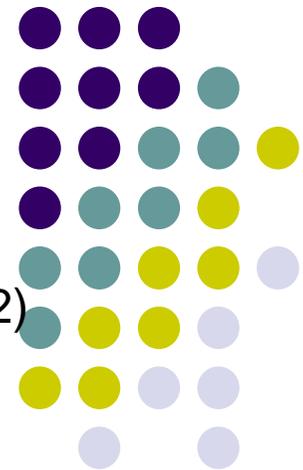


*ОБЩАЯ ФИЗИКА*  
*ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОЛОГИИ*  
*ЛЕКЦИЯ №27*

---

(Для студентов элитного технического отделения ЭТО-2)



# Содержание лекции



- 1. Понятие о космологии. Общие сведения о Вселенной**
- 2. Исторический очерк**
- 3. Космологический принцип**
- 4. Статическая модель Эйнштейна**
- 5. Нестационарность Вселенной. Модель Вселенной А. Фридмана**
- 6. Закон Э. Хаббла**
- 7. Раздувание (инфляция) Вселенной. Синтез фридмановской и инфляционной моделей**
- 8. Большой Взрыв**
- 9. Элементы теории «горячей Вселенной». Процессы рождения и гибели частиц. Основные достижения теории горячей Вселенной**

# Содержание лекции (продолжение)



10. Квантовая эпоха. О единой теории поля
  11. Эпоха адронов (адронная эра)
  12. Эпоха лептонов (лептонная эра)
  13. Эпоха излучения (радиационная эра)
  14. Эпоха галактик
  15. Достижения и проблемы теории Большого Взрыва
  16. Темная материя
  17. Темная энергия
  18. Бозон Хиггса
  19. Стандартная модель (СМ) физики элементарных частиц.
- Заключение

# Параметры Вселенной



Вселенная содержит порядка  $10^{11}$  галактик

Число звезд в каждой галактике  $10^9 - 10^{11}$  звезд

Радиус Вселенной  $\sim 10^{26}$  м

Возраст Вселенной  $\sim 13,7$  млрд. лет

# Системы мира

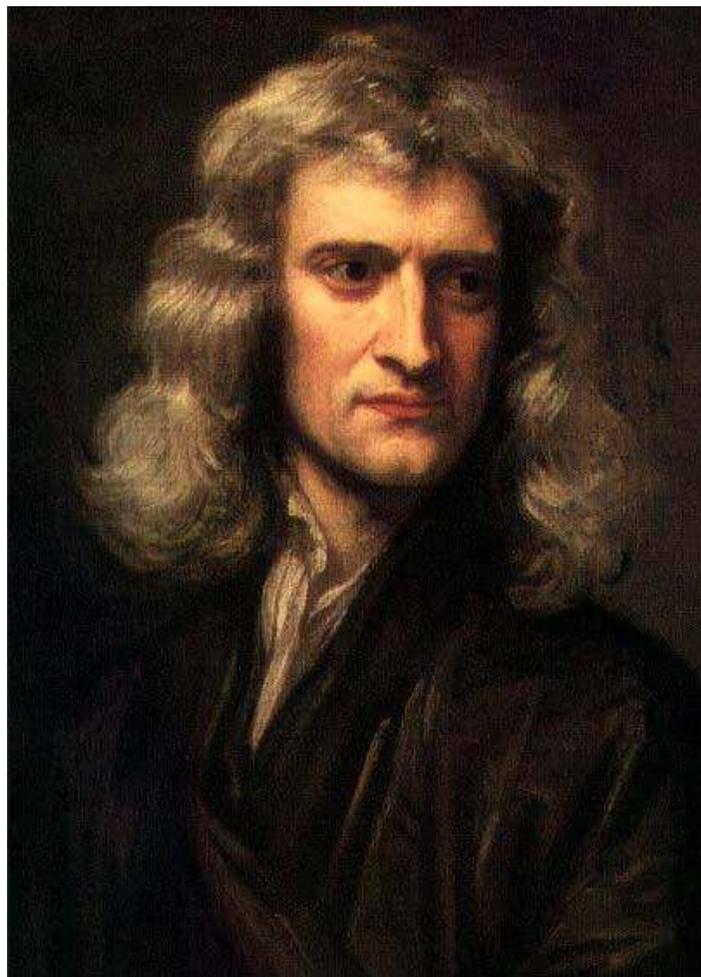


1. Геоцентрическая система Птолемея
2. Гелиоцентрическая система Коперника
3. Статическая модель Вселенной  
Эйнштейна

**«Самая грубая ошибка Эйнштейна, по его признанию.**

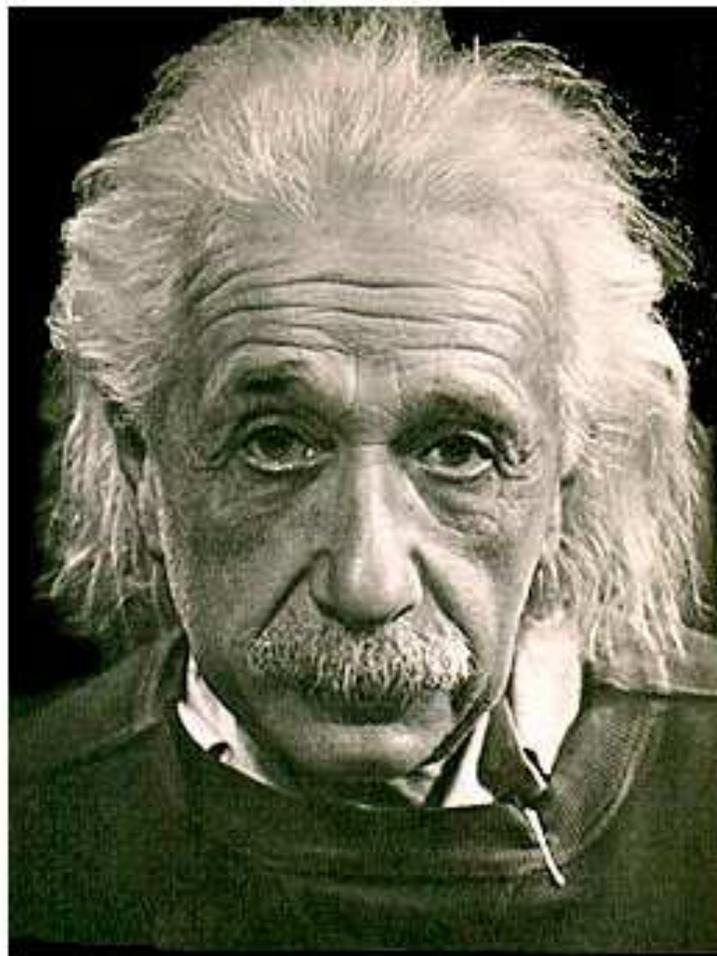
**Вакуум—наинизшее энергетическое состояние частиц и полей в природе, но это состояние не должно быть равным нулю**

# Великий Ньютон



1642–1727

# Создатель ОТО



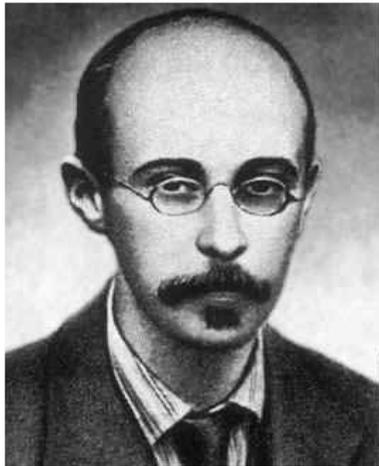
**А. Эйнштейн (1888 - 1955)**

# Джеймс Клерк Максвелл



1831-1887

# Создатели современной КОСМОЛОГИИ



**А.А. Фридман (1888 - 1925)**  
Создатель теории нестационарной Вселенной

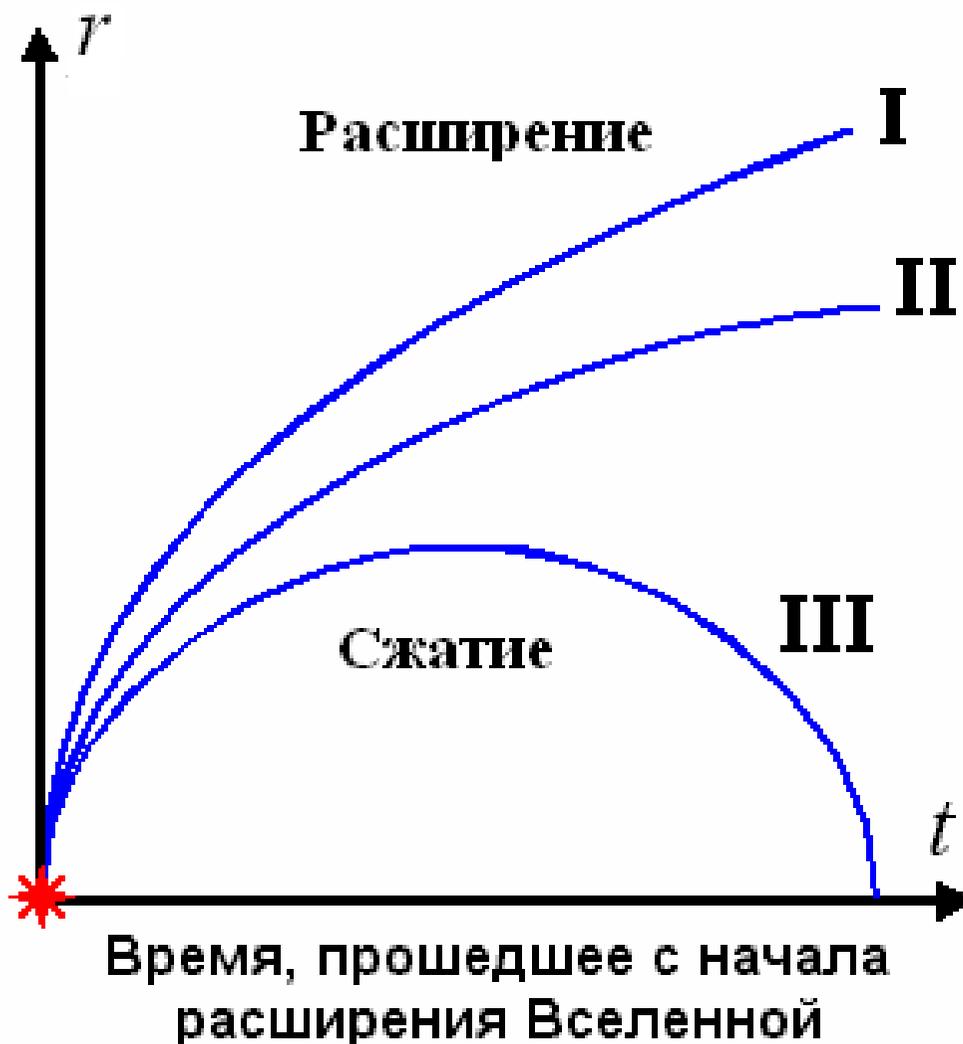


**Э. Хаббл (1889 - 1953)**  
Величайший астроном



**Ч. Леметр (1894 - 1966)**  
"Отец Большого Взрыва"

# Модель Вселенной А. Фридмана



# Модель Вселенной А. Фридмана

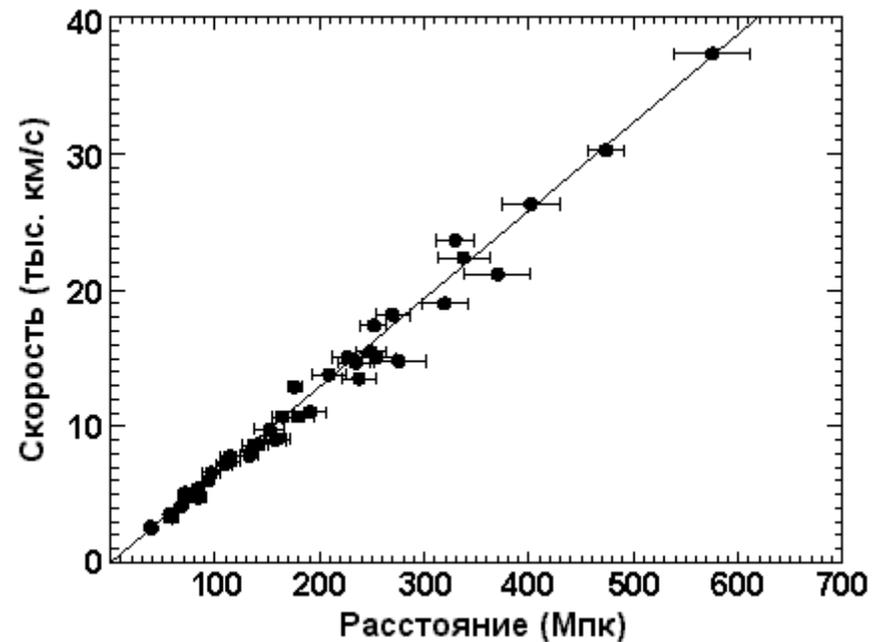
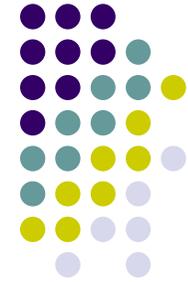


1. Вселенная расширяется и будет расширяться неограниченно
2. Расширение Вселенной будет постоянно замедляться гравитационными силами, пока она не придет в стационарное состояние
3. Вселенная пока расширяется, но спустя относительно большой срок расширение под действием гравитационных сил прекратится и сменится сжатием

**Судьба Вселенной зависит от ее средней плотности.**

**К выводам Фридмана независимо позднее пришел аббат Жорж Леметр, которого называют отцом «Большого Взрыва»**

# Зависимость скорости разбегания галактик от расстояния между ними



$$H = \frac{1}{4 \cdot 10^{17}} \cdot \frac{1}{c}$$

Закон Хаббла  $v = Hr$

$$t = \frac{1}{H} \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с} \approx 1,3 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$



# Инфляционная модель

По Фридману

$$r \sim t^b; \quad b = 1/2$$

По теории раздувания

$$r \sim e^{Ht}$$

Инфляционная модель необходима, чтобы обосновать однородность, изотропность Вселенной и ее плоскую геометрию ( $r \rightarrow \infty$ )



**Г.А. Гамов (1904 - 1968)**

**Создатель теории "Горячей Вселенной"**

# Элементы теории «горячей Вселенной»



$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

частица + античастица  $\rightarrow \gamma + \gamma$

$$T = \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}$$

Устойчивость системы зависит от соотношения  $E_{\text{св}}$  и  $kT$ .

1. Вещество, из которого сформировались звезды и галактики, на  $\sim 75$  % состояло из водорода и на  $\sim 25$  % из гелия
2. Существование реликтового (остывшего) излучения ( $T \sim 3 \text{ K}$ )

# Этапы эволюции Вселенной



1. Ранняя Вселенная – до  $10^{-43}$  с
2. Квантовая эпоха ( $10^{-43}$  с... $10^{-6}$ с;  $10^{32}$ — $10^{13}$  К)
3. Эпоха адронов ( $10^{-6}$  с... $10^{-4}$ с;  $10^{13}$ — $10^{12}$  К)
4. Эпоха лептонов ( $10^{-4}$  с – 1 с;  $10^{12}$  ... $10^{10}$  К)
5. Эпоха излучения (радиационная эра) – (1 с... $10^6$  лет;  $10^{10}$  ... $5 \cdot 10^3$  К)
6. Эпоха галактик ( $10^6$  лет– наст. время)

# Квантовая эпоха ( $10^{-43}$ с... $10^{-6}$ с; $10^{32}$ — $10^{13}$ К)



Расширение из сингулярности

$$d = 10^{-35} \text{ м} \quad T = 10^{32} \text{ К} \quad \rho = 10^{30} \text{ кг/м}^3$$

**Бозоны Хиггса, «Кварковый суп»-содержание эпохи**

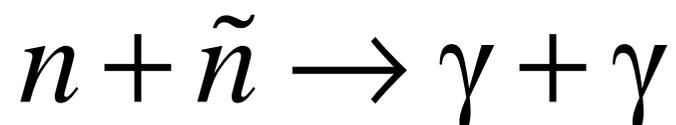
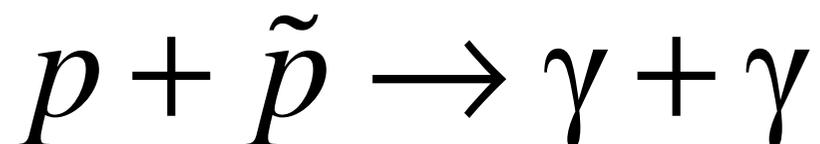
**К вопросу о единой теории поля**

К концу эпохи все фундаментальные взаимодействия  
разделились. Кварки попали в «адронный» мешок.

# Эпоха адронов ( $10^{-6}$ с... $10^{-4}$ с; $10^{13}$ — $10^{12}$ К)



Система в термодинамическом равновесии



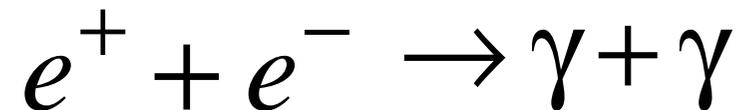
По мере расширения температура падала и рождалось все меньше и меньше тяжелых частиц. К моменту  $t = 10^{-4}$  с нуклон-антинуклонные пары проаннигилировали, образовав фотоны.

Остался небольшой избыток частиц : 1 частица на  $10^9$  пар частиц-античастиц. Зарядово-несимметричная модель Вселенной.

**В конце эры: адроны «вымерли» но часть частиц осталась**

# Эпоха лептонов ( $10^{12} \dots 10^{10}$ )

К;  $10^{-4}$  с – 1 с)



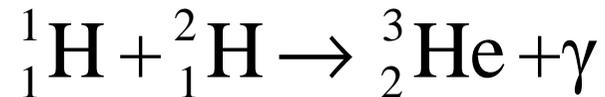
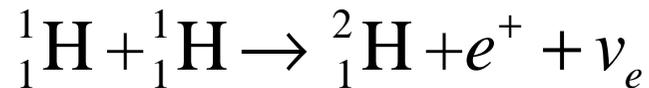
*К концу эпохи все электрон-позитронные пары проаннигилировали. Остаток, по закону сохранения заряда был, так как заряд оставшихся протонов должен был быть скомпенсирован.*

**Благодаря несовпадению числа частиц и античастиц кроме фотонов и нейтрино существует вещество, из которого построены галактики и планеты**

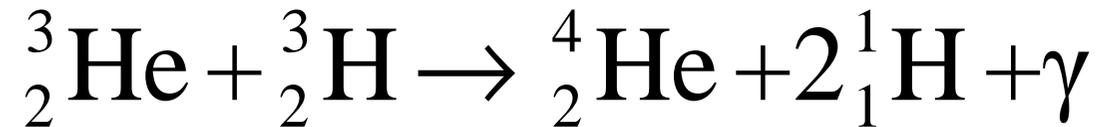
# Эпоха излучения (1 с...10<sup>6</sup> лет; 10<sup>10</sup>...5·10<sup>3</sup> К)



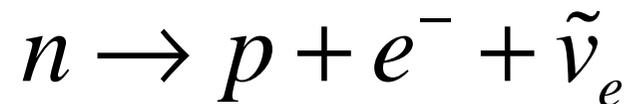
Вселенная достаточно остыла, чтобы протон и нейтрон соединились, образовав ядро дейтерия. Энергия равновесных фотонов составляла 1 МэВ . Удельная энергия связи ядер дейтерия~ 2 МэВ, у гелия ~ 7,1 МэВ . Энергия равновесных фотонов меньше удельной энергии связи нуклонов в ядре.



# Эпоха излучения (продолжение)

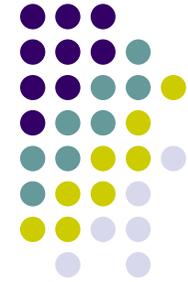


На этом ядерные реакции в ранней Вселенной прекратились.



*Возник избыток протонов по отношению к нейтронам; протонам не хватало нейтронов для образования ядер гелия. Излишек протонов остался в виде ядер водорода: отсюда соотношение по массе между водородом (25 %) и гелием (75 %)*

# Эпоха галактик



В конце предыдущей и начале эпохи галактик при температурах 3500...4000 К начинается процесс образования и протонов, дейтронов и ядер гелия при соединении с свободными электронами нейтральных атомов водорода, дейтерия и гелия.

В начальный этап этого периода вещество отделилось от излучения. Фотонный газ отделился от вещества . Затем сжатие под действием гравитационных сил с повышением температуры до  $10^7$  К с образованием звезд, галактик.

*Судьба звезды зависит от ее массы : белый карлик – 0,2 до 1,2  $m_{\odot}$  ,  
нейтронная звезда – 1,2 до 3,2  $m_{\odot}$  , черные дыры – больше 3,2  $m_{\odot}$*

# Достижения и проблемы теории Большого Взрыва



## *Доказанные реликты:*

1. Однородность и изотропность распределения материи в больших масштабах
2. Фоновое (реликтовое) электромагнитное излучение
3. Соотношение между водородом и гелием



# Проблемы

1. Самые первые мгновения Вселенной не вписываются в фридмановскую модель. Требуется создание квантовой теории гравитации
2. Не обнаружены первичные кварки в свободном состоянии
3. Не обнаружены магнитные монополи
4. Открыта Вселенная или замкнута?

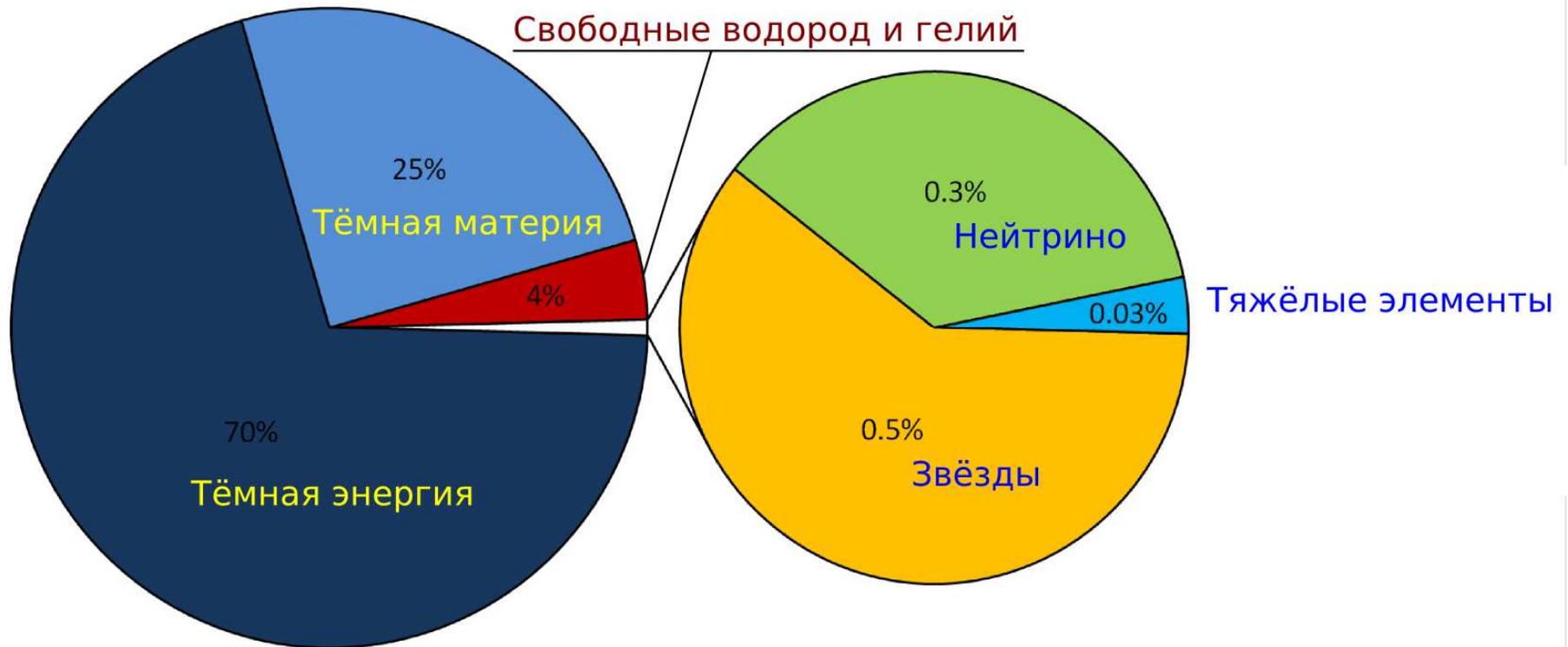
Критическая плотность  $\rho_{кр}$  равна  $9,31 \times 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup> (или  $9,31 \times 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>).

**Расчетный результат**

$$10^{-31} \text{ кг/м}^3 < \rho < 10^{-28} \text{ кг/м}^3$$

5. Что было до Большого Взрыва?
6. Как появилась Вселенная?

# Баланс энергий в современной Вселенной



# Темная материя



Темная материя – несветящаяся материя

Фриц Швике (1937 г.) определял скорость вращения отдельных звезд в спиральных галактиках

$$G \frac{mM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$
$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \sim \frac{1}{\sqrt{r}},$$

Но скорость постоянна и не зависит от радиуса  $r$ . Значит масса  $M$  должна быть больше.

Теория суперсимметрии объясняет темную материю неизвестными более тяжелыми суперпартнерами: у каждого фермиона должен быть парный с ним бозон и наоборот.

# Темная энергия

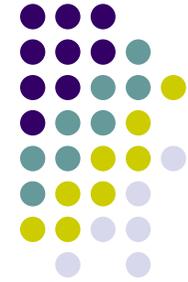


Установлено, что последние 5-6 млрд. лет Вселенная расширяется с ускорением. Звезды более тусклые, чем это следует из закона Хаббла. Объясняется темной энергией, физическая природа которой неизвестна.

Два кандидата:

1. Физический вакуум-космологическая постоянная. Но такой разновидности вакуума должен соответствовать энергетический диапазон на границе между инфракрасным и радиоизлучением, который вдоль и поперек изучен, но ничего аномального не обнаружено. Плотность энергии не изменяется со временем.
2. Сверхслабое скалярное поле, пронизывающее всю Вселенную с более высокой плотностью, чем плотность темной материи..
3. Изменение гравитационных законов на космологических расстояниях и космологических временах

# Бозон Хиггса



Ввел шотландский профессор Питер Хиггс в 1964 г.

Существует скалярное поле Хиггса, благодаря которому частицы материализовались, приобретя массу.

Бозон Хиггса тесно связан с астрономическими «загадками»: темной материей, темной энергией, инфляционной моделью

Но главное: необходимый элемент стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. В основе лагранжиан. Единственная не обнаруженная частица.

Все прогнозы Стандартной модели сбывались с фантастической точностью: открытие  $W^\pm$  (80 ГэВ)-бозонов и  $Z^0$ -бозона (90 ГэВ), открытие последнего предсказанного теорией  $t$ -кварка (170 ГэВ)

# Бозон Хиггса (продолжение)



Поиск с помощью наиболее выгодных в энергетическом отношении коллайдеров:

1. Тэватрон на 980 ГэВ. Стоимость 200 млн. долларорв
2. Большой адронный коллайдер на 7 ТэВ. Стоимость 6 млрд. долларов. Длина тоннеля ~227 км.

На теоретическом существовании бозона Хиггса строятся все современные теории Большого Взрыва : имеются в виду , в первую очередь, физические процессы

Чем закончится «охота» сказать трудно. Диапазон энергий 136 – 185 ГэВ установлен. Существуют сомнения в поимке бозона. Тогда в дело вступят новые уже готовые заменить Стандартную модель альтернативные теории.

# ЦЕРН С ВЫСОТЫ ПТИЧЬЕГО ПОЛЕТА. На переднем плане штаб-квартира БАК

