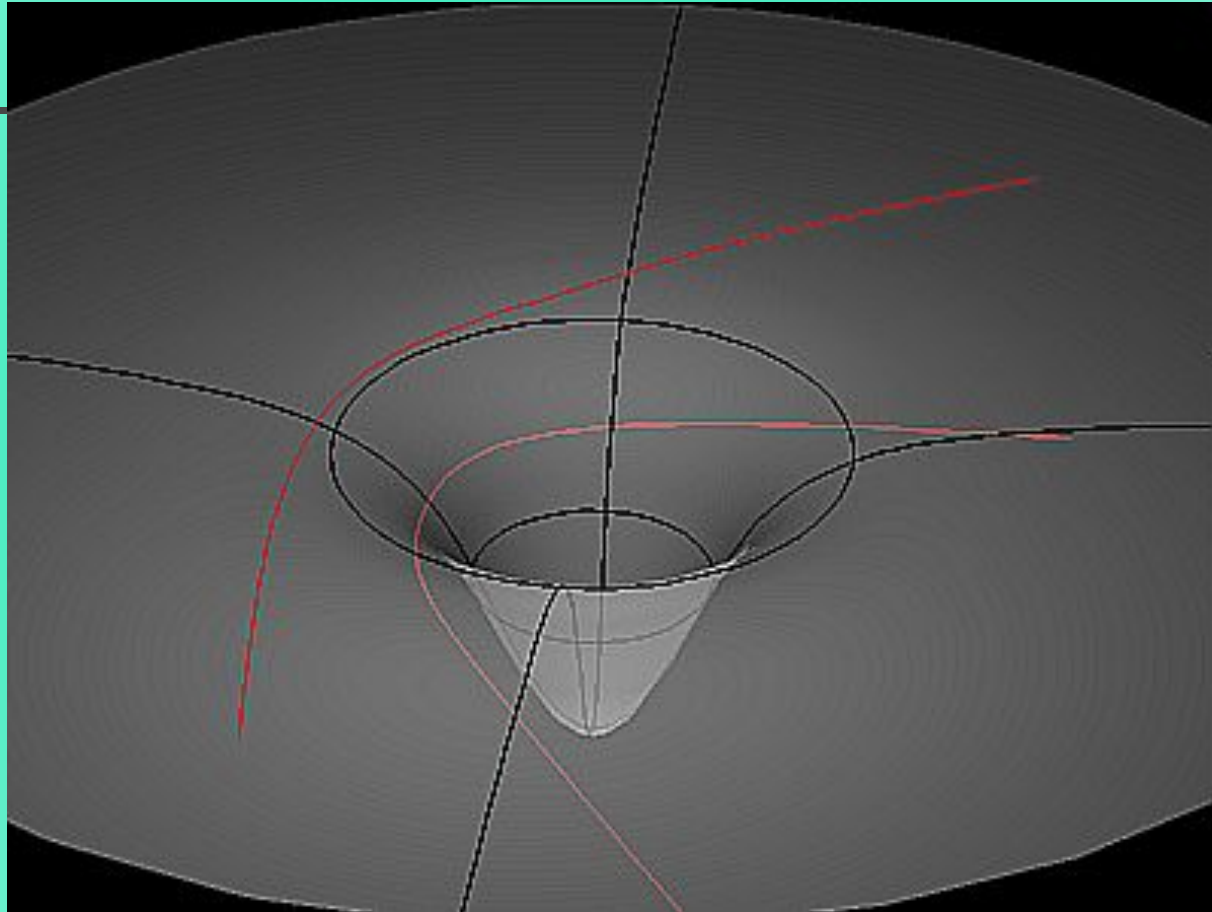
вызывается

помещенными в него

материей и энергией.

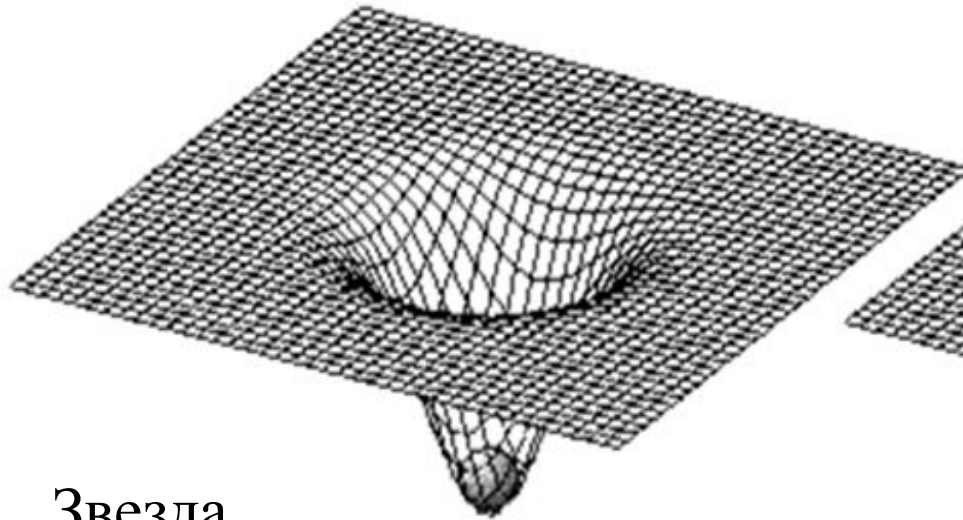


4. Основные положения общей теории относительности

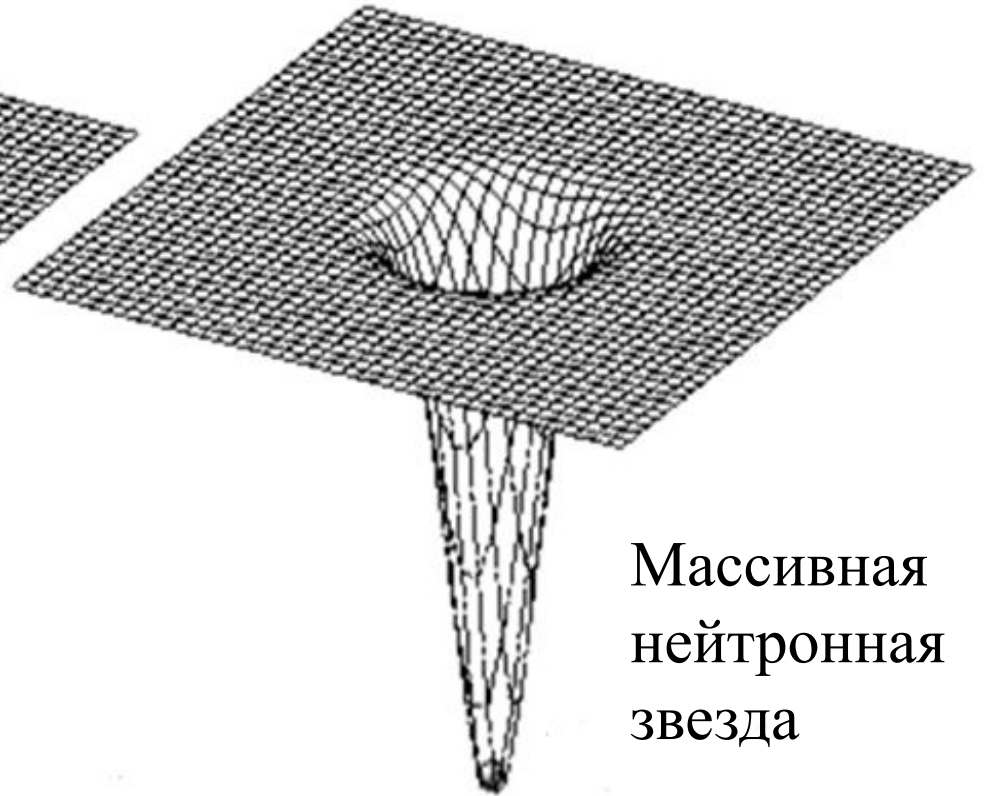


Геодезическая линия в искривленном пространстве —
кривая.

4. Основные положения общей теории относительности



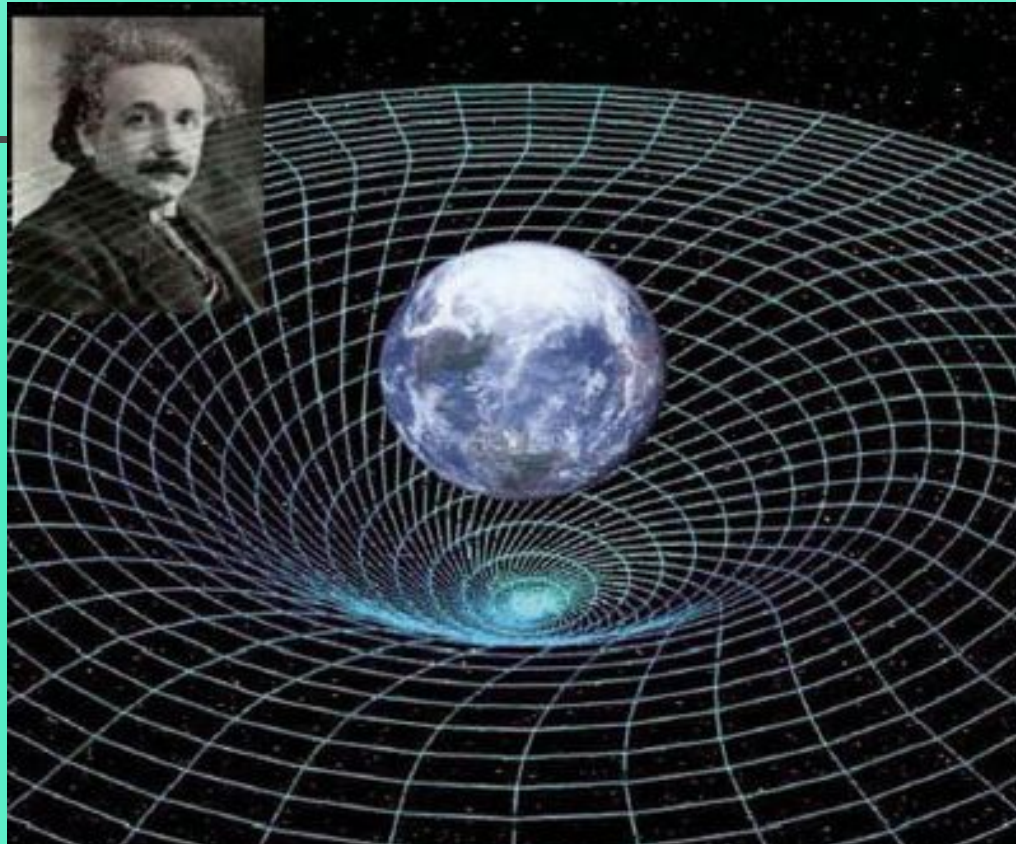
Звезда
небольшой
массы



Массивная
нейтронная
звезда

Чем массивнее тело, тем сильнее искривляется пространство-время.

4. Основные положения общей теории относительности



Земля движется по орбите не потому, что Солнце ее притягивает, а потому, что 4-мерное пространство искривлено.

4. Основные положения общей теории относительности

Объяснение **природы гравитации** в ОТО:

посредником, передающим действие массивных тел на огромные расстояния, является **само пространство-время**.

Массивные тела
говорят пространству,
как ему искривляться

Пространство
говорит телам,
как им двигаться

4. Основные положения общей теории относительности

Свойства искривленных пространств:

– время течет по-разному в разных точках одной СО;

– даже в одной СО не сохраняется интервал Минковского;

– результат параллельного переноса зависит от пути.

Новое объяснение природы гравитации **устранило принцип дальнего действия:**

расчеты Эйнштейна показали, что при изменении масс искривление передается **не мгновенно**, а со скоростью **c**.

5. Наука космология

Основные понятия

Космология — это наука, занимающаяся изучением крупномасштабной структуры и эволюции Вселенной.



5. Наука космология

Основные понятия



Вселенная – это весь существующий материальный мир, бесконечный и бесконечно разнообразный по формам, которые принимает материя в процессе своего развития.

5. Наука космология

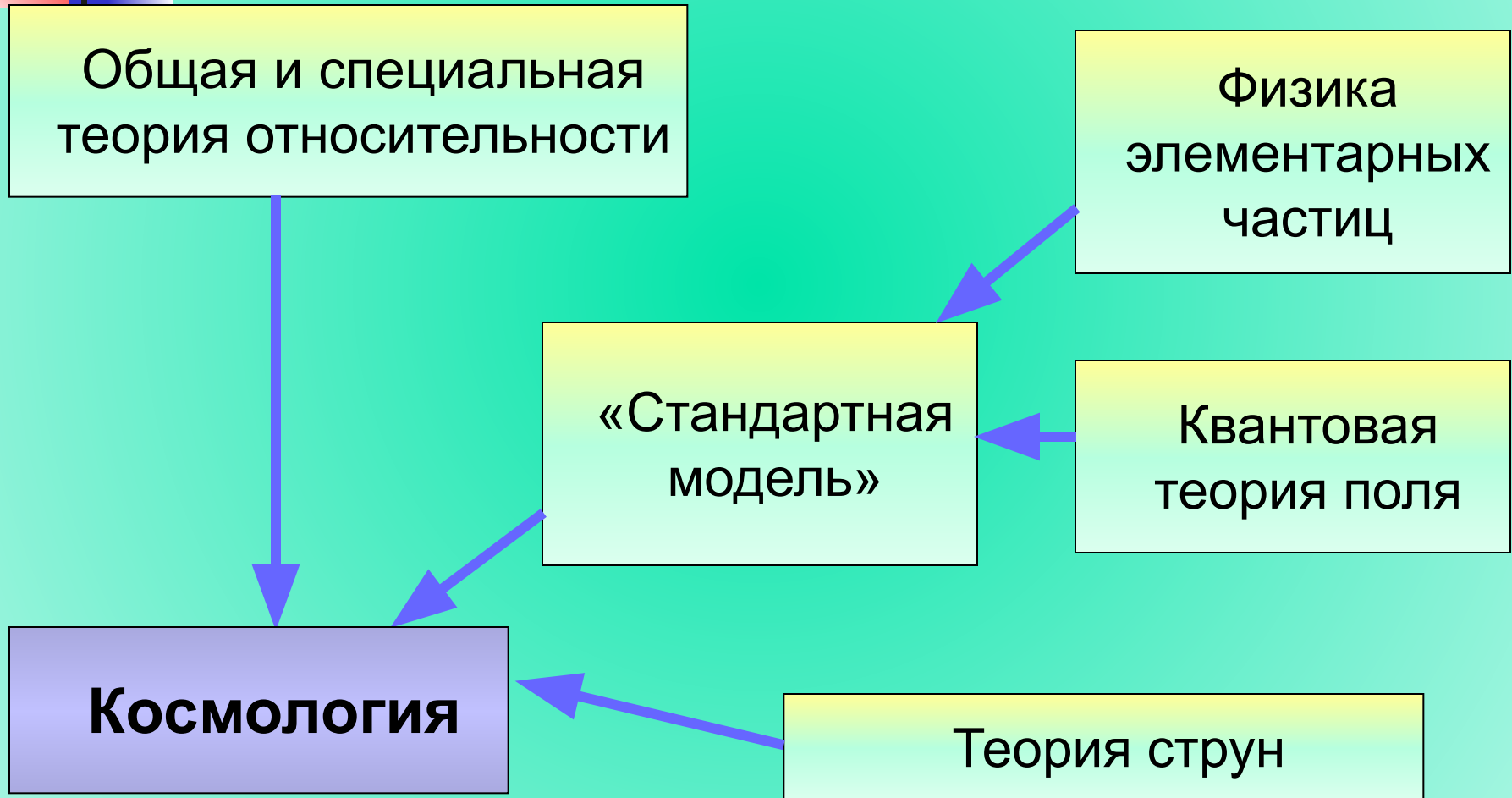
Основные понятия



Метагалактика – часть Вселенной, доступная исследованию астрономическими средствами, соответствующими достигнутому уровню развития науки.

5. Наука космология

Теоретические основы космологии

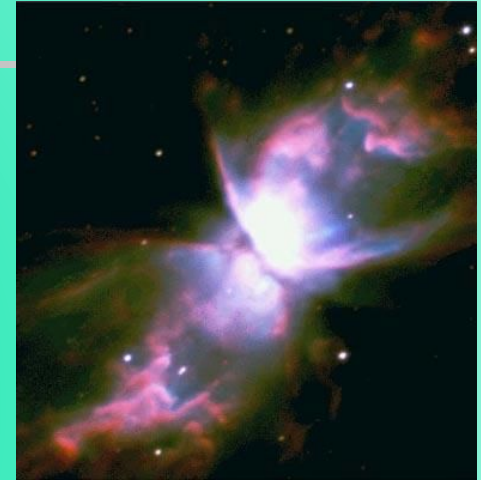


5. Наука космология

Экспериментальные основы космологии

Космические
исследования

Астрономия



Ускорители элементарных
частиц



5. Наука космология



Астрономия

Астрономия XX века – наблюдения во всем
волновом диапазоне.

Гамма-лучи (длины волн порядка атомных ядер)

Рентгеновский диапазон (длины волн порядка атомов)

Ультрафиолетовый (короче видимого)

Инфракрасный (длиннее видимого)

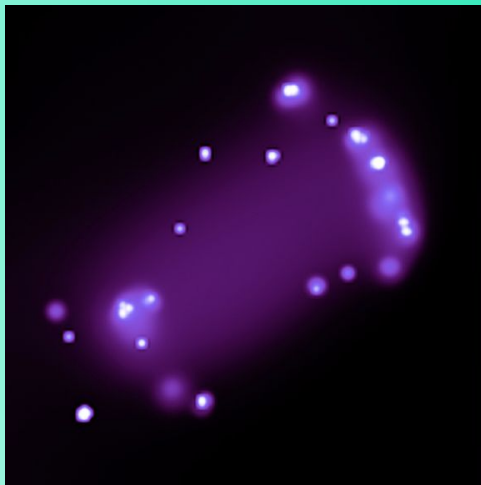
Радиоизлучение (мм – км)

5. Наука космология

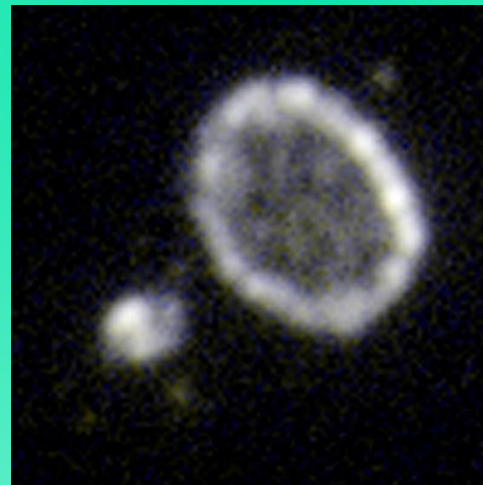
Астрономия

Галактика «Колесо кареты»

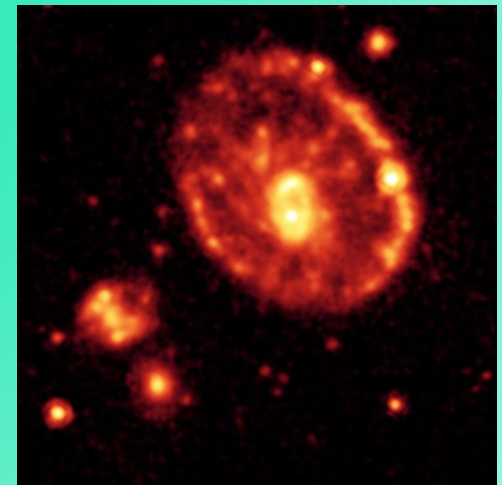
Оптический
диапазон



Рентгеновские
лучи



Ультрафиолет



Инфракрасный
диапазон



Мауна-Кеа («Белая гора») на Гавайях (США) – самая высокая в мире. От ее основания на дне Тихого океана до вершины – 10 250 м. Дело, однако, в том, что 6000 м склона находятся под водой и только 4205 выше уровня моря. В целом же она на 1357 м выше Эвереста. На Мауна-Кеа построены 13 научных астрономических центров из 11 стран.



Обсерватория Кека — астрономическая обсерватория, расположенная на пике горы Мауна-Кеа. Первый телескоп был закончен в 1992 г., второй – в 1996 г. Телескопы принадлежат Калифорнийскому технологическому институту (Калтех) и Калифорнийскому университету. 10-метровый 8-ярусный 300-тонный телескоп Кека имеет оригинальную конструкцию. Каждое главное зеркало состоит из 36 шестиугольных сегментов, которые работают вместе как один кусок стекла – это революционная технология, которая увеличивает мощность зеркал.

5. Наука космология

Космические исследования

Скопления галактик

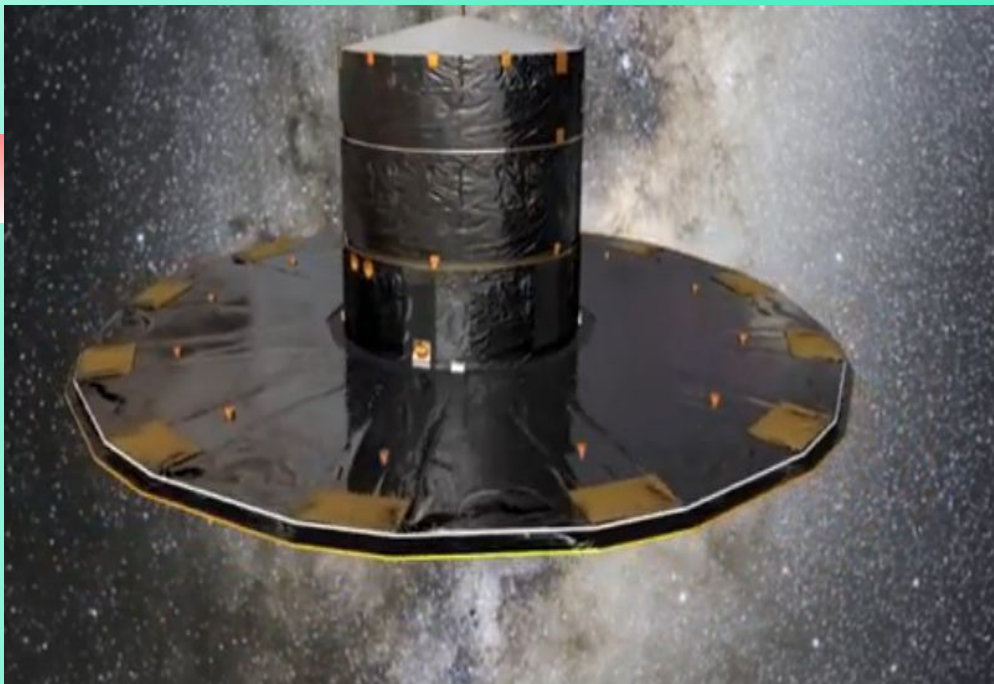


Галактики



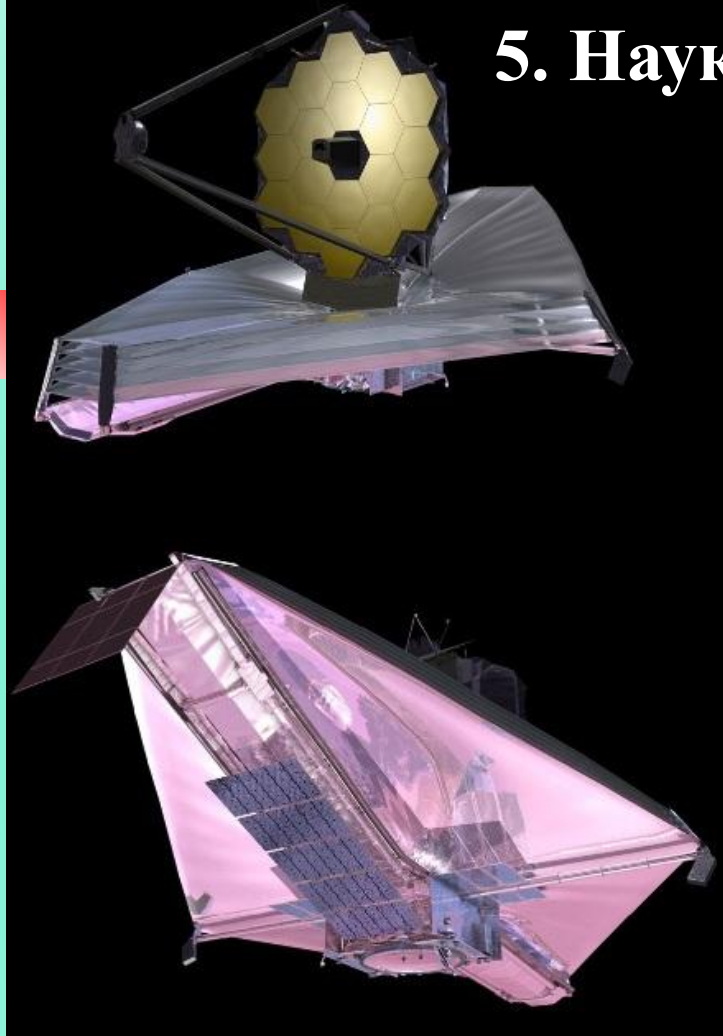
Звезды





Запущенный в космос 19 декабря 2013 года телескоп **«Гайя»** получил первые тестовые изображения. Обсерватория **«Гайя»** (Gaia) предназначена в основном для составления подробной карты

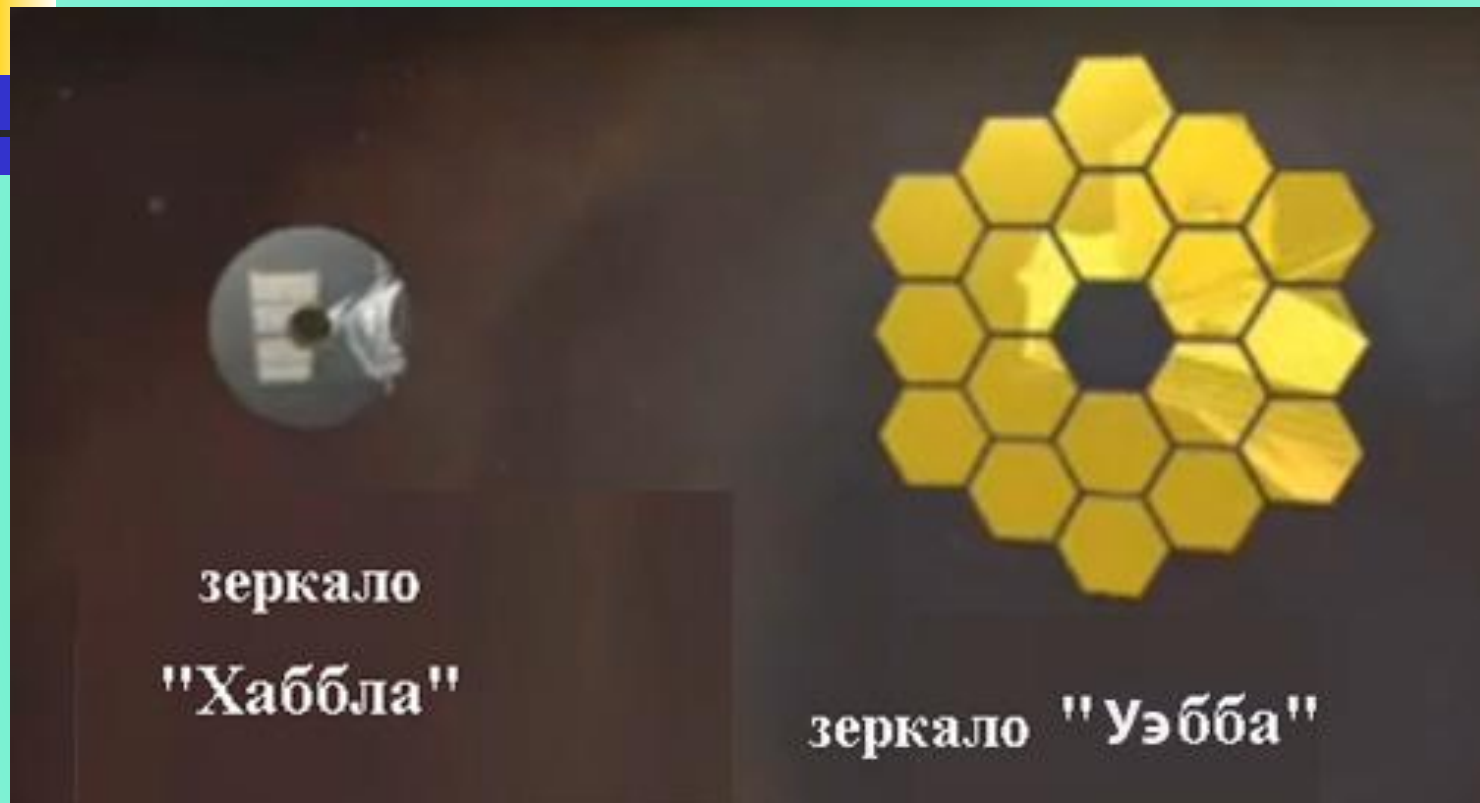
распределения звезд в нашей галактике, однако точность ее фотометра настолько велика, что она может обнаружить тысячи новых экзопланет. Предполагается, что за свой **пятилетний** полет «Гайя» соберет обширные данные, предоставив достаточно информации для того, чтобы ответить на вопросы о происхождении, структуре и эволюции Млечного Пути, а также о наличии схожих с Землей экзопланет,



Планируется, что в 2018 году ракета-носитель Ariane 5 ЕСА запустит совместную миссию НАСА и ЕКА — космический телескоп имени **Джеймса Уэбба**. Аппарат станет крупнейшей орбитальной обсерваторией. 6,5-метровое основное зеркало телескопа составят 18 бериллиевых элементов.

Солнцезащитный экран размером с теннисный корт предотвратит нагрев и позволит отвести тепло от датчиков телескопа.

Одна из основных целей миссии — это определение физико-химических параметров планетных систем, их способности поддерживать жизнь.



Главная инновация **«Уэбба»** — это его размер. Главное зеркало телескопа составят 18 бериллиевых элементов: каждый по 1,5 метра в поперечнике. Их положение контролируется так точно, что они будут действовать как единое зеркало.

5. Наука космология

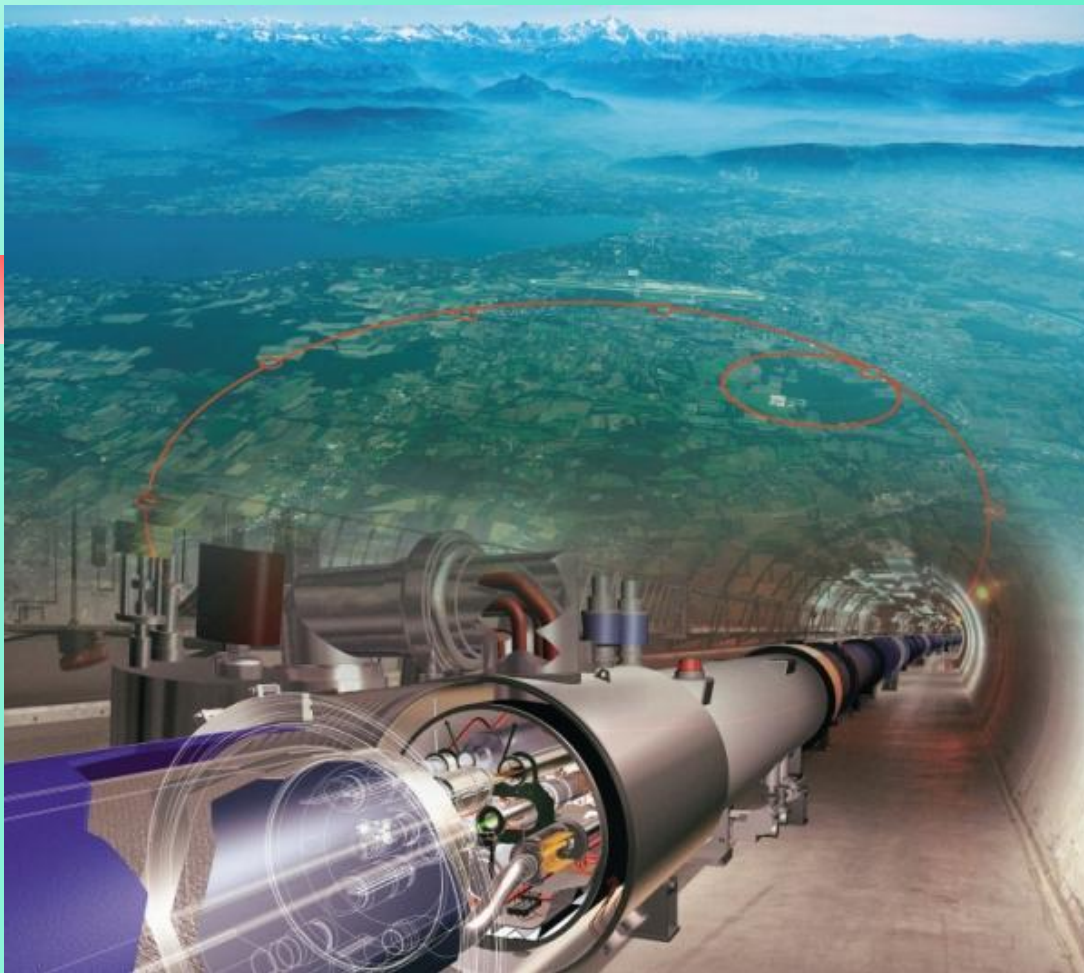
Ускорители элементарных частиц



Теватрон — кольцевой ускоритель-коллайдер, расположенный в национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми в городке Батавия штата Иллинойс, недалеко от Чикаго.

Ускорители элементарных частиц

Большой адронный коллайдер,
сокращенно **БАК,** —
ускоритель
заряженных частиц
на встречных
пучках,



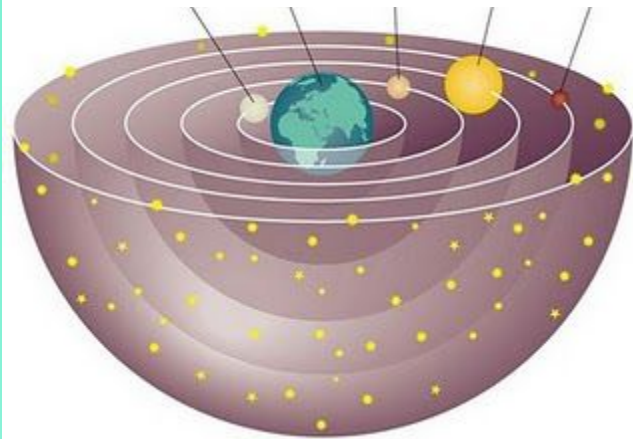
предназначенный для разгона **протонов** и тяжелых **ионов** и изучения продуктов их соударений. Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (**ЦЕРН**), на границе Швейцарии и Франции. БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире.

6. Космологические модели Вселенной

Античная КМ

Космологические представления Аристотеля:

Луна Земля Венера Солнце Марс



В подлунном мире все состоит из земли, воды, воздуха, огня.



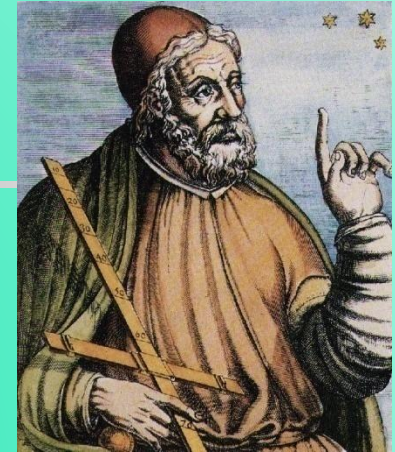
Аристотель
(384–322 до н. э.)

В надлунном мире вплоть до ограничивающей сферы все заполнено гипотетическим эфиром.

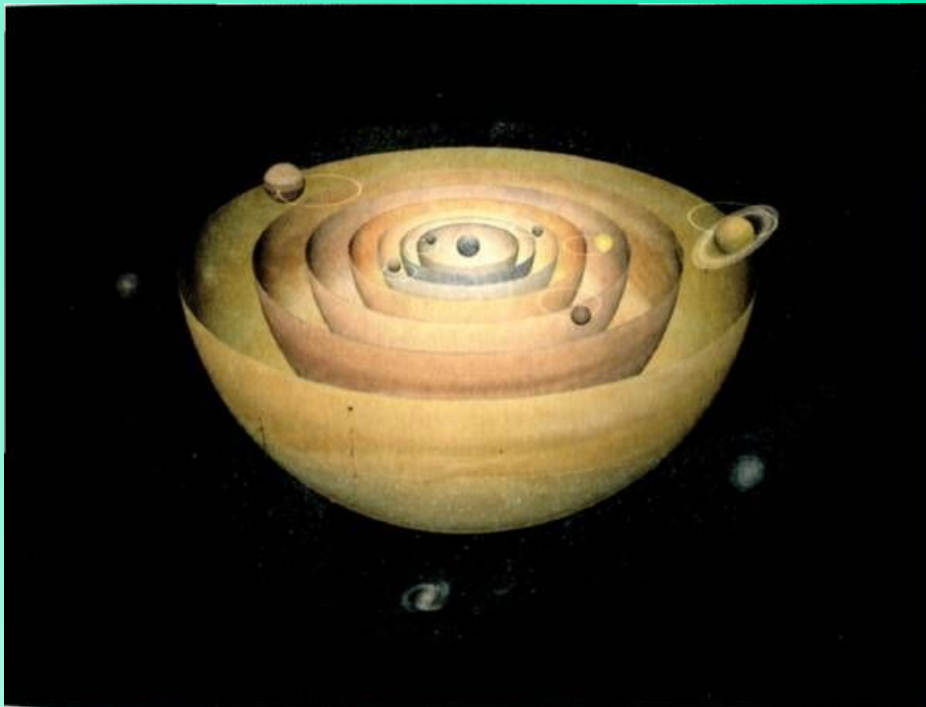
6. Космологические модели Вселенной

Античная КМ

Клавдий Птолемей
(ок. 87–165) –
древнегреческий
астроном, математик



Геоцентрическая система Птолемея (развитие идей Аристотеля):

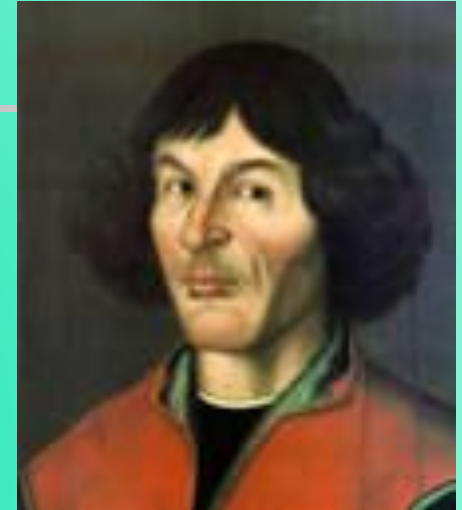
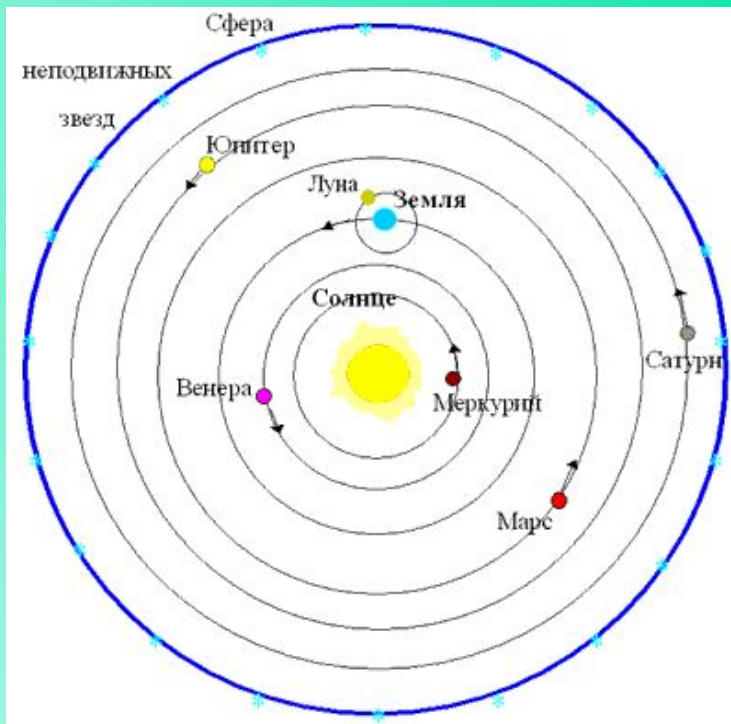


В центре Вселенной –
сферическая Земля,
вокруг нее обращаются
Луна, Солнце, планеты по
сложной системе
окружностей. Все это
заключено в сферу
неподвижных звезд.

6. Космологические модели Вселенной

Средние века

Гелиоцентрическая
система Коперника:



Николай Коперник
(1473–1543) –
польский астроном,
математик

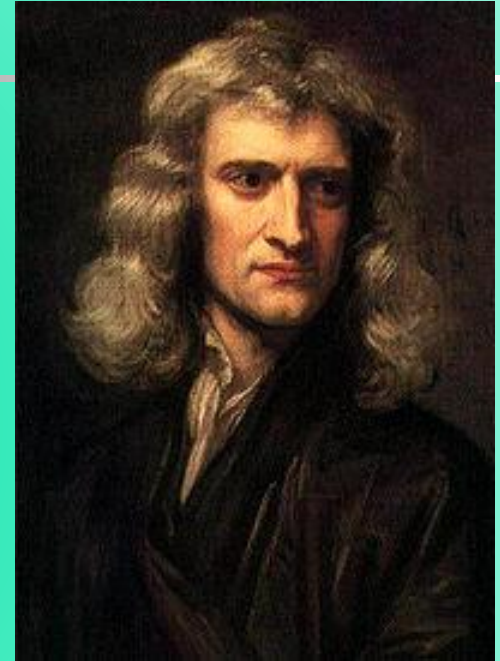
6. Космологические модели Вселенной

Механистическая КМ

Ньютоновская космология



Вселенная – безграничная, бесконечная, однородная, неизменная.



Сэр Иссак НЬЮТОН (1643–1727) – английский физик, математик и астроном.

6. Космологические модели Вселенной



Ньютон: Вселенная **должна быть бесконечна** – иначе вся материя упадет в ее центр вследствие тяготения.

В бесконечной же Вселенной нет центра.



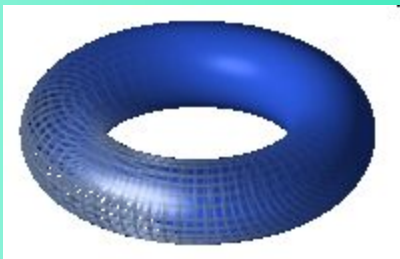
Вселенная стационарна

Эйнштейн: Вселенная может быть безгранична, **но конечна** и стационарна.

6. Космологические модели Вселенной

Вселенная Эйнштейна

однородна, изотропна и равномерно заполнена материей, преимущественно в форме вещества; безгранична и стационарна, но **конечна**.



2-мерные безграничные, но **конечные** пространства

По Эйнштейну, мировое пространство замкнуто и представляет собой **четырёхмерную сферу**, для которой верна **геометрия Римана**.

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

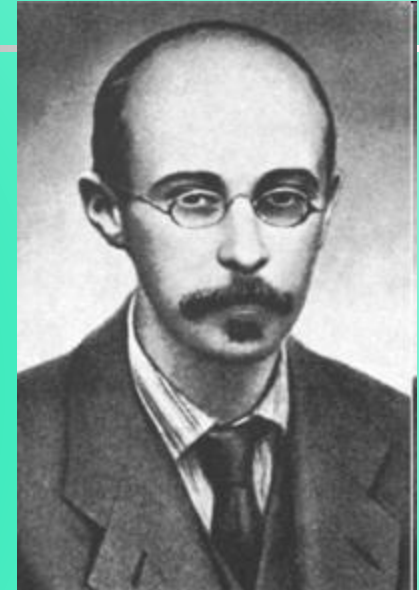
Постулаты:

1. Космологический принцип.
2. ОТО.

Следствие:

Вселенная **не может быть стационарной** – она либо расширяется, либо сжимается

(нестатические решения уравнений Эйнштейна)



А. А. Фридман (1888–1925) – российский и советский математик, физик

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

Космологический принцип

Для всех наблюдателей Вселенная выглядит одинаково, независимо от места наблюдения.



Эдвард Артур Милн (1896–1950) – английский астрофизик-теоретик.

или

Мы не находимся в особом месте Вселенной.

Эдвард Артур Милн, 1935

Этот принцип является главной аксиомой современной космологии.

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

Эквивалентная формулировка космологического принципа

Вселенная на больших масштабах является **однородной** и **изотропной**.

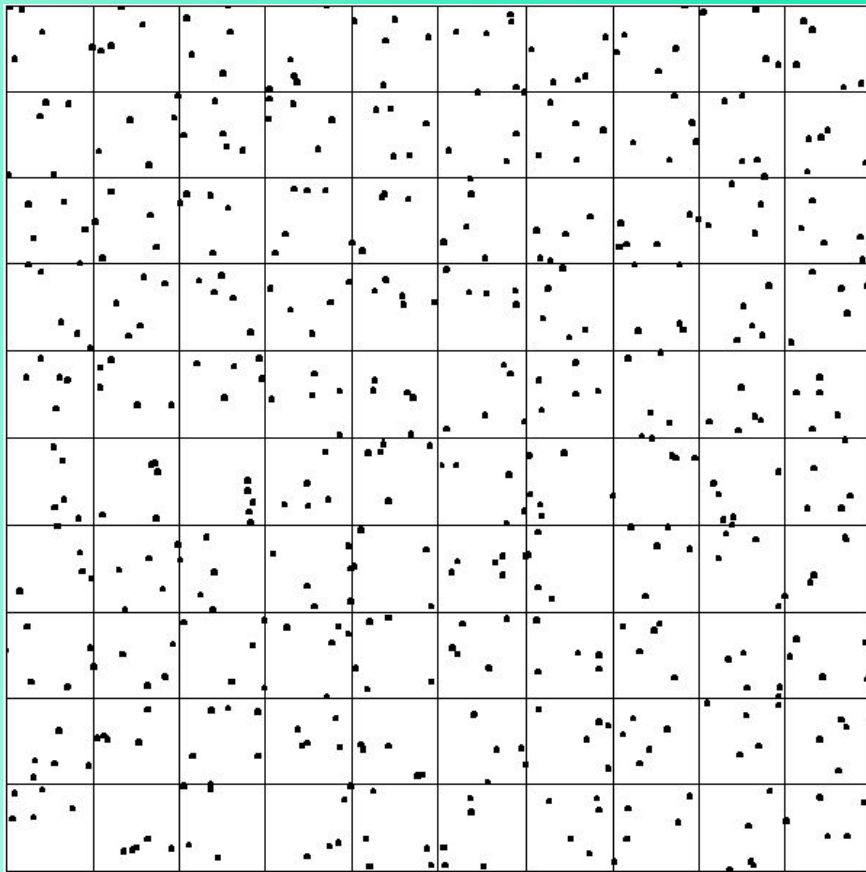


- ❖ Вселенная как целое **не должна вращаться** (ось вращения была бы выделенным направлением).
- ❖ У нее не должно быть **центра** и пространственной границы (нарушалось бы условие однородности).

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

Принципы и факты: крупномасштабная структура Вселенной



0,5 млрд световых лет

Вселенная однородна
в больших масштабах,
но неоднородна
в малых.

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фрийдмана (1922)

Наша Вселенная расширяется или сжимается?

В моделях Фрийдмана все зависело от критической плотности $\rho_{\text{крит}}$

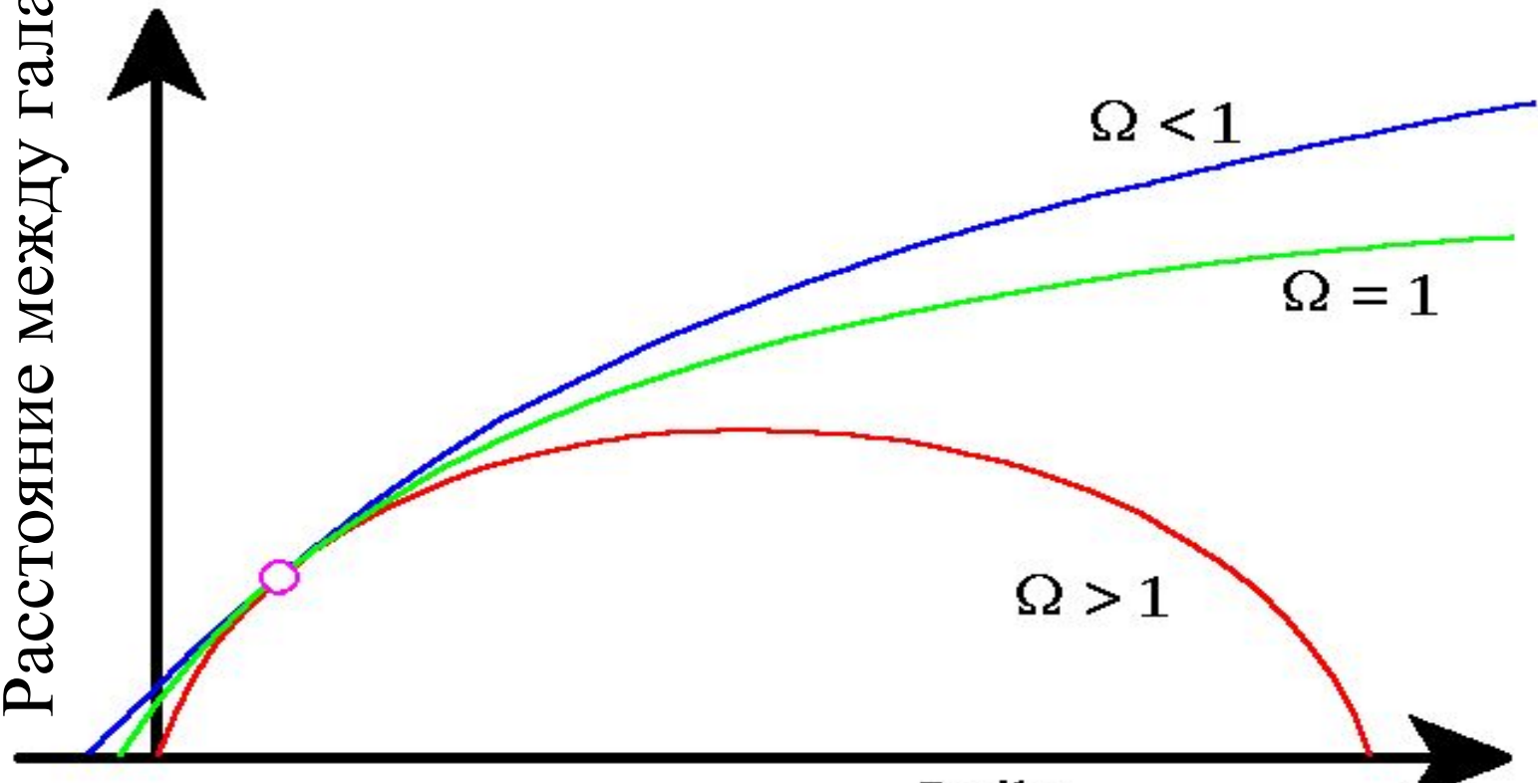
$$\rho_{\text{крит}} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3 \approx 5 \text{ атомов водорода на м}^3$$

Параметр плотности $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{крит}}}$

6. Космологические модели Вселенной

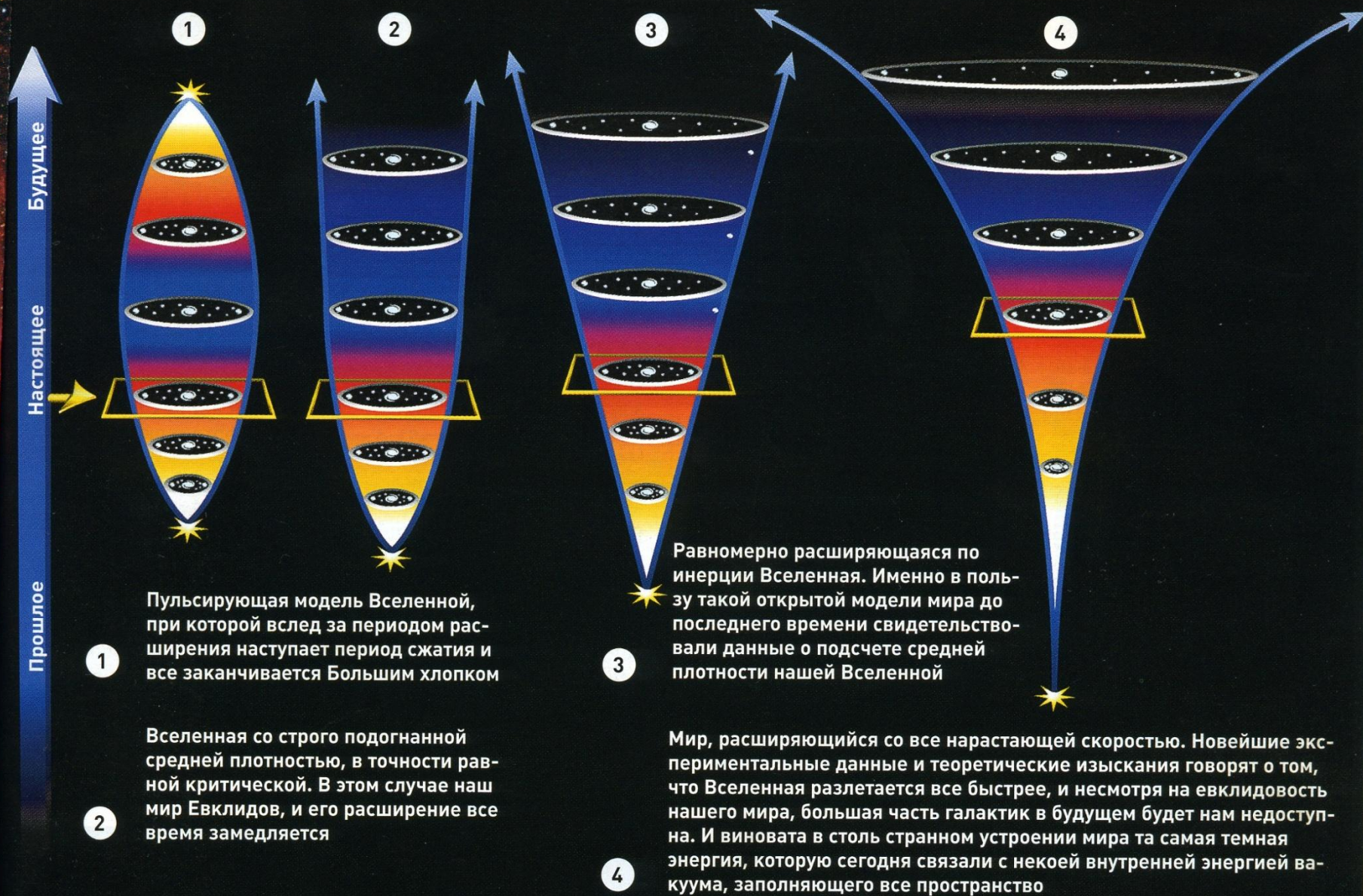
Космологическая модель Фридмана (1922)

Расстояние между галактиками



Время, прошедшее с начала расширения Вселенной

Возможные сценарии развития нашего мира



6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)



Фридман: **начало Вселенной**

– **точка сингулярности.**

В решениях уравнений Фридман обнаружил особую точку – момент времени, в который **радиус мира равен нулю**, а **плотность** содержащегося в нем вещества равна **бесконечности.**

В точке сингулярности
перестают действовать известные
нам законы физики.

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

В какой Вселенной мы живем?

Согласно современным экспериментальным данным, наблюдаются:

- ❖ противоречия между **наблюдаемой массой** галактик и скоплений галактик с их **гравитацией**,
- ❖ **аномально высокая скорость вращения** звезд на периферии галактик.



В нашей Вселенной присутствует **темная материя** (скрытая масса).

6. Космологические модели Вселенной

Космологическая модель Фридмана (1922)

Баланс энергий в современной Вселенной

