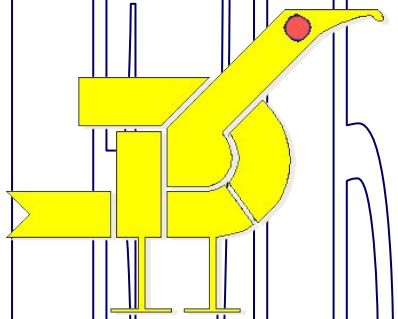
ИЗДАТЕЛЬСТВО



ДРОФА

2007

ПРЕДСТАВЛЯЕТ

900igr.net

В. А. Касьянов

ФИЗИКА
ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

11 класс

Дополнительные главы
к учебнику В. А. Касьянова
«Физика. 11 класс»

ДРОФА
Москва • 2006

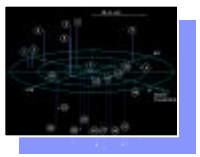
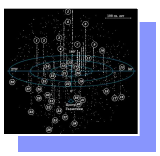
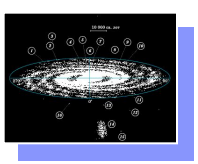
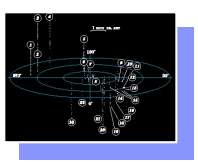
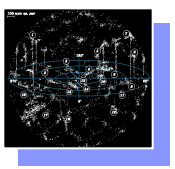
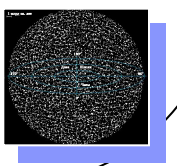
Особенности эволюции объектов во Вселенной являются предметом изучения космологии (от греческого κοσμολογια — изучение мира).

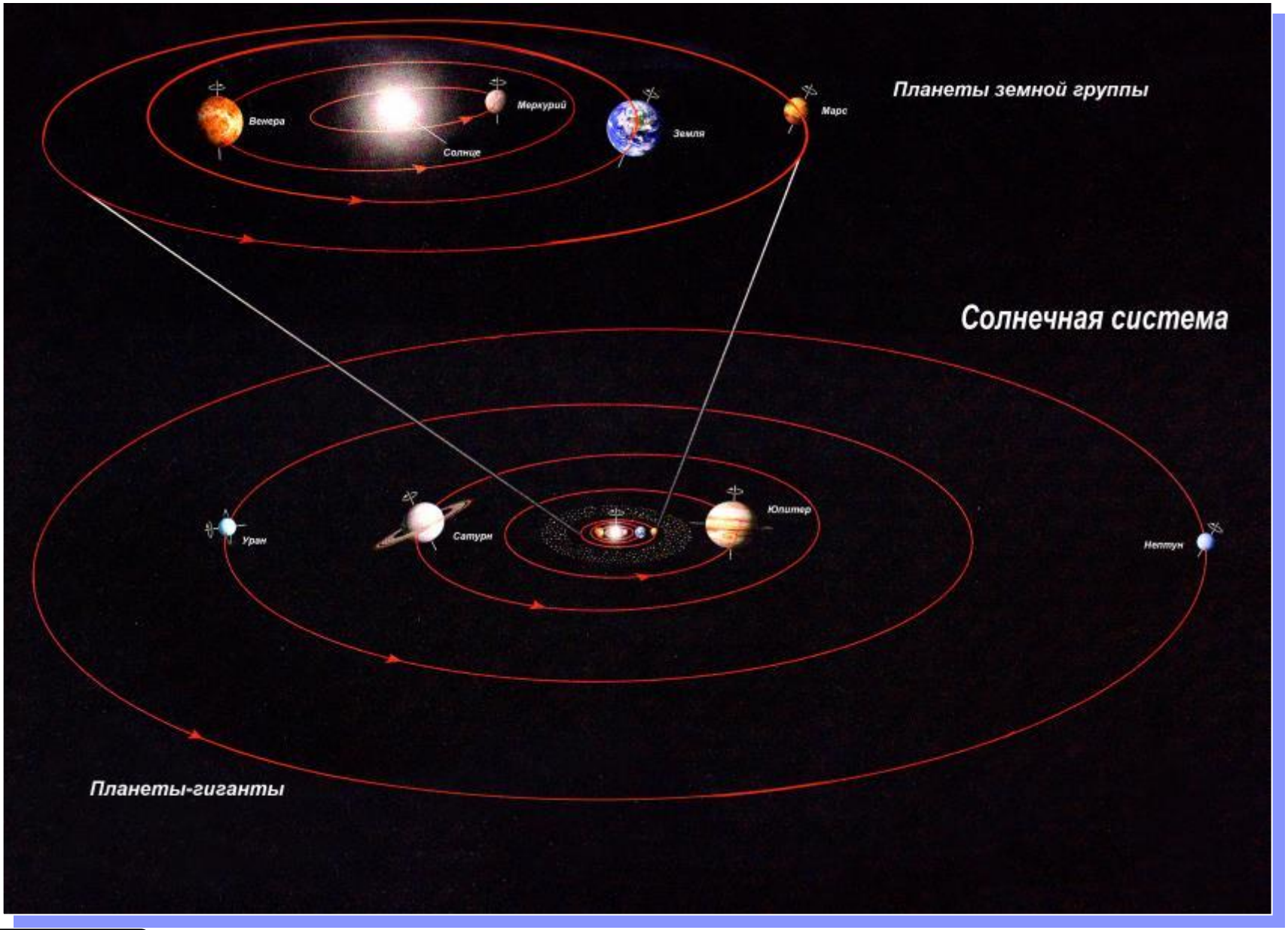
Космология – теоретическая астрофизика мегамасштабов, изучающая строение и эволюцию Вселенной как целого.

Охарактеризуем сначала особенности распределения в пространстве астрономических объектов.

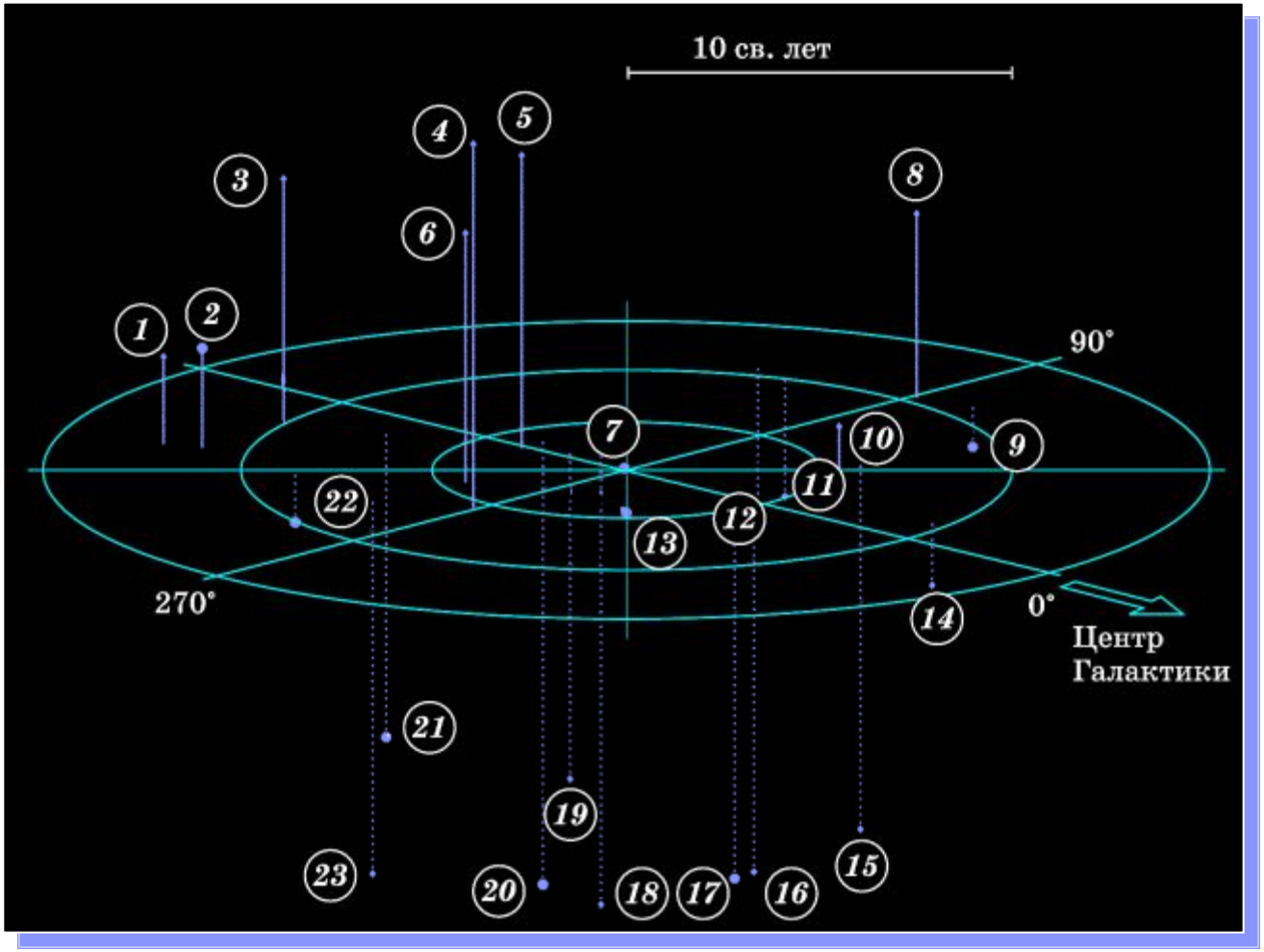
В таблице 1 приведены средние размеры неоднородностей пространственного распределения объектов - основных астрономических структур – в порядке возрастания их размера.

Астрономическая структура	**Планетная система**	**Ближайшие звезды**	**Звездное скопление**	**Галактика**	**Скопление галактик**	**Сверхскопления галактик**	**Наблюдаемая Вселенная**
Средний размер (св. лет)	**1**	**10**	**100**	**100 000**	**1 млн**	**100 млн**	**15 млрд**

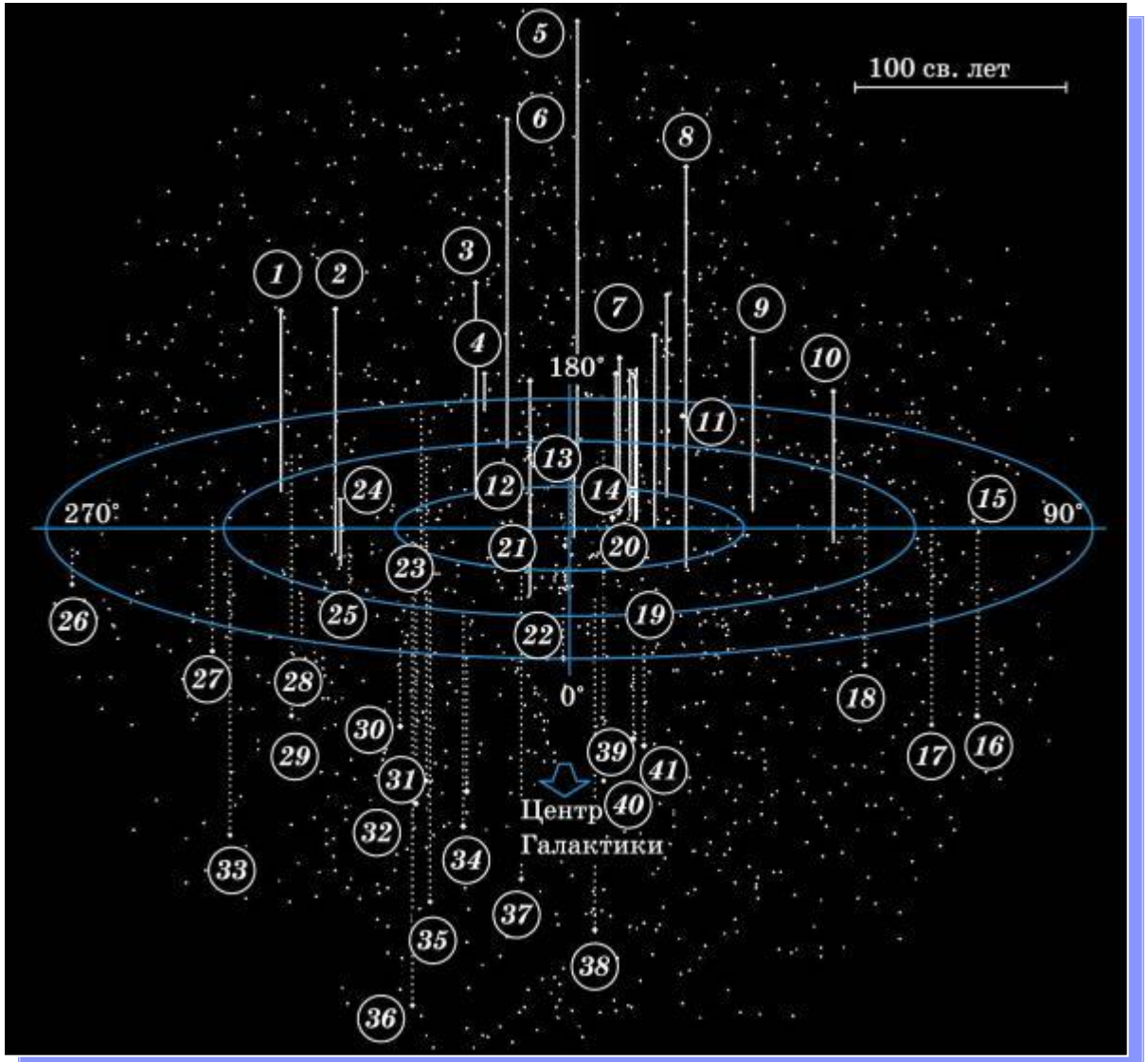


ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД



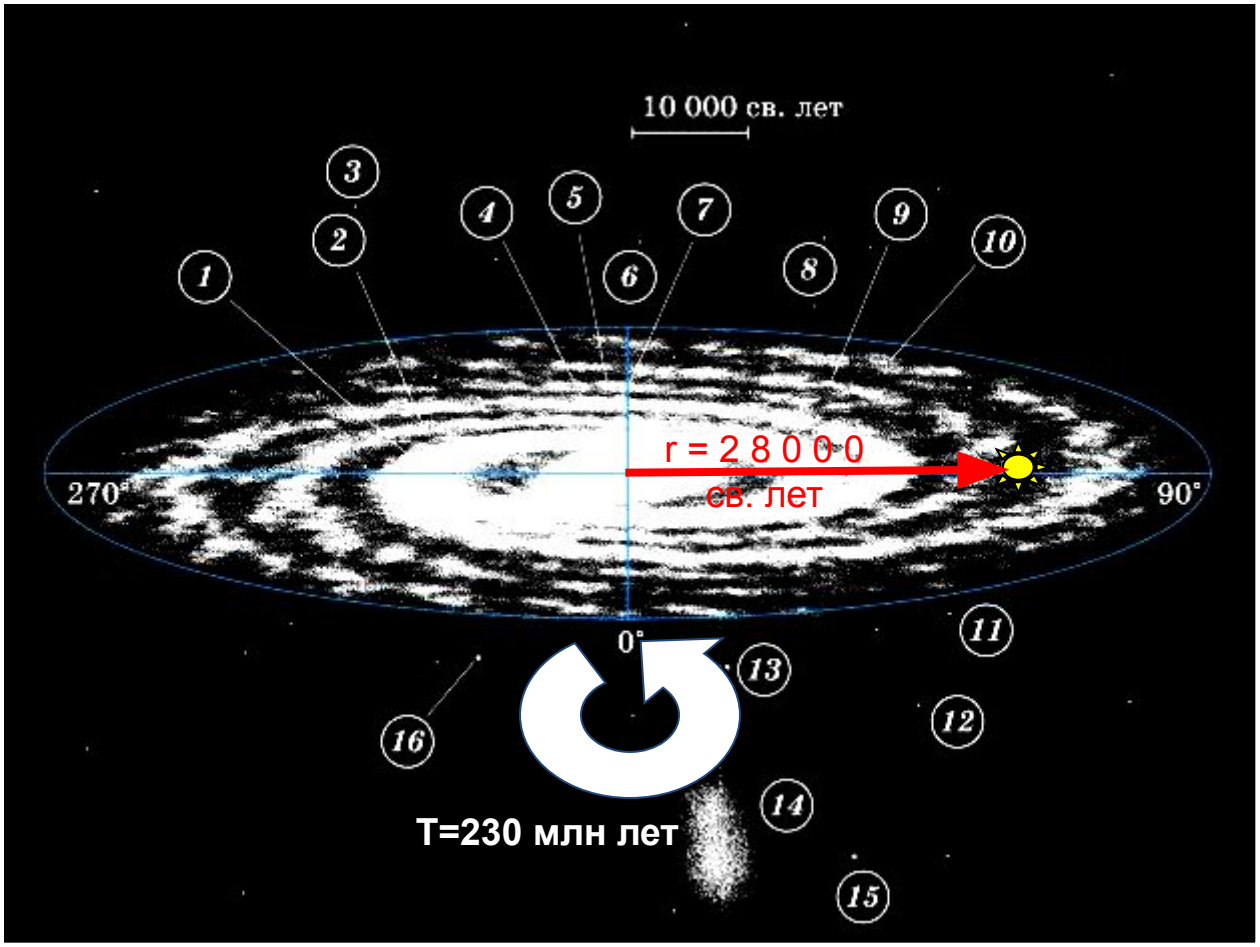
1. Звезда Лейтена;
2. Процион;
3. G51—15;
4. Росса 128;
5. Лаланд 21185;
6. Вольф 359;
7. Солнце;
8. Струве 2398;
9. Лебедя 61;
10. Звезда Барнарда;
11. Росса 248;
12. Грумбридж 34;
13. Проксима (α Центавра)
14. Росса 154;
15. L789-6;
16. Лакайль 9352;
17. ε Индейца ;
18. L725-32;
19. L726-8;
20. τ Кита ;
21. ε Эридан;
22. Сириус;
23. L372-58

ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД

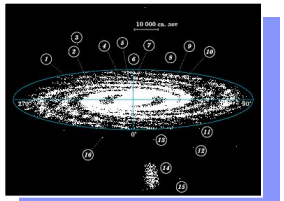


1. α Гидры; 2. γ Ворона; 3. γ Льва; 4. μ Близнецов; 5. μ Большой Медведицы;
6. α Рыси; 7. β,γ,δ,ε,ζ,η,α Большой Медведицы; 8. ε Волопаса; 9. ε Малой Медведицы;
10. γ Дракона; 11. η Возничего; 12. Солнце; 13 Акртур; 14. Капелла; 15. α Кассиопеи; 16. η Пегаса;
17. β Пегаса; 18. β Андромеды; 19. Скопление Гиады; 20 Вега; 21 Альдебаран; 22. ε Стрельца;
23. γ Ориона: 24. γ Центавра; 25. β Киля; 26. N Паруса; 27. τ Кормы; 28. γ Треугольника;
29. ε Зайца;
30. α Жертвенника; 31. γ Эридана; 32. Ахернар; 33. γ Южной Гидры; 34. α Павлина;
35. α Тукана; 36. γ Феникса;
37. β Журавля; 38. γ Журавля; 39. φ Стрельца;
40. σ Стрельца; 41. α Кита

ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД



1. Ветвь Наугольника;
2. Щит — Южный Крест;
3. М68;
4. Рукав Стрельца;
5. Рукав Ориона;
6. М5;
7. Солнце;
8. М13;
9. Рукав Персея;
10. Рукав Лебедя;
11. М15;
12. М2;
13. М30;
14. Карликовая галактика Стрельца;
15. М75; *16. Шаровое скопление*



Солнечная система, находясь в рукаве Ориона на расстоянии *r* = 28 000 св. лет от центра нашей Галактики — Млечный путь, совершает один оборот вокруг него за период *T* = 230 млн лет. По этим данным можно оценить массу Галактики Второй закон Ньютона для Солнца массой $M_O = 2 \cdot 10^{30}$ кг имеет вид:

$$M_O \frac{4\pi^2}{T^2} r = G \frac{M_O M_G}{r^2}$$

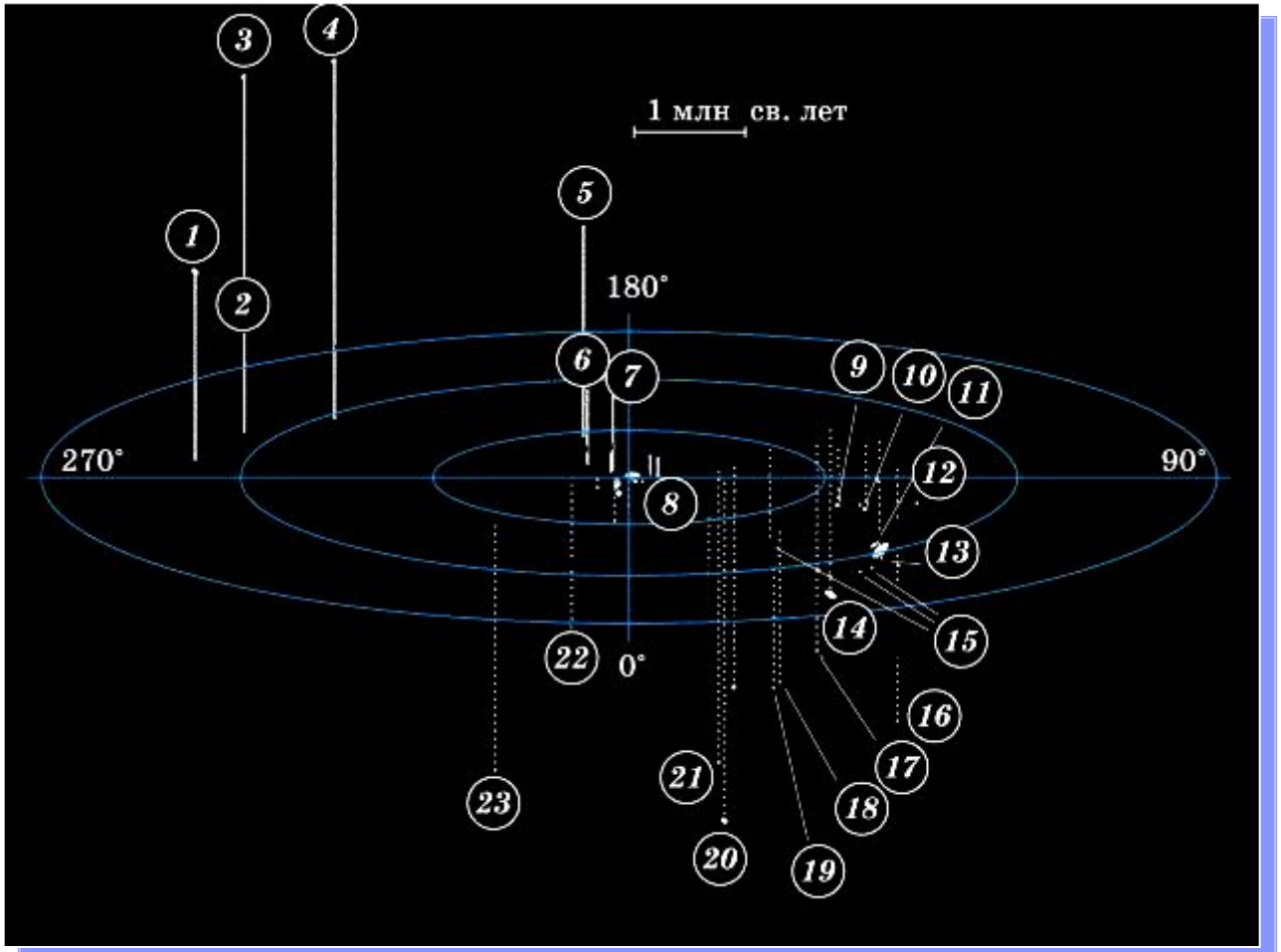
Следовательно,

$$M_G = 4\pi^2 \frac{r^3}{GT^2} = 2 \cdot 10^{41} \text{ кг}$$

Тогда примерное число *N* звезд в Галактике оказывается порядка

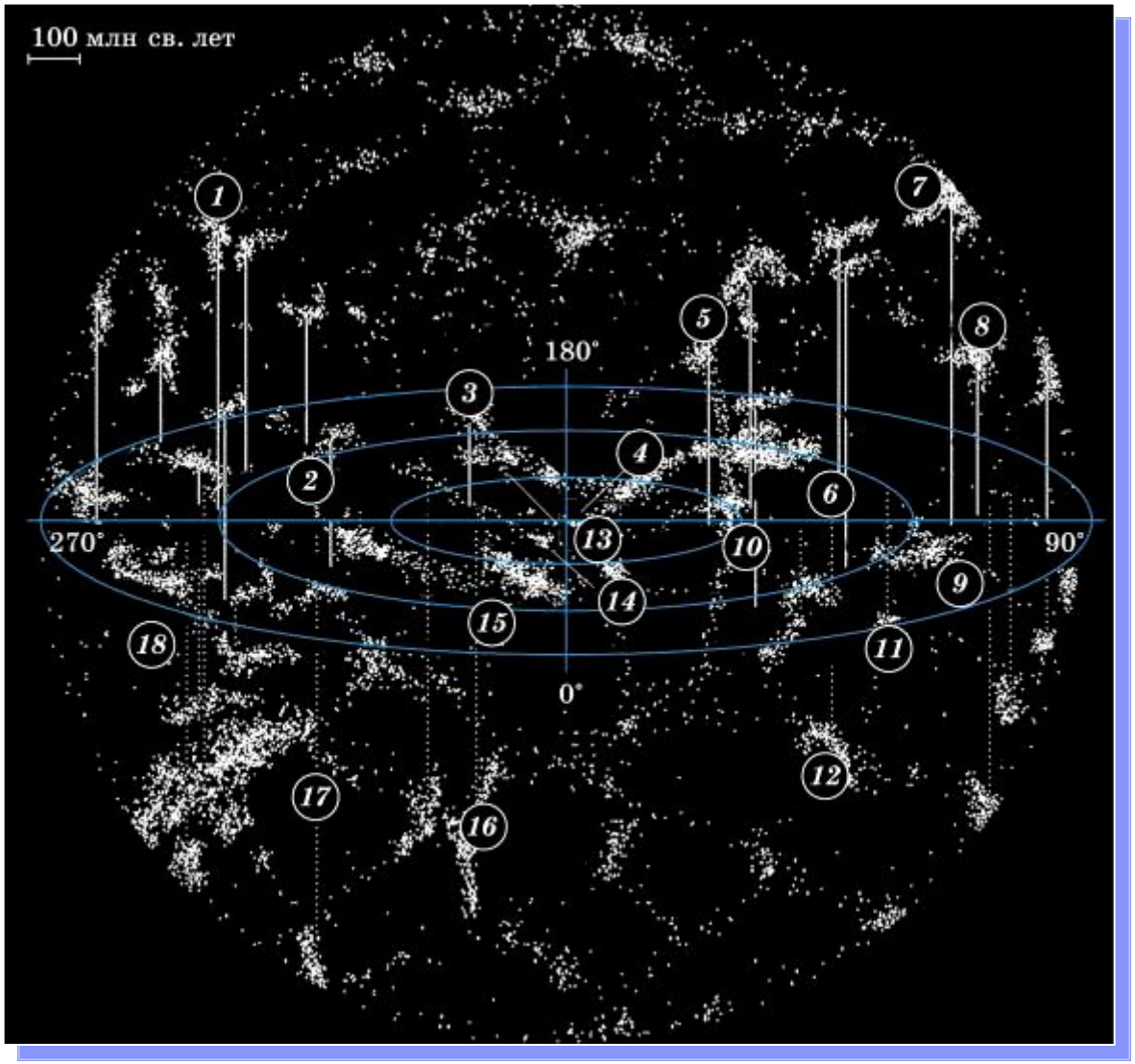
$$N = \frac{M_G}{M_O} = 10^{11}$$

ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД



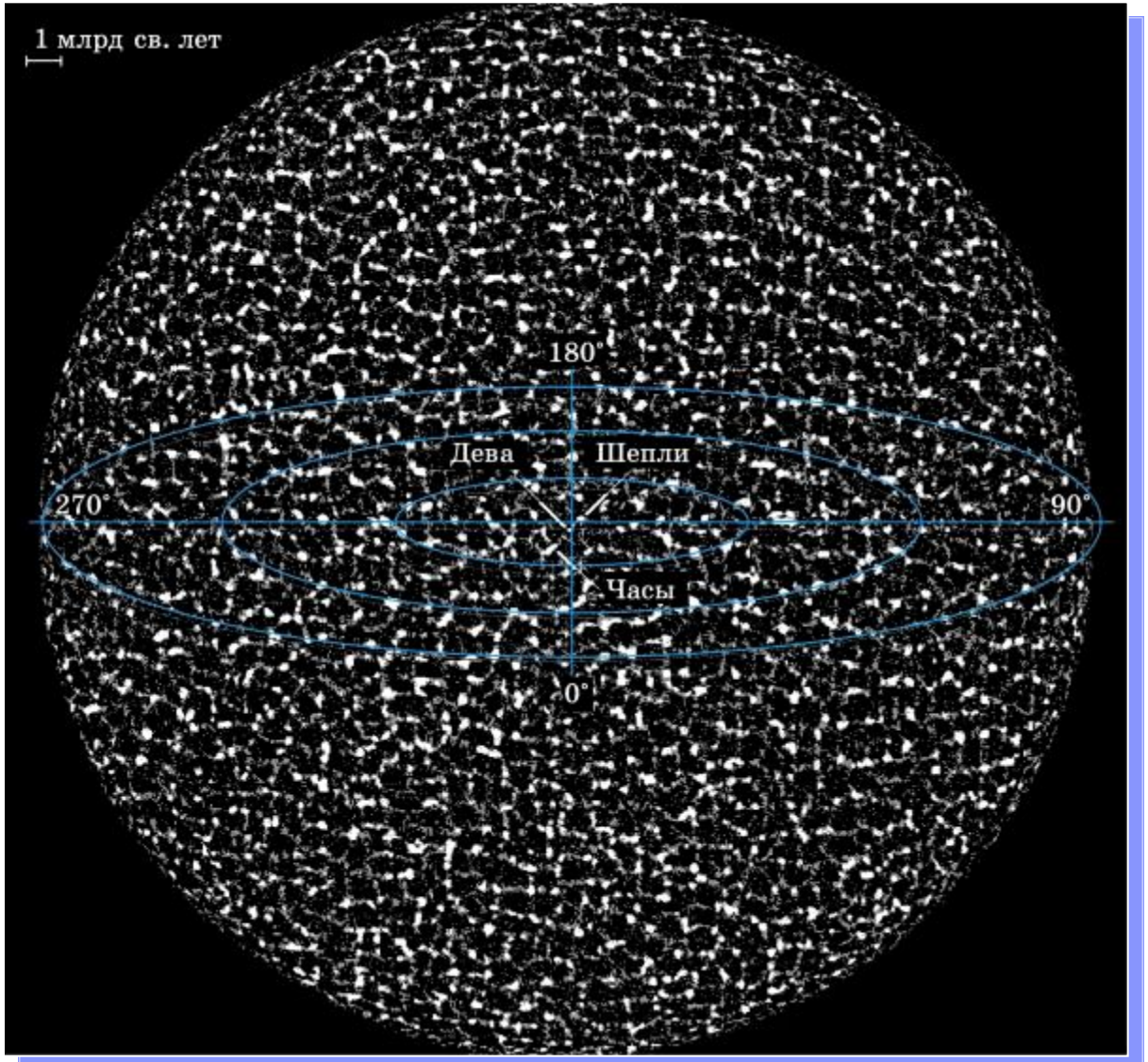
1. NGC 3109;
2. Насос (карликовая);
3. Секстант A;
4. Секстант B;
5. A Льва;
6. I Льва;
7. II Льва;
8. Млечный Путь;
9. NGC 185;
10. NGC 147;
11. NGC 205;
12. IC 10;
13. Галактика Андромеды;
14. Галактика Треугольника;
15. I, II и III Андромеды;
16. Пегас (карликовая);
17. LGS 3;
18. Водолей (карликовая);
19. Стрелец (карликовая неправильная);
20. WLM;
21. Кит (карликовая);
22. Феникс (карликовая);
23. Тукан (карликовая)

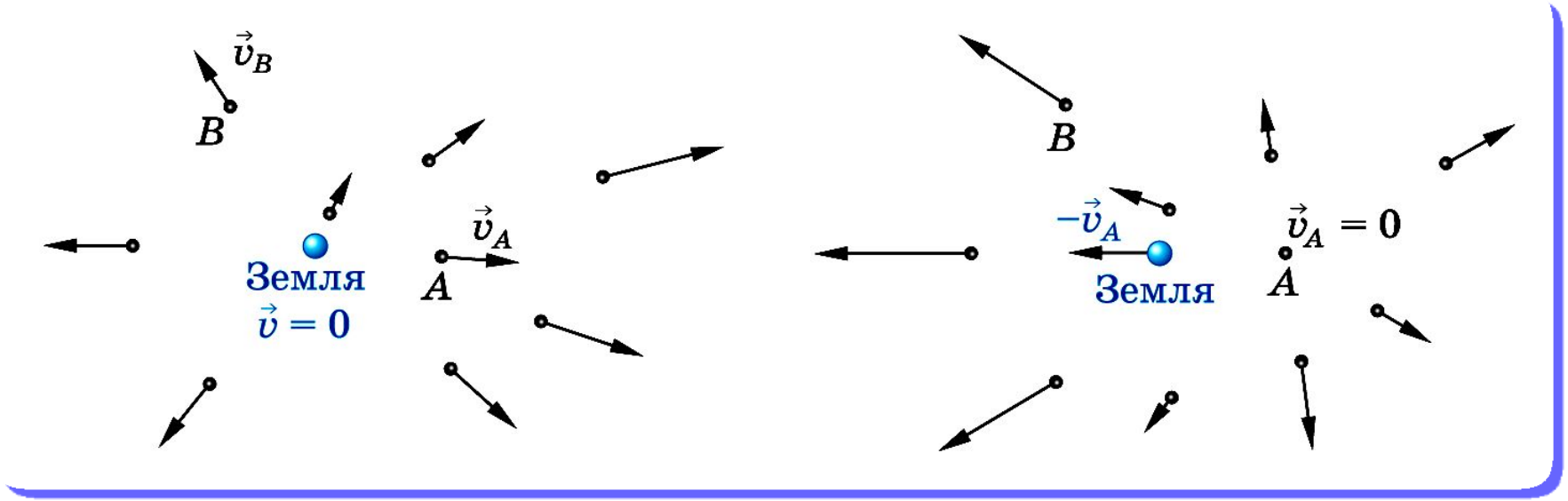
ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД



1. Козерога;
2. Скульптора;
3. Павлина—Индуса;
4. Центавра;
5. Геркулеса;
6. Шепли;
7. Северной Короны;
8. Волопаса;
9. Большой Медведицы;
10. Волосы;
11. Льва;
12. Секстанта;
13. Девы;
14. Гидры;
15. Персея—Рыб;
16. Голубя;
17. Часов;
18. Рыб—Кита

ВЕРНУТЬСЯ НАЗАД


1 млрд св. лет
180°
Дева
Шепли
270°
90°
Часы
0°



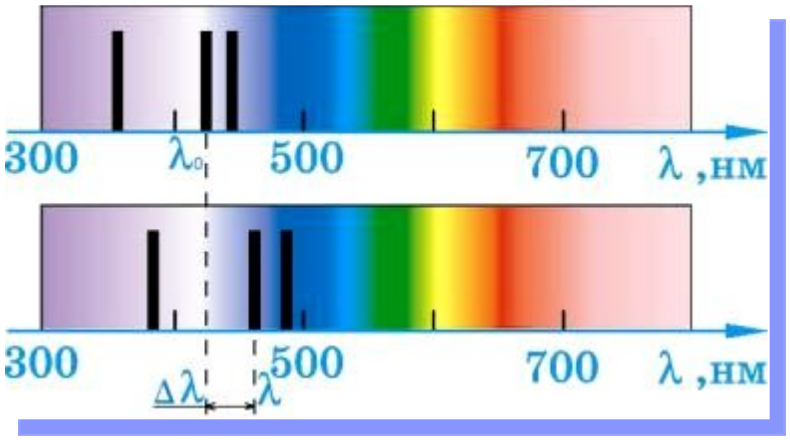
а) относительно Земли

б) относительно соседней галактики A

Разбегание галактик, или расширение Вселенной, наблюдается не только с Земли, но и из любой другой точки Вселенной.

$$v = H_0 \bullet r$$

где *Но* = 70 км/с/Мпк — постоянная Хаббла.
(В астрономии расстояние часто измеряют в *парсеках* (пк),
1 пк = 3,26 св. г. = 3,09•10 м)
Постоянная Хаббла показывает, что галактика, находящаяся от Земли на расстоянии 1 Мпк, удаляется от Земли со скоростью 70 км/с.



Скорость галактик может быть измерена по эффекту Доплера. Известная спектральная линия излучения неподвижного атома длиной волны сравнивается с длиной волны , принимаемой приемником от удаляющегося со скоростью v источника. Если скорость удаления источника от приемника много меньше скорости света, то

$$\lambda = \lambda_0 (1 + v/c)$$

Таким образом длина волны , воспринимаемая наблюдателем оказывается больше длины волны , излучаемой источником, на величину

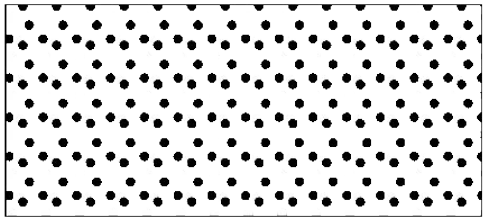
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 v/c$$

***«Красное смещение»* спектральных линий возрастает при увеличении скорости движения источника излучения.**
Таким образом скорость галактики находится из формулы:

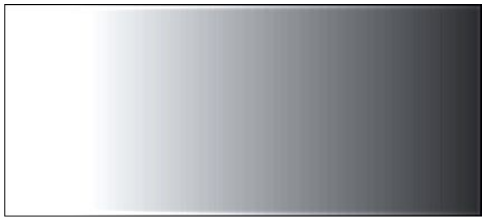
$$v = c \bullet \Delta\lambda / \lambda$$

Двумерное пространство

а) однородное, изотропное

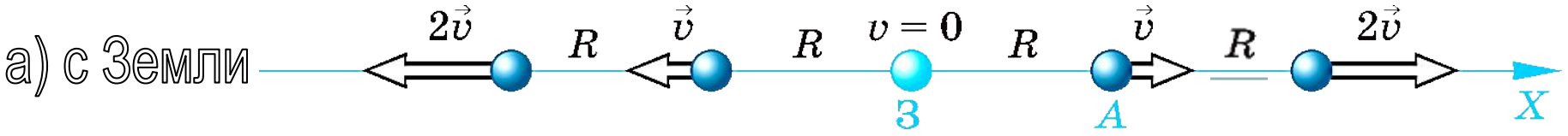


б) однородное, анизотропное



в) неоднородное, анизотропное

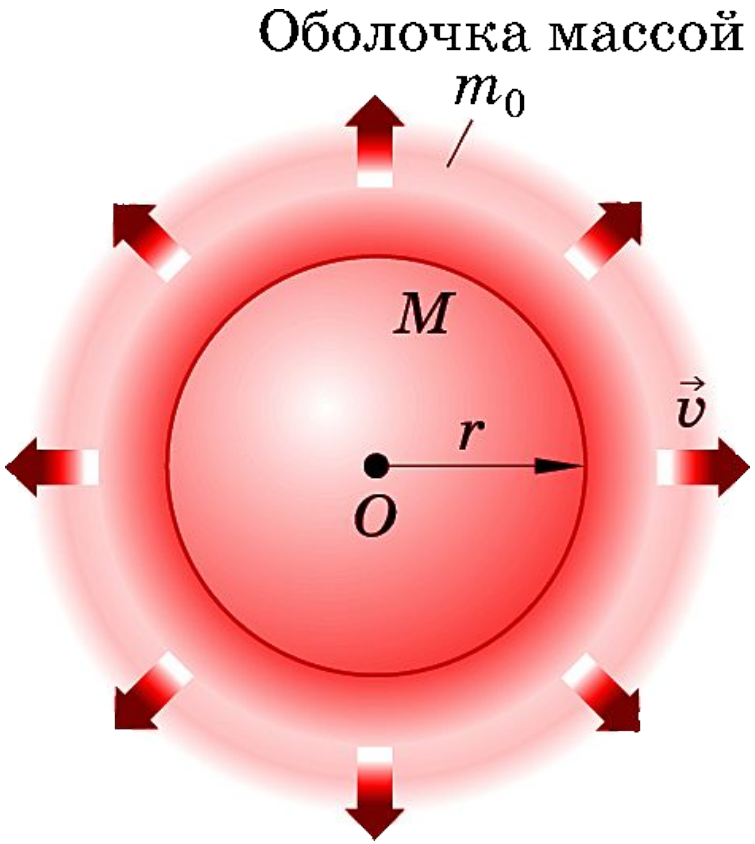
Наблюдение расширения Вселенной



Закон Хаббла позволяет оценить время разлета самых отдаленных Галактик, или время расширения Вселенной:

$$t = r/\mathrm{v} = 1/\mathrm{H_o} = \frac{1}{70\dfrac{10^3}{10^6 \cdot 3,26 \cdot 3 \cdot 10^8}} = 14 \text{ млрд лет}$$

Это время примерно характеризует возраст Вселенной.



Вселенная как совокупность расширяющихся сферических оболочек.

Энергия внешней оболочки массой *m*o, расширяющейся с начальной скоростью *v* в поле внутреннего шара массой M и радиусом *r,* может быть представлена в виде $E_k + E_p = E$:

$$\frac{m_0 v^2}{2} - G\frac{m_0 M}{r} = E\,,$$

где *E* — полная механическая энергия оболочки (нуль отсчета потенциальной энергии принят на бесконечности). Характер ее расширения зависит от величины и знака *E*. .

При E = 0 , $v^2 = 2GM/r$

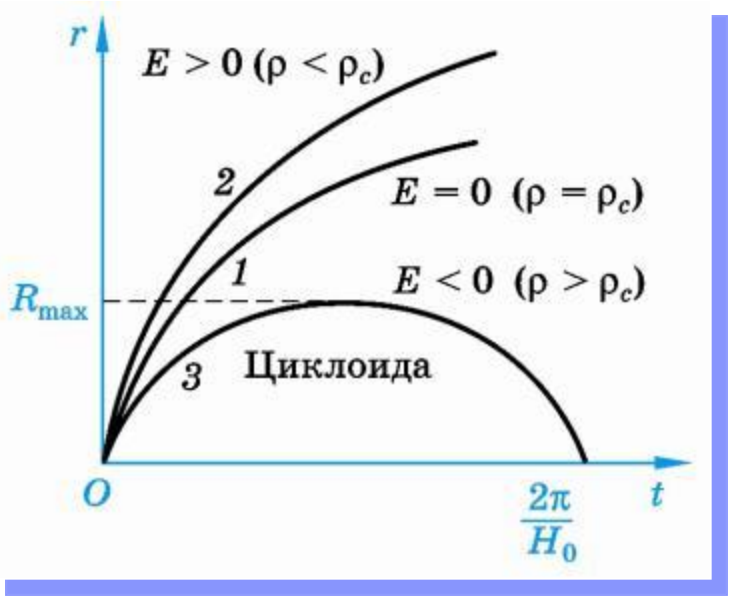
$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$ **- вторая космическая скорость vII частицы, движущейся в гравитационном поле массы *M*.**

Для однородной и изотропной Вселенной $v = H_0 \bullet r$ **Учитывая, что масса *M* Вселенной связана с ее плотностью** ρ $(M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3)$ **, и подставляя v и *M* , получаем**

$$H_0^2 r^2 = 2G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 / r$$

Тогда критическая плотность Вселенной

$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_c \approx 10^{-26}\, кг/м^3,$$

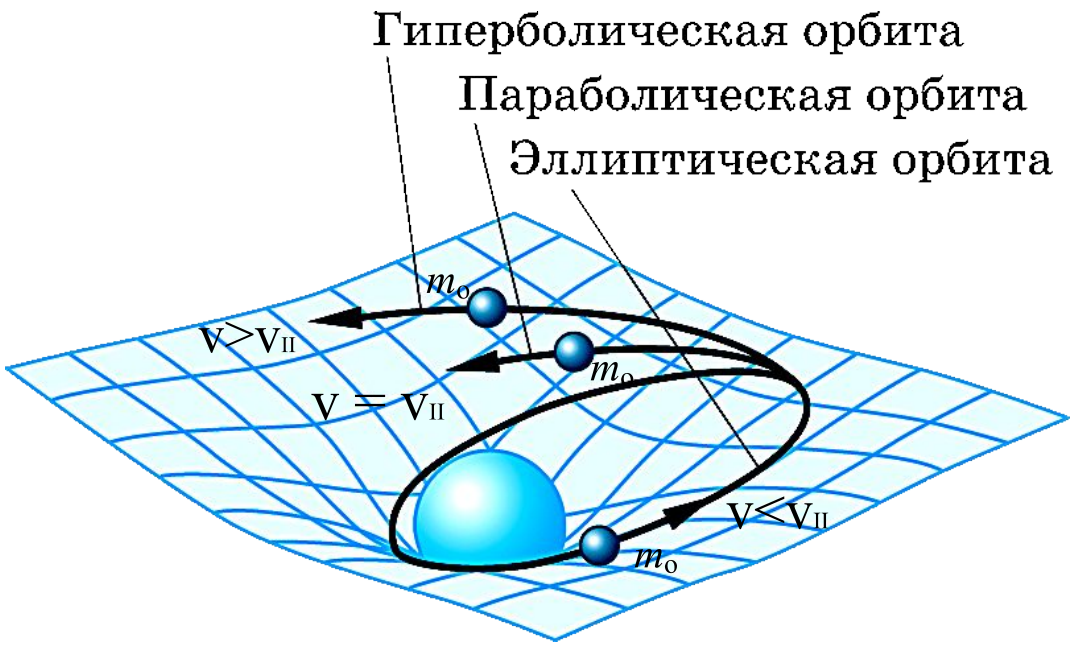


Эволюция Вселенной определяется балансом между ее кинетической и потенциальной энергией. Характер ее расширения зависит от величины и знака полной энергии:

1) $\rho = \rho_c$ $(E = 0)$ ***– открытое плоское пространство;***

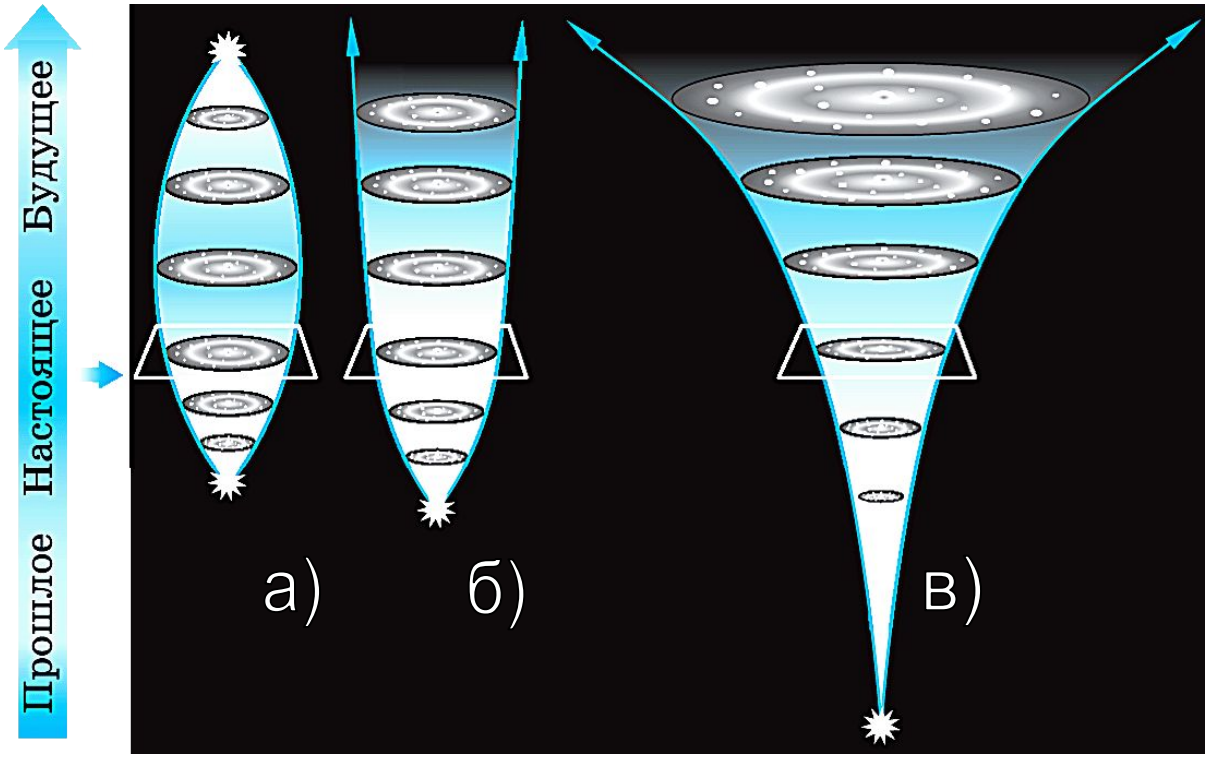
2) $\rho < \rho_c$ $(E > 0)$ ***– кривизна пространства считается отрицательной (открытое гиперболическое пространство),***

3) $\rho > \rho_c$ $(E < 0)$ ***– сферическое пространство с положительной кривизной — замкнутое и конечное.***



Модель пространства, искривленного гравитацией, можно представить в виде плоского листа резины, на который помещается тяжелый шар. Под действием шара резина растягивается, образуется воронка, имитирующая искривление пространства. Чем больше масса шара, тем больше кривизна пространства.

Объект массой *mo* (например, сферическая оболочка Вселенной), обладающий скоростью $v = v_{II}$, движется по параболической траектории. В случае $v > v_{II}$, движение объекта происходит по гиперболе. Если скорость объекта $v < v_{II}$, возникает замкнутое эллиптическое движение.

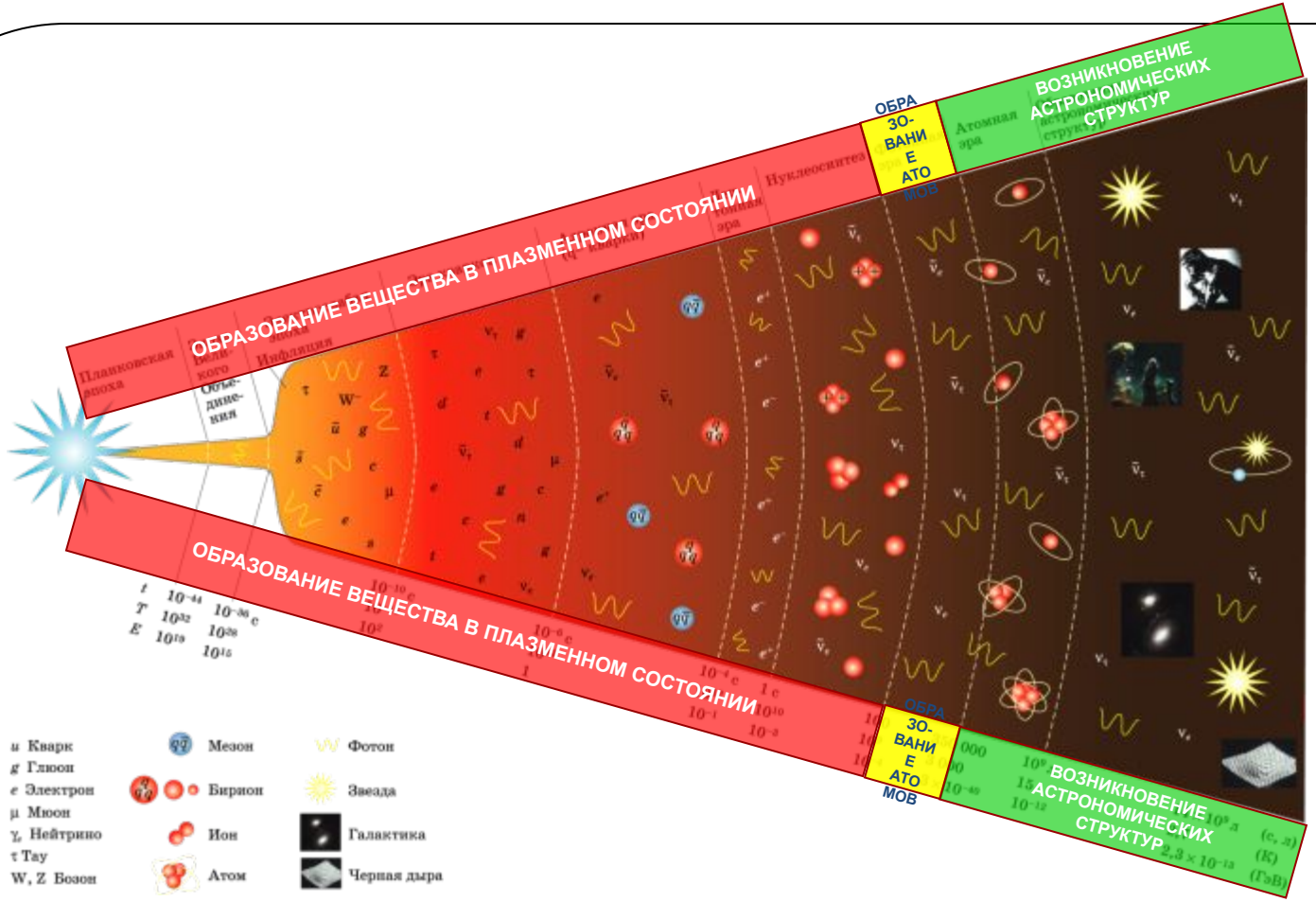


а) $\rho > \rho_c$;

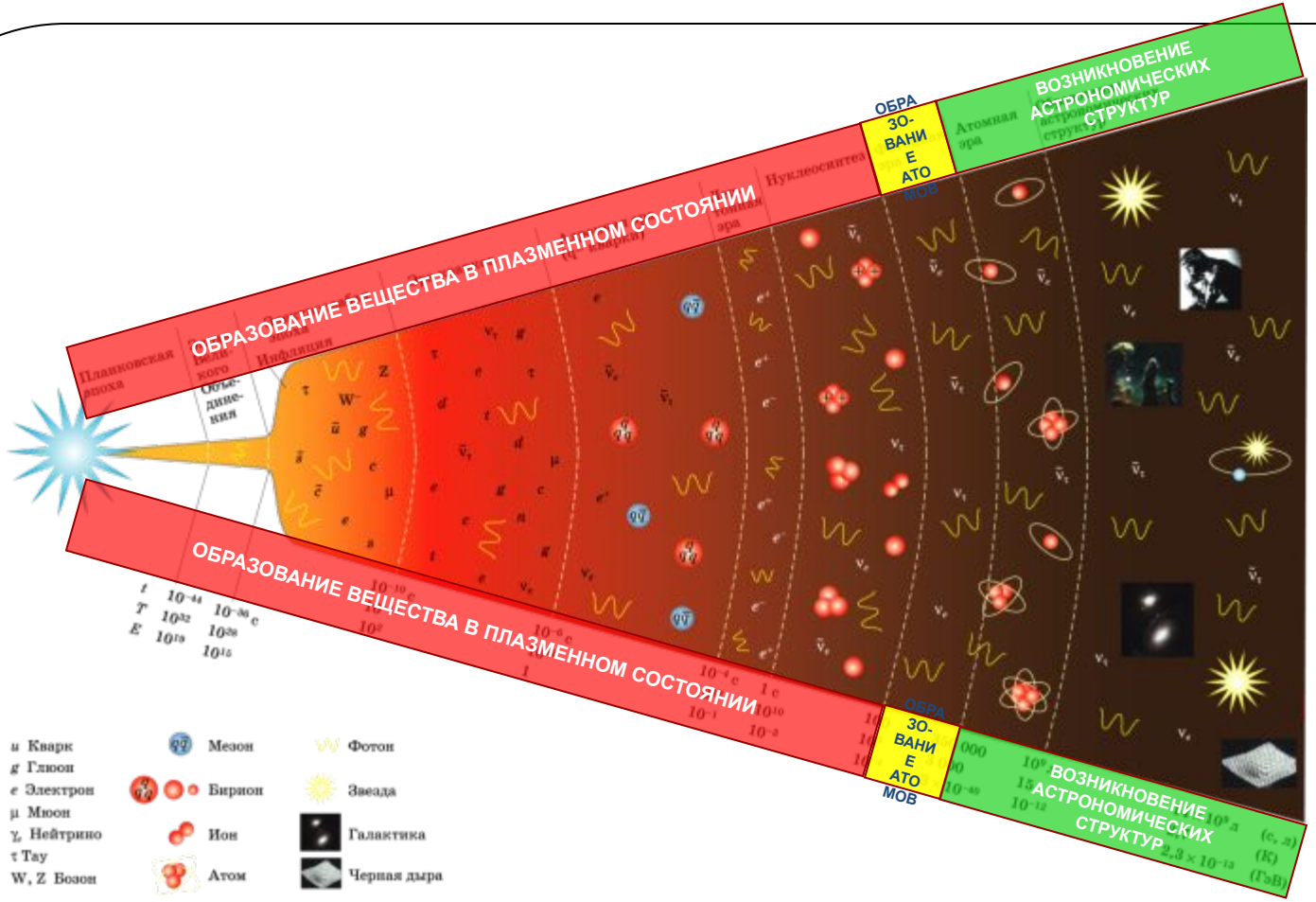
б) $\rho = \rho_c$;

в) $\rho < \rho_c$

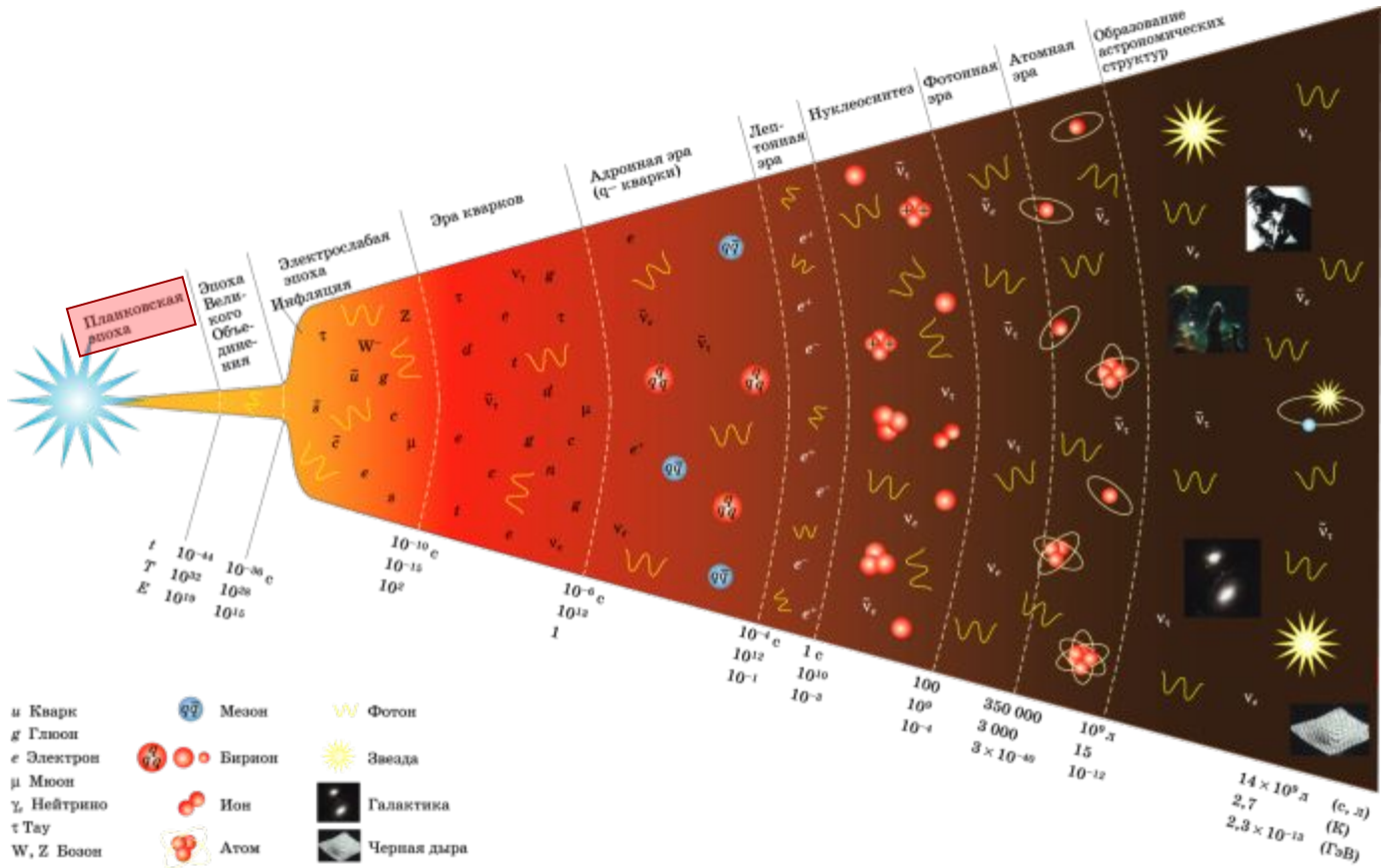
Три возможных варианта эволюции Вселенной в зависимости от ее реальной плотности.



Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.
В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.



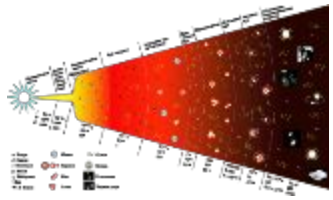
Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.
В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

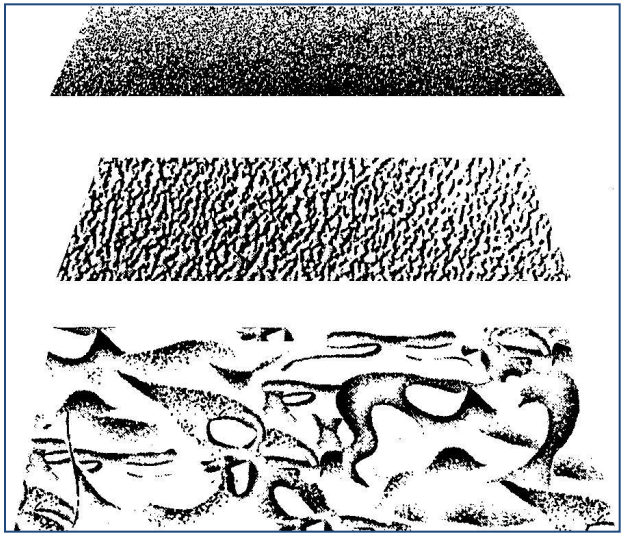


Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

(t < 10^{-43} c)





Физический вакуум

Сначала существовал только физический вакуум. В отличие от пустого пространства, как мы его себе представляем, в физическом вакууме постоянно присутствуют квантовые флуктуации поля. В этот период все взаимодействия

неразличимы.

Из фундаментальных констант, характеризующих квантовые и гравитационные свойства материи, *G*, ħ, c, можно найти единственную алгебраическую комбинацию, имеющую размерность длины.

$$R_{\text{р}} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-35}\ \text{м}$$

Временной масштаб, или характерное время распространения взаимодействия

$$t_{\text{р}} = R_P / c = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 10^{-43}\ \text{с}$$

Масса частицы, квантовой черной дыры, имеющей размер, сопоставимый с размером Вселенной в этот момент времени (в *планковскую эпоху*):

$$M_{\text{р}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2 \cdot 10^{-8}\ \text{кг}$$

Плотность вещества в этот момент времени

$$\rho_{\text{р}} = M_{\text{р}} / R_{\text{р}}^3 \approx 10^{97}\ кг/м^3$$

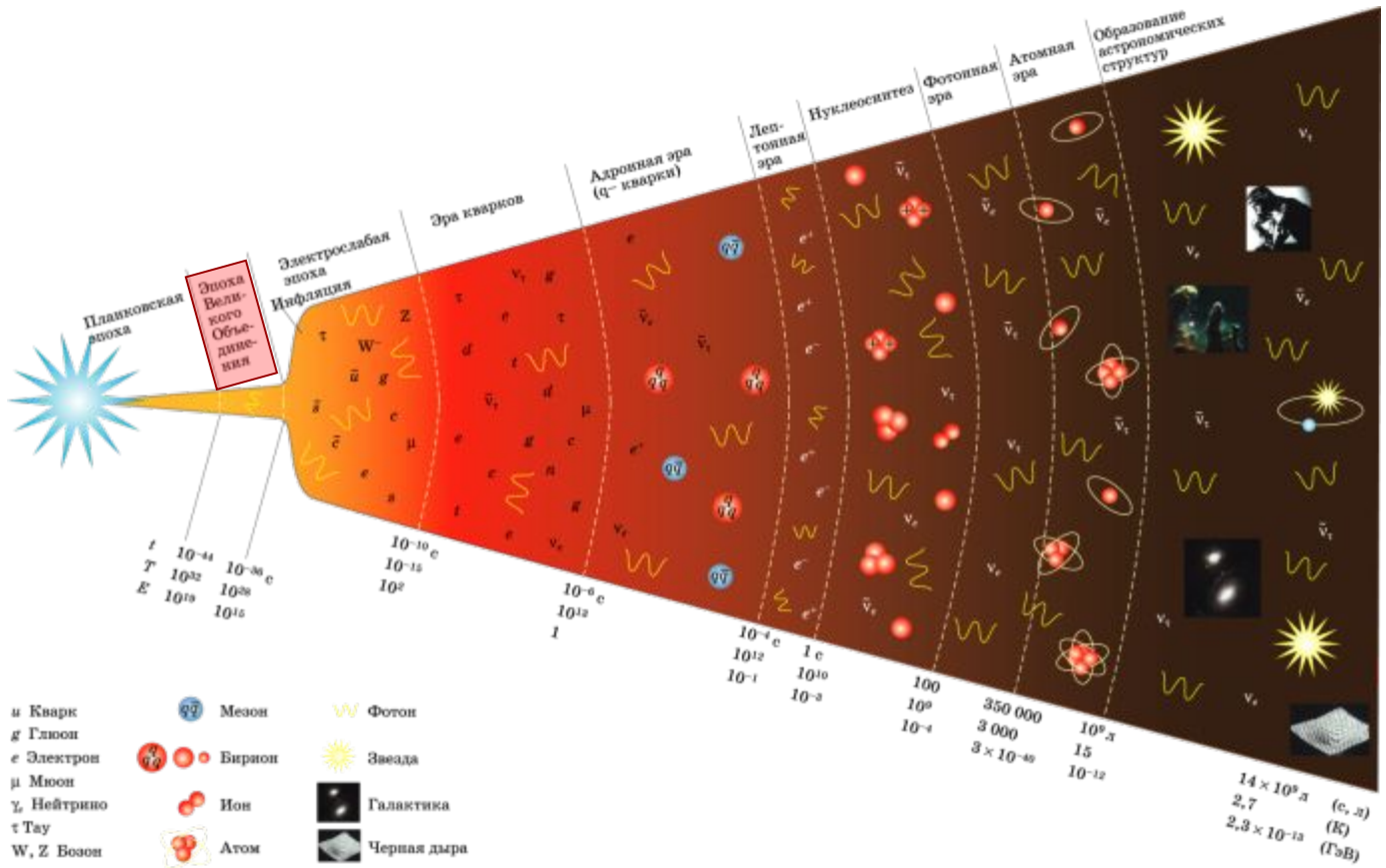
(на 94 порядка превышающая плотность воды)

Энергия покоя *E*р частицы массой *M*р

$$E_{\text{р}} = M_P c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}} \approx 10^{19}\ \text{ГэВ}$$

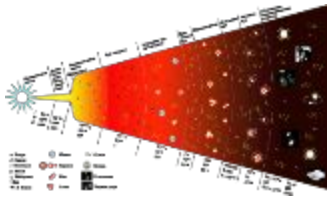
Такой энергии соответствует температура $(1\ \text{эВ} = 1{,}16 \cdot 10^4\ \text{К})$:

$$T_{\text{р}} \approx 10^{32}\ \text{К}.$$

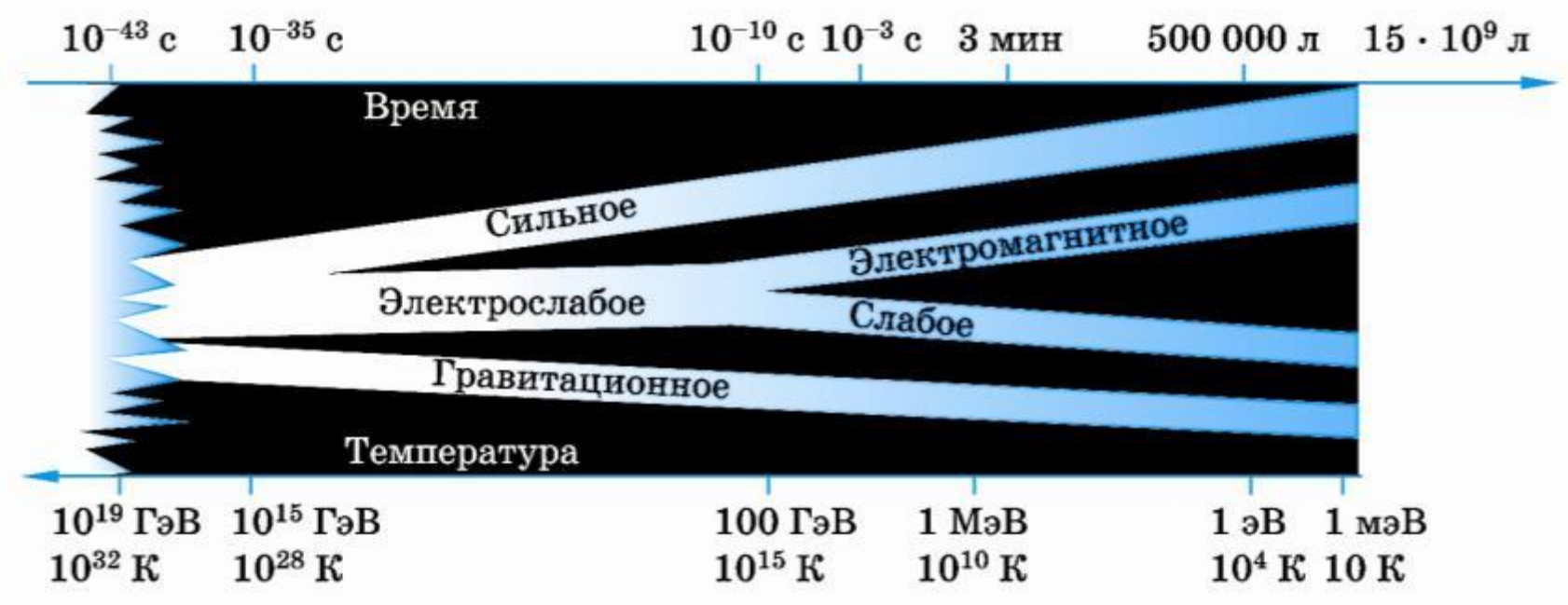


Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

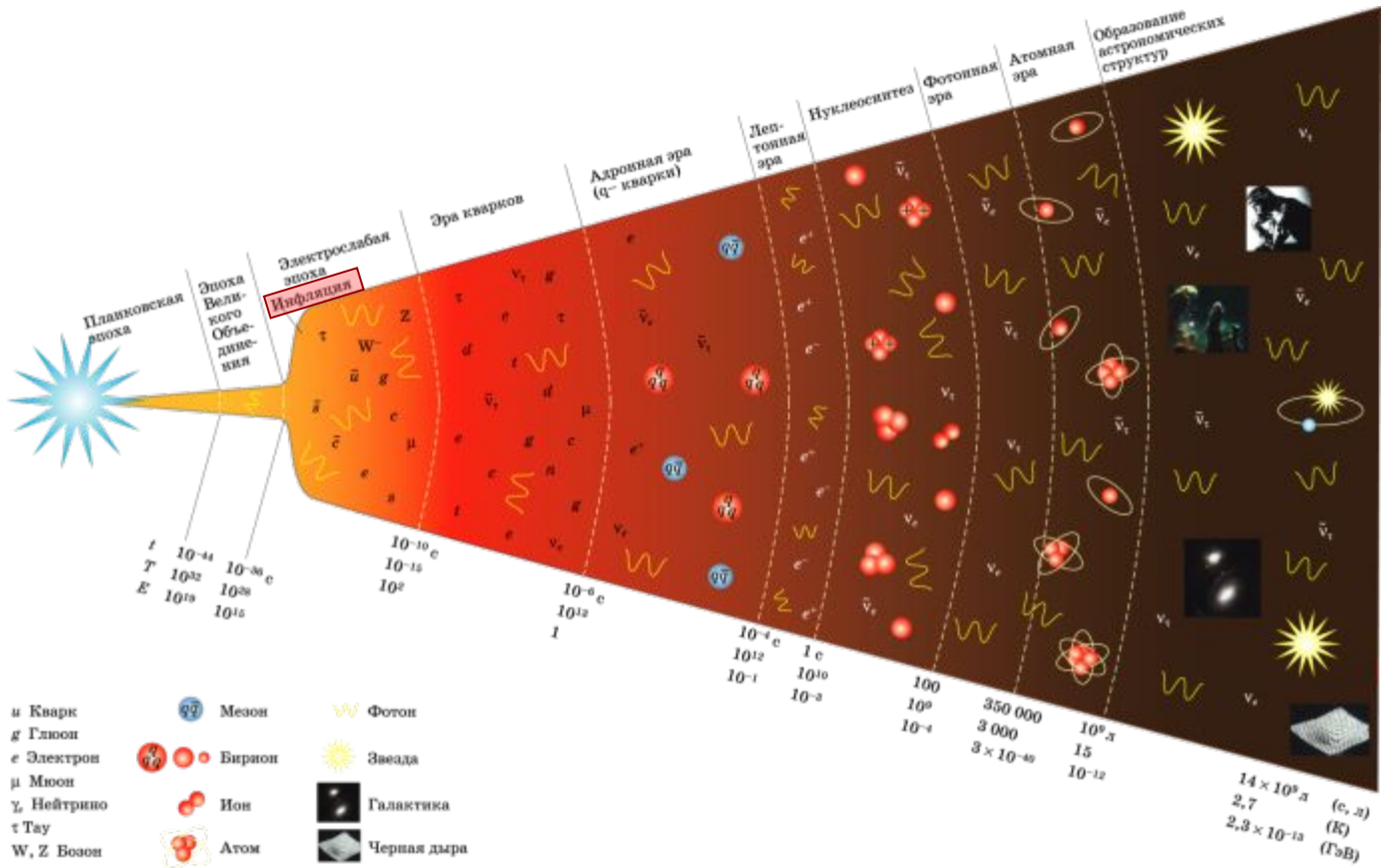
В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.



$(10^{-43} - 10^{-36})$ с



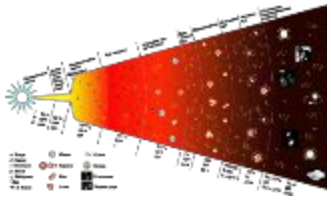
В период времени от 10^{-43}с до 10^{-36}с нарушается симметрия четырех взаимодействий. Возникает своего рода фазовый переход: гравитационное взаимодействие становится независимым от остальных в диапазоне температур от 10^{32}К до 10^{28} К.
Три остальных взаимодействия — сильное, слабое и электромагнитное — при этих температурах рассматриваются теорией *Великого объединения* как единое (сильное и электрослабое) взаимодействие.

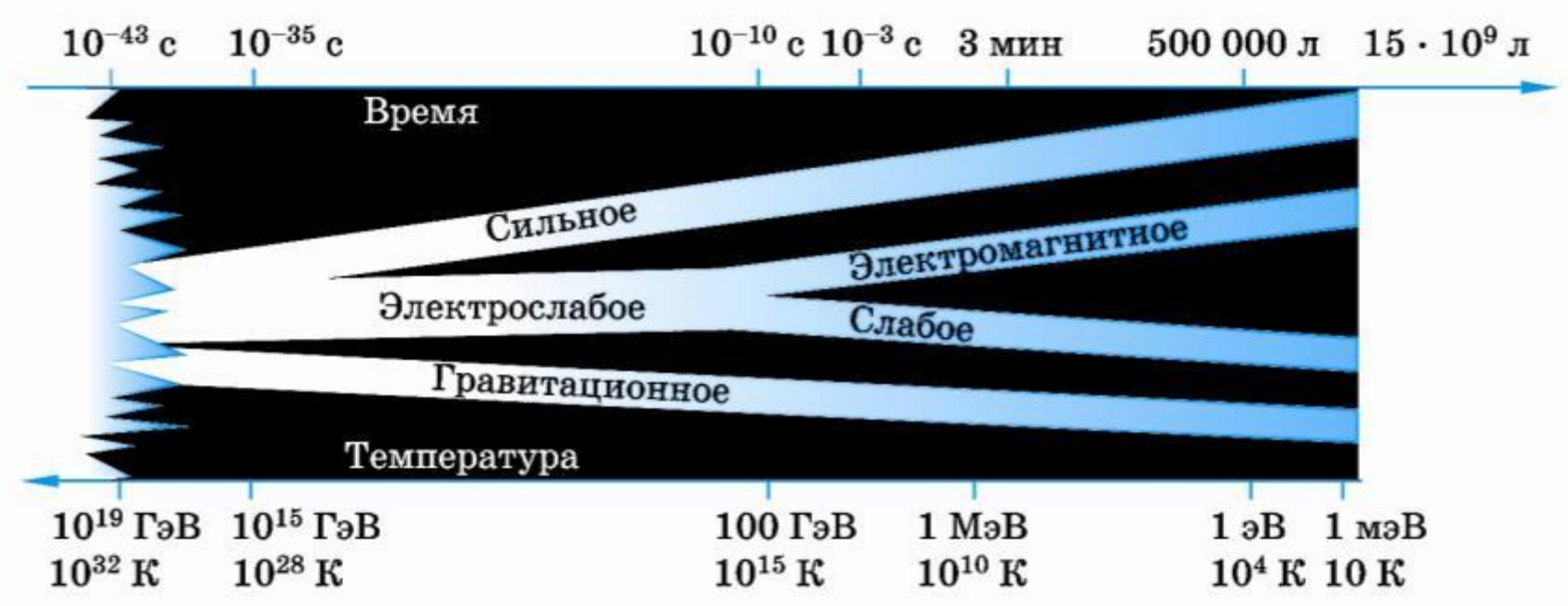


Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

$(10^{-36} - 10^{-34})$ с





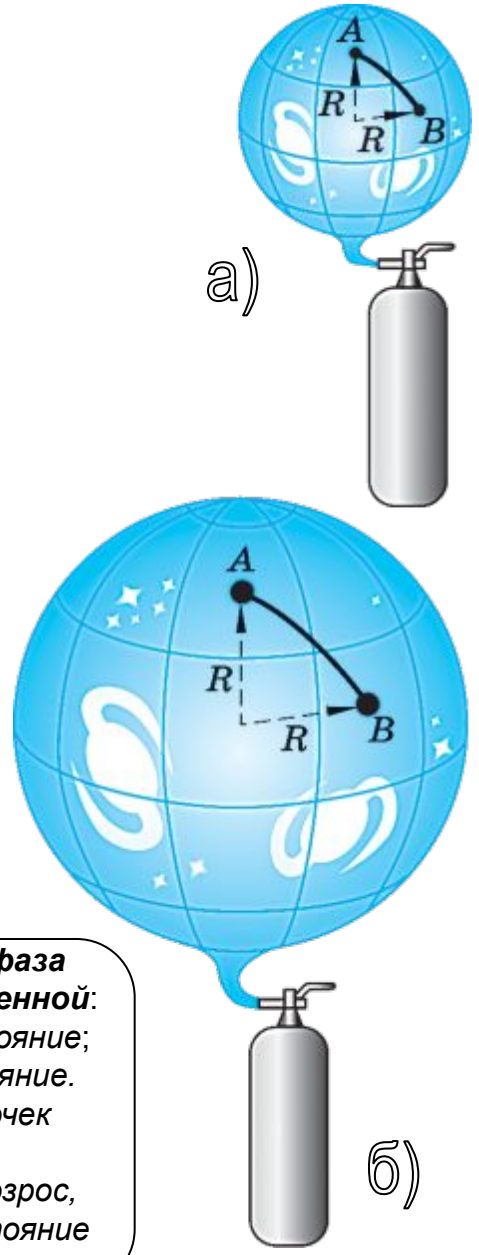
Космологические уравнения позволяют оценить зависимость температуры *T* (в К) Вселенной от времени *t* (в с):

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

В период от 10^{-36}с до 10^{-34} с температура Вселенной упала с 10^{28} К до 10^{27}К. В результате спонтанного нарушения симметрии пространства—времени в этом диапазоне температур сильное взаимодействие отделяется от электрослабого (электромагнитного и слабого). Энергия, выделяющаяся при этом, приводит к резкому экспоненциальному *инфляционному* росту масштаба Вселенной.

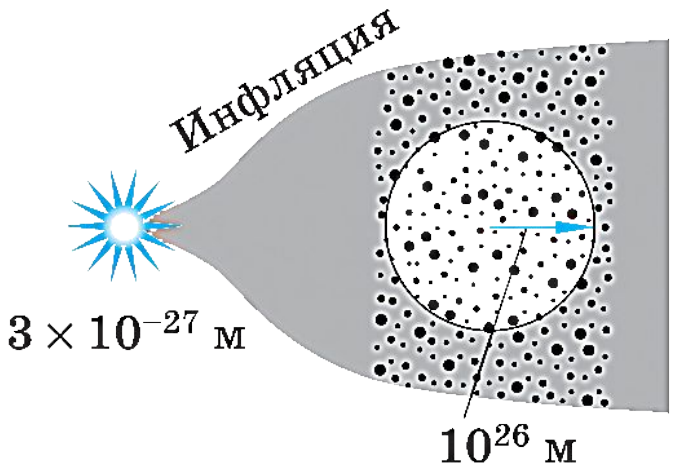
Каждые 10^{-36}с размер Вселенной возрастал в *e* = 2,718 раза. Учитывая, что сто таких интервалов содержится в 10^{-34}с, в период инфляции размер должен возрасти в e^{100}раз, или в раз $10^{0,43 \cdot 100} = 10^{43}$

Таким образом, за 10^{-34}с размер Вселенной вырос до $3 \cdot 10^{17}$м, превысив диаметр Солнечной системы.

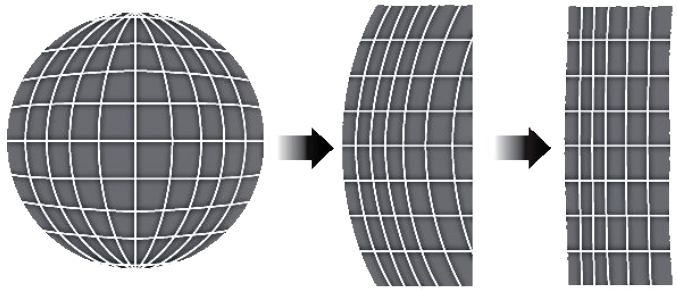


Инфляционная фаза расширения Вселенной:
а) начальное состояние;
б) конечное состояние.
Координаты точек прежние,
но радиус резко возрос,
так же как и расстояние между точками

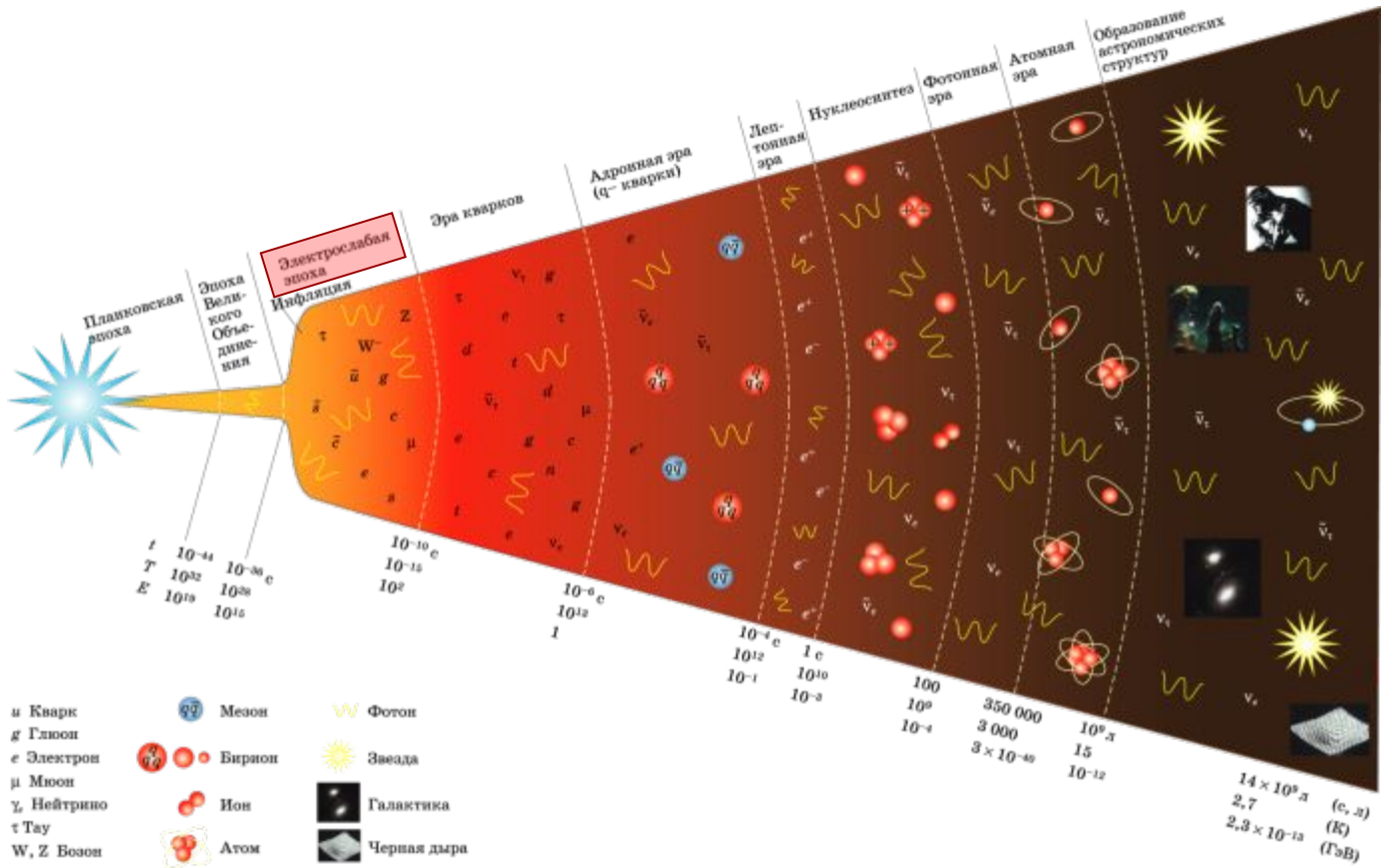
Благодаря инфляции истинный размер Вселенной оказывается в миллион раз больше, чем ее видимый размер порядка 15 млрд св. лет. Гигантское инфляционное расширение уменьшает начальную кривизну пространства-времени, приближая окончательный вариант пространства к евклидовому. Это частично подтверждает предположение о том, что плотность Вселенной близка к критической.



Истинные размеры Вселенной значительно превышают видимый горизонт 10^{26} м

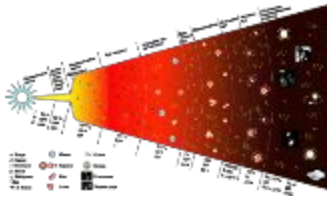


Приближение реального пространства к евклидовому в результате инфляции



Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

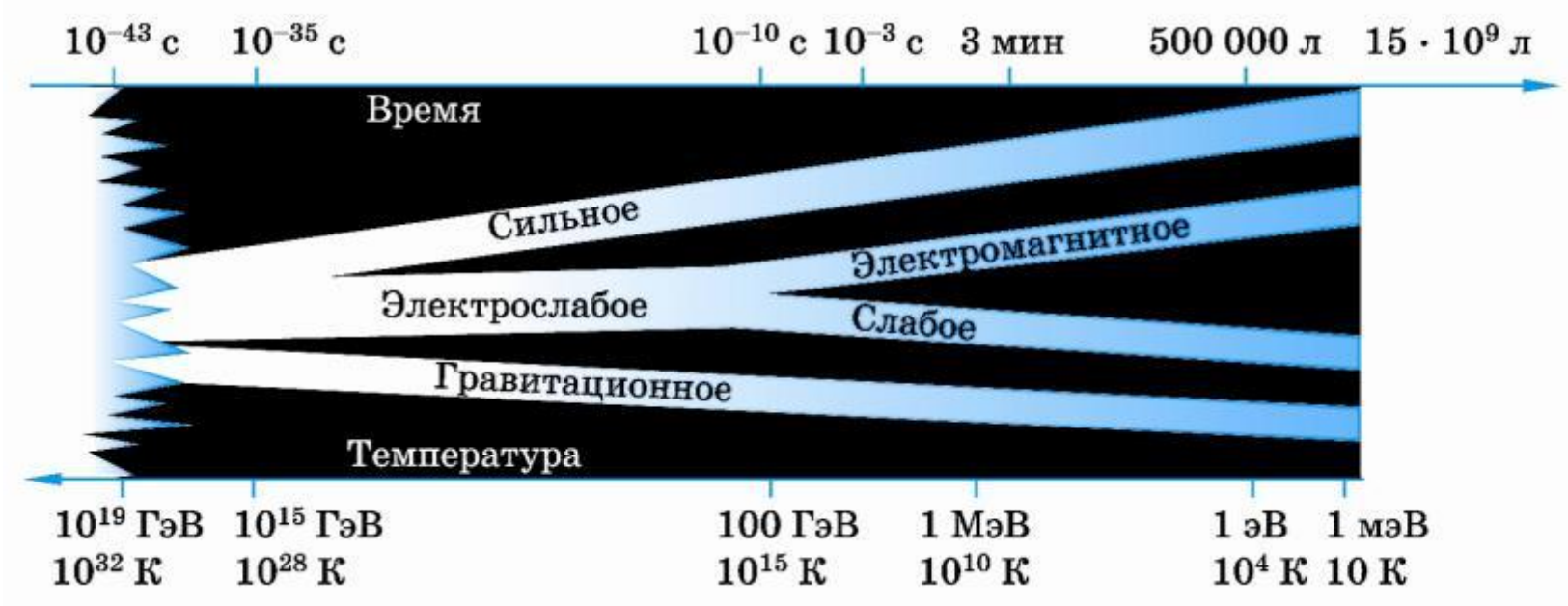


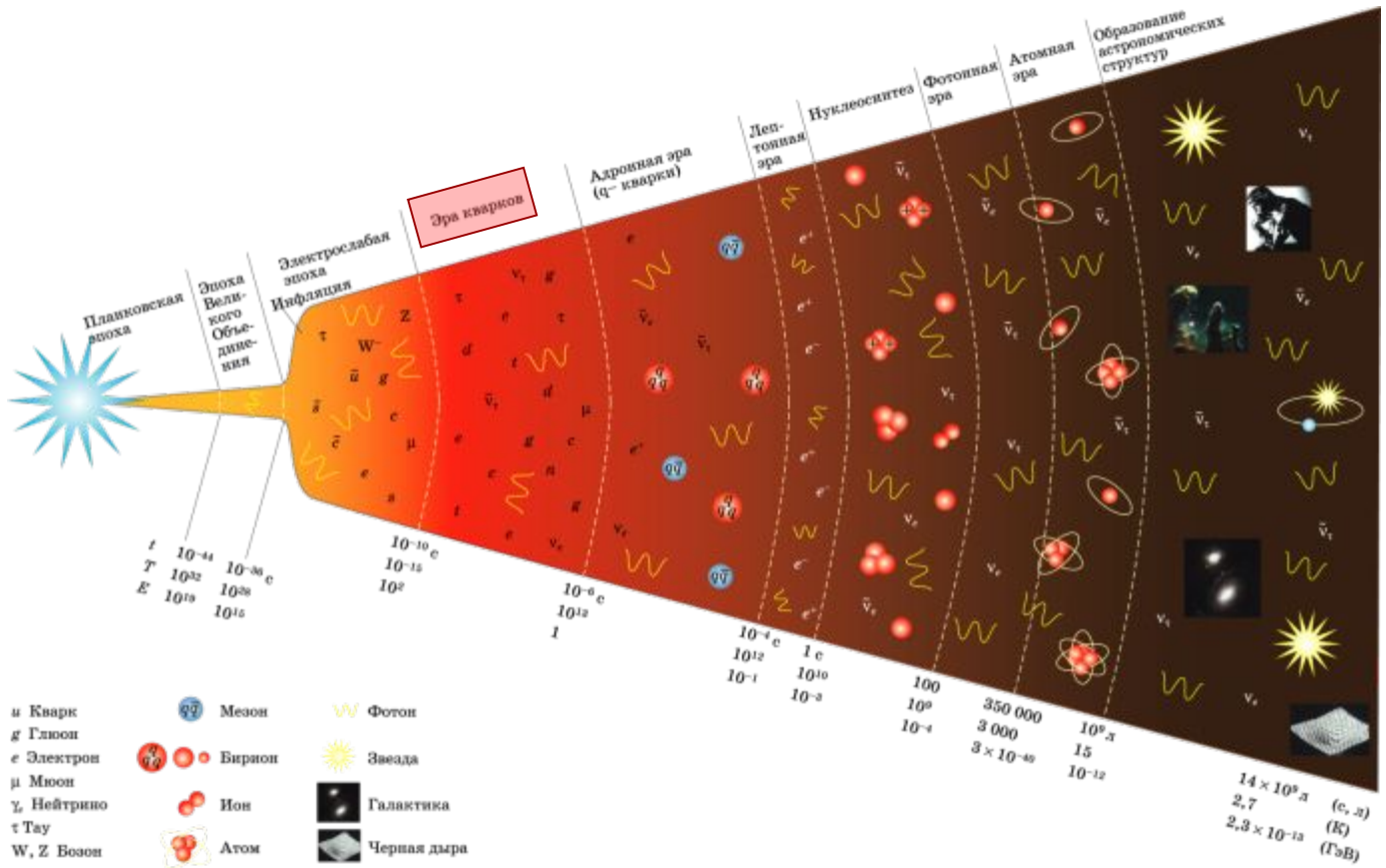
$$(10^{-36} - 10^{-10})\ \text{с}$$

В момент времени $t = 10^{-34}$с инфляция заканчивается, но расширение и охлаждение Вселенной продолжаются.
Новый фазовый переход - разделение электромагнитного и слабого взаимодействия — возникает при температуре

$$T_c \approx 3 \cdot 10^{15}\ \text{К} \approx 200\ \text{ГэВ}$$

и заканчивается к моменту времени 10^{-10} с.

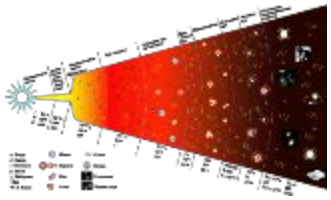




Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

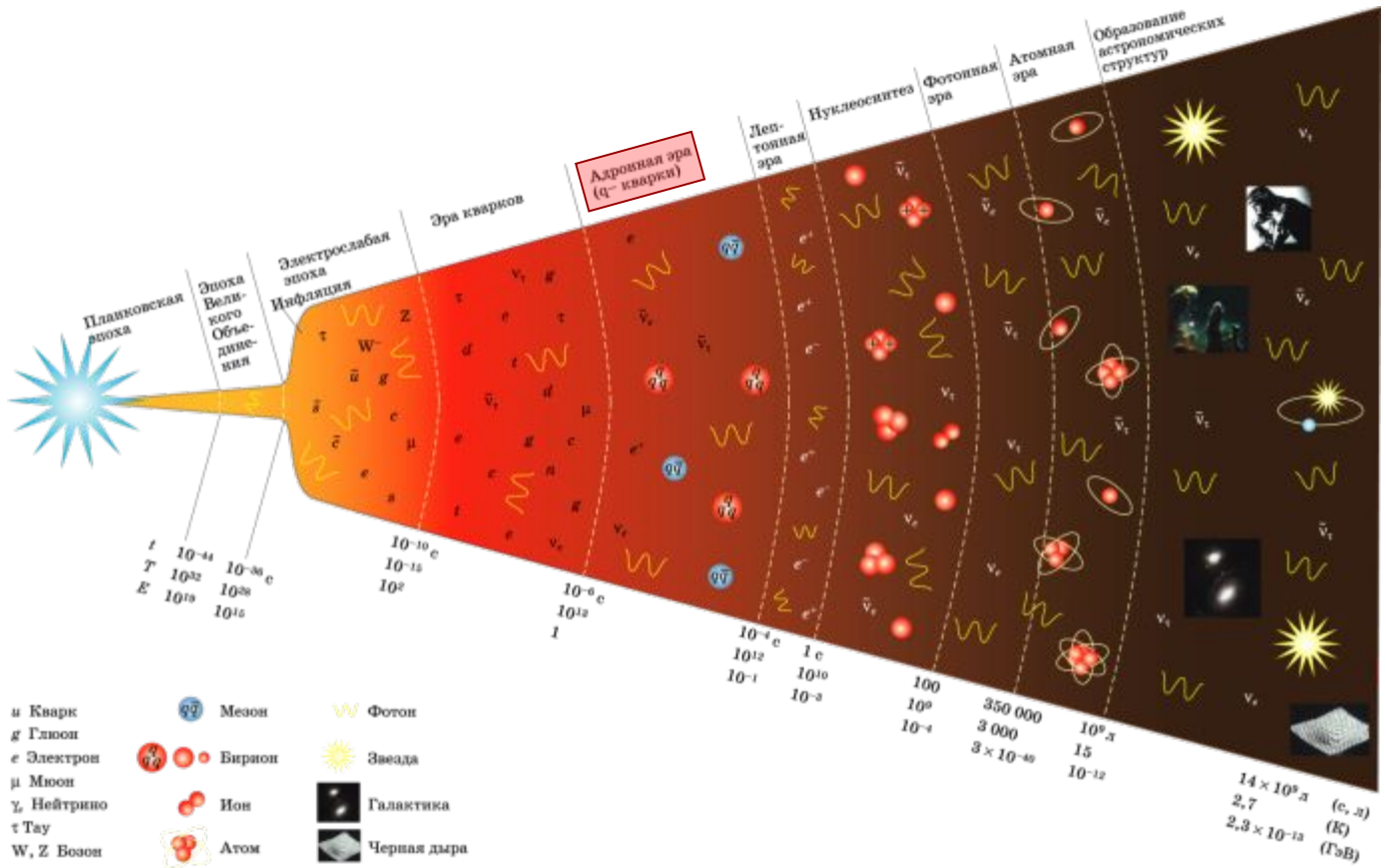
В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

$(10^{-10} - 10^{-6})$ с



Смесь кварков — антикварков, лептонов и антилептонов, частиц — переносчиков взаимодействий заполняет Вселенную в течение последних двух эпох: инфляционной и электрослабой (от 10^{-36} с до 10^{-10} с).

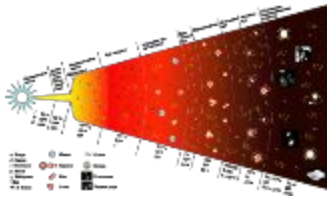
Такой же состав Вселенной остается и от 10^{-10}с до с, т. е. в интервале температур от 10^{15} К до 10^{13} К. При этом все четыре фундаментальных взаимодействия разделились.



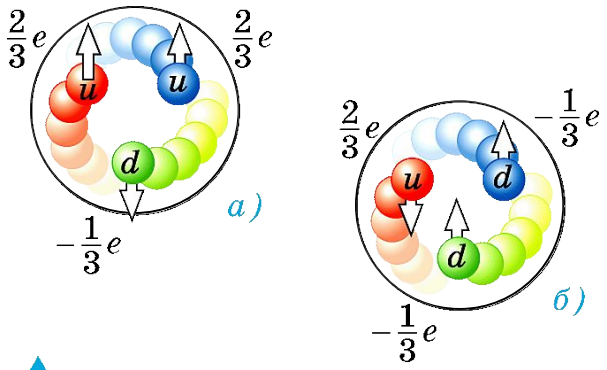
Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

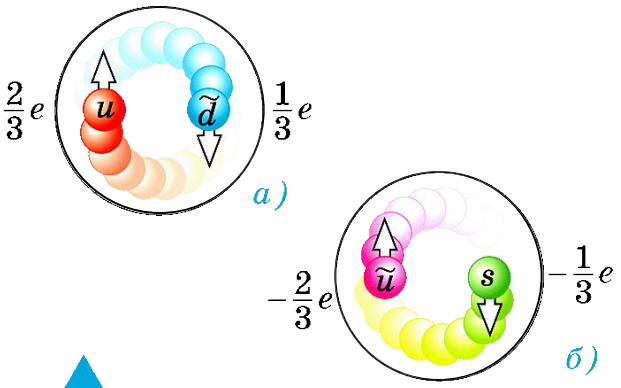
$(10^{-6} - 10^{-4})$



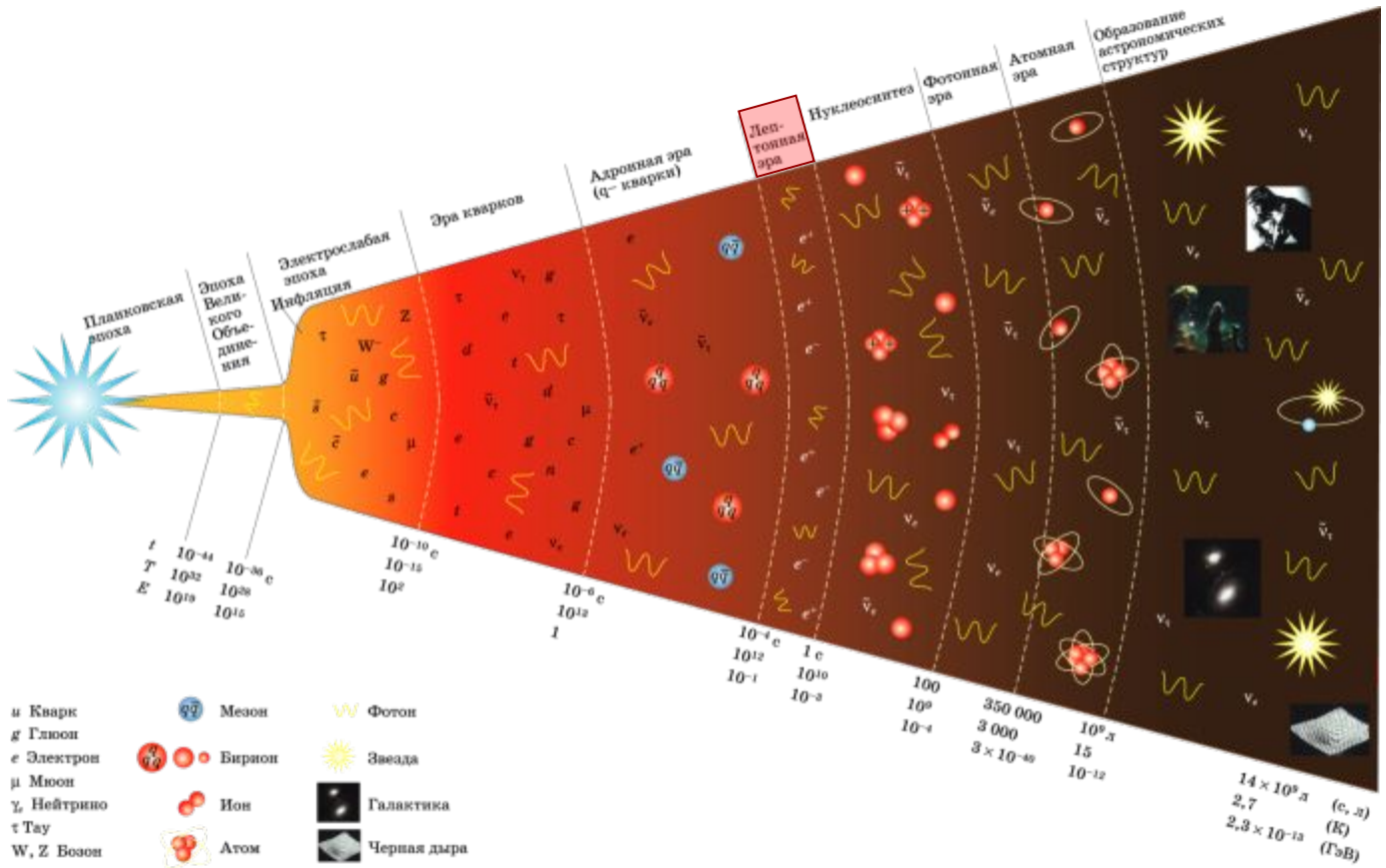
Каждый свободный кварк в диапазоне температур 10^{13} К — 10^{12} К либо объединяются с антикварком (в мезон или антимезон) либо находят себе место в барионе (или антибарионе). Ввиду того, что Вселенная, расширяясь, продолжает охлаждаться, адроны (барионы и мезоны) не могут распасться на кварки в результате обратного процесса. А этот период в состав Вселенной входят сотни разновидностей андронов (отсюда название фазы развития Вселенной), их античастиц, лептоны и антилептоны, а также переносчики всех видов взаимодействий. Частицы и античастицы постоянно аннигилируют друг с другом, а выделяющаяся при этом энергия вновь рождает частицы. В состоянии равновесия эти процессы уравновешивают друг друга.



Кварковая структура нуклонов
а) протон;
б) нейтрон

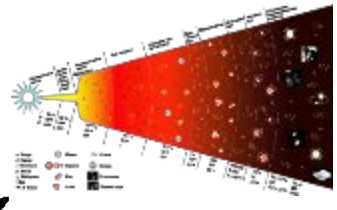


Кварковая структура мезонов
а) π^+-мезон;
б) K^--мезон



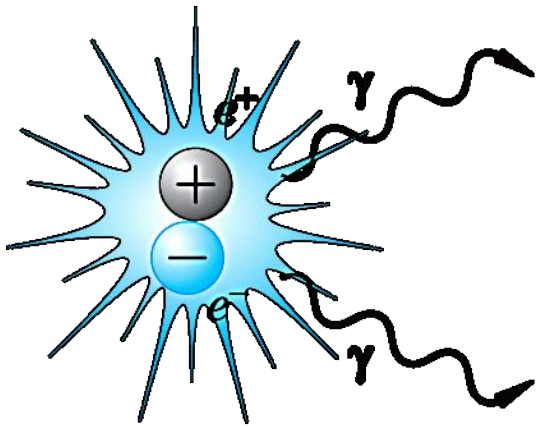
Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.



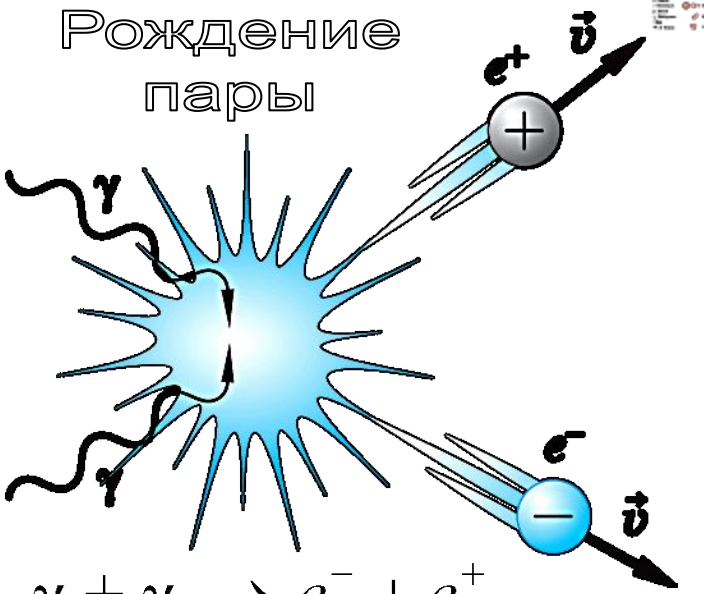
((10^{-6}-10^{-4}) – 1) с

Реакция аннигиляции



$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Рождение пары

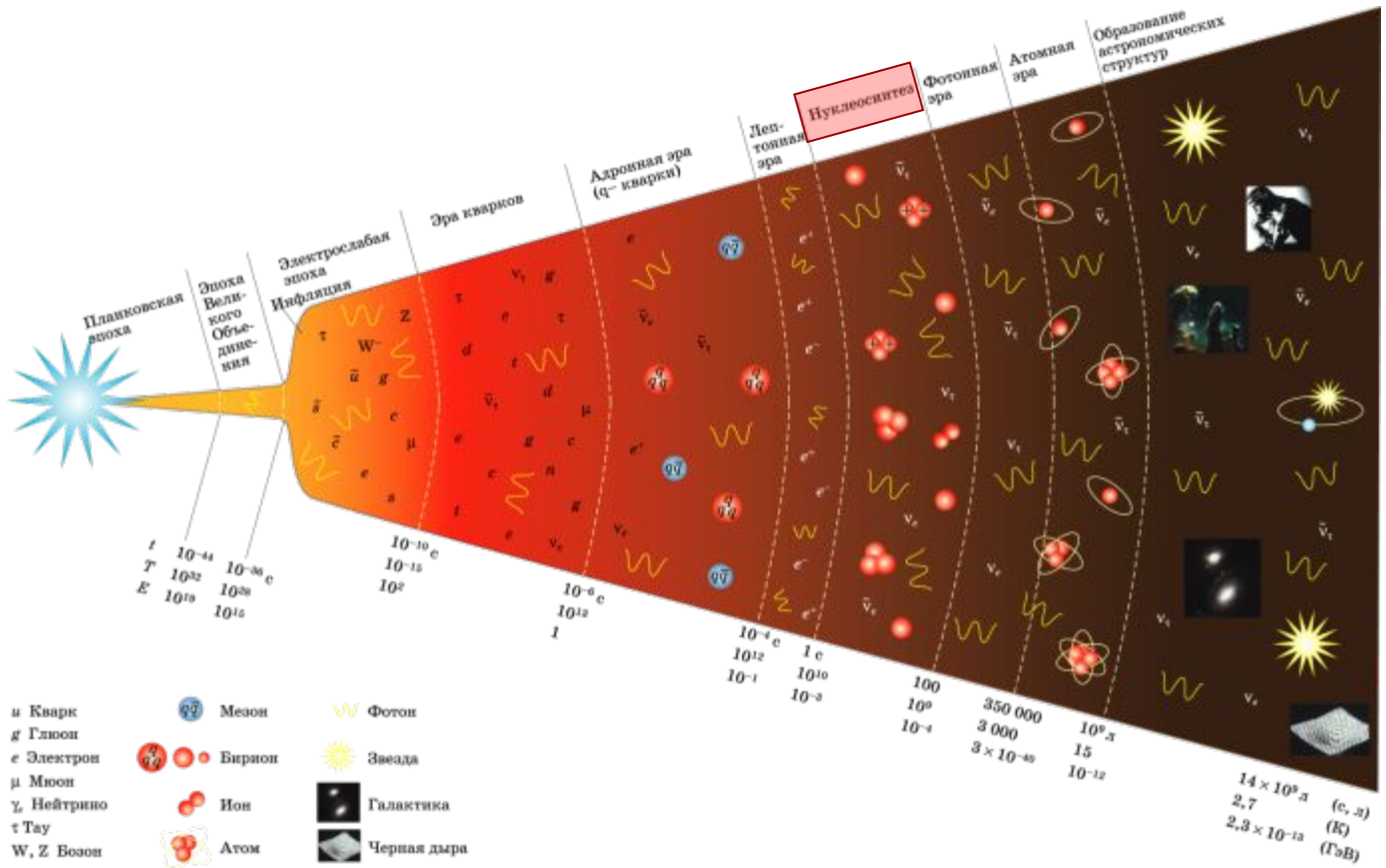


$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$

Реакция рождения пары частица — античастица имеет пороговый характер, т. е. происходит тогда, когда энергия кванта электромагнитного излучения оказывается больше, чем энергия покоя рожденных частиц: $h\nu \geq mc^2$. Для Вселенной, имеющей температуру T, энергия кванта теплового излучения примерно равна kT. Это означает, что реакция рождения пары происходит лишь при

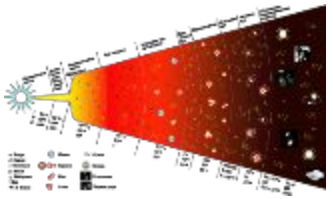
$$kT \geq mc^2 = kT_a$$

T_a – пороговая температура рождения пары частица—античастица.



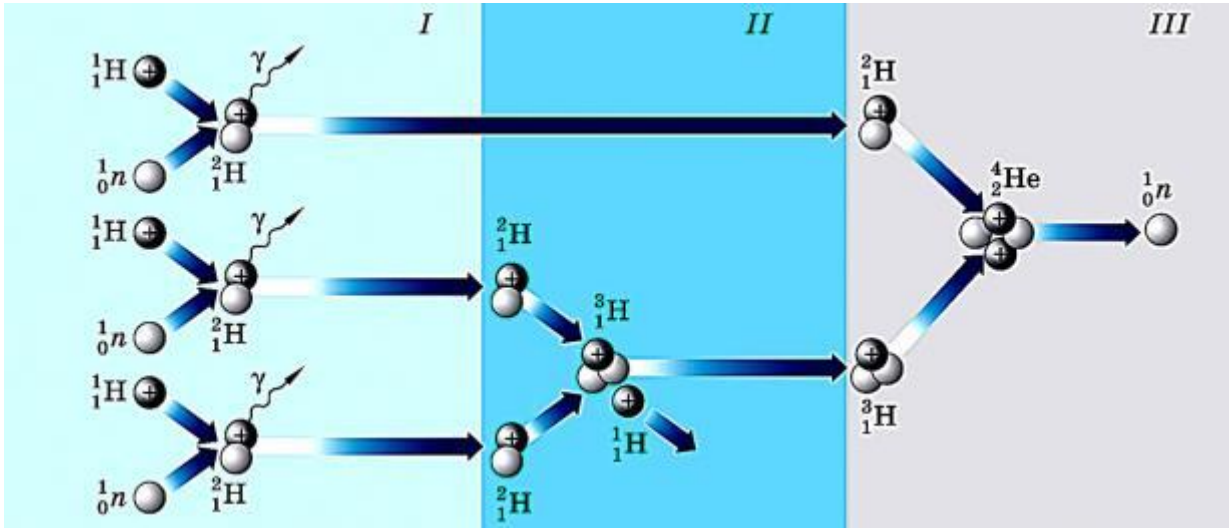
Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.



(1-100) с

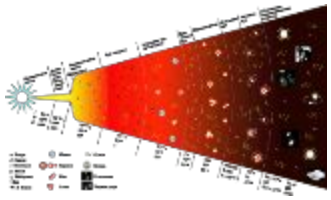
Спустя чуть более 1 с с момента Большого взрыва антивещество во Вселенной полностью аннигилировало. Таким образом, в составе Вселенной не осталось антивещества. Вещество было представлено протонами, нейтронами, электронами, а излучение - фотонами и нейтрино.



$$ {}_1^1H + {}_0^1n \rightarrow {}_1^2H + \gamma $$

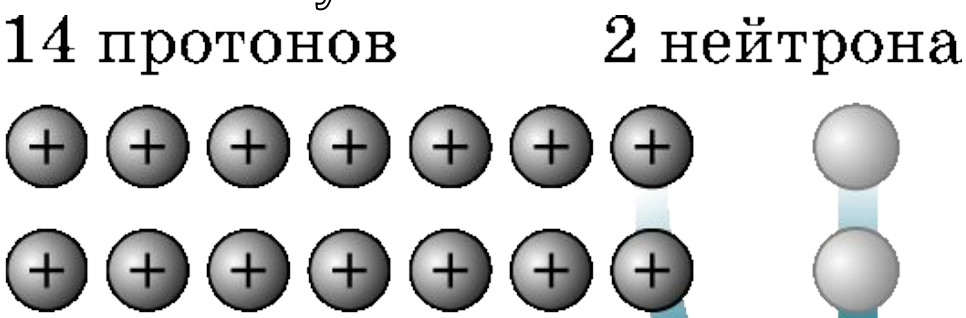
$$ {}_1^2H + {}_1^2H \rightarrow {}_1^3H + {}_1^1H $$

$$ {}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n $$

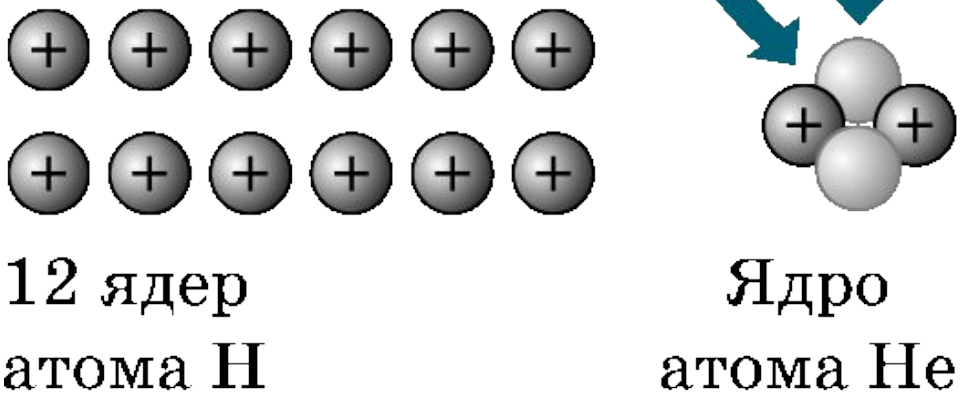


(100 с – 15 мин)

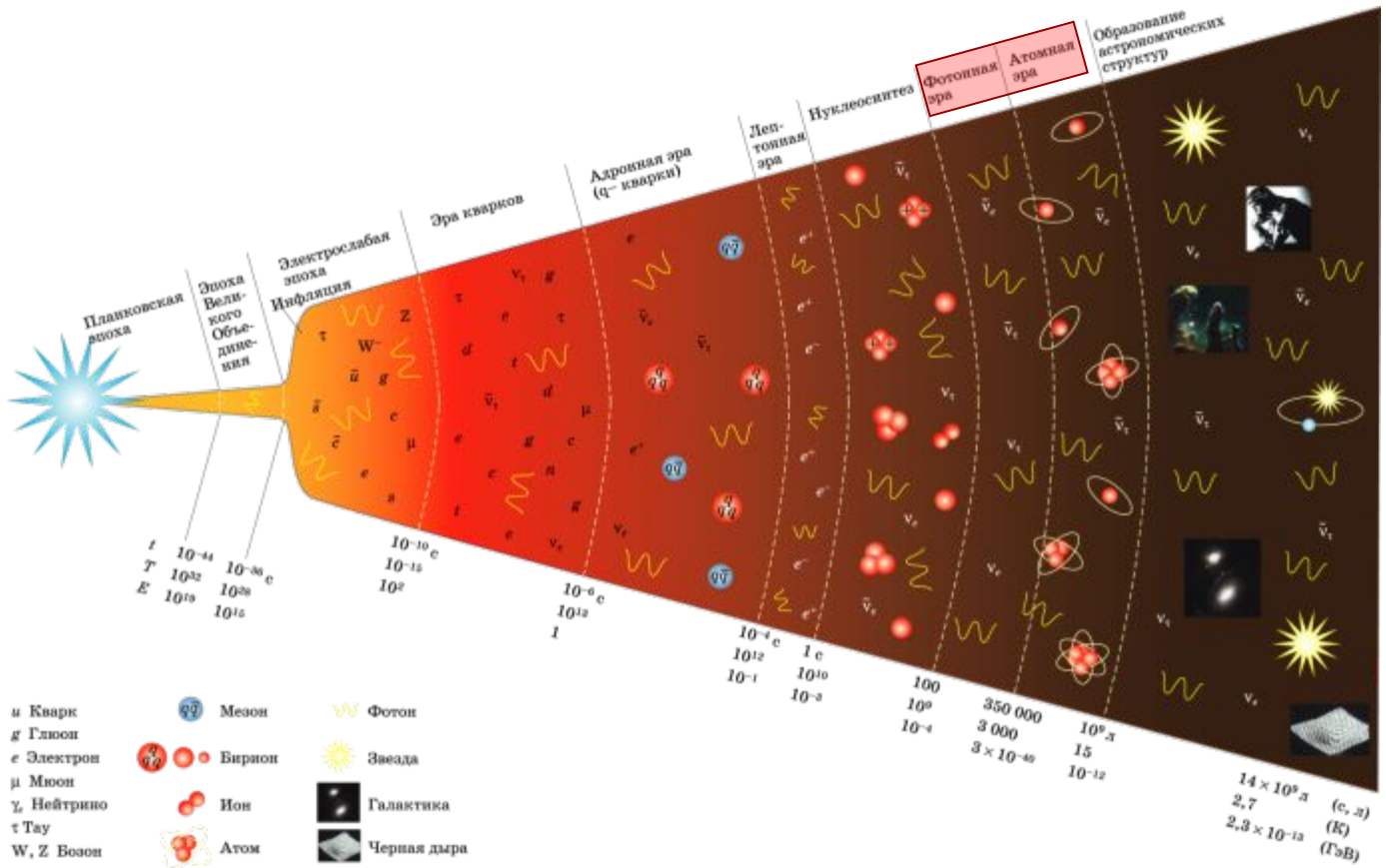
а) в начале нуклеосинтеза



б) в конце нуклеосинтеза



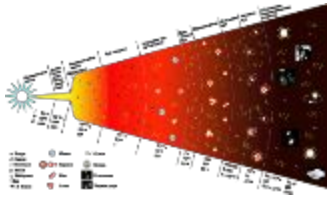
Через 15 мин с момента Большого Взрыва вещество во Вселенной (помимо электронов) состояло на 75% по массе из ядер атома водорода и на 25% из ядер гелия. Изотопы с массовыми числами от 5 до 8 нестабильны и быстро распадались. Свободных нейтронов для синтеза тяжелых изотопов не осталось. Кроме того синтез более тяжелых изотопов требовал существенно больших температур. Он станет возможным при образовании звезд миллиарды лет спустя.

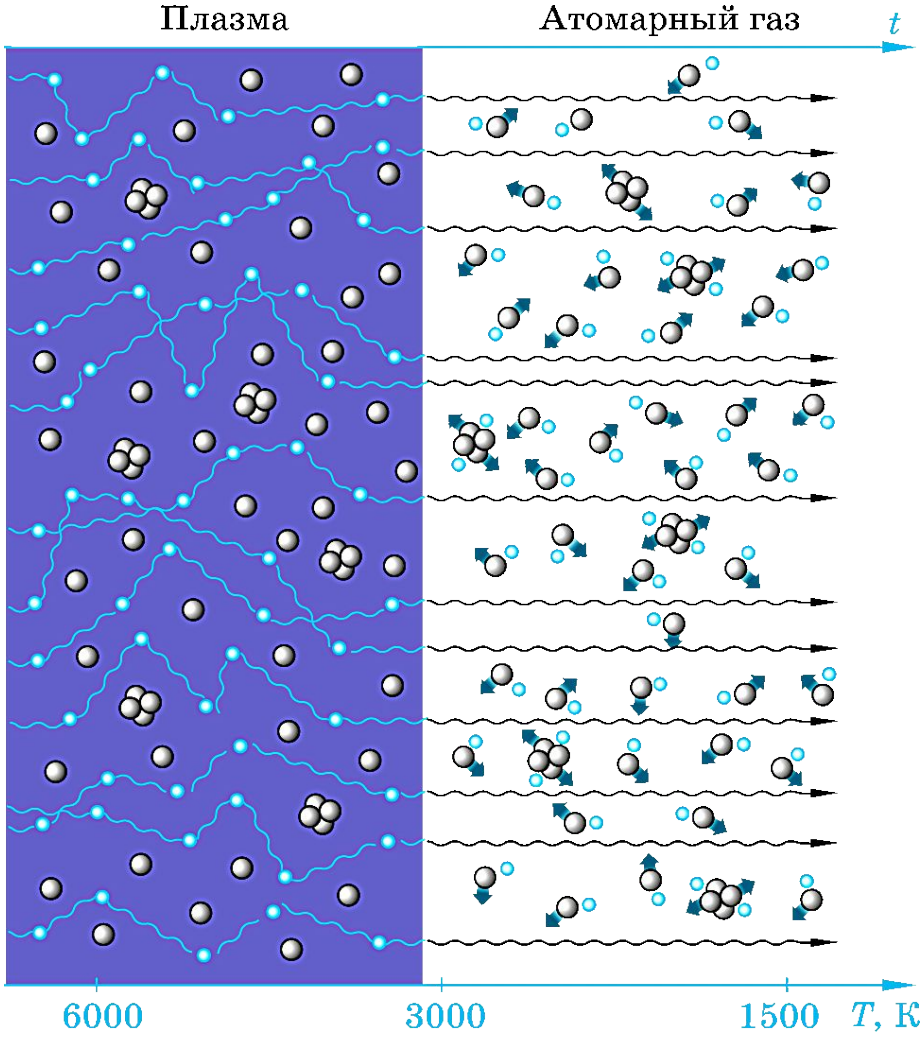


Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

(15 мин. — 350000 — 1 млрд лет)



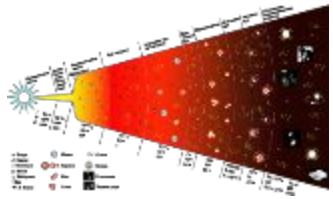


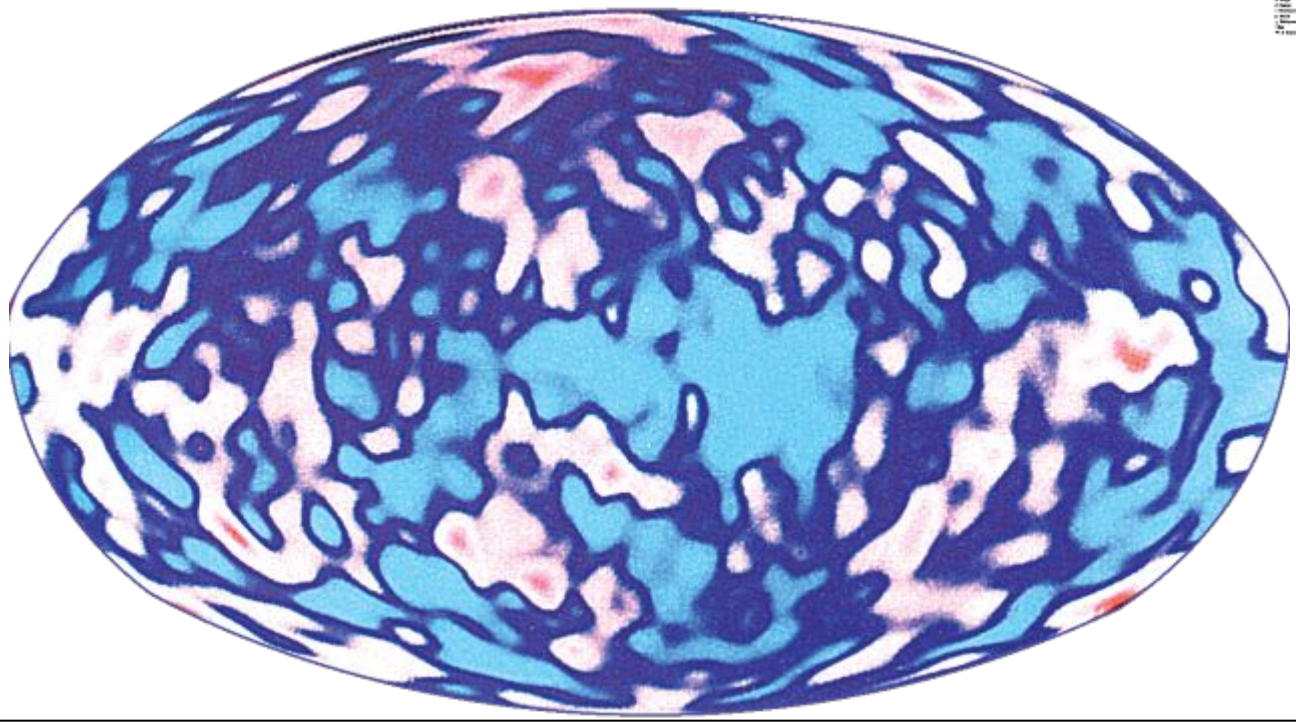
При последующем расширении вещества Вселенной, существующего в виде водородно-гелиевой плазмы через 350 000 лет ее температура оказывается порядка:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{3,5\cdot 10^{5}\cdot 3,15\cdot 10^{7}}} \approx 3000\ \text{К}$$

При этой температуре доминирование процесса рекомбинации заряженных частиц над процессами ионизации приводит к переходу вещества в газообразное состояние: наступает *эра атомов*. При *T* > 3000 К Вселенная выглядела непрозрачной (подобно туманной атмосфере), так как излучение, взаимодействуя с заряженными частицами (электронами, ионами) отклонялось и поглощалось ими.

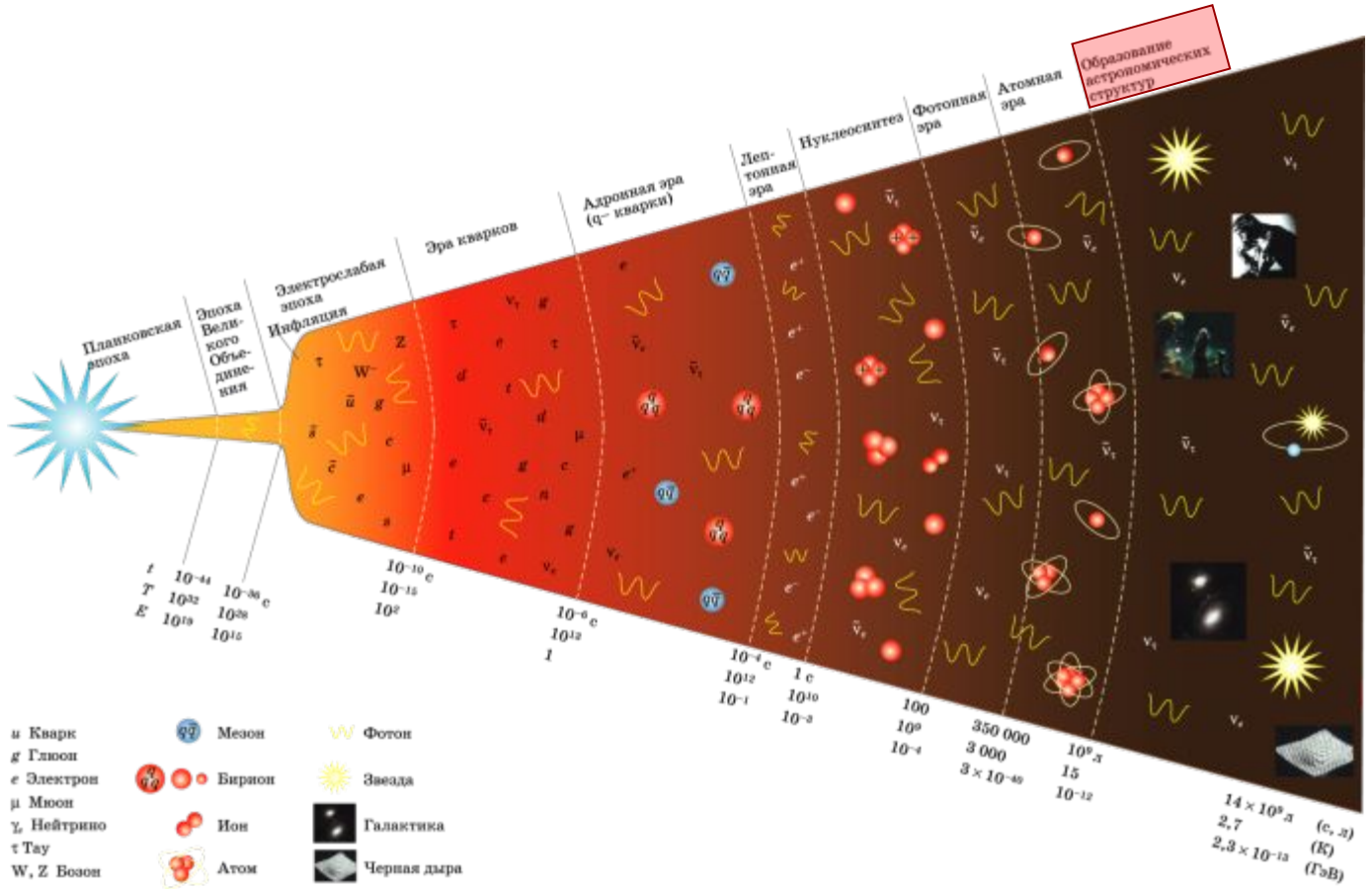
При *T* < 3000 К свободные электроны исчезают в результате рекомбинации с ионами водорода *H+*, а энергия кванта излучения оказывается недостаточной для возбуждения атомов. Излучение перестает взаимодействовать с веществом, свободно (изотропно) распространяясь во всех направлениях. Вселенная становится прозрачной для теплового излучения, которое сохранилось с тех времен до настоящего времени в течение 14,5 млрд лет.





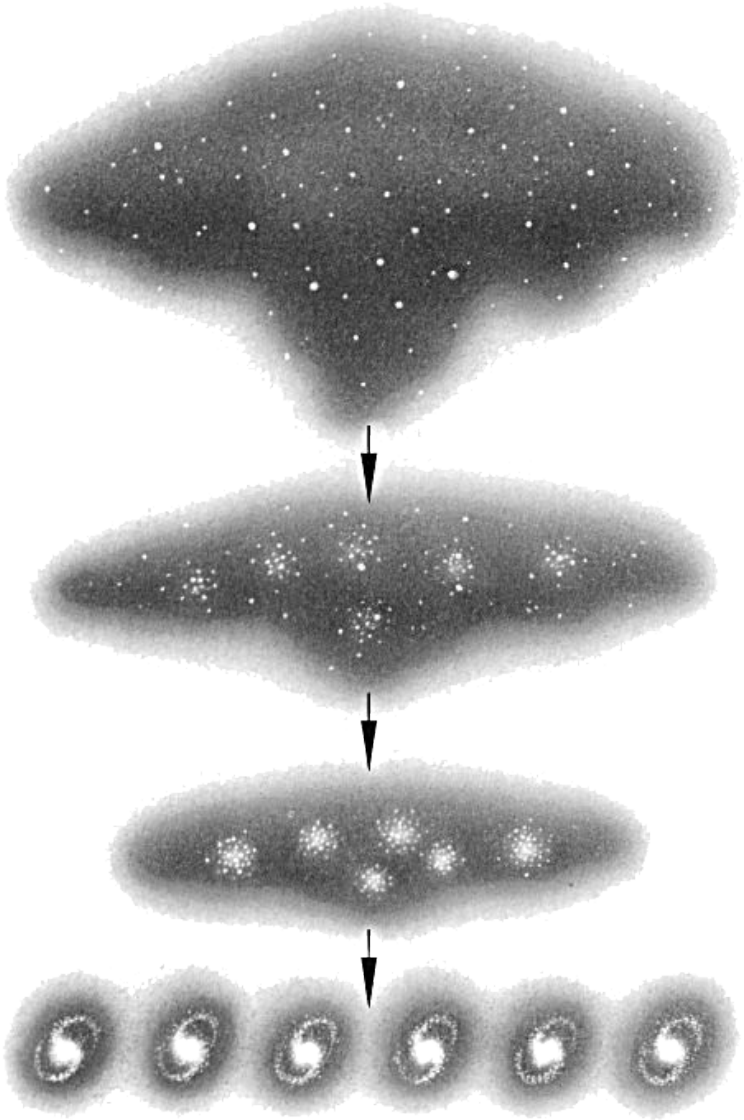
Астрономические структуры могут возникнуть лишь в результате уплотнения первичного газа. Космический аппарат COBE (Cosmic Background Explorer (*англ.*) — исследователь космического фона), запущенный в 1989 году измерил спектр реликтового излучения с точностью, на два порядка превышающей предыдущие измерения. Его анализ показал анизотропию реликтового излучения, т. е. разницу его температуры в различных направлениях от наблюдения.

Области с большей температурой (большей энергией фотонов) соответствуют повышенной плотности вещества в ранней Вселенной. Меньшие температуры фотонов определяют менее плотное космическое пространство. Пространственные масштабы флуктуаций на рисунке оказываются порядка размера сверхскоплений галактик, т.е. около 100 млн лет.



Разлет галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Ранняя Вселенная была более плотной, и более горячей, чем в настоящее время.

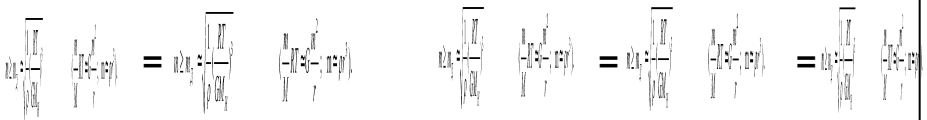
В конце 40-х гг. XX в. американский физик российского происхождения ***Георгий Гамов*** предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.



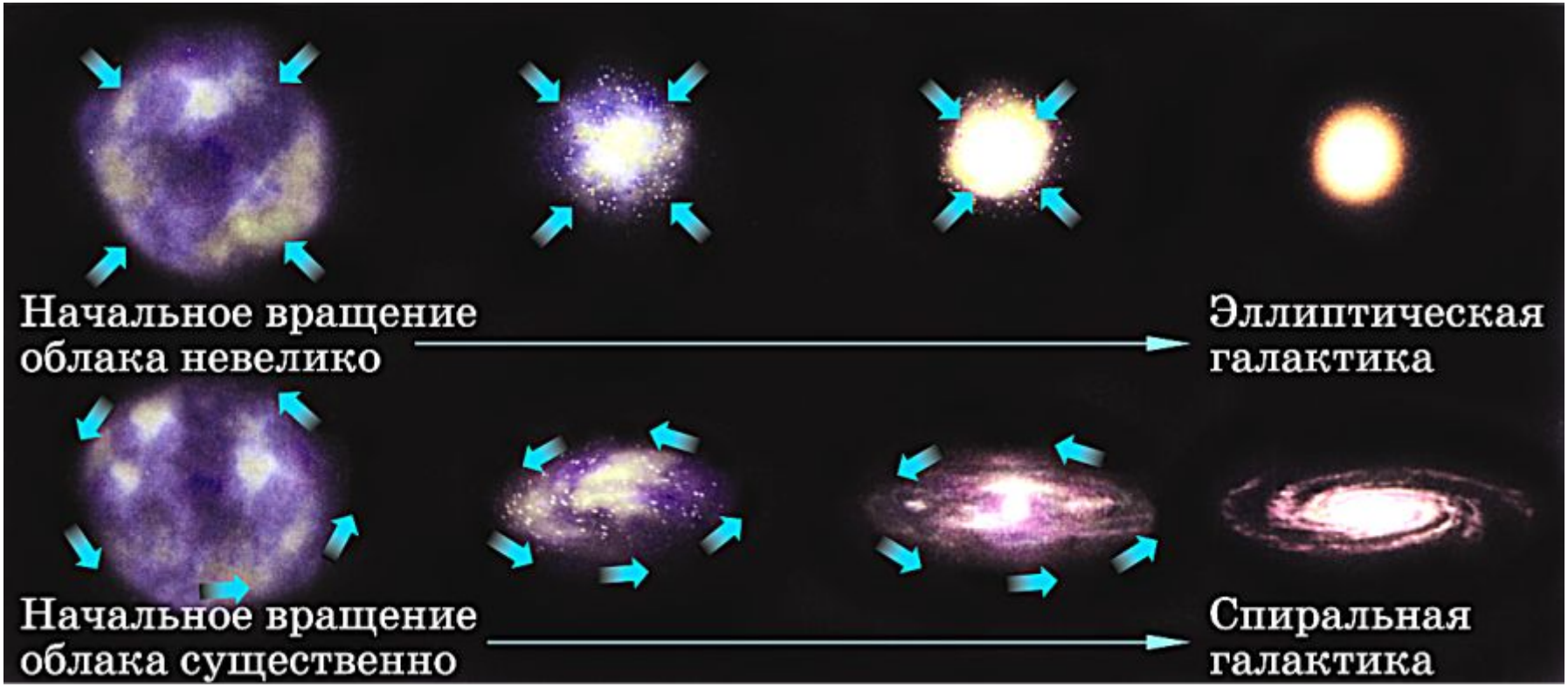
Гравитационное сжатие первоначального облака происходит асимметрично. Наибольшее притяжение возникает между наиболее близкими частями облака в направлении минимального размера. В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определенных плоскостях.

Со временем такая среда неизбежно разбивается на отдельные фрагменты, размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации.

Процесс гравитационного сжатия облака, начинается только, если его масса *m* оказывается больше некоторой минимальной массы , называемой массой Джинса в честь английского астрофизика ***Джеймса Джинса***.



Подобная масса характерна для небольших галактик.



Галактика образуется из огромного газового облака, размеры которого лишь незначительно превышают размер будущей галактики. При сжатии облака образуются первые звезды. Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы