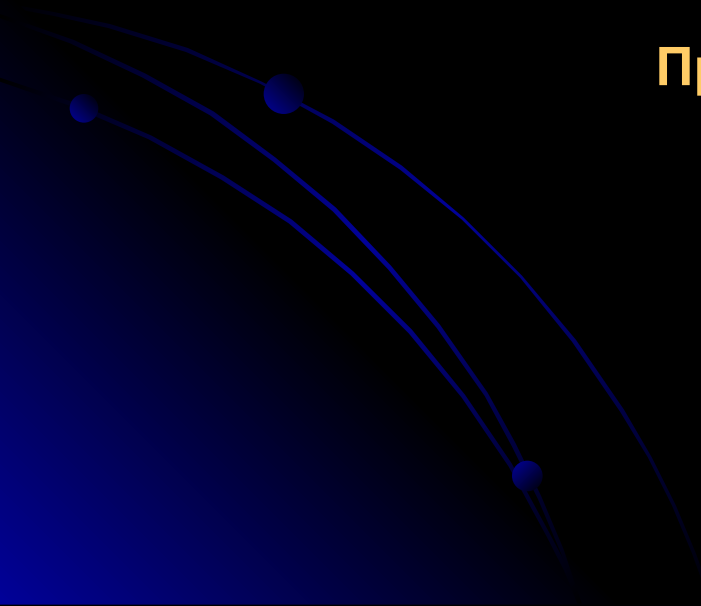


АСТРОФИЗИКА И ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

/с элементами космогонии/

Проф. В.А. Захожай



Разделы астрономии

- Астрометрия
- Небесная механика
- Астрофизика
- Звездная астрономия
- Космогония
- Космология

Астрофизика – наука* о природе небесных тел и космического вещества.

Звездная астрономия – наука, изучающая звездные системы.

Космогония – наука, изучающая происхождение и развитие космических тел и их систем

* – наука $\equiv$ раздел астрономии.

Объект исследования – первичное и более широкое понятие.

Предмет исследования – выделяется определенное свойство объекта.

Астрофизика

Объект исследования – космические тела и космическое вещество:

- Звезды.
- Субзвезды.
- Планеты.
- Вещество, входящее в состав космических тел и газопылевой составляющей Вселенной

Предмет исследования:

- Физические свойства.
- Элементный и химический состав.
- Процессы, происходящие в космических телах и космическом веществе.

Звездная астрономия

Объект исследования – звездные системы:

- Кратные звезды (субзвезды) и планетные системы.
- Звездные скопления и ассоциации.
- Галактики и их объединения различного уровня иерархии
 - подгруппы,
 - группы,
 - скопления,
 - сверхскопления

Предмет исследования:

- Общие закономерности.
- Состав.
- Звездная статистика.
- Кинематика.
- Динамика.
- Космография – подраздел, изучающий структуру Метагалактики (Вселенной).

Космогония

Объект исследования – происхождение и эволюция космических объектов:

- Космических тел.
- Космического вещества.
- Звездных систем и их объединений различного уровня иерархии.

Предмет исследования:

- Процесс образование
 - космических тел,
 - звездных систем.
- Эволюция
 - динамическая,
 - химическая,
 - фотометрическая,
 - состава космических объектов.
- Изменение статистических свойств с возрастом
 - выборки космических объектов,
 - звездных систем,
 - объединений различного уровня иерархии.

Связи между астрофизикой, звездной астрономией и космогонией настолько велики, что без эволюционной составляющей объяснение всего разнообразия космических объектов невозможно для объяснения и понимания.

Этим вызвано и **название лекции**

Астрофизика и звездная астрономия
/с элементами космогонии/

Лекция состоит из 2-х частей:

- астрофизической,
- звездно астрономической,

включающей все вопросы перечня Гос. экзамена

Астрофизическая составляющая:

- **Классификация космических тел**
 - звезд,
 - субзвезд,
 - планет и экзопланет.
- **Спектральная (одно- и двумерная) классификация звезд и субзвезд.**
- **Свойства космических тел на ключевых стадиях эволюции**
 - зависимость от
 - = начальной массы,
 - = элементного (химического) состава;
 - эволюционная диаграмма Герцшпрунга-Рессела;
 - особенности эволюции звезд в ТДС;
 - схема «предки – потомки».

Звездно астрономическая составляющая:

- **Классификация звездных систем и их объединений.**
- **Основные свойства**
 - кратных звездных систем, — планетных систем,
 - звездных скоплений и ассоциаций, — галактик,
 - объединений галактик разного уровня иерархии,
 - межзвездной среды в звездных системах.
- **Звездная статистика.**
- **Кинематика и динамика звездных систем.**
- **Космография**
 - Местная звездная система (Пояс Гулда);
 - Галактика и Наша звездная система;
 - Местная группа галактик (МГГ)
 - = подсистема Андромеды, = галактики Периферии;
 - Местное сверхскопление
 - = окрестности МГГ, = общая структура;
 - Пространственно-временная структура Вселенной.
- **Эволюция звездных систем.**
- **Общий сценарий развития Вселенной.**

Классификация космических тел

Космические тела различают по их

- начальной массе,
- механизму образования,
- характерным процессам, происходящим в недрах,
- энергетике, ответственной за их светимость.

Шкала

масс

Астероидные тела
метеорное вещество

Планеты

Субзвезды

Звезды

$10^{-9} \div 10^{-11}$

0.012

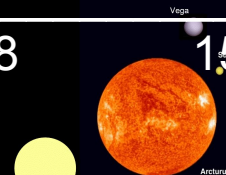
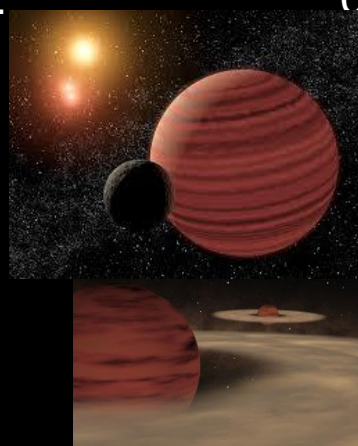
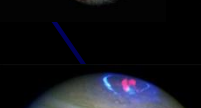
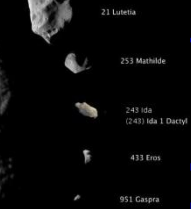
0.08

$150 \div 600?$

$M/M_{\odot}$



4 Vesta



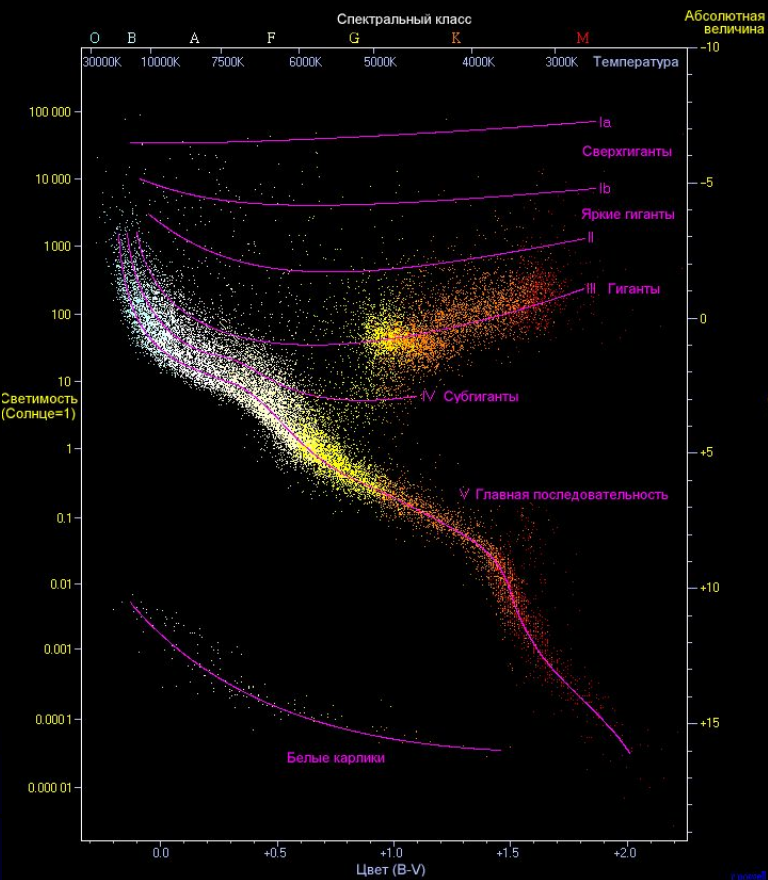
Классификация космических тел

Звезды – космические тела, образующиеся путем самогравитации, и эволюционирующие за счет гравитационного сжатия и термоядерных реакций, включая полный протон-протонный цикл, в результате которых из ядер легких элементов синтезируются ядра более тяжелых элементов.

Субзвезды – космические тела, образующиеся путем самогравитации, содержащие вещество с различной степенью вырождения электронов и ионизации атомов, и эволюционирующие за счет запасов внутренней энергии.

Планеты – космические тела, образующиеся путем коагуляции, находящиеся в конденсированном состоянии и эволюционирующие вследствие гравитационной дифференциации вещества.

Звезды



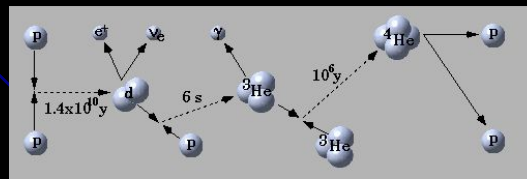
Sp: WR – O – B – A – F – G – K – M5

Характеристики:

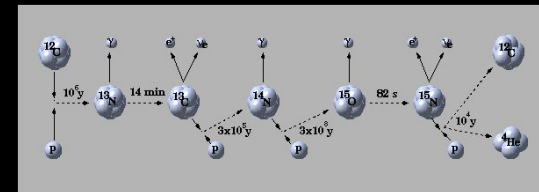
V: $M = 0.08 \div 150 M_{\odot}$
 $R \approx 0.1 \div 15 R_{\odot}$
 $T_{ef} \approx 2\,800 \div 50\,000 K$
 $L \approx 0.01 \div 800\,000 L_{\odot}$

III: $R \approx 50 \div 100 R_{\odot}$
 I: $R > 100 R_{\odot}$

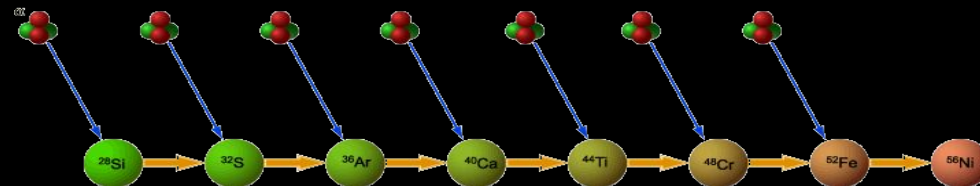
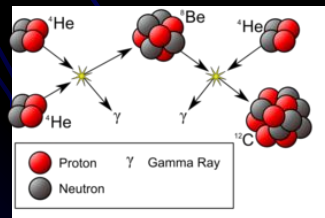
V: $p-p$ – цикл
 Pop I: $M \leq M_{\odot}$
 Pop III



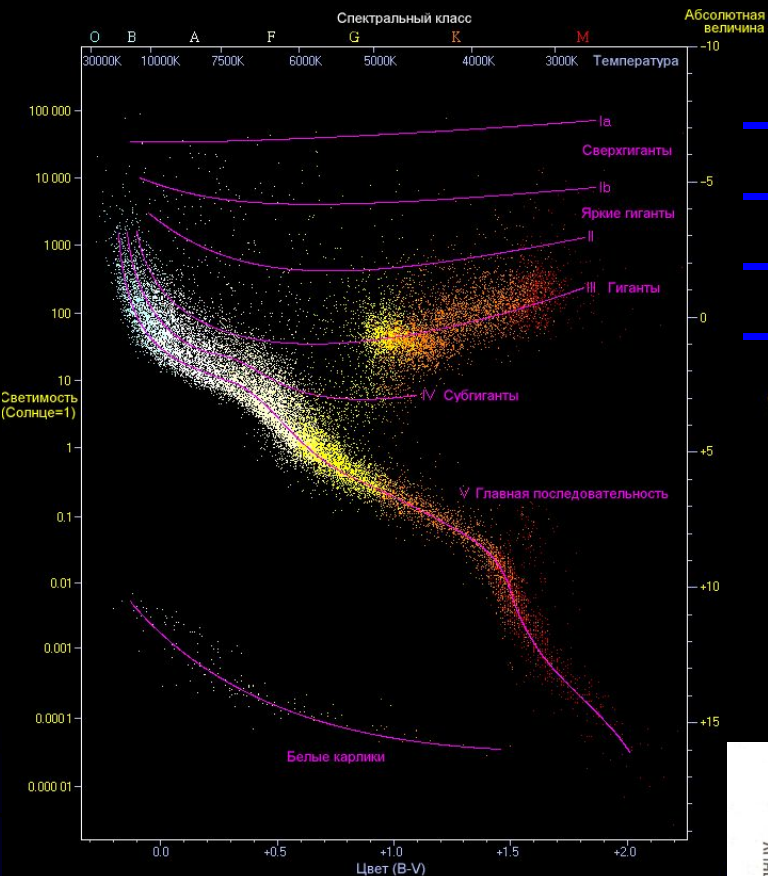
CNO – цикл
 $M > M_{\odot}$



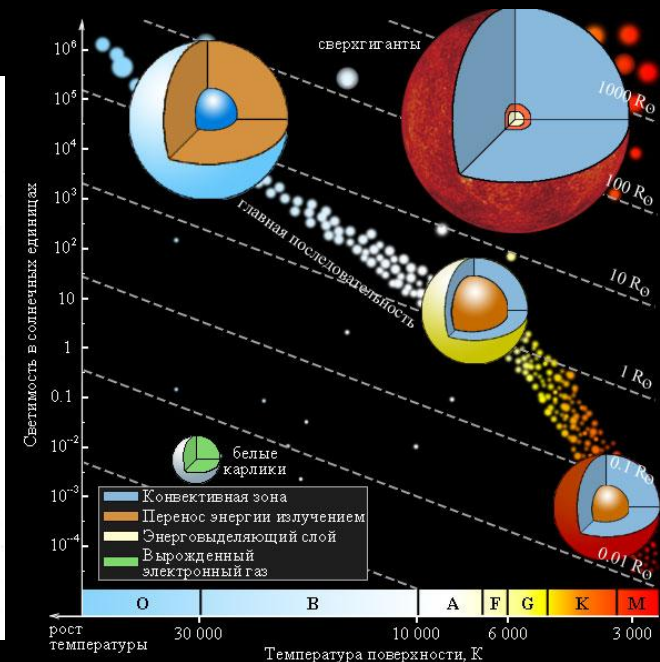
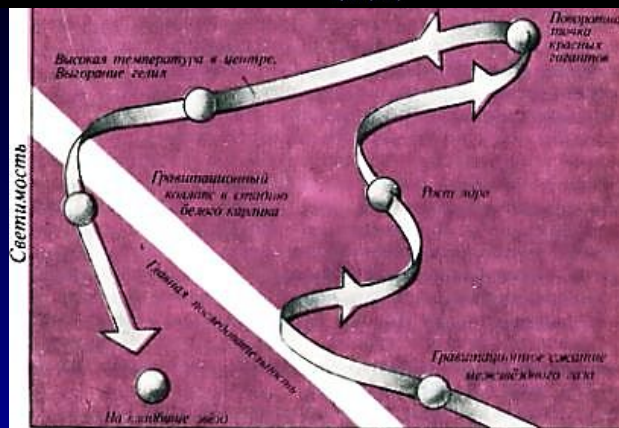
I ÷ III: 3α – p-ция ...
 Fe, Co, Ni



Основные стадии эволюции звезд



- Протозвезда.
- Главная последовательность.
- Гигант.
- Звездные остатки
 - = белый карлик,
 - = нейтронная зв.,
 - = черная дыра.

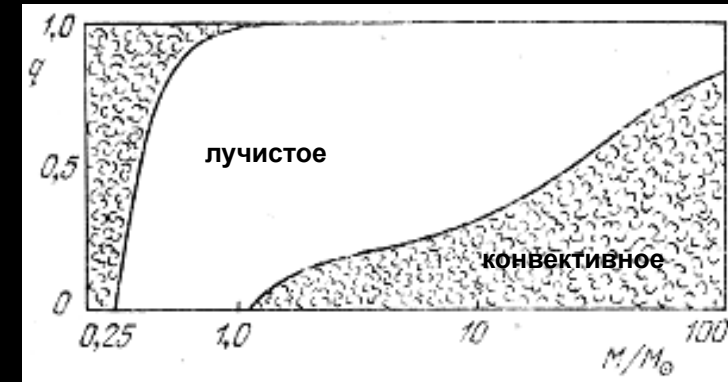


Особенности строения и эволюции звезд

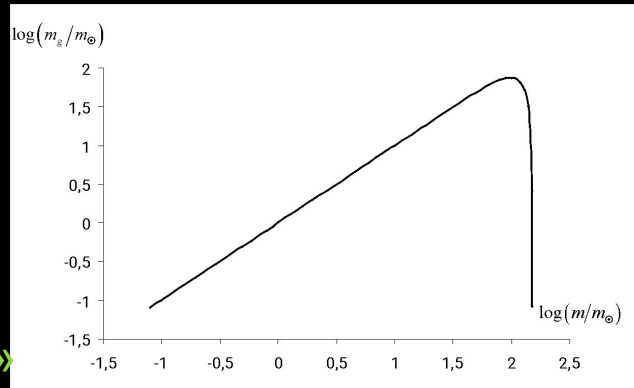
Зоны равновесия

Темп эволюции звезд зависит от

- механизма передачи энергии «с центра наружу»;
- элементного состава;
- начальной массы;
- потери массы вещества.

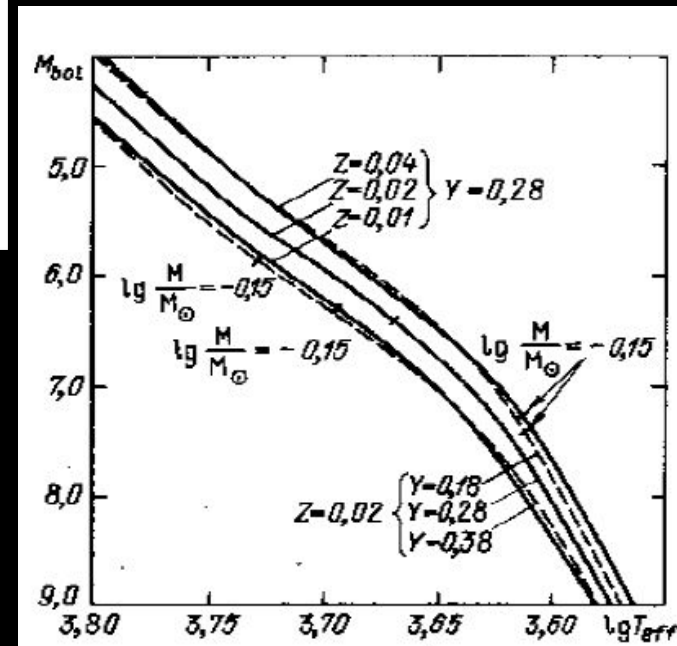


Зависимость «масса гигантов нулевого возраста – масса звезд нулевого возраста (Pop I)»



Звезды Pop III

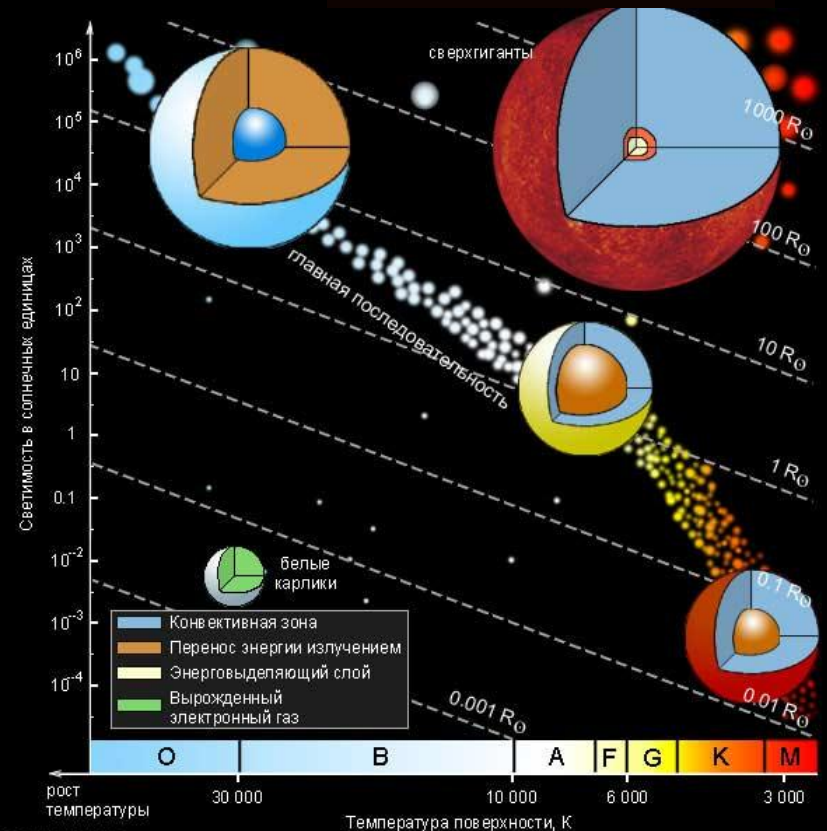
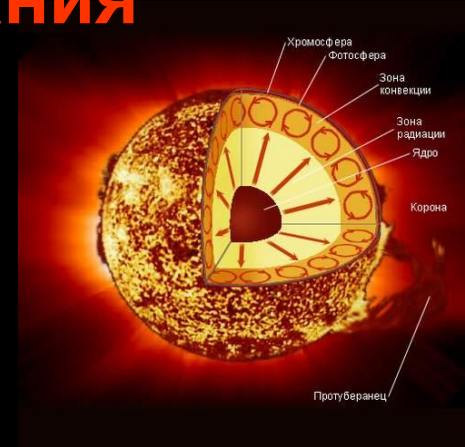
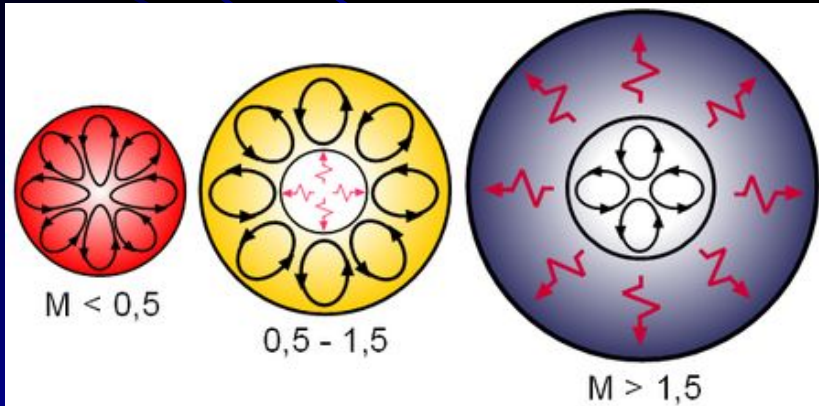
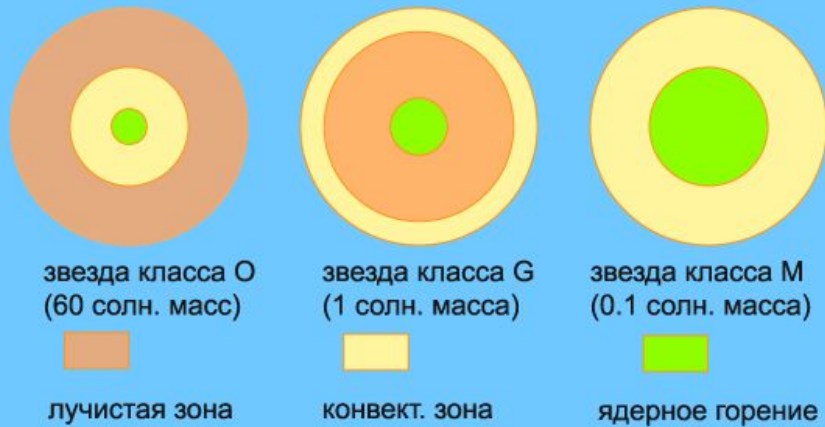
- теряют за счет звездного ветра
 - 3% при $M = 300 M_{\odot}$,
 - 5% при $M = 500 M_{\odot}$;
- при $M > 280 M_{\odot}$ заканчивают эволюцию стадией черных дыр.



Внутренняя структура звезд по результатам численного моделирования

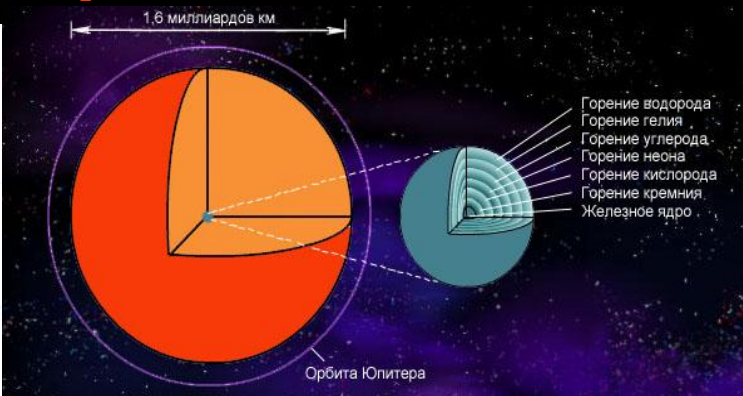
Главная последовательность

Внутренняя структура звезд главной последовательности

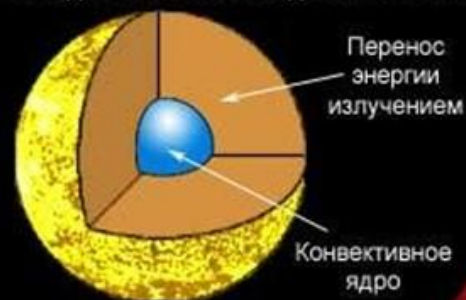


Внутренняя структура звезд по результатам численного моделирования

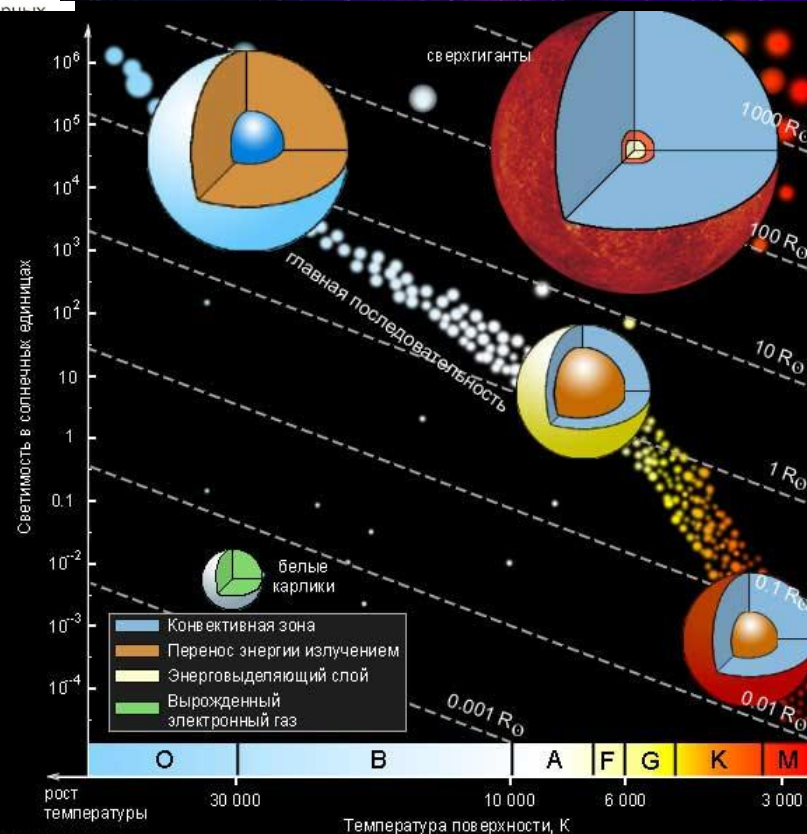
Звезды-гиганты Сверхгиганты



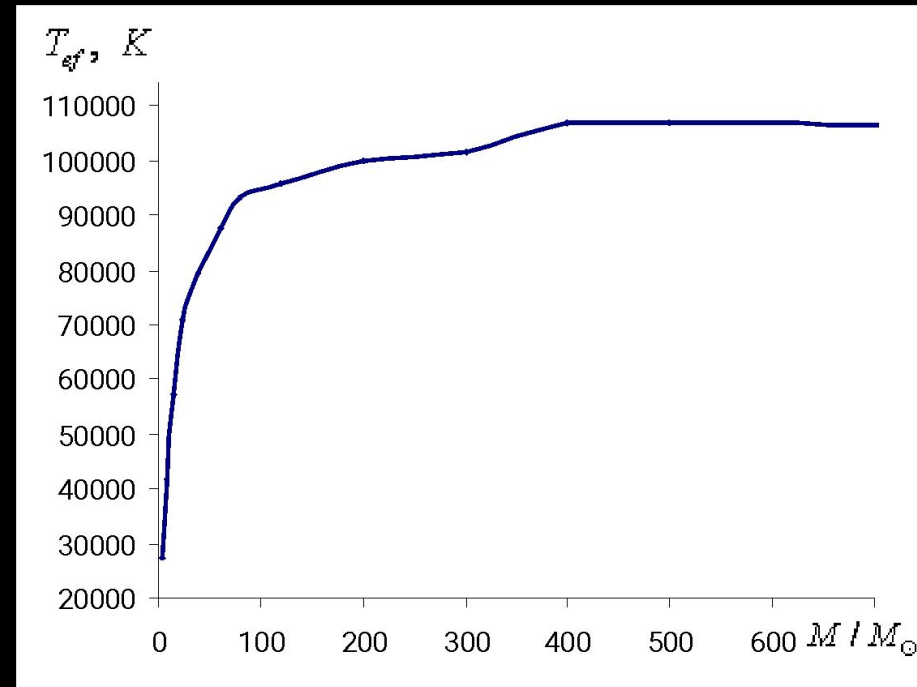
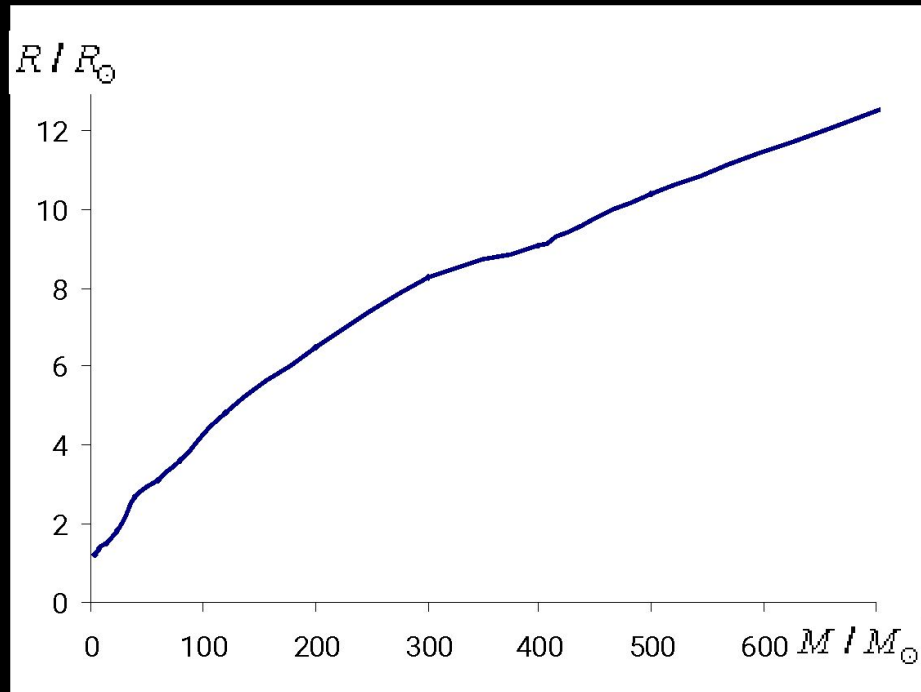
Звезды главной последовательности



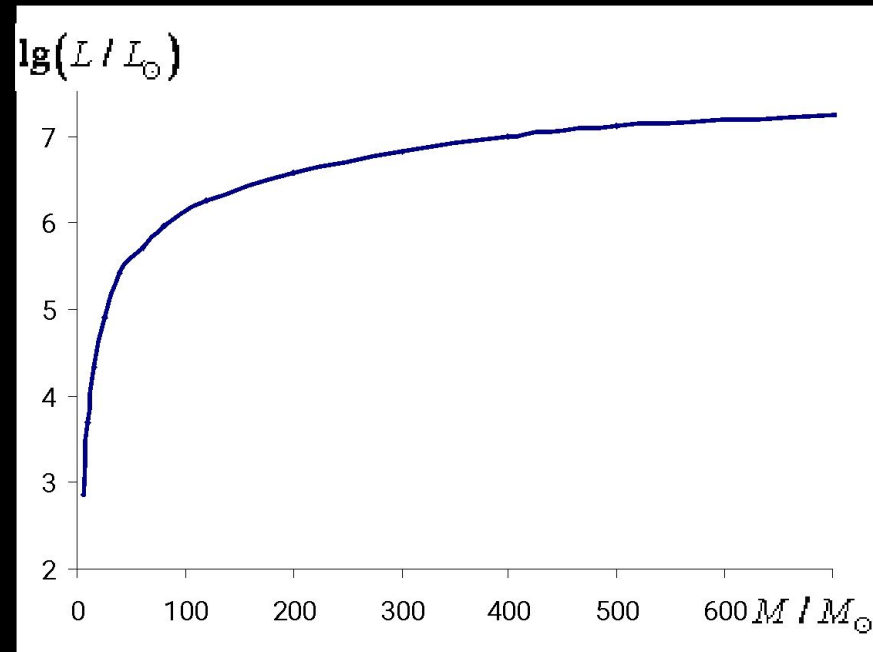
Белый карлик



Звезды Pop III

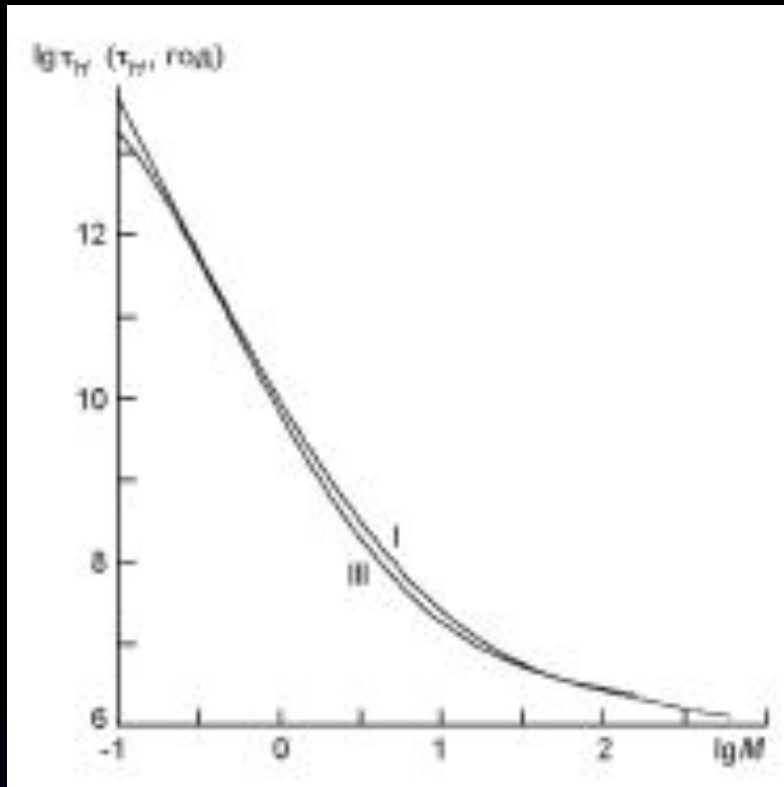


У звезд населения III
ожидаются систематически
меньшие радиусы и большие
эффективные температуры



[Schaerer D. A&A, 2002, 382, 28]

Особенности эволюции звезд

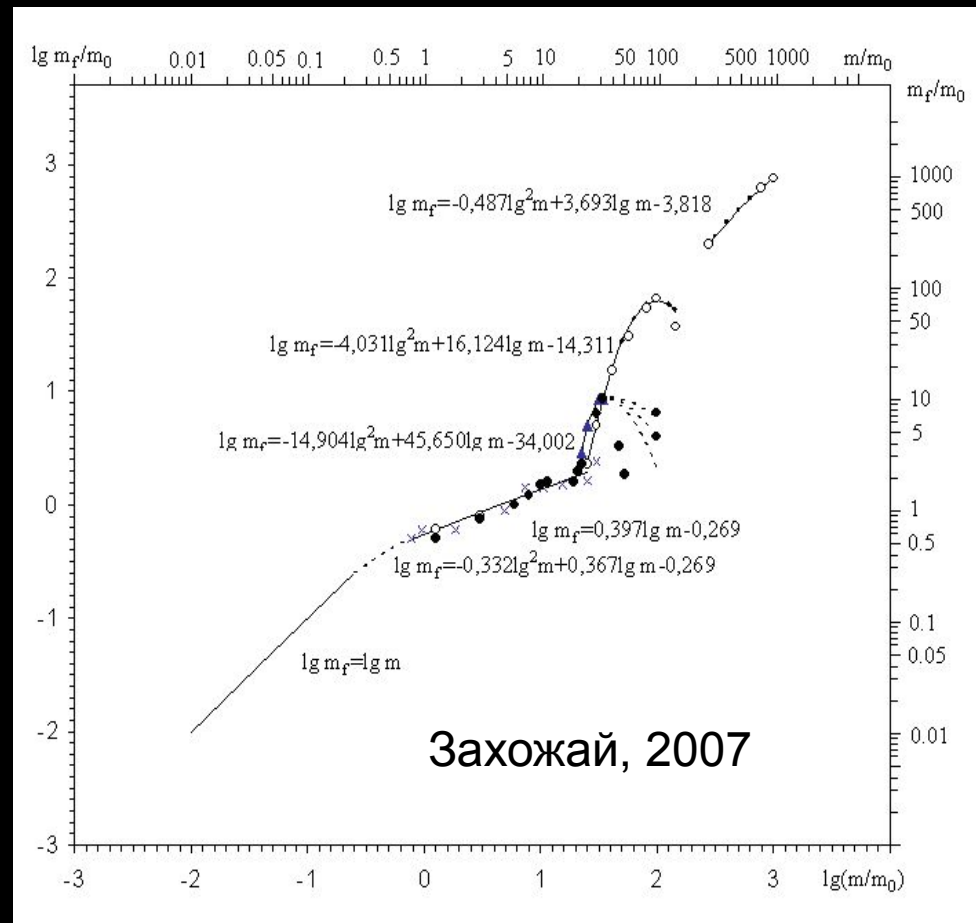


Зависимость «время горения водорода — масса звезд нулевого возраста»

Максимальные массы ($M/M_{\odot}$) звезд ч. д. («зв.»):

- Pop I — 150 ≈ 10
- Pop III — 500÷600 ≈ 500

Зависимость «масса звездного остатка — масса звезд нулевого возраста»

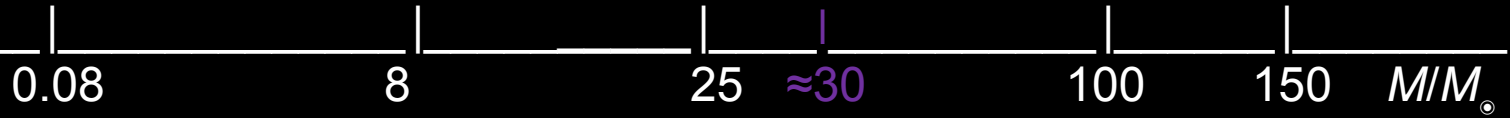


Звезды → звездные остатки

Шкала звездных масс

Субзвезды

Звезды



Шкала масс звездных остатков

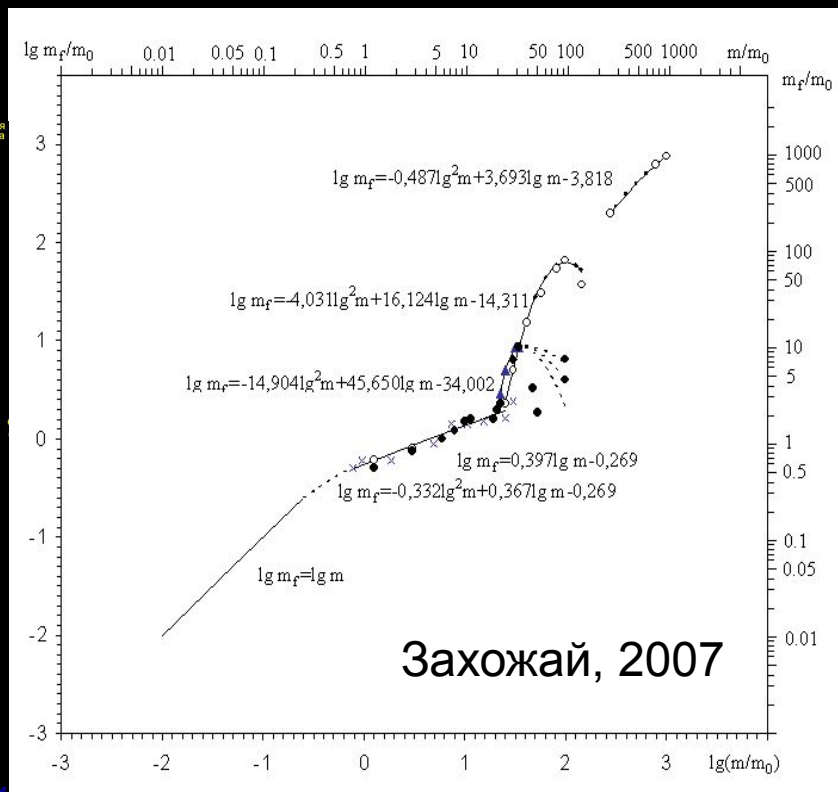
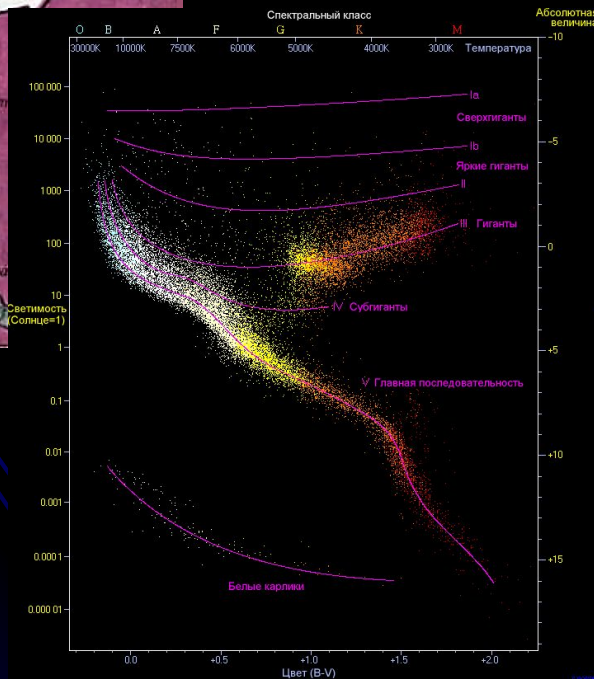
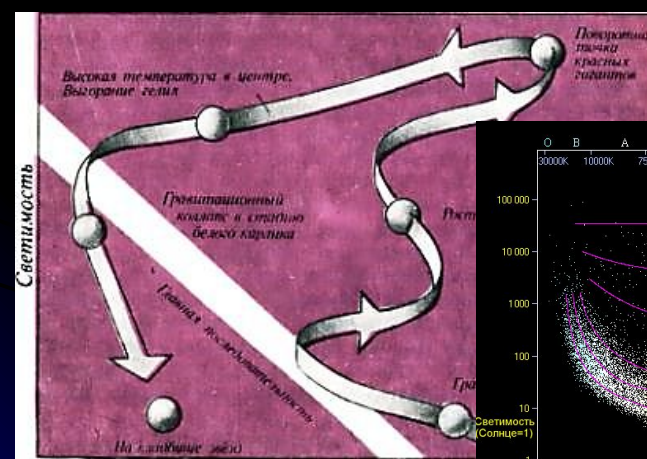
Черные карлики

Бел. карлики

Нейтр. звезды

Черные дыры

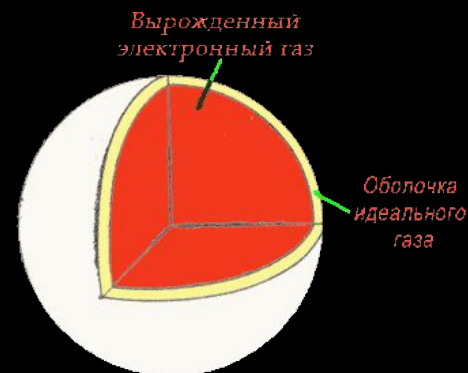
Межзв. газ



Звездные остатки

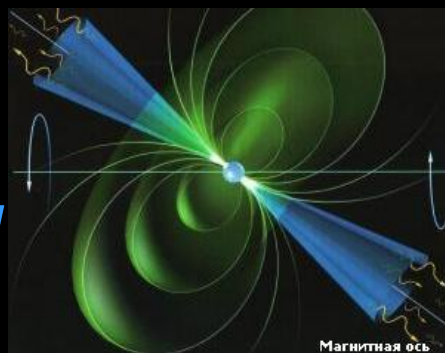
Белые карлики

$$P_{E1} = K_1 \left(\frac{1}{\mu_E} \rho \right)^{5/3} \quad P_{E2} = K_2 \left(\frac{1}{\mu_E} \rho \right)^{4/3} \quad P_a = \frac{1}{\mu_a} \frac{k}{m_p} \rho T$$



Нейтронные звезды

$$P_{n1} = K_{n1} \rho^{5/3} \quad P_{n2} = K_{n2} \rho^{4/3}$$



1-я стадия ($t < 10$ Мг) – **пульсары**

Черные дыры

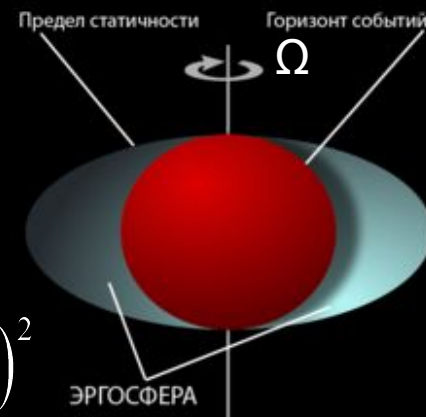
Рожденные частицы, улетая из эргосферы на ∞ , уносят $E_{\text{ч.д.}}$:

$$\Omega = \frac{4\pi I}{M_{\text{чд}} S}$$

I – момент импульса тела, из которого возникла ч.д.

$$dE_{\text{вращ}} / dt \approx \hbar \Omega^2$$

$$S = 4\pi r_g^2 = 4\pi \left(2GM_{\text{чд}} / c^2 \right)^2$$



Основные стадии эволюции звезд

0.08 0.25 0.5 2.3 8 25 100 120 150 M/M_☉

M/M_☉

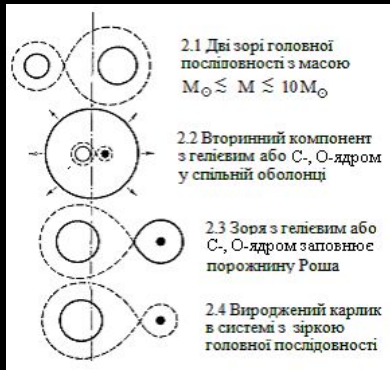
- 0.08 – **min** M_{3B}
- 0.08 – 0.25 – **полностью конвективные звезды** (не проходят стадию гигантов)
- 0.08 – 0.5 – **конечная стадия: He- белый карлик**
- < 2.3 – **начало 3 α - р-ции идет в вырожденном ядре (He- вспышка)**
- ≤ 8 – **конечная стадия – белый карлик**
- 8 – 25 – **конечная стадия – нейтронная звезда** (вырождение в ядре не наступает вплоть до образования хим. элементов «железного пика» (^{56}Fe , ^{58}Co , ^{59}Ni))
- 25 – 100 – **конечная стадия – черная дыра**
- > 100 – **звездные остатки не образуются**
- 120 – 150 – **не проходят стадию гигантов**
- 150 – **max** M_{3B}
- В звездах образуются все химические элементы до «железного пика»**
- ^{251}Cf (Калифорний) – **max** масса ядра хим. элементов, образующаяся при взрыве сверхновых звезд

Периоды	Ряды	Группы элементов																			0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII									IX																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		- R ₂ O	- RO	- R ₂ O ₃	RH ₄ RO ₂	RH ₃ R ₂ O ₃	RH ₂ RO ₂	RH	R ₂ O ₃	RO ₄									-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1	I	1 H 1.00794 водород																		2 He 4.00260 гелий																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
2	II	3 Li 6.941 литий	4 Be 9.01218 бериллий	5 B 10.81 бор	6 C 12.011 углерод	7 N 14.007 азот	8 O 15.9994 кислород	9 F 18.998403 фтор												10 Ne 20.179 неон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
3	III	11 Na 22.98977 натрий	12 Mg 24.304 магний	13 Al 26.981538 алюминий	14 Si 28.0855 кремний	15 P 30.97376 фосфор	16 S 32.06 сера	17 Cl 35.453 хлор												18 Ar 39.948 аргон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
4	IV	19 K 39.098 калий	20 Ca 40.08 кальций	21 Sc 44.9559 скандий	22 Ti 47.88 титан	23 V 50.9415 ванадий	24 Cr 51.9961 хром	25 Mn 54.938045 марганец	26 Fe 55.93494 железо	27 Co 58.933195 кобальт	28 Ni 58.933195 никель									36 Kr 83.80 криптон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
5	V	29 Cu 63.546 медь	30 Zn 65.38 цинк	31 Ga 69.723 галлий	32 Ge 72.59 германий	33 As 74.9216 мышьяк	34 Se 78.96 селен	35 Br 79.904 бром												36 Kr 83.80 криптон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
6	VI	37 Rb 85.478 рубидий	38 Sr 87.62 стронций	39 Y 88.9059 иттрий	40 Zr 91.224 цирконий	41 Nb 92.90638 ниобий	42 Mo 95.94 молибден	43 Tc 98.9062 технеций	44 Ru 101.07 рутений	45 Rh 102.9055 родий	46 Pd 106.42 палладий									54 Rn 222 радон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
7	VII	47 Ag 107.8682 серебро	48 Cd 112.41 кадмий	49 In 114.82 индий	50 Sn 118.69 олово	51 Sb 121.75 сурьма	52 Te 127.60 теллур	53 I 126.9046 йод												54 Rn 222 радон																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
8	VIII	55 Cs 132.9054 цезий	56 Ba 137.33 барий	57 La-Lu 138.90547 лантаноиды	58 Ce 140.12 церий	59 Pr 140.90765 прометий	60 Nd 144.24 ниобий	61 Pm 144.91274 прометий	62 Sm 150.36 самарий	63 Eu 151.964669 европий	64 Gd 157.25 гадолиний	65 Tb 158.92519 тербий	66 Dy 162.50 диurio	67 Ho 164.930329 holmium	68 Er 167.259 erbium	69 Tm 168.934869 thulium	70 Yb 173.054 ytterbium	71 Lu 174.967 lutetium	72 Hf 178.49 hafnium	73 Ta 180.9479 tantalum	74 W 183.85 вольфрам	75 Re 186.207 рений	76 Os 190.23 осмий	77 Ir 192.22 иридий	78 Pt 195.084 платина																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							</

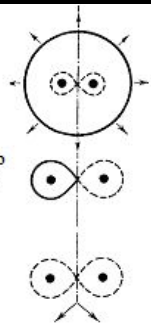
Особенности эволюции звезд в ТДС

1%

$M < 8 M_{\odot}$



2.5 Дві гелієві або С-, О-зорі у спільній оболонці



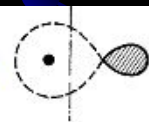
2.6 Зоря з гелієвим або С-, О-ядром заповнює порожнину Роша (повторна нова)

2.7 Два вироджені карлики

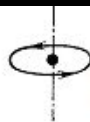
2.10 Червоний карлик з виродженням С-, О-ядром - продукт зближення компонентів внаслідок випромінювання гравітаційних хвиль

2.11 Червоний карлик з нейтронною зорею (барстер)

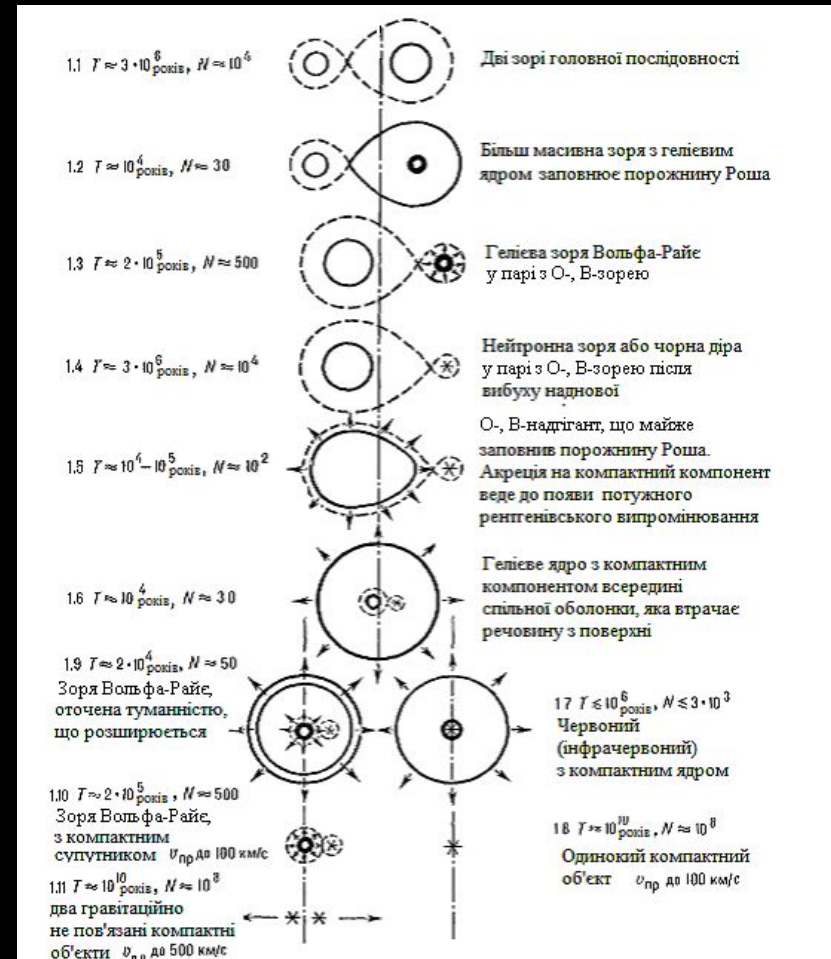
2.8 Один із карликів заповнює порожнину Роша (наднова зоря?)



2.9 Гелієвий або С-, О-карлик, оточений важким диском (наднова зоря?)



$M > 8 M_{\odot}$



Эволюционные «сценарии» компонентов ТДС

Штриховые линии

— полость Роша,

— положение центра масс.

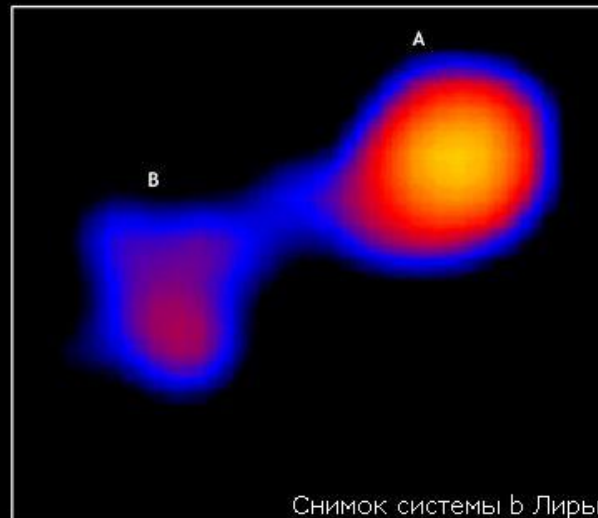
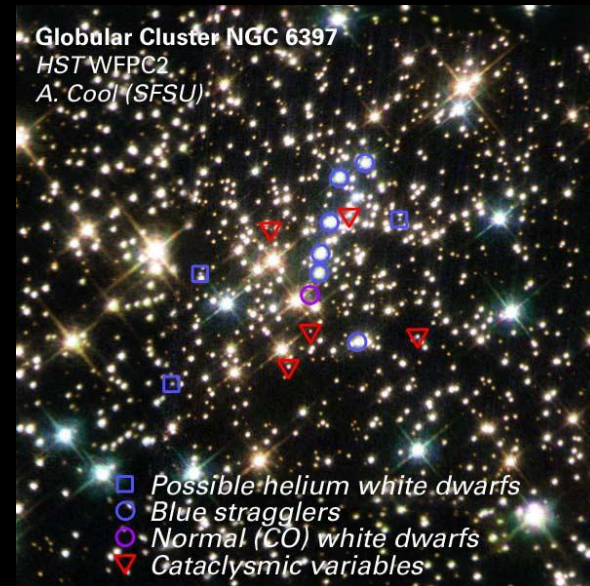
T — время жизни.

N — ожидаемое число объектов в Галактике

Особенности эволюции звезд в ТДС

- Звезды WR: $T_{ef} \approx 100\,000\text{ K}$
- Не- белые карлики в ТДС
(шаровое скопление NGC 6397)

Синие квадраты — гелиевые белые карлики,
фиолетовые кружки — «нормальные» белые
карлики с высоким содержанием углерода



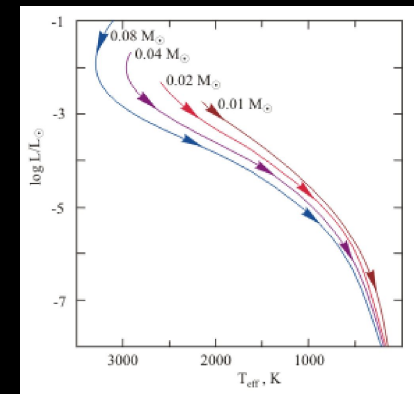
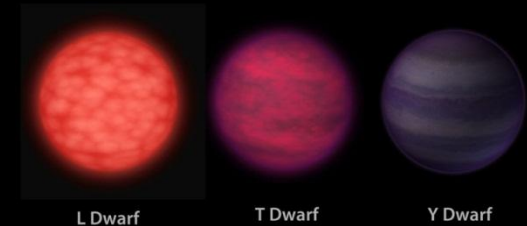
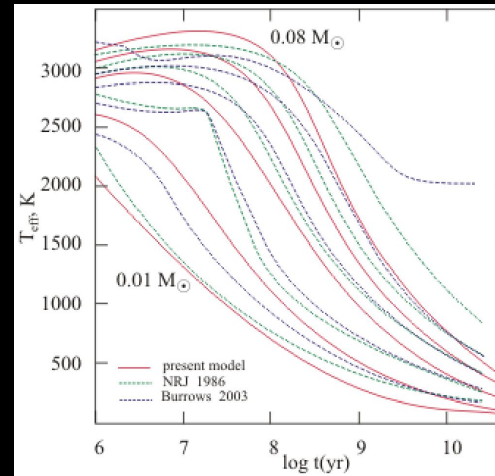
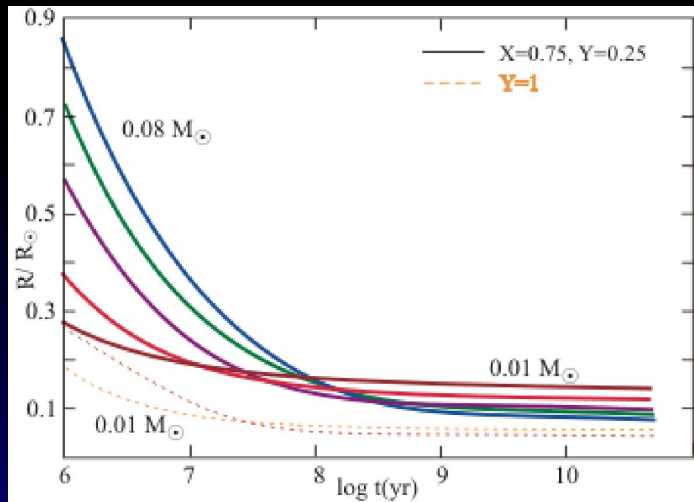
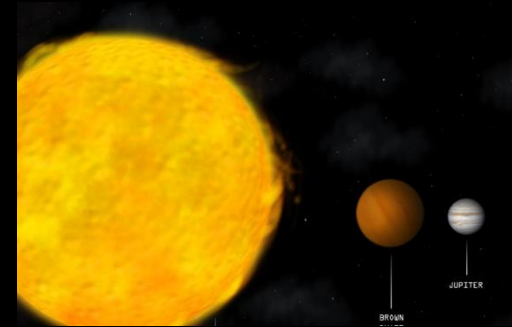
Субзвезды

Sp: **WR – O – B – A – F – G – K – M5 – M5.5 – L – T – Y**
звезды **субзвезды**

При $M < 0.08 M_{\odot}$ ($T_c < 3.2 \cdot 10^6$ K, $Sp \geq 5.5V$) полный p–p цикл не идет

При $T_c < 3.2 \cdot 10^6$ K горит: водород $M > 0.07 M_{\odot}$
 литий $M > 0.06 M_{\odot}$
 дейтерий $M > 0.012 M_{\odot}$

У объектов с $M < 0.012 M_{\odot}$ не идут никакие реакции



Субзвезды

Sp: **WR – O – B – A – F – G – K – M5 – M5.5 – L – T – Y**
звезды субзвезды

M5.5–M9.5: $T_{\text{эф}} = 2800 - 2400 \text{ K},$
L: $2400 - 1500 \text{ K},$
T: $1500 - 900 \text{ K},$
Y: $< 900 \text{ K}.$

Спектральный класс

- не зависит от масс,
- зависит от возраста.

Климат

Остывание ($T < 2\,000 \text{ K}$) Fe-, Si- газов в атмосфере ведет к образованию из их конденсата (капелек и частиц) – облаков.

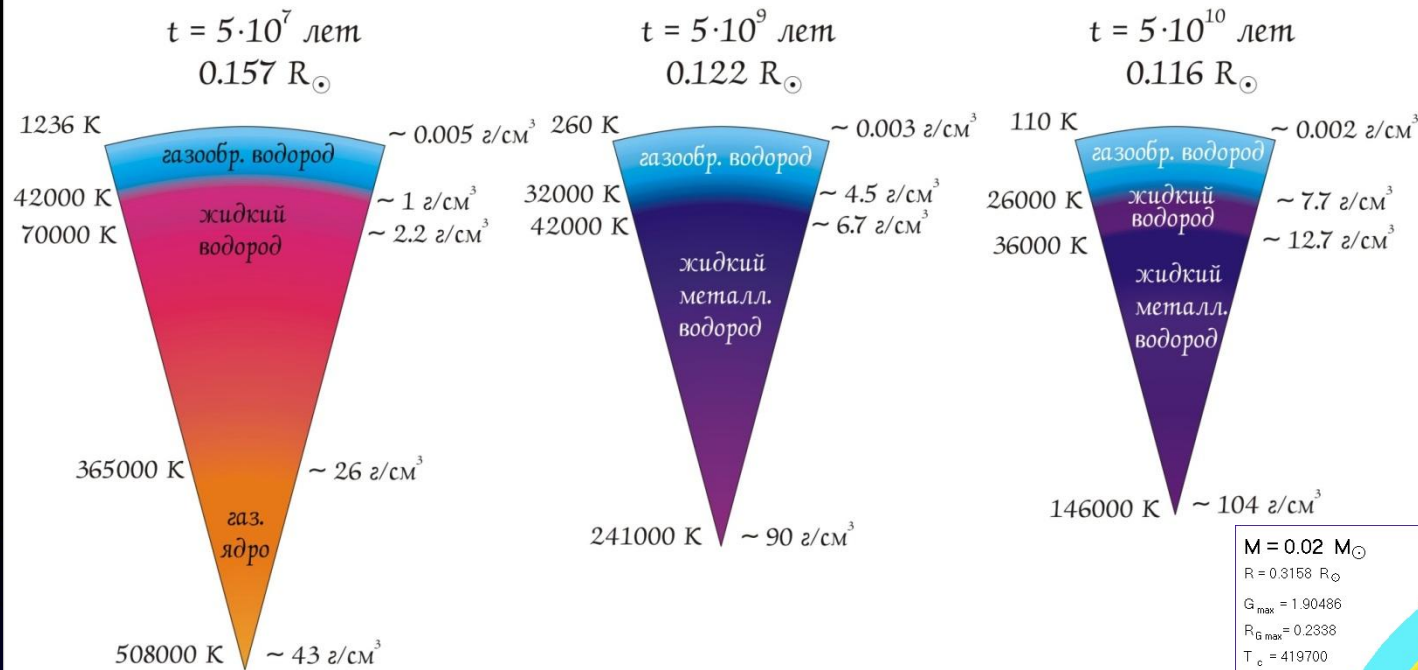
Наблюдения (КТ Хаббла и Спитцера):

- Нисходящие потоки Fe-, Si- частиц и капель.
Интерпретация: наличие дождей из этих частиц.
- Эпизодическое увеличение яркости.

Интерпретация: обнажение нижних более горячих слоев атмосферы вследствие рассеивания облаков в процессе метеорологических процессов.

Эволюция вещества недр

Субзвезда $M = 0.02 M_{\odot}$ ($X=0.75$, $Y=0.25$)



$M = 0.02 M_{\odot}$

$R = 0.3158 R_{\odot}$

$G_{\max} = 1.90486$

$R_{G \max} = 0.2338$

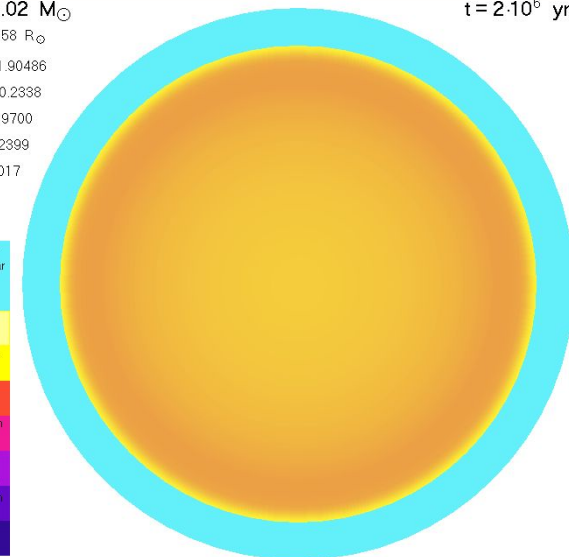
$T_c = 419700$

$\rho_{0c} = 5.2399$

$G_c = 1.017$

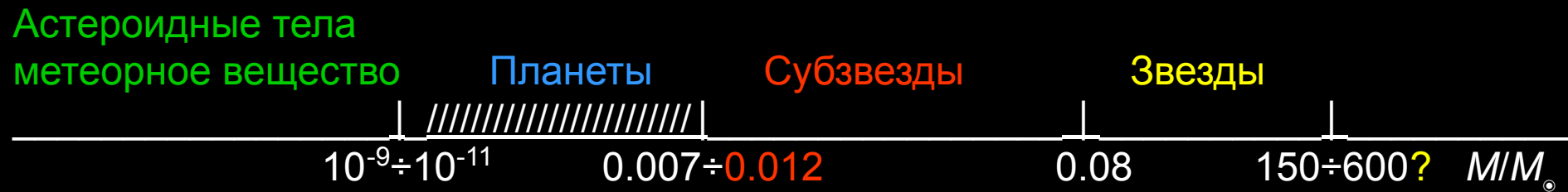
$t = 2 \cdot 10^6$ yr

atomic
molecular
neutral
gas
fully
ionized
plasma
gas
liquid
hydrogen
liquid
metallic
hydrogen



Планеты и экзопланеты

Шкала масс



П л а н е т ы — космические тела, образующиеся, как правило, путем коагуляции, находящиеся в конденсированном состоянии и эволюционирующие вследствие гравитационной дифференциации вещества.

$0.007 M_{\odot}$ — min M способная образоваться путем самогравитации
[M. Rees, 1976]

$0.012 M_{\odot}$ — min M достаточная для горения дейтерия
[A.S. Grossman, H.C. Graboske, 1973]

$0.043 M_{\odot}$ — max M способная образоваться путем коагуляции
[E.I. Vorobyov, S. Basu, 2013; B. Ma, J. Ge, 2013]

Классификация планет и их атмосфер

В зависимости от удаленности от ц. объекта возникают условия для формирования планет различных типов:

- **Металлические (Me):** $\langle \rho \rangle \sim 8 \text{ г/см}^3$, $M_{min} \sim 10^{24} \text{ г} \approx 10^{-9} M_{\odot}$, $R_{min} \approx 780 \text{ км.}$
- **Силикатные (Si):** $\langle \rho \rangle \sim 3 \text{ г/см}^3$, $M_{min} \sim 10^{23} \text{ г} \approx 10^{-10} M_{\odot}$, $R_{min} \approx 500 \text{ км.}$

Время эволюции ($T_{\odot} \sim 10^8$ лет) сравнимо со временем аккумуляции планет земного типа. Тела с $M < 10^{-10} M_{\odot}$ перестают эволюционировать сразу после образования.

- **Ледяные (Ic):** $\langle \rho \rangle \sim 1 \text{ г/см}^3$, $M_{min} \sim 10^{22} \text{ г} \approx 10^{-11} M_{\odot}$, $R_{min} \approx 340 \text{ км.}$
- **Водородно-гелиевые (H-He):** $\langle \rho \rangle \sim 1 \text{ г/см}^3$, $M_{min} \sim 10^{29} \text{ г} \approx 10^{-4} M_{\odot} \sim M_{\text{ж}}$,
 $R_{min} \approx 30\,000 \text{ км.}$

Планеты способные удерживать H-He - атмосферу .

Шкала масс

Астероидные тела
метеорное вещество

Планеты

Субзвезды

Звезды

$10^{-9} \div 10^{-11}$

0.012

0.08

150 ÷ 600 ?

$M/M_{\odot}$

Классификация планет и их атмосфер

В зависимости от удаленности от ц. объекта возникают условия для формирования планетных атмосфер:

- **“класс “Юпитера”** ($T_{\text{ef}} \approx 150 \text{ K}$) с аммиачными облаками;
- **“водяной” класс** ($T_{\text{ef}} \approx 250 \text{ K}$) с преобладанием в облаках конденсированной воды;
- **класс без облаков** ($T_{\text{ef}} \approx 350 \text{ K}$);
- **высокотемпературный класс** ($T_{\text{ef}} \approx 900 \text{ K}$), где преобладает поглощение щелочными металлами и железом.

Аммиачный класс атмосфер соответствует водородно-гелиевым планетам, поскольку молекулы метана, аммиака, водорода, азота и воды наиболее характерны для низкотемпературной зоны околозвездного окружения.

Высокотемпературный класс должен быть характерным для наиболее близких к звездам планетам, вероятно, – металлическим.

Вода и углекислый газ, по-видимому, характерны для атмосфер, температура которых $\approx 200\text{-}300 \text{ K}$, как это наблюдается в Солнечной системе у силикатно-металлических планет.

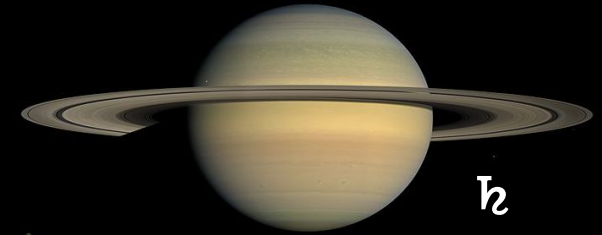
Проявление общих закономерностей в Солнечной системе

Силикатно-металлические (Me-Si) и
металло-силикатная планеты (Si-Me)

Водородно-гелиевые планеты (H-He)



Ледяные гиганты (glc)



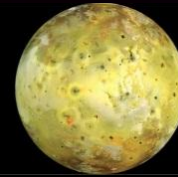
dSi-Me:

Карликовые планеты (d)



dlc-Si:

dSi-lc:

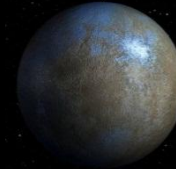
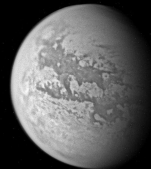
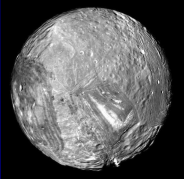


Луна

Ио

Ганимед

Европа



Миранда

Каллисто

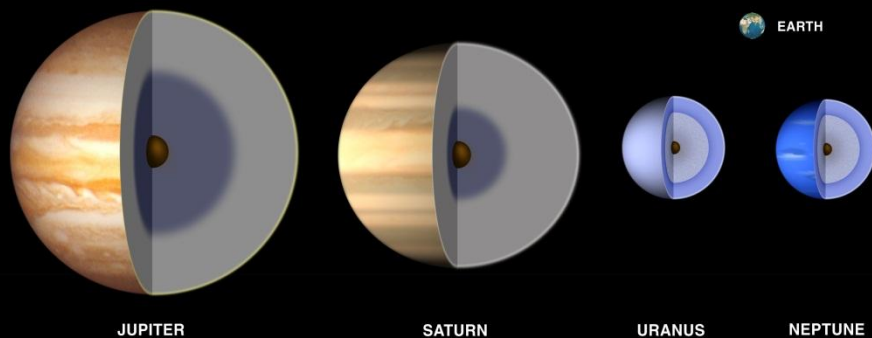
Титан

Церера

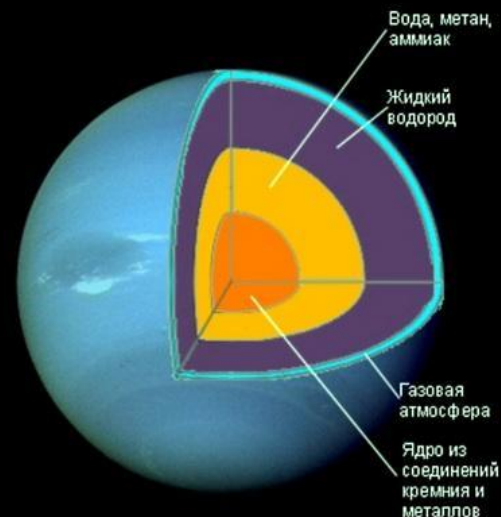
Плутон

Тефия

Внутренняя структура планет по результатам численного моделирования



- Molecular hydrogen
- Metallic hydrogen
- Hydrogen, helium, methane gas
- Mantle (water, ammonia, methane ices)
- Core (rock, ice)



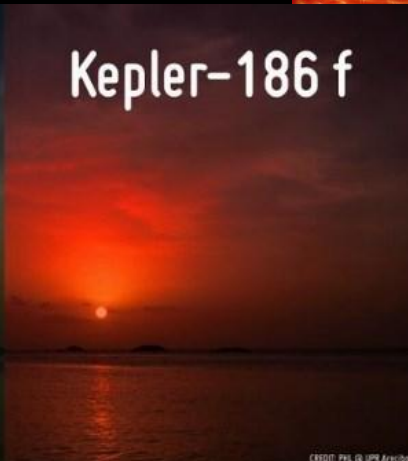
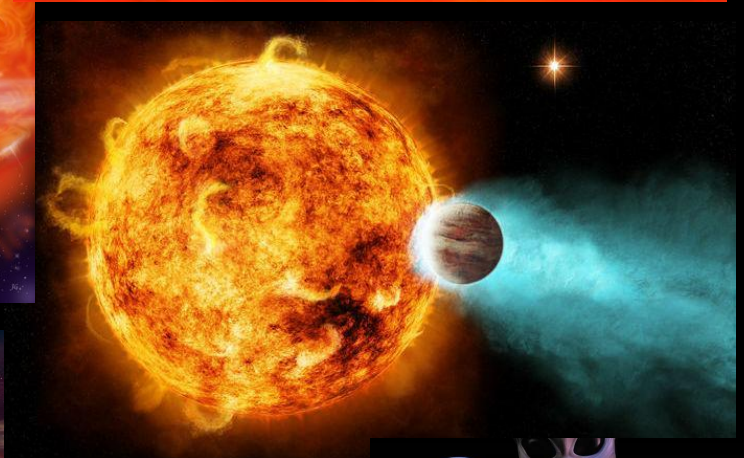
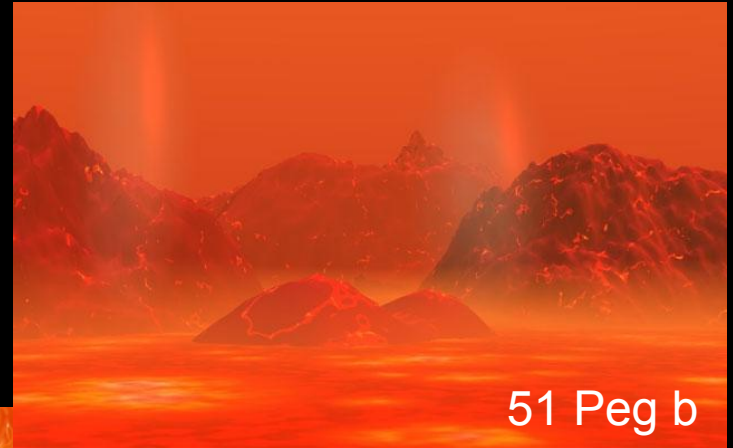
- КОРА (Crust)
- МАНТИЯ (Mantle)
- ЯДРО (Core)

Планеты и экзопланеты

1995 г. – открытие «горячего юпитера» **Беллефонт у 51 Peg**
[M. Mayor, D. Queloz].

51 Peg b:

$M_{\text{pl-min}} = 0.5 M_J$, $P = 4.2^{\text{d}}$ $a \approx 0.05$ а.е.
 $T_{\text{пов}} \approx 1000^{\circ} \text{C}$, $V_{\text{ветра}} \approx 1000$ км/ч,
Облака из Fe- пара.



Результаты поиска экзопланет

Астрометрический

1 планета (!) у 1 пл. сис*.

Лучевых скоростей

711 планет у 534 пл. сист. (128 кратные)

Транзитов

2719 планет у 2034 пл. сист. (453 кратные)

Прямое детектирование

- планет
- протопланетных дисков

83 планет у 76 пл. сист. (5 кратные)
около 1000 у одиночных и кр. сист.

Гравитационное микролинзирование

56 планет у 54 пл. сист. (2 кратные)

Периодических пульсаций

24 планет у 19 пл. сист. (4 кратные)

16.05.2017.

Всего открыто – 3610 планет у 2704 планетных систем (у 610 – 2-е и более пл.)

*HD 176051: $M_{3B} = 0.9 M_{\odot}$, $r = 15$ пк,
 $M_{Пл} = 1.5 M_J$, $a = 1.76$ а.е.

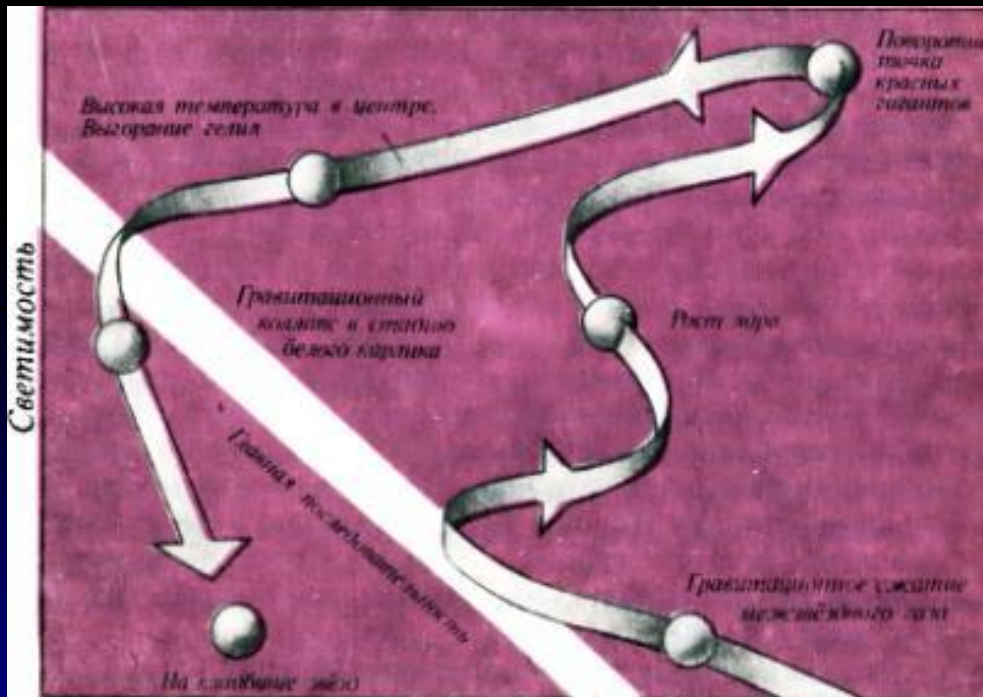
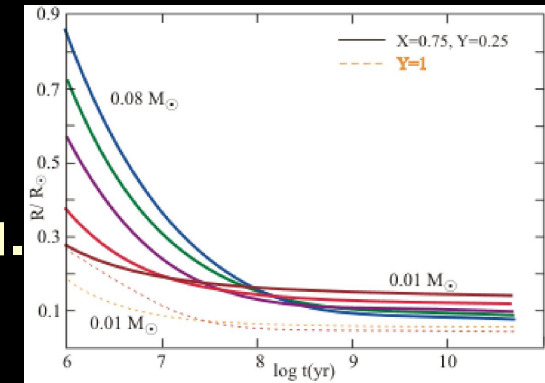
Основные стадии эволюции космических тел

Звезды:

- протозвезда,
- гл. последовательность,
- гигант,
- звездные остатки.

Субзвезды:

- протозвезда,
- стадия сжатия.



Планеты:

- протопланета,
- дифференциация недр,
- выделение ядра
- остывание недр.

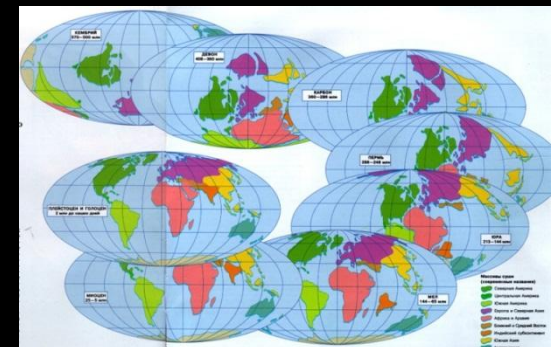


Схема «предки – потомки»

Масса объектов 0.007 ≈ 3 – 10 $M/M_{\odot}$

Объекты	Черные карлики			Черные дыры	Звезды, субзвезды, планеты	
---------	----------------	--	--	-------------	----------------------------	--

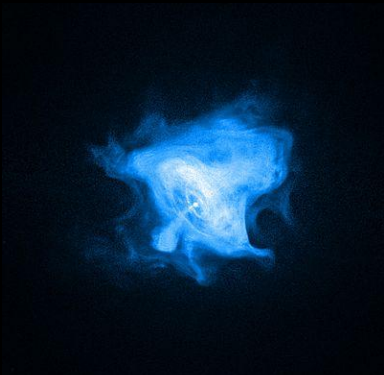
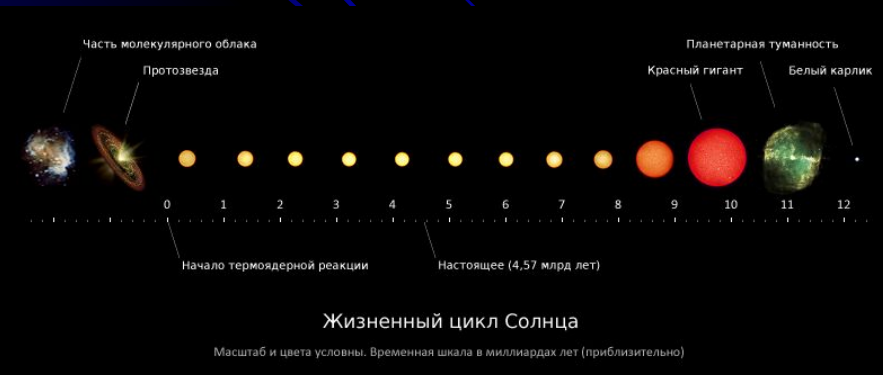
Масса остатков 0.007 ≈ 3 – 10 $M/M_{\odot}$

Остатки	Черные карлики	Белые карлики		Нейтронные звезды		Черные дыры	Газо-пылев. среда	
Элем. состав ядра в конце стадии гиганта	H-He	C-O	C-O	O- Ne- Mg-	Fe-Co-Ni	Fe-Co-Ni	He-... Fe	

$\tau_{\text{эл}} \cdot 10^6$ лет $M/M_{\odot}$

Элем. состав ядра в конце стадии главной последоват.	H-He	He	He	He	He	He	He	
--	------	----	----	----	----	----	----	--

Начальная масса $M/M_{\odot}$



Классификацию звездных систем и их объединений

Космические тела входят в различные объединения: звездные, субзвездные, планетные и комбинированные. Чаще всего системы явл. комбинированными, т.е в их состав входят космические тела различных классов.

Звездные системы

- Кратные звездные системы ($N \lesssim 20$),
– планетные системы;
- звездные скопления и ассоциации ($N \sim 10 \div 10^6$);
- галактики ($N \sim 10^{5 \div 6} \div 10^{12}$).



Классификацию звездных систем и их объединений

Объединения галактик

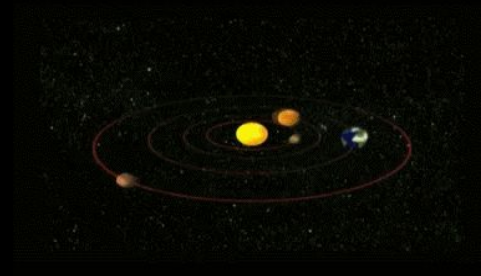
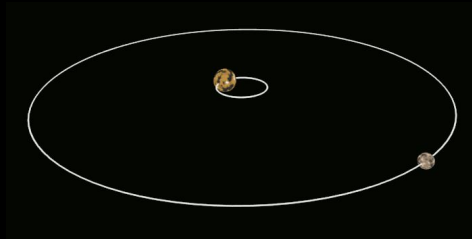
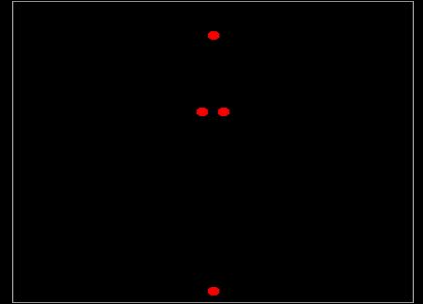
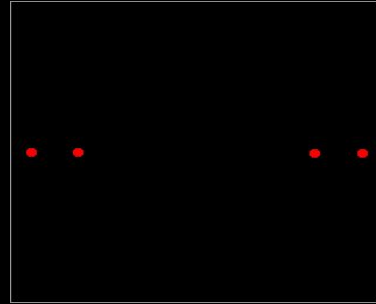
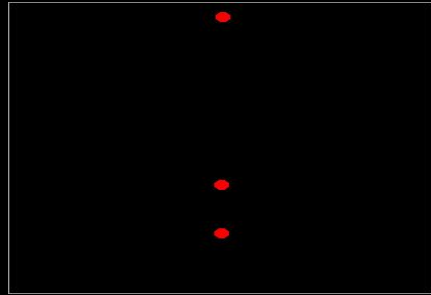
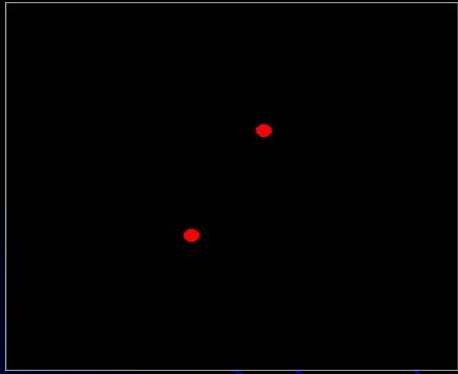
- **подгруппы (семейства)**
 - N_r – несколько десятков;
- **группы**
 - 1 ÷ 2 подгрупп;
 - $N_r < 100$;
- **скопления**
 - $N_r \gtrsim 10^2$;
- **сверхскопления**
 - $\sim 10^2$ групп;
 - $N_r > 10^4$;
- **гиперскопления**
 - $\sim 10^2$ сверхскоплений;
 - $N_r \sim 10^5$.



Кратные звездные системы

Это гравитационно-связанные системы с 2-х и более компонентов звездной (или субзвездной) природы, вращающихся вокруг общего центра масс.

Системы, состоящие исключительно из субзвезд, относят к субзвездным.



Компонентами одиночных звезд и субзвезд, кратных звездных и субзвездных систем могут быть планеты: они образуют планетные системы.

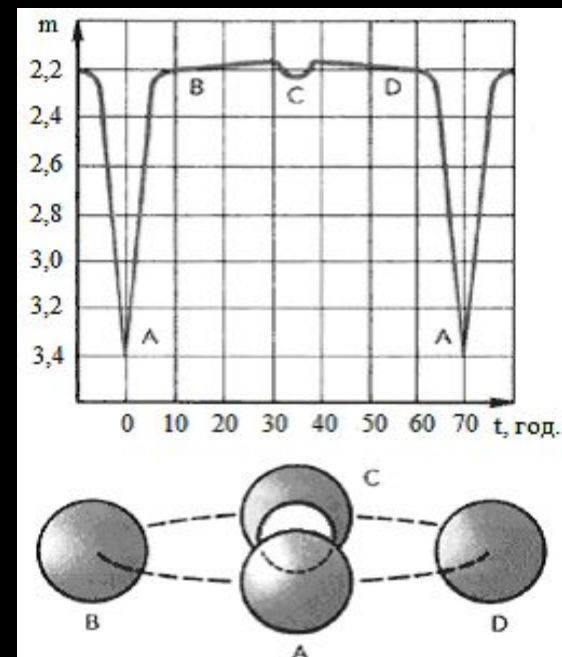
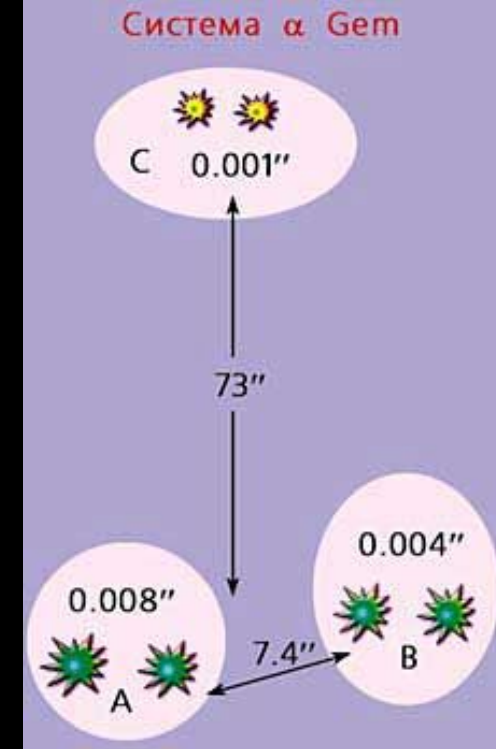
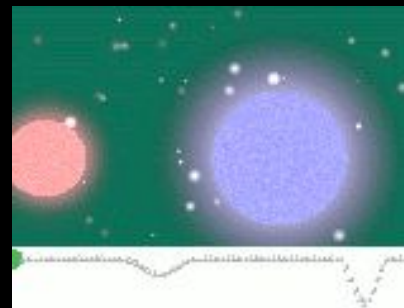
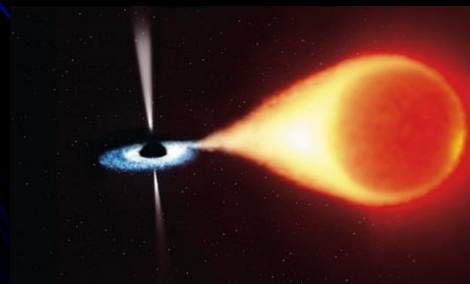
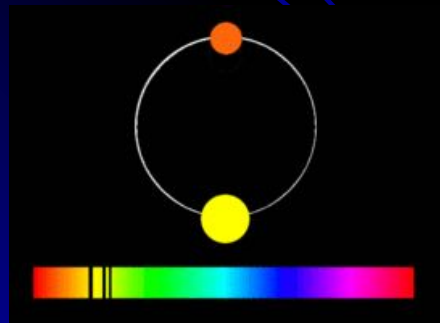
Кратные звездные системы

• Неустойчивые.

• Устойчивые.

В зависимости от удаленности, ориентации к наблюдателю, физических характеристик компонентов:

- широкие ($> 85\%$);
- затменные ($\approx 6\%$);
- спектрально-двойные ($\approx 6\%$);
- астрометрически-двойные;
- тесные двойные ($\approx 1\%$).



Планетные системы

Разделяются на *S*- и *P*- типа.

Входят в состав:

- *S*- типа – одиночных и кратных звезд и субзвезд;
- *P*- типа – только ТДС.

Подавляющее число планетных систем относится к *S*- типу (2553 – на 19.05.2016 г.)



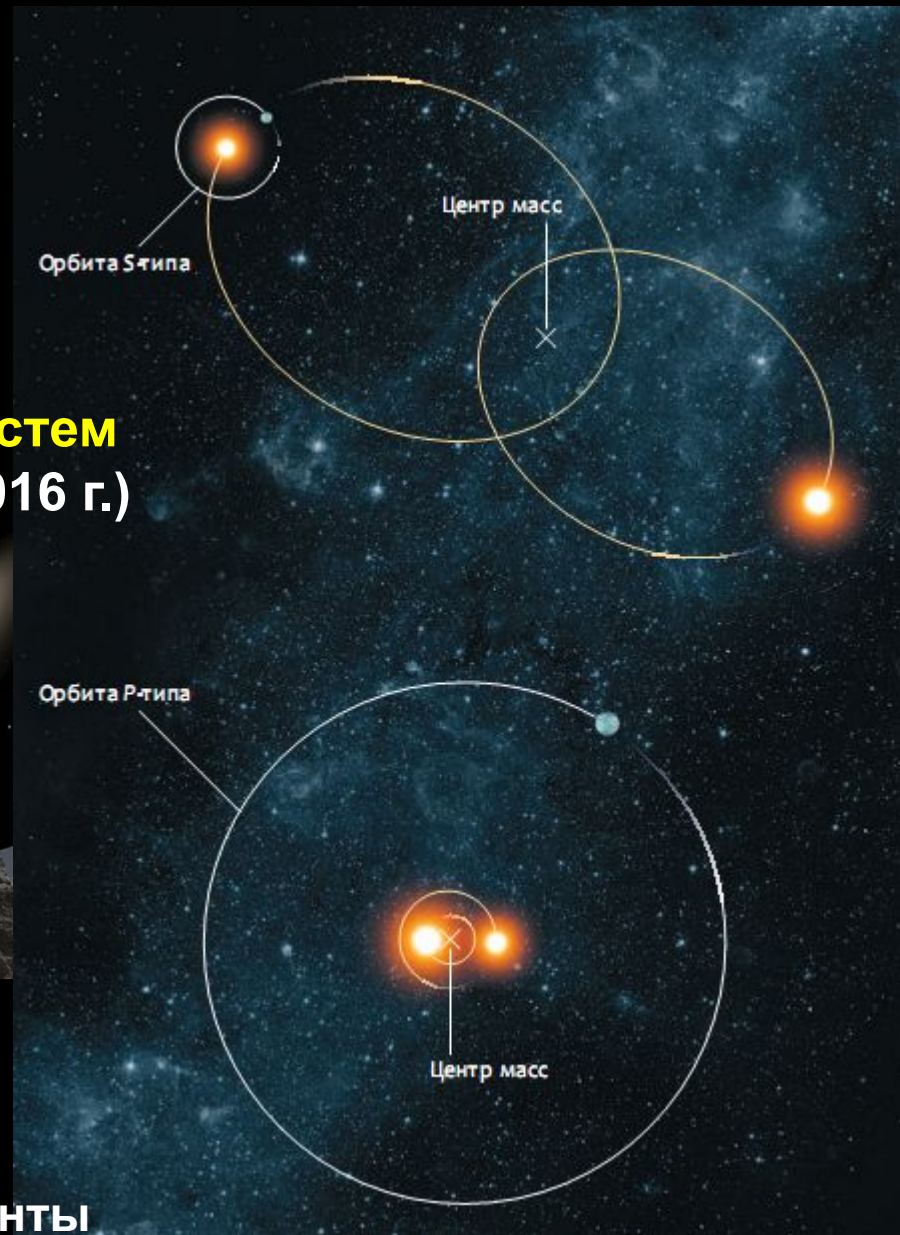
КТ «Кеплер»

Ø = 1.4 м



Kepler-16b (2012 г.), *Kepler-34b*,
Kepler-35b, *Kepler-38b*, *Kepler-47b*, с,
Kepler-64b, ...

Все открытые экзопланеты в составе планетных систем *P*- типа – газовые гиганты



Ближайшие к Солнцу планетные системы

Ближе 10 пк от Солнца у 23 звезд открыто 67 планет
(вкл. 8 больших в СС).

с 1-й планетой	– 7 сист.;	с 5-ю планетами	– 1 сист.;
с 2-я планетами	– 8 – « –;	с 6-ю	– « – – 2 – « –;
с 3-я	– « – – 3 – « –;	с 7-ю	– « – – 1 – « –;
с 4-я	– « – – 1 – « –;	с 8-ю	– « – – Солн. – « –;

20% – юпитероподобные (H-He);

20% – урано-нептуновые (glc);

60% – «большие земли» и землеподобные (Si).

Находятся в зоне жизни – 12 Si- пл. ($\approx 1/2$ известен возраст t):

Каптейн b, Глизе 581 d, g,	t , Гг	– 8;
Проксима Центавра b	– “ –	– 6;
т Cet,	– “ –	– 6;;
Земля,	– “ –	– 4.5;
Глизе 667 Cc,	– “ –	– 2.

Ближайшие к Солнцу планетные системы

$r = 3.22$ пк (10.5 св. лет)

Система ϵ Eri

- 2 астероидн. пояса (осколочные диски):

$$r_{1_внешн.} = 3 \text{ а. е.},$$
$$r_{2_внешн.} = 20 \text{ а. е.};$$

- КОМЕТНЫЙ ПОЯС

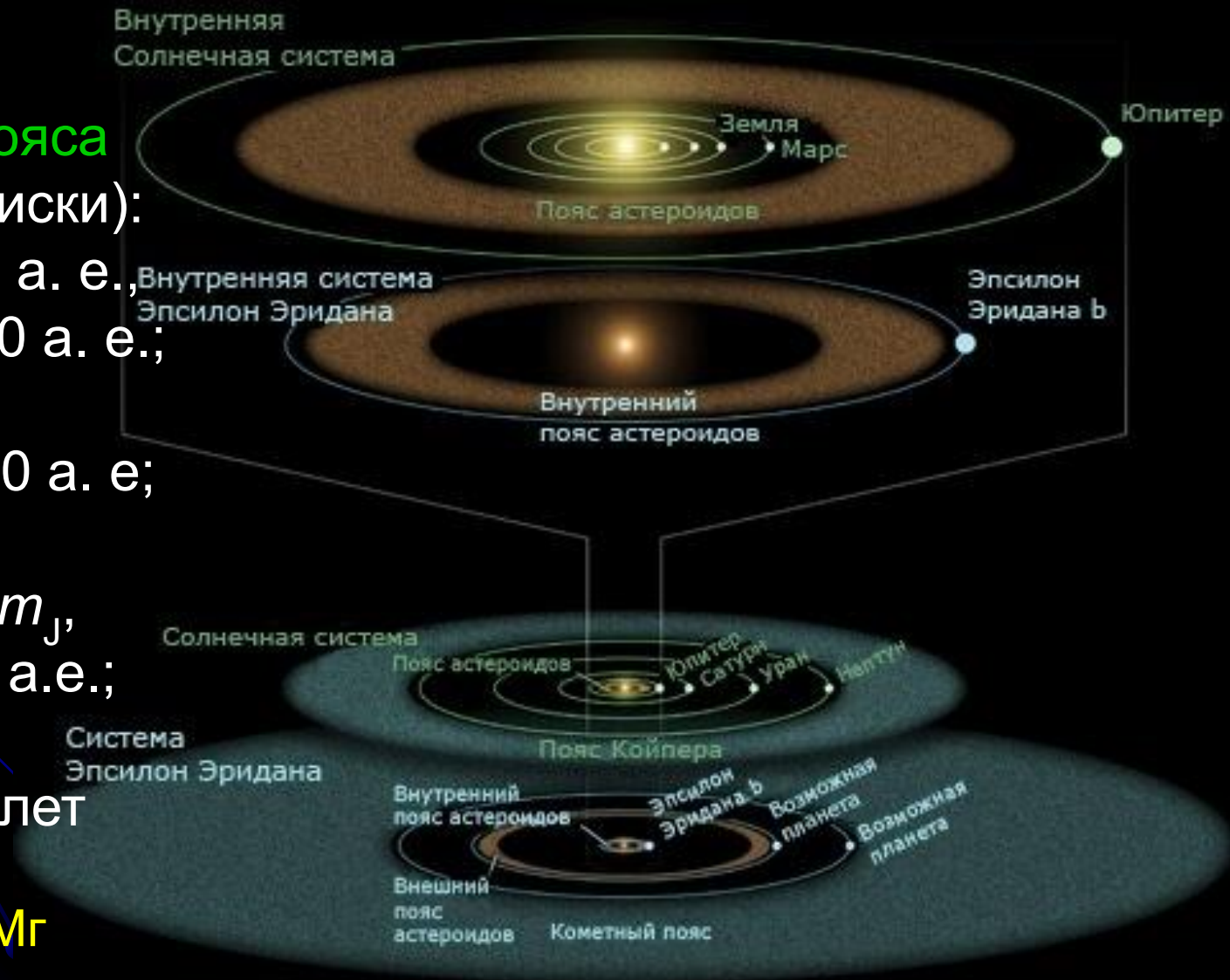
$$r = 35 - 100 \text{ а. е.};$$

- планеты:

$$b - 1.2 - 1.55 m_J,$$
$$a \approx 3.3 \text{ а. е.};$$

$$? c - 0.1 m_J,$$
$$P = 280 \text{ лет}$$

Возраст – 500 Мг



Ближайшие к Солнцу планетные системы

SETI: на $\lambda = 21$ см,
 $\nu = 1420$ МГц ($H \rightarrow T < 100$ K)
[Cocconi G., Morrison P., 1959]

Объект SETI: Система τ Cet

Проект «Озма»: τ Cet & ϵ Eri
[Drake F.D., 1959, 1961]

- **астероидный пояс** (осколочный диск):
 $r_{\text{внешн.}} = 55 \text{ а. е.};$
- **5 планет**
 $a \approx 115 \text{ а.е.};$

В далеком созвездии Тау Кита
Все стало для нас непонятно,-
Сигнал посылаем: "Вы что это там?"-
А нас посылают обратно.

На Тау Ките живут в красоте —
Живут, между прочим, по-разному —
Товарищи наши по разуму.

...

В. Высоцкий



$r = 3.65$ пк (11.9 св. лет)

Планета τ Cet e:
 $M = 4,3 M_{\oplus}$, находится в
зоне обитаемости
($P = 168^d$, $a = 0.55 \text{ а.е.}$)

[Tuomi M., Jones H.R.A., Jenkins J.S.,
Tinney C.G., et al., 2013, A & A, 551A,
79.]

Возраст — 5.8 Гг

Объект SETI

Система Gliese 581

$r = 6.54$ пк (≈ 21 св. лет)

Звезда

$$m_V = 10.58^m$$

$$M = 0.18 M_{\odot}$$

$$T_{\text{ef}} = 3260 \text{ K}$$

$$\text{Sp} = \text{M5V}$$

$$R = 0.38 R_{\odot}$$

Возраст – 7÷11 Гг

6 планет

**Планеты (суперземли)
в зоне жизни:**

$$d: 6-8 M_{\oplus}, \approx 2 R_{\oplus}.$$

При наличии атмосферы и CO_2 :
возможен парниковый эффект.

$$g: 3.1-4.3 M_{\oplus}, 1.2-1.5 R_{\oplus}, \\ T_{\text{орб}} = 36.6 \text{ земных суток}$$

Считается наиболее вероятным кандидатом пригодности её для жизни:

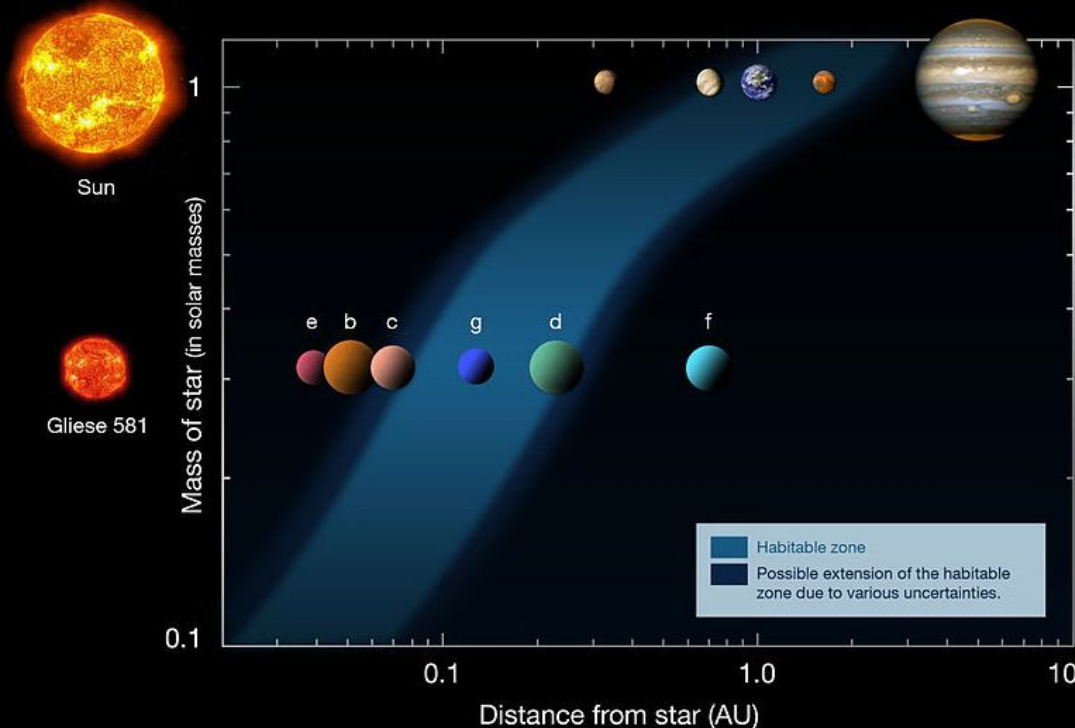
$$\langle T \rangle = -12 \div -31 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температуры:

$$\text{днем} - -34 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ночью} - +71 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Обитаемая зона:

$$\approx 0,1-0,3 \text{ а.е.}$$



Звездные скопления и ассоциации

Динамически-связанные системы, время жизни которых определяется начальным числом звездно-субзвездной составляющей N_0 и их начальной средней пространственной плотностью $\langle \rho(N_0) \rangle$:

$$\tau_d \approx \frac{3N_0}{\ln N_0 \sqrt{G \langle \rho(N_0) \rangle}} \quad \begin{aligned} \langle \rho(N_0) \rangle &= f(N_0, \varnothing) \\ &= f(M/M_S, \varnothing) \end{aligned}$$

- **Сверхассоциации:** $M \sim 10^5 \div 10^6 M_\odot$, $\varnothing \approx 600$ пк (и более),
возраст: $t \sim 10 \div 100$ Мг
- **Зв. ассоциации:** $N_0 \sim 10 \div <10^2$, $\varnothing \sim 10 \div <10^2$ пк, $t \lesssim 1$ Мг
(ОВ-, Т-, R-)
- **Зв. скопления**
 - **Рассеянные:** $N_0 \sim 10^2 \div 10^3$ ($\max N \approx 10^4$), $\varnothing \sim 1.5 \div 20$ пк,
 $t \sim 10^{6-7} \div 5-10$ Гг ($> 80\%$ – $t \lesssim 100$ Мг, $\max t \approx 10$ Гг)
 - **Шаровые:** $N = 3 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^6$, $\varnothing \approx 15 \div 200$ пк ($\langle \varnothing \rangle \approx 40$ пк),
 $t > 10$ Гг

Звездные скопления и ассоциации

Концентрируются

• **Сверхассоциации:** $t \sim 10 \div 100 \text{ Мг}$

• **Зв. ассоциации:** $t \lesssim 1 \text{ Мг}$

$$\langle n \rangle \sim \frac{2N_0}{\varnothing^3} \quad \langle n \rangle_{\text{СВ/ПК}^3} \sim \langle n \rangle_{\text{ЗВ/ПК}^3} \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$$

• **Звездные скопления**

– **Рассеянные:** $t \lesssim 100 \text{ Мг}$

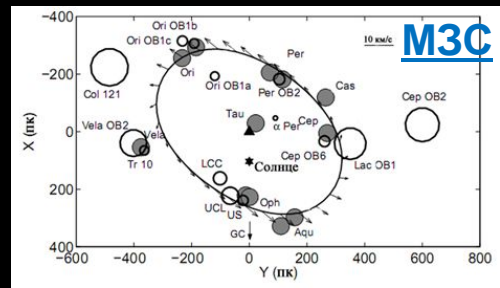
$\langle n \rangle_{\text{ЗВ/ПК}^3} \sim 10^{-1} \div 1$

– **Шаровые:** $t > 10 \text{ Гг}$

$\langle n \rangle_{\text{Ш/ПК}^3} \sim 1 \div 10$

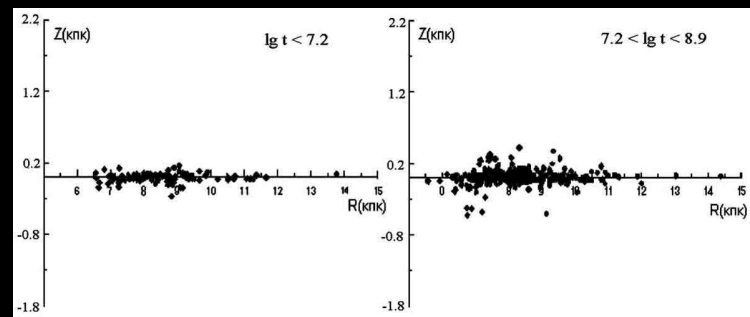
$\langle n \rangle_{\text{СВ/ПК}^3} \sim \langle n \rangle_{\text{ЗВ/ПК}^3} < \langle n \rangle_{\text{Окр}_\odot} < \langle n \rangle_{\text{ЗВ/СК}} < \langle n \rangle$

Области звездообразования

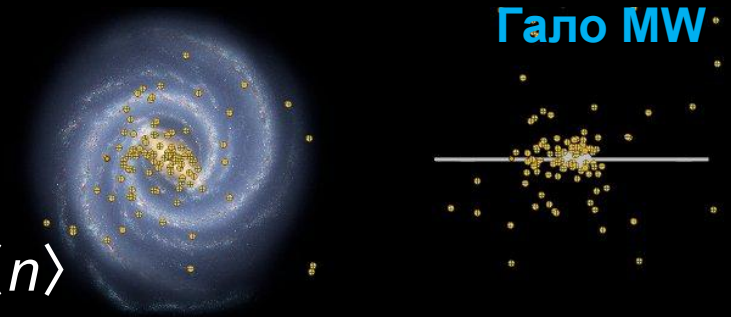


$\langle n \rangle_{\text{Окр}_\odot} \sim 10^{-1} \text{ ЗВ/ПК}^3$

Диск MW



Гало MW



Галактики

Наиболее грандиозные гравитационно-связанные
звездные системы:

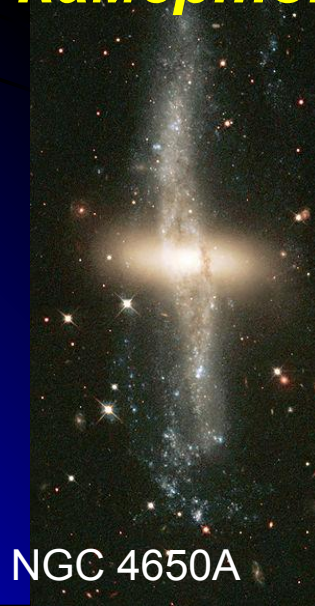
- $M \sim 10^5 \div 10^{13} M_{\odot}$,
- $\varnothing = 1 \div 250$ кпк (max – до ≈ 2 Мпк),
- $N_* \lesssim 10^{13}$ зв.

Основные составляющие
(по числу и массе):

- звезды, – субзвезды, – планеты,
- межзвездный газ и пыль,
- темная материя (до 90%).

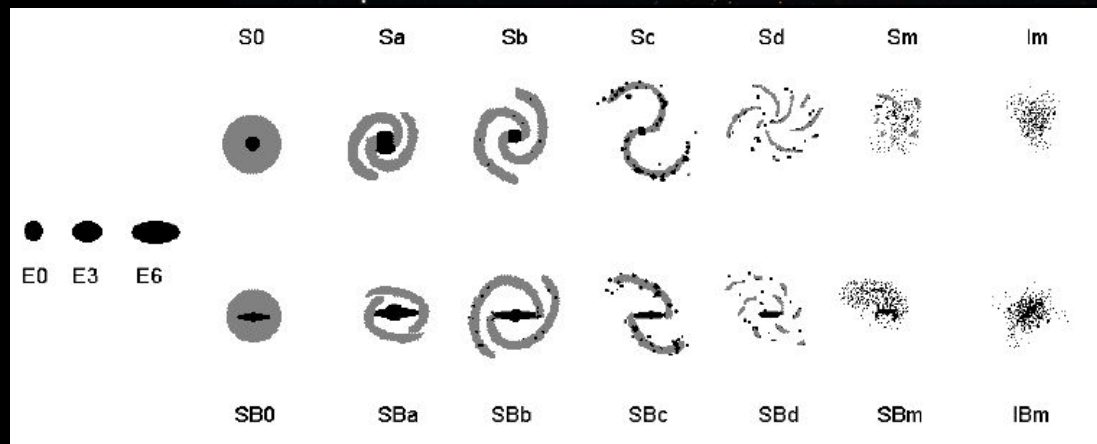
Все объекты участвуют
в движении вокруг ц. масс

Камертонная классификация галактик



NGC 4650A

E0-E7 – 20%



S0-SB0 – 20%

S-SB – 55%

Irr – 5%

(1/4) – с кольцами (90°)

(2/3 – SB)

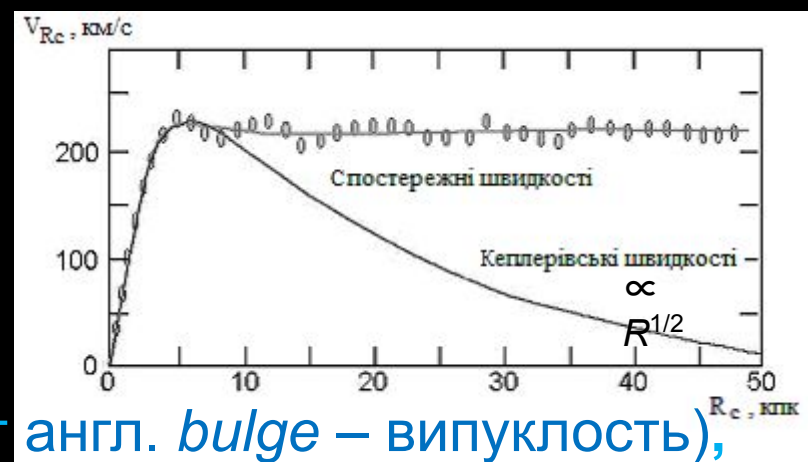
Спиральные галактики

S и SB:

- $M \sim 10^9 \div 10^{11} M_{\odot}$ (max – $10^{12} M_{\odot}$),
- $\varnothing = 1 \div 250$ кпк,
- $L_{\Sigma} \sim 10^8 \div 10^{10} L_{\odot}$

Состав:

- балдж (от англ. *bulge* – выпуклость),
- диск (с рукавами, население I),
- гало (вероятно, население II).



Содержан. газа, %
 $V_{\text{орб}}$, км/с

4
300

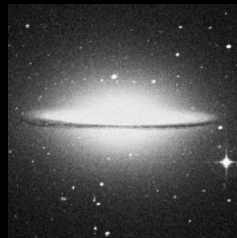
8
220

25
175

> 25
< 175



...



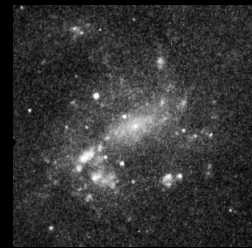
Sa



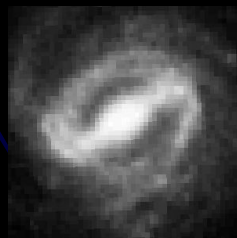
Sb



Sc



Sd



SBa



SBb

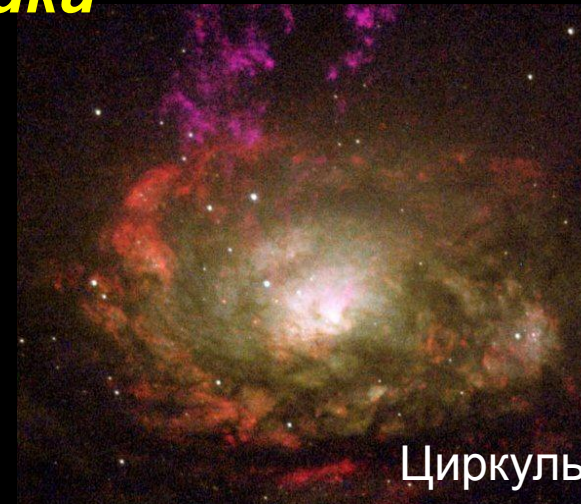


SBc



Спиральные (активные) галактики

Сейфертовские галактики – спиральные галактики (1-2%) с активными ядрами. Яркие звездоподобные ядра меняют свой блеск, ионизируют окружающий газ, сгустки движ.. с $V \sim 10^{3.5}$ км/с.



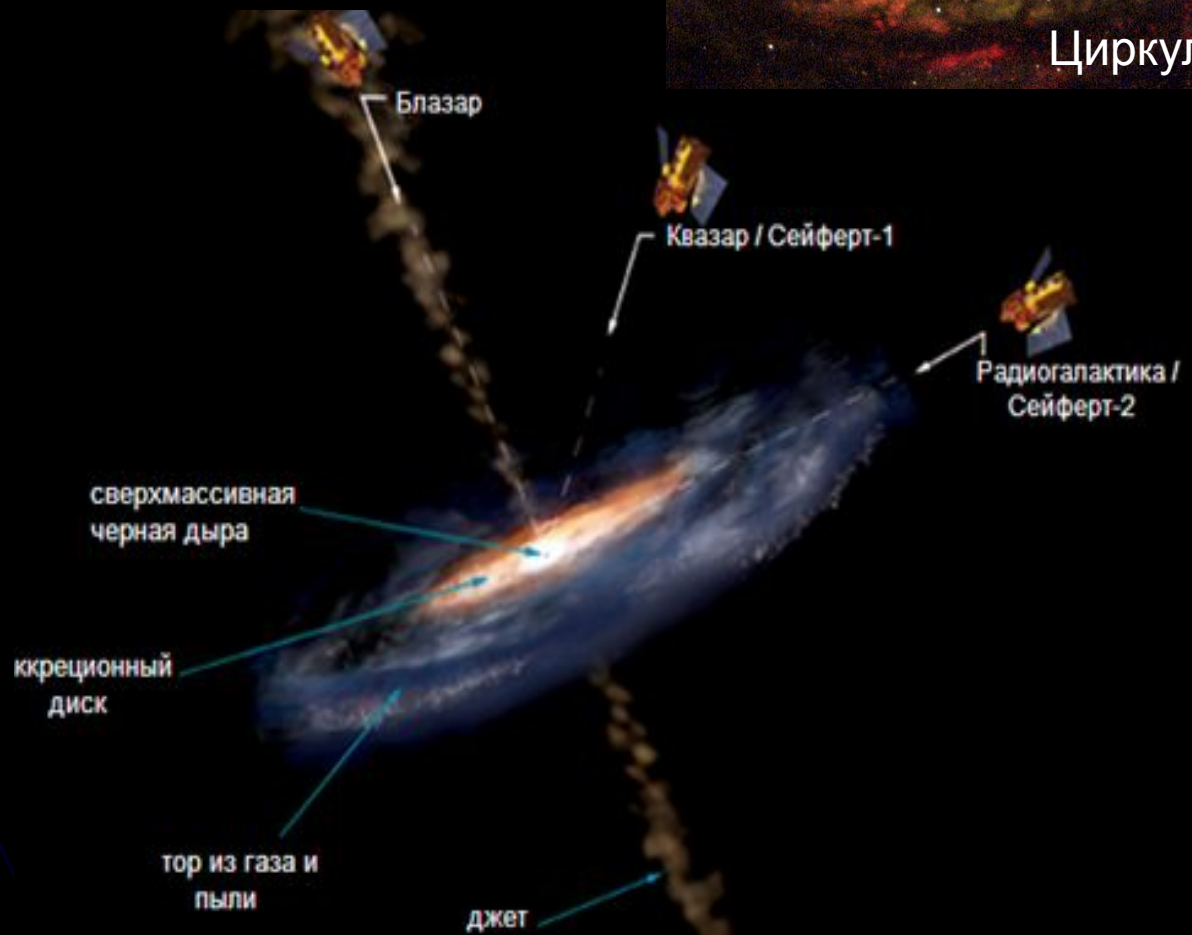
2-а типа: Sy1 и Sy2.

$$L_{X_Sy1} \sim 10 L_{X_Sy2}$$

$$L_{ИК_Sy2} > L_{ИК_Sy1}$$

$L_{ИК_Sy2}$ – обусловлена в осн. тепловым и излуч. пыли,

ИК-спектр Sy1 более плоский и ближе к спектру квазаров.





E0–E7:

- $M \sim 10^5 \div 10^{13} M_{\odot}$,
 - $\emptyset = 1 \div 205$ кпк,
 - $L_{\Sigma} \sim 10^5 \div 10^{11} L_{\odot}$
- $M_{\max} \approx 10^{13} M_{\odot}$, $R \leq 50-60$ кпк
($\emptyset_{\max} \approx 1.8$ Мпк (IC 1101)) – **сD-галактики**.

Состав (население II): **звезды** ($t < 5-7$ Гг)

Отсутствуют:

- звезды очень большой светимости
- газовая и пылевая материя,
- звездообразования (в настоящее время).

• **Массивные E- галактики** ($M \gtrsim 10^{11} M_{\odot}$, $M_{B\Sigma} \lesssim -20^m.5$) – **3-х мерные эллипсоиды**, форму которых поддерживают хаотич. движен. звезд с $\sigma_{V_{\text{вр}}} \lesssim 200$ км/с.

• **Небольшие E- галактики** ($M < 10^{11} M_{\odot}$, $M_{B\Sigma} > -20^m.5$) – **2-х мерные эллипсоиды** (вращения), форму которых поддерживают $V_{\text{вр}}$.
Внутри возможно существует диск.

Линзовидные галактики

SO–SBO:

Состав (похож на спиральные галактики):

- балдж;
 - могут иметь бары (SBO);
 - диск (массивный, нет рукавов);
- почти нет газа (как у E- галактик);
- состоят, в основном, из старых звёзд;
- низкое звездообразование;
- содержат массивную сфероидальную компоненту;
- выявлена корреляции $M_{\text{чд}} = 0.001 M_{\text{балдж}}$.

Свойства: • $\varnothing_{\text{линз_г}} < \varnothing_{\text{спир_г}}$;

- ступенчатый ход распределения яркости (из-за наличия диска, отлич. от E- галактик);
- $\approx 1/4$ имеют внешние полярные кольца ($\angle \approx 90^\circ$);
- обладают признаками как E- так и S-, SB- галактик –
считаются промежуточным типом между ними.



Галактика Веретено
(NGC 5866)



NGC 4650A

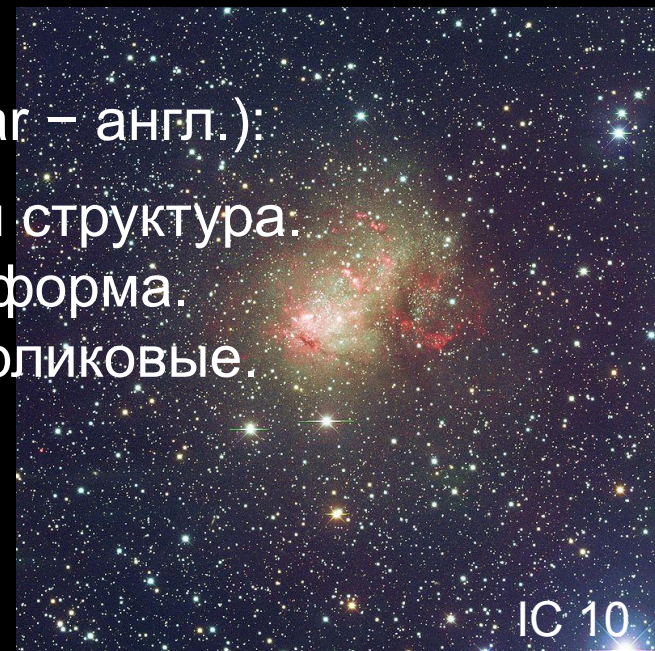
Неправильные галактики

Irr :

- $M \leq 10^{10} M_{\odot}$,
- $\varnothing = 1 \div 10$ кпк,
- $L_{\Sigma} \leq 2 \cdot 10^9 L_{\odot}$,
- газ – $2 \div 50\%$.

3-и подтипы (irregular – англ.):

- 1) Irr I – клочковатая структура.
- 2) Irr II – аморфная форма.
- 3) dl (или dlrrs) – карликовые.



IC 10

Irr I – граничный случай S-, SB- галактик:

- следы спиральной структуры
 - наличие – Sm, SBm,
 - отсутствие – (Im);
- осевое вращение.

Irr II – похожи на E- галактики:

- цвет,
- плавная смена яркости к периферии,
- отсутствуют звезды-сверхгиганты,
- нет ярких газовых туманностей.

dl (или dlrrs) – $< \sim 10^9$ зв.:

- имеют аналоги галактик, принадлежащих камертонной классификации,
- голубые компактные галактики,
- ультаракомпактные карликовые галактики.

Космическая газопылевая среда

Реликтовый газ



Диффузная ●

материя

Облака ●

Межзвездная ●

среда

Диффузное вещество в звездных системах

Темные ●

Светлые ●

Туманности ●

Межпланетная ●

среда

Образования вокруг косм. тел

Первичные ●

Поздние
Протопланетные ●

Аккреционные
Планетарные ●

Оболочки ●

Диски ●

Остаточные ●

туманности

Диффузное вещество $\rightarrow$ Межзвездная среда в зв. системах /диффузная материя и облака/

Фаза	T, K	$n, \text{см}^{-3}$	Масса облаков, $M_{\odot}$	Размер, пк	Доля занимаемого объема [†]
Корональный газ	$\approx 5 \cdot 10^5$	~ 0.003	—	—	~ 0.3 :
Зоны НII низкой плотности	$\approx 10^4$	~ 0.3	—	—	~ 0.1
Межоблачная среда	$\approx 10^4$	~ 0.1	—	—	~ 0.4
Облака HI	≈ 80	~ 10	~ 100	~ 10	~ 0.01
Молекулярные облака	≈ 10	$\sim 10^3$	~ 300	~ 1	$\sim 10^{-5}$
Глобулы	≈ 10	$\sim 10^4$	~ 20	~ 0.3	$\sim 3 \cdot 10^{-9}$
Яркие области НII	$\approx 10^4$	~ 30	~ 300	~ 10	$\sim 10^{-4}$
Гигантские молекулярные облака	~ 20	~ 300	$\sim 3 \cdot 10^5$	~ 40	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$
Мазерные конденсации	$\lesssim 100$	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^5$	$\sim 10^{-5}$	

[†] Вблизи плоскости Галактики

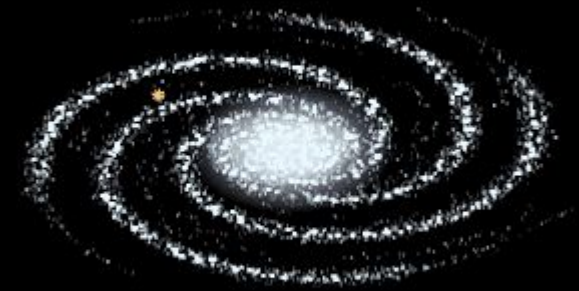
Движение звездных систем

Изучают

- Звездная кинематика.
- Звездная динамика.

Базируется на определениях

- Расстояний.
- Пространственных движений.
- Кривых вращения.



© ООО ФИЗИКОН, 2003

24 млн. лет

Исследования в звездной кинематике освобождены от эффектов, вызванных

- осевым вращением Земли;
- прецессией и нутацией;
- орбитальным вращением Земли вокруг Солнца;
- и т.п.

Определение расстояний до космических объектов

Астрометрические

параллаксы

Гео-метрические

- годовые

- апексные

Динамические

- орбитальные

- фрагментальные

Фотометрические

параллаксы и расстояния

- спектральные параллаксы

- цефеидные параллаксы

- по модулям расстояния

- расстояния по интегральным величинам

Космологические

расстояния

- фотометрические

- угловые

- по собственным движениям

- другие

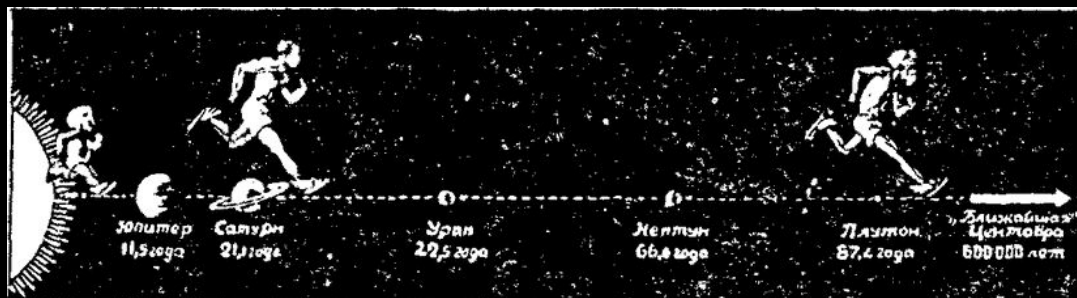
Методы определения годовых параллаксов

- Бесселя

- Шлесингера

- Каптейна

- Ван-Маанена



Расстояния от ☉ до планет и звезд в годах жизни «сороконожки»

Пространственные движения и скорости

Базой для определения пространственных движений и скоростей объектов является:

- 1) изменение их координат на небесной сфере за определенный промежуток времени;
- 2) скорость по лучу зрения V_r ;
- 3) расстояние.

$$\mu_\alpha = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} \quad \mu_\delta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{t_2 - t_1}$$

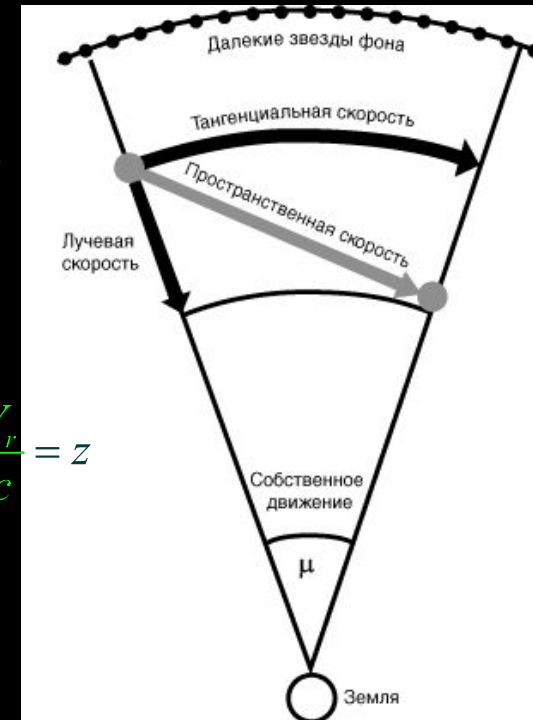
V_r определяются на основе эффекта Доплера-Физо, согласно которому длина волны смещенной линии λ_0 в спектре, движущегося источника по лучу зрения со скоростью V_r , связана с той же линией λ_1 , неподвижного источника относительно наблюдателя:

$$\lambda_0 = \lambda_1 \sqrt{\frac{1 + V_r/c}{1 - V_r/c}} \Rightarrow V_r = c \frac{(1 + z)^2 - 1}{(1 + z)^2 + 1}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{V_r}{c} = z$$

Пространственная скорость объекта

$$V = \sqrt{\left(\frac{4.74 \mu r}{1+z} \right)^2 + V_r^2}$$



Проблема вращения Галактики

Решается путем анализа кривая вращения ($V(R)$), звездных систем, как функции их физических моделей

1. Масса звездной системы сосредоточена в ее центре

Результат сравнения сил: центробежной и всемирного тяготения

$$\frac{mV^2}{R} = G \frac{mM}{R^2} \Rightarrow V = \sqrt{G \frac{M}{R}} \Rightarrow V \propto R^{-1/2}$$

2. Твердотельное вращение: $V = \omega R|_{\omega = \text{const}} \propto R$

$$V \propto R \Rightarrow F_{\text{цс}} = \frac{mV^2}{R} \Rightarrow F_{\text{цс}} \propto R \quad \text{закон Гука}$$

3. Стационарная система (не меняется в размерах со временем и подчиняется теореме о вириале): $2T + \Omega = 0$

Среднеквадратическая V звезд в таких системах

[Eddington A.S., 1916]:

$\bar{R}$ – "средний" радиус зв. системы

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{2} \frac{GM}{\bar{R}}$$
$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1, k=1}^n \frac{1}{r_{ik}} \quad i \neq k$$

Следствия $V(R)$ – кривая вращения, как функция физических моделей системы

1. *Масса звездной системы сосредоточена в ее центре*

$$\left. \frac{mV^2}{R} \right|_{V \propto R^{-1/2}} = G \frac{mM}{R^2} \Rightarrow \bar{\rho} \propto R^{-3}$$

2. *Твердотельное вращение: $V = \omega R|_{\omega = \text{const}} \propto R$*

$$\left. \frac{mV^2}{R} \right|_{F \propto R, V \propto R} = G \frac{mM}{R^2} \Rightarrow \bar{\rho} = \text{const}$$

3. *Стационарная система*

$$\left. \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \right|_{M \propto R} \Rightarrow \bar{\rho} \propto R^{-2}$$

/Определенные существенные
для системы характеристики не
меняются со временем/



Наблюдаемые $V(R)$ в галактиках и их следствия

Для центральных областей галактик
(признаки твердотельного вращения):

$$V \propto R, \quad \bar{\rho} = \text{const}$$

Далее центральных областей
галактик

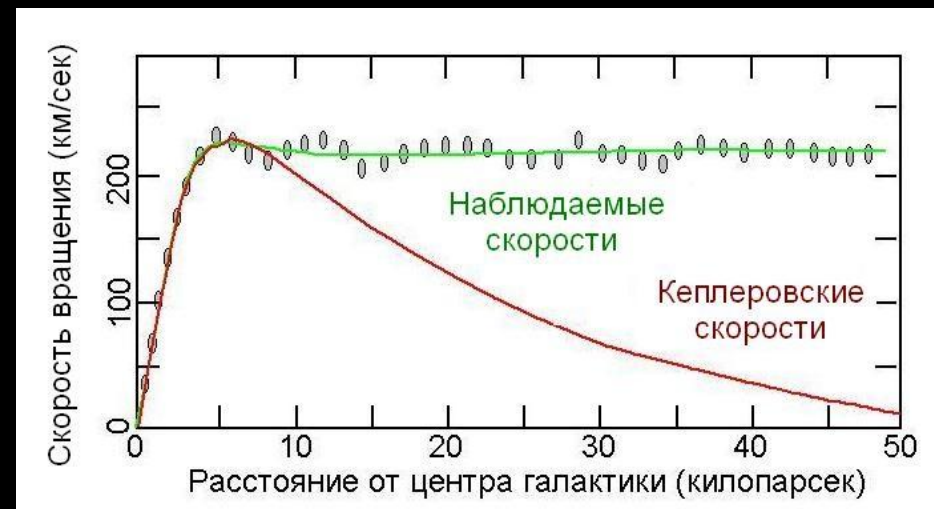
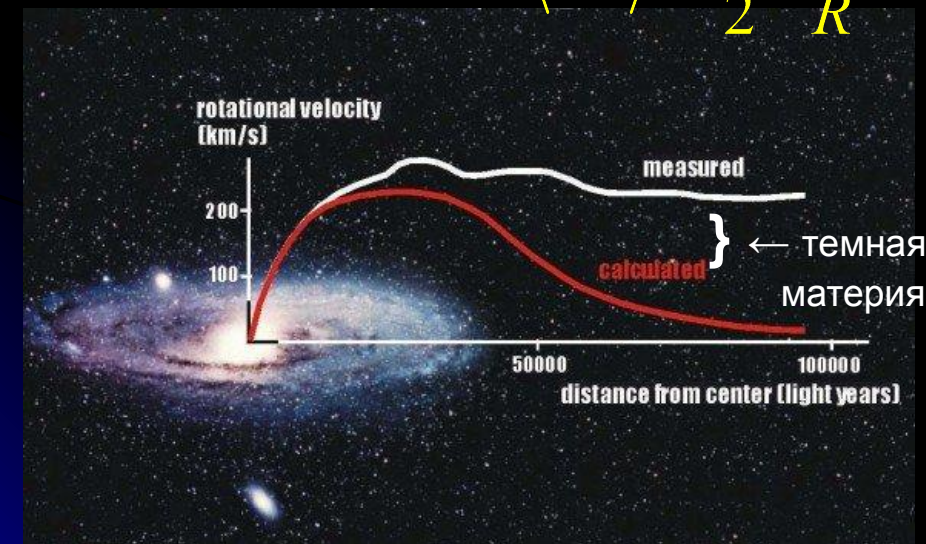
(признаки стационарной системы
при $V = \text{const}$):

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{2} \frac{GM}{\bar{R}}$$

$$M(R)|_{V=\text{const}} \propto R, \quad \bar{\rho} \propto R^{-2}$$

$$V \propto R^{-1/2}, \quad \bar{\rho} \propto R^{-3}$$

— не выполняется
кеплеровский 3-й
движения



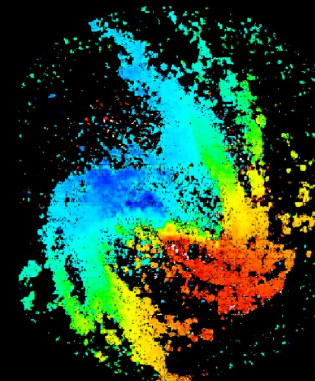
Методы определения кривых вращения звездных систем

При исследовании $V(R)$ Галактики, опираются на
выбранные центроиды, для которых известны:

- галактические координаты l, b ;
- расстояния до них r ;
- кинематические характеристики (могут быть известны не все)
 - собственные движения известны (μ_l, μ_b),
 - только лучевая скорость (для более удаленных) V_r .

Основные методы определения параметров галактического
вращения:

- Ботлингера,
- Оорта,
- Камма.



Общая структура Вселенной /космография/

Космические структуры (в которых находится человек):

- **Местная звездная система**

- окрестности Солнца,
- область А- кольца.

- **Наша звездная система**

- Галактика,
- объекты сферической составляющей.

- **Местная группа галактик**

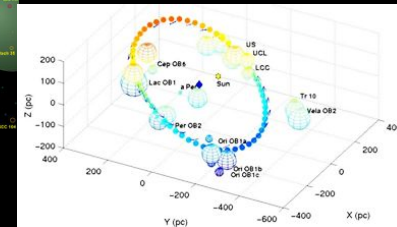
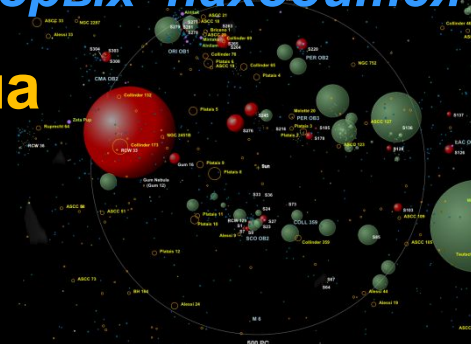
- подгруппа Туманности Андромеды,
- галактики Периферии.

- **Местное сверхскопление**

- Местный Объем,
- скопления галактик в Деве.

- **Гиперскопление Ланиакеля и Местный войд**

- **Ячеистая Метагалактика.**



Местная звездная система (Пояс Гулда)

$R \sim 8$ кпк от центра MW между галактическими рукавами Стрельца и Персея.

$$M = 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$$

Вращение (прямое) О-, В- звезд, вокруг центра масс МЗС, прослеживается до $r \sim 1$ кпк – оценка $R_{\text{МЗС}}$.

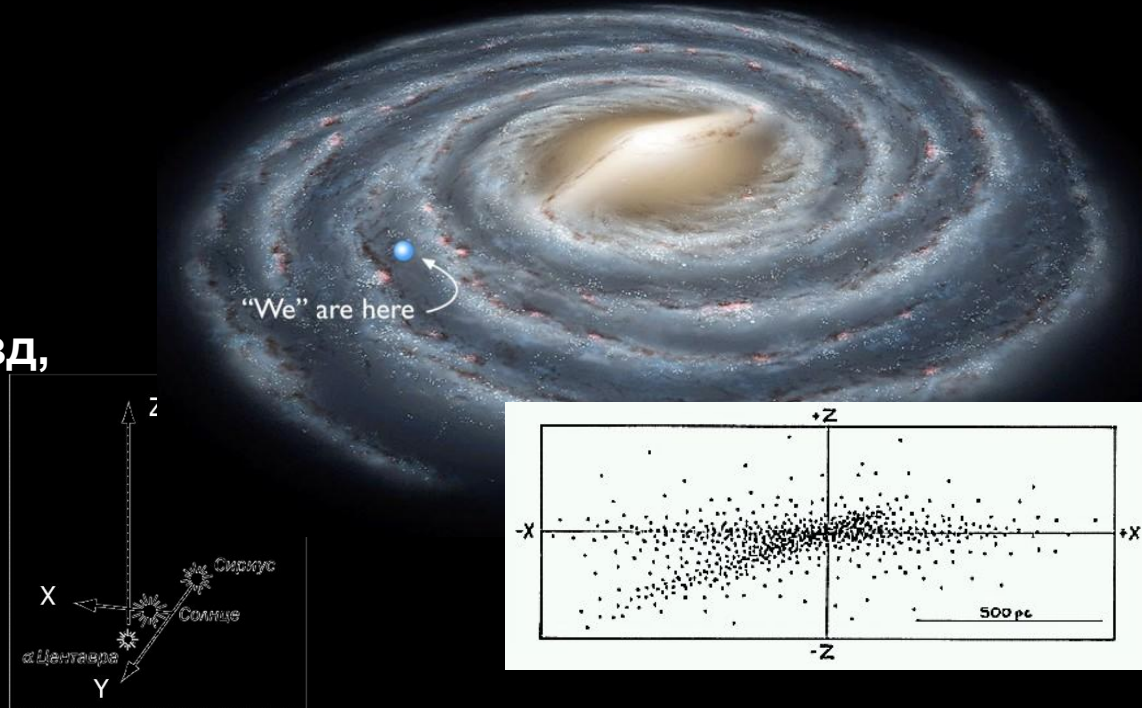
$V = 3 \pm 1$ км/с и 6 км/с (max), характерный $T_{\text{вращ}} = 500$ Мг

Возраст – $\sim 10^8$ лет.

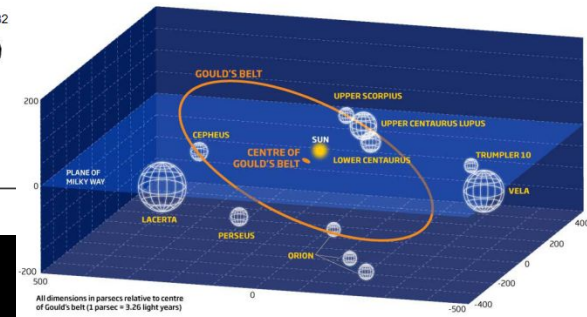
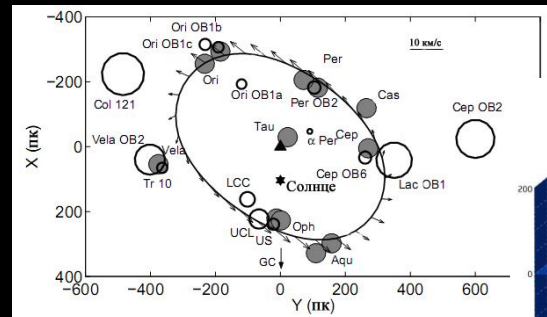
Старая популяция – ≈ 600 Мг, молодая – ≈ 60 Мг

Число наблюдаемых

- зв. скоплен. – неск. сотен,
- ассоциаций – неск. десятков
- > 500 О-, В-, А- звезд,
- $>$ звезд типа Т Тельца.



$m_V < 4^m$ ($M_V < 4^m$, $V: M > 1.3 M_{\odot}$, $R > 1.23 R_{\odot}$, $T_{\text{ef}} > 6530$ K, $L/L_{\odot} > 2.5$); III, II, I
Все яркие звезды неба



SBbc- тип

Диаметр – 30 кпк

Масса – $2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

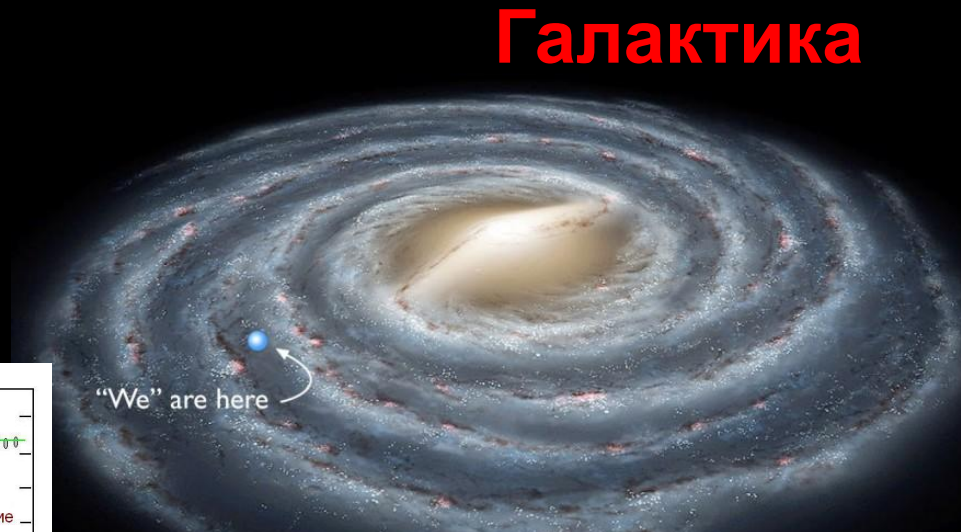
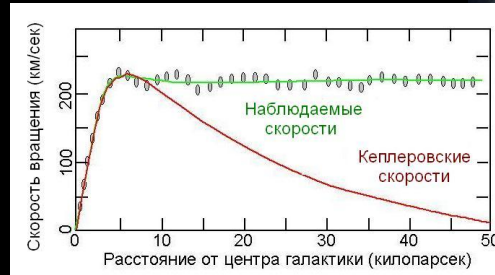
$$R_o \approx 8$$

$$V_o \approx 220 \text{ км/с}$$

$$P_o \approx 220 \text{ Мг}$$

Общее число:

- звезд – $(2-4) \cdot 10^{11}$
- субзвезд – $\sim 10^{10}$
- планет – $\sim 10^{13}$
- Газ – $\sim 10^{-2} M_{MW}$
- Пыль – $\sim 10^{-4} M_{MW}$



Балдж = перемычка

$$2h \times \Delta R_{GC} = 2 \times (1.25-3)$$

$$\text{кпк } P_{\text{балдж}} \approx 15-18 \text{ млн. лет}$$

Сверхассоциации ($10^5-10^6 M_{\odot}$):

- известно – ≈ 40 .

ОВ- ассоциации:

- ожидается – ≈ 4000 ,
- известно ($R_{GC} < 1.5$ кпк) – $\sim 10^2$.

Шаровые звездные скопления:

- ожидается – ≈ 200 ,
- известно – ≈ 150 .

Рассеянные звездные скопления:

- ожидается – $\approx 300\,000$,
- известно ($R_{GC} < 2.5$ кпк) – ≈ 1500 .

Центр: Арочное скопление

(самые

массивные

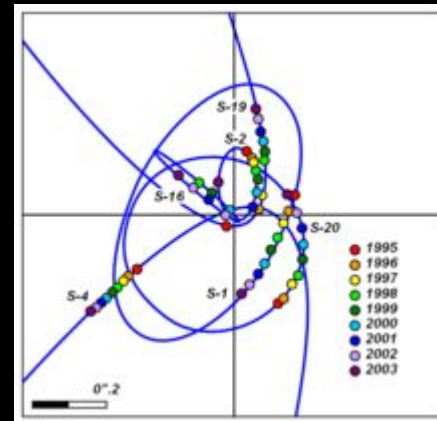
Черная дыра

$$M \approx 4 \cdot 10^6 M_{\odot},$$

$$R_{\text{ШВ}} = 0.07 \text{ а.е.},$$

$$R_{\text{ак.д}} = 45 \text{ а.е.}$$

2-я черная дыра – ?



Диаметр – ≈ 500 кпк

Масса – $1.2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

Число галактик – 15 (16?)

Наша звездная система

Периферия:

$R_{GC} = 120-250$
кпк

Внешнее гало (корона):

$R_{GC} = 20-120$
кпк

Гало (молодое):

$R_{GC} = 9-20$
кпк

Внутреннее (старое) гало:

$R_{GC} < 9$
кпк

Диск:

$R_{GC} = 15$
кпк

• ТОНКИЙ:

$2h = 1.5-2$

кпк

• ТОНКИЙ:

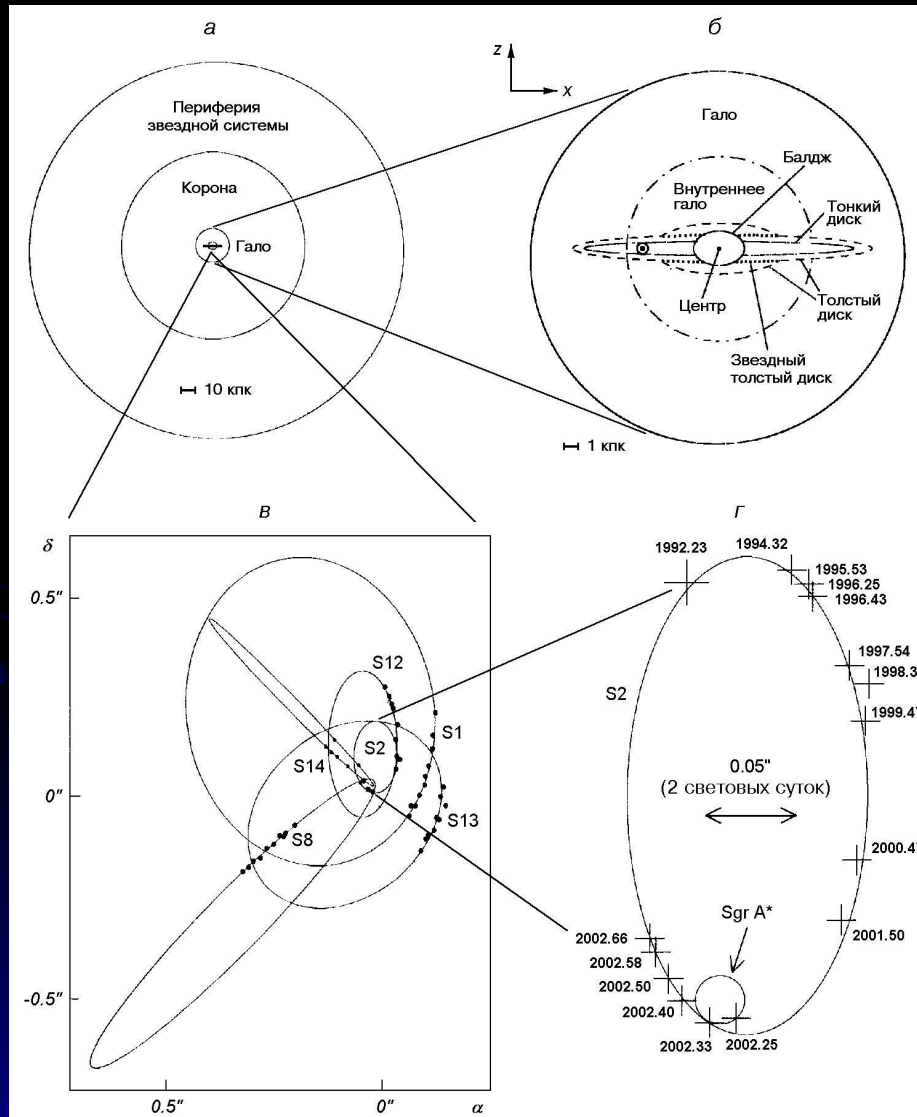
$2h = 0.5-1$

Балдж

$2h \times R_{GC} = 2 \times 3$

кпк

$R_0 \approx 8$ кпк

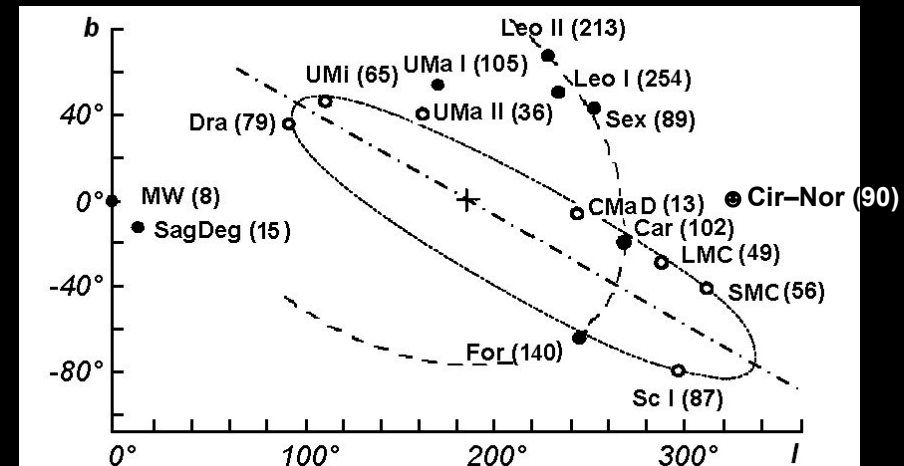
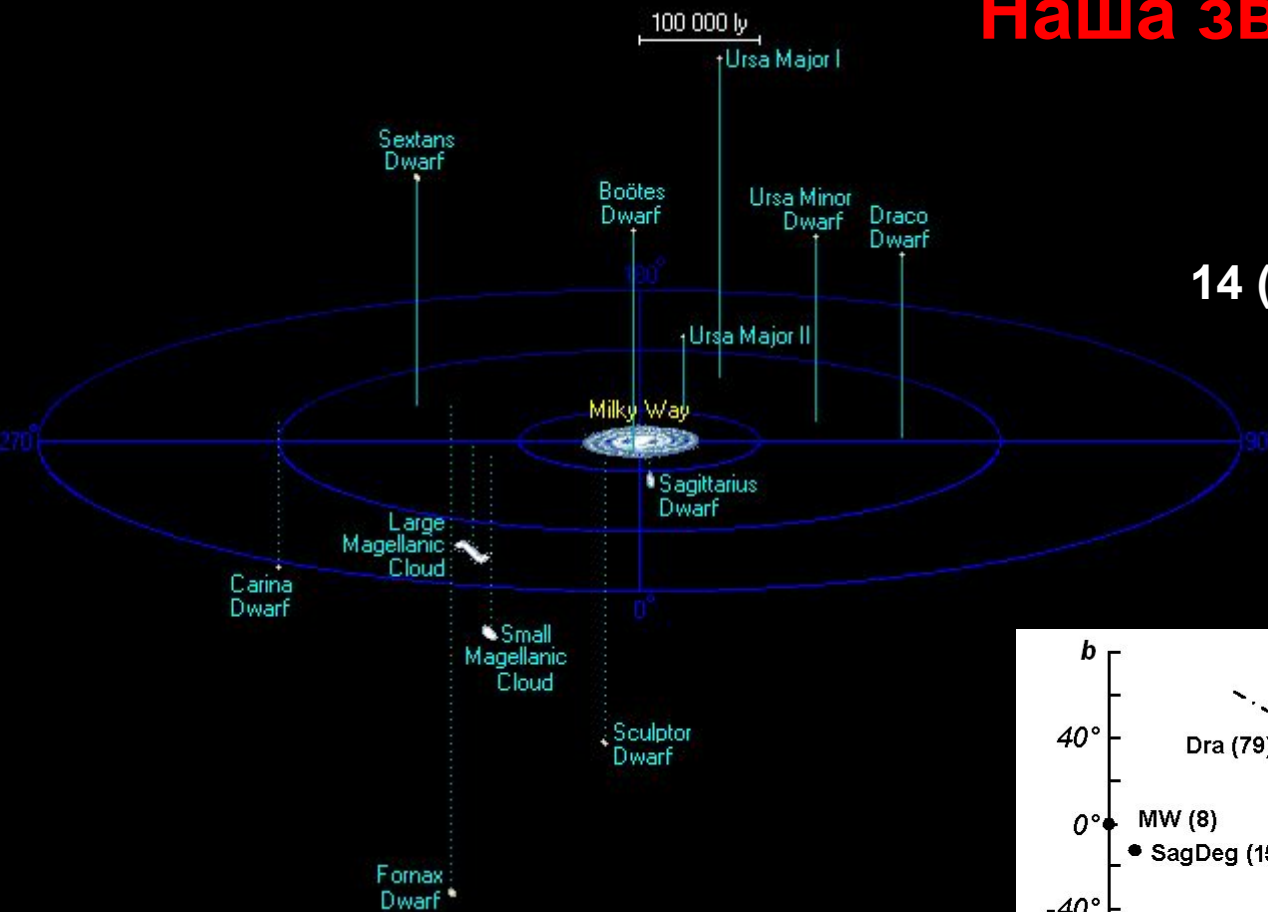


Наша звездная система

Сателлиты Галактики и периферия НЗС

14 (15?) галактик-сателлитов
с $R_{GC} - 13-260$ кпк

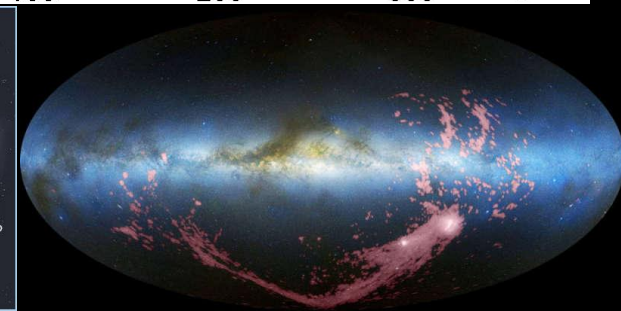
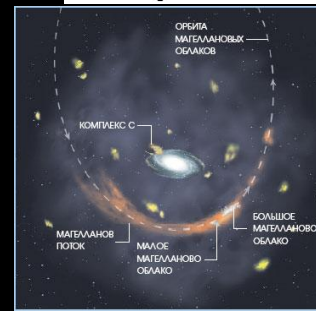
Концентрируются к 3-м
внегалактическим
сателлитарным
поясам (ВГСП)



ВГСП I: в пределах молодого гало

ВГСП II: Магелланов пояс ($\angle$

$\approx 70^\circ$)
ВГСП III: $r > 90$ кпк ($\angle$
 $\approx 50^\circ$)

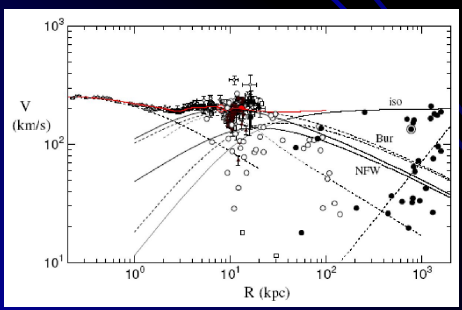
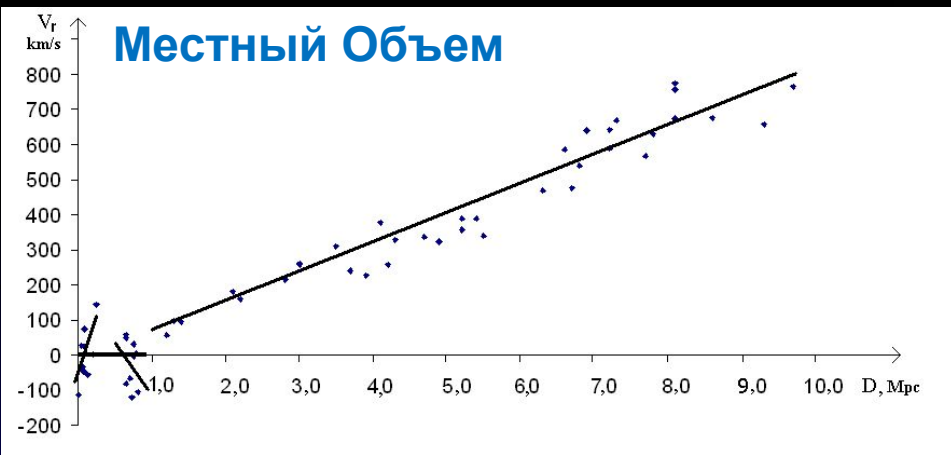


Местная группа галактик

Диаметр – ~ 1.5 Мпк

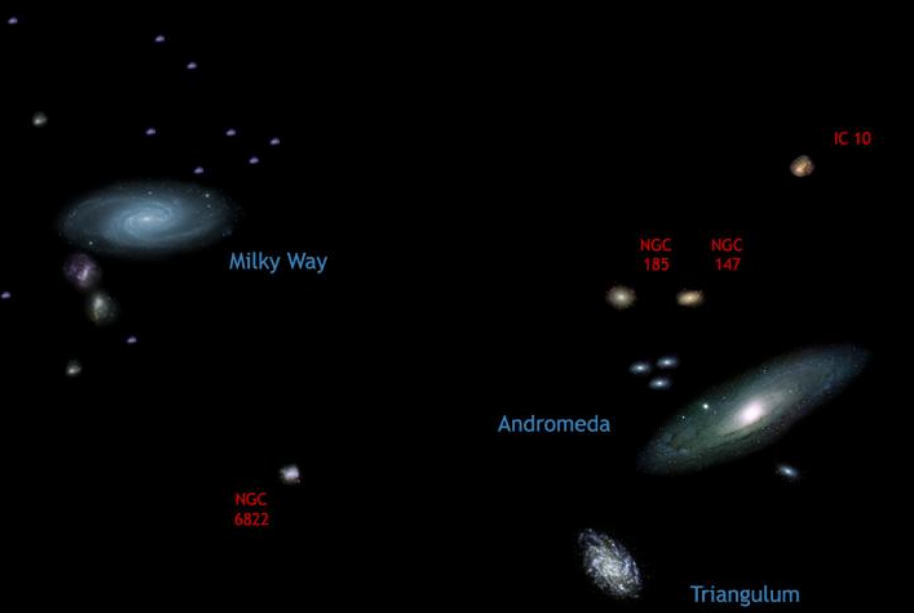
Масса – $2.3 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

- Галактики:
- известно – 50
 - заподозрено – > 15
 - самые массивные – MW и M31



$$\frac{GM_M m}{R^2} > \frac{8\pi G}{3} m \rho_V R$$
$$M_{H3C} \approx M_{подгр-}$$

M31



Эйнштейновский закон всемирного антитяготения (отталкивания)

Ньютоновская сила
тяготения

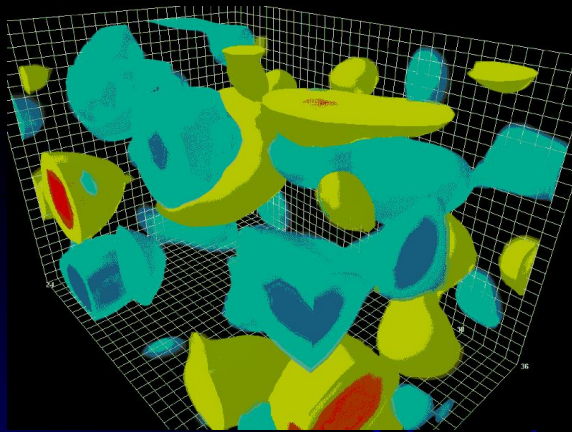
$$F_N = -\frac{GM_M m}{R^2}$$

Эйнштейновская сила
отталкивания

$$F_E = \frac{8\pi G}{3} m \rho_V R$$

Физический вакуум Глинера (1965 г.):

$$\rho_V = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$$



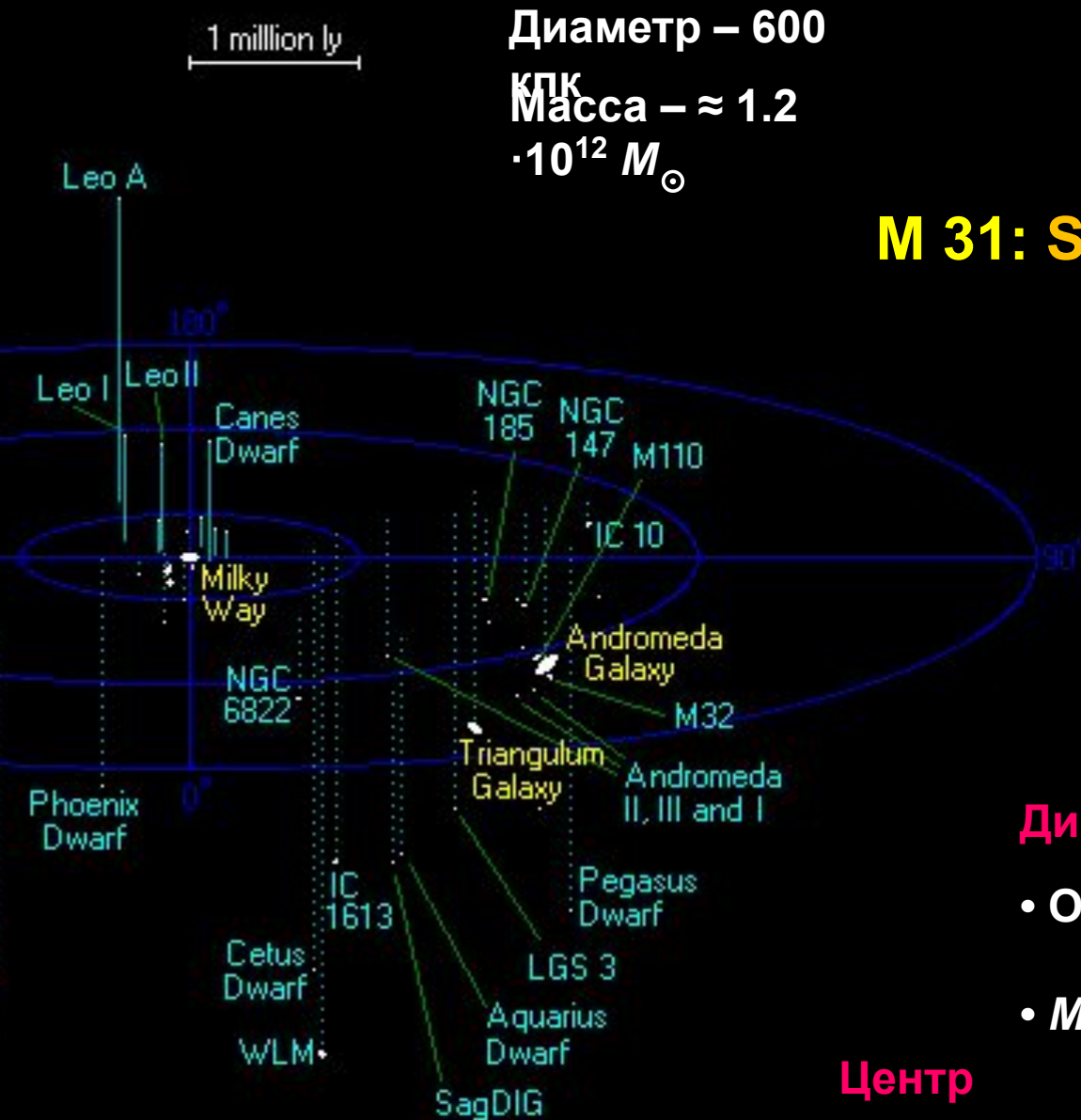
$$F_N + F_E = 0 \quad \rightarrow \quad \rho_M = 2\rho_V$$

$$M_{МГГ} = \frac{8\pi}{3} \rho_V R^3 < 1.5 \cdot 10^{12} M_\odot$$

$$M_{МГГ} = (1.29 \pm 0.14) \cdot 10^{12} M_\odot \quad [\text{Karachentsev I.D.; Kashibadze O.G., 2006}]$$

Допускается возможность влияния темной энергии на сгущивание галактик в их распределении во Вселенной.

Подсистема Андромеды



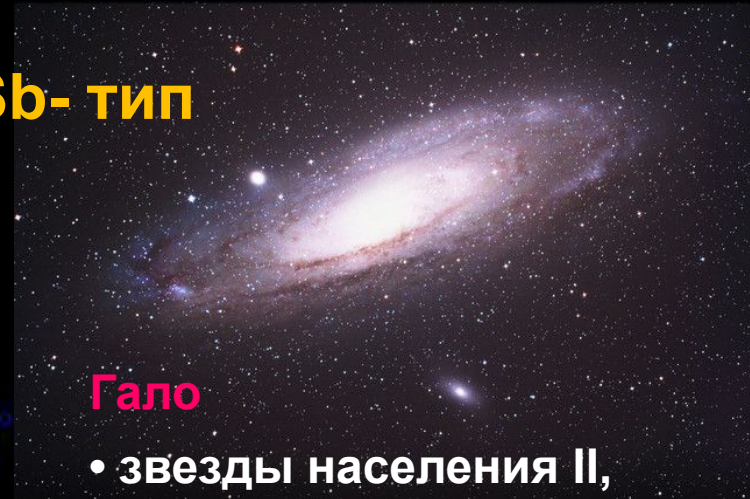
Диаметр – 600

кпк
Масса – $\approx 1.2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

Состав:

- **Туманность Андромеды**,
- 18 сателлитов,
- 2 звездных потока.

М 31: Sb- тип



Гало

- звезды населения II,
 $T = (6-13) \text{ Гг}$,
- цефеиды,
- 460 шаровых скоплений

Диск – двухкомпонентный

- ОВ- ассоциации и комплексы (рукава $R_{GC} = 9-18 \text{ кпк}$),
- $M_{\text{газ M31}} \approx M_{\text{газ MW}}$ (HI, HII),

Центр

- черная дыра –

$$M \approx 6 \cdot 10^7 M_{\odot} = 15 M_{\text{ч.д. MW}}$$

Пространственная структура галактик-сателлитов подгруппы Андромеды

Все галактики: $R_{GC\ M31} \approx 5\ (M32) \div 280\ (LGS\ 3,\ And\ VI)\ \text{кпк}$

Самые массивные (M33 и IC 10) – $R_{GC\ M31} = 225, 250\ \text{кпк}$

Галактики M32, M110 и БМО, ММО

Общие свойства:

- массы и размеры соизмеримы,
- признаки
 - наличие спиральной структуры,
 - действия приливных сил от центральных галактик.

Различия:

- содержание газопылевой составляющей,
- темп современного звездообразования,
- тип (как следствие предыдущих отличий):
 - БМО, ММО – иррегулярные, близкие,
 - M32, M110 – компактные, удалённые.

Концентрация сателлитов к плоскостям, наклоненным к экватору M31:

- $\angle \approx 30^\circ$ – большинство галактик,
- $\angle \approx 80^\circ$ – сфероидальные карликовые галактики.

Галактики Периферии

$R = 400-1360$

кпк

14 галактик (17 кандидатов):

- 1 спиральная,
- 3 эллиптические (карлики)
- 10 иррегулярных.

Эллиптические галактики

в Ките (dSph/E4)

в Тукане (dE4)

$R = 755$ кпк

$R = 980$ кпк

Взаимодействующие галактики

NGC 3109

PGC 29194

(Гидра)

(Насос)

SB(s)m – тип

dE3.5 – тип

$R = 890$ кпк

$R = 1320$ кпк

Иррегулярные галактики

7 из 10 – имеют перемычки (IB-тип)

Галактика Барнарда

в Стрельце (NGC 6822) – ближайшая к Солнцу и самая массивная.

$R = 500$ кпк

$M = 1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$



d- галактика в Стрельце (SagDIG) – самая удалённая: $R = 1040$ кпк

Объекты 2-х типов звездообразования:

- содержат в 20 раз меньше металлов, чем у Солнца,
- молодые звезды с $T = 4-8$ млрд. лет.

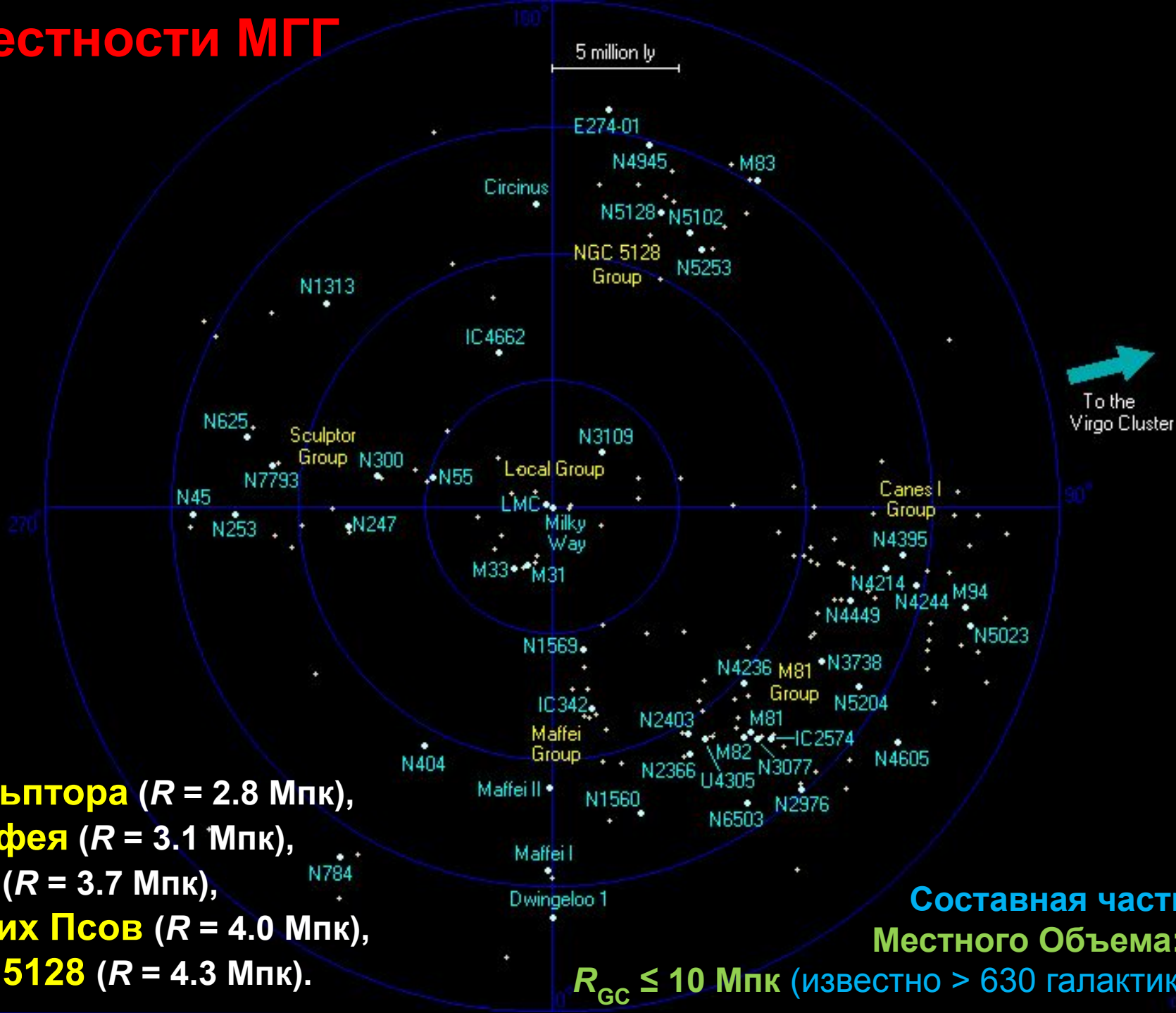
За пределами Местной группы

- Окрестности Местной группы.
- Местное Сверхскопление (Девы)
 - структура и астрофизические свойства;
 - кинематика.
- Гиперскопление Ланиакея и Местный войд
 - структура и состав;
 - окрестности.
- Ячеистая структура Вселенной.



Окрестности МГГ

$R \leq 5$
Мпк



- **Скульптора** ($R = 2.8$ Мпк),
- **Маффея** ($R = 3.1$ Мпк),
- **М 81** ($R = 3.7$ Мпк),
- **Гончих Псов** ($R = 4.0$ Мпк),
- **NGC 5128** ($R = 4.3$ Мпк).

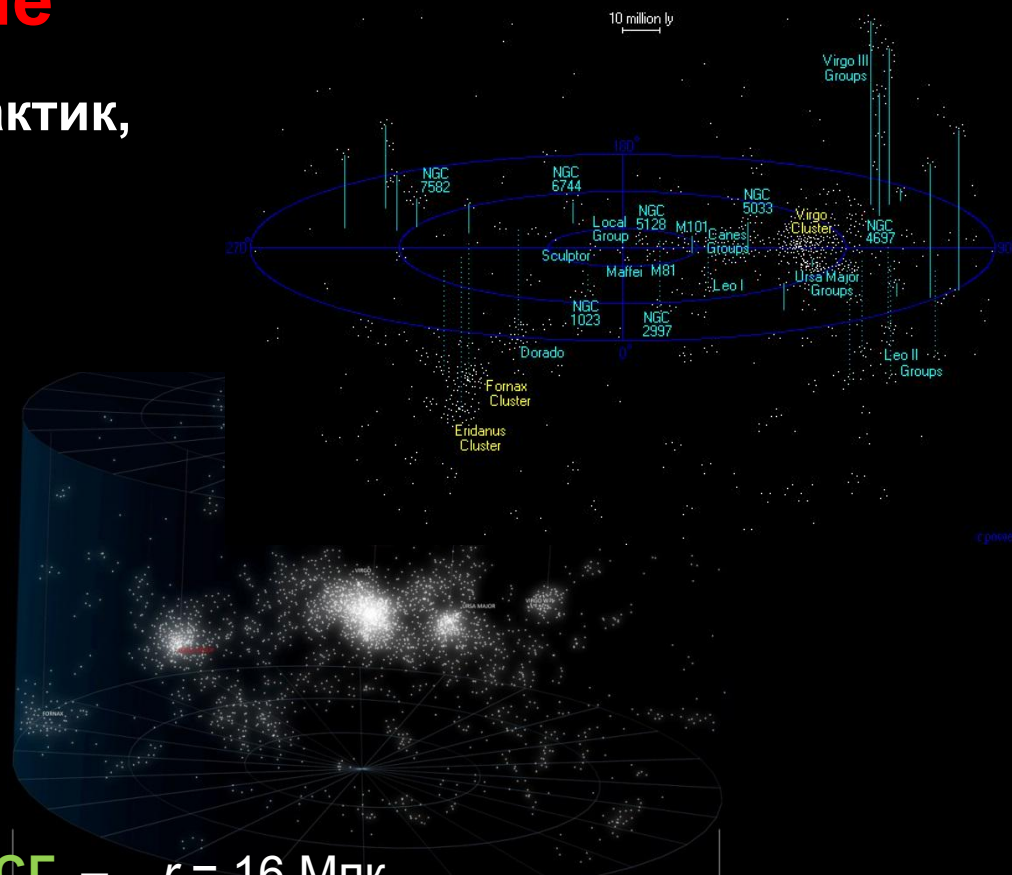
$R_{GC} \leq 10$ Мпк (известно > 630 галактик)

Составная часть
Местного Объема:

Местное сверхскопление

- ≈ 100 групп и скоплений галактик,
- $N > 30\,000$ галактик,
- $M \sim 10^{15} M_{\odot}$,
- $D = 60$ Мпк.

- 60% галактик сосредоточены в узком диске, $D \approx 50$ Мпк, толщиной 3 Мпк.
- 98% всех галактик входит в 11 галактич. облака и занимают 5% объема МССГ – обособлены в пространстве.



Центр МССГ – $r = 16$ Мпк

ближайшее скопление галактик в Деве :

$D = 5$ Мпк

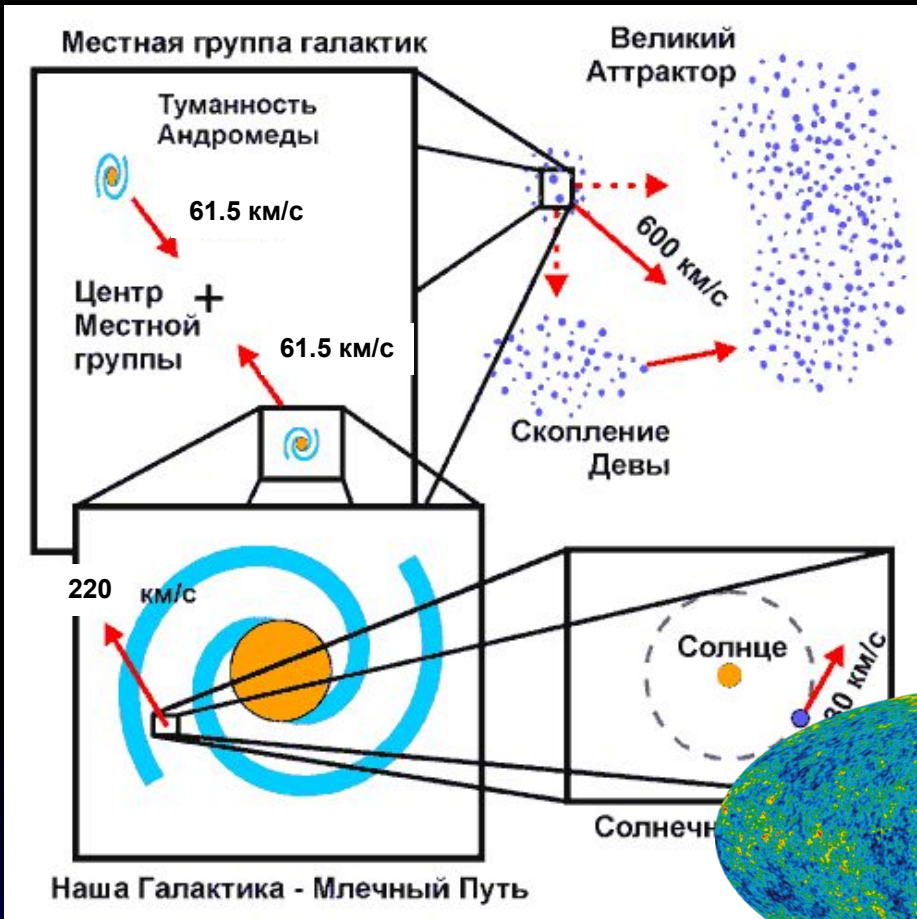
$n \approx 500$ галактик/Мпк³ – на порядок выше, чем в группах галактик,
 $N \approx 200$ галактик высокой и средней светимости (2/3 – спиральные).

Ожидаемое полное число – ≈ 2000 галактик.

Состоит из трёх групп, удаленных на 16, ≈ 21 и ≈ 23 Мпк.

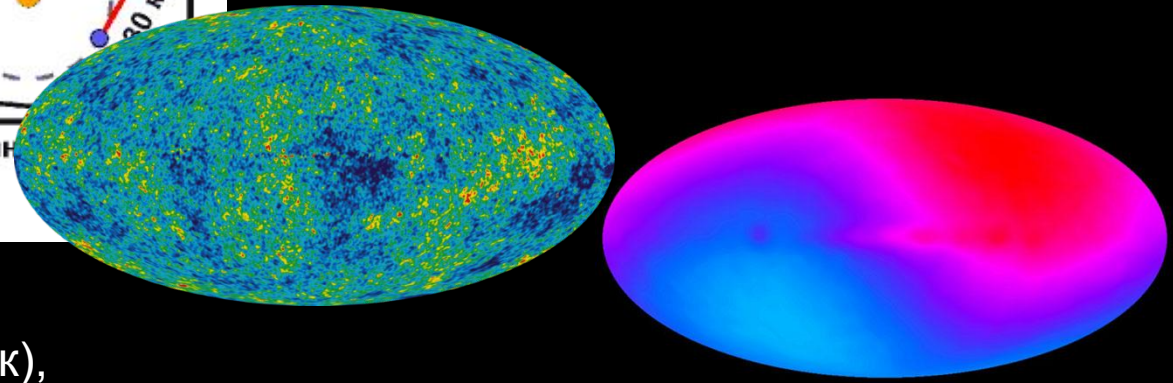
Дева А – центр МССГ: cD- галактика – M 87, $r = 16$ Мпк

Кинематика в Сверхскоплении Девы



Центр МГ движется относительно МССГ со скоростью 300 км/с , а относительно микроволнового фона – 620 км/с .

Составляющий вектор этих движений направлен на Большой Аттрактор, оказывающий гравитационное действие на МГГ и на МССГ.



Тензор постоянной Хаббла:

- на ядро МССГ – $81 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$,
- на его полярную ось – $48 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$,
- на $\perp$ к плоскости, образованной с этой ориентацией – $62 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$.

Карта высокого пространственного распределения реликтового излучения и отклонений от изотропного распредел. с $T = 2.728 \pm 0.004 \text{ К}$ («+» – красный)

Гиперскопление Ланиакеля

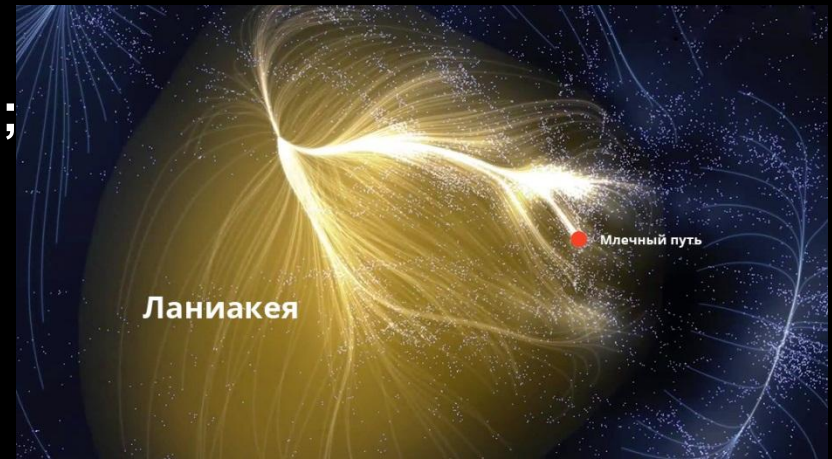
Ланиакеля (по-гавайски — «необъятные небеса») — фактически, это гиперскопление галактик, в котором содержатся:

- Сверхскопление Девы;
- сверхскопление Гидры-Центавра;
- Великий Аттрактор.

$\varnothing \approx 160 \text{ Мпк};$

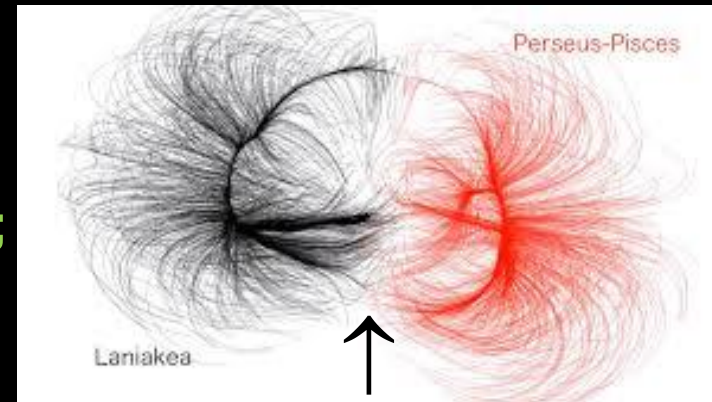
$N_g \approx 100\,000;$

$M \sim 10^{17} M_{\odot} \approx 10^2 M_{\text{Св_Девы}}$



Соседи:

- сверхскопление Персея-Рыб (принадлежит цепи Персей-Пегас в Комплексе сверхскоплений Рыб-Кита);
- Местный войд (англ. *void* — пустота).

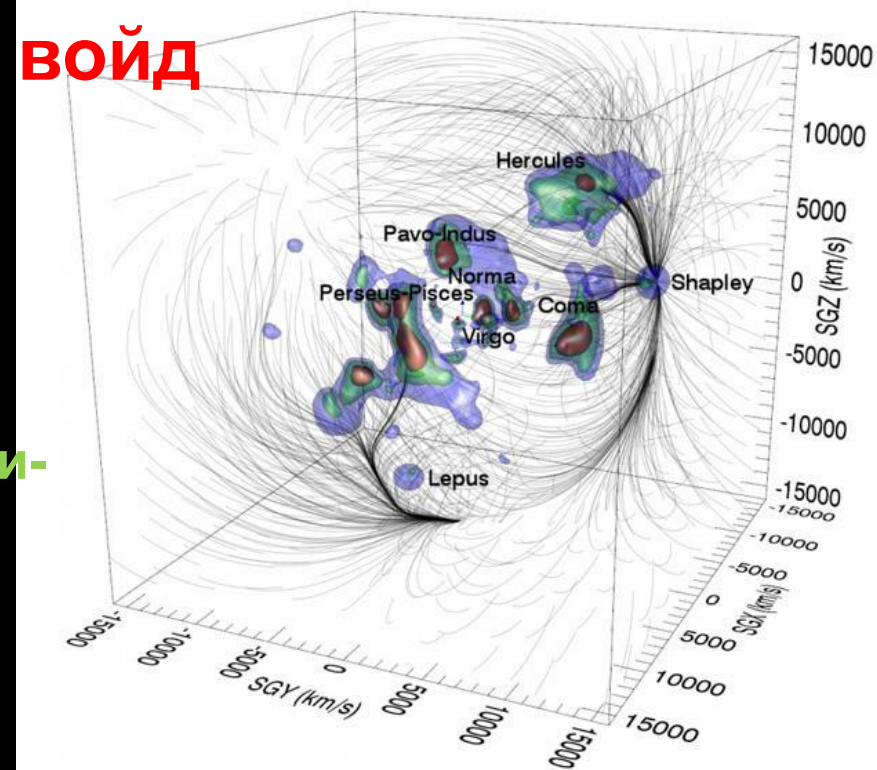


Местный войд

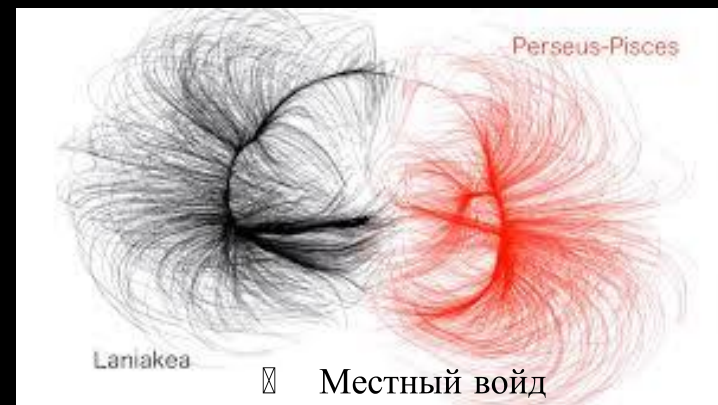
Местный войд

Местный войд — ближайшая гигантская область, практически свободная от галактик:

- состоит из 3-х отдельных секторов, разделённых мостами-тонкими нитями;
- расположен рядом с Местной группой галактик (МГГ) и примыкает к ней;
- удален от МГГ на расстоянии 23 Мпк;
- ограничен Местным Листом*, в котором находится МГГ.

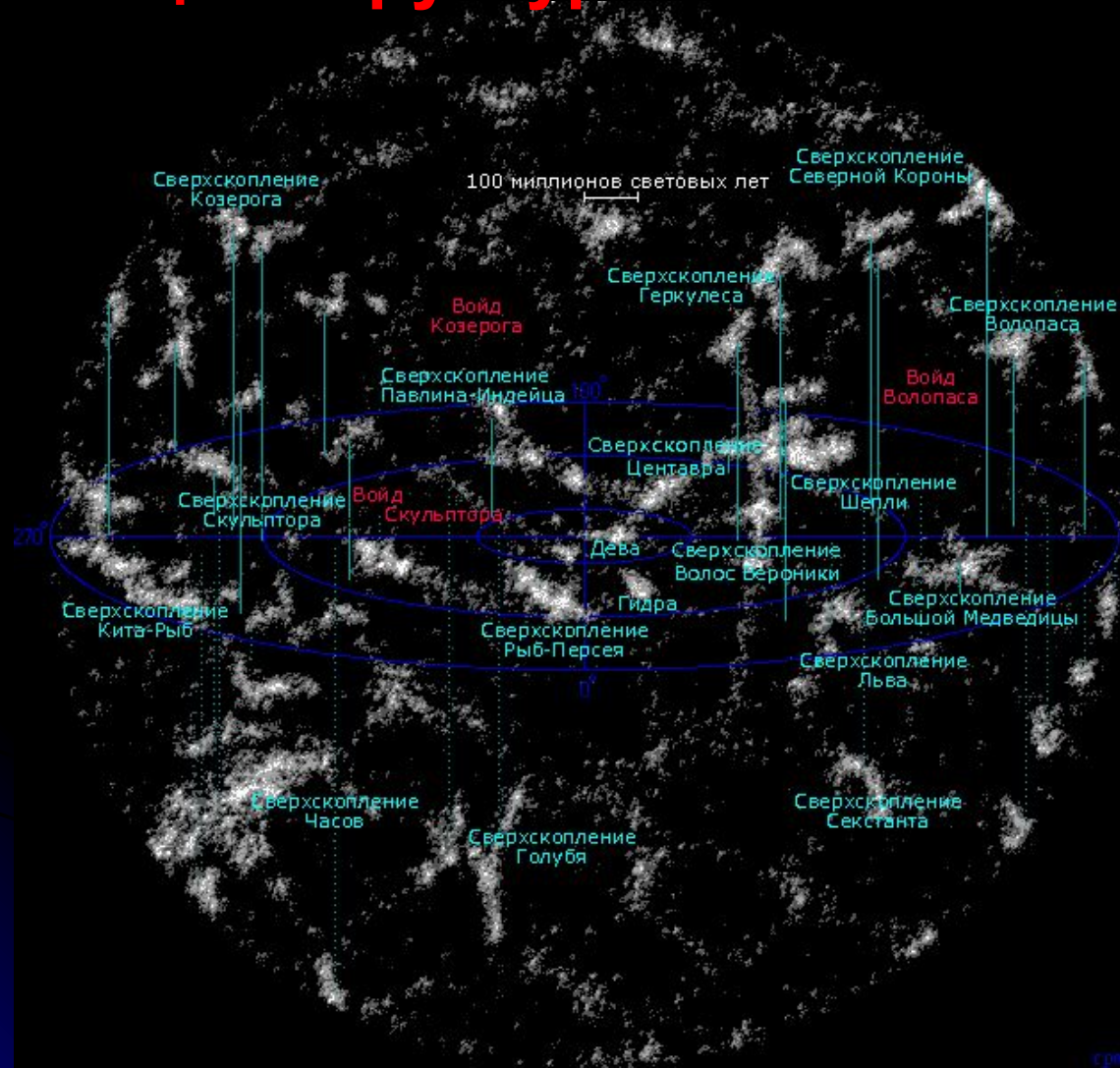


$$\emptyset_{\text{МВ}} \gtrsim 45 \text{ Мпк}$$

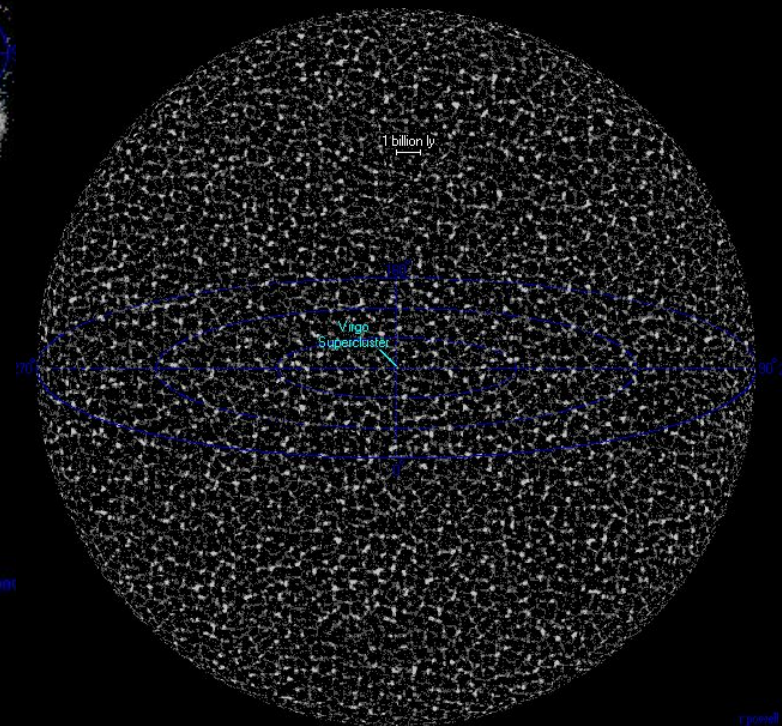


* Галактическая нить, содержащей в себе МГГ.

Общая структура Местного сверхскопления



Карта ближайших сверхскоплений
ближе $r = 1$ млрд. световых лет



Метагалактика (видимая Вселенная)
ближе $r \approx 14$ млрд. световых лет

Эволюция звездных систем

Возникновение и эволюция галактик

Спиральные галактики

Эллиптические галактики

Линзовидные галактики

$S \rightarrow SO$
 $SB \rightarrow SBO \rightarrow E$

Быстро вращающееся облако,



сжимаясь,



превращается в тонкий вращающийся диск



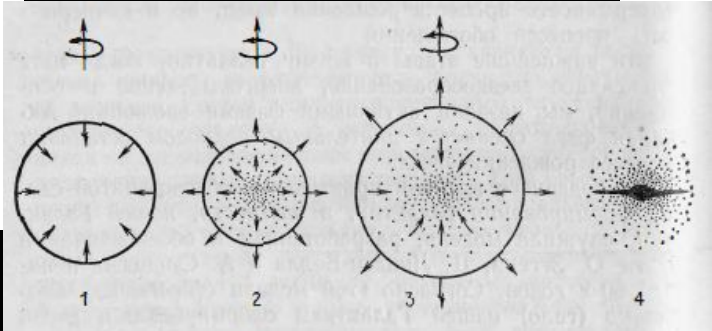
Медленно вращающееся облако,



сжимаясь,



превращается в медленно вращающийся сфероид



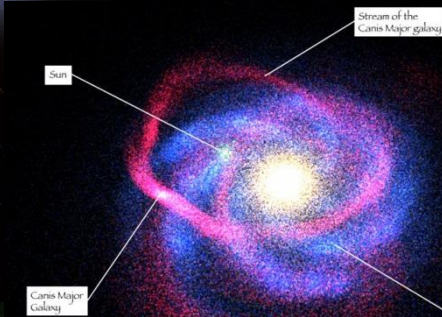
Эволюция звездных систем

Возникновение и эволюция галактик

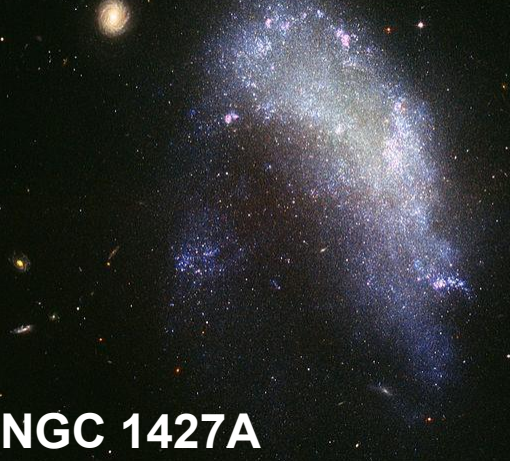
Неправильные галактики (звездные потоки)



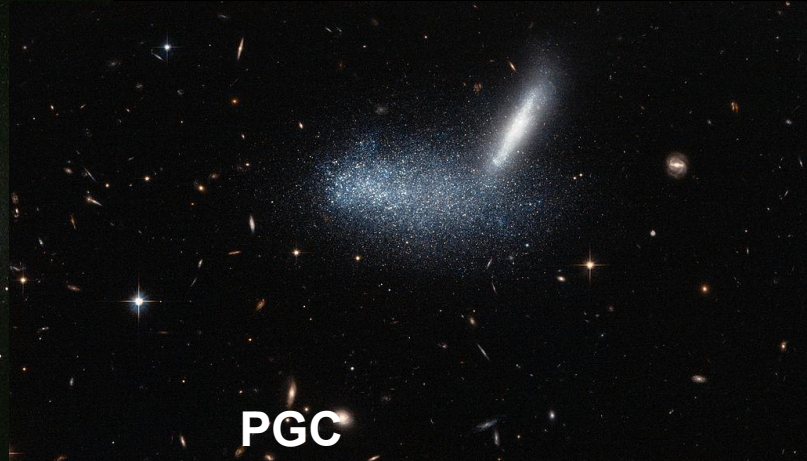
NGC 2363



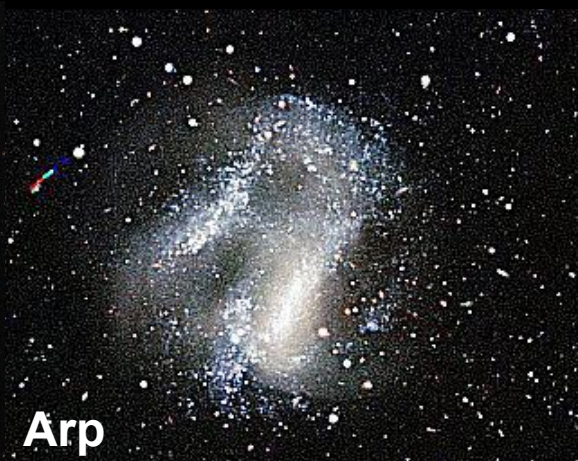
Кольцо Единорога – 60 кпк «след» от приливной силы MW (2 мкм – обзор неба)



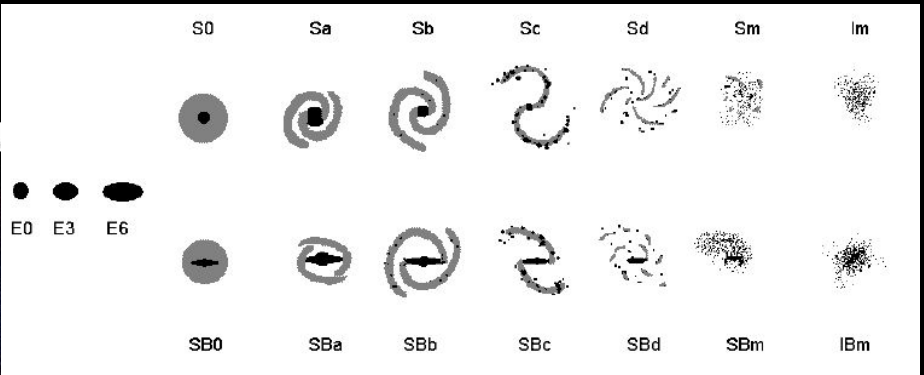
NGC 1427A



PGC



Arp

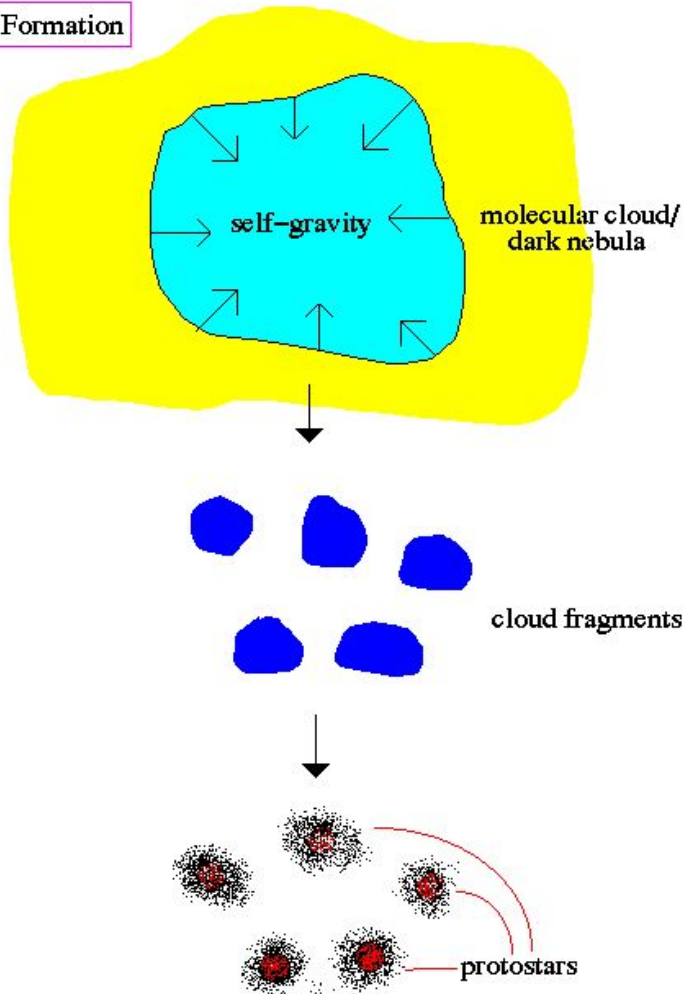


Эволюция звездных систем

Возникновение звездных скоплений и ассоциаций

Фрагментация межзвездной среды (молекулярных облаков)

Star Formation



Jeans Mass:

$$M_J \sim (k_B / G m_H)^{3/2} T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Typical values of Jeans mass:

- neutral H cloud: $T \sim 100\text{K}$, density $\sim 10^{-21} \text{ kg/m}^3 \Rightarrow M_J \sim 10^4 - 10^5 M_\odot$
- dense molecular: clouds $T \sim 10\text{K}$, density $\sim 10^{-19} \text{ kg/m}^3 \Rightarrow M_J \sim 100 M_\odot$



М 35 и более старое
NGC 2158 (внизу справа)

ОВ- сверхассоциация
30 Золотой Рыбы БМО

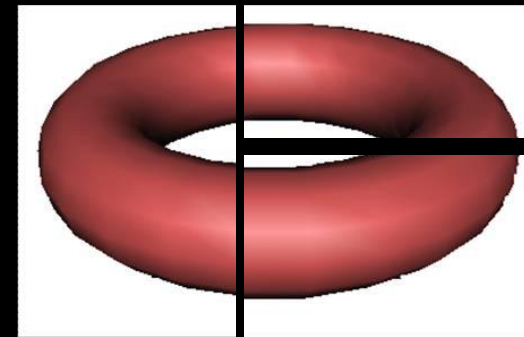
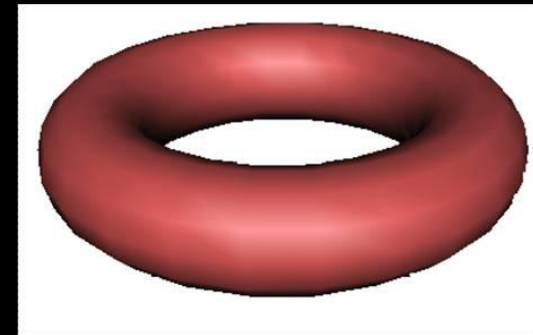
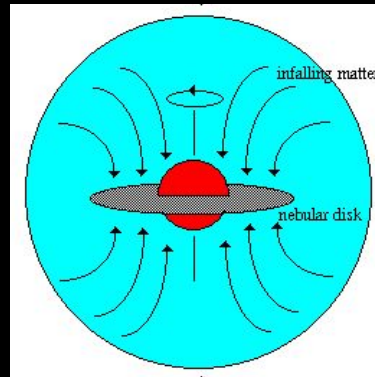
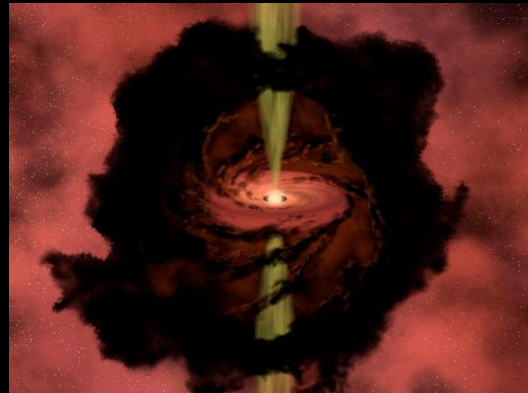
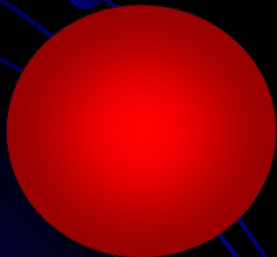
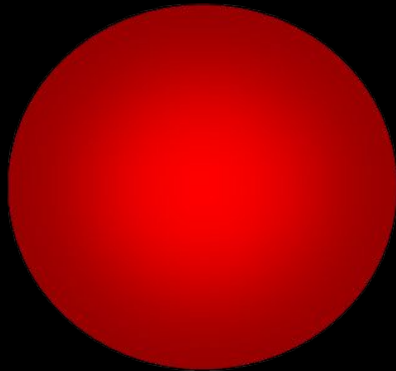
Образование планетных систем

Момент количества движения $J (cm^2 c/)$

$$< 5 \cdot 10^{50} (M/M_{\odot})^{5/3}$$

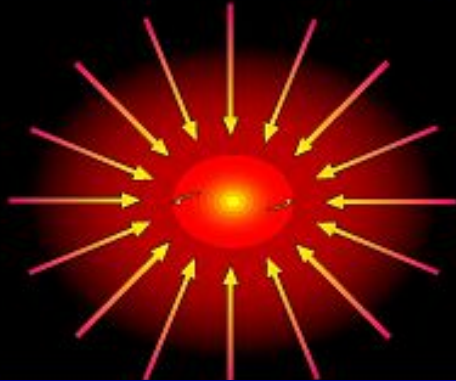
$$5 \cdot 10^{50} (M/M_{\odot})^{5/3} \div 10^{52} (M/M_{\odot})^{5/3}$$

$$> 10^{52} (M/M_{\odot})^{5/3}$$

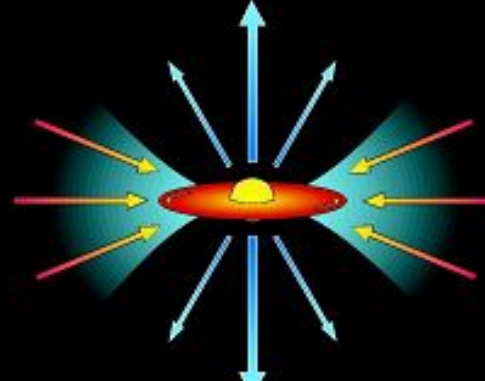


Эволюция звездных систем

Образование и эволюция планетных систем



10^4 лет; $10-10^4$ а.е.; $10-300\text{K}$



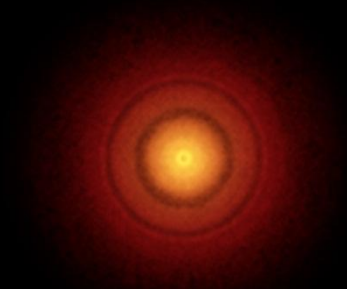
10^{5-6} лет; $1-1000$ а.е.; $100-3000\text{K}$



10^{6-7} лет; $1-100$ а.е.; $100-3000\text{K}$



10^{7-9} лет; $1-100$ а.е.; $200-3000\text{K}$

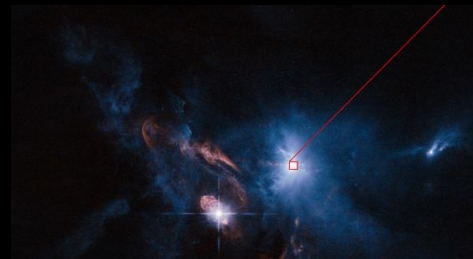


TW Hydrae (2016)



ALMA (2014), Чили

66 антен: $54 - \varnothing = 12$ м, $12 - \varnothing = 7$ м ($\lambda = 0.3 \div 9.3$ мм)



HL Taurus (2014)

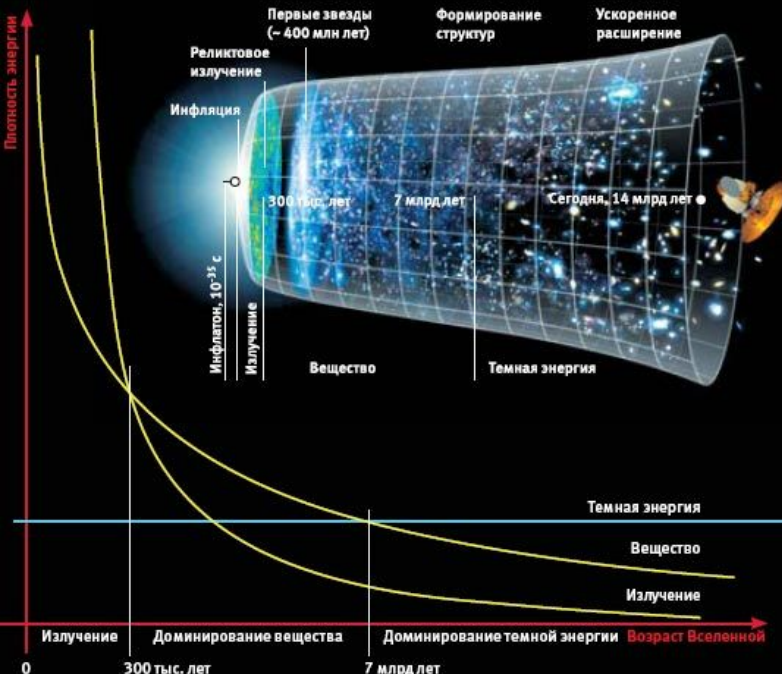
Общий сценарий развития Вселенной

Три основные стадии развития:

1) образование барионной материи и вступление в действие фундаментальных законов физики ($t_U < 2 \cdot 10^5$ лет, $T > 4000$ K);

2) возникновение космических тел, звездных систем и формирование крупномасштабной структуры Вселенной ($t_U \approx 2 \cdot 10^5 \div 1.4 \cdot 10^{10}$ лет);

3) будущее развитие космических объектов и материи Вселенной ($t_U > 1.4 \cdot 10^{10}$ лет)



Общий сценарий развития Вселенной

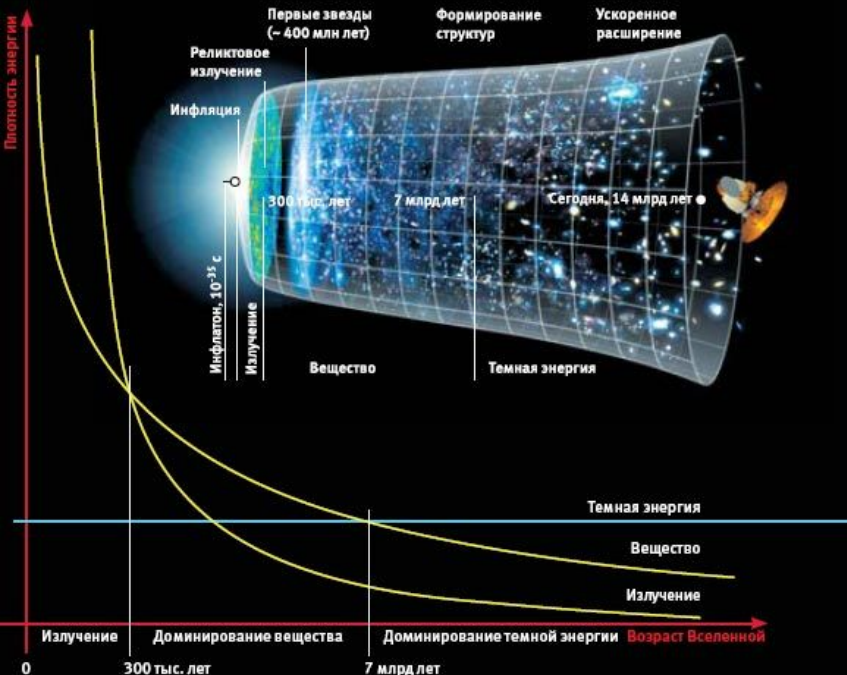
Первый этап развития ($t_U < 2 \cdot 10^5$ лет):

- Действие гравитации, как отдельного взаимодействия (планковская эра, $t_U \sim t_{Pl} \sim 10^{-43}$ с и $T \sim T_{Pl} \sim 10^{32}$ К).
- Действие Большого объединения (стадия инфляции, $t_U \sim 10^{-43} \div 10^{-35}$ с, $T \sim 10^{32} \div 10^{27}$ К).
- Окончательное разъединение всех взаимодействий (адронная эра, $T \sim 10^{16}$ К).
- Образование барионов (конец адронной эры, $T \sim 10^{12}$ К), после невозможности аннигиляции кварков с антикварками.
- Образование e^- и e^+ (лептонная эра, $T < 10^{12}$ К).
- Вселенная стала прозрачной для излучения (эра излучения, $T \approx 3000$ К) $\rightarrow$ плазма: 75% – H, 25% – ^4He .

Общий сценарий развития Вселенной

Второй этап развития ($t_U \sim 2 \cdot 10^5$ лет ÷ наше время):

- Первые звезды ($t_U \sim 10^6? \div 10^7? \div 10^8?$ лет).
- Образование галактик ($t_U \sim 1 \div 5$ млрд. лет) и начало формирования их населений (в последующие $\sim 1 \div 2$ млрд. лет).

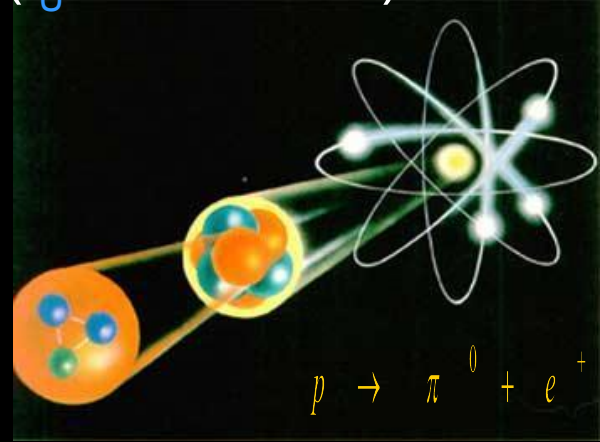


- Второе (массовое) звездообразование ($t_U \sim 4$ млрд. лет).
- Сравнивались плотности вещества и Темной энергии ($t_U \approx 7$ млрд. лет).
- Возникновение Солнечной системы ($t_U \approx 8$ млрд. лет).

Общий сценарий развития Вселенной

Третий этап развития ($t_U > 14$ млрд. лет) будущее:

- MW+M31 станет cD- галактикой ($t_U = 10^{11}$ - 10^{12} лет).
- Исчерпается весь галактический газ ($t_U = 10^{11}$ - 10^{12} лет).
- Ядерные реакции в звездах исчерпаются ($t_U = 3 \cdot 10^{14}$ лет).
- Распад протонов ($t_U \sim 10^{37}$ лет).
- Распад планет (за $t \sim 10^{38}$ лет).
- Распад черных карликов (за $t \sim 10^{39}$ лет).
- Распад черных дыр
 - образовавшихся из звезд Pop I и II — за $t \sim 10^{68}$ - 10^{70} лет,
 - самых массивных (из звезд Pop III) — за $t \sim 10^{73}$ лет,
 - составляющих ядра галактик ($\sim 10^8 M_\odot$) — за $t \sim 10^{89}$ лет.



Сценарий может и другим ☺!?

Спасибо за внимание !

