

# 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



---

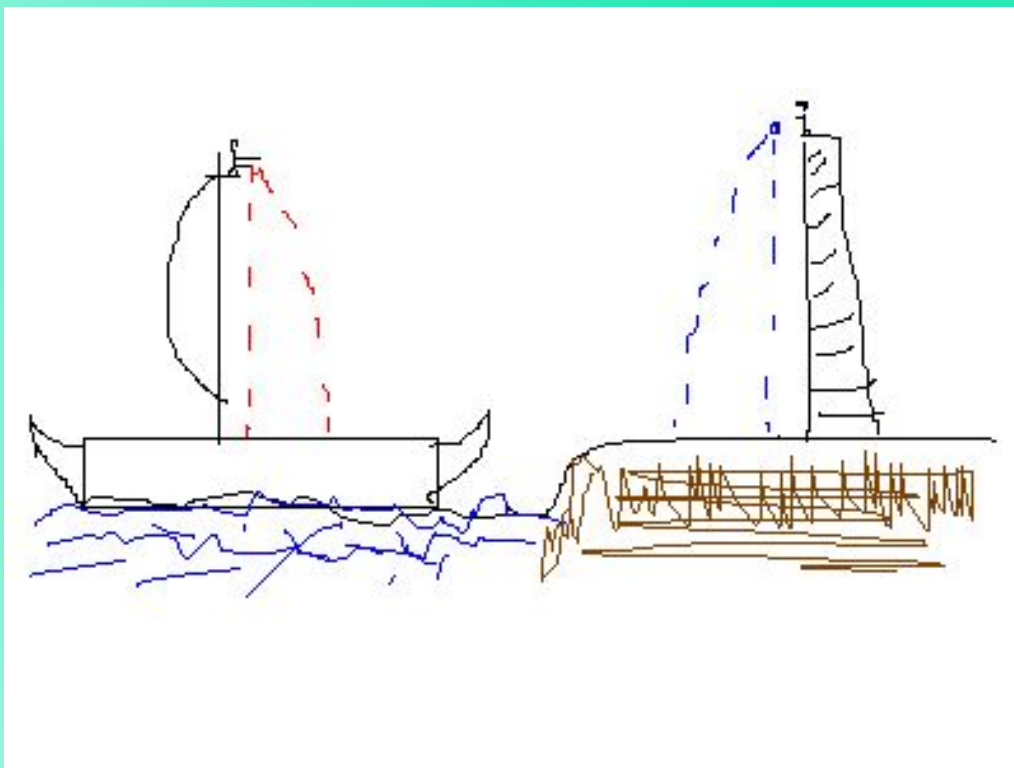
## Принцип относительности Галилея

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**

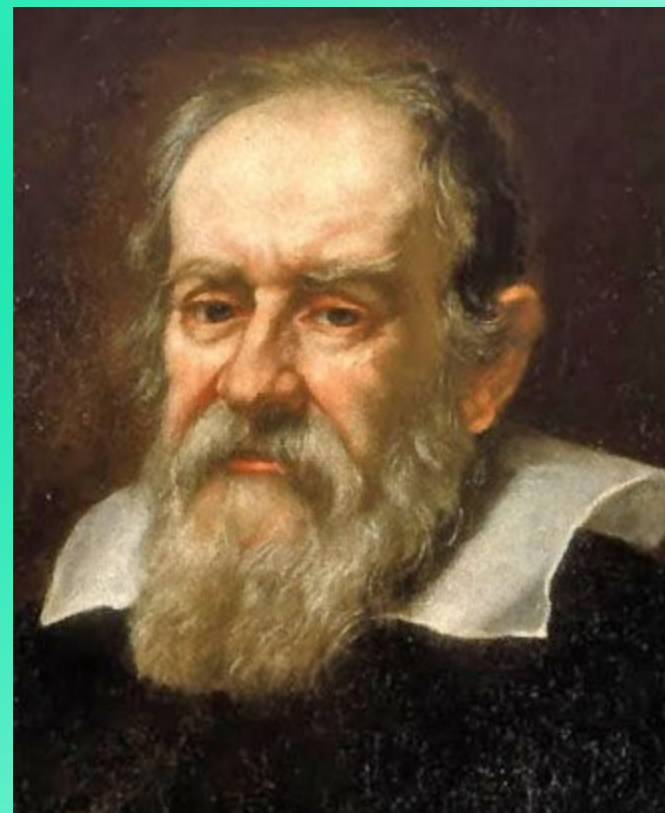
# 1. Эволюция представлений о пространстве и времени

## Преобразования Галилея

---

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

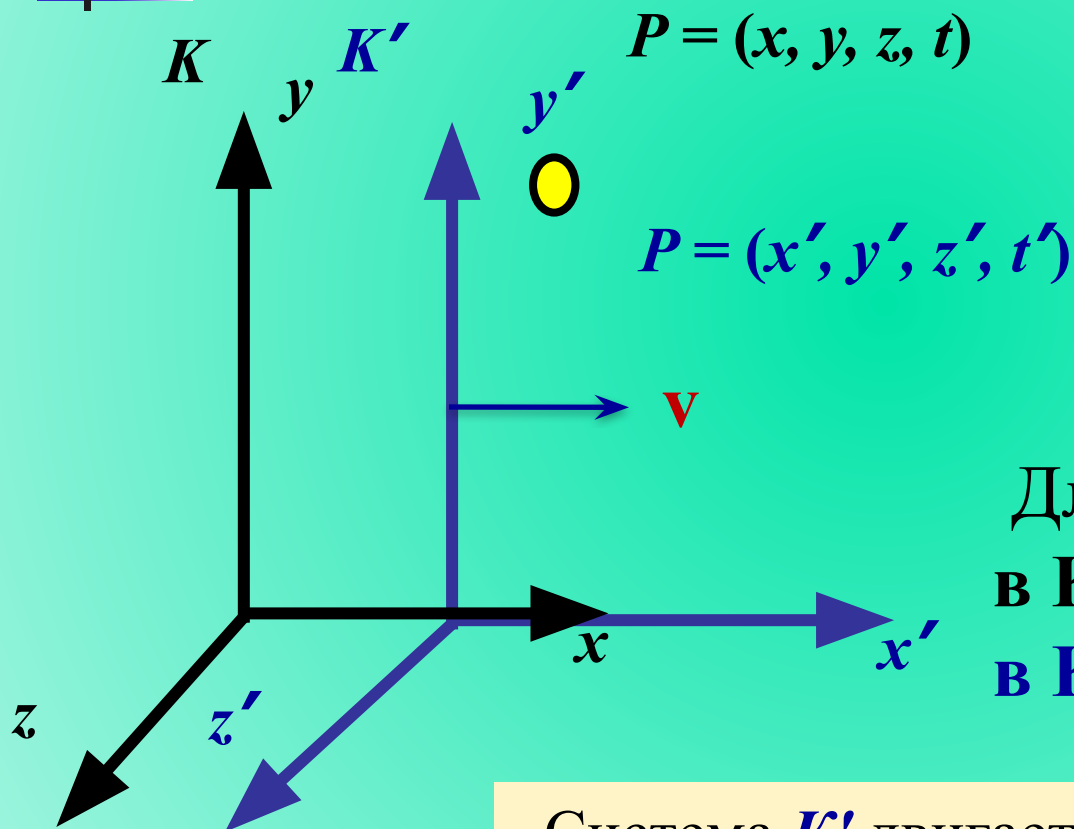
Галилео Галилей (1564–1642) – итальянский физик, механик, астроном, философ и математик





# 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

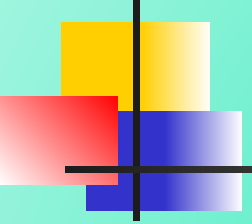
**Специальная теория относительности (СТО)**

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?**

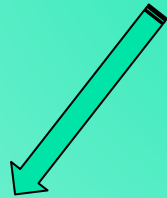
- Из теории – уравнений Максвелла
- Из проверки экспериментами
  - Физо, 1851
  - Майкельсона – Морли, 1887

## 2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

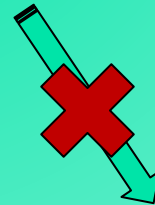
Для выдвижения второго постулата было два основания – **теоретическое** и **экспериментальное**.

**Теоретическое основание** для выдвижения второго постулата:

Уравнения Максвелла **неинвариантны** относительно преобразований Галилея



Принцип  
относительности



Преобразования  
Галилея

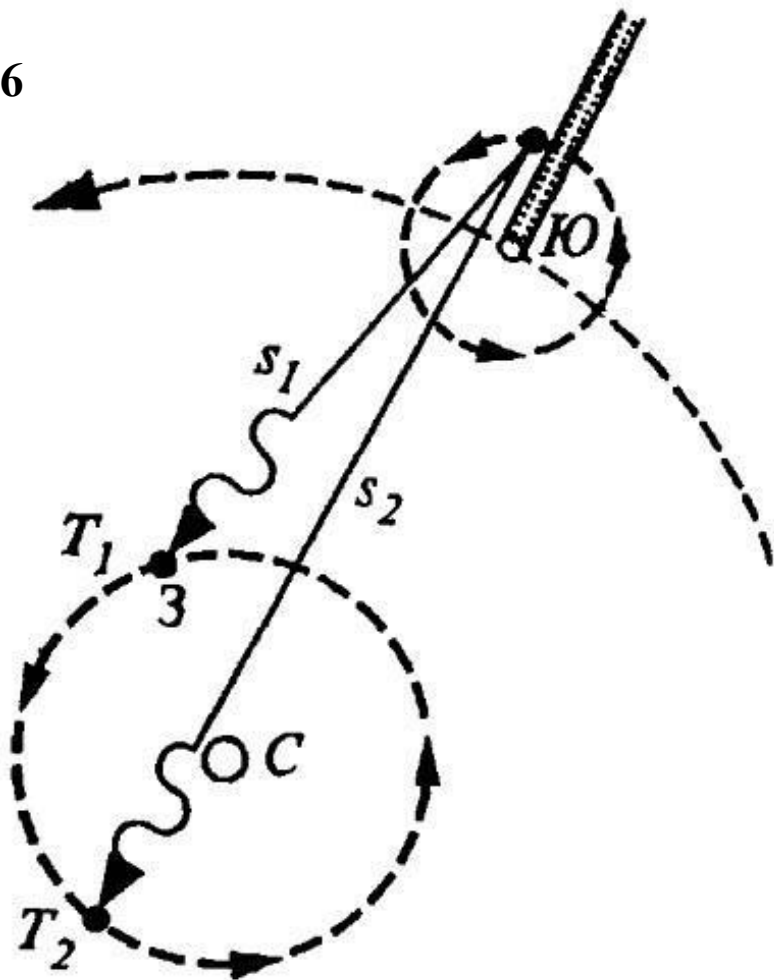
## 2. Постулаты и следствия специальной теории относительности

15

### Экспериментальное основание для выдвигения **второго постулата**

1676

г.



Оле Кристенсен  
Рёмер  
(1644–1710) –  
датский астроном



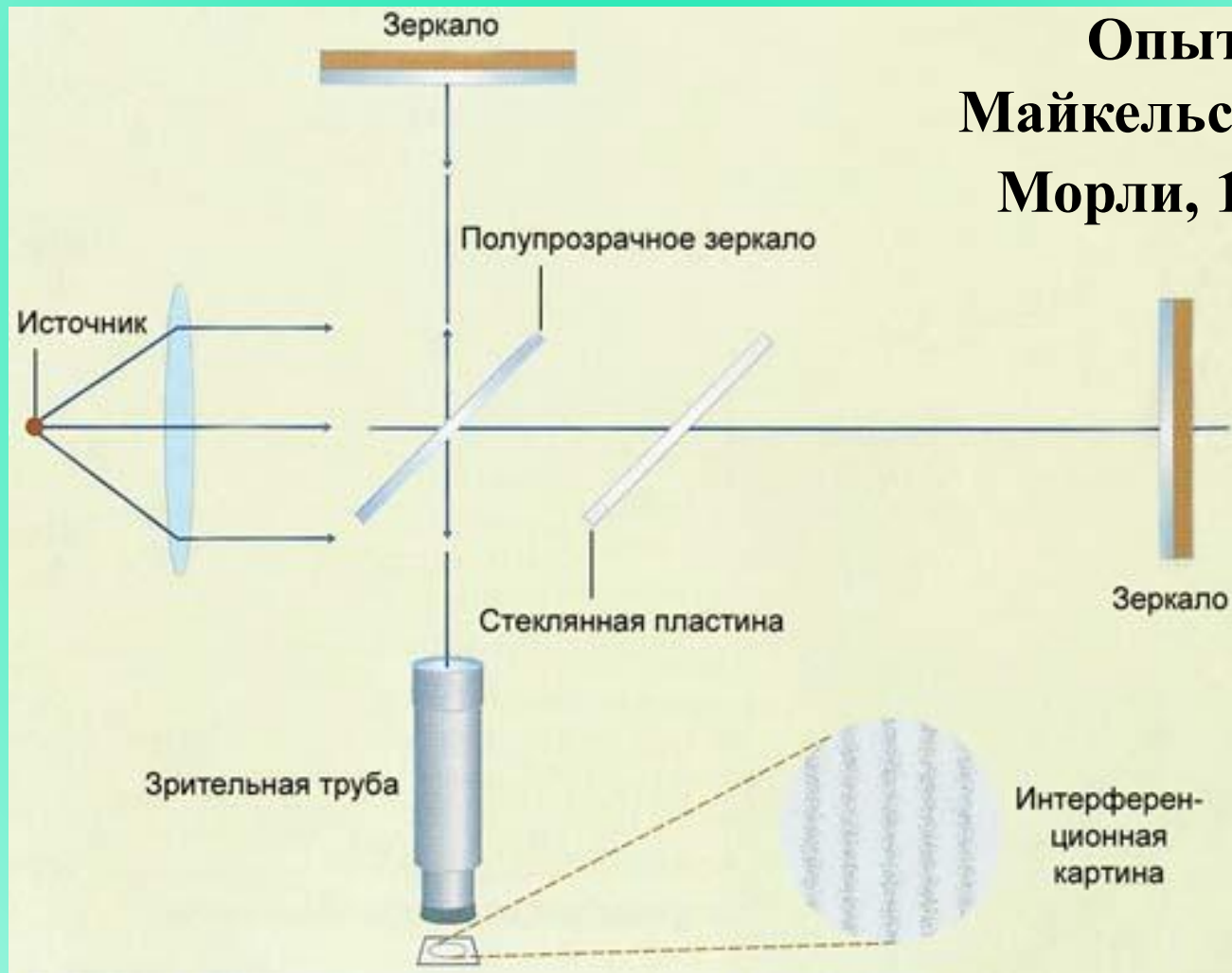
Время между затмениями лун Юпитера длиннее, когда Земля дальше



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:

---

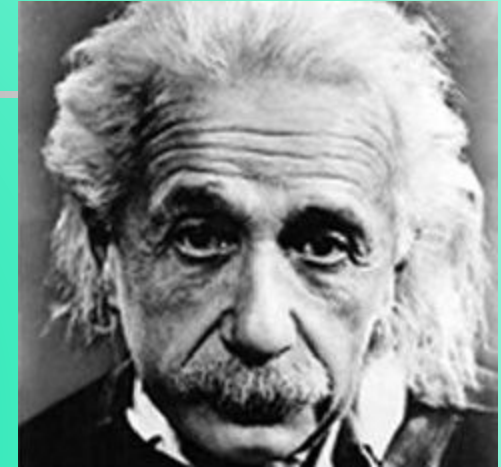
### 2. Принцип инвариантности (постоянства) скорости света:

**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

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

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

$$y' = y$$

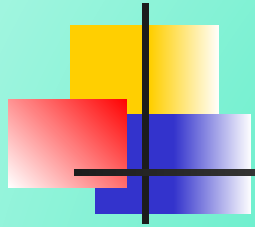
$$z' = z$$

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

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

Релятивистский коэффициент  $\gamma$  всегда  $> 1$ .

## 2. Постулаты и следствия специальной теории относительности



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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

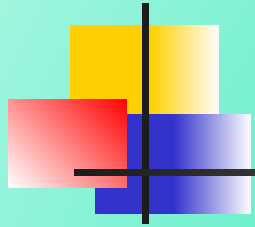
$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

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

### 3. Преобразования Лоренца



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

Иначе  $\gamma$  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

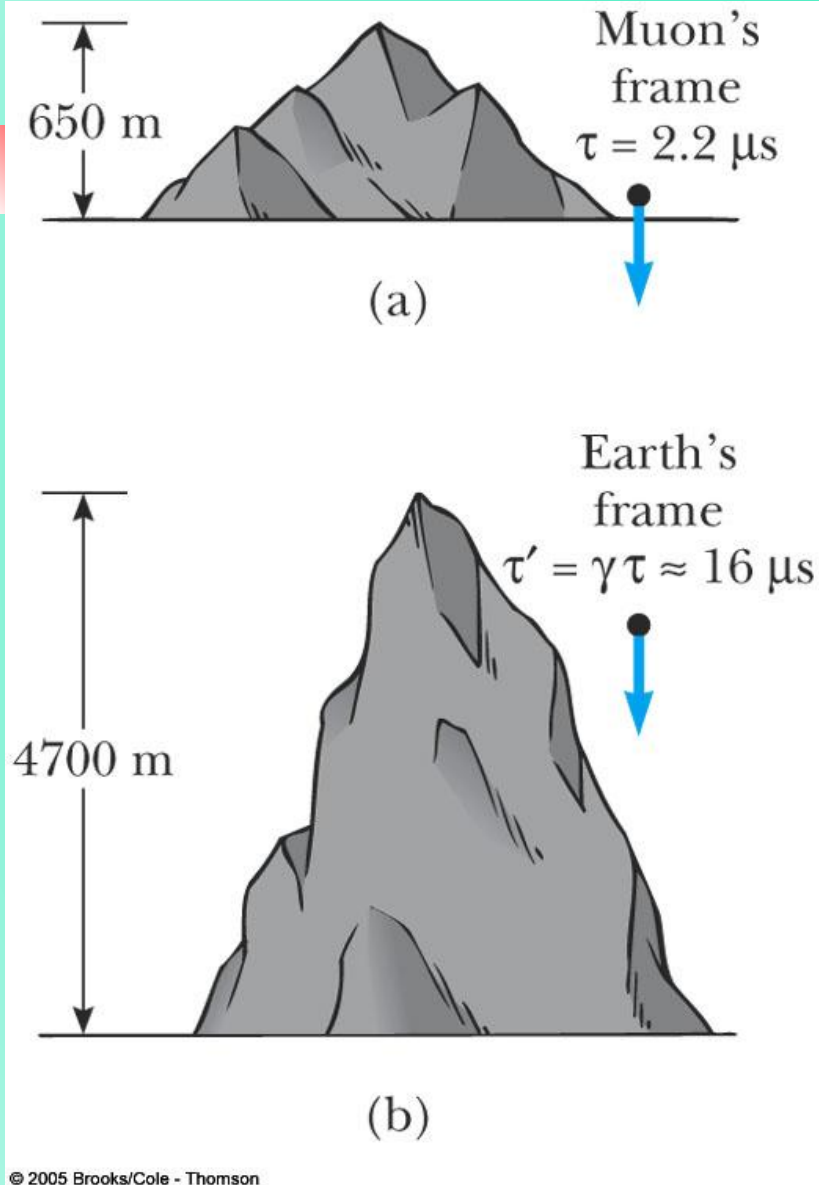
### теории относительности СО мюона

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

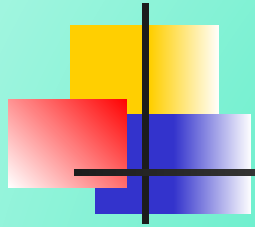
**Масса движущихся релятивистских частиц зависит от их скорости:**

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

**$m$**  – 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

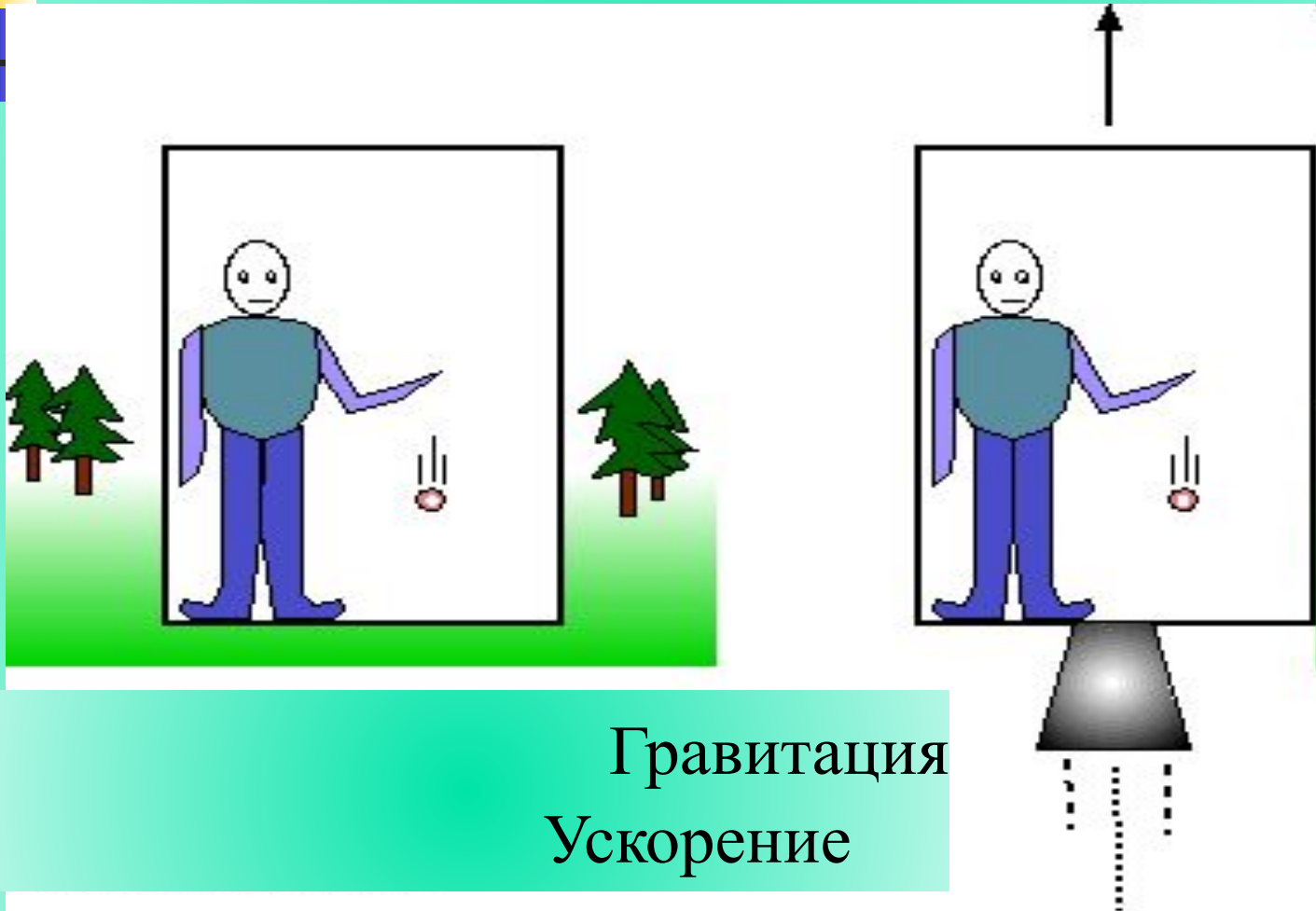
Гравитация = Ускорение



**Принцип эквивалентности:**

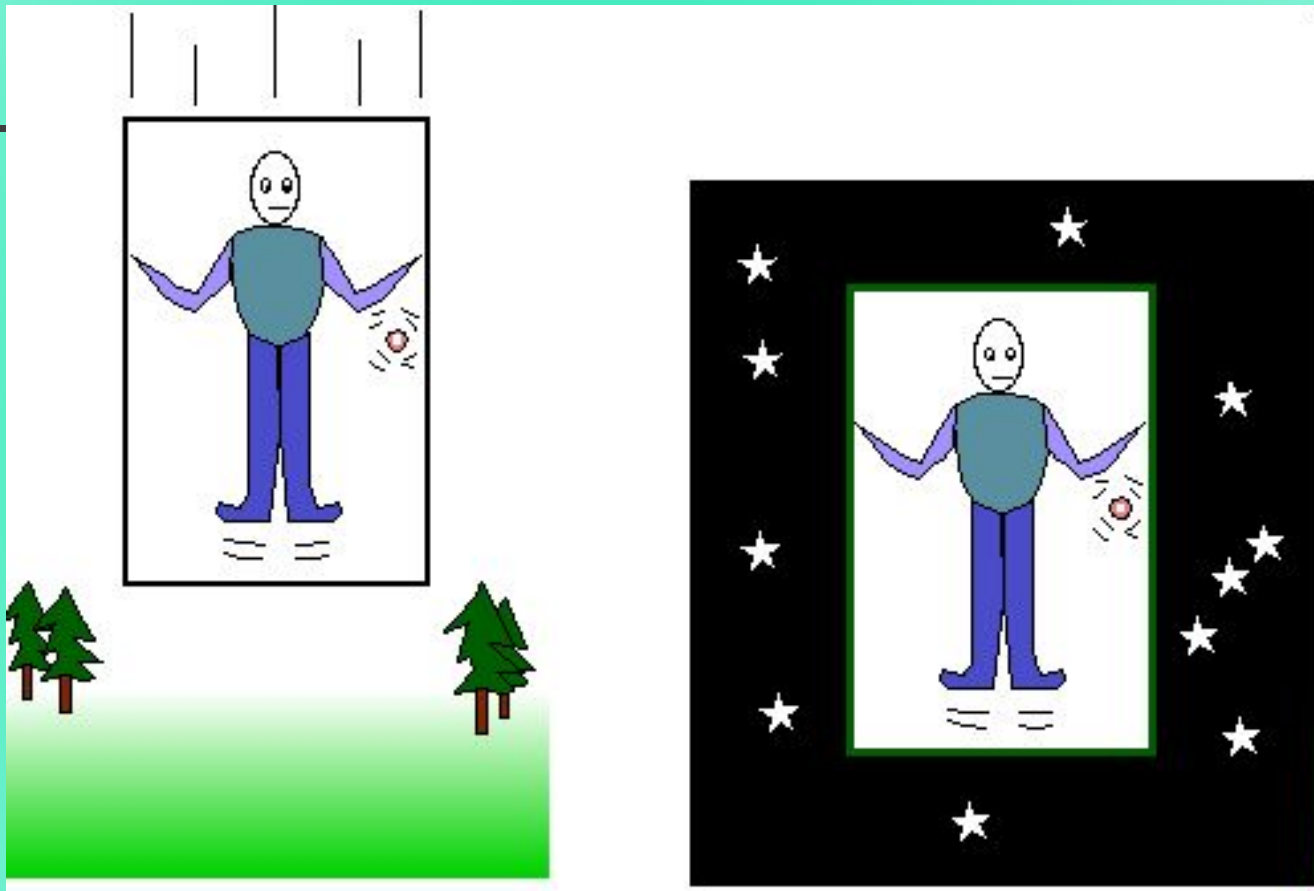
**в поле тяготения** (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве **без тяготения**, если в нем вместо инерциальной системы отсчета ввести систему, **ускоренную** относительно нее.

# 3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна



Гравитация  
Ускорение

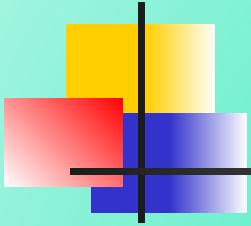
# 3. Принцип эквивалентности. Лифт Эйнштейна



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



---

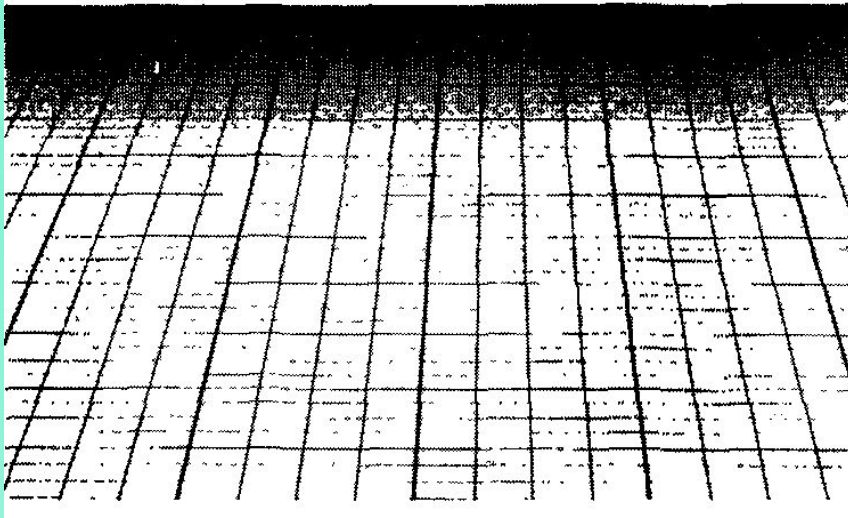
Гравитация и ускорение – это изменение **геометрических** свойств **пространства-времени**.

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

**Геодезическая линия** определяется как кратчайший путь между двумя точками.

## 4. Основные положения общей теории относительности

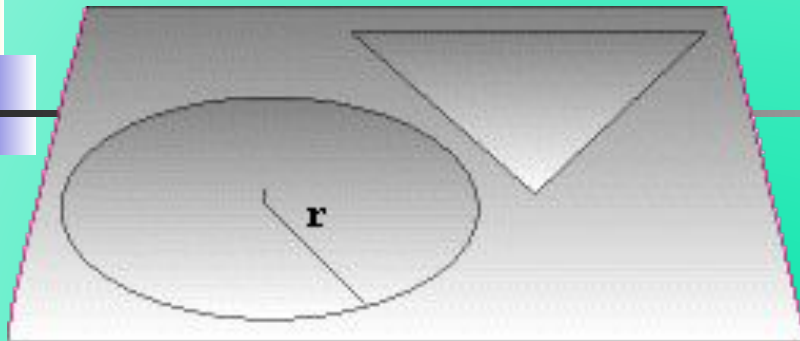
Плоское **евклидово** пространство (нулевая кривизна) **однородно**:



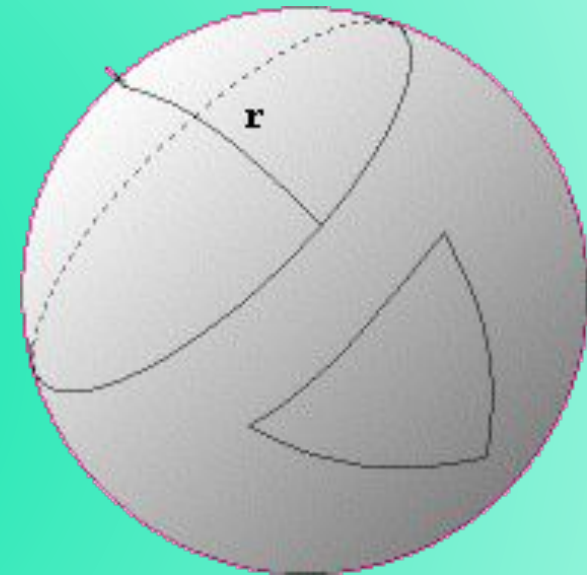
кратчайшее расстояние между точками – **геодезическая линия** – не меняется в разных местах СО и является **прямой**.

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

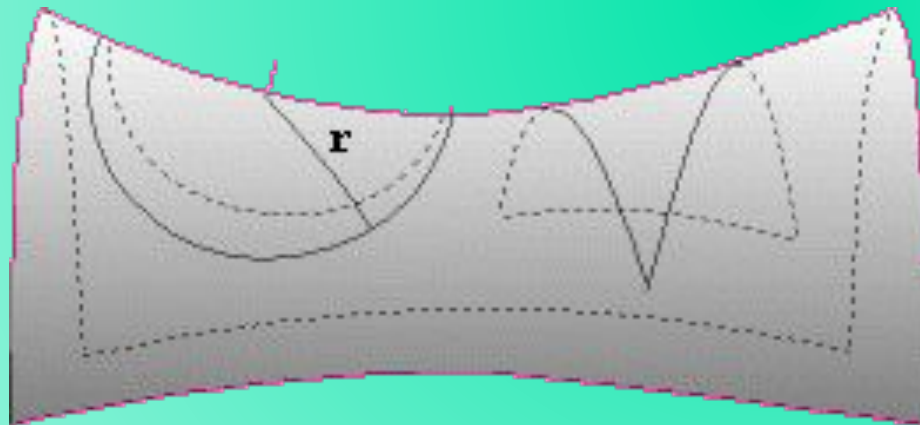
# 4. Основные положения общей теории относительности



Плоское евклидово

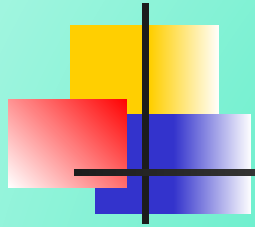


Пространство  
Римана  
(+) кривизна



Пространство Лобачевского  
(-) 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 $2\pi$	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

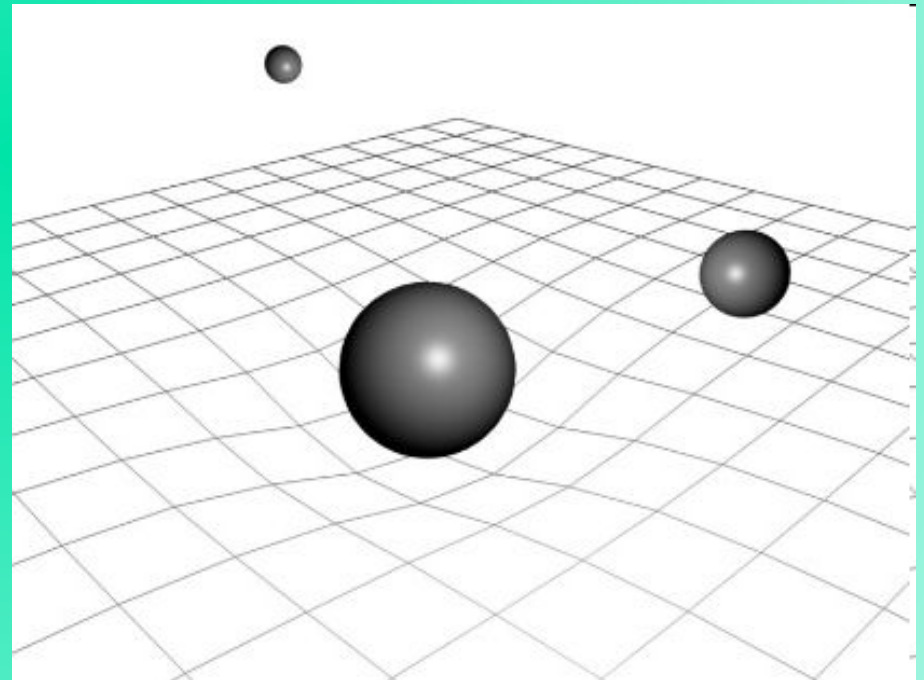
**искривление**

пространства-времени

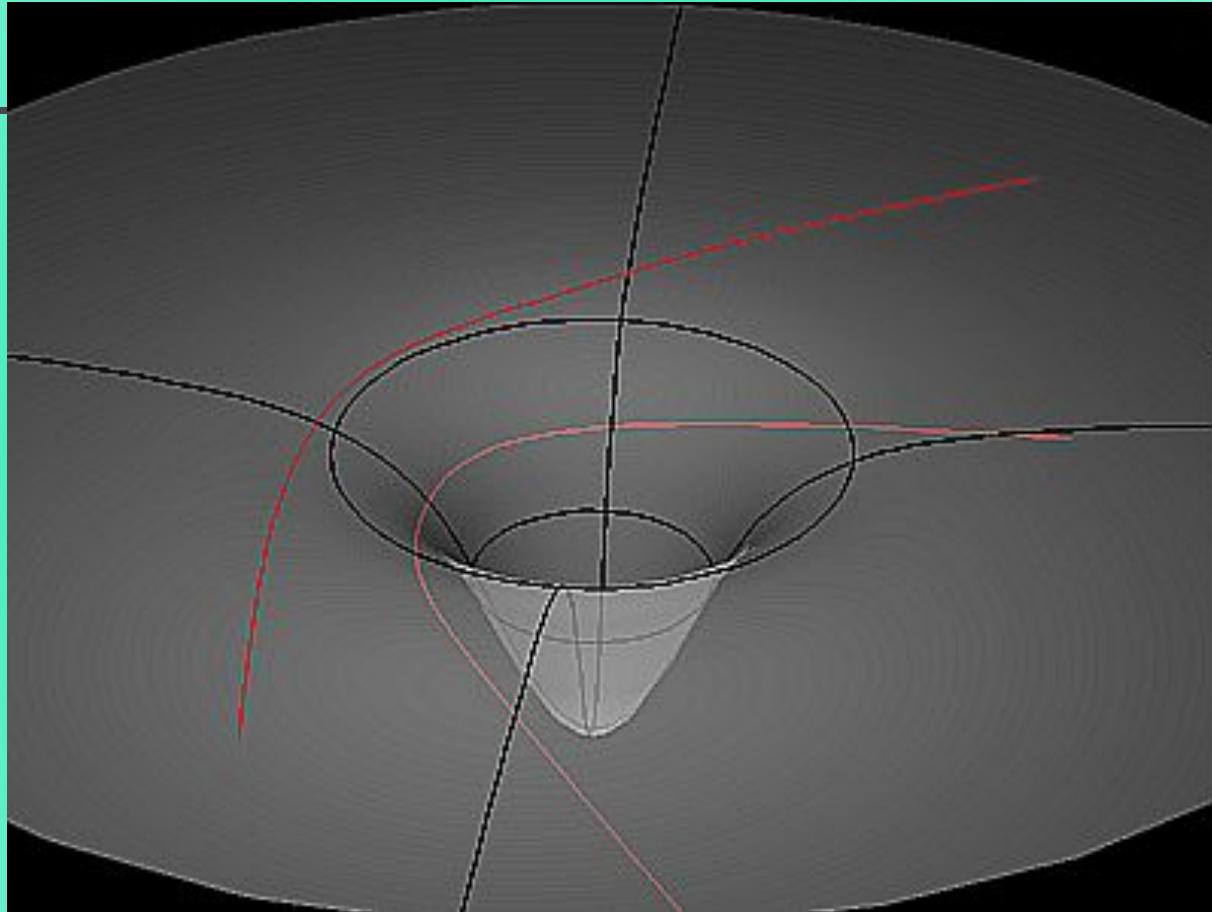
вызывается

помещенными в него

**материей и энергией.**



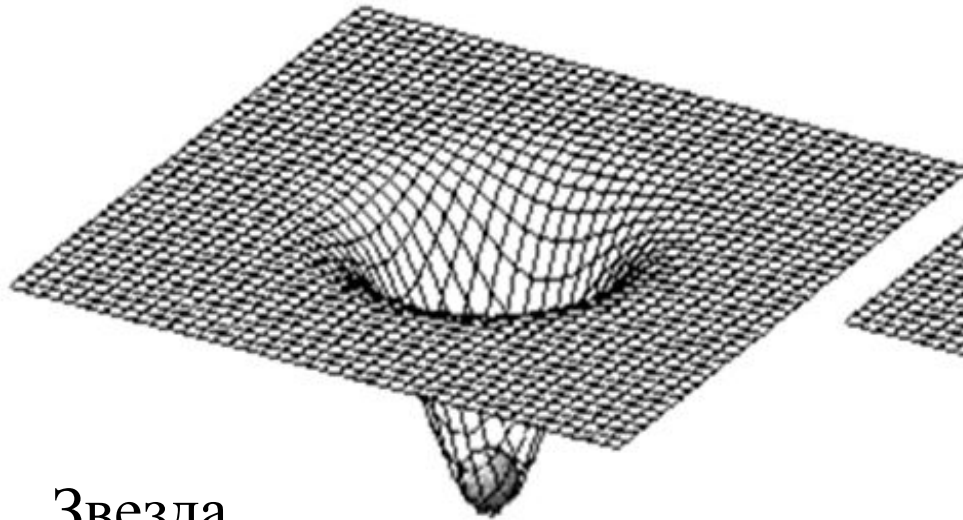
## 4. Основные положения общей теории относительности



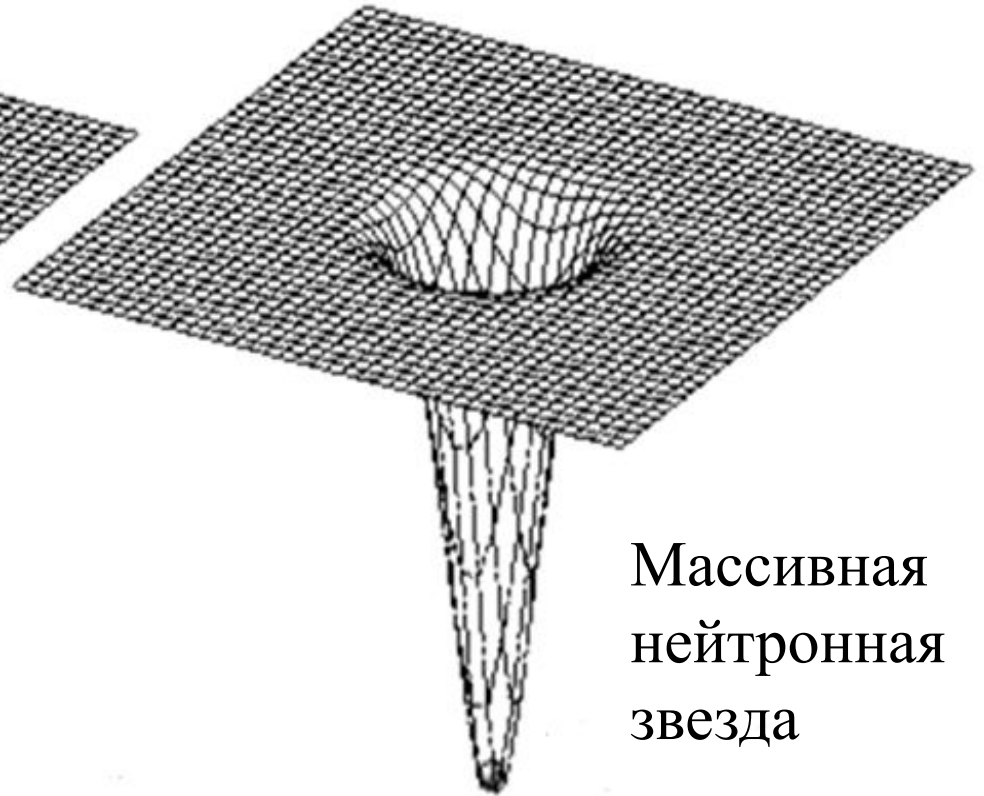
Геодезическая линия в искривленном пространстве —  
**кривая.**



# 4. Основные положения общей теории относительности



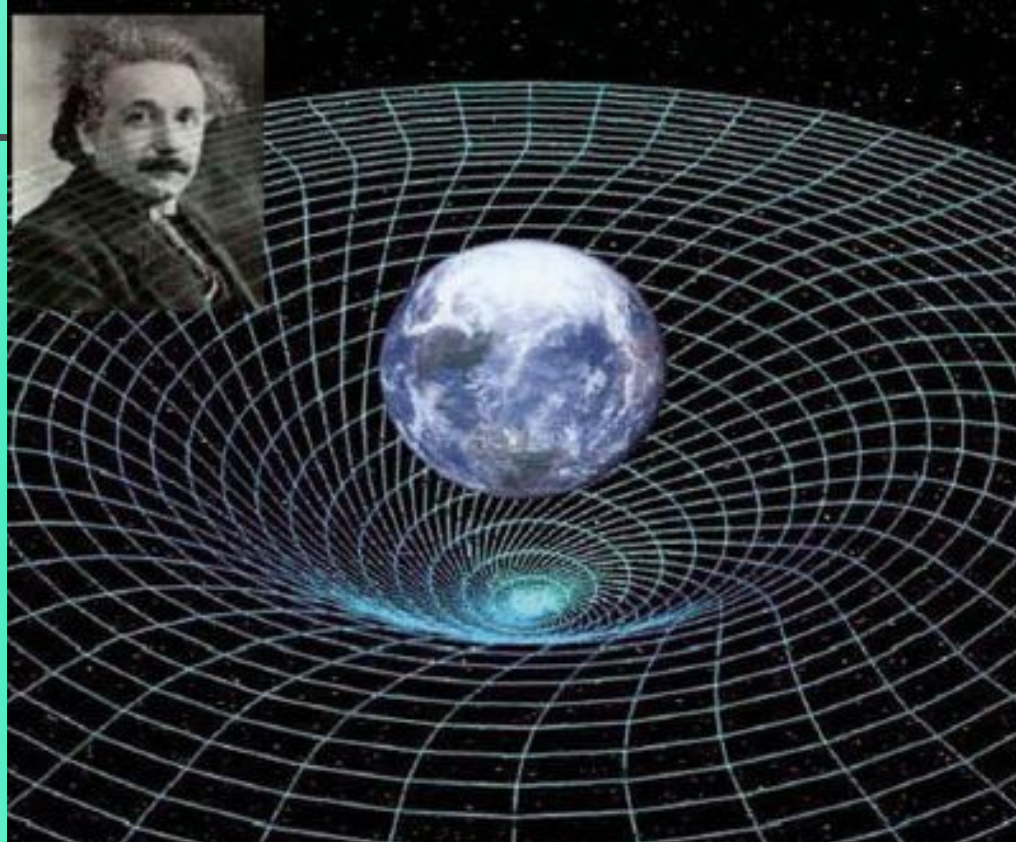
Звезда  
небольшой  
массы



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

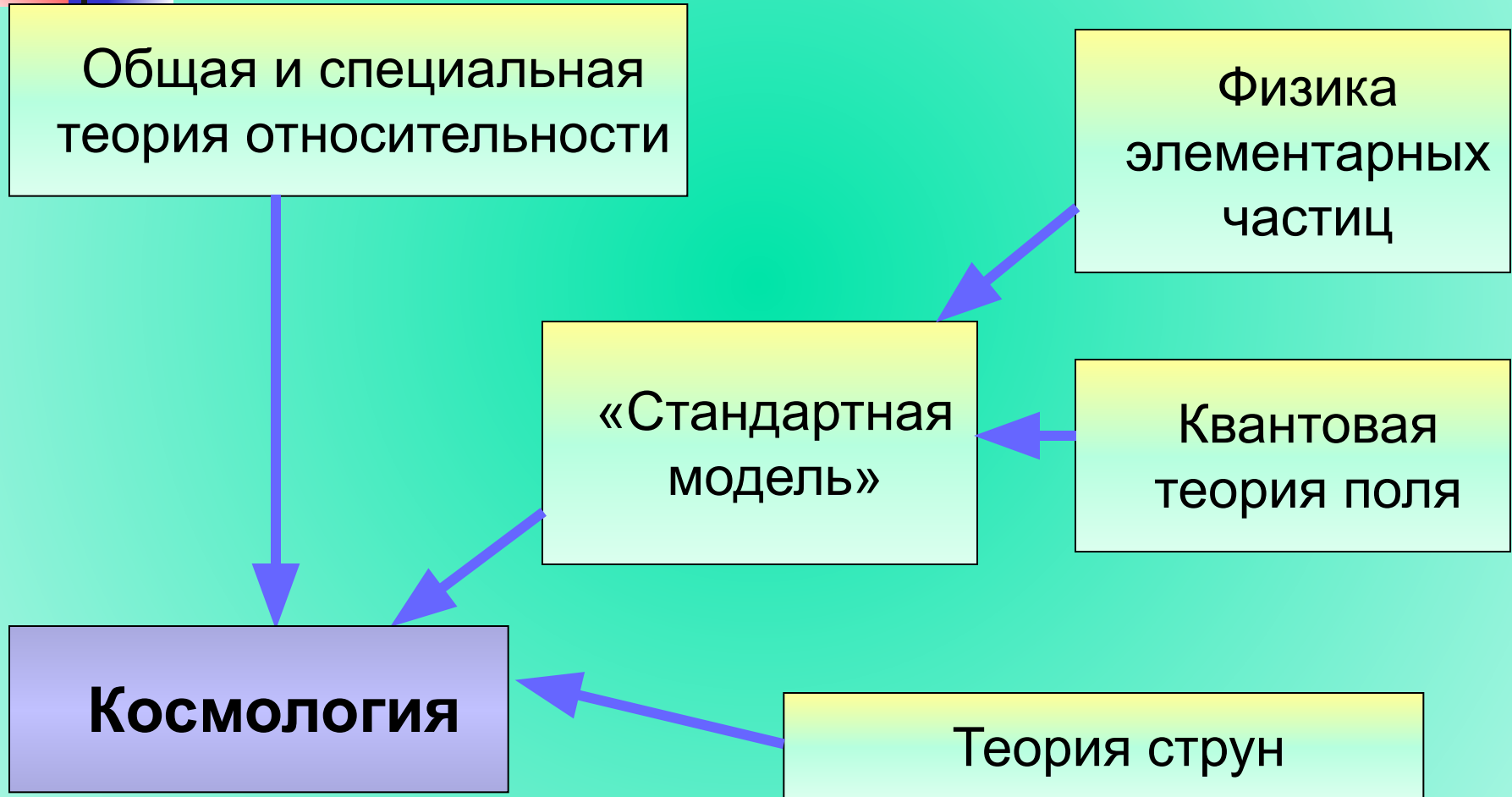
### Основные понятия



**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)

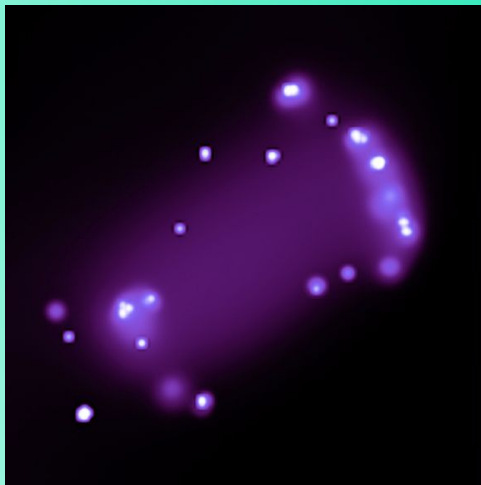
Радиоизлучение (мм – км)

## 5. Наука космология

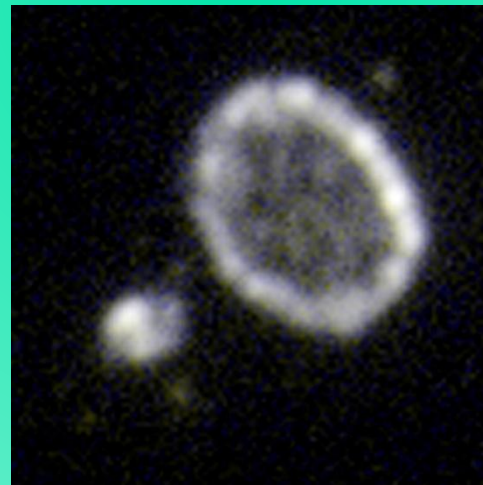
### Астрономия

### Галактика «Колесо кареты»

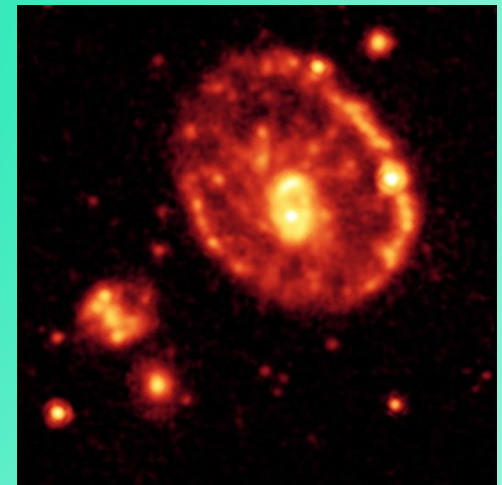
Оптический  
диапазон



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

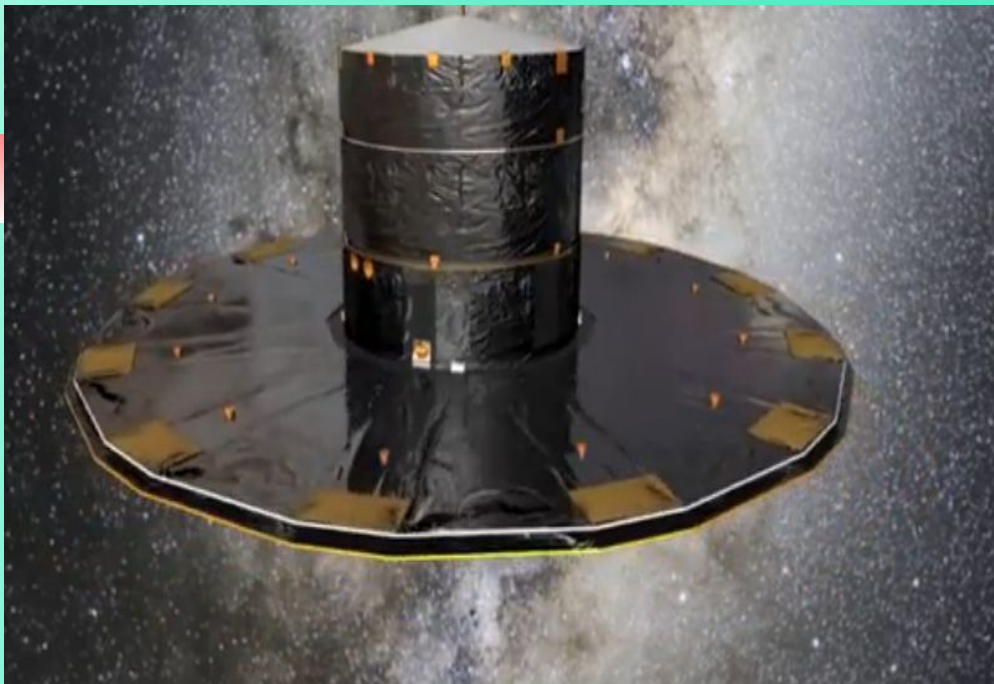


Галактики



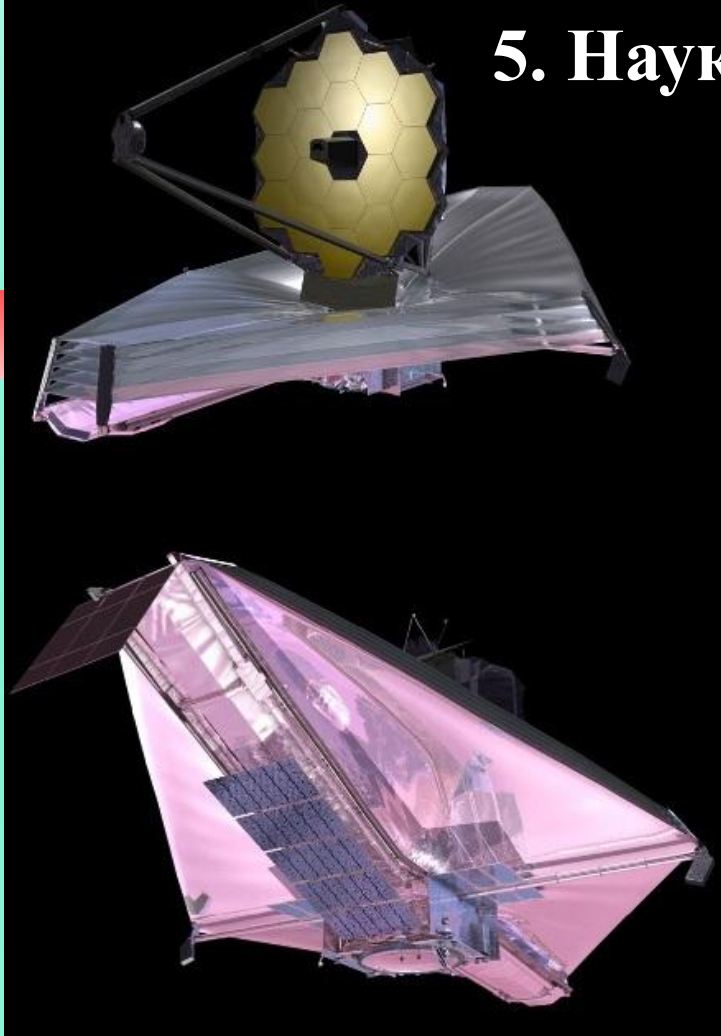
Звезды





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,

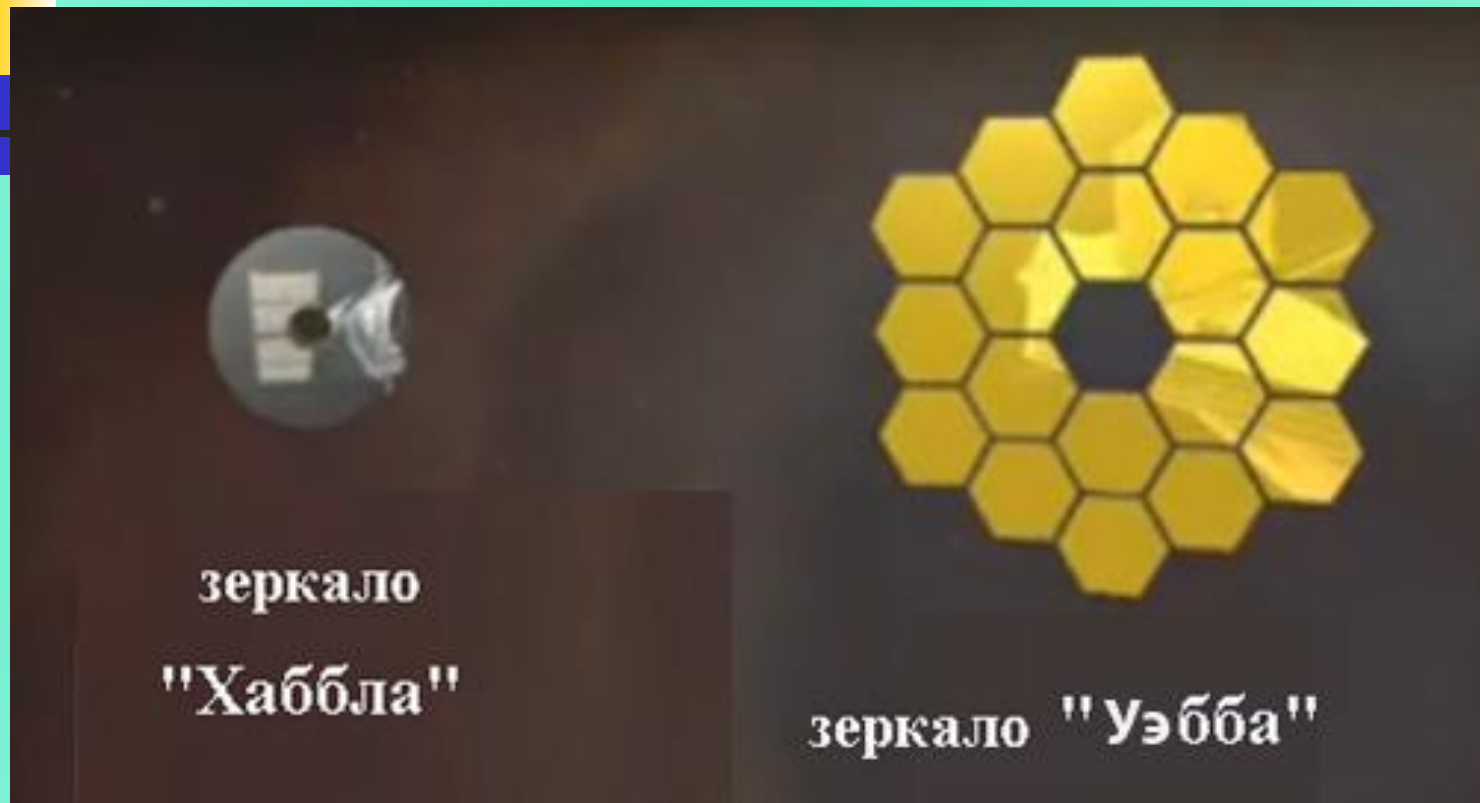


Планируется, что в 2018 году ракета-носитель Ariane 5 ЕСА запустит совместную миссию НАСА и ЕКА — космический телескоп имени **Джеймса Уэбба**. Аппарат станет крупнейшей орбитальной обсерваторией. 6,5-метровое основное зеркало телескопа составят 18 бериллиевых элементов.

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

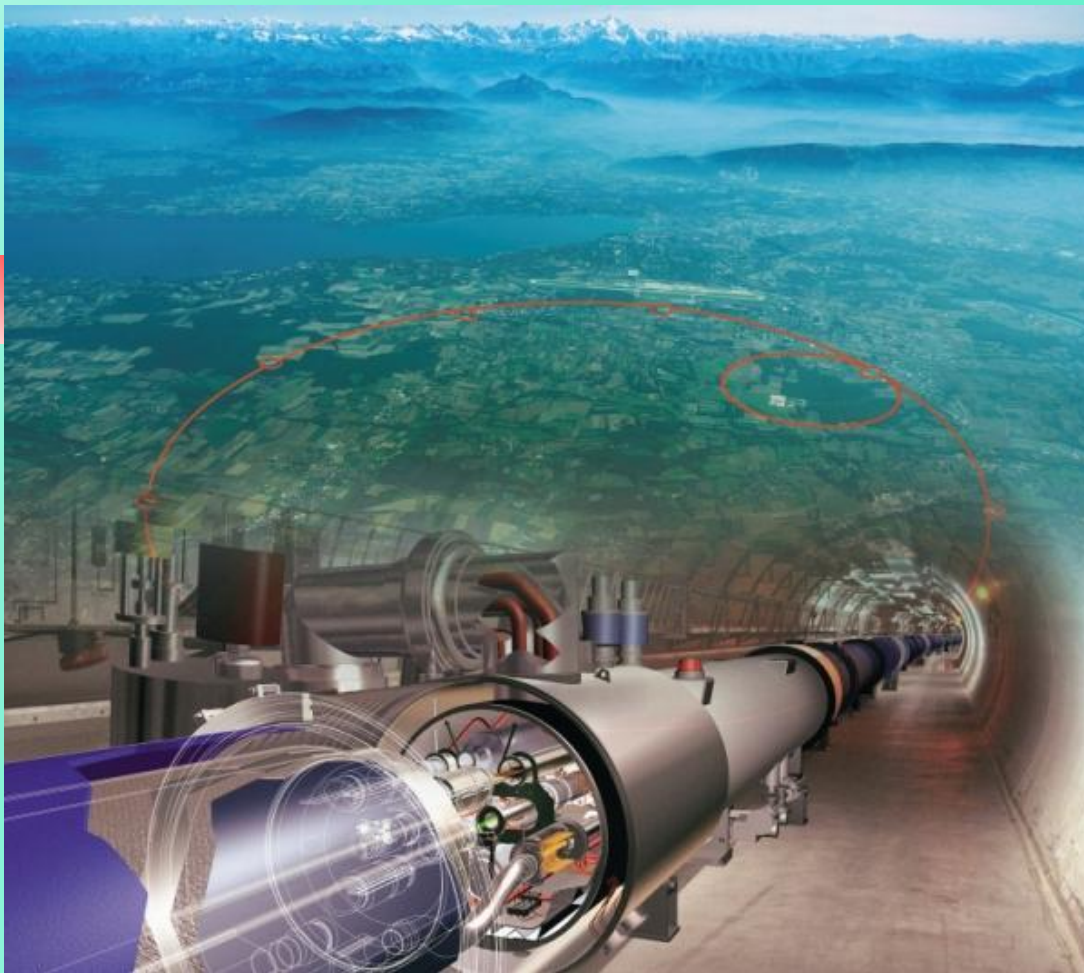
### Ускорители элементарных частиц



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,



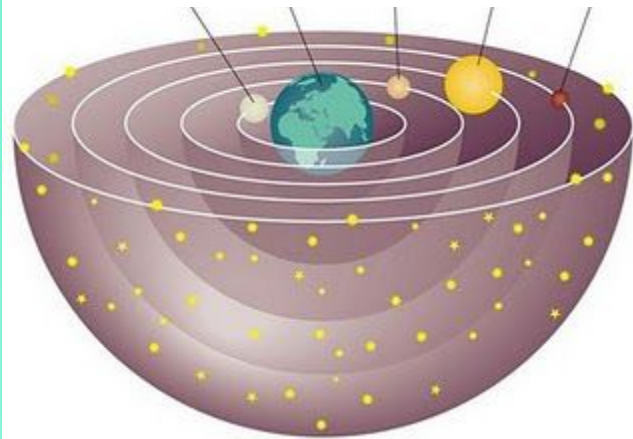
предназначенный для разгона **протонов** и тяжелых **ионов** и изучения продуктов их соударений. Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (**ЦЕРН**), на границе Швейцарии и Франции. БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире.

## 6. Космологические модели Вселенной

### Античная КМ

### Космологические представления Аристотеля:

Луна Земля Венера Солнце Марс



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



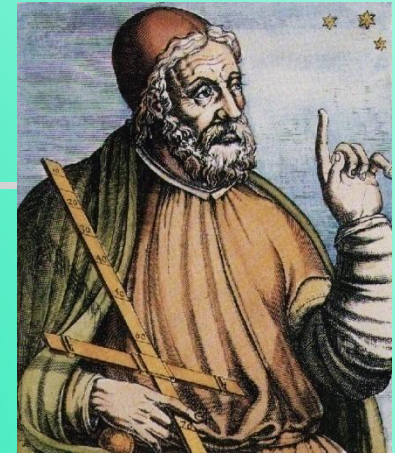
Аристотель  
(384–322 до н. э.)

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

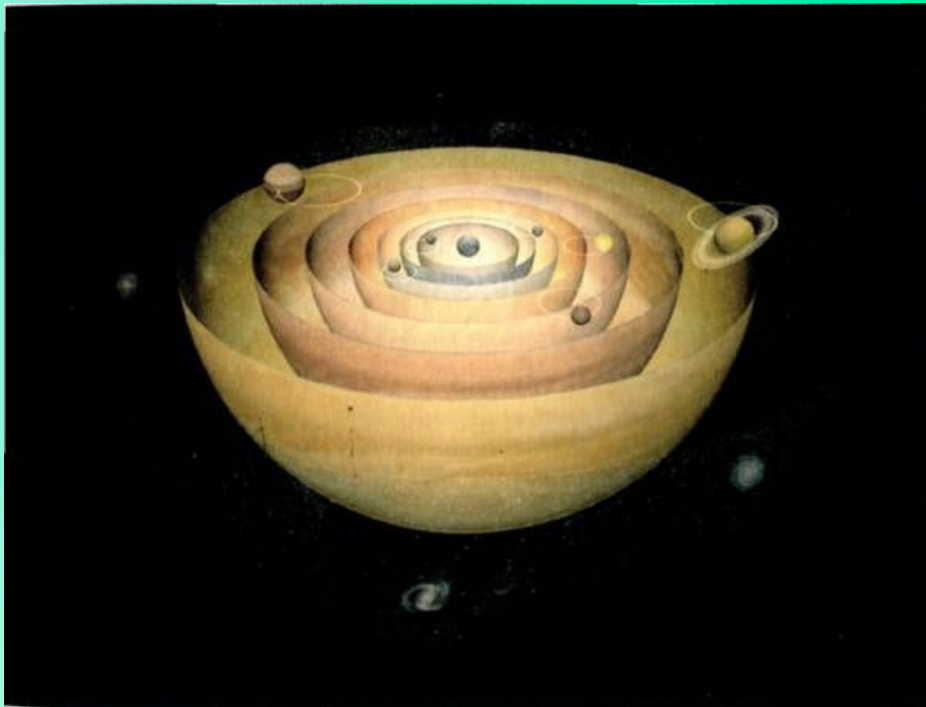
## 6. Космологические модели Вселенной

### Античная КМ

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



### Геоцентрическая система Птолемея (развитие идей Аристотеля):

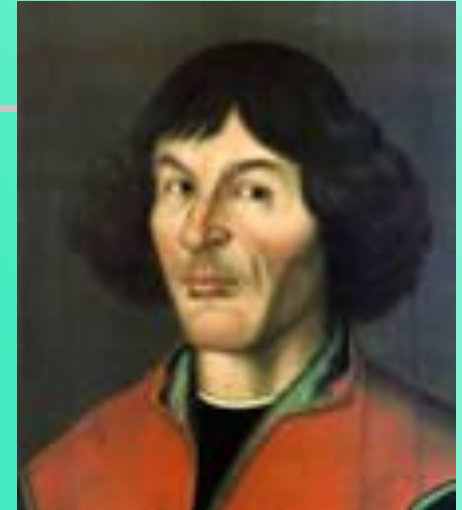
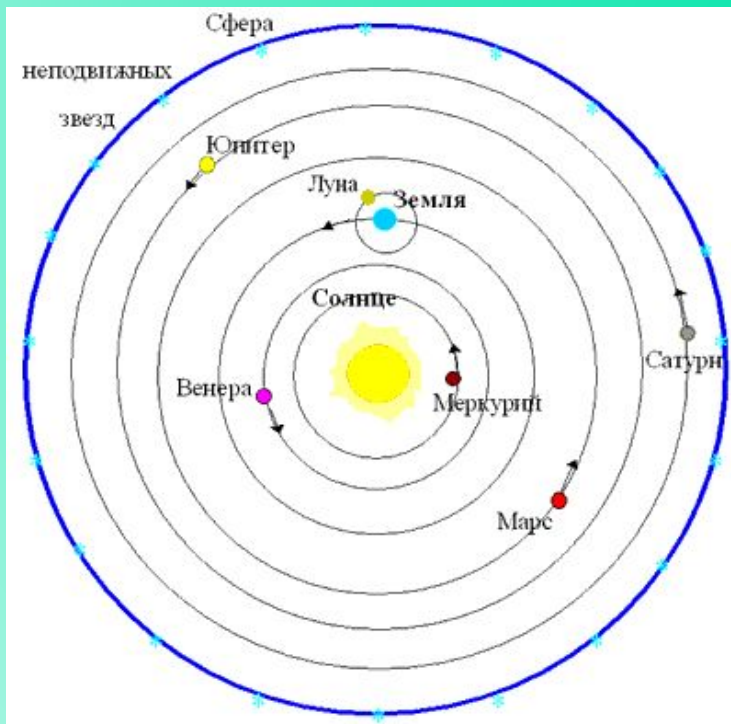


В центре Вселенной –  
сферическая Земля,  
вокруг нее обращаются  
Луна, Солнце, планеты по  
сложной системе  
окружностей. Все это  
заключено в сферу  
неподвижных звезд.

## 6. Космологические модели Вселенной

Средние века

Гелиоцентрическая  
система Коперника:



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

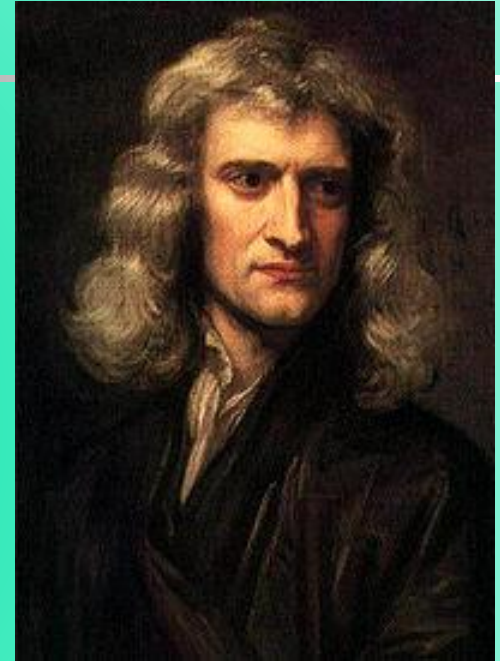
## 6. Космологические модели Вселенной

### Механистическая КМ

### Ньютоновская космология

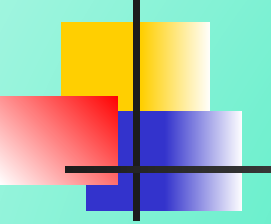


Вселенная – безграничная, бесконечная, однородная, неизменная.



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**

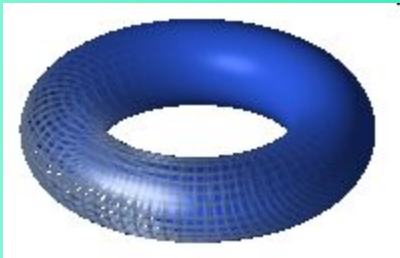
**Эйнштейн:** Вселенная может быть безгранична, **но конечна** и стационарна.



## 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)

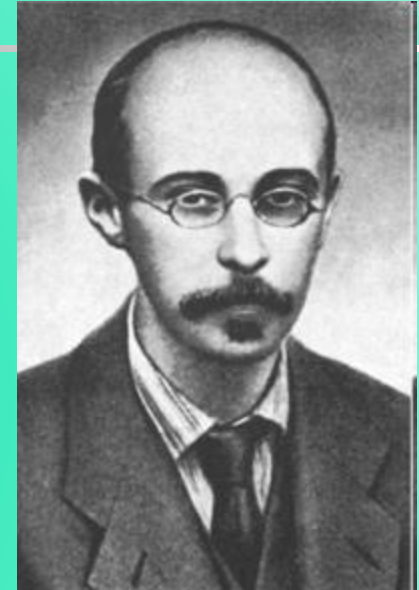
#### Постулаты:

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**.

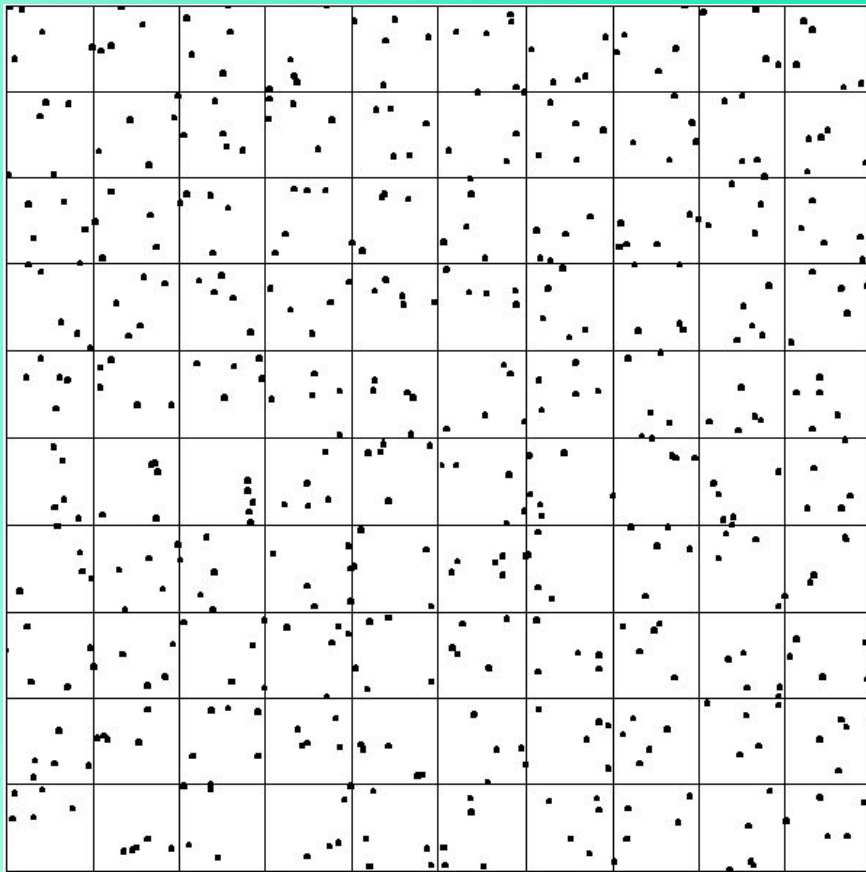


- ❖ Вселенная как целое **не должна вращаться** (ось вращения была бы выделенным направлением).
- ❖ У нее не должно быть **центра** и пространственной границы (нарушалось бы условие однородности).

## 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  $\rho_{\text{крит}}$

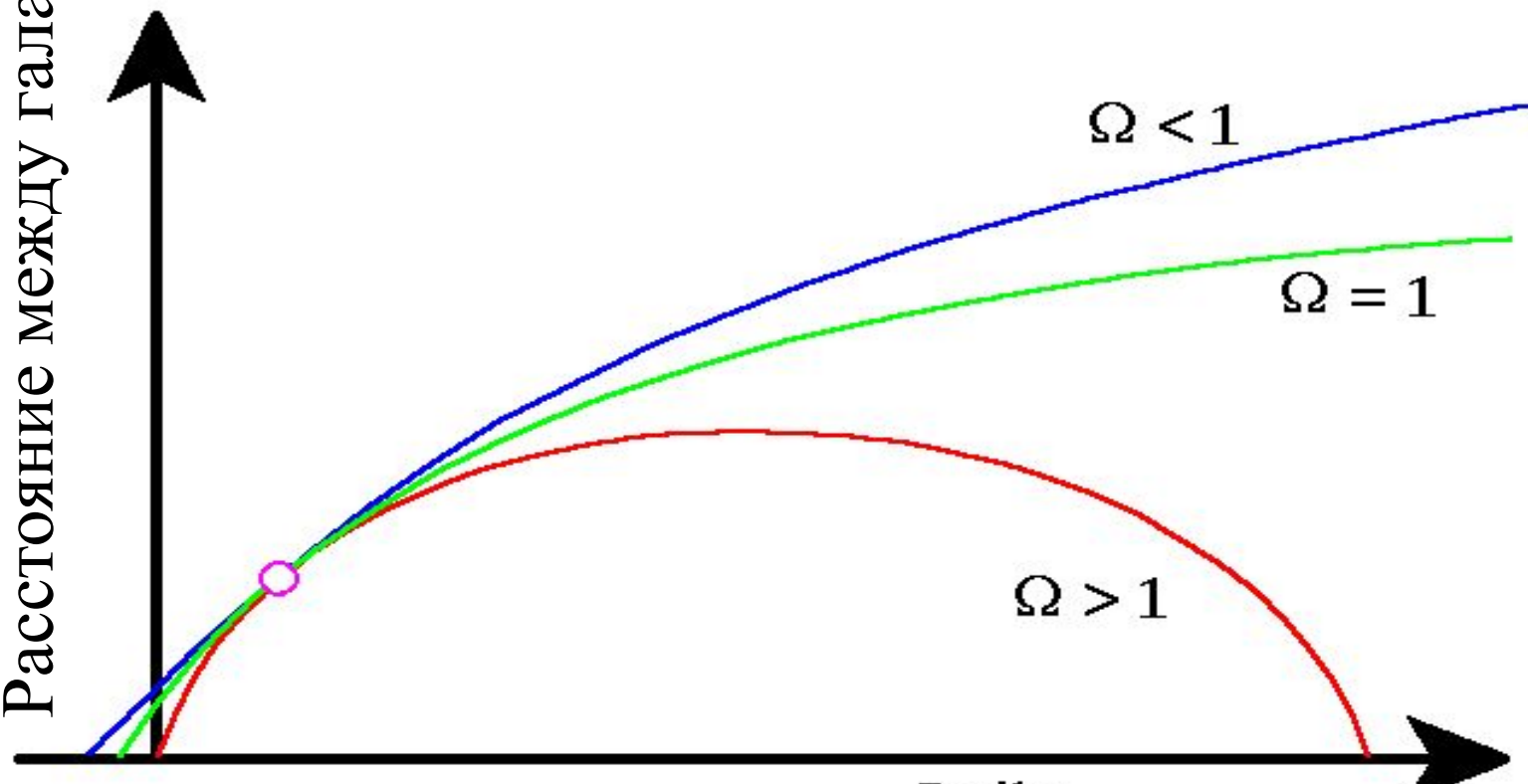
$$\rho_{\text{крит}} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3 \approx 5 \text{ атомов водорода на м}^3$$

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

## 6. Космологические модели Вселенной

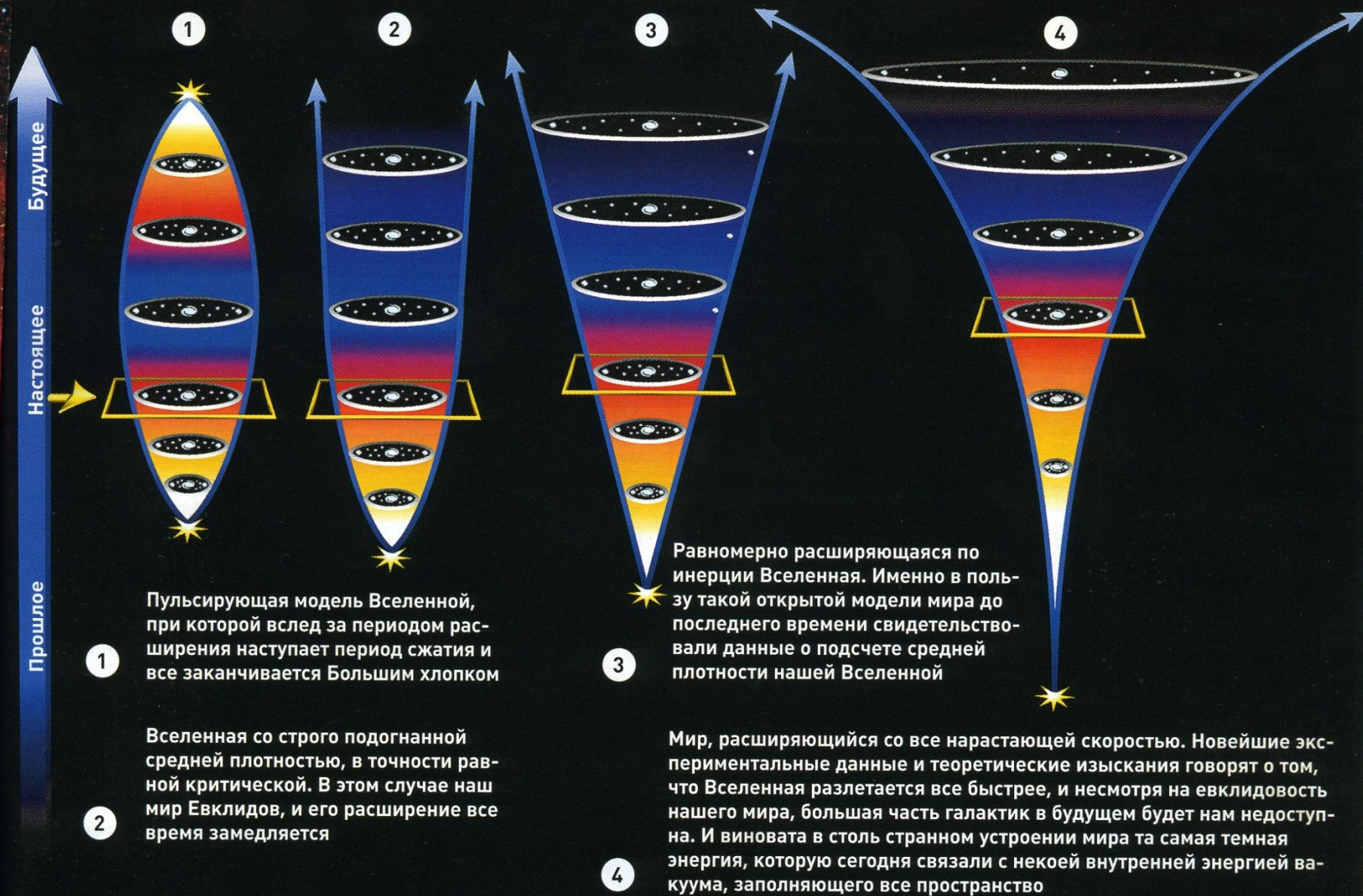
### Космологическая модель Фридмана (1922)

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

