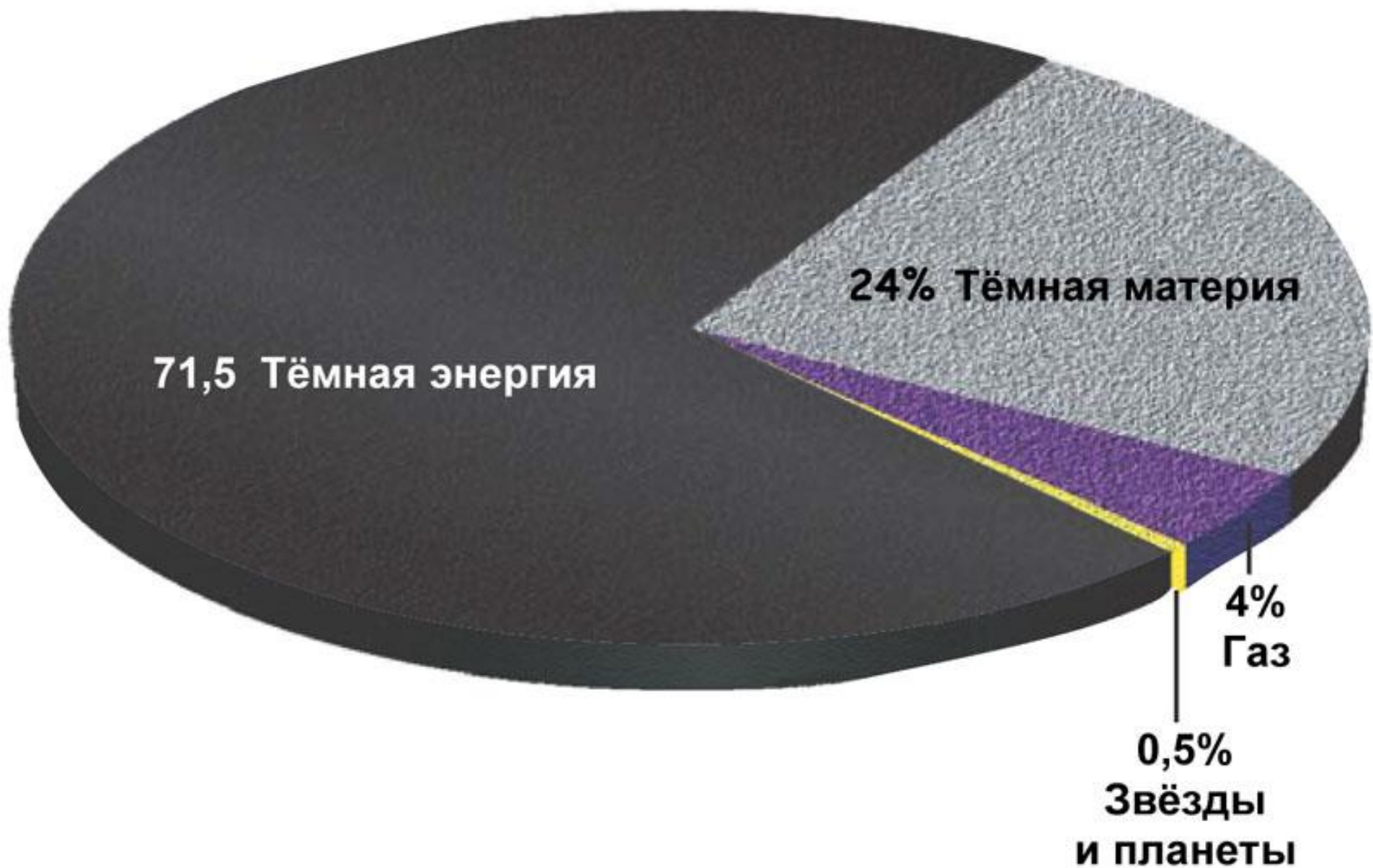




Рождение и эволюция звёзд

Сурдин В.Г.

Состав (нашей) Вселенной



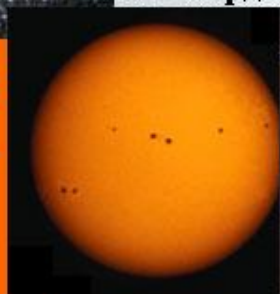




Образование звезд – непрерывный галактический процесс



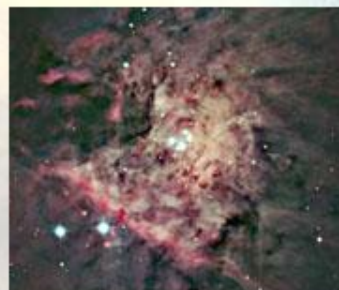
Солнце
4.5 млрд.лет



Плеяды
100 млн.лет



Трапеция
< 1 млн.лет



HH47
< 10 тыс.лет

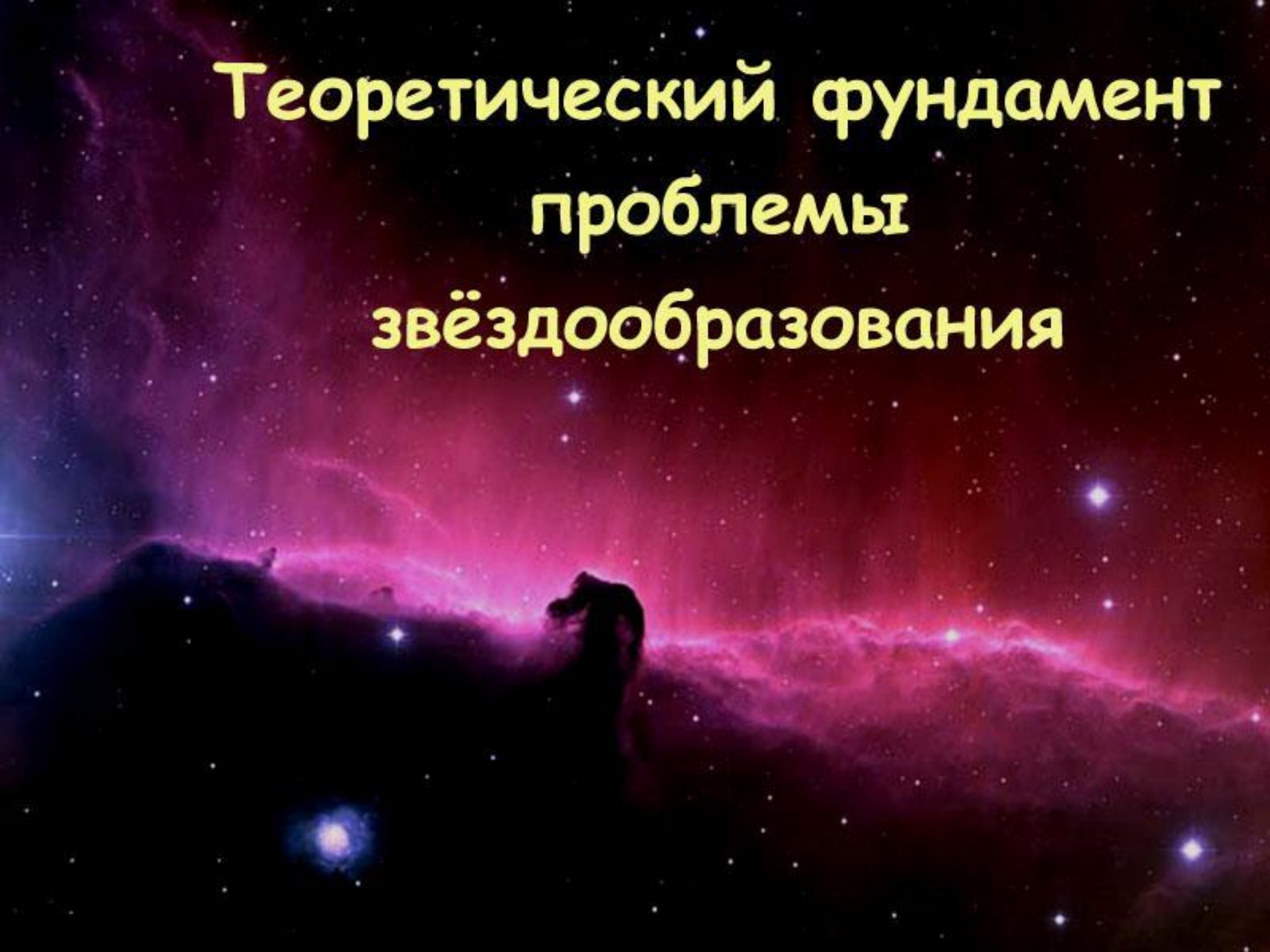


Bulge

Disk

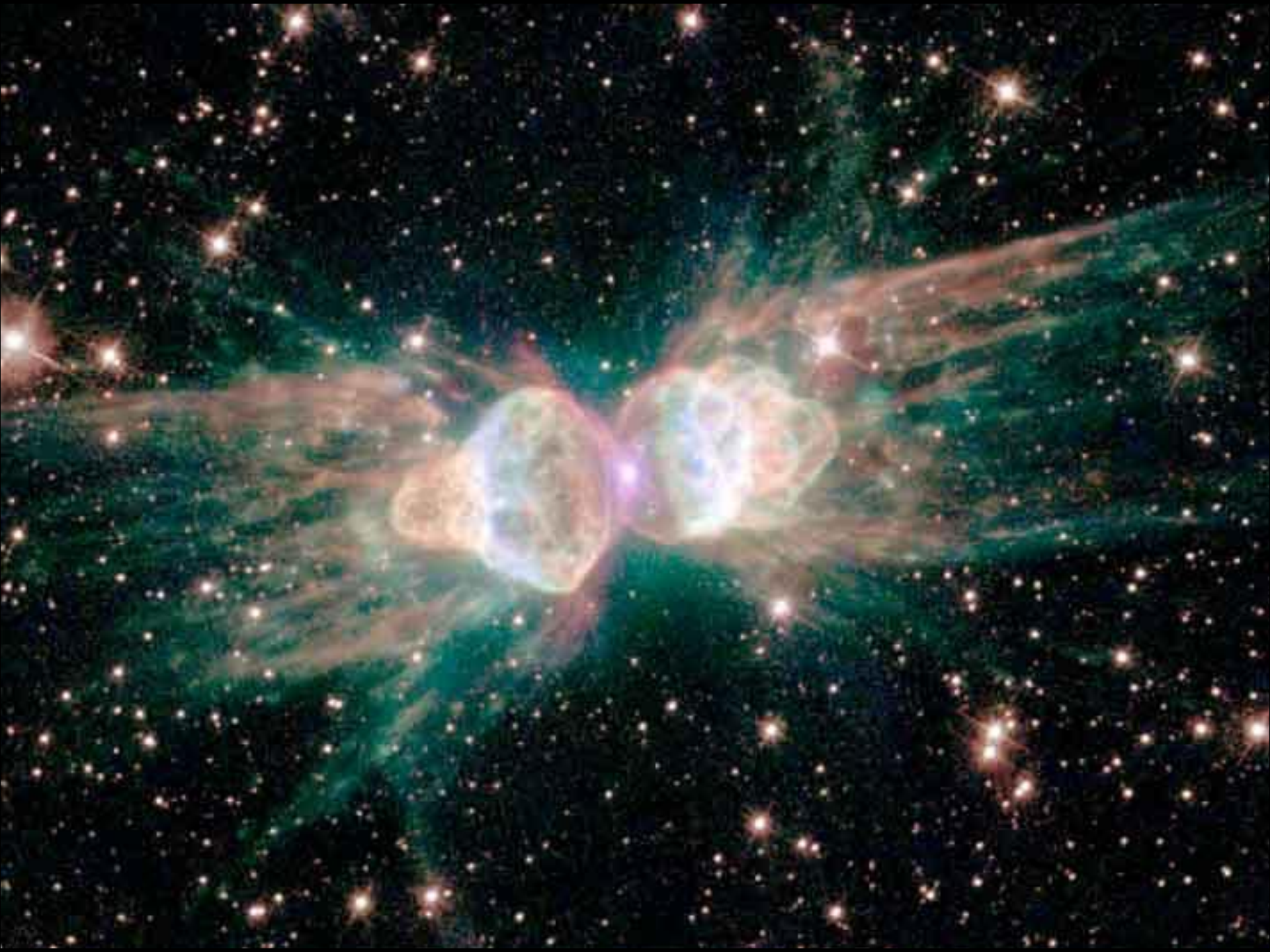


**Теоретический фундамент
проблемы
звёздообразования**



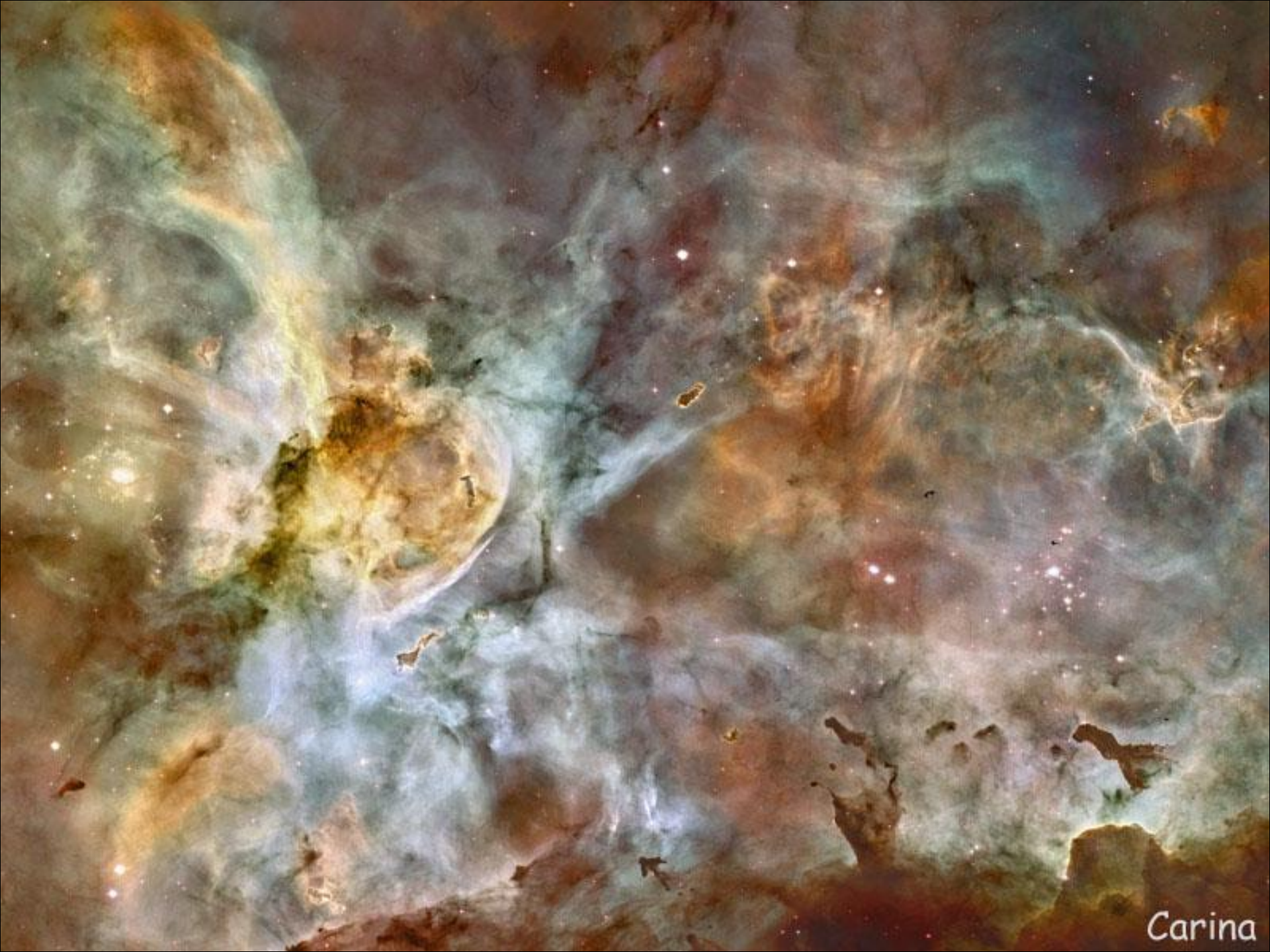




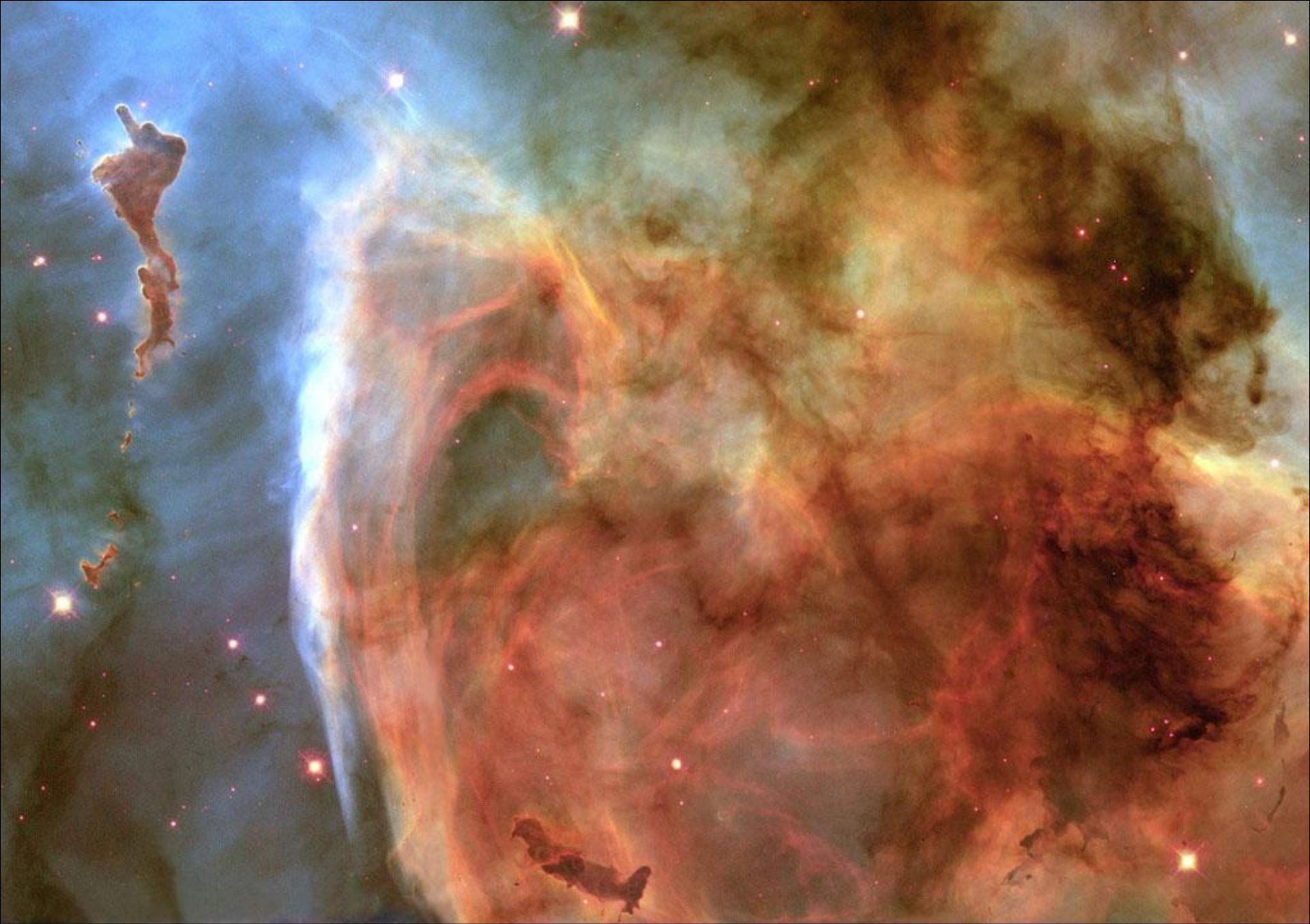






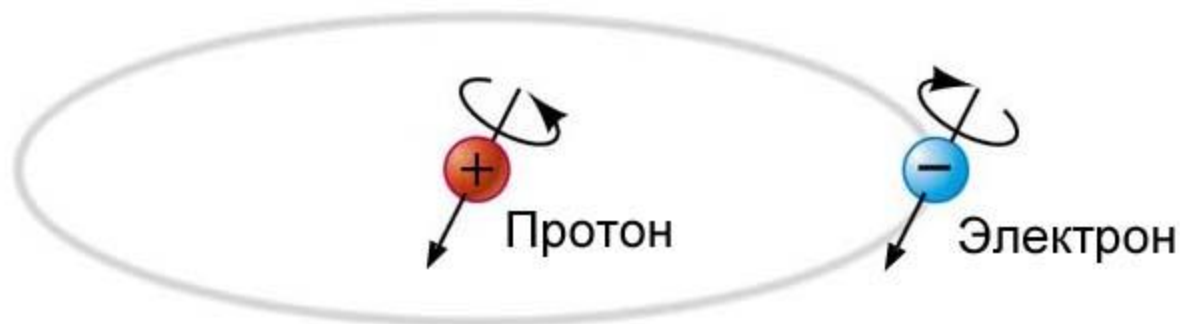


Carina



Carina

Взаимодействие спиновых магнитных моментов



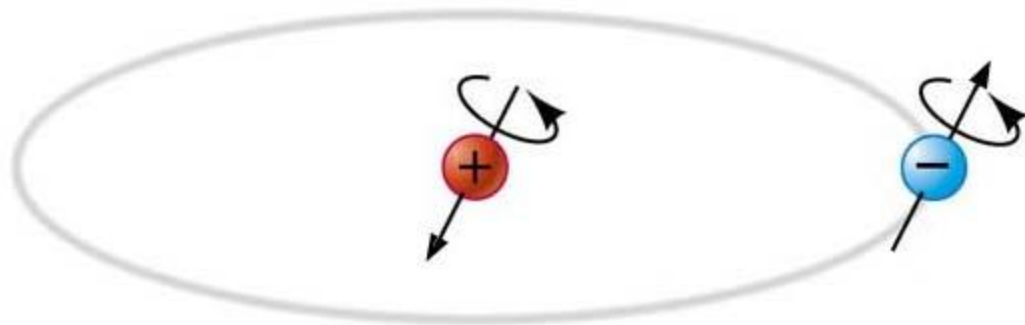
Антипараллельные спины
Параллельные магнитные моменты



Излучение кванта
 $\lambda = 21$ см



Причина сверхтонкого
расщепления уровней
энергии у атомов и
механизм излучения
линии 21 см
атомом водорода



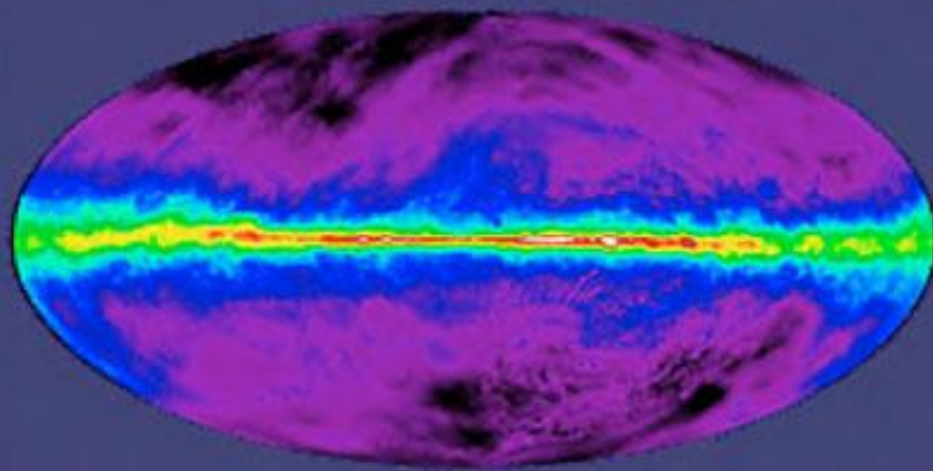
Параллельные спины
Антипараллельные магнитные моменты

Галактика в разных диапазонах волн

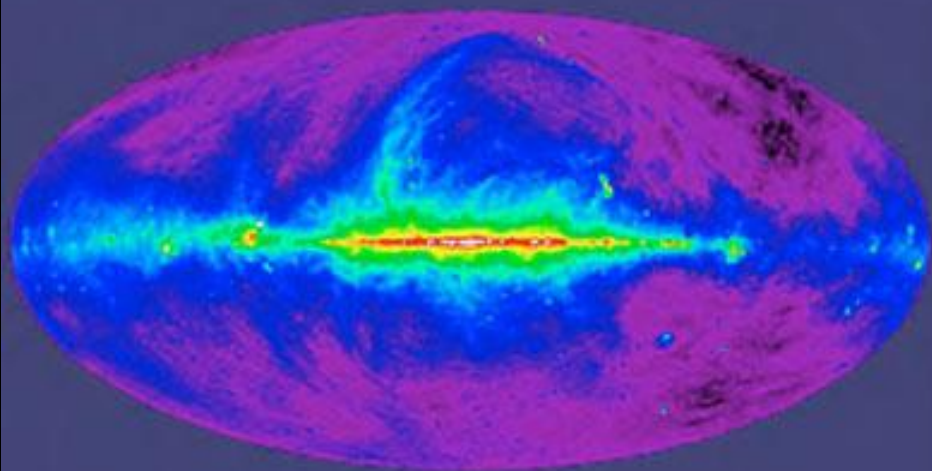
optical



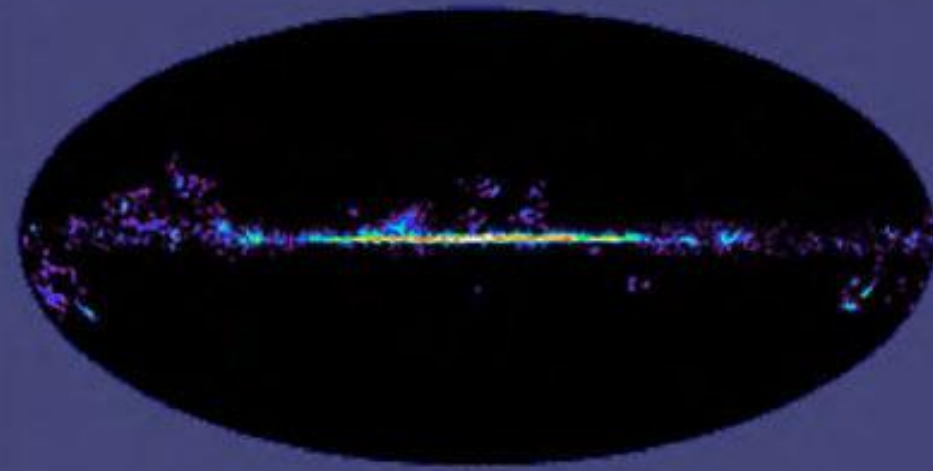
HI line (1420 MHz)



radio continuum (408 MHz)



CO(1-0) line (115 GHz)



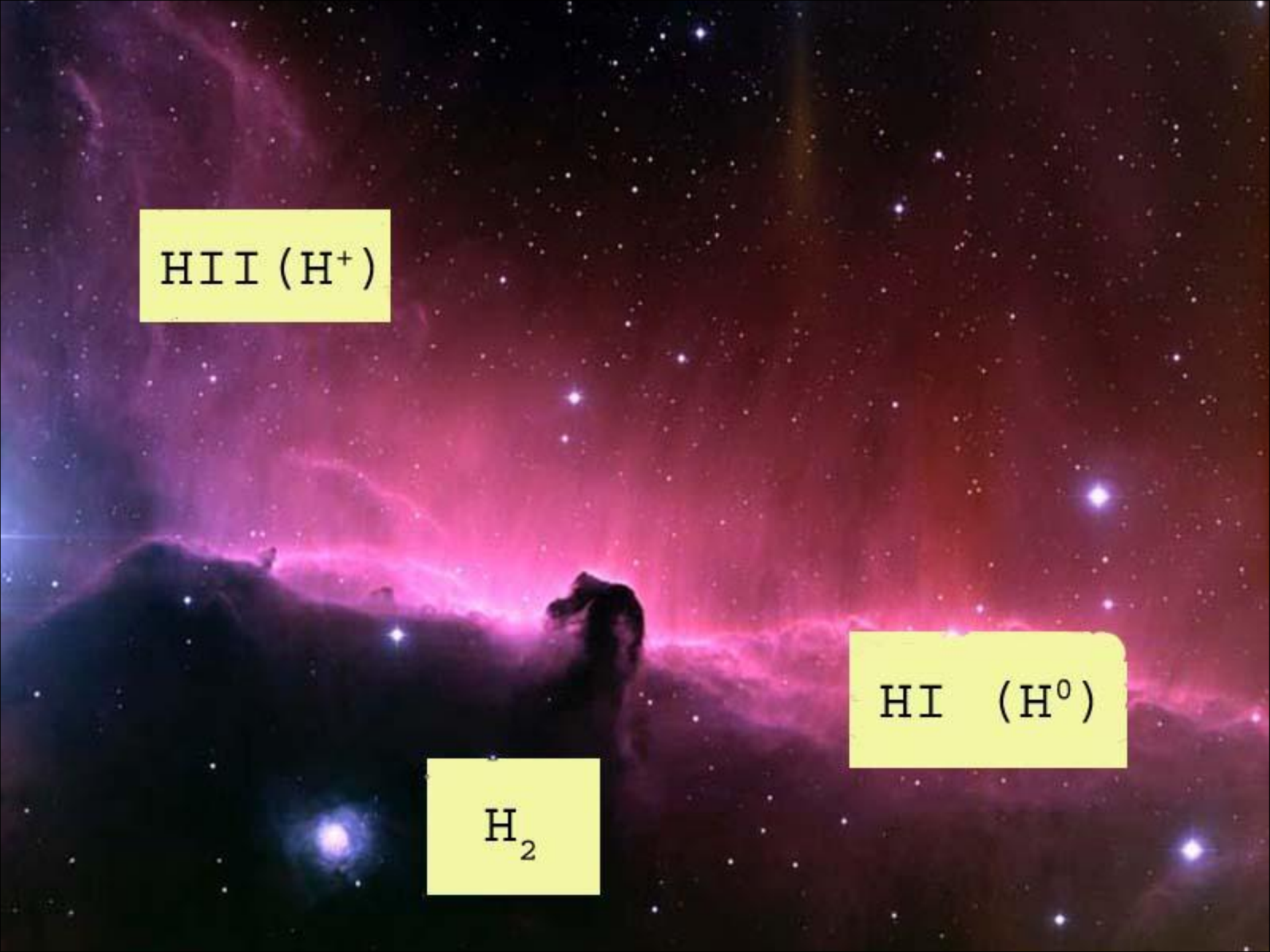






**Межзвездные
молекулярные облака
и
рождение звезд**





HII (H^+)

HI (H^0)

H_2

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МОЛЕКУЛЫ

Формула	Название молекулы	Спектральный диапазон	Год открытия
CH	Метилидин	Опт	1937
CN	Циан	Опт	1940
OH	Гидроксил	Р 18 см	1963
H ₂ O	Водяной пар	Р 1,4 см	1968
NH ₃	Аммиак	Р 1,3 см	1968
H ₂ CO	Формальдегид	Р 6,2 см	1969
CO	Моноокись углерода	Р 2,6 мм	1970
H ₂	Молекулярный водород	УФ	1970
НСООН	Муравьиная кислота	Р 18 см	1970
HCN	Синильная кислота	Р 3,4 мм	1970
CH ₃ OH	Метанол (древесный спирт)	Р 36 см	1970
NH ₂ CHO	Формаид	Р 6,5 см	1971
H ₂ S	Сероводород	Р 1,8 мм	1972
CH ₃ CH ₂ OH	Этиловый (винный) спирт	Р 2,9 мм	1974

Межзвездная пыль - катализатор химических реакций



На поверхности пылинки атомы водорода
объединяются в молекулу

В 1902 г. Джинс впервые записал уравнения газодинамики с учетом гравитации и обнаружил, что они имеют два решения:

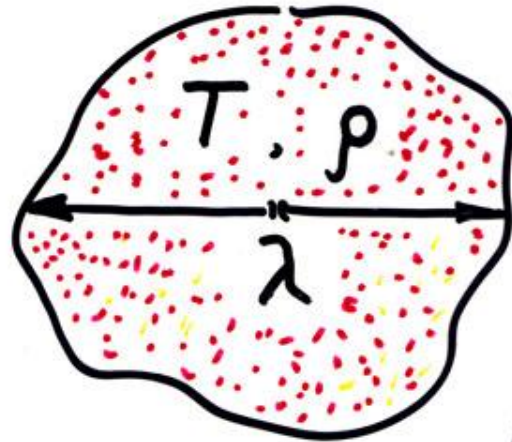
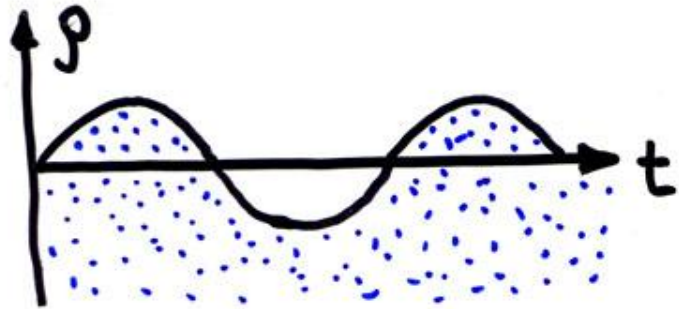
звуковая волна
и
коллапс

Джеймс Хопвуд
Джинс
1877-1946



Формула Джинса

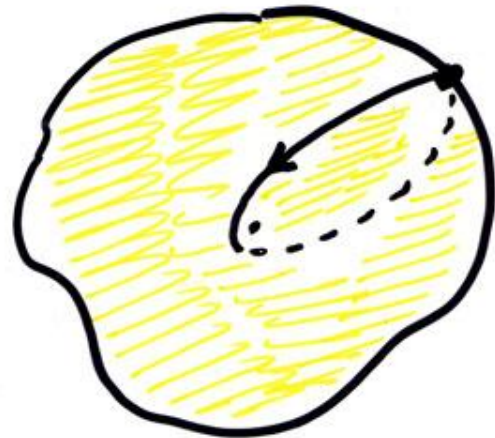
1902 г. Джеймс Хопвуд Джинс (James Jeans)



$$M = \frac{4\pi}{3} \lambda^3 \rho$$

$$t_{ff} = \pi \sqrt{\frac{\lambda^3}{GM}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

$$t_{dyn} = \lambda / v_s$$



$$t_{dyn} / t_{ff} \sim \lambda$$

$$R_y, M_y = ?$$

$$\underline{t_{\text{dyn}} = t_{\text{ff}}}$$

$$R_y = 0.06 \text{ pk} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \cdot \frac{10^4 \text{ cm}^{-3}}{n_{\text{H}_2}} \right)^{1/2}$$

$$M_y = 0.4 M_{\odot} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{3/2} \left(\frac{10^4 \text{ cm}^{-3}}{n_{\text{H}_2}} \right)^{1/2}$$

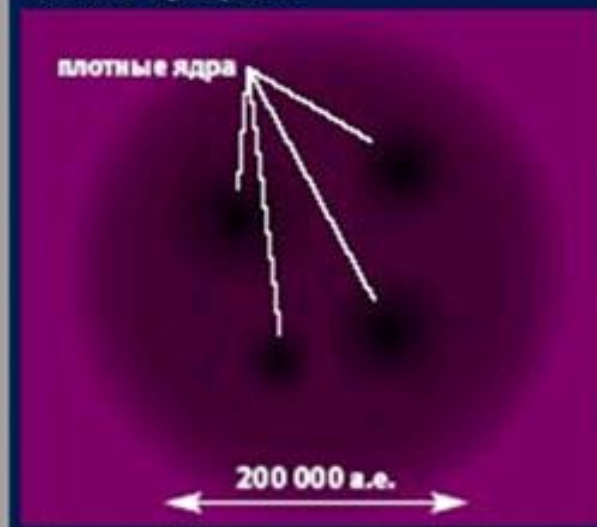
Основные фазы межзвездной среды и их параметры Джинса

Год открытия	Фаза	Температура, К	Плотность, см ⁻³	M_J , M_{\odot}	R_J , пк
1920	Теплая, HI-II	8000	0,25	1×10^8	2×10^3
1950	Прохладная, HI	80	40	2×10^3	7
1970	Горячая, HII	3×10^5	0,002	5×10^{11}	2×10^5
1975	Холодная, H ₂	10	10^3	4	0,3

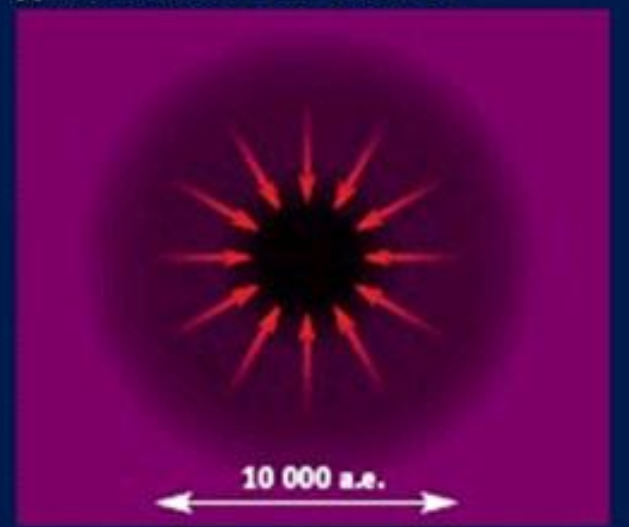
Параметры гигантских молекулярных облаков

Параметр	Среднее значение	Диапазон значений
Масса, M_{\odot}	5×10^5	$5 \times 10^4 \div 5 \times 10^6$
Радиус, пк	20	$10 \div 50$
Средняя плотность, $\text{H}_2/\text{см}^3$	300	$10^2 \div 10^3$
Температура, К	10	$5 \div 30$
Гравитационная энергия, эрг	10^{51}	$10^{50} \div 10^{52}$
Энергия диссоциации H_2 , эрг	2×10^{52}	$3 \times 10^{51} \div 10^{53}$
Скорость ухода с поверхн., км/с	15	$10 \div 20$
Дисперсия скоростей газа внутри облака, км/с	9	$2 \div 17$
Характерное время жизни, лет	3×10^7	$10^7 \div 10^8$
Индукция магнитного поля, Гс	2×10^{-5}	$(1 \div 4) \times 10^{-5}$

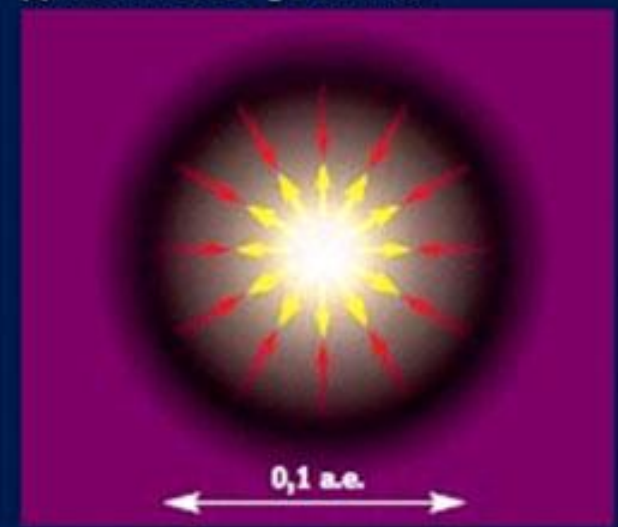
Темное межзвездное облако
Начало процесса



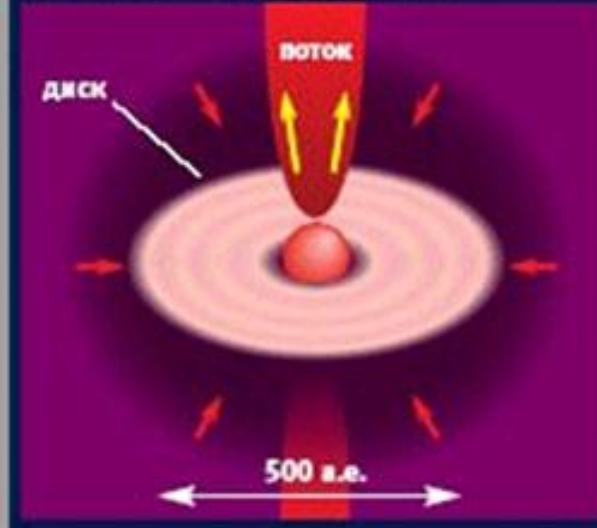
Быстрое сжатие плотного ядра
Длительность ~100 тыс. лет



Медленное сжатие
Длительность ~50 млн лет



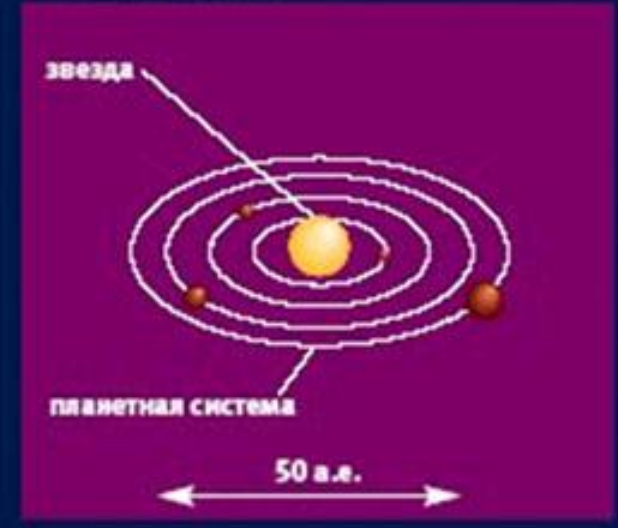
Протозвезда
Длительность ~100 тыс. лет



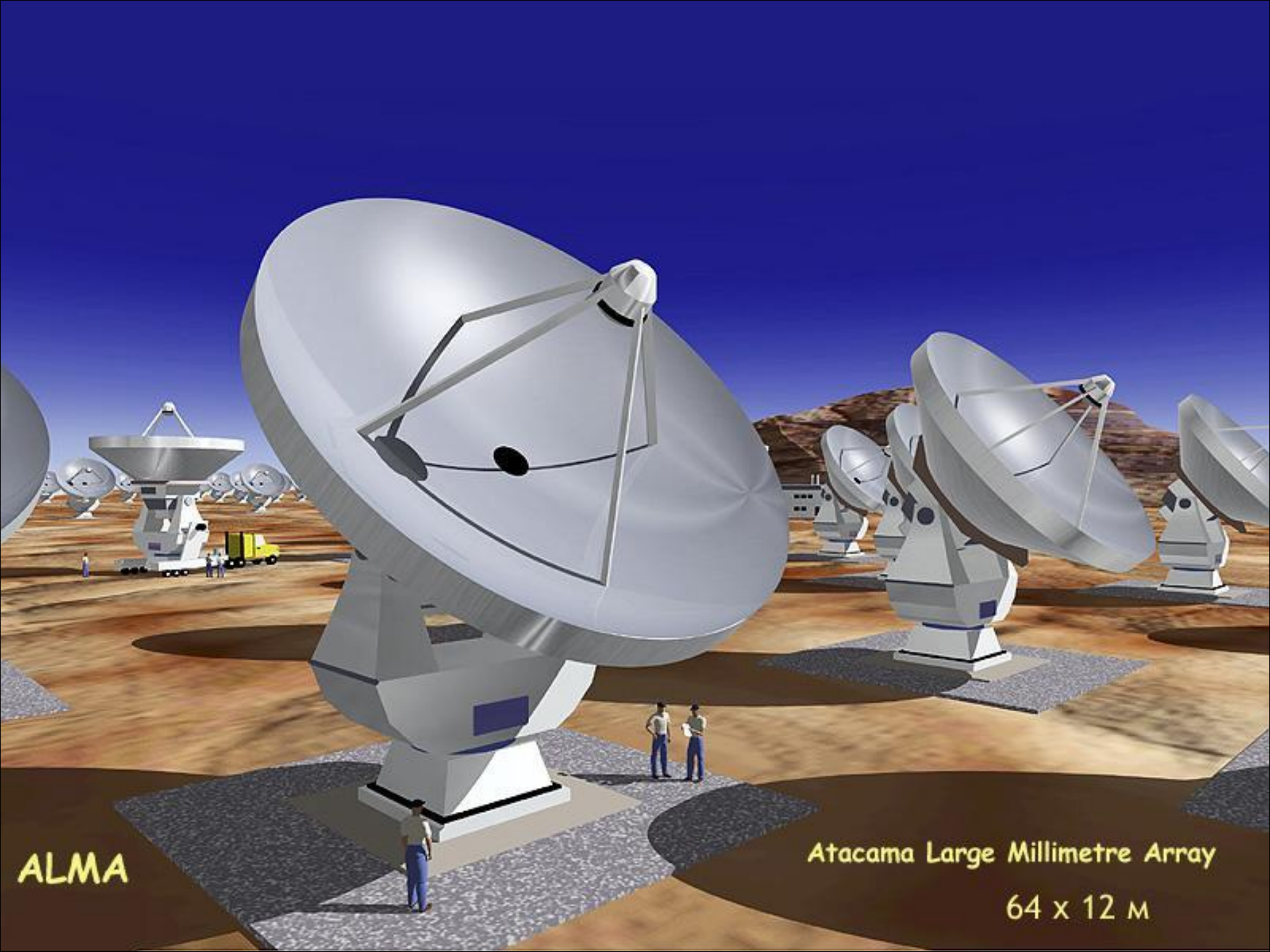
Очень молодая звезда
Длительность ~50 млн лет



Молодая звезда
Конец процесса



Этапы формирования звезды



ALMA

Atacama Large Millimetre Array

64 x 12 M



Плато Чахнантор, высота 5060 м, Чилийские Анды, 2011 г.

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)

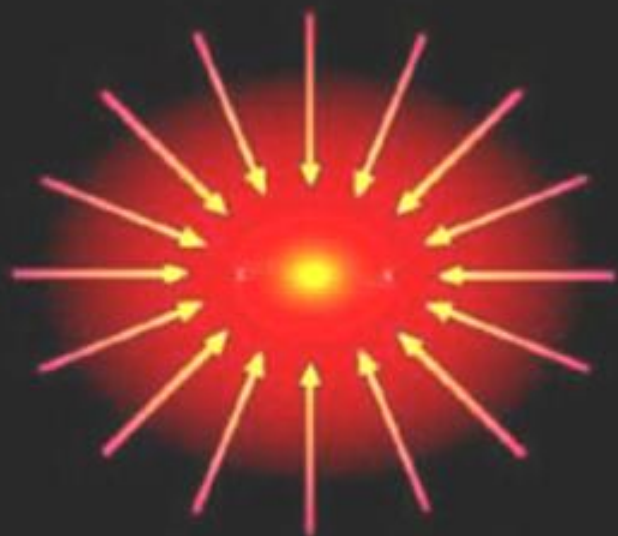
66 суб-мм антенн диаметром 7 и 12 м

Строительство завершено в 2013 г.

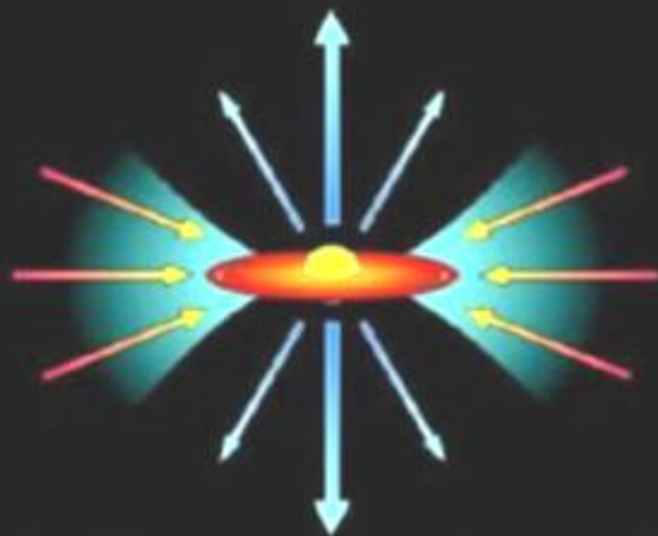


ALMA 1 mm continuum image of the disk surrounding HL Tau.
The disk is 0.8 arcsec in radius, corresponding to about 100 AU

ALMA Partnership et al. (2015)



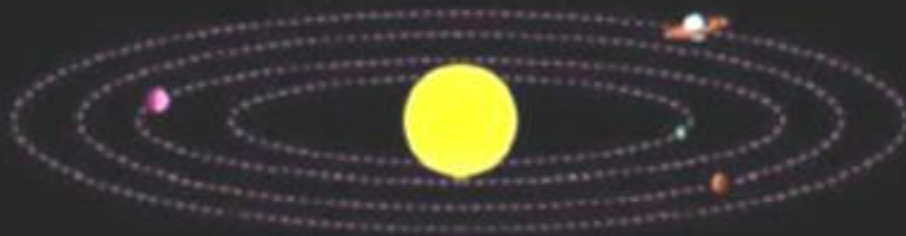
10^4 yrs; $10-10^4$ AU; $10-300$ K



10^{5-6} yrs; $1-1000$ AU; $100-3000$ K



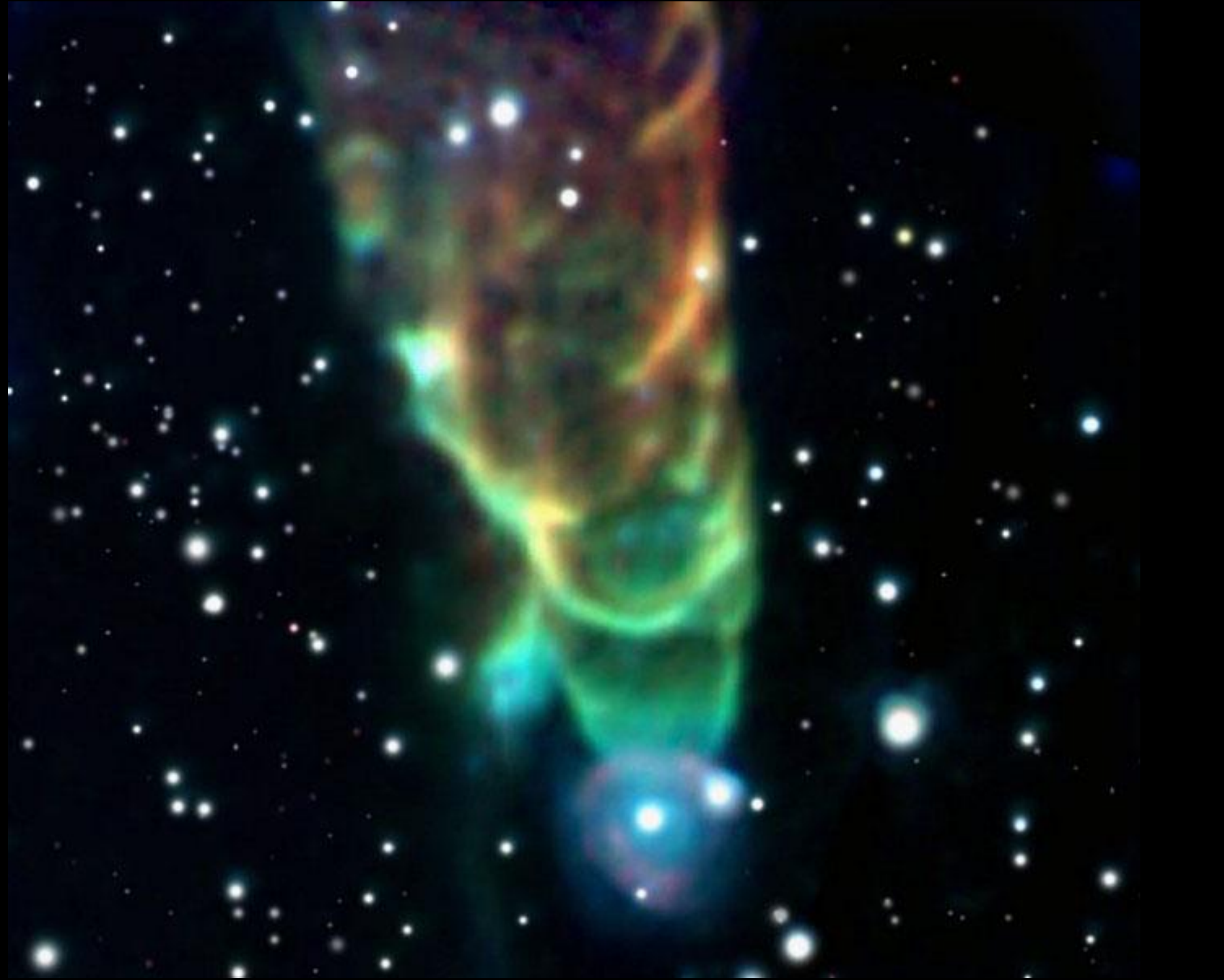
10^{6-7} yrs; $1-100$ AU; $100-3000$ K



10^{7-9} yrs; $1-100$ AU; $200-3000$ K



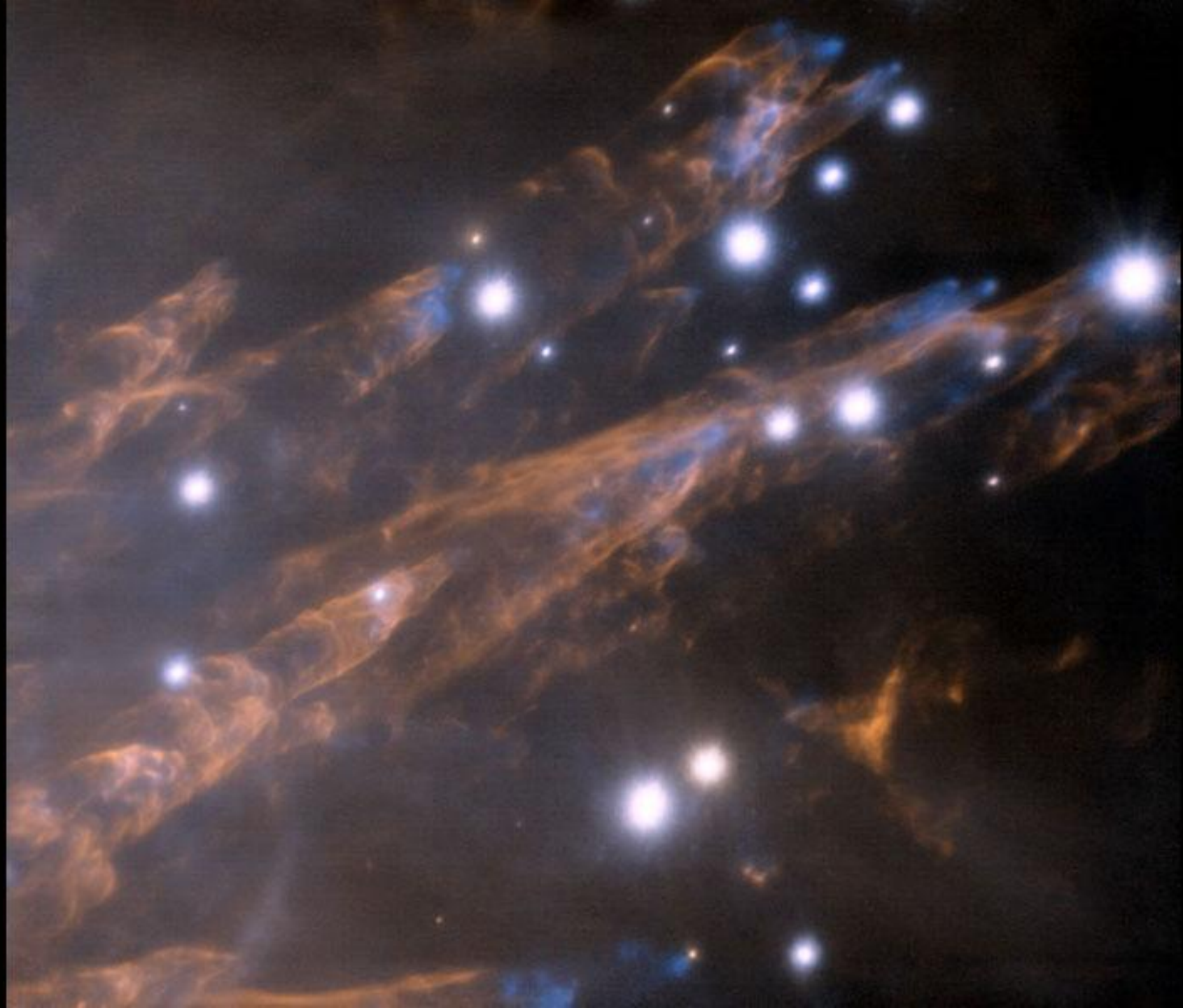




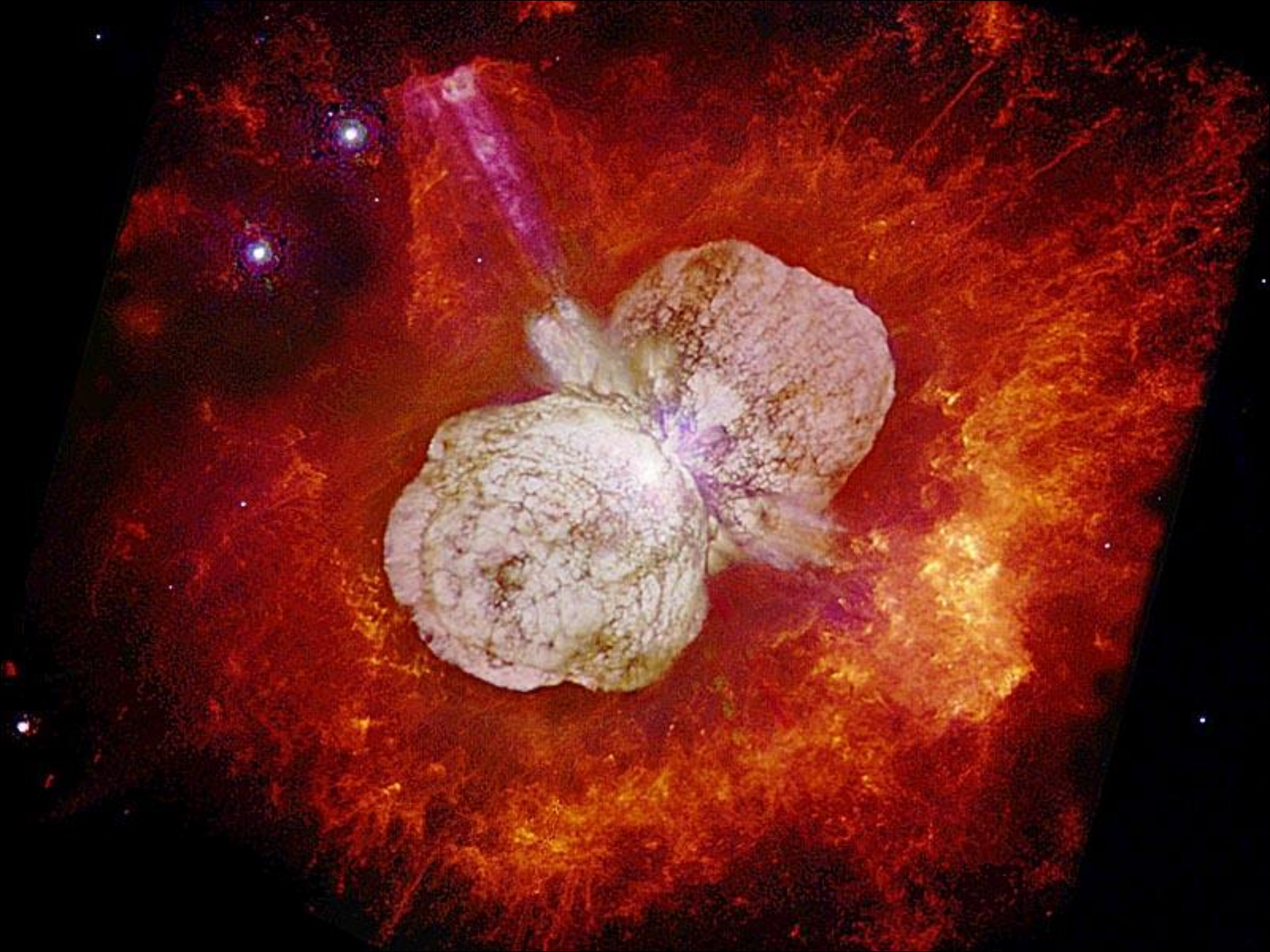




Orion KL











NGC 2237-9
(Monoceros)

Rosette
nebula





*Взаимодействие
массивных
звезд с МЗС
приводит к
формированию
гигантских
пузырей и
оболочек HI*

*Не исключено,
что в них
формируется
следующее
поколение
звезд*

Star-Forming "Bubble" RCW 79

Spitzer Space Telescope • IRAC

NASA / JPL-Caltech /

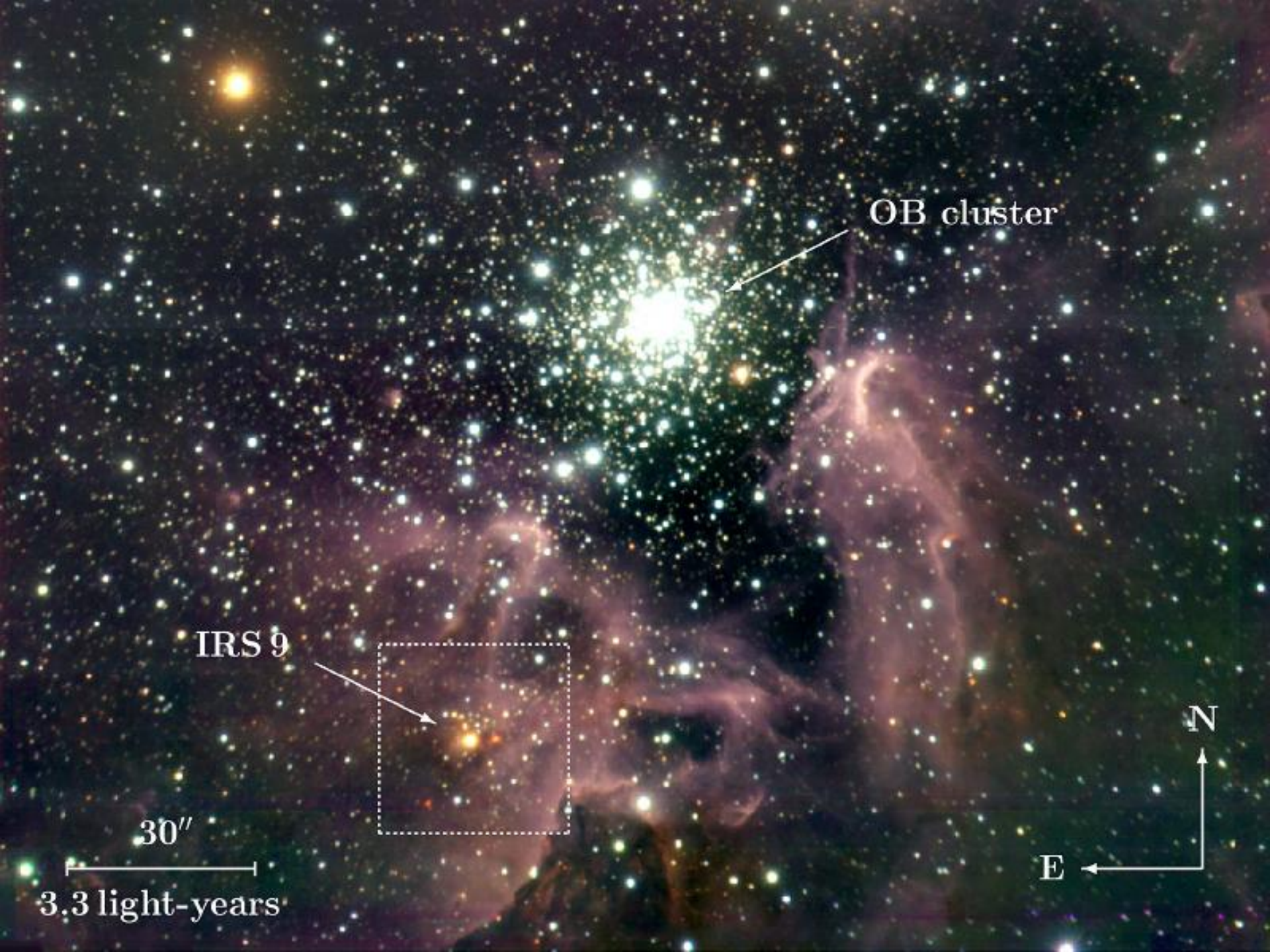
E. Churchwell (University of Wisconsin-Madison)



Orion

H α + opt





OB cluster

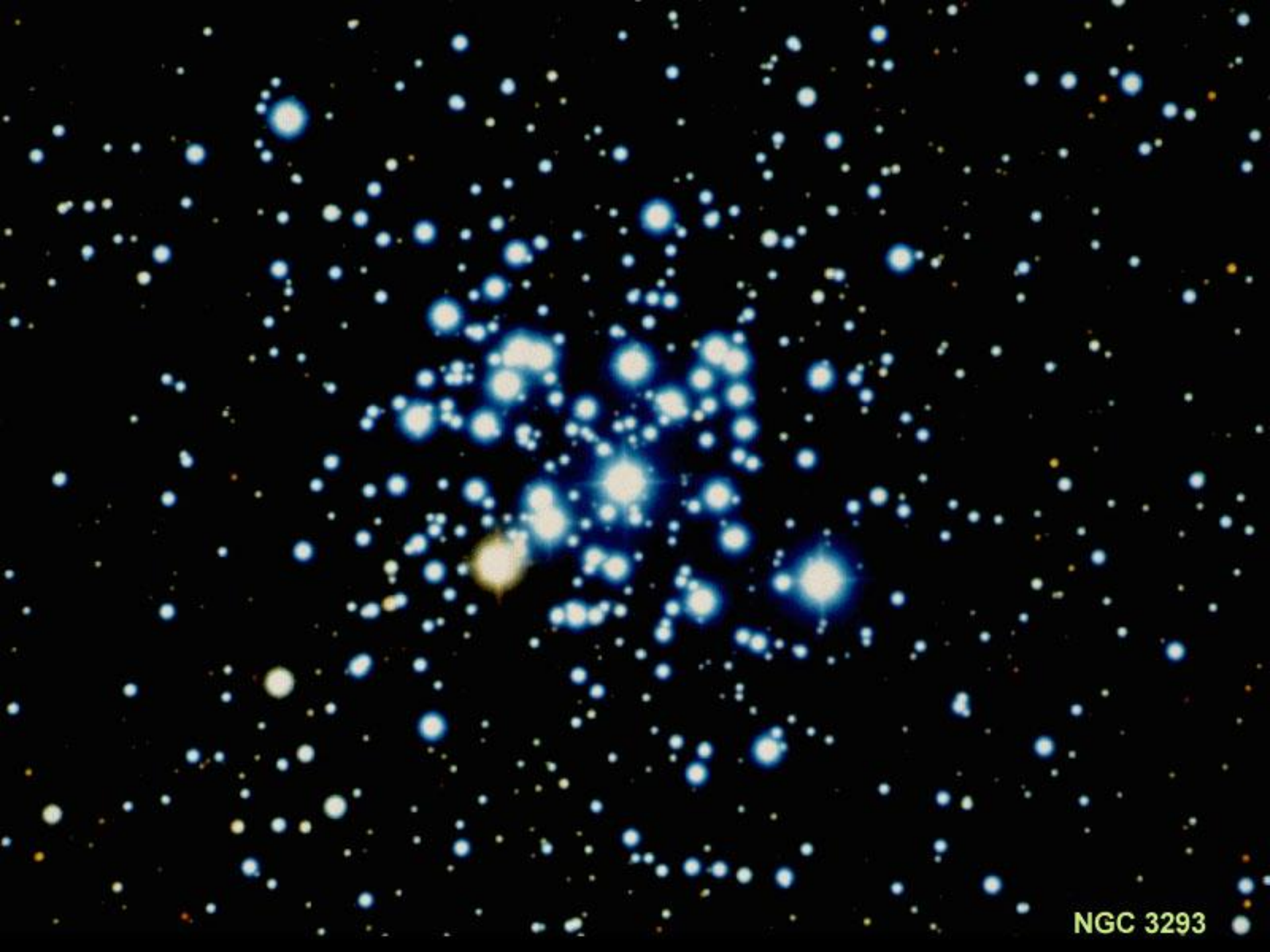
IRS 9

30''

3.3 light-years

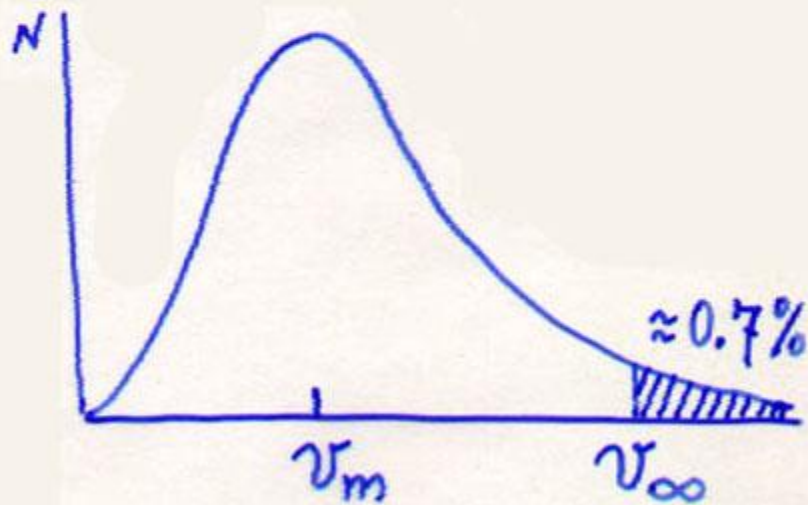
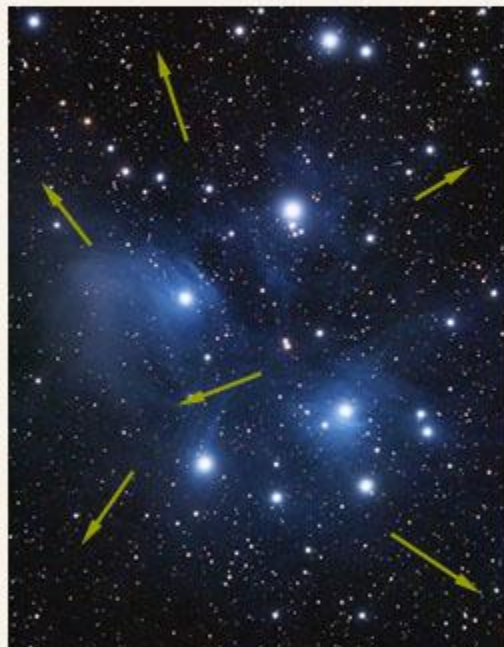
N

E



NGC 3293

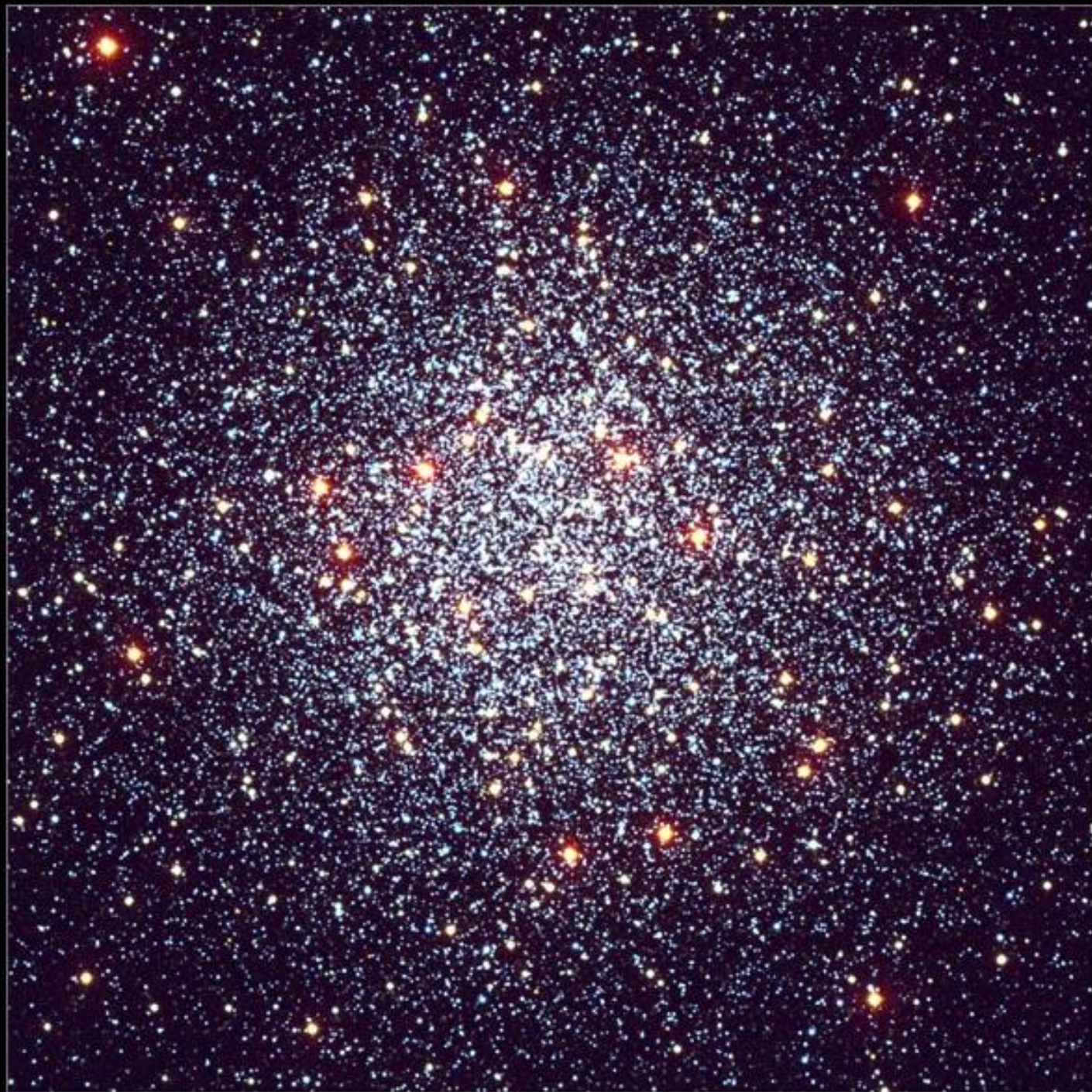
Релаксация и “испарение” звёздных скоплений



Свободные взаимодействующие частицы вылетают из открытых систем и, как правило, не возвращаются

Распределение звезд по скорости

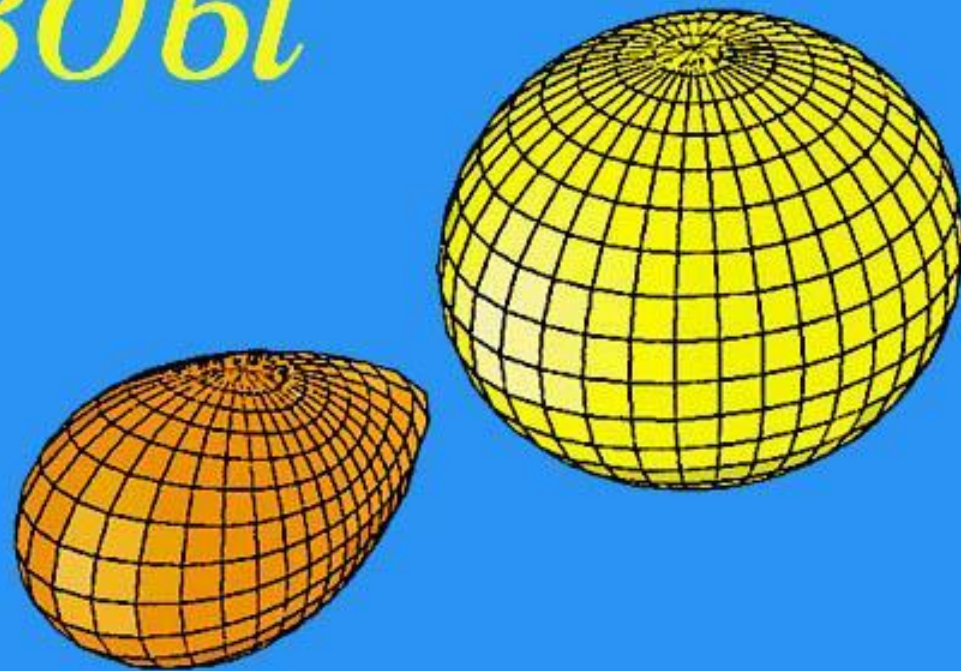
M55

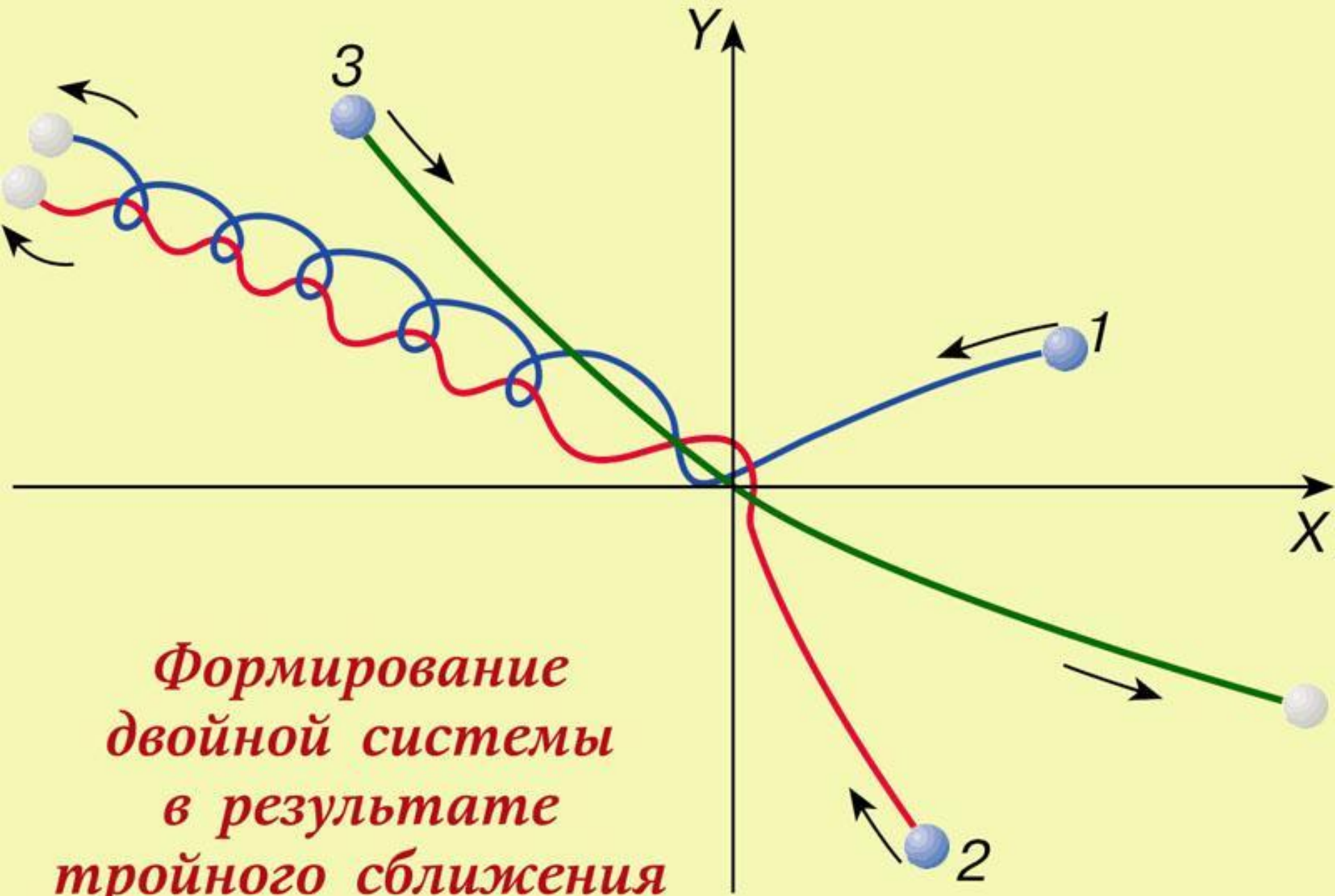


M 13



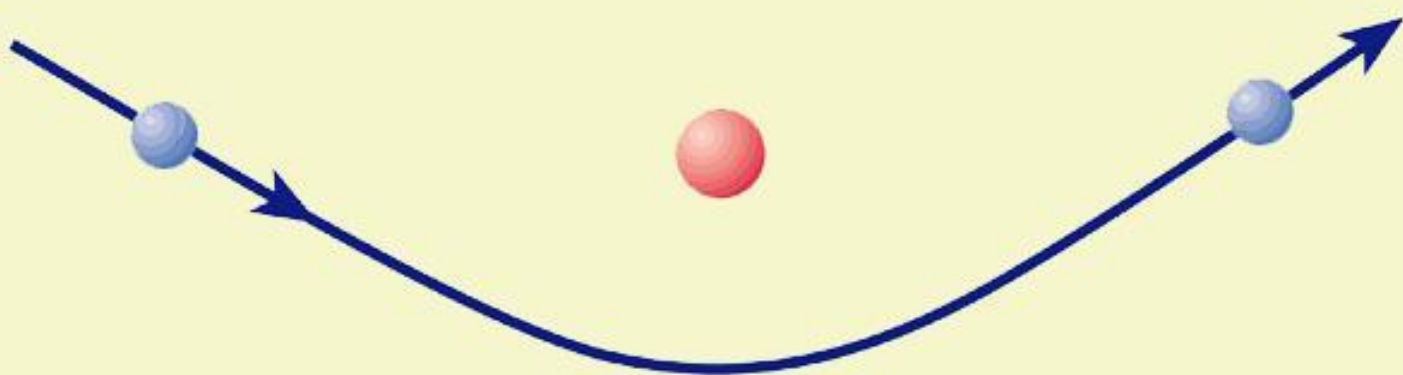
Двойные звезды



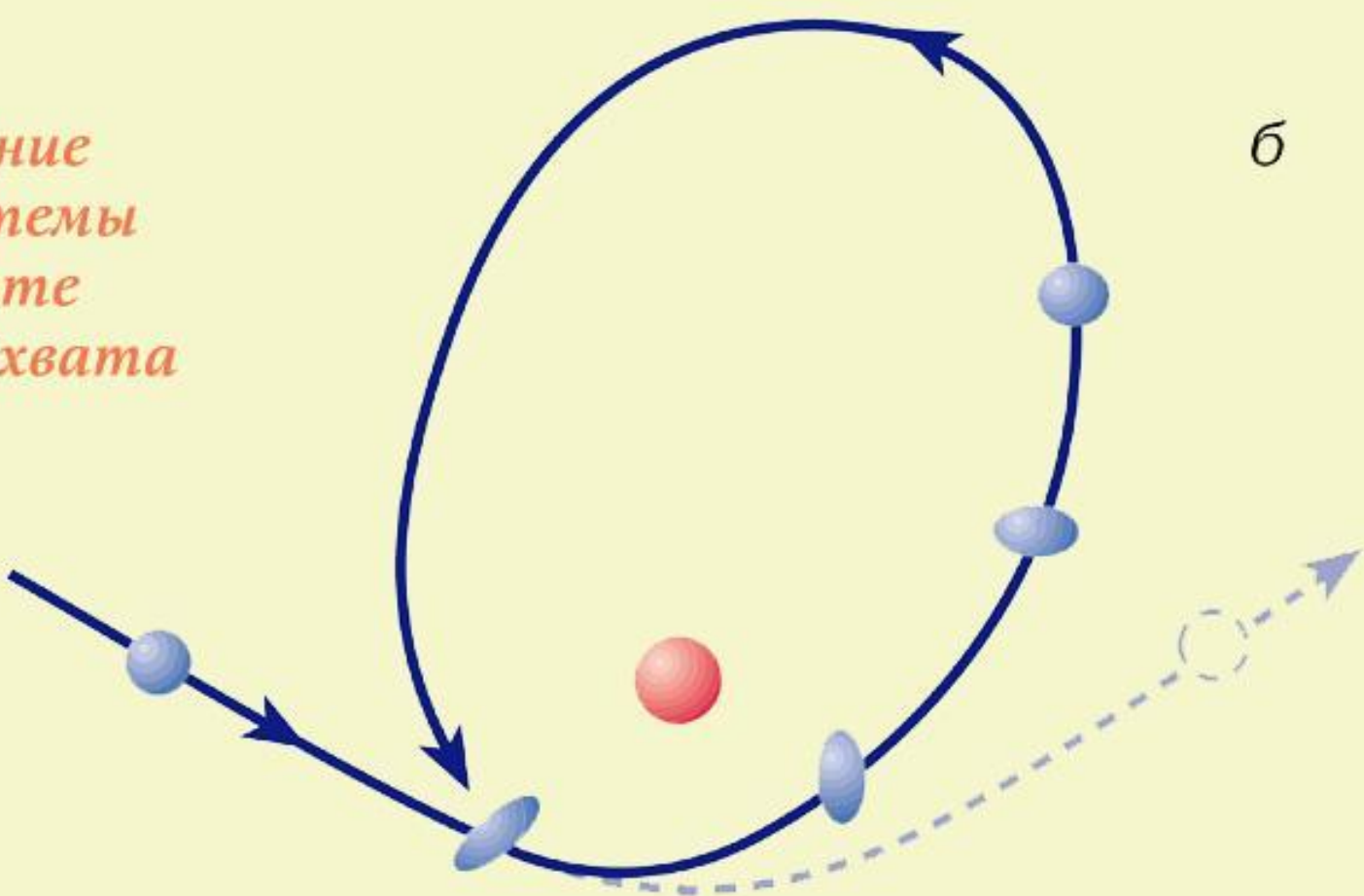


*Формирование
двойной системы
в результате
тройного сближения*

а

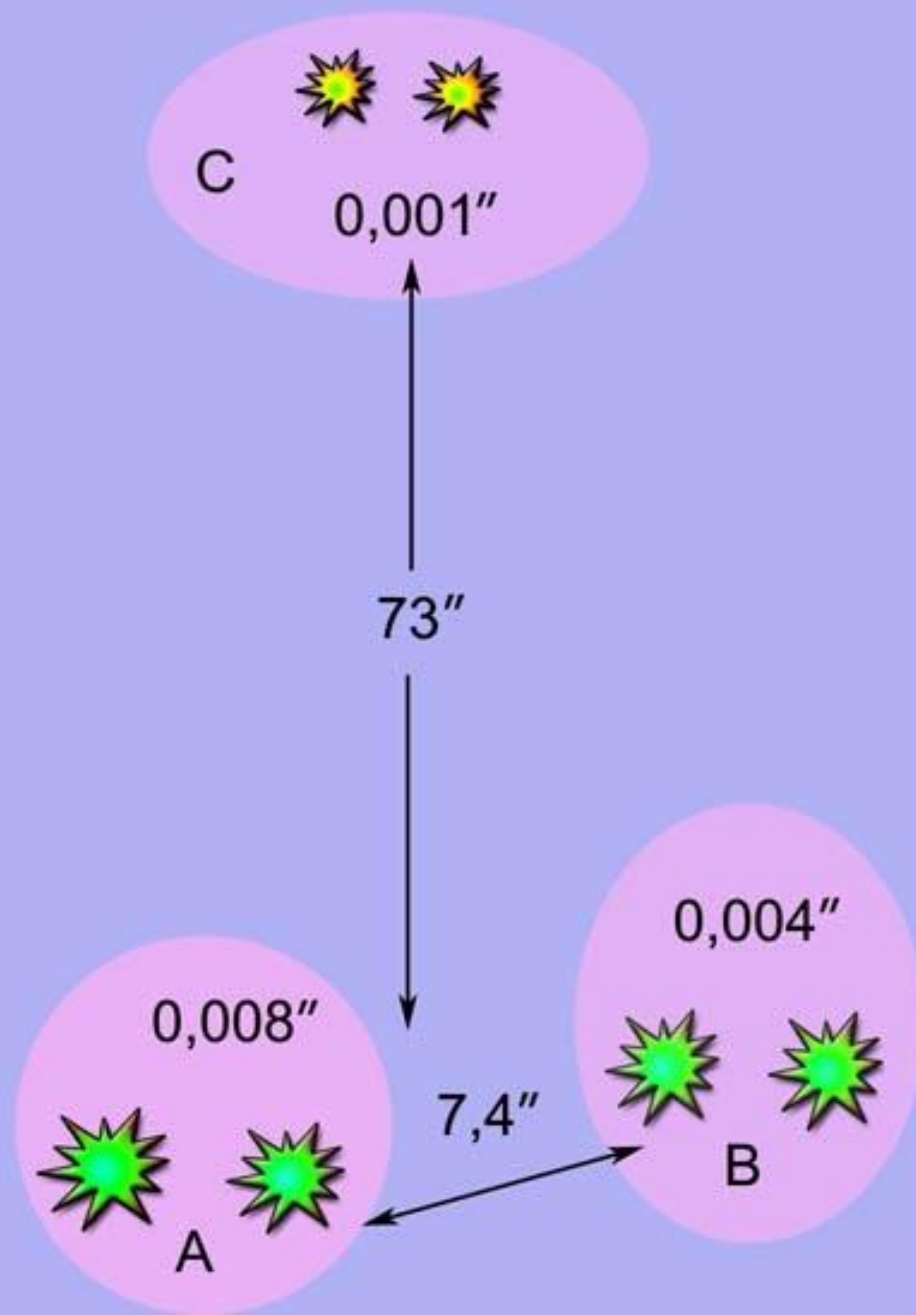


б



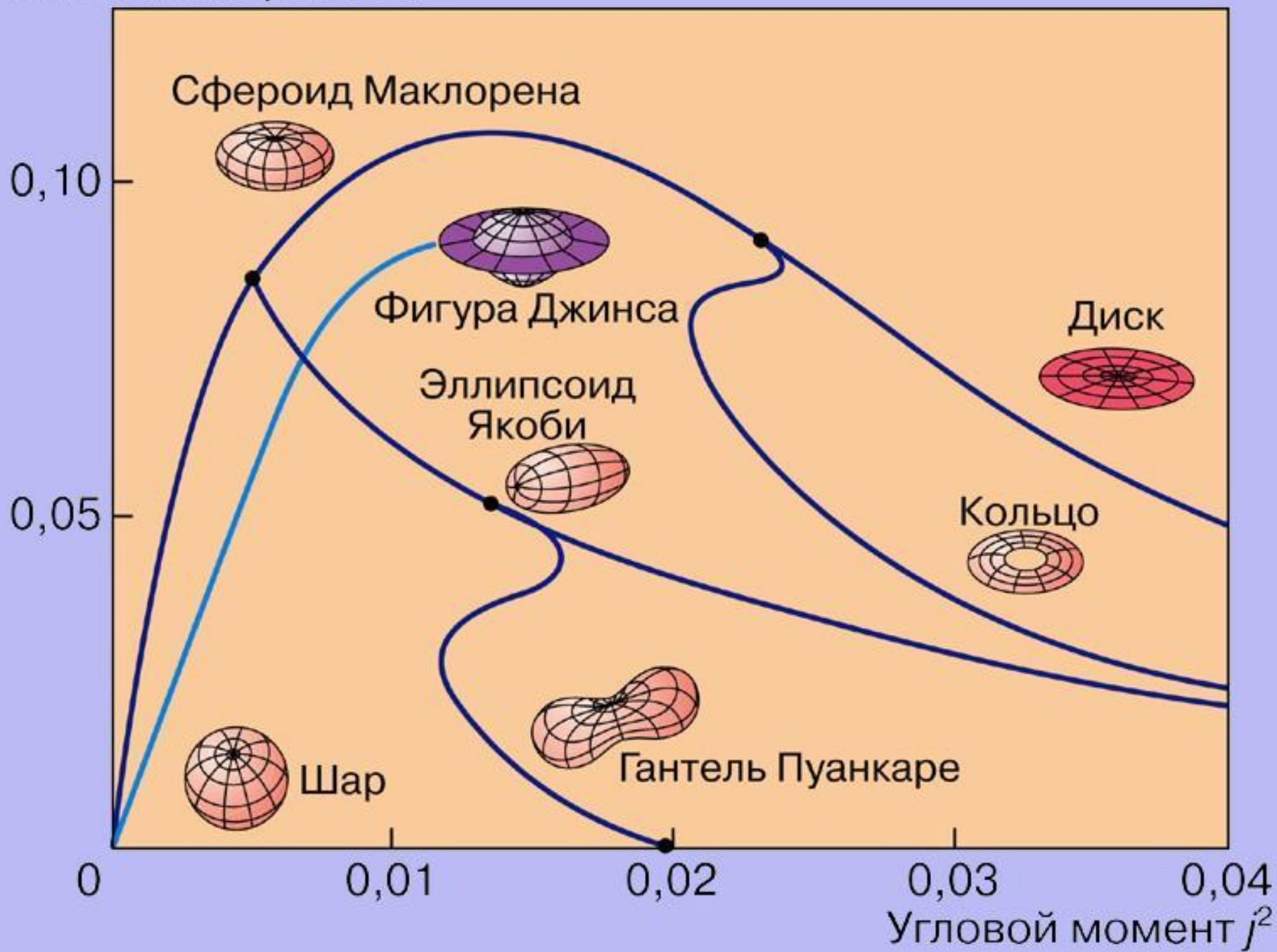
*Формирование
двойной системы
в результате
приливного захвата*

Система α Gem



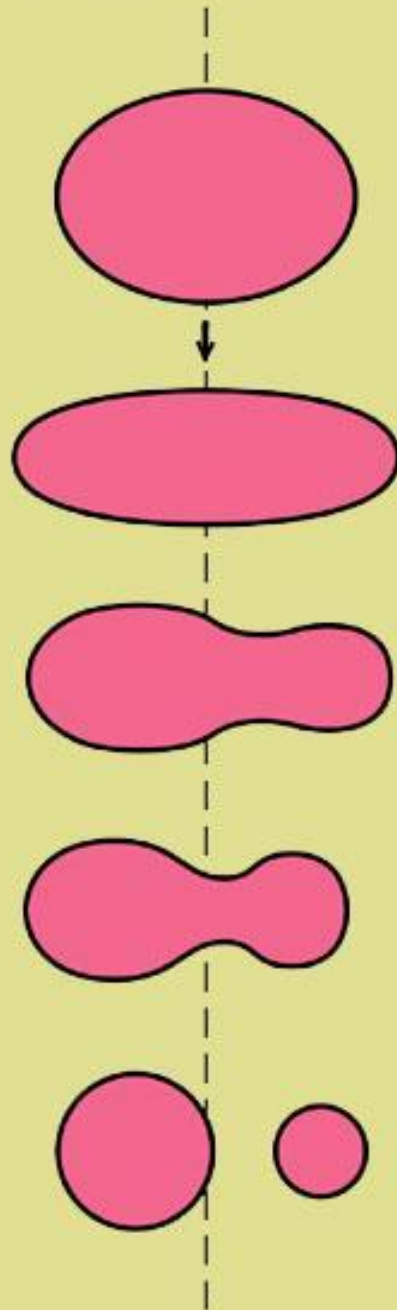
К а с т о р
6-кратная
звезда

Угловая скорость ω^2

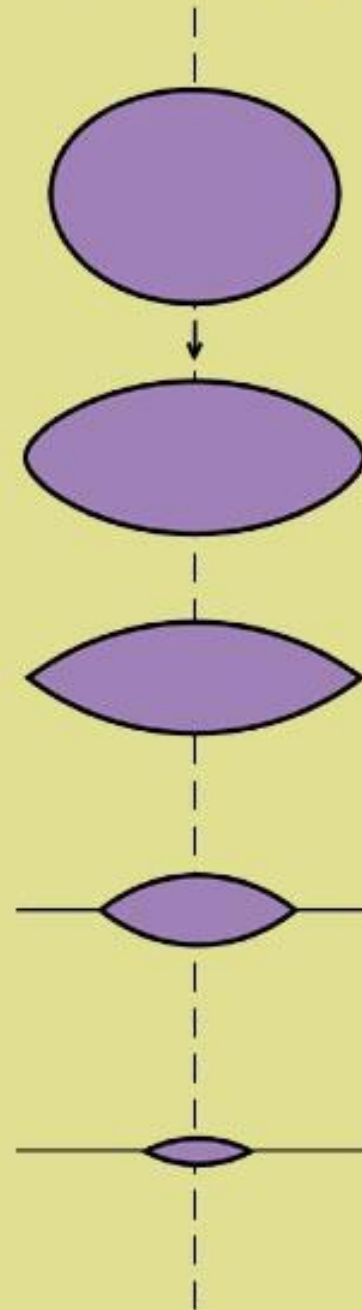


Эволюция вращающегося самогравитирующего тела

Тело
однородной
плотности
("жидкое")

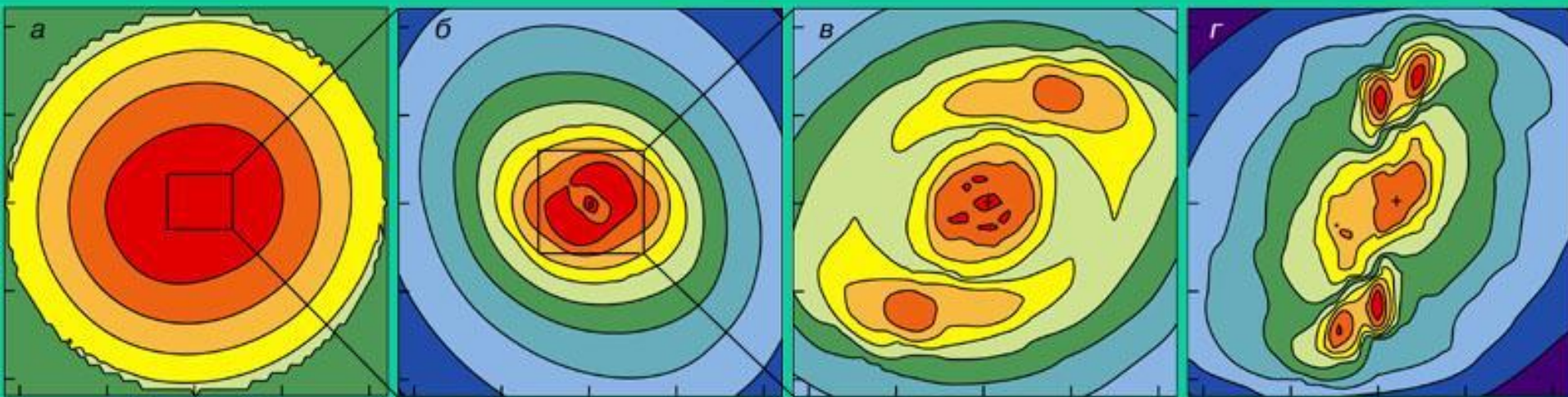


Тело
с сильной
концентрацией
к центру
(газовое)



Коллапс и фрагментация вращающегося межзвездного облака

в трехмерной модели Алана Босса (Институт Карнеги, США)



0,35

1,38

1,42

1,44

Время

в единицах начального времени свободного падения

($t_{ff} = 16\ 000$ лет)

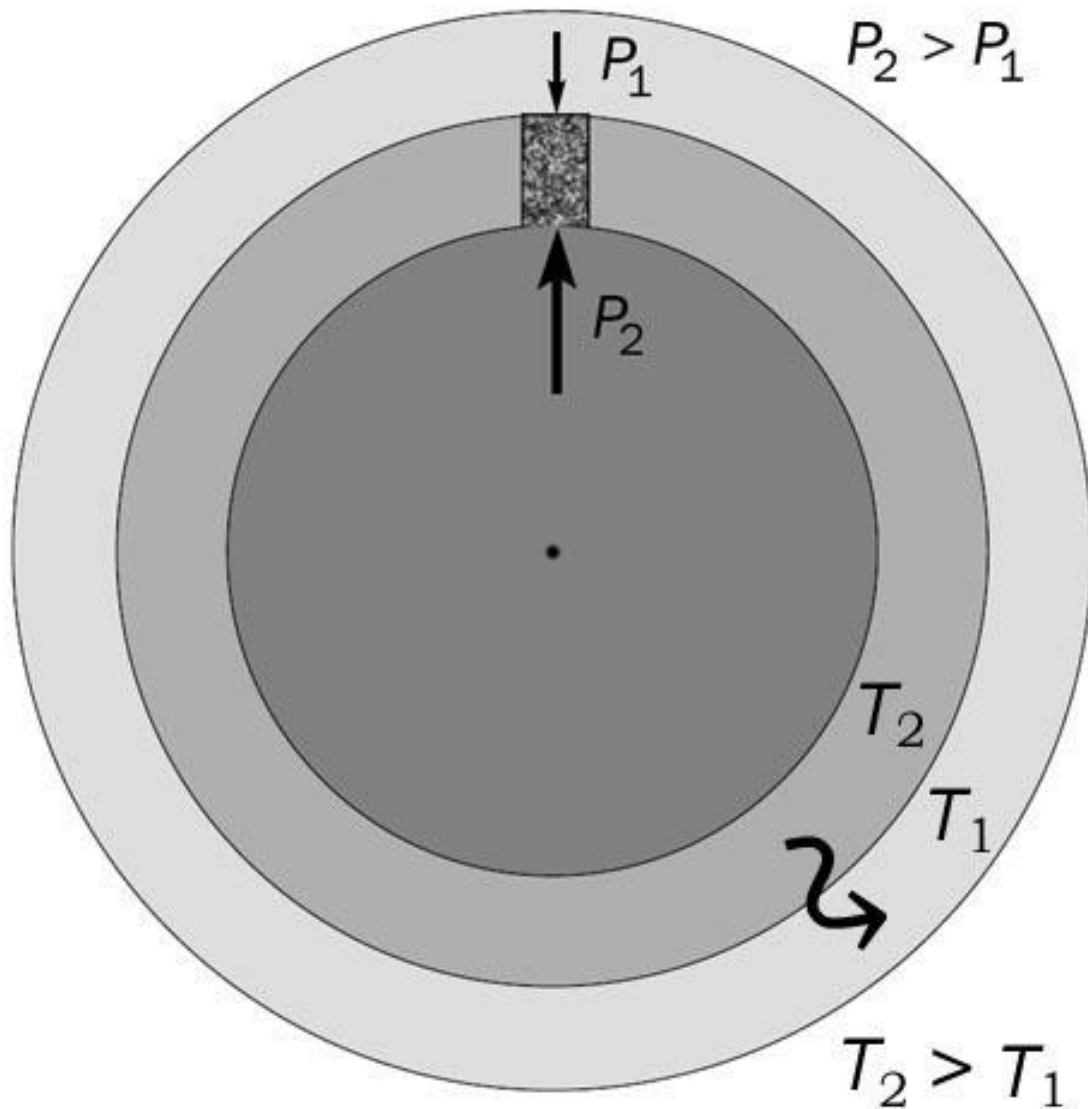


www.eso.org

A night sky filled with stars, with the silhouettes of trees at the bottom. The text is centered in the upper half of the image.

ЗВЁЗДЫ
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ
И ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Гидростатическая модель звезды



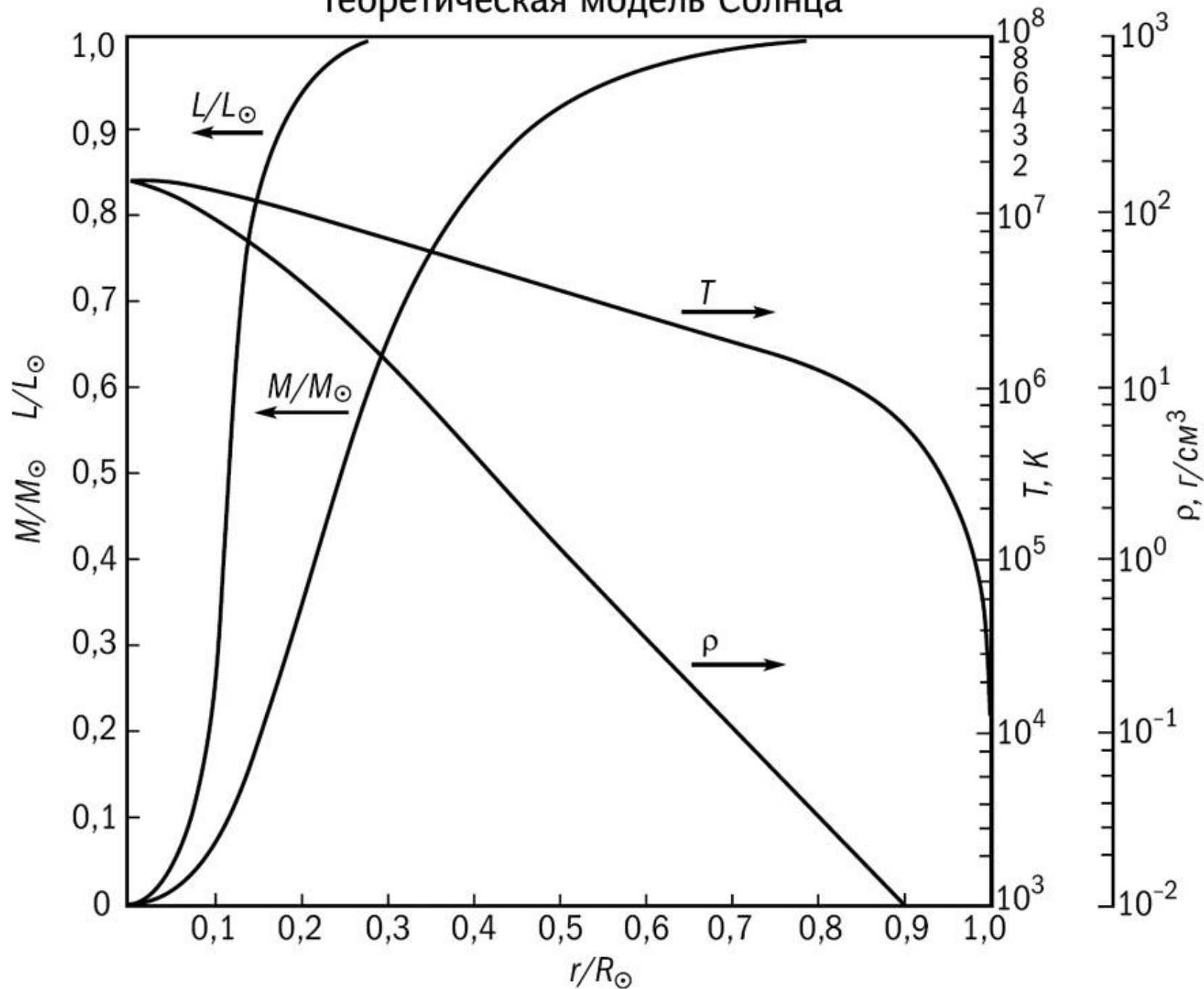
В равновесии вес элемента объема уравнивается за счет разности давления в соседних слоях звезды.

А потеря энергии с поверхности (в виде излучения) компенсируется её переносом из недр наружу разными механизмами теплопроводности.

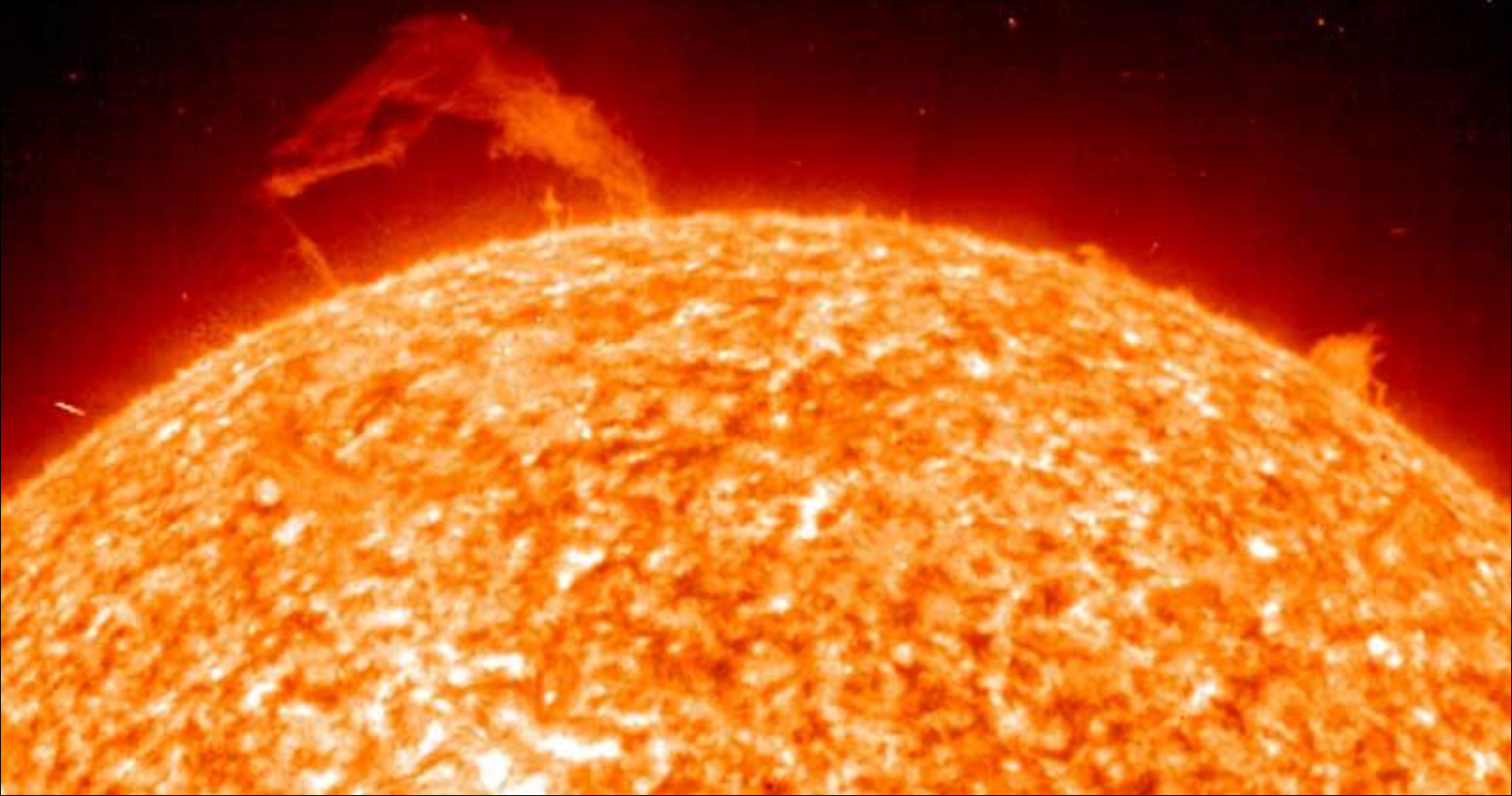
Важно:

$$P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}}$$

Теоретическая модель Солнца



Источники энергии звёзд



Химические реакции

уголь, нефть, газ
 $C + O \rightarrow CO, CO_2$

2×10^7 Дж/кг

Химические реакции

$$M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ г} = 2 \times 10^{30} \text{ кг}$$

$$L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{ эрг/с} = 4 \times 10^{26} \text{ Вт}$$

$$Q = 2 \times 10^7 \text{ Дж/кг}$$

$$t = \frac{M_{\odot} Q}{L_{\odot}} = \frac{2 \times 10^{30} \times 2 \times 10^7}{4 \times 10^{26} \times 3 \times 10^7} = 3 \times 10^3 \text{ лет}$$

Работа силы тяжести

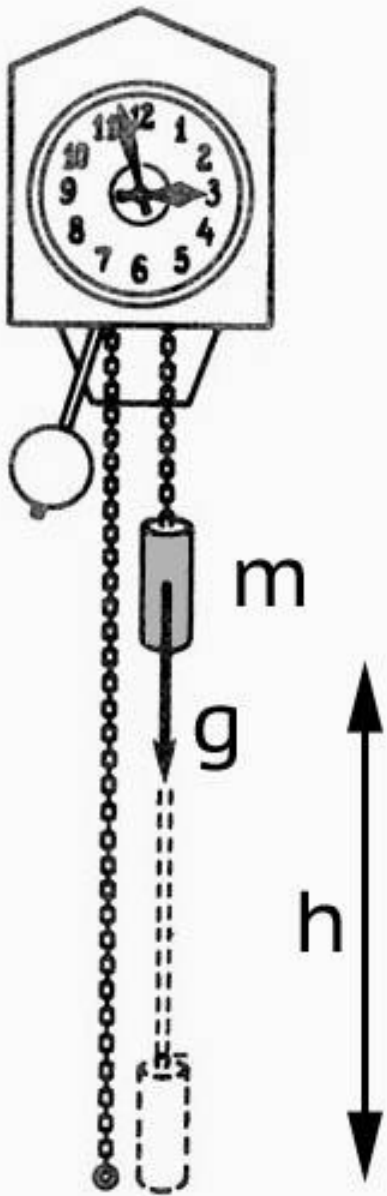
$$E = mgh$$

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

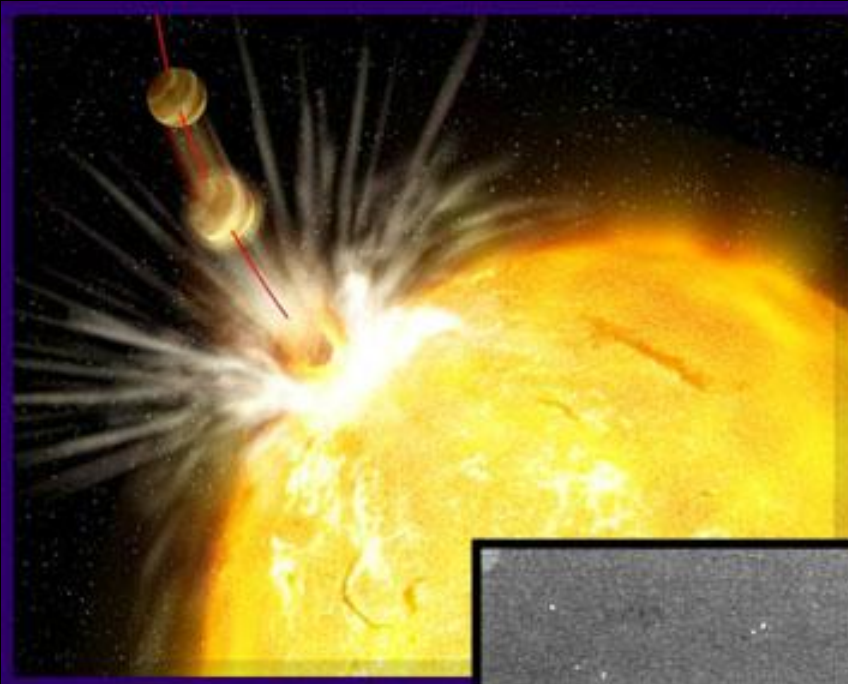
Гравитационная энергия связи

$$m \rightarrow M, \quad h \rightarrow R$$

$$U = \frac{GM^2}{R}$$

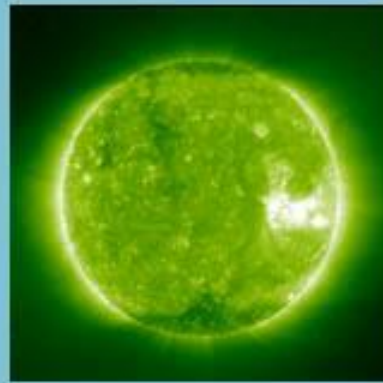
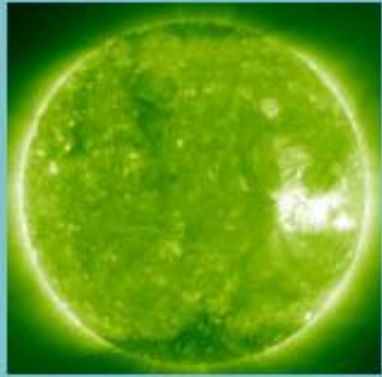


В середине XIX века
в качестве источника
энергии Солнца
рассматривалось
падение на него
космических тел



Зодиакальный
свет убеждал,
что резервуар
мелких спутников
Солнца
действительно
существует

Гипотеза сжатия Солнца (сер. XIX в.)



Майер Ю.Р. (1814-1878)

Гельмгольц Г.Л.Ф. (1821-1894)

лорд Кельвин (У.Томсон, 1824-1907)

Гравитационная энергия Солнца

$$U = \frac{G M^2}{R}$$

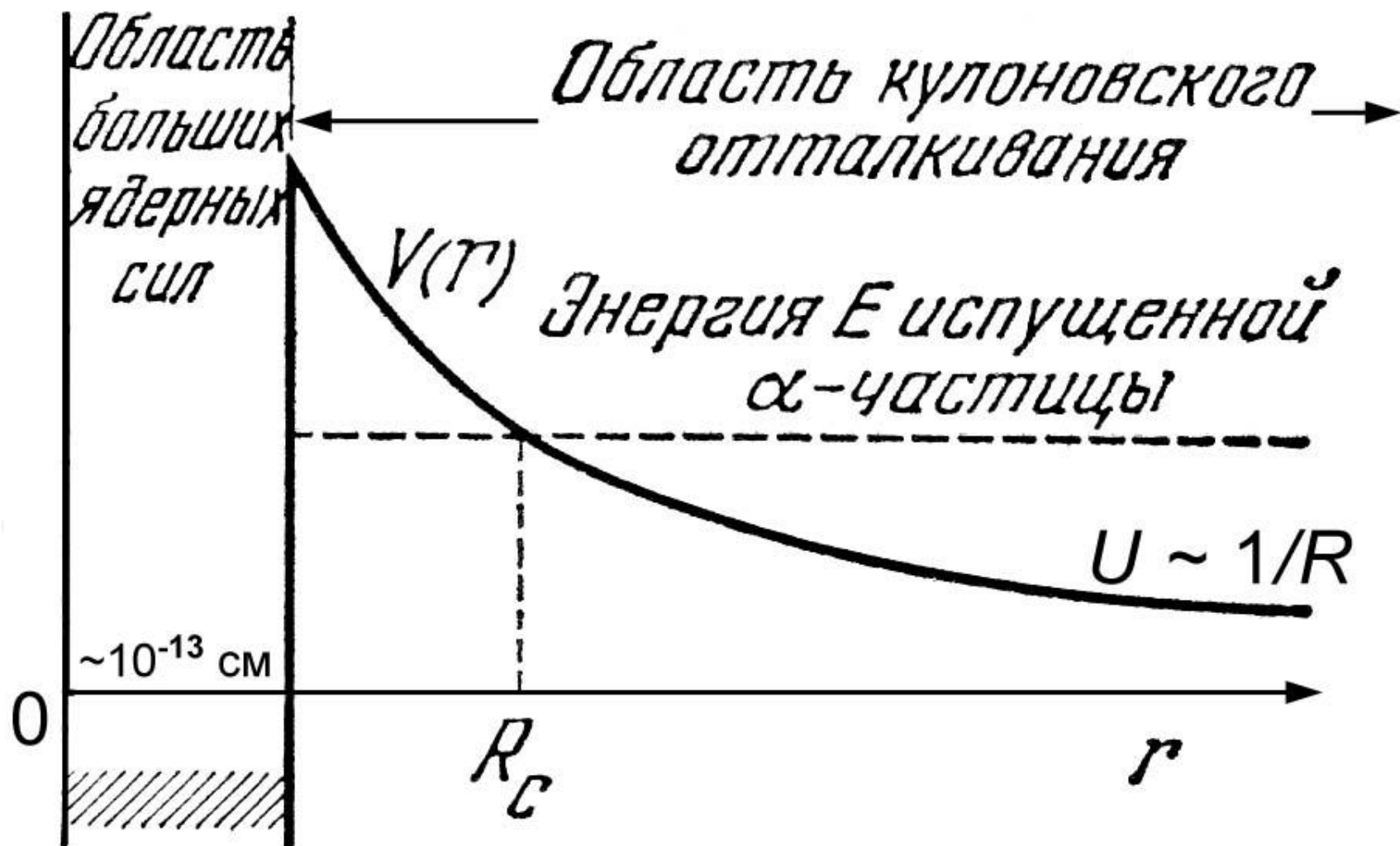
Время высвечивания гравитационной энергии

$$t = U/2L = 30 \text{ млн лет}$$

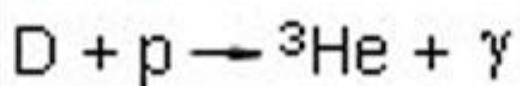
ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

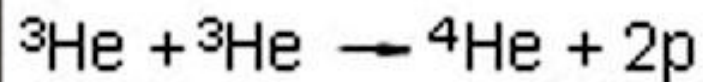
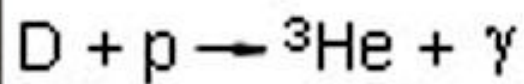
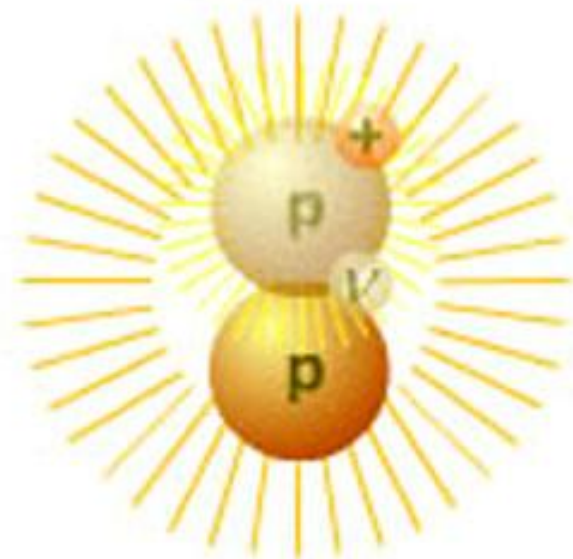
№	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		№
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	1 ВОДОРОД 1,00797 H														2 ГЕЛИЙ 4,0026 He		1
2	3 ЛИТИЙ 6,939 Li		4 БЕРИЛЛИЙ 9,0122 Be		5 БОР 10,811 B		6 УГЛЕРОД 12,01115 C		7 АЗОТ 14,0067 N		8 КИСЛОРОД 15,9994 O		9 ФТОР 18,9984 F		10 НЕОН 20,183 Ne		2
3	11 НАТРИЙ 22,9898 Na		12 МАГНИЙ 24,312 Mg		13 АЛЮМИНИЙ 26,9815 Al		14 КРЕМНИЙ 28,086 Si		15 ФОСФОР 30,9738 P		16 СЕРА 32,064 S		17 ХЛОР 35,453 Cl		18 АРГОН 39,948 Ar		3
4	19 КАЛИЙ 39,102 K		20 КАЛЬЦИЙ 40,08 Ca		21 СКАНДИЙ 44,956 Sc		22 ТИТАН 47,90 Ti		23 ВАНАДИЙ 50,942 V		24 ХРОМ 51,996 Cr		25 МАРГАНЕЦ 54,938 Mn		26 ЖЕЛЕЗО 55,845 Fe		4
5	29 МЕДЬ 63,54 Cu		30 ЦИНК 65,37 Zn		31 ГАЛЛИЙ 69,72 Ga		32 ГЕРМАНИЙ 72,59 Ge		33 МЫШЬЯК 74,9216 As		34 СЕЛЕН 78,96 Se		35 БРОМ 79,909 Br		36 КРИПТОН 83,80 Kr		5
6	37 РУБИДИЙ 85,47 Rb		38 СТРОНЦИЙ 87,62 Sr		39 ИТРИЙ 88,905 Y		40 ЦИРКОНИЙ 91,22 Zr		41 НИОБИЙ 92,906 Nb		42 МОЛИБДЕН 95,94 Mo		43 ТЕХНЕЦИЙ 97,907 Tc		44 РУБИДИЙ 101,07 Ru		6
7	47 СЕРЕБРО 107,870 Ag		48 КАДМИЙ 112,40 Cd		49 ИНДИЙ 114,82 In		50 ОЛОВО 118,69 Sn		51 СУРЬМА 121,75 Sb		52 ТЕЛЛУР 127,60 Te		53 ИОД 126,9044 I		54 КСЕНОН 131,30 Xe		7
8	55 ЦЕЗИЙ 132,905 Cs		56 БАРИЙ 137,34 Ba		57 ЛАНТАН** 138,91 La		72 ГАФНИЙ 178,49 Hf		73 ТАНТАЛ 180,948 Ta		74 ВОЛЬФРАМ 183,85 W		75 РЕНИЙ 186,2 Re		76 ОСМИЙ 190,23 Os		8
9	79 ЗОЛОТО 196,967 Au		80 РУТУТЬ 200,59 Hg		81 ТАЛЛИЙ 204,37 Tl		82 СВИНЕЦ 207,19 Pb		83 БИСМУТ 208,980 Bi		84 ПОЛОНИЙ 209 Po		85 АСТАТИН 210 At		86 ЭМАНАЦИЯ 222 Em		9
10	87 ФРАНЦИЙ 223,020 Fr		88 РАДИЙ 226,025 Ra		89 АКТИНИЙ*** 227,028 Ac		104 ЭКАГАФНИЙ 266-270 E-Hf		105 ЭКАТАНТАЛ 271, 273 E-Ta		106 ЭКАВОЛЬФРАМ 272-276 E-W		107 ЭКАРЕНИЙ 277 E-Re		108 ЭКАОСМИЙ 288 E-Os		10
11	111 ЭКАЗОЛОТО 287 E-Au		112 ЭКАРУТУТЬ 288-292 E-Hg		113 ЭКАТАЛЛИЙ 293 E-Tl		114 ЭКАСВИНЕЦ 294-298 E-Pb		115 ЭКАБИСМУТ 299 E-Bi		116 ЭКАПОЛОНИЙ 300-304 E-Po		117 ЭКААСТАТИН 305 E-At		118 ЭКАЭМАНАЦИЯ 306-310 E-Em		11

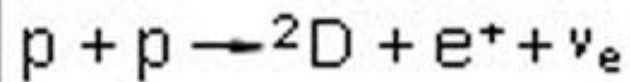
** ЛАНТАНИДЫ		*** АКТИНИДЫ	
27 КОБАЛЬТ 58,9332 Co	58 НИКЕЛЬ 58,71 Ni	136, 138 140 142 Ce	59 ПРАЗЕДИМ 140,907 Pr
45 РОДИЙ 102,905 Rh	102 ПАЛАДИЙ 106,4 Pd	141 156 158 160-164 Tb	60 НЕОДИМ 144,24 Nd
77 ИРИДИЙ 192,2 Ir	190 192 194 195 196 198 Pt	224 226-230 232 Th	91 ПРОТАКТИНИЙ 231,036 Pa
109 ЭКАИРИДИЙ 288 E-Ir	280 ЭКАПАЛАДИЙ 110 282-286 288 E-Pt	247 Bk	98 КАЛИФОРНИЙ 251 Cf
			99 ЭЙНШТЕЙНИЙ 254,088 Es
			100 ФЕРМИЙ 255 Fm
			101 МЕНДЕЛЕВИЙ 260 Md
			102 НОБЕЛИЙ 265 No
			103 ЛУРЕНСКИЙ 262 Lw
			104 ДУНГЛИЙ 261 Gd
			70 ИТТЕРБИЙ 173,04 Yb
			71 ЛУТЕЦИЙ 175 Lu
			95 АМЕРИЦИЙ 243,061 Am
			96 КЮРИЙ 247 Cm
			102 НОБЕЛИЙ 265 No
			103 ЛУРЕНСКИЙ 262 Lw

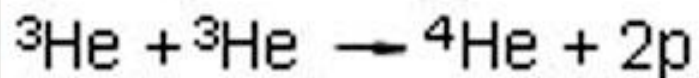
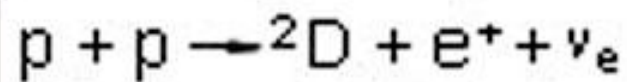


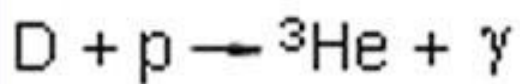
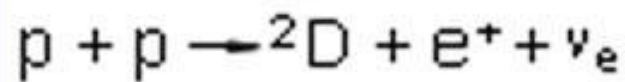
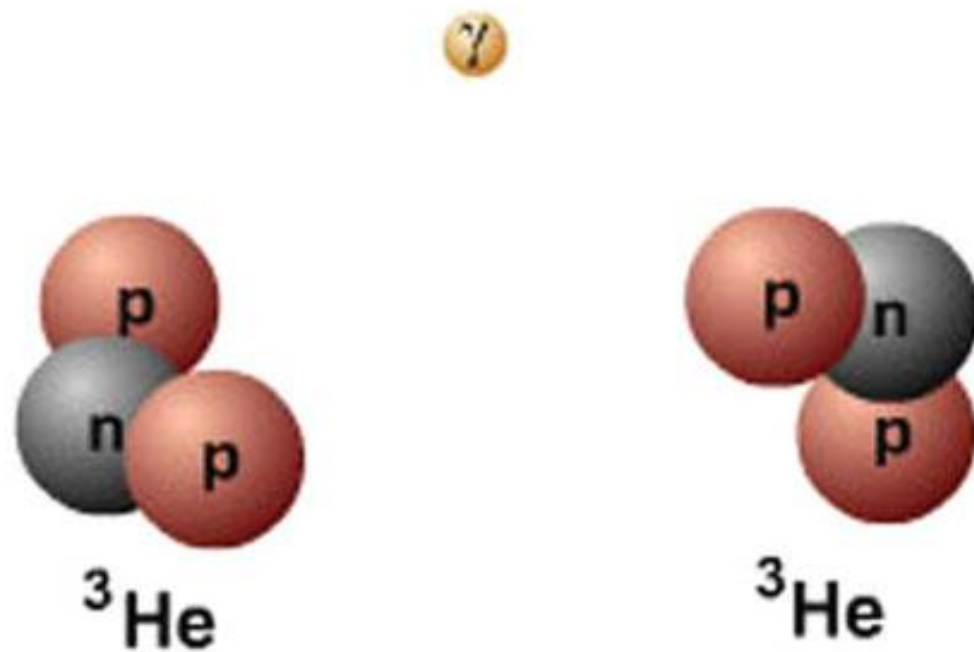
Потенциальная энергия α -частицы
вблизи атомного ядра

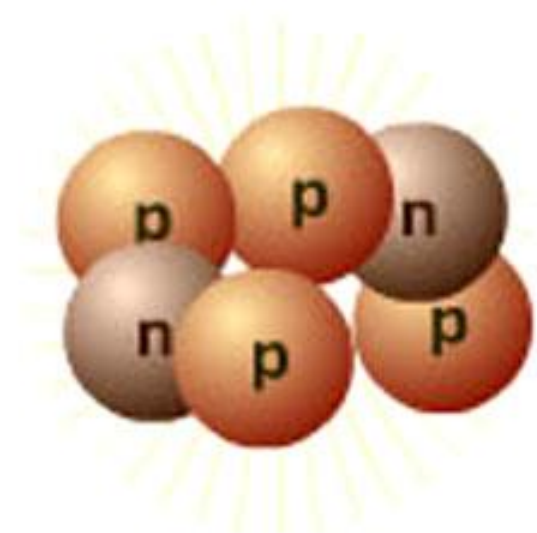


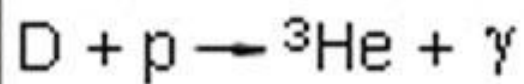
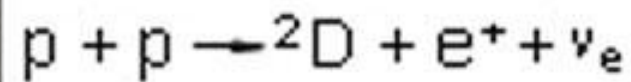
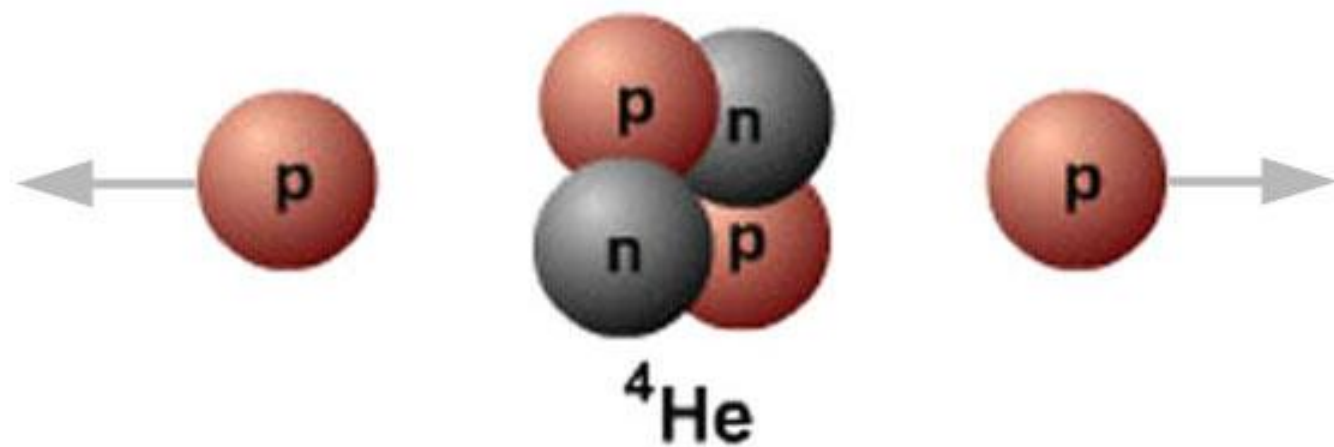


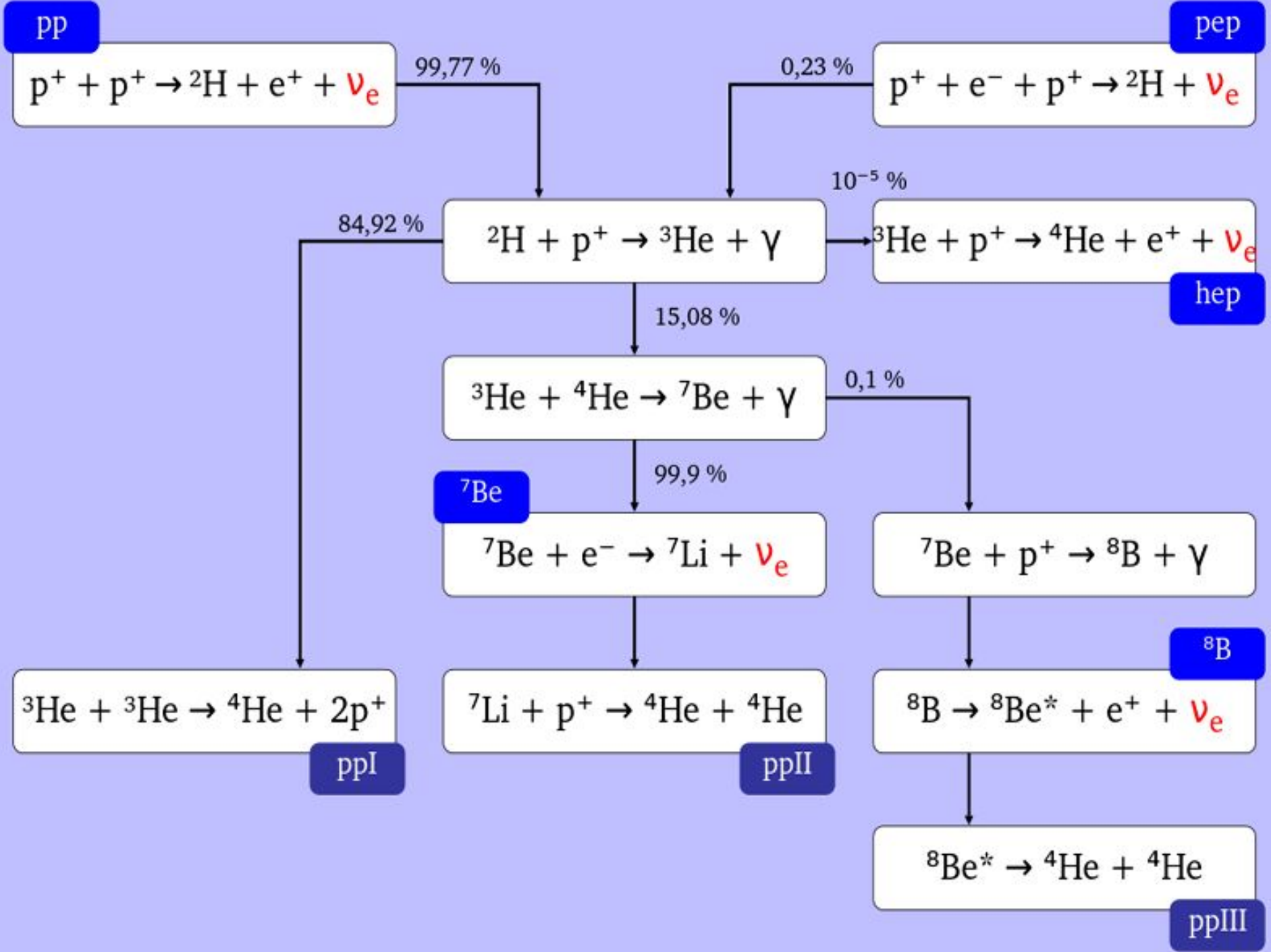








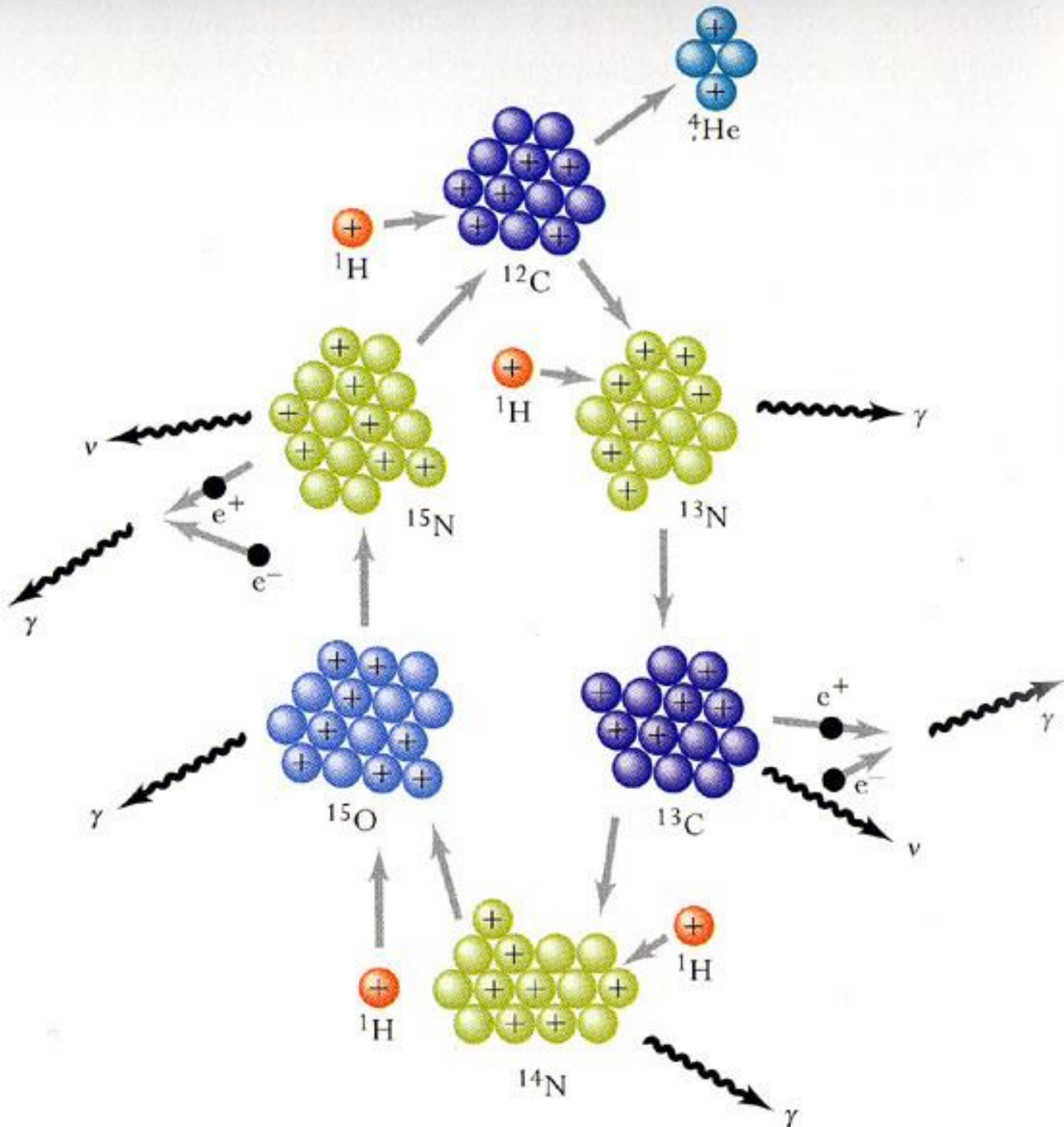


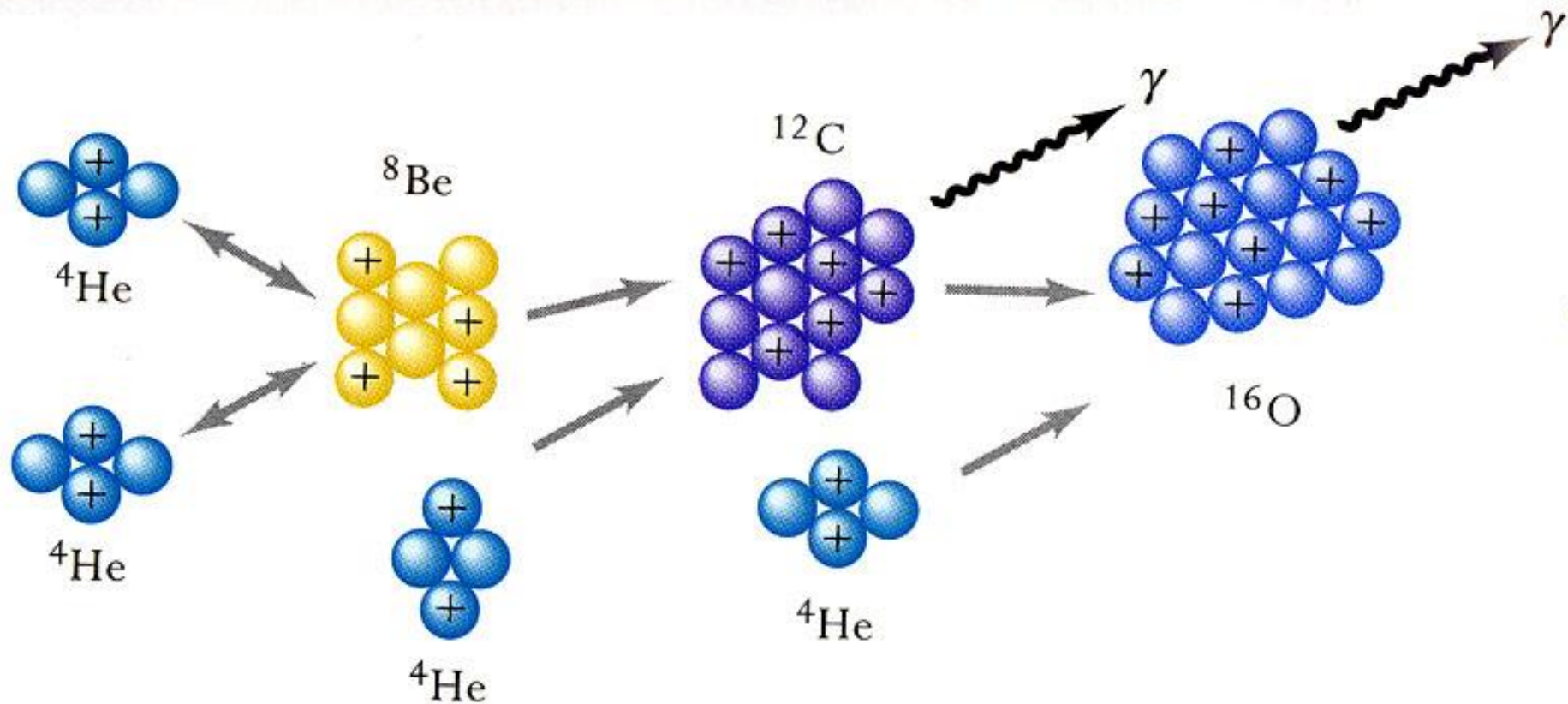


Углеродно-азотный цикл

CNO-цикл

Carbon cycle





3 α -реакция

Стадии генерации ядерной энергии

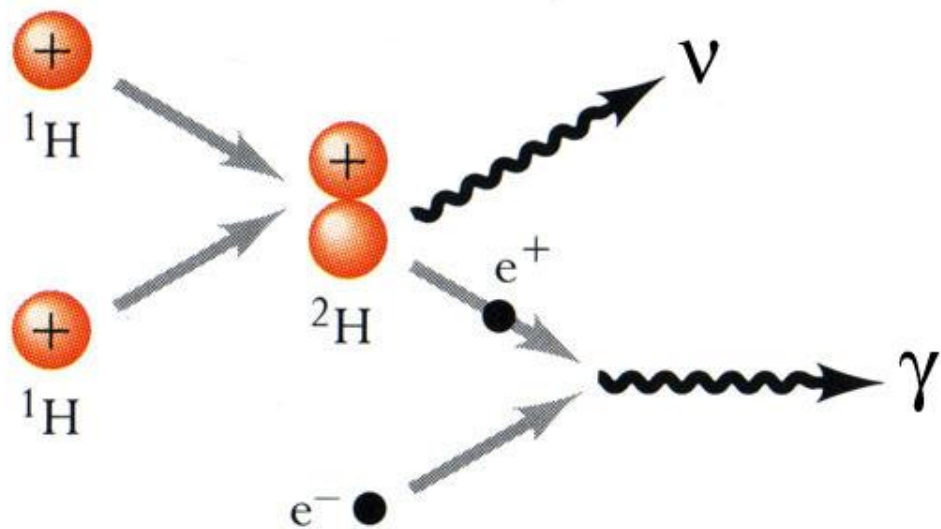
Процесс	Топливо	Продукты реакции	Примерная температура
Горение водорода	Водород	Гелий	$(1-3) \times 10^7$ К
Горение гелия	Гелий	Углерод, кислород	2×10^8
Горение углерода	Углерод	Кислород, неон, натрий, магний	8×10^8
Горение неона	Неон	Кислород, магний	$1,5 \times 10^9$
Горение кислорода	Кислород	От магния до серы	2×10^9
Горение кремния	От магния до серы	Элементы, близкие к железу	3×10^9

Параметры звезд главной последовательности

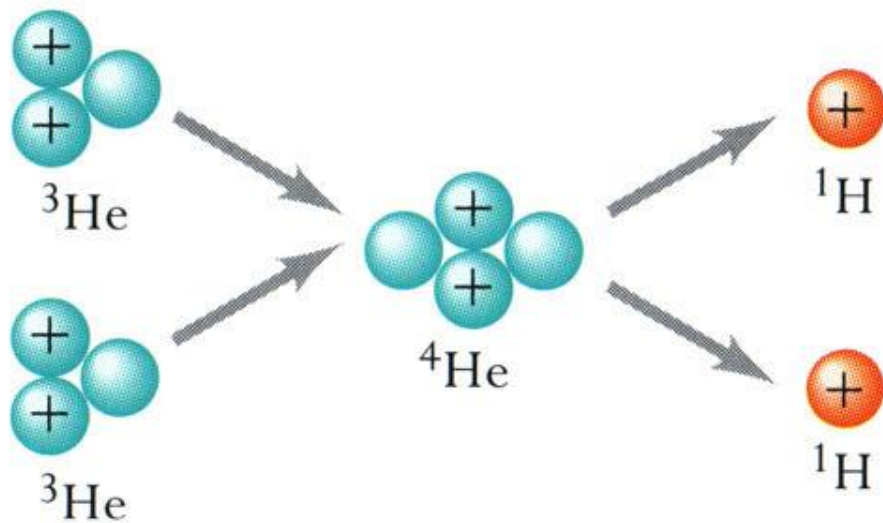
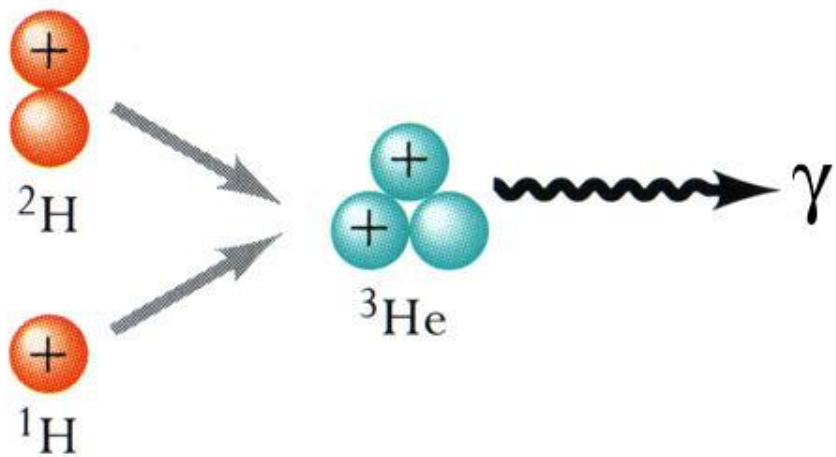
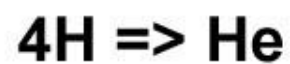
Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Температура, К	Спектральный класс	Время жизни, лет
120	15,8	1 800 000	53 300	O3	3 млн
60	10,6	530 000	48 200	O4	4
27	8,5	140 000	38 000	O7	8
16	5,7	16 000	32 000	B0	13
8,3	4,8	2 500	17 000	B3	34
5,4	3,7	750	15 000	B5	80
3,5	2,7	130	12 500	B8	220
2,6	2,3	63	9 500	A0	480
2,2	2,0	40	9 000	A2	770
1,8	1,7	11	8 100	A7	1 400
1,5	1,3	6,3	7 100	F2	2 500
1,2	1,1	2,5	6 100	F8	5 300
1,0	1,00	1,10	5 800	G2	10 млрд
0,85	0,87	0,44	5 300	G8	18
0,78	0,79	0,28	4 830	K2	25
0,58	0,67	0,12	3 900	K8	70
0,47	0,63	0,075	3 670	M0	150
0,33	0,36	0,030	3 400	M2	230
0,2	0,21	0,005	3 200	M4	800

Физические параметры звезд

$M (M_{\odot})$	$R (R_{\odot})$	ρ (г/см ³)	ρ_c (г/см ³)	T_c (10 ⁶ К)	$L (L_{\odot})$	Спектр
<i>Главная последовательность нулевого возраста</i>						
50	11	0,053	2,0	37	5×10^5	O6
20	7,2	0,075	5,0	35	5×10^4	O9
10	4,9	0,13	8,9	31	5000	B2
5	3,5	0,16	20	27	630	B6
2	1,9	0,41	68	21	25	A5
1	0,94	1,7	90	14	0,8	G3
0,3	0,30	16	100	8	0,015	M3
0,2	0,22	26	158	7	0,006	M4
0,1	0,12	81	690	5	0,001	M5
0,085	0,074	290	2000	4	0,0004	M6
<i>Красный гигант</i>						
1,3	27	0,0001	320	40	150	K2
<i>Белый карлик</i>						
0,9	0,01	10^6	$1,6 \times 10^7$	8	0,001	



Протон-протонная реакция



Хлорный
детектор
солнечных
нейтрино
(Хоумстейк,
Ю. Дакота)

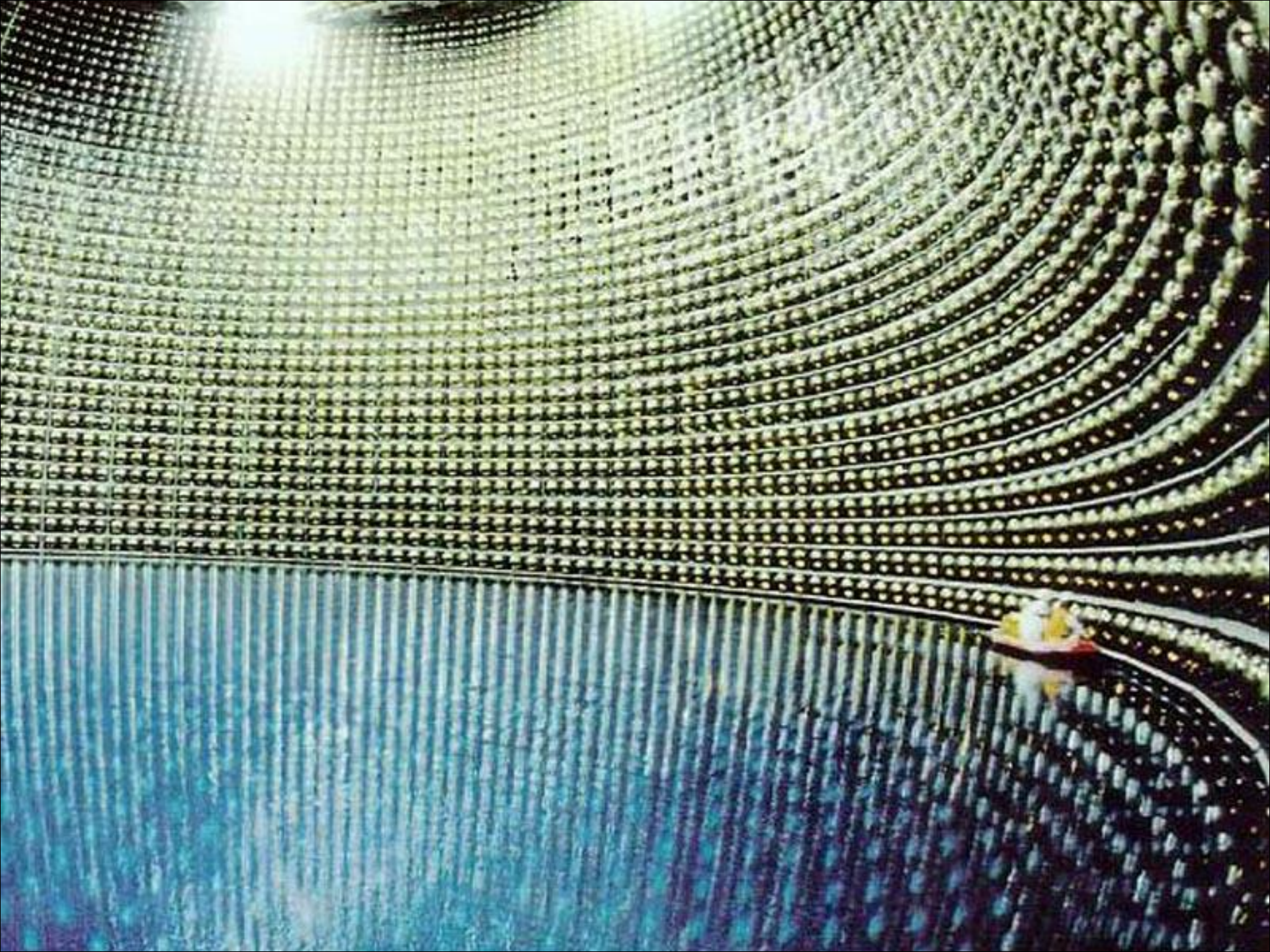
Глубина 1,5 км

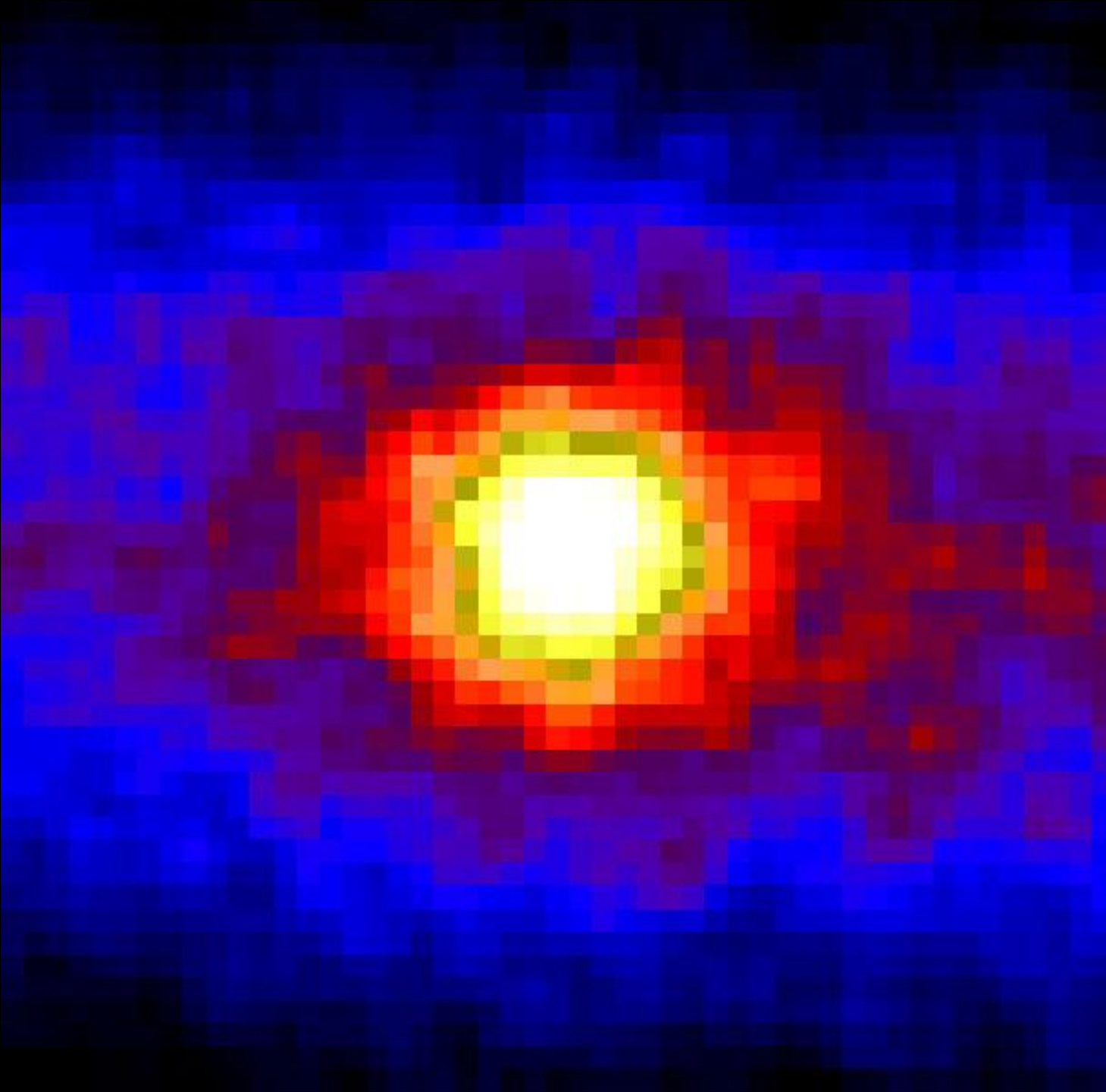
Объем 380 тыс л

Вещество -
тетрахлорэтилен
 C_2Cl_4

Авторы -
Раймонд Дэвис
и др. (1968-96)







Изображение
Солнца,
полученное
детектором
нейтрино
Суперкамиоканде
в 1998 г.

Экспозиция
500 сут

Ширина кадра
90 градусов

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge Bosons

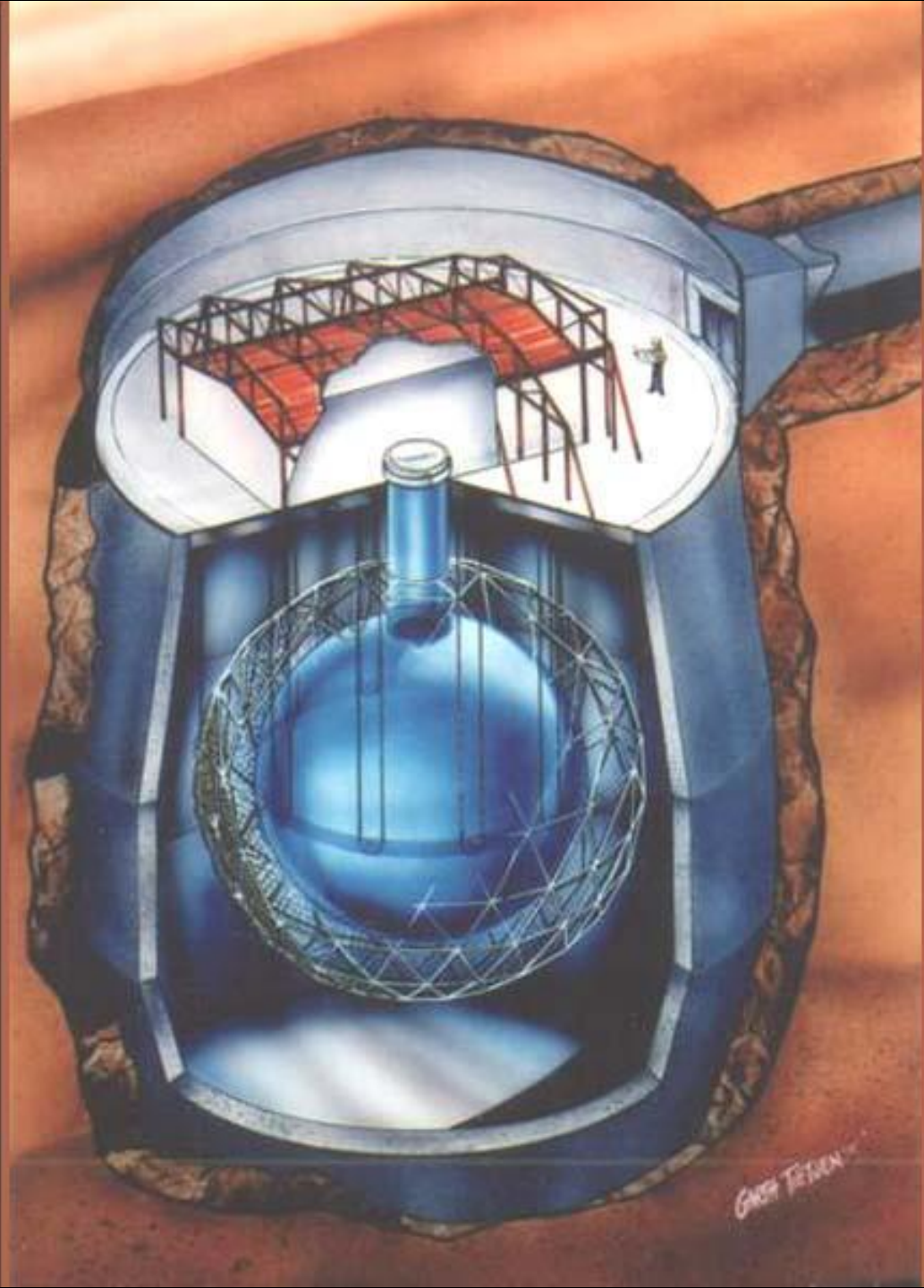
Садберийская нейтринная обсерватория
(г. Садбери, провинция Онтарио, Канада).

1000 тонн тяжелой воды (D_2O) в
прозрачном акриловом (плексигласовом)
шаре диаметром 12 м, окруженном
9600 ФЭУ на геодезической сфере,
диаметром 18 м, погруженной в
резервуар с чистой водой
на глубине 2 км.

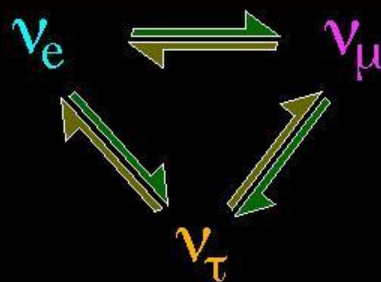
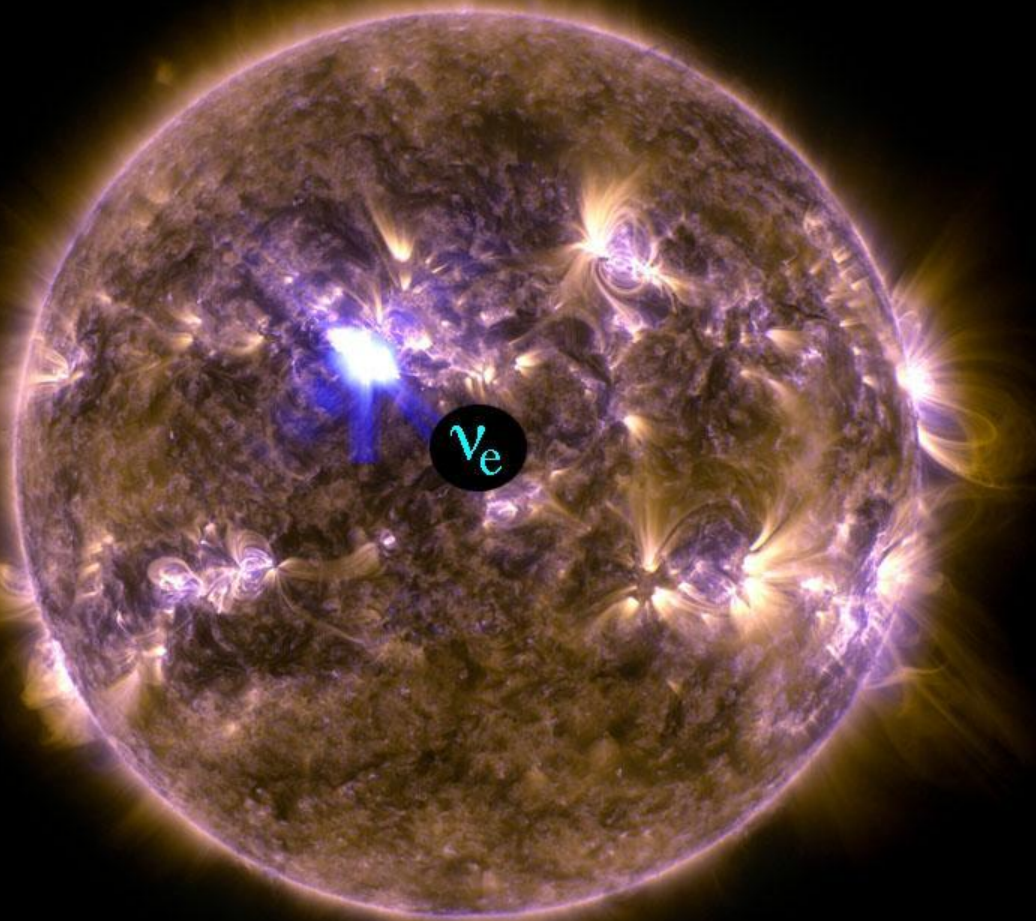
В 2002 г. здесь решена проблема
солнечного нейтрино -
зарегистрированы все три типа нейтрино
(ν_e ν_μ ν_τ) в таком общем количестве,
сколько ν_e должно рождаться на Солнце

Тем самым доказано, что:

- модель Солнца верна
- нейтрино имеет массу покоя
- происходят осцилляции нейтрино

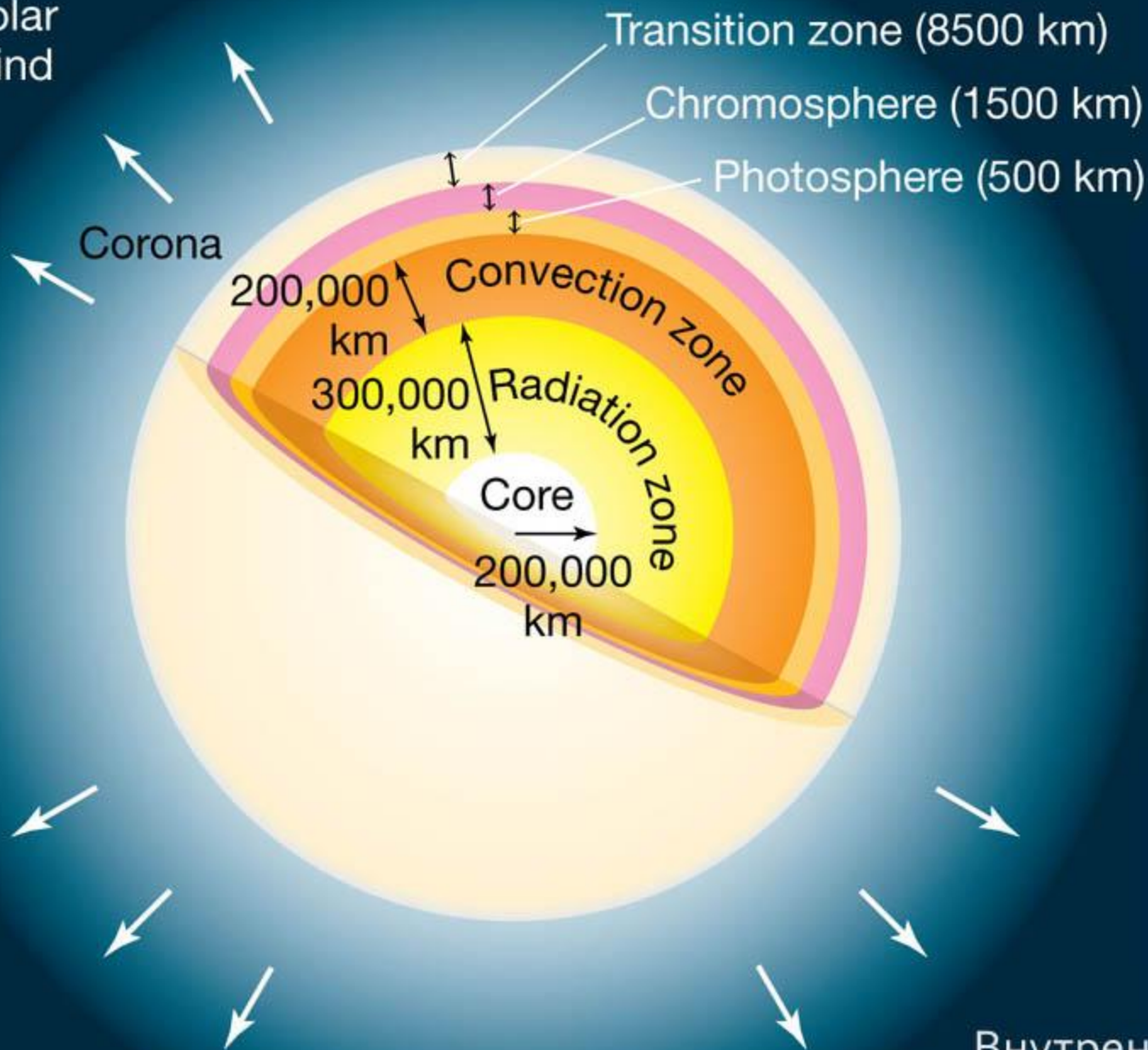


Осцилляции нейтрино по пути от Солнца к Земле



Родившись в недрах Солнца как электронные нейтрино, эти частицы за 8 мин пути к Земле частично превращаются в нейтрино других сортов (ароматов) - мюонные и тау

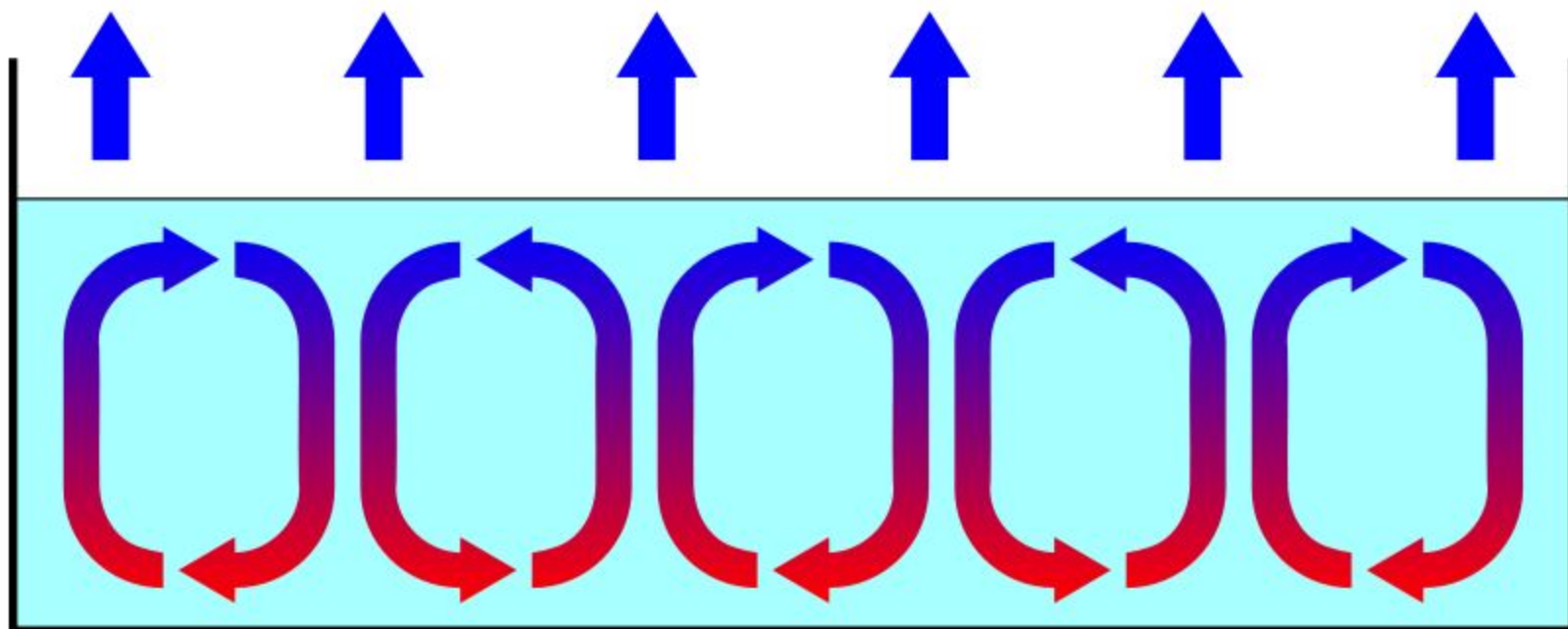
Solar
wind



Внутреннее строение
звезды типа Солнца

Формирование конвективных ячеек Бенара

Охлаждение



Нагрев

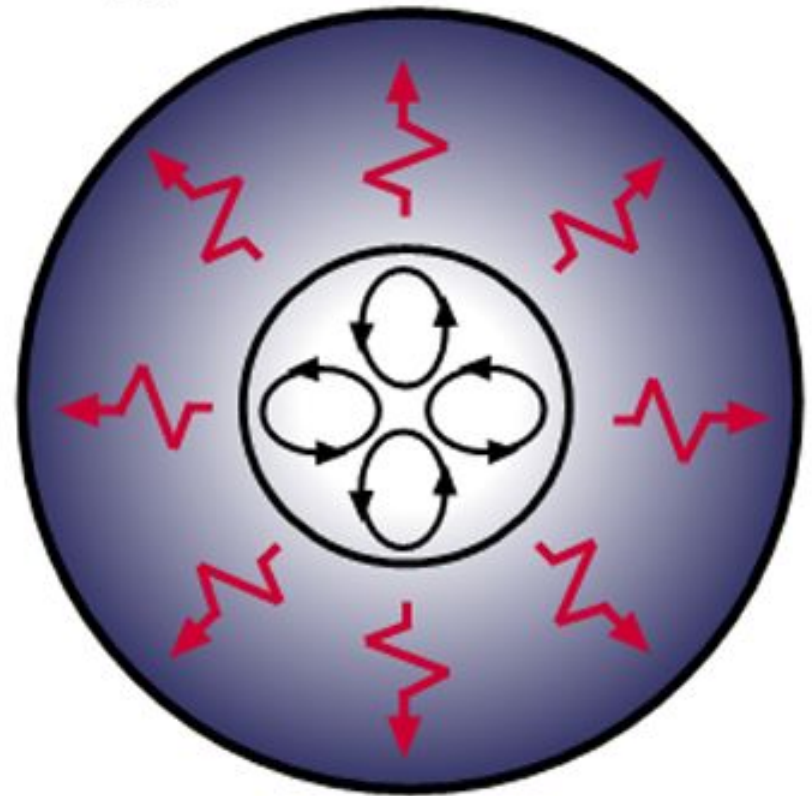
Перенос энергии в недрах звёзд



$M < 0,5$




$0,5 - 1,5$



$M > 1,5$

Масса звезды в массах Солнца

Из трёх известных механизмов переноса энергии (теплопроводность, излучение и конвекция) нормальные звёзды используют два:

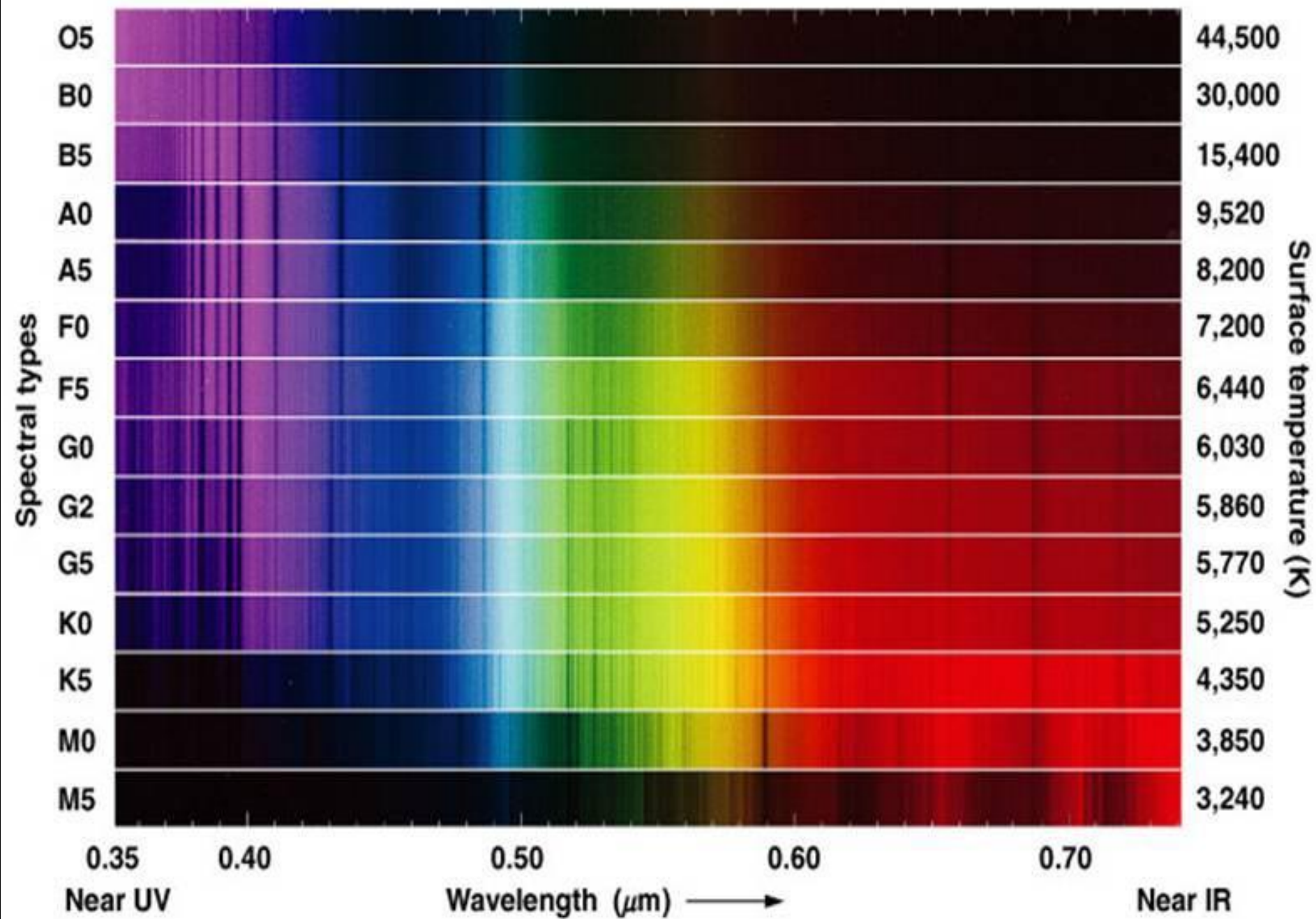
лучистый перенос, т. е. диффузию квантов () и

конвекцию, т. е. макроскорическую циркуляцию вещества ()

Эволюция звезд



Спектры звёзд

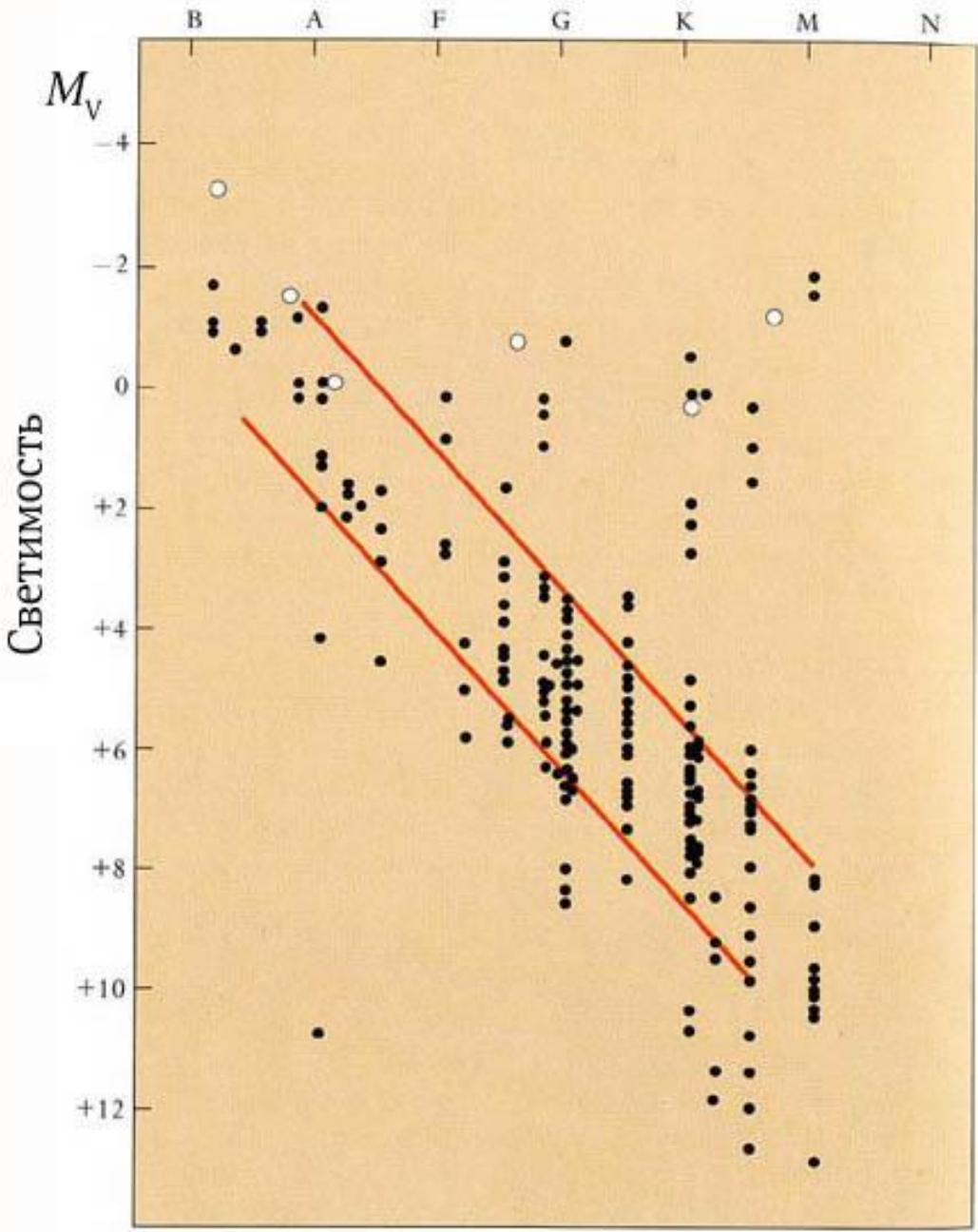




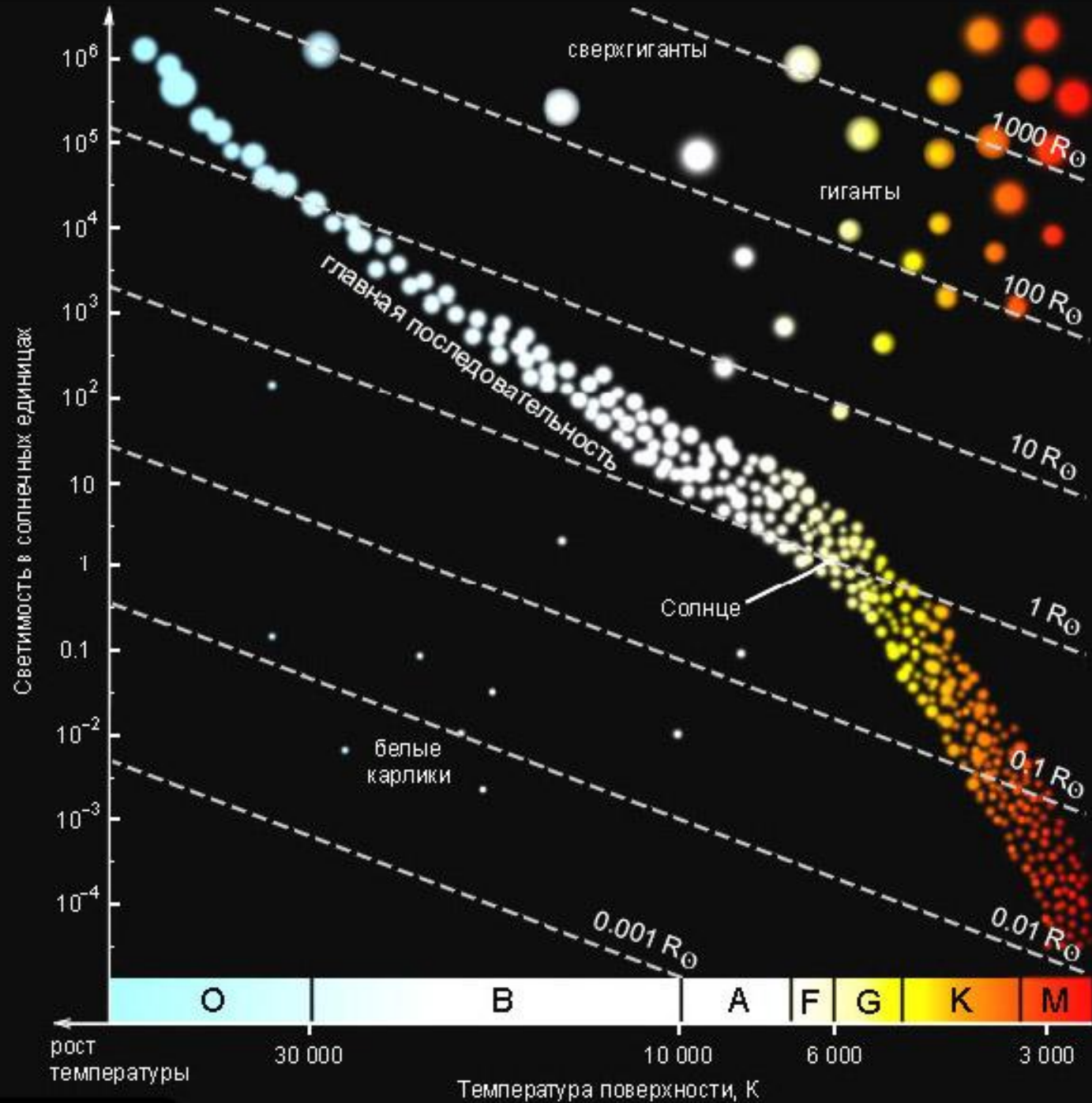
Генри Норрис Рассел (США)



Эйна́р Герцшпру́нг (Дания)



Спектральный класс (температура)



Светимость в солнечных единицах

рост температуры

Температура поверхности, К

O B A F G K M

30 000

10 000

6 000

3 000

$0.001 R_{\odot}$

$0.01 R_{\odot}$

$0.1 R_{\odot}$

$1 R_{\odot}$

$10 R_{\odot}$

$100 R_{\odot}$

$1000 R_{\odot}$

сверхгиганты

гиганты

главная последовательность

белые карлики

Солнце

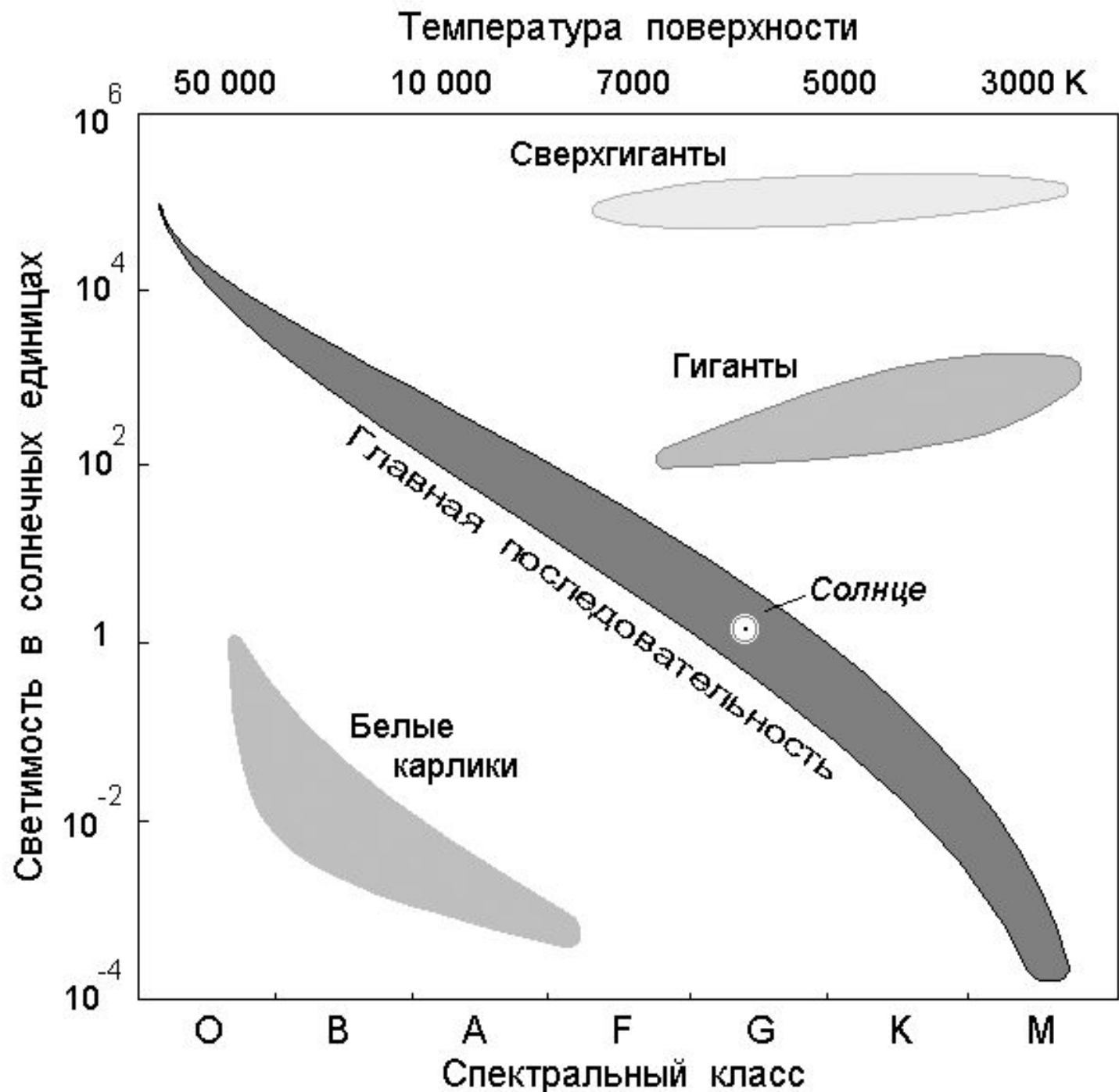


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Светимость (в солнечных единицах)

1000000

10000

100

1

0,01

0,0001

0,000001

Гипергиганты

Ia⁺

Сверхгиганты

Ia

Яркие гиганты

Ib

II

Гиганты

III

Главная последовательность

Субгиганты

IV

"Карлики"

Субкарлики

V

Красные карлики

VI

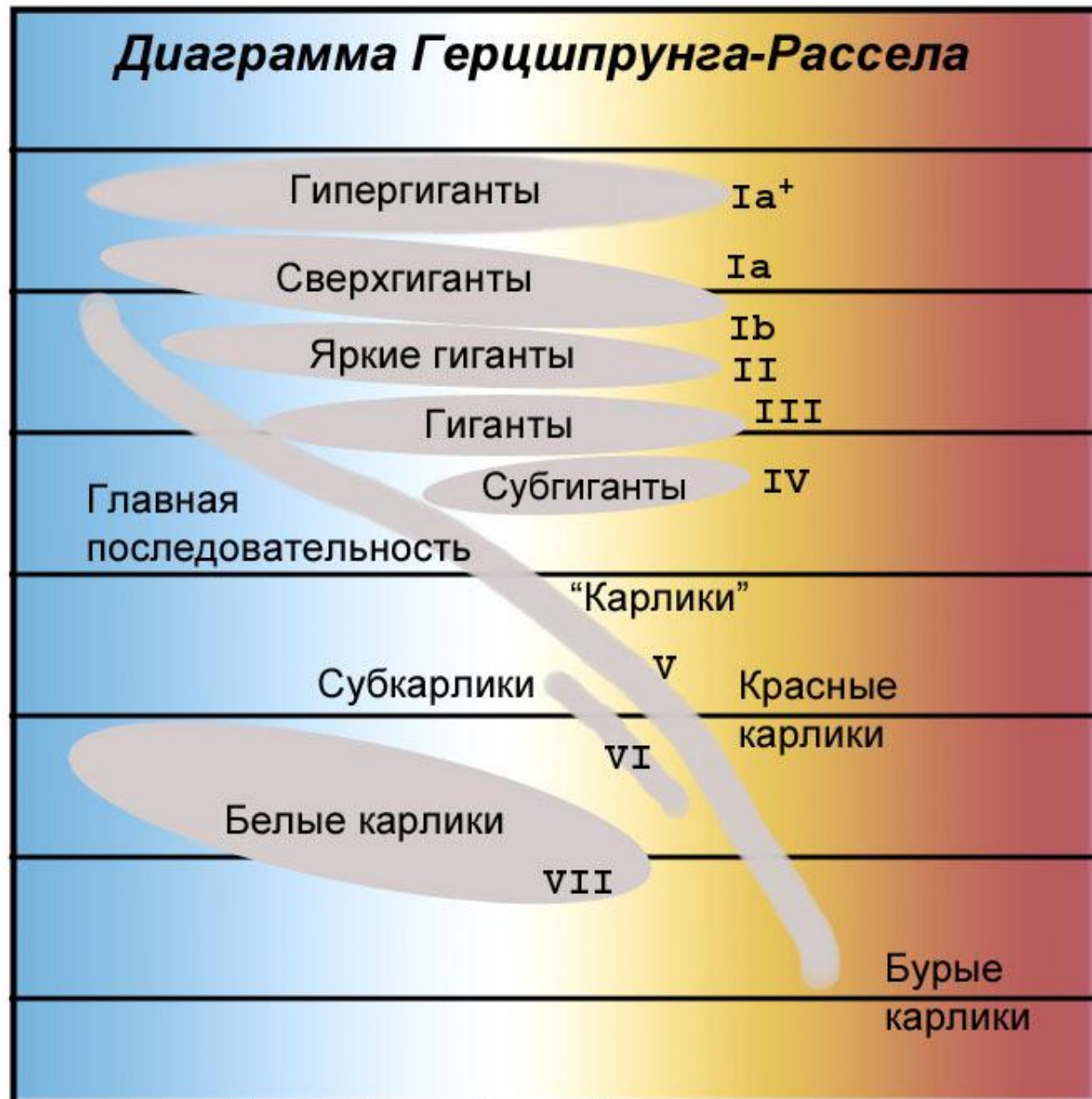
Белые карлики

VII

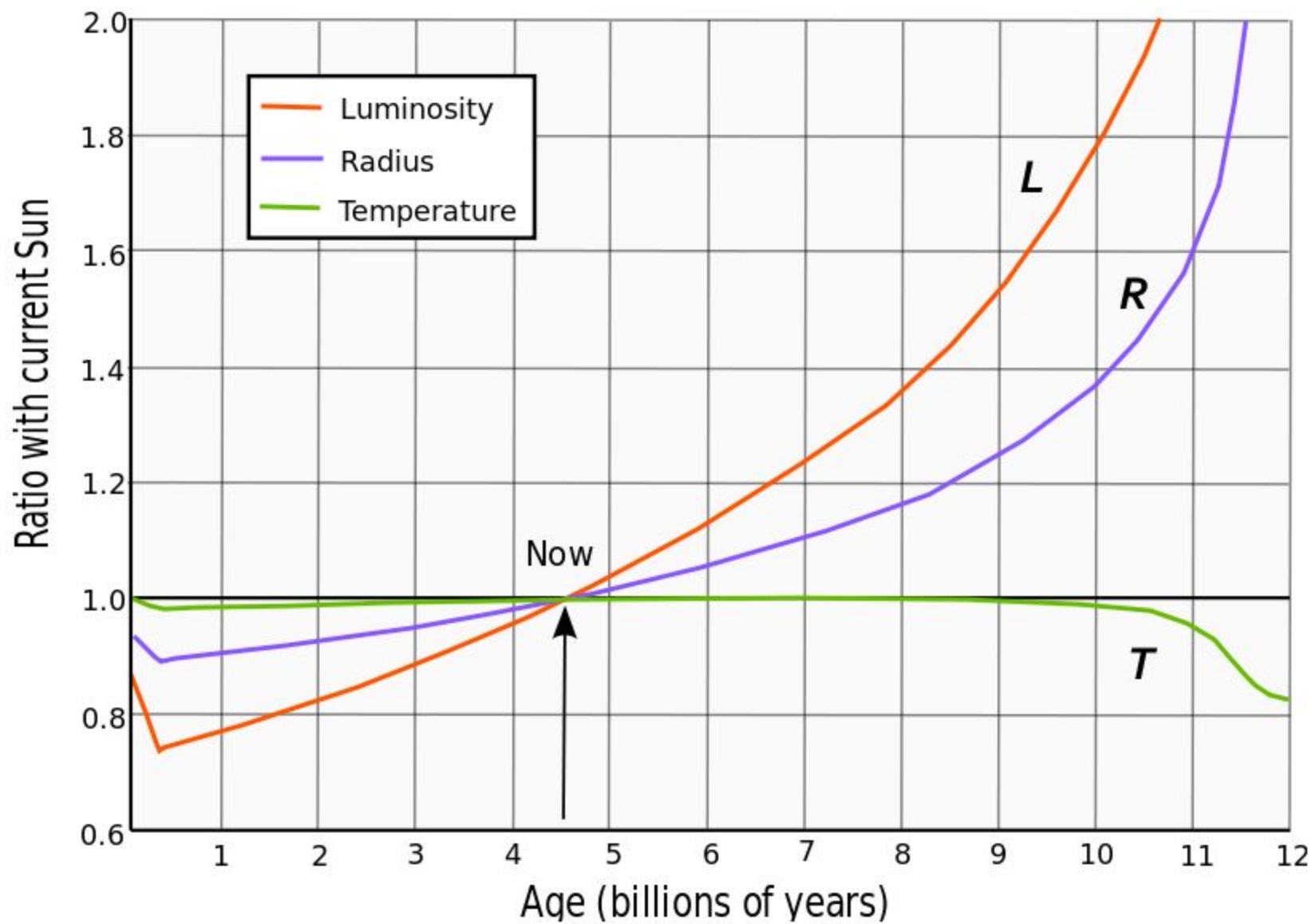
Бурые карлики

O | B | A | F | G | K | M | L | T

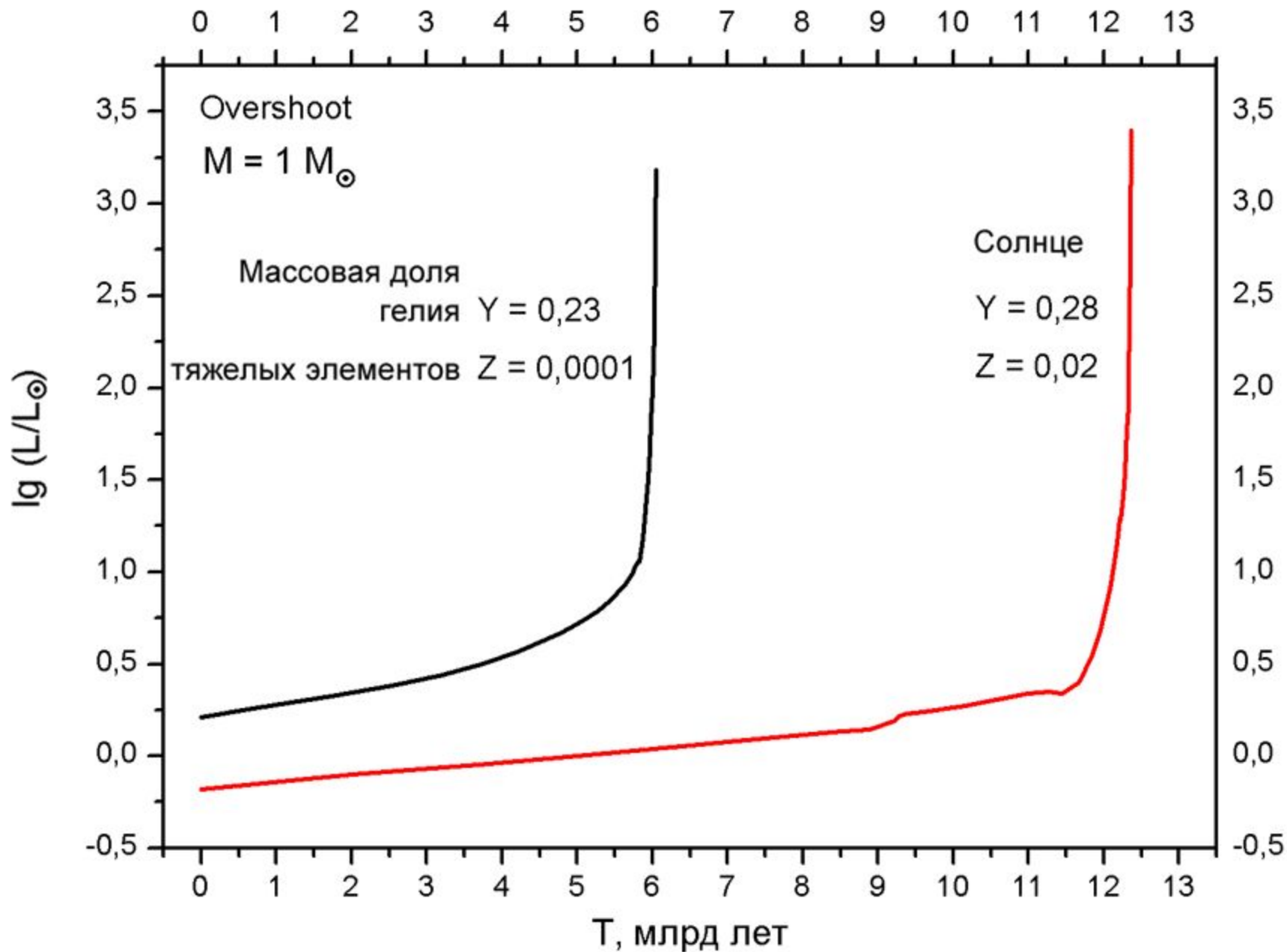
Спектральный класс



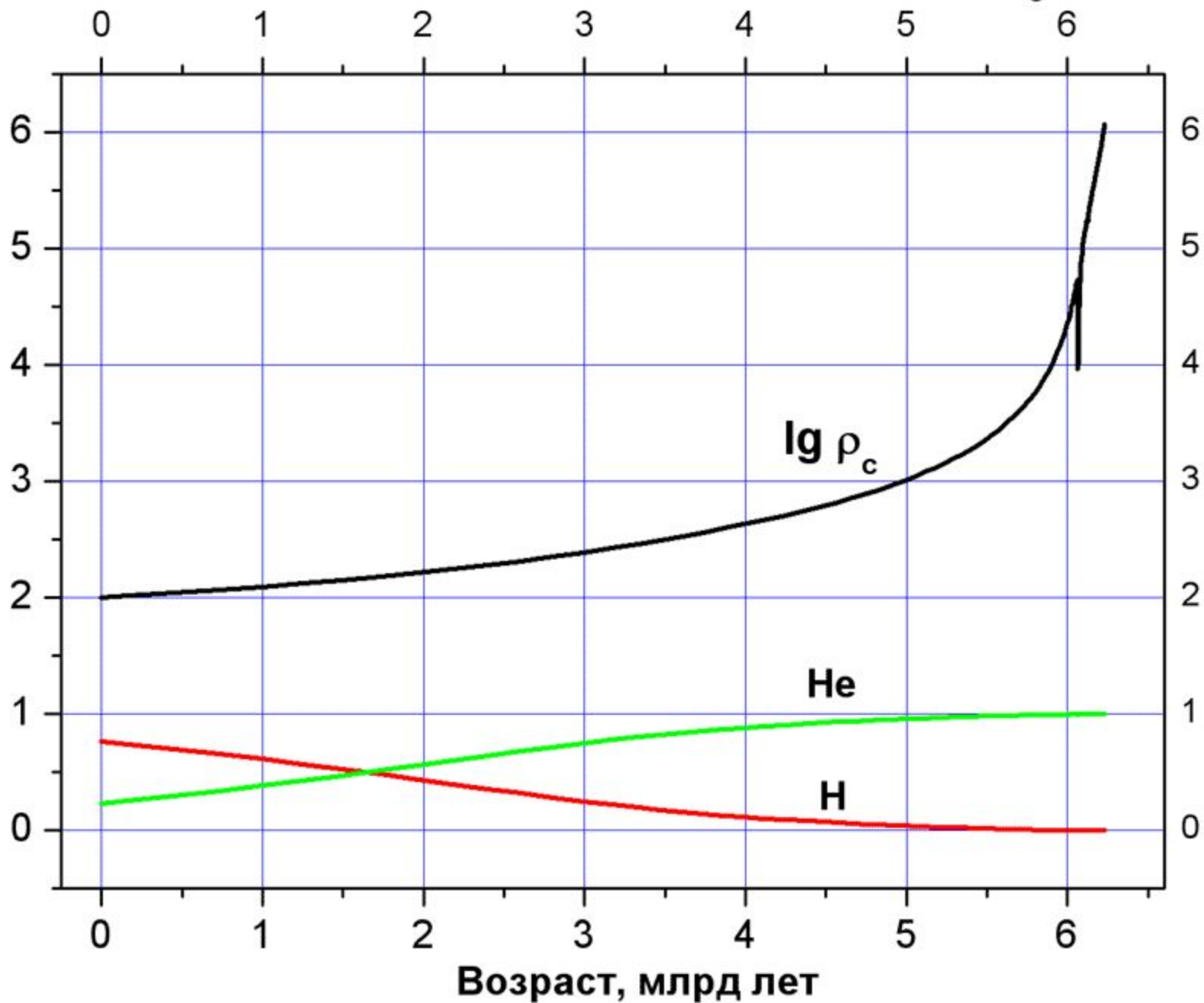
Эволюция внешних параметров Солнца

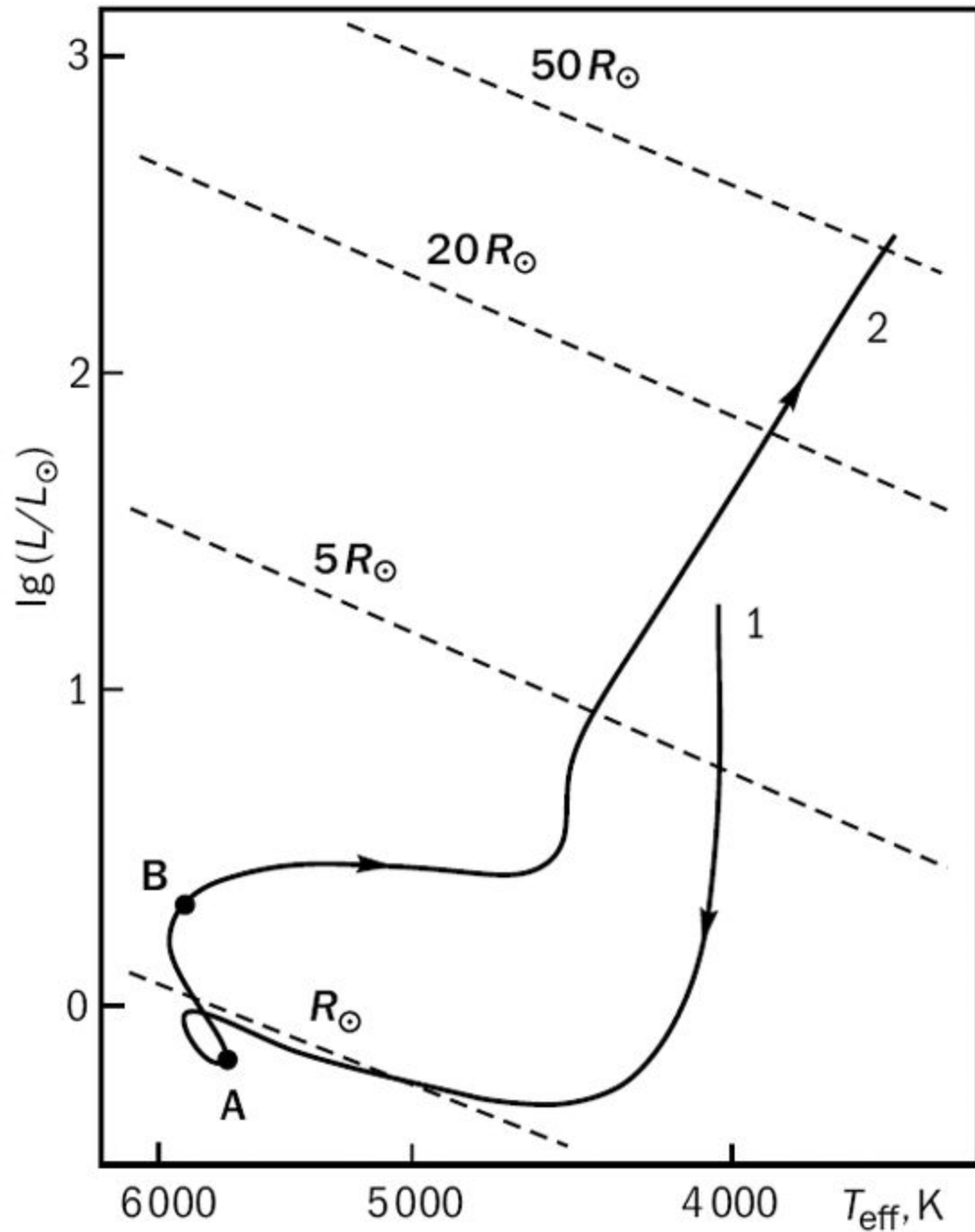


Эволюция светимости звезды с начальной массой $1 M_{\odot}$



Эволюция плотности и химсостава в центре звезды $M = 1 M_{\odot}$ $Z = 0$





Эволюционный трек звезды с массой $1 M_{\odot}$

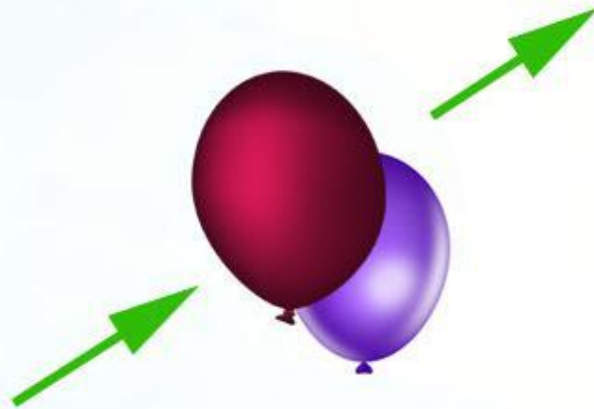
- 1 - сжатие на стадии протозвезды;
- 2 - расширение на стадии красного гиганта.

В точке **A** в ядре начинаются реакции горения водорода.

В точке **B** горение перемещается в слой над ядром, а само гелиевое ядро начинает сжиматься.

Чем больше
размер оболочки,
тем она прозрачнее

Воздушный шарик -
модель красного гиганта



Надуваем!



Эволюция Солнца



Антарес



Бетельгейзе



Наше Солнце

Сириус

Арктур

Поллукс



Ригель



Альдебаран

Солнце

на стадии красного гиганта
увеличит размер своей
фотосферы в 200 раз
и достигнет
орбиты
Земли



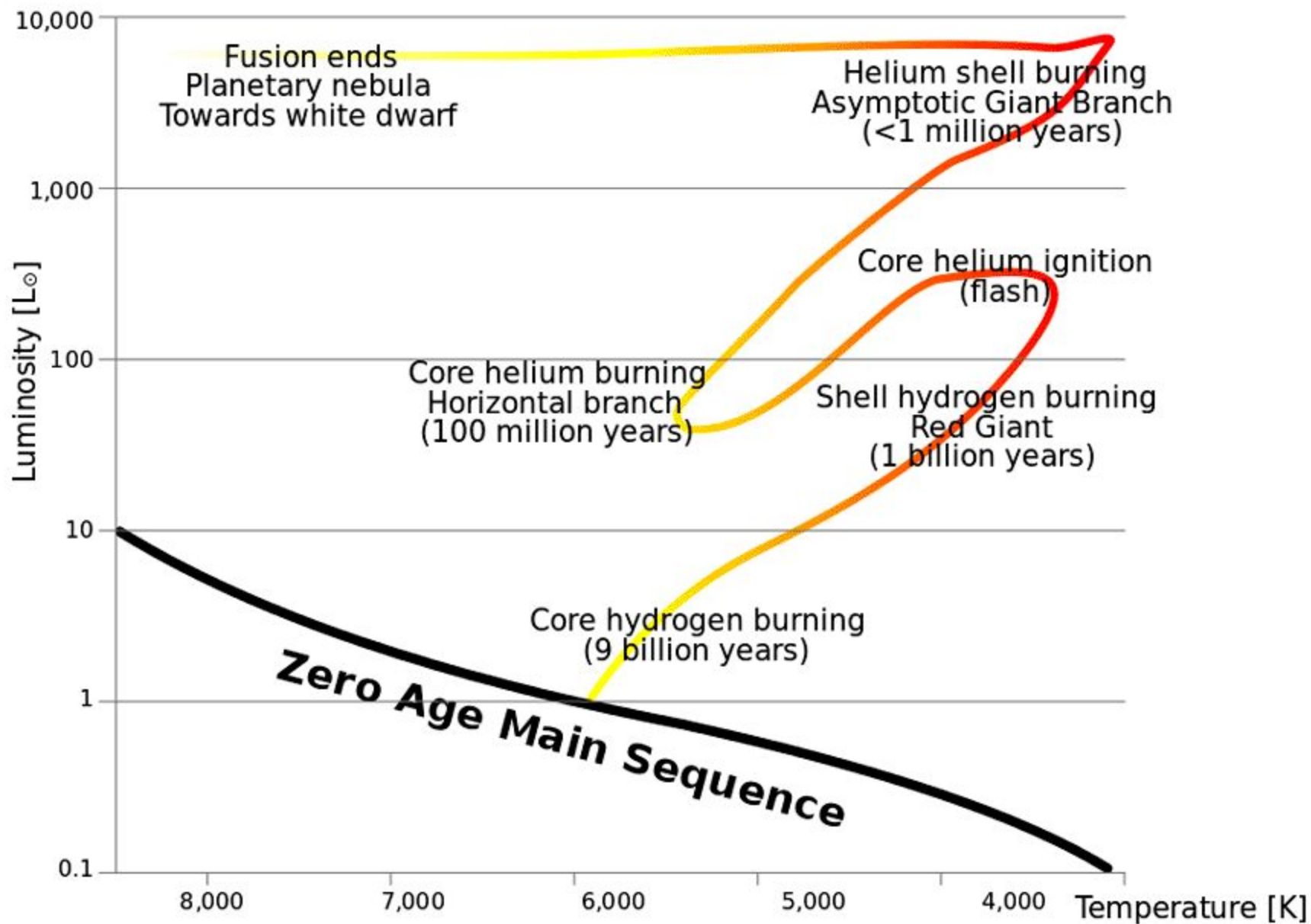
The Sun as a red giant
(diameter ≈ 2 AU)

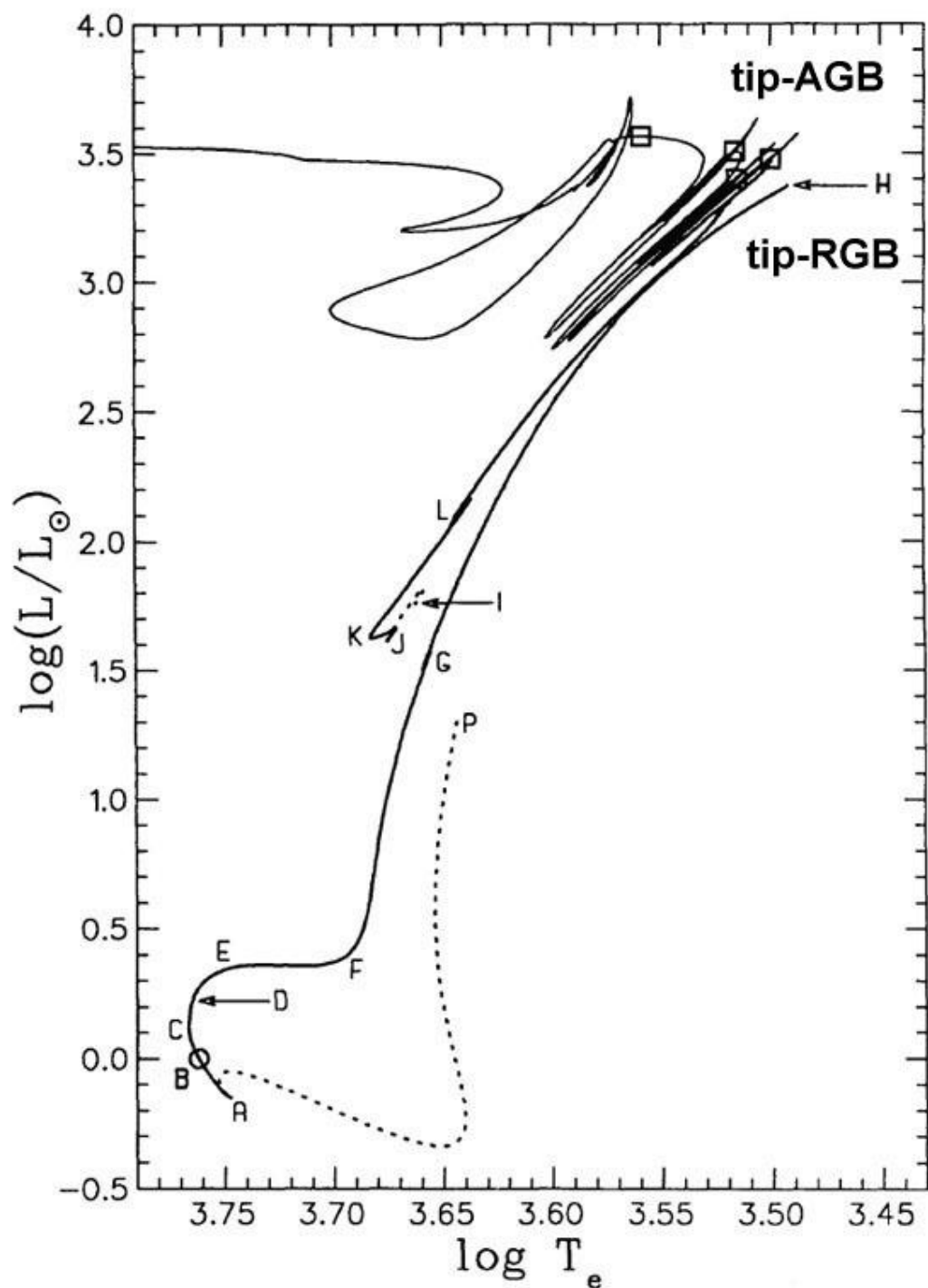
The diagram features a large orange-red circle representing the Sun as a red giant. A smaller yellow-green circle represents the Sun as a main-sequence star. A rectangular inset with a grey border shows the main-sequence star in a black background, with a white box highlighting its tiny size relative to the red giant. A small white box at the bottom left of the red giant circle indicates the position of the inset.

The Sun as a main-sequence star
(diameter ≈ 0.01 AU)

Эволюция Солнца

от начальной главной последовательности до окончания термоядерных реакций





Эволюция Солнца с учетом потери массы

- A-E - главная последовательность
- E-F - покраснение
- F-H - ветвь красных гигантов
- I - L - горизонтальная ветвь
- L-1st flash - ранняя асимпт. ветвь
- Тепловые пульсации на AGB
- Переход к белым карликам

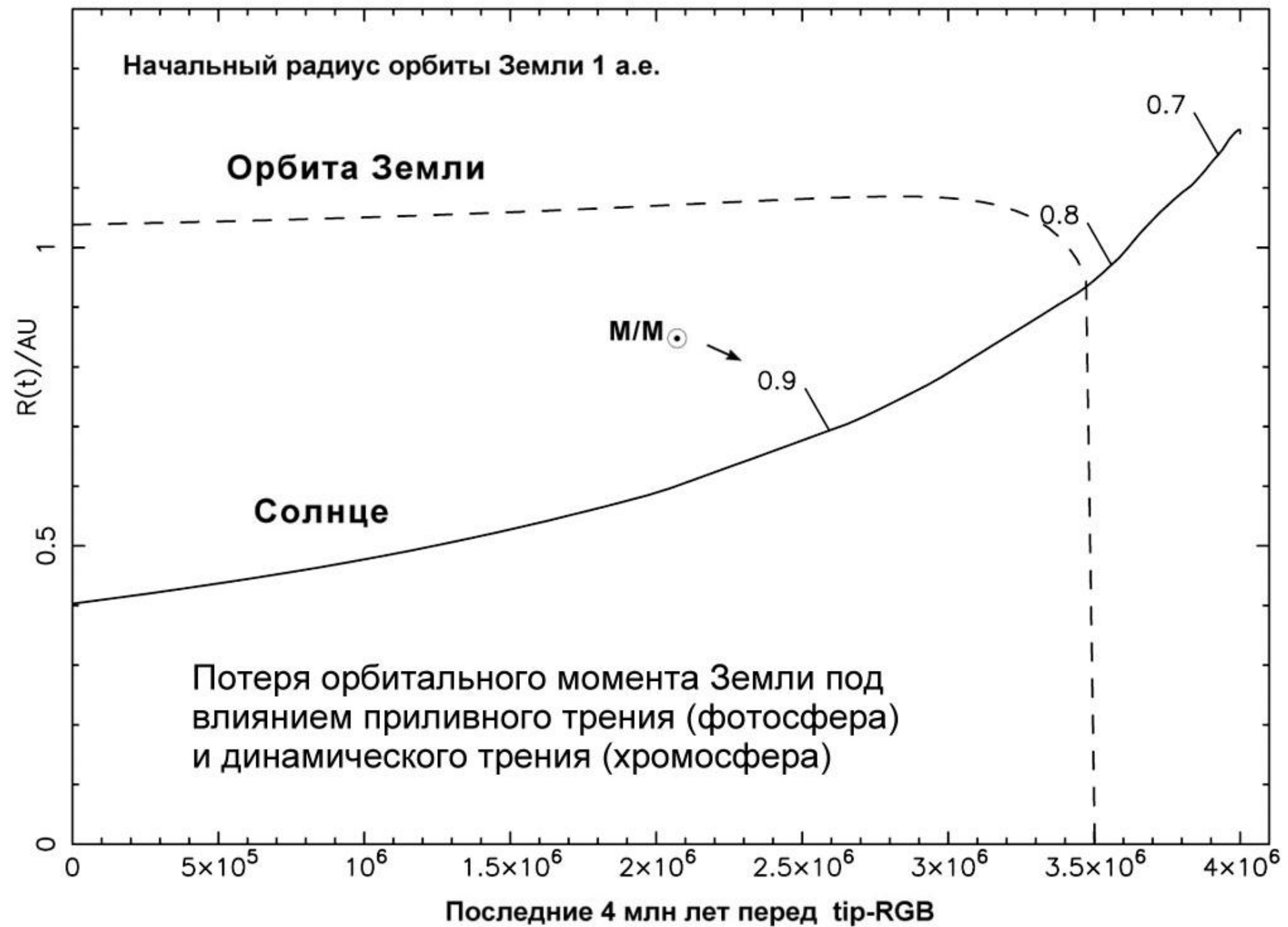
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 418:457-468, 1993 November 20

OUR SUN. III. PRESENT AND FUTURE

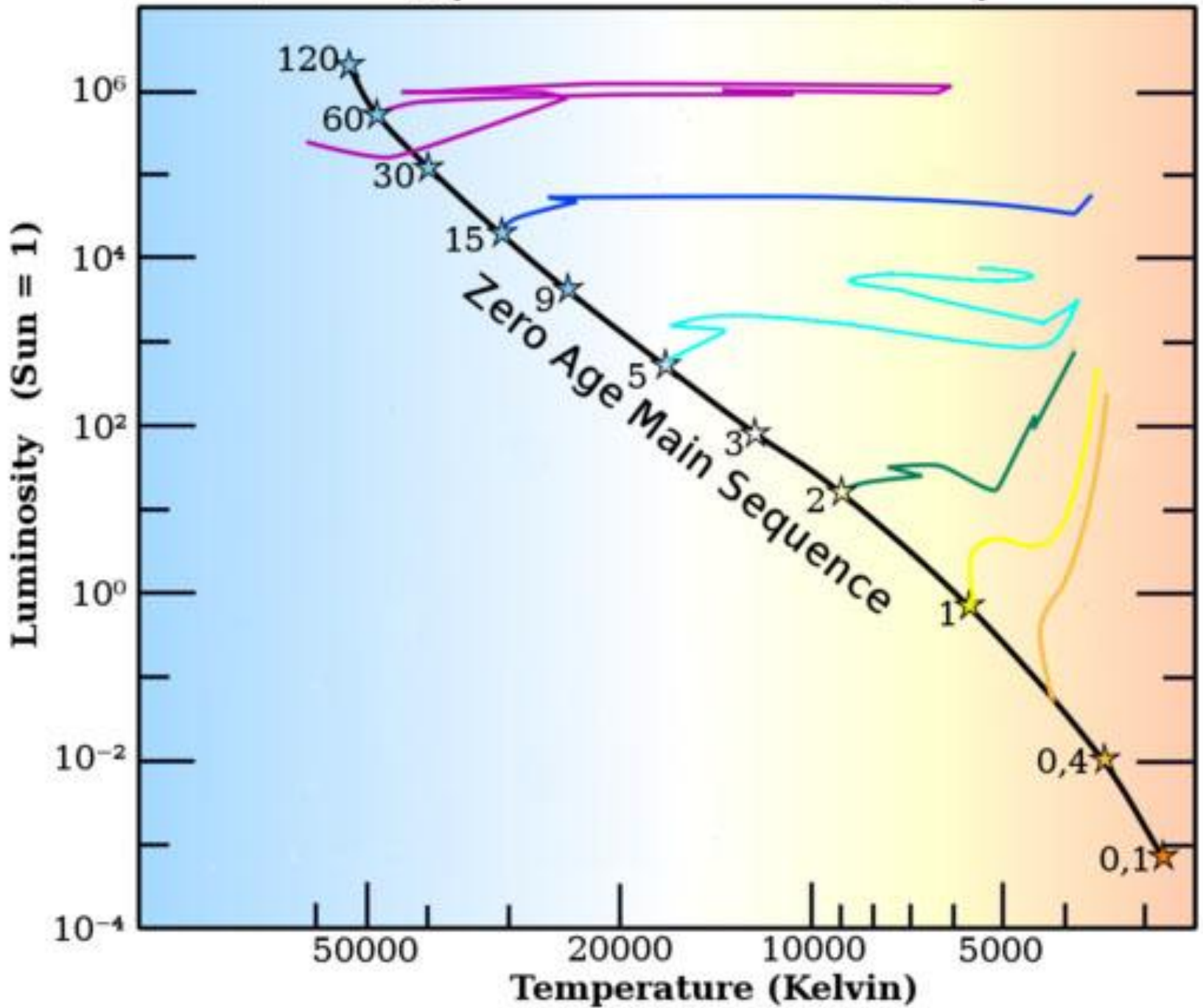
I.-JULIANA SACKMANN, ARNOLD I. BOOTHROYD, AND KATHLEEN E. KRAEMER

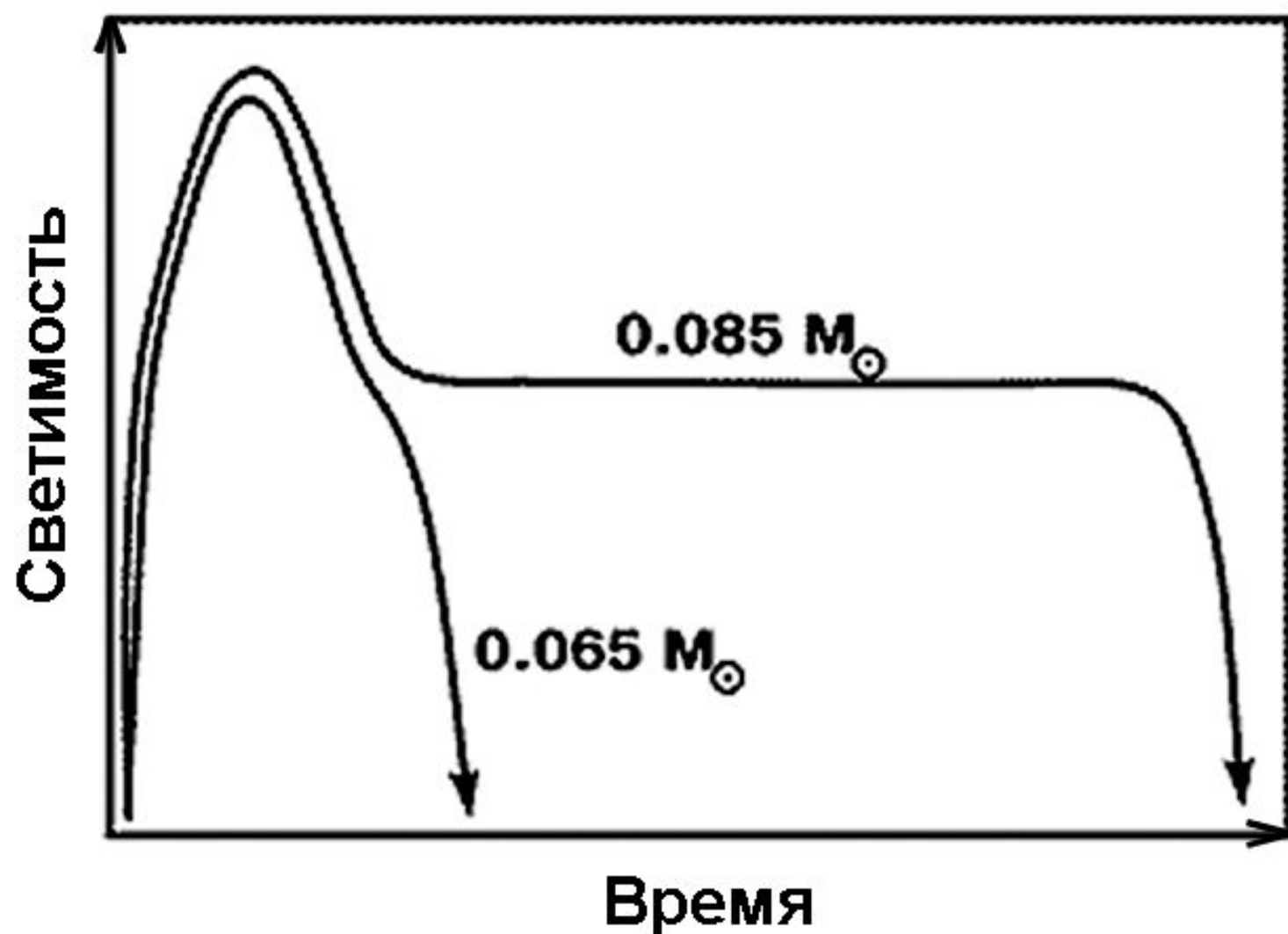
SOLAR EVOLUTION MODEL WITH MASS LOSS

Phase	Age (Gyr)	$L (L_{\odot})$	$T_{\text{eff}} \text{ (K)}$	$R (R_{\odot})$	$M_{\text{Sun}} (M_{\odot})$
ZAMS	0.00	0.70	5596	0.89	1.000
Present	4.58	1.00	5774	1.00	1.000
MS:hottest	7.13	1.26	5820	1.11	1.000
MS:final	10.00	1.84	5751	1.37	1.000
RGB:tip	12.17	2730.	2602	256.	0.668
ZA-He	12.17	53.7	4667	11.2	0.668
AGB:tip	12.30	2090.	3200	149.	0.546
AGB:tip-TP	12.30	4170.	3467	179.	0.544

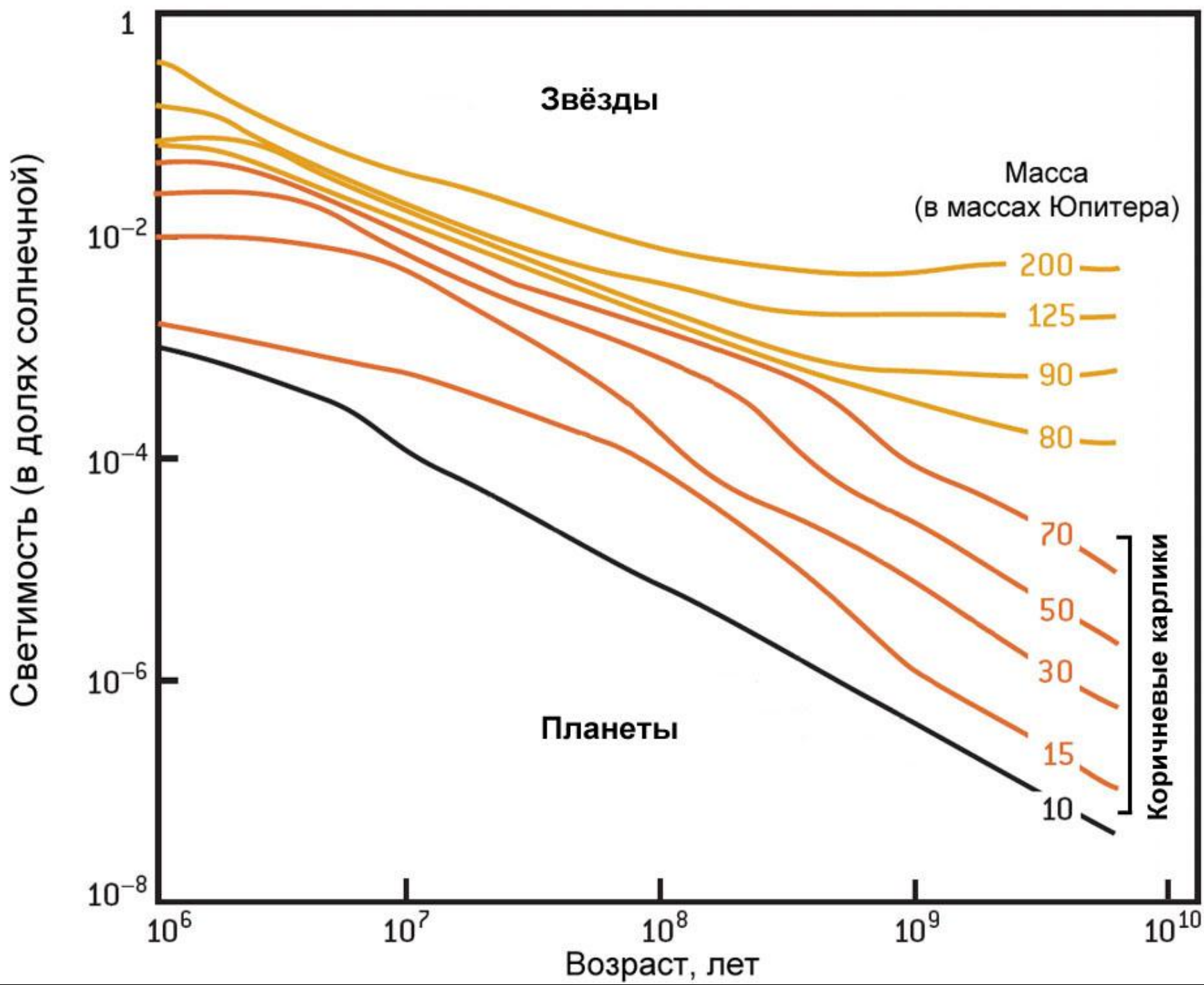


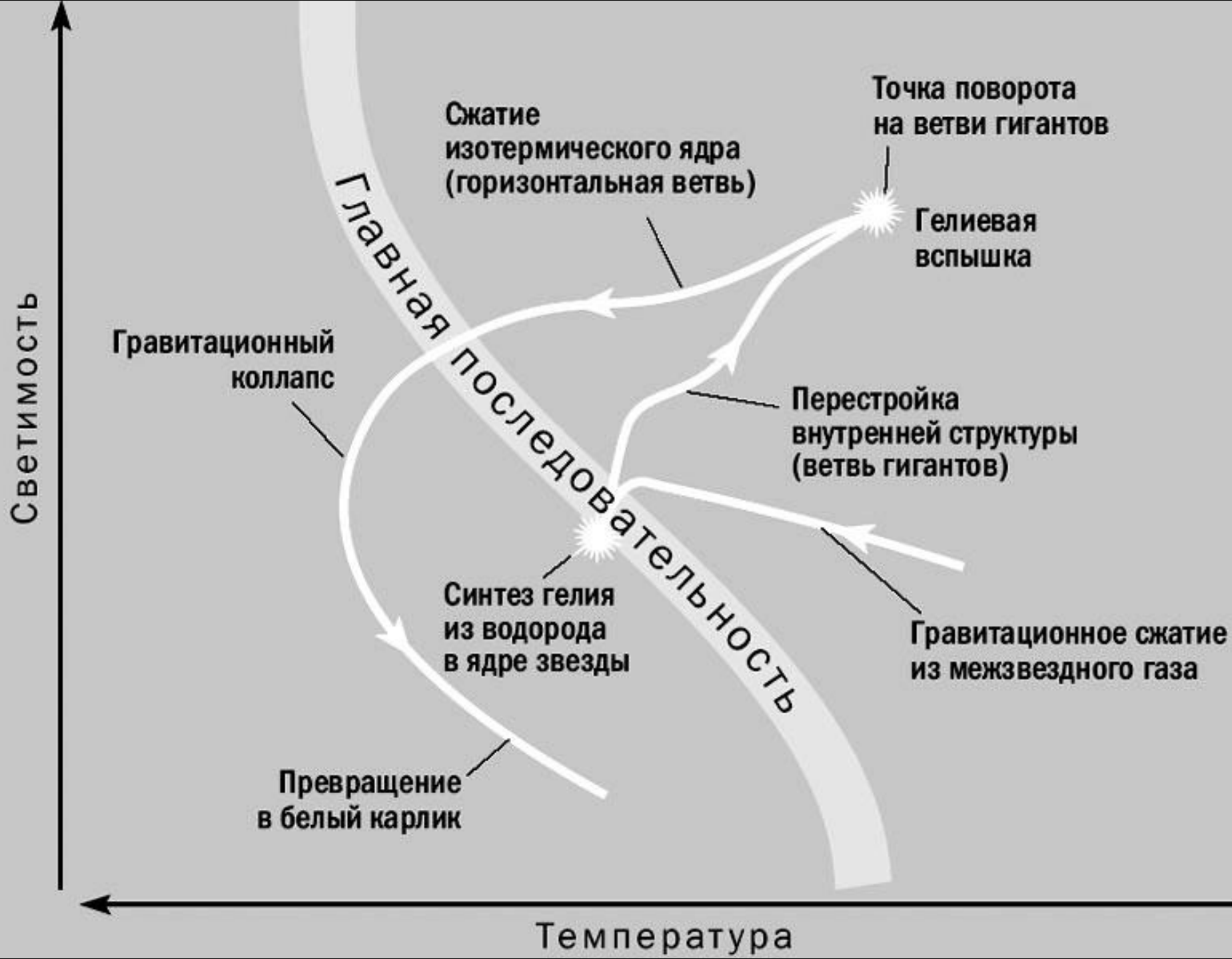
Эволюция звезд разной массы на ГР-диаграмме от ГП

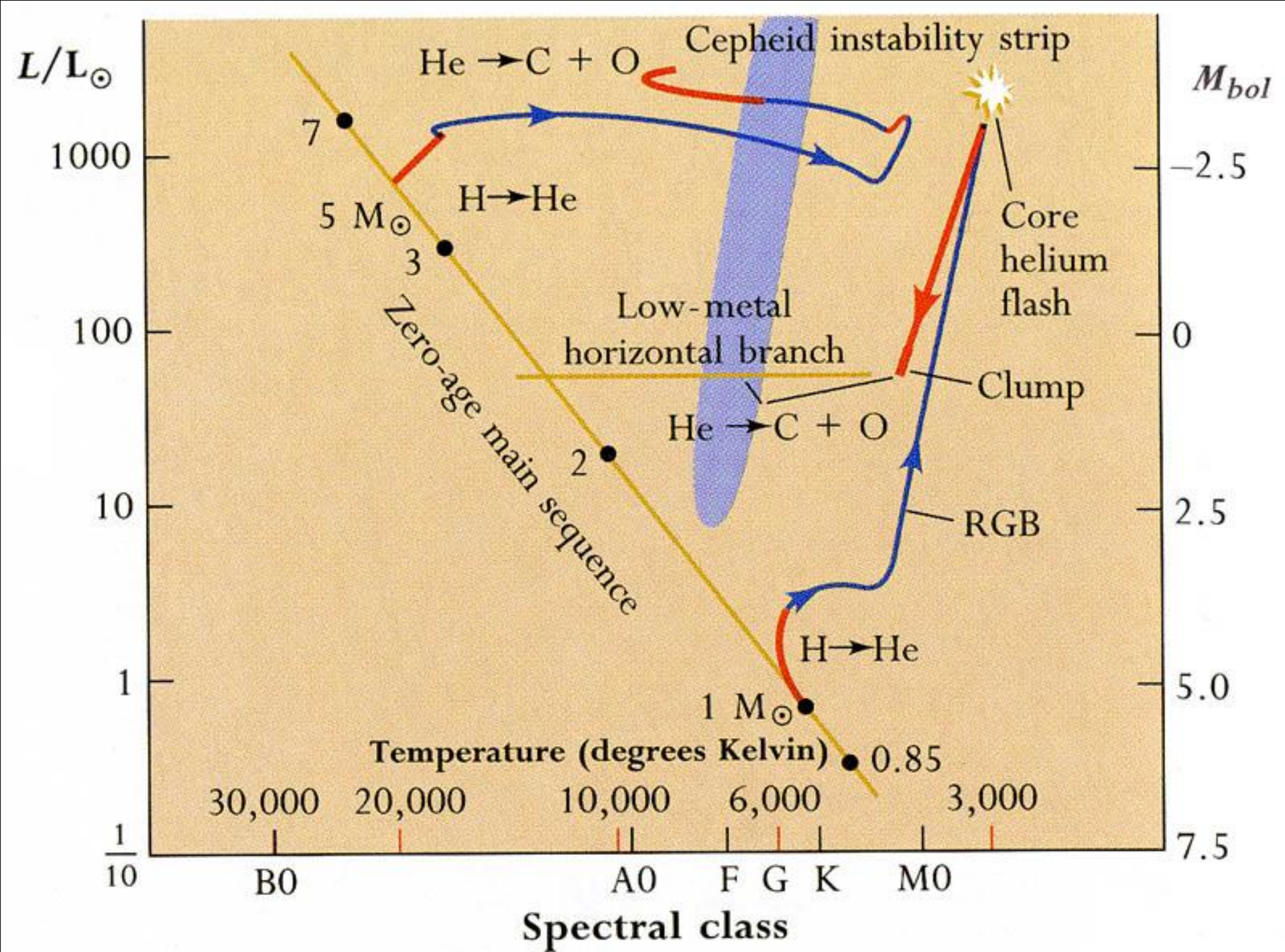




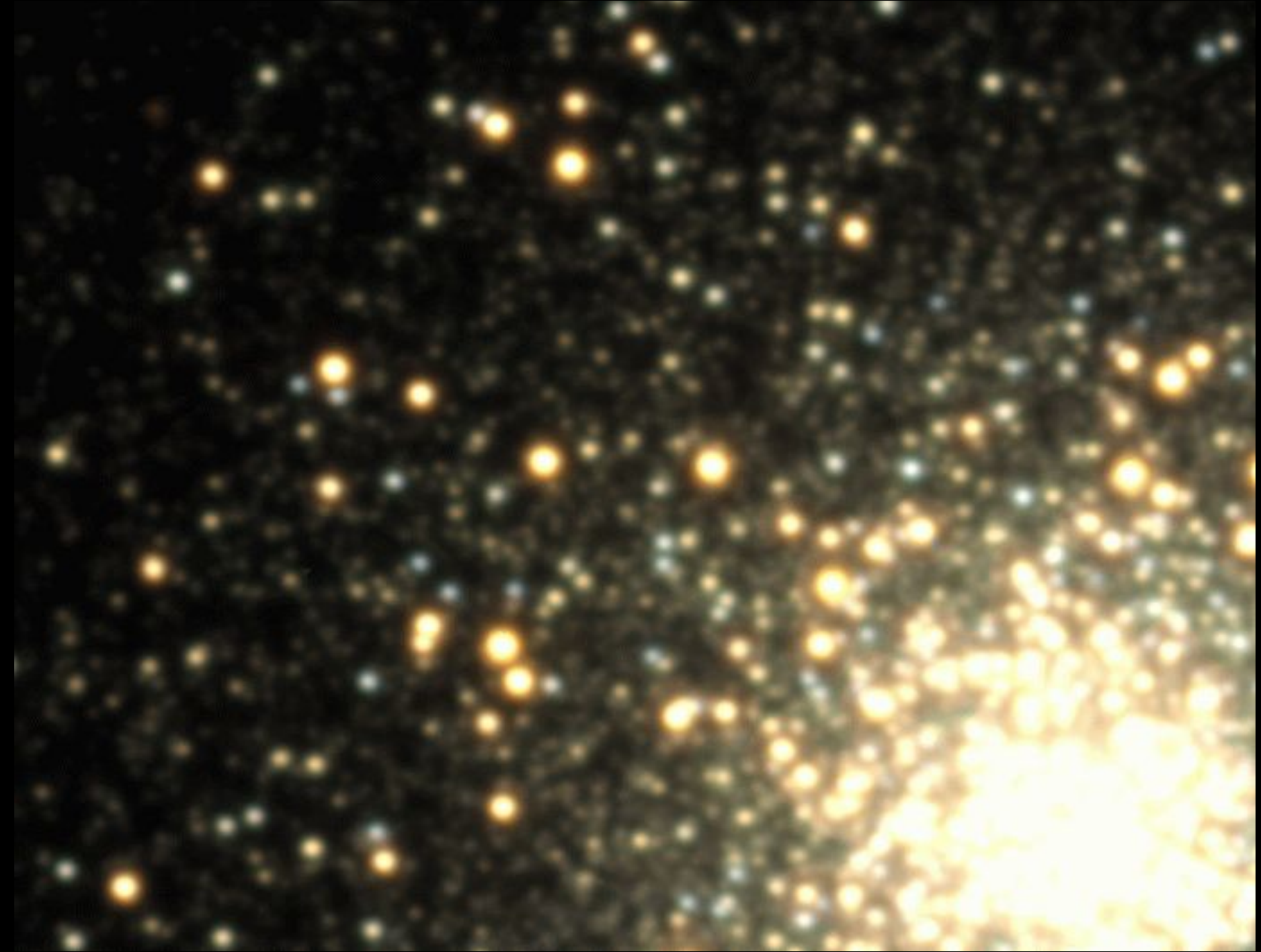
Эволюция светимости двух протозвезд, имеющих массы чуть больше и чуть меньше нижнего предела, необходимого для протекания термоядерной *pp*-реакции







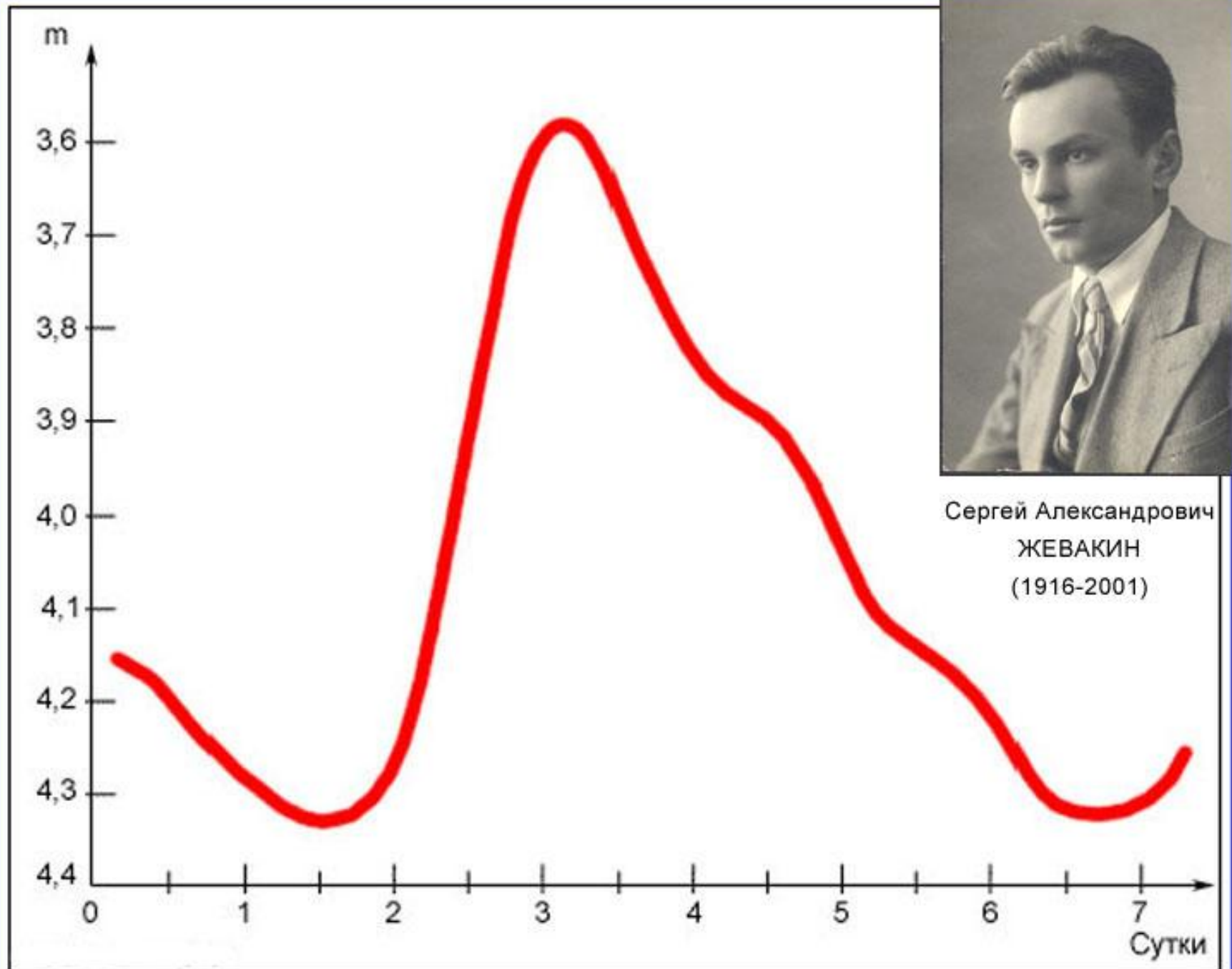






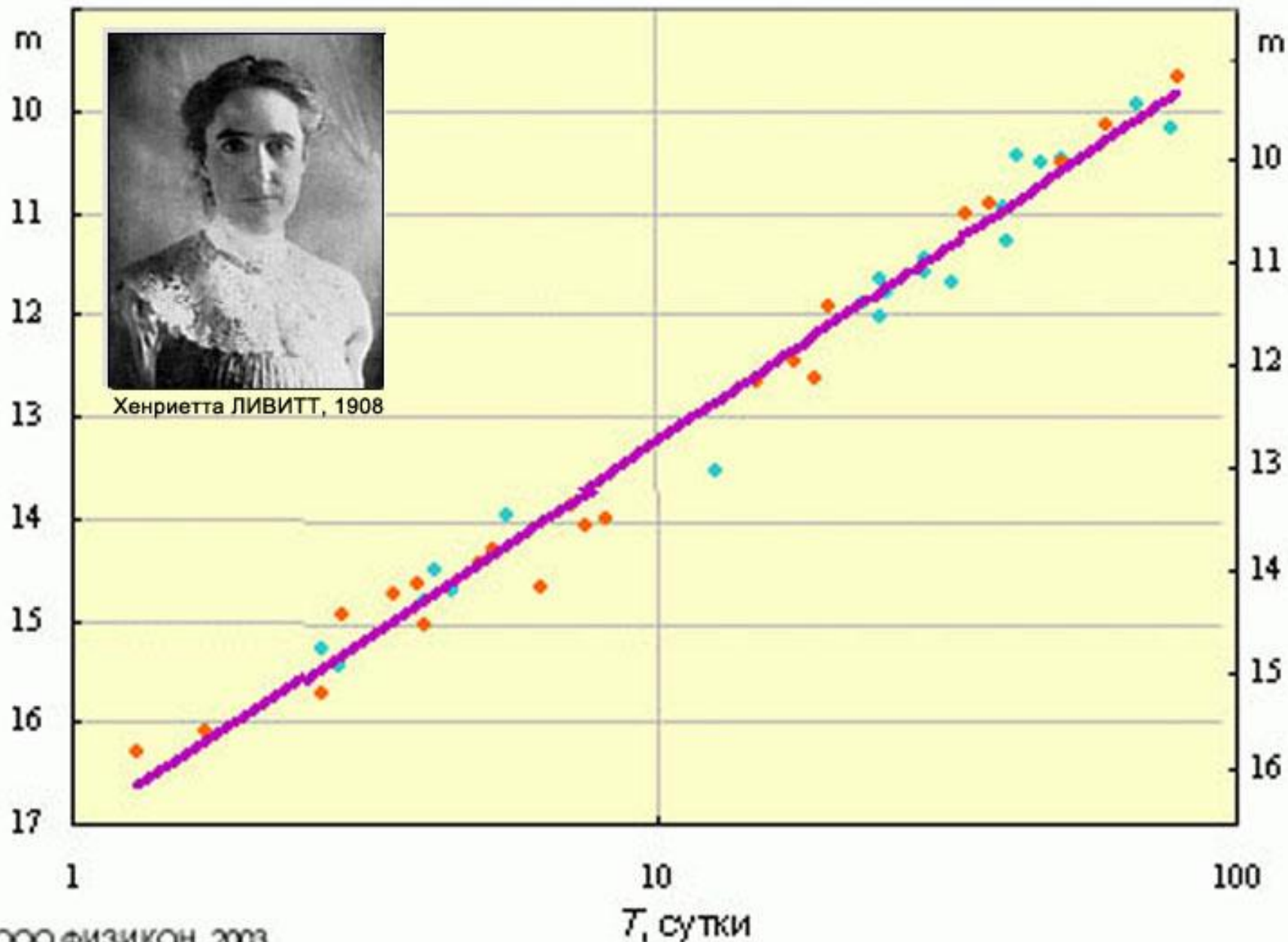


Сергей Александрович
ЖЕВАКИН
(1916-2001)



• MMO

• БМО



Поздние стадии эволюции одиночных и двойных звезд

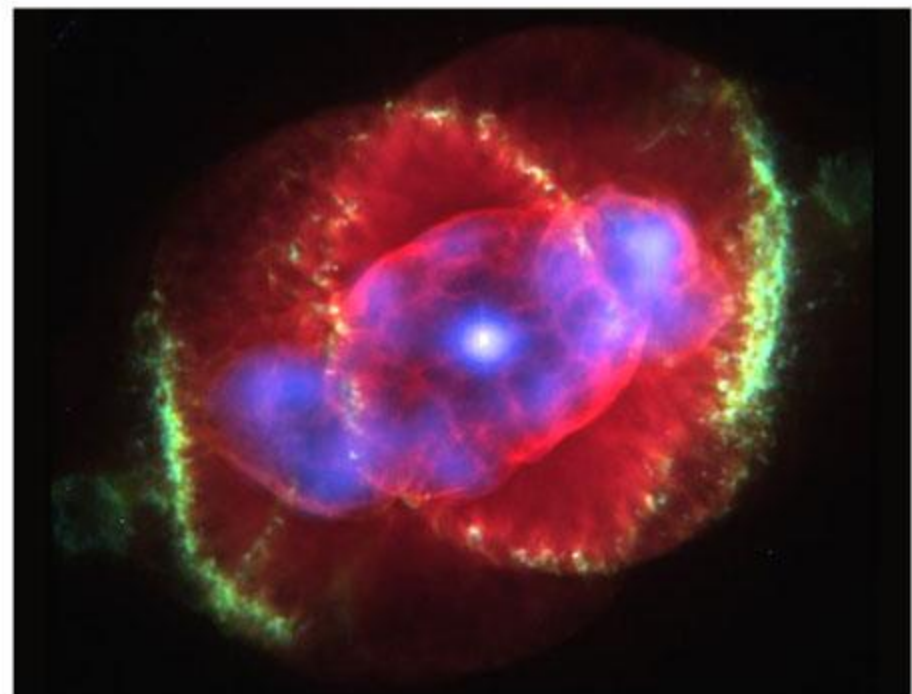
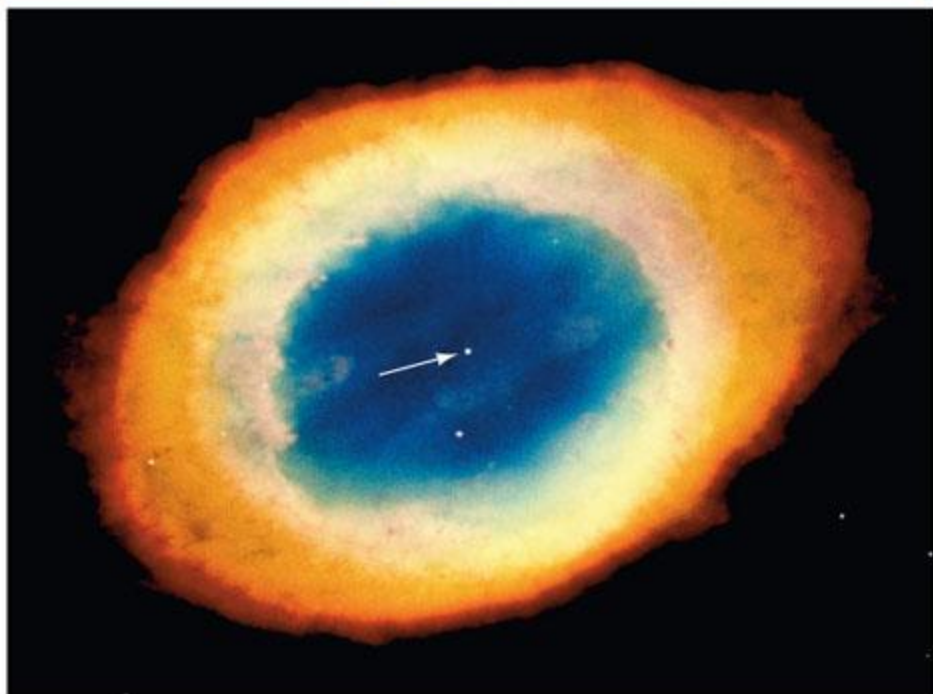
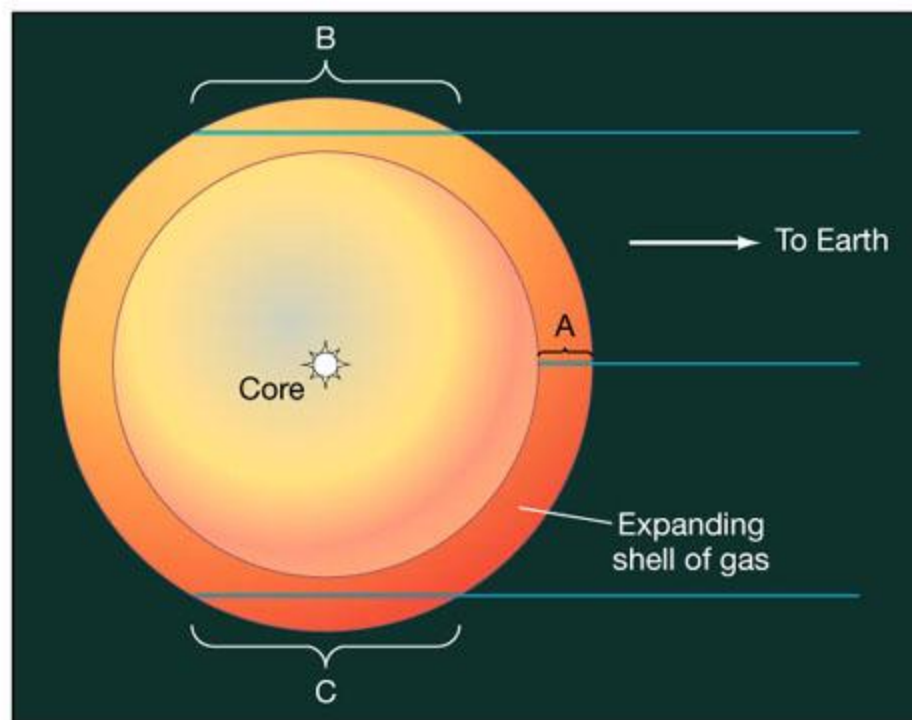
**белые карлики
нейтронные звезды
черные дыры**











Звезда
Вольф 457



Белый карлик
Лейтена



Белые карлики

Масса как у Солнца,
размер как у Земли

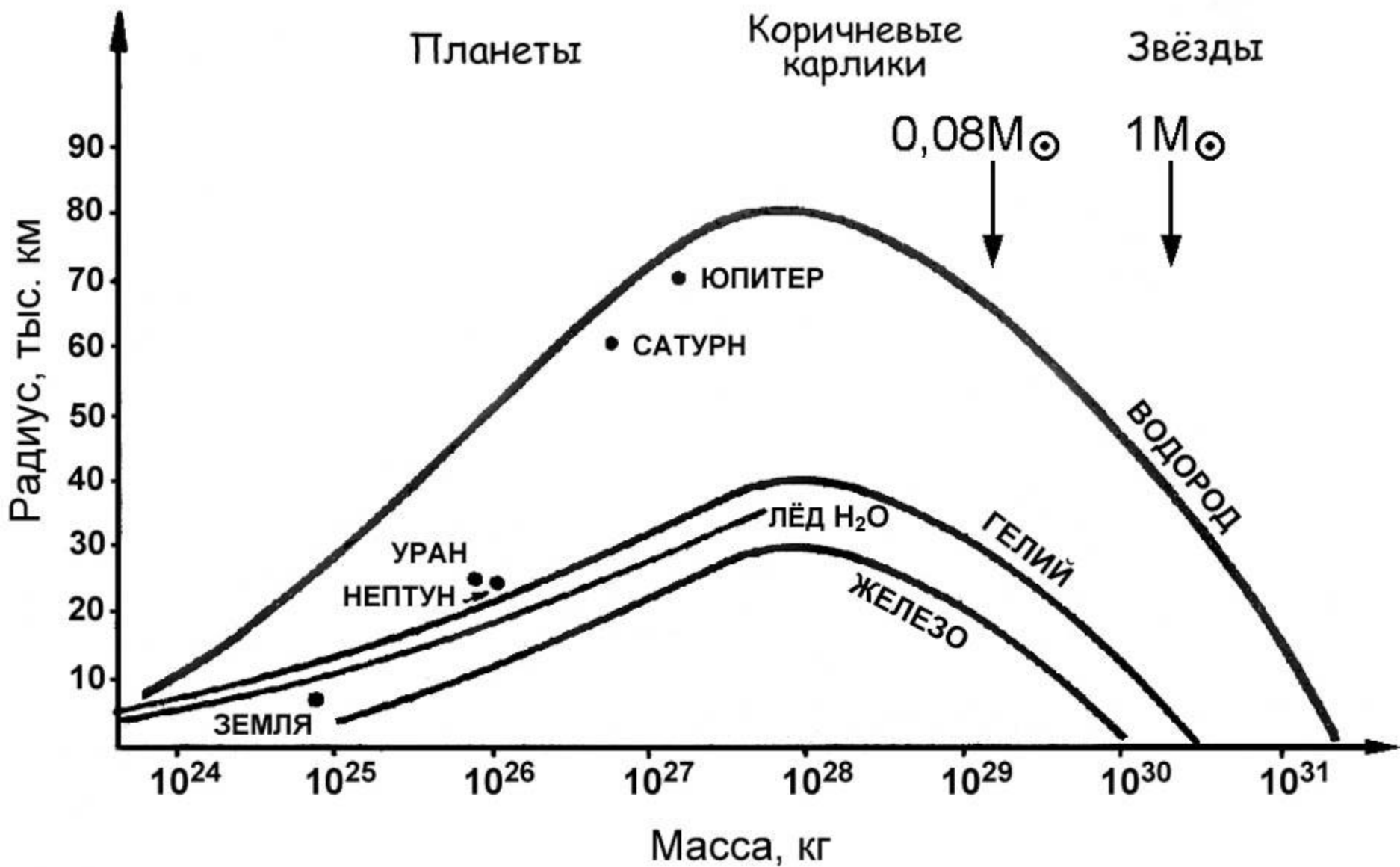
Следовательно,
средняя плотность
в миллион раз
(100 x 100 x 100)
больше, чем у Солнца,
т. е. 1,5 млн г/см³

Земля

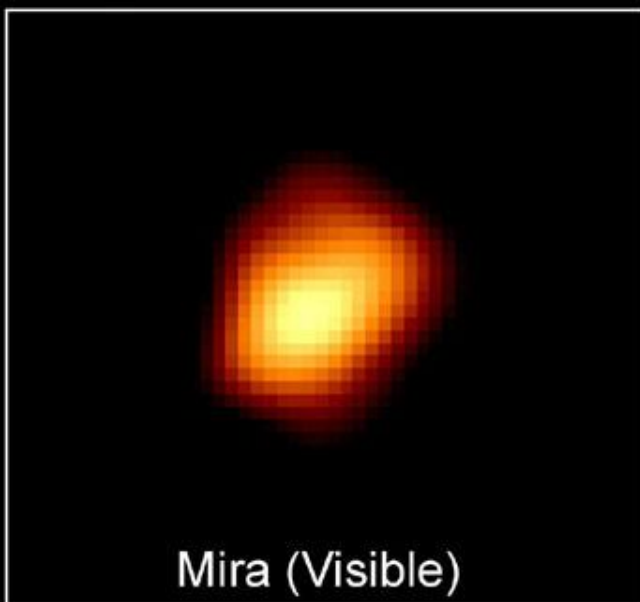




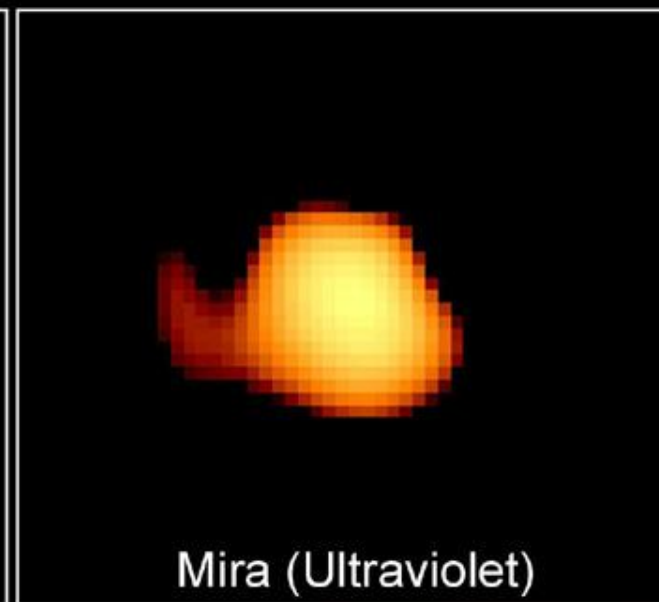
Субраманьян
Чандрасекар
(1910-1995)



Размер холодных равновесных конфигураций различной массы и химического состава



Mira (Visible)



Mira (Ultraviolet)

Mira Omicron Ceti

Hubble Space
Telescope

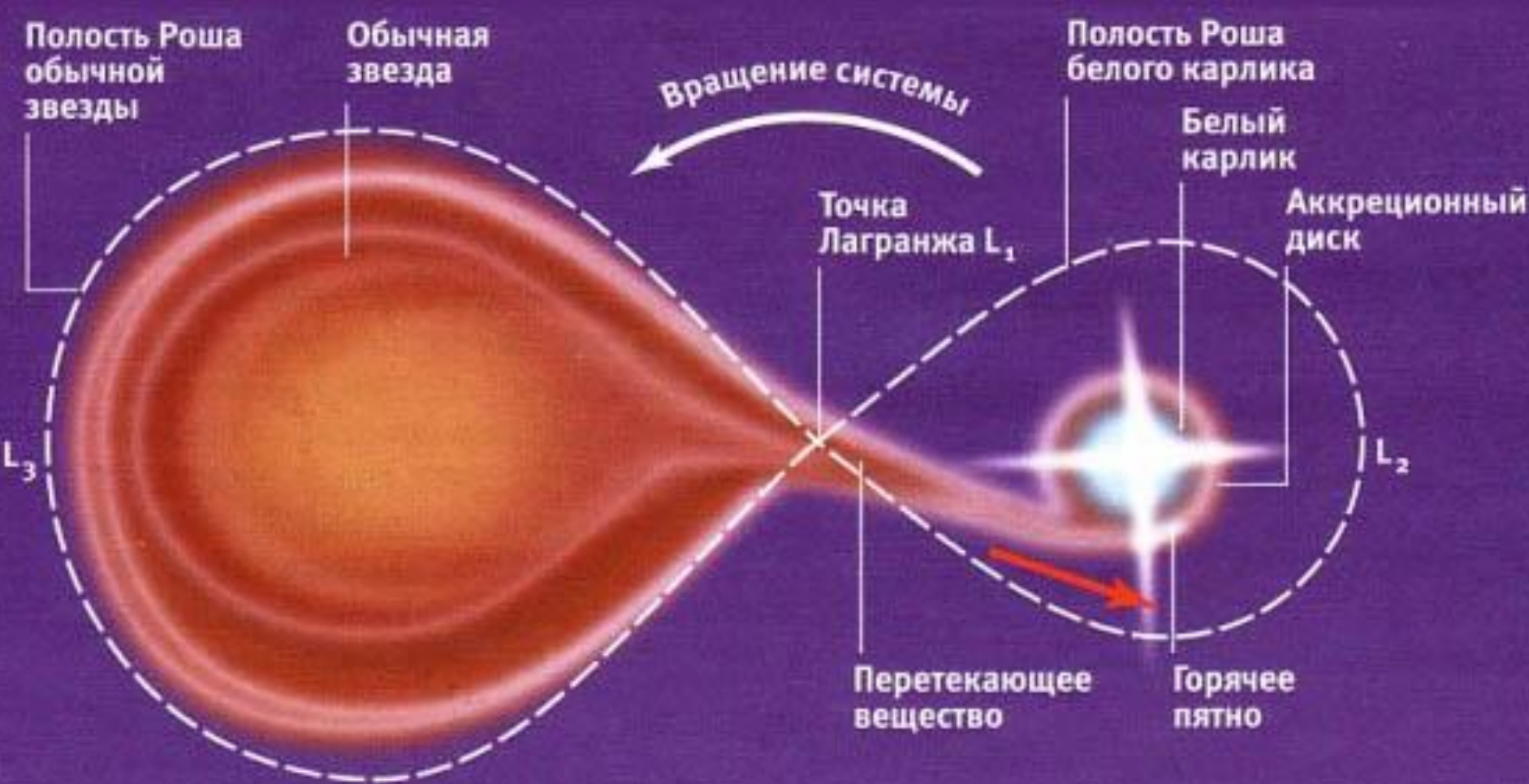


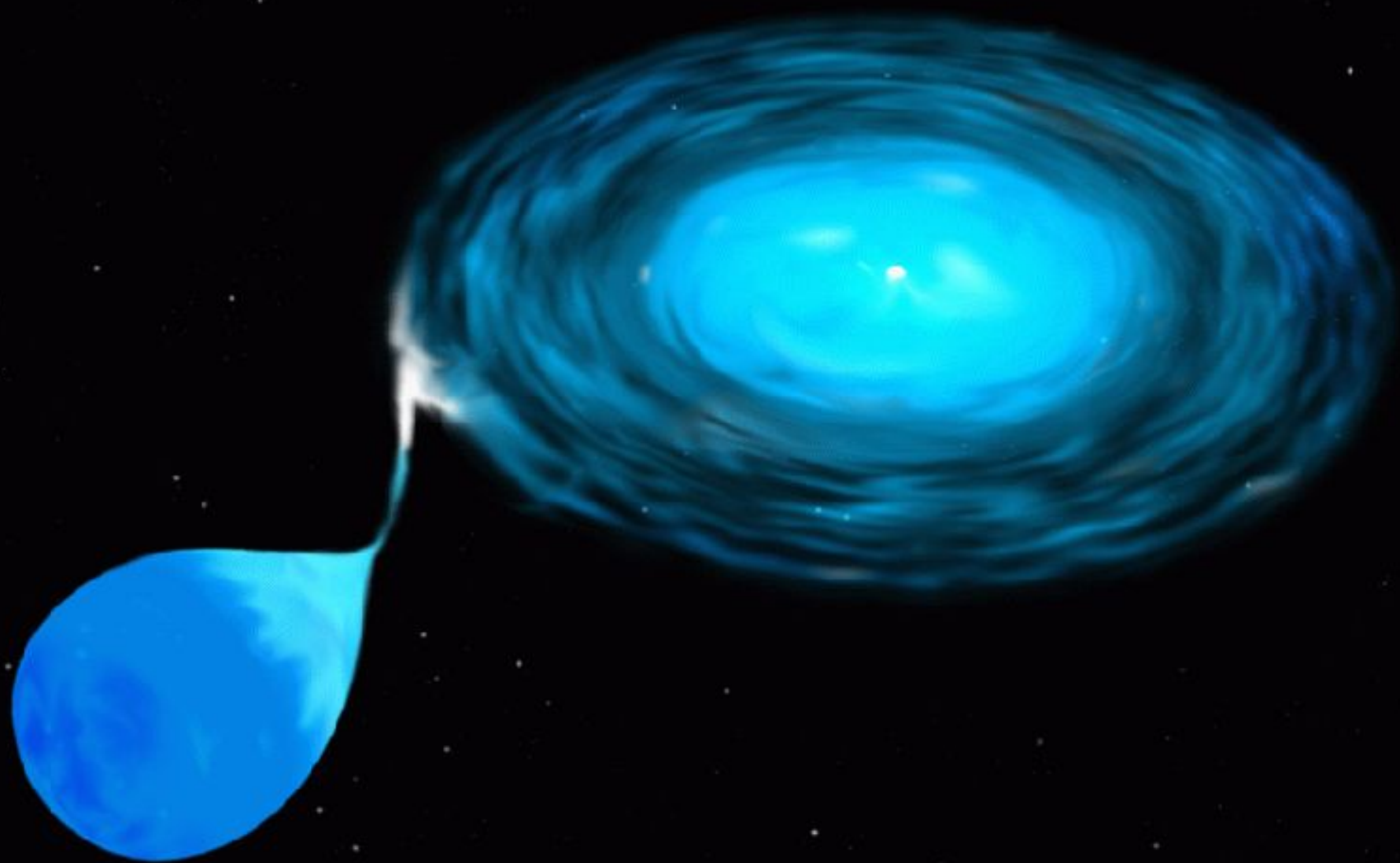
Рентгеновский снимок

Chandra

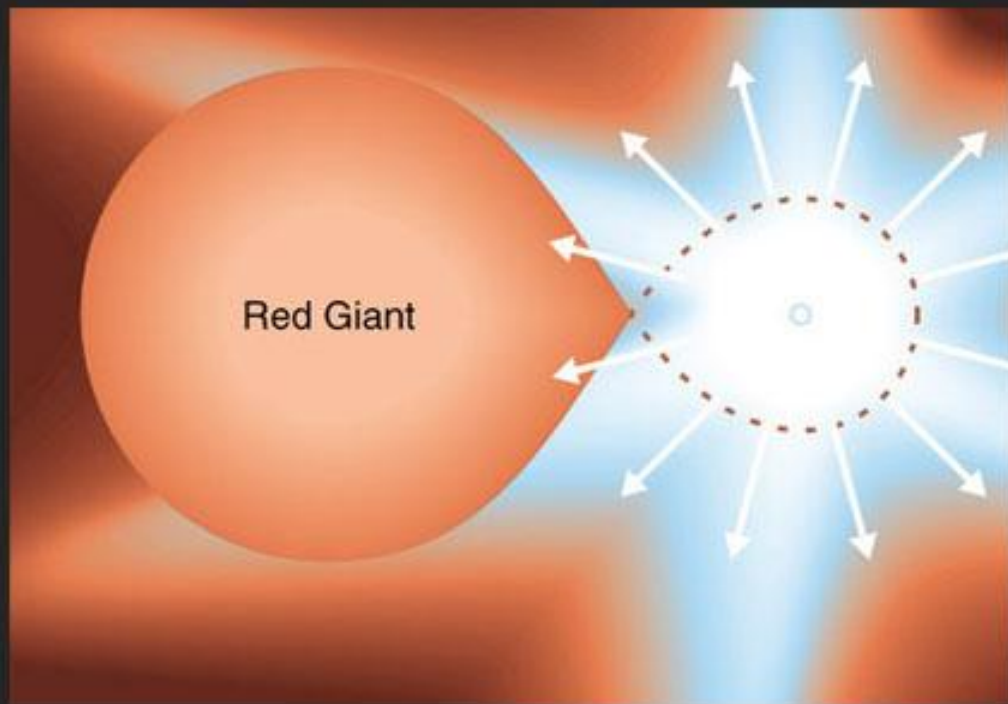
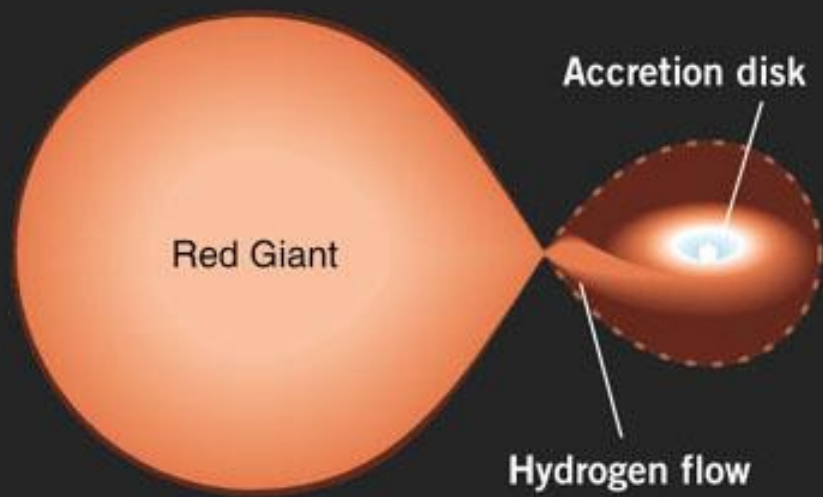
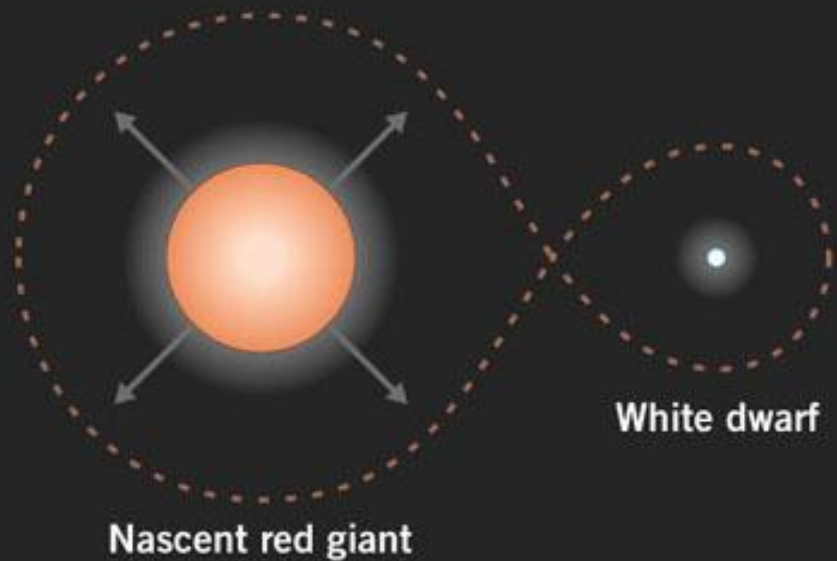


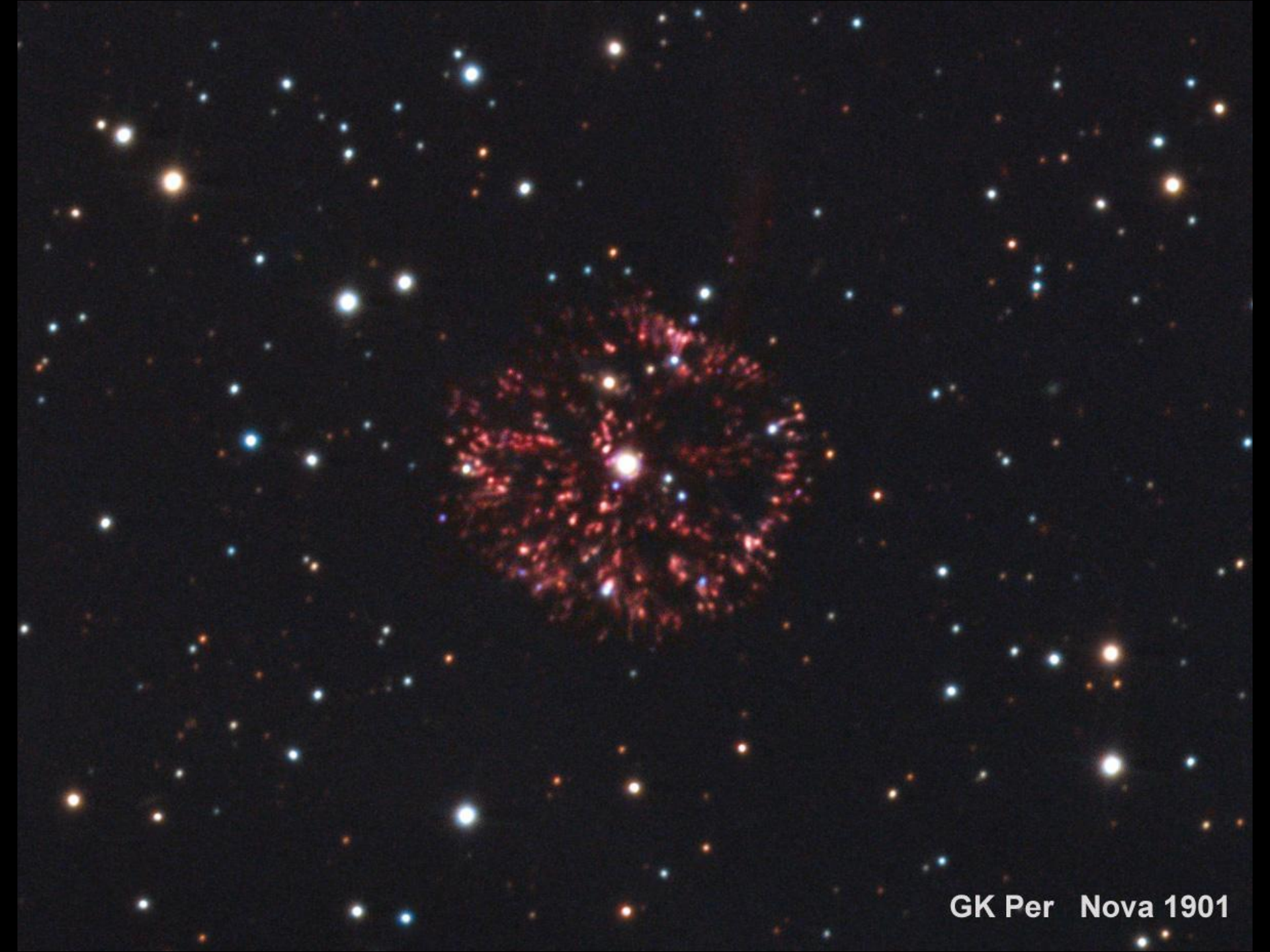
Рисунок художника



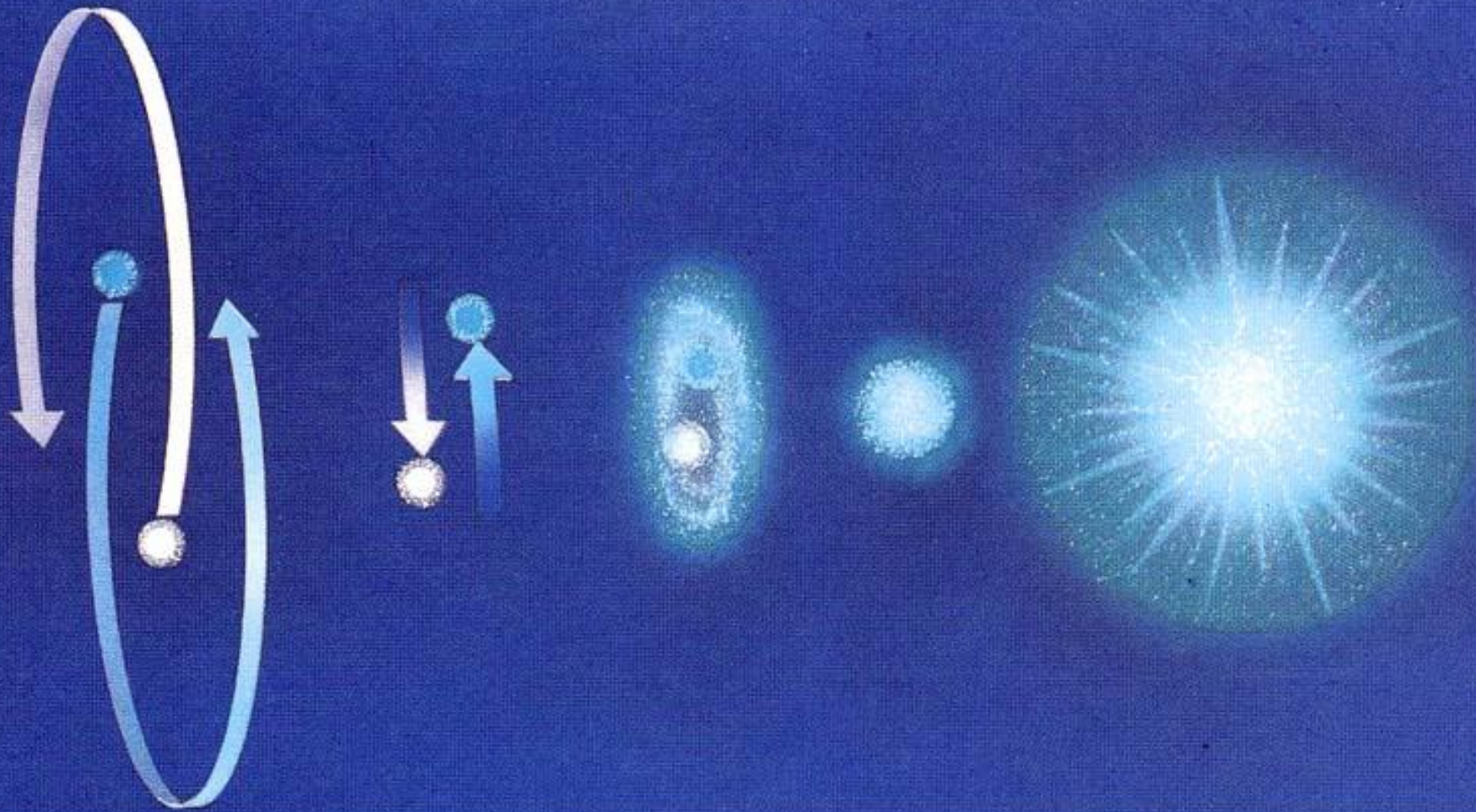


Nova



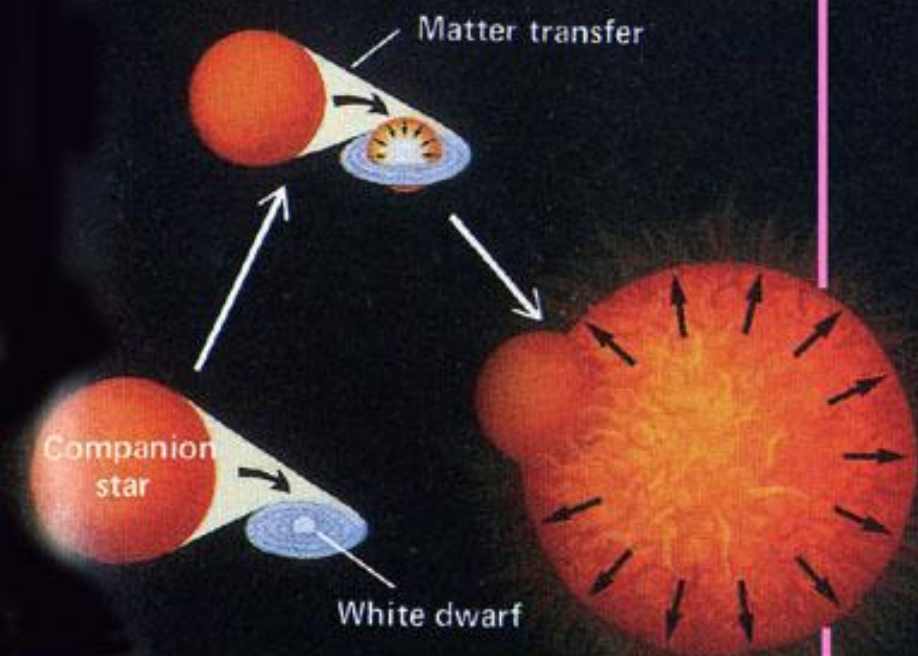


GK Per Nova 1901



Слияние белых карликов

Type I Supernova



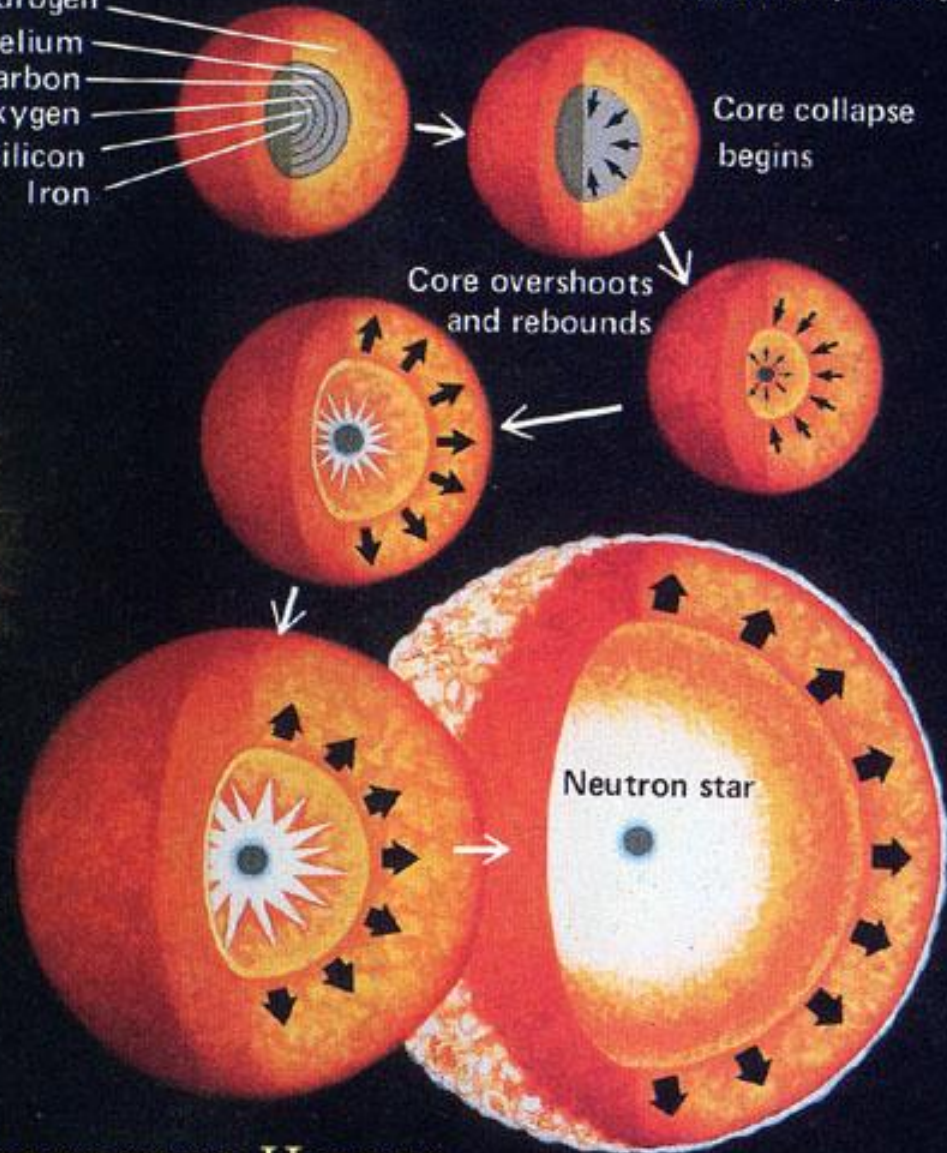
Сверхновая типа Ia

В спектре нет линий водорода и гелия, но есть Ca, Mg, Fe, Si.
Кривые блеска подобны и в максимуме одинаковы (-20^m)

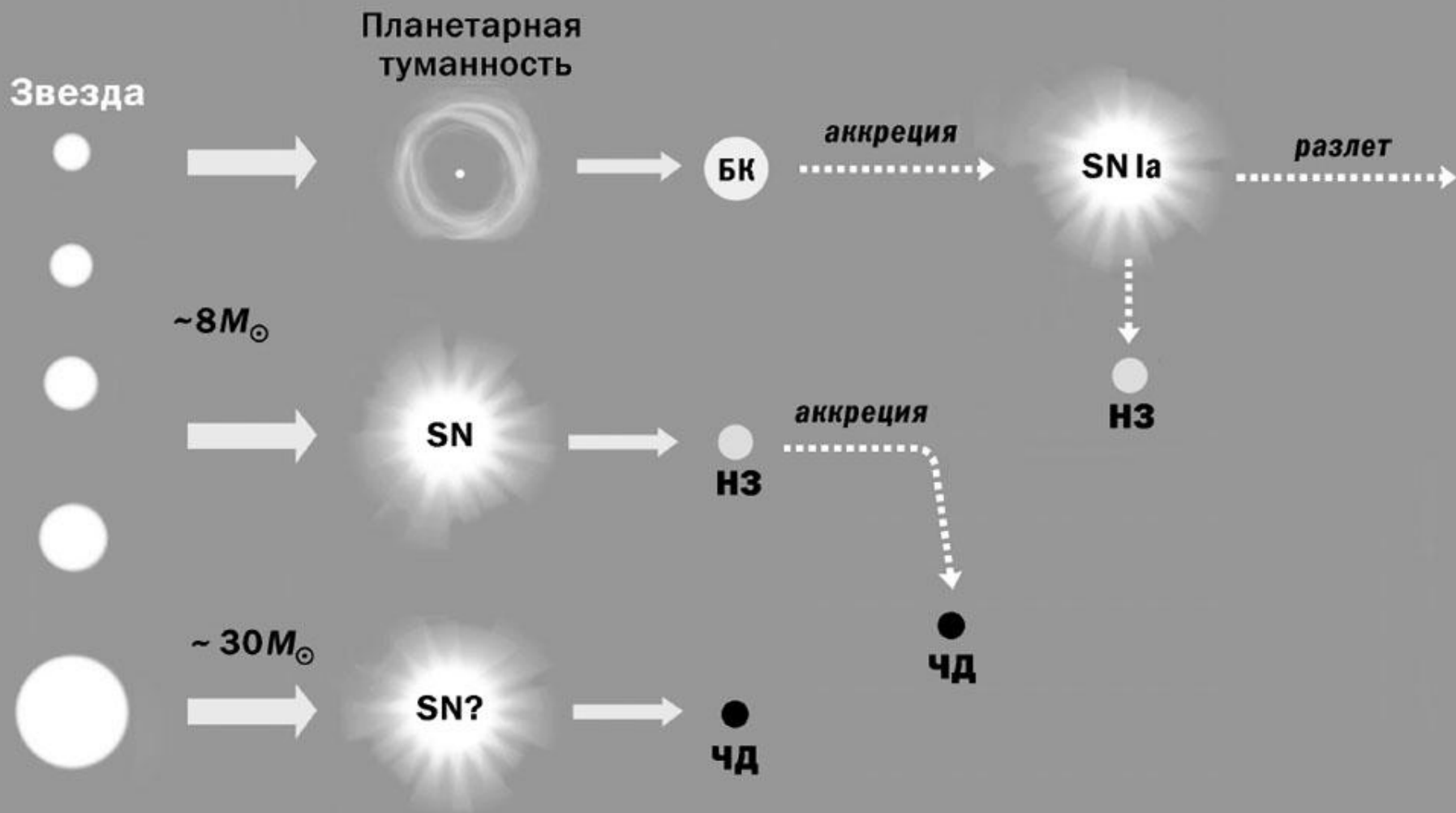
Dominant elements

Hydrogen
Helium
Carbon
Oxygen
Silicon
Iron

Type II Supernova



Сверхновая II типа

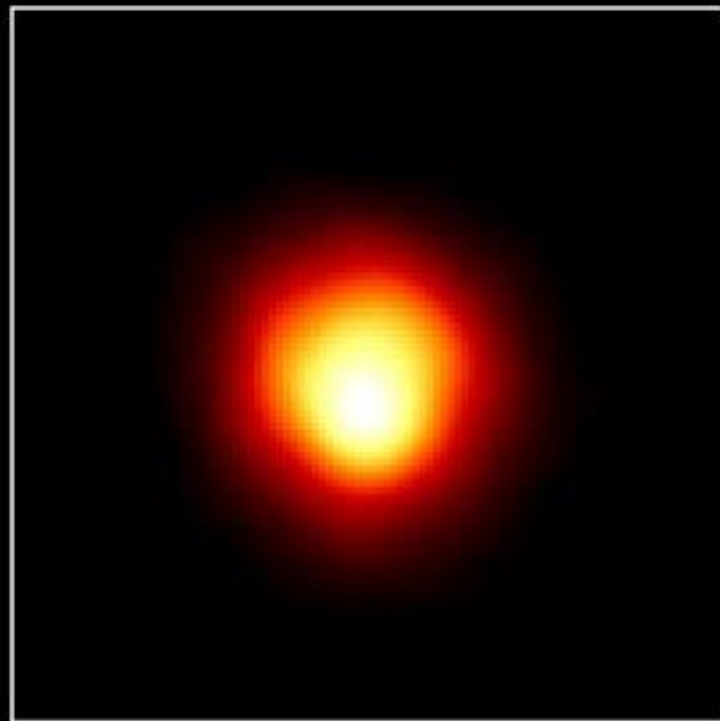


Конечные стадии эволюции звёзд разной массы



M 51 SN2005CS 7 июля 2005 г.

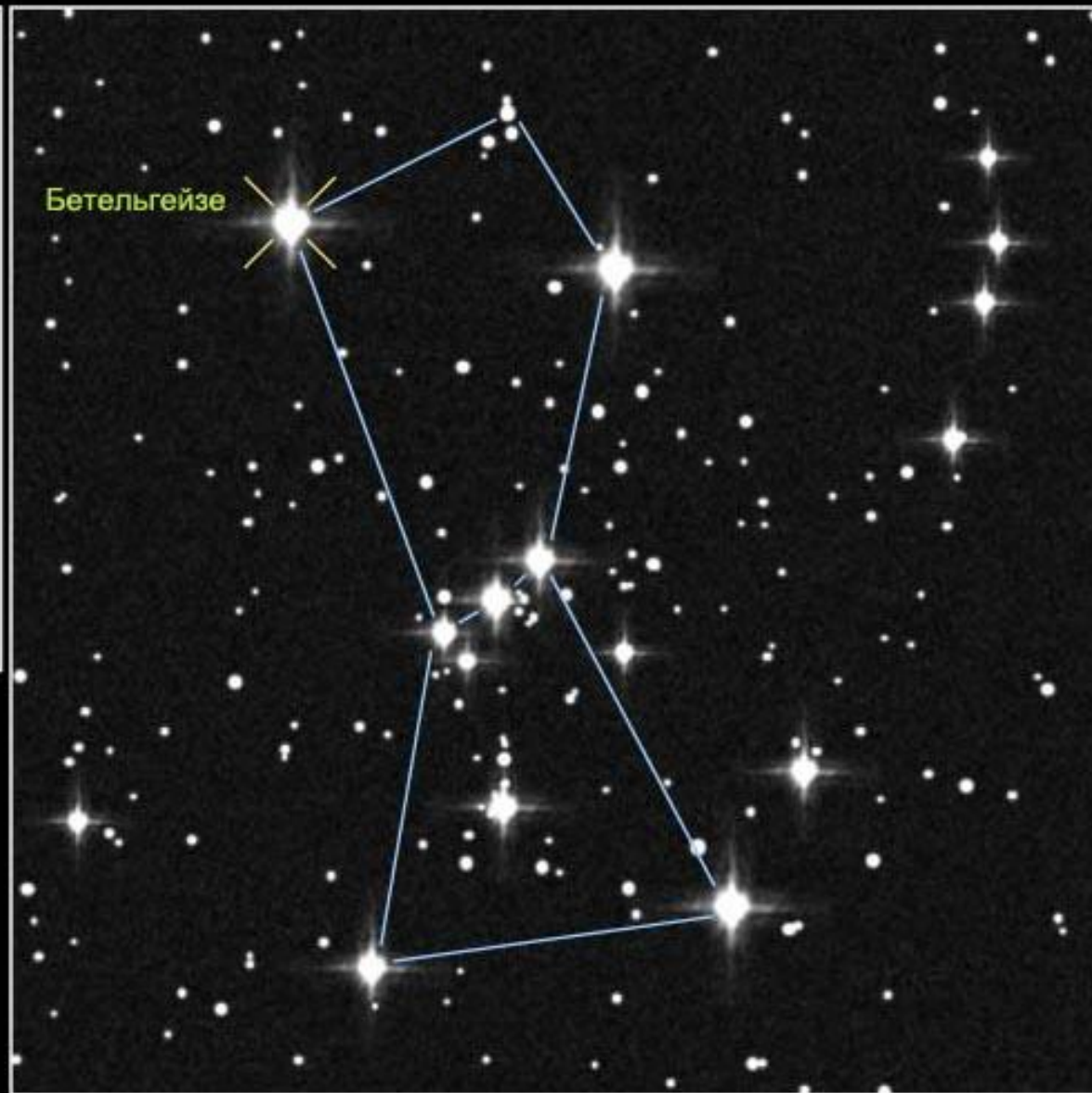
Звезда Бетельгейзе. Фото Космического телескопа "Хаббл"



Размер звезды Бетельгейзе

Размер орбиты Земли

Размер орбиты Юпитера



Созвездие Орион

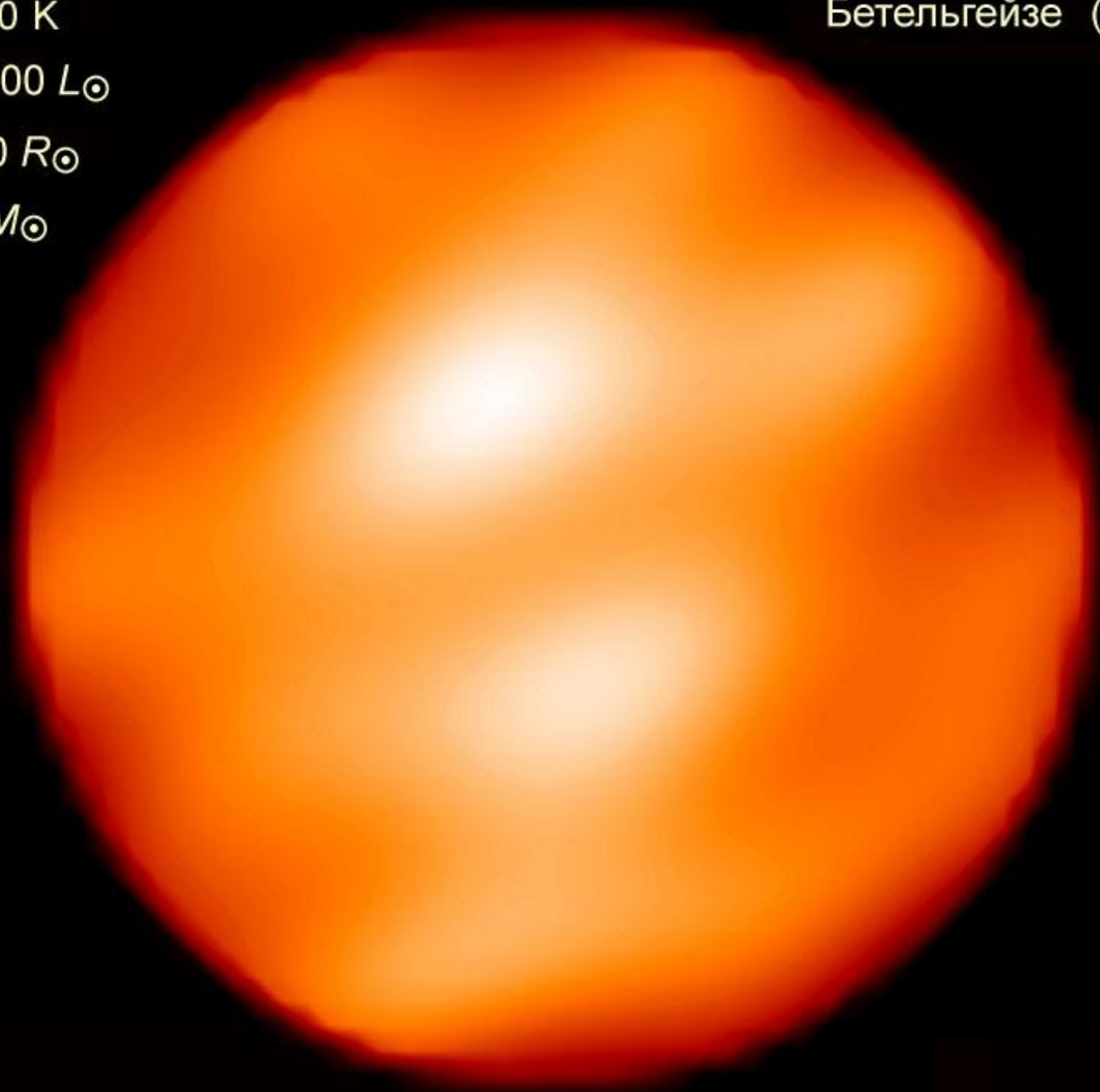
$T = 3600 \text{ K}$

$L = 80\,000 L_{\odot}$

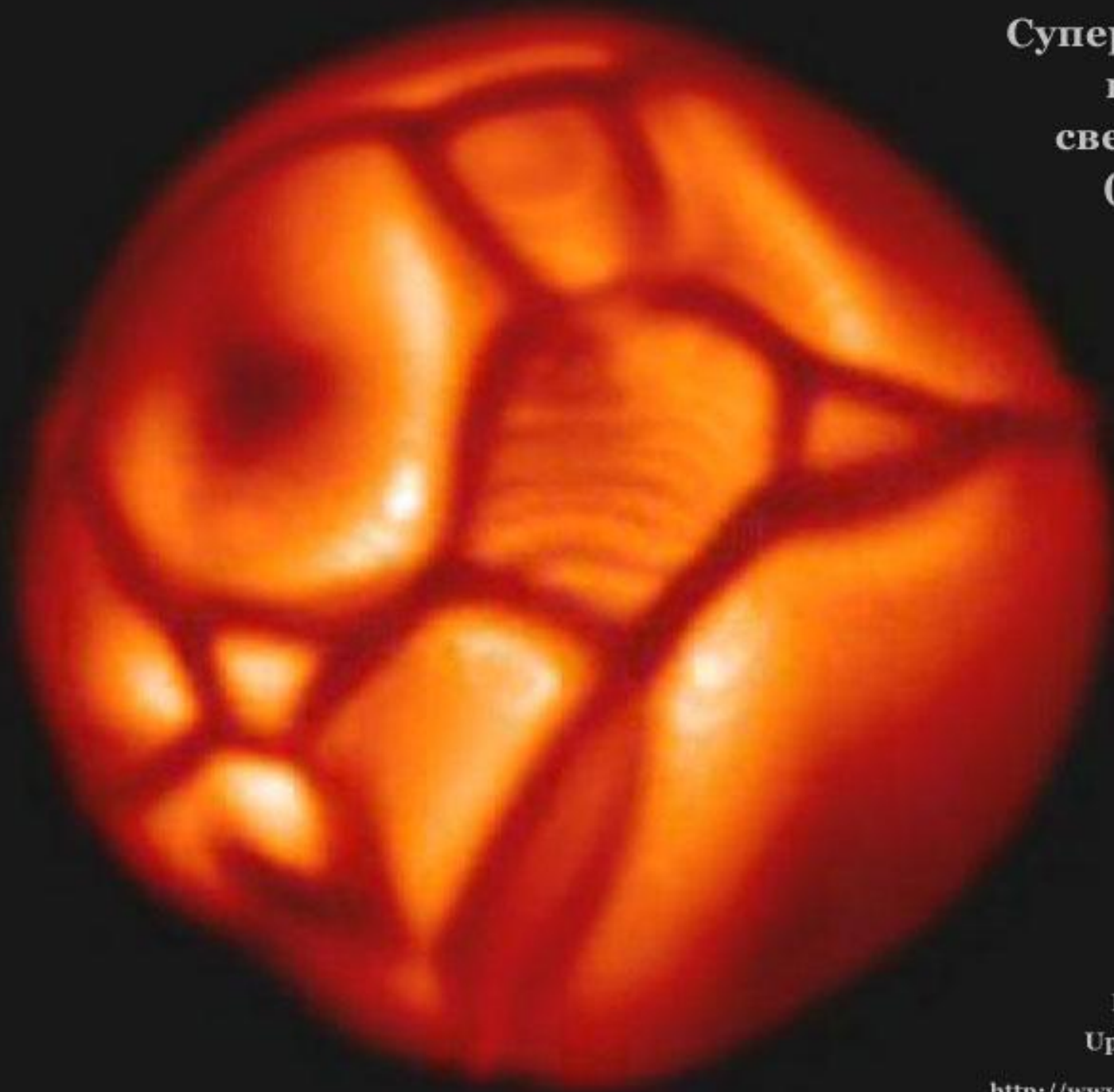
$R = 1000 R_{\odot}$

$M = 15 M_{\odot}$

Бетельгейзе (α Orionis)



**Супергрануляция
красного
сверхгиганта
(модель)**

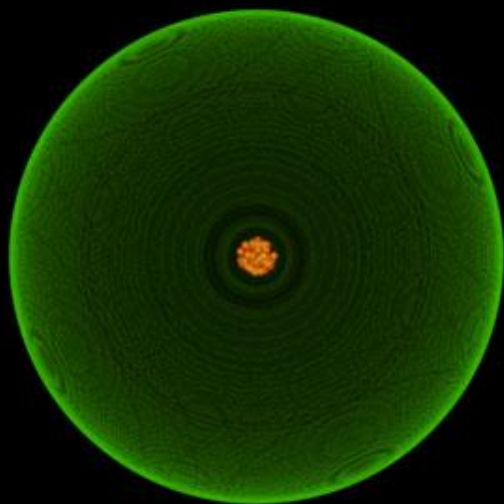


**Bernd Freytag
Uppsala University**

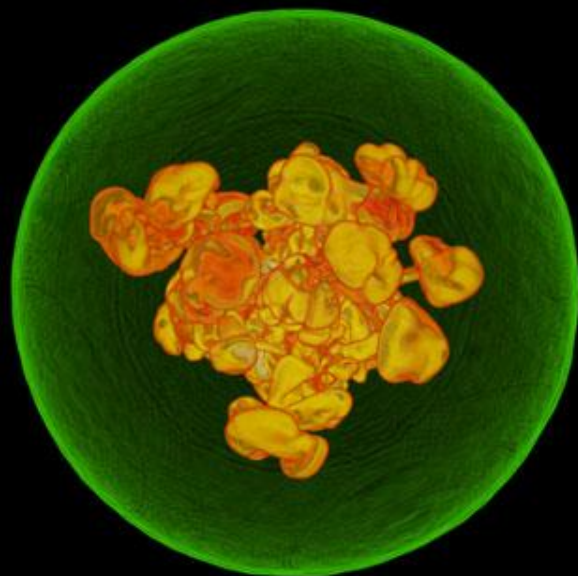
<http://www.astro.uu.se/~bf/movie/>



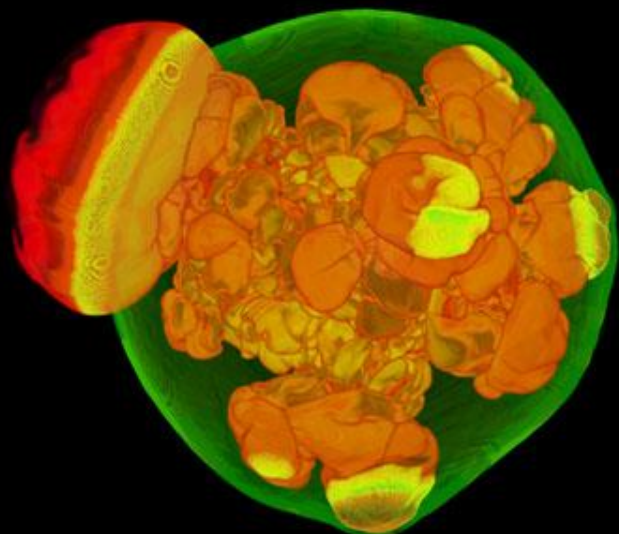
Time: 0.0 seconds



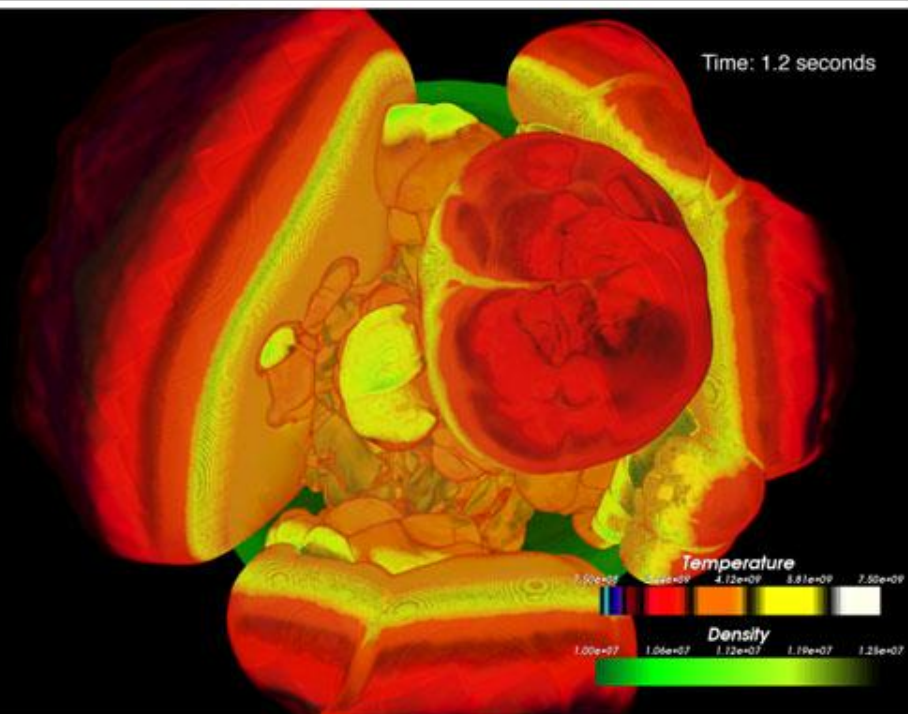
Time: 0.85 seconds



Time: 1.1 seconds



Time: 1.2 seconds



White Dwarf Deflagration

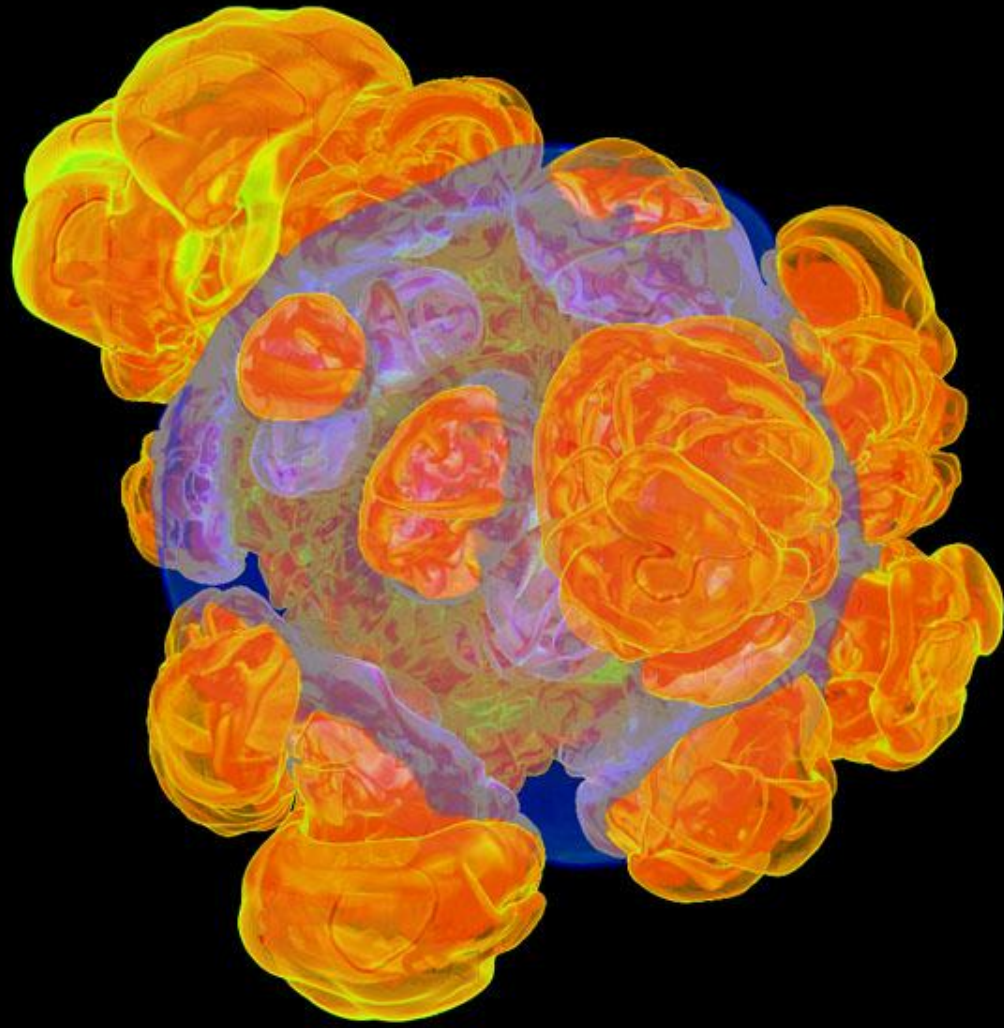
Resolution: 6 km

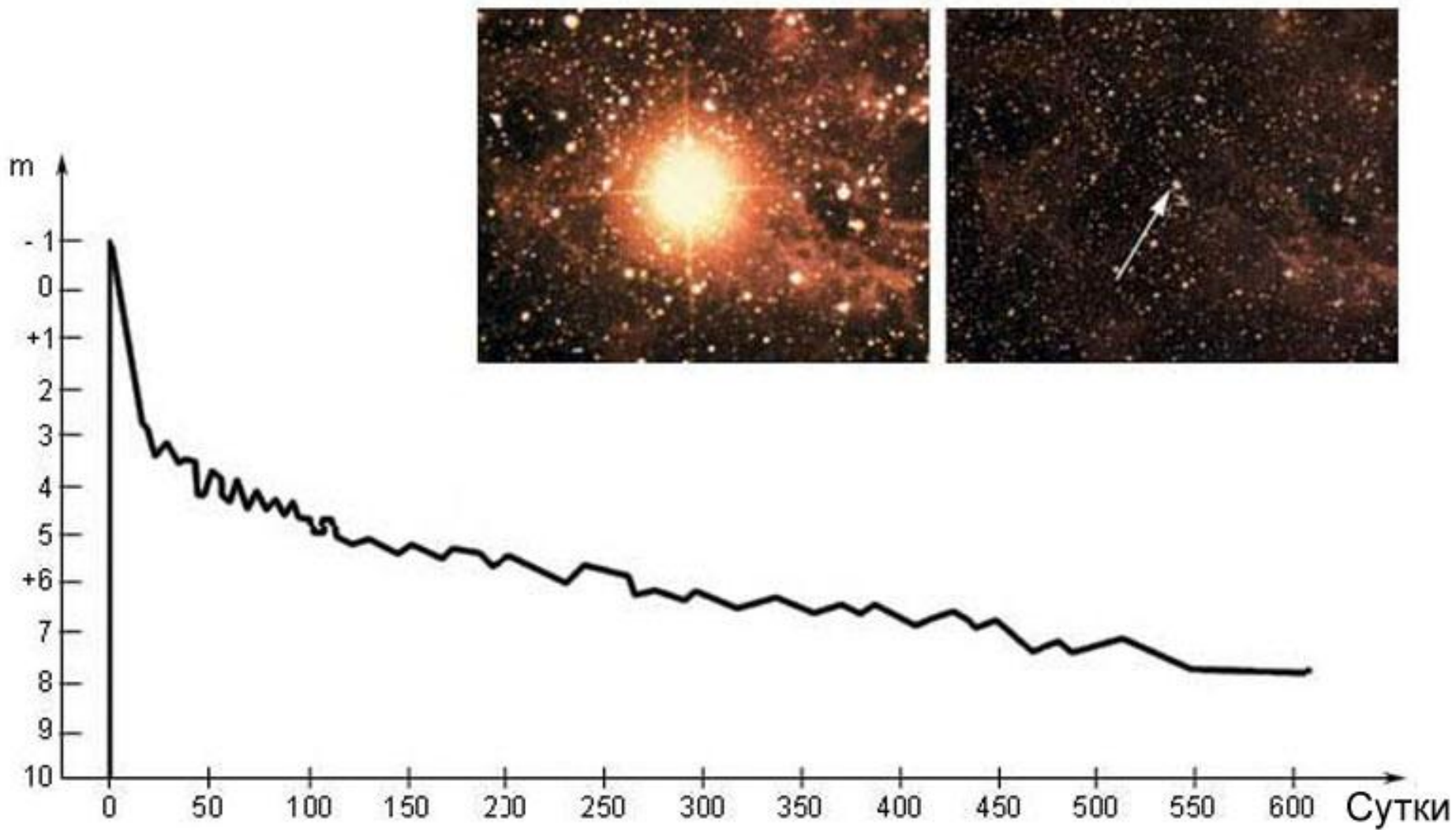
Initial Bubble Radius: 18 km

Ignition Offset: 42 km

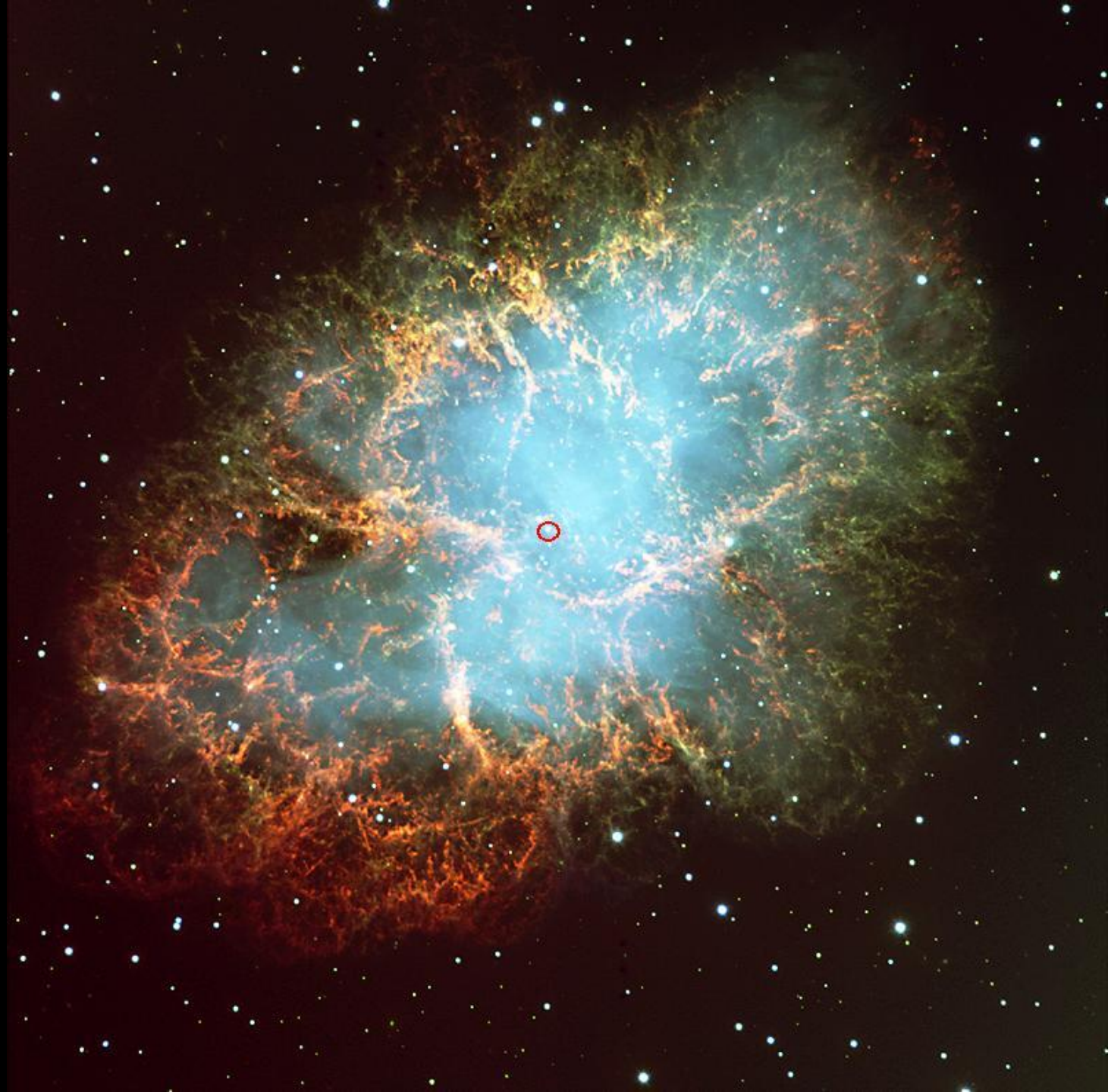
Variable 1: Density [$1.5e+07$ - $2.0e+07$]

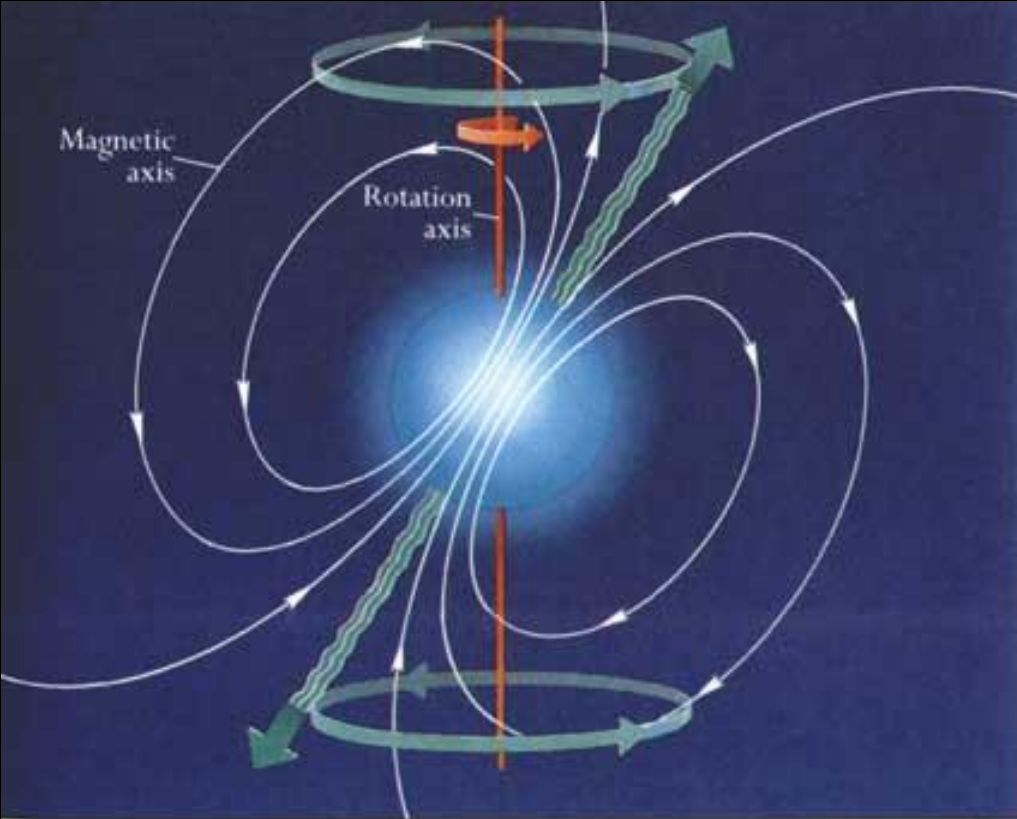
Variable 2: Temperature: [$1.5e+09$ - $4.0e+09$]



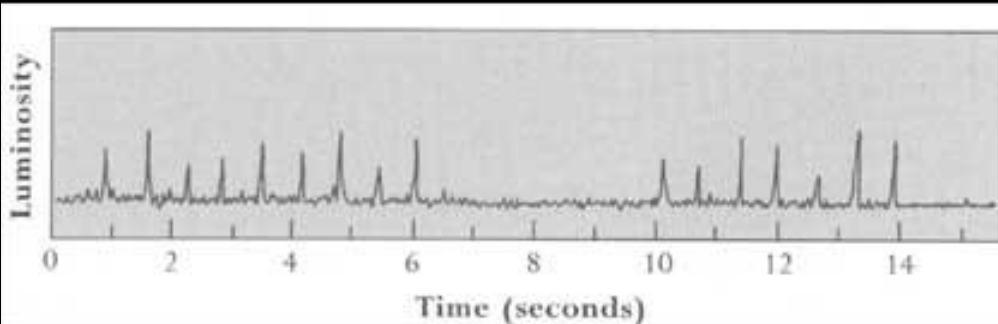


Кривая блеска сверхновой

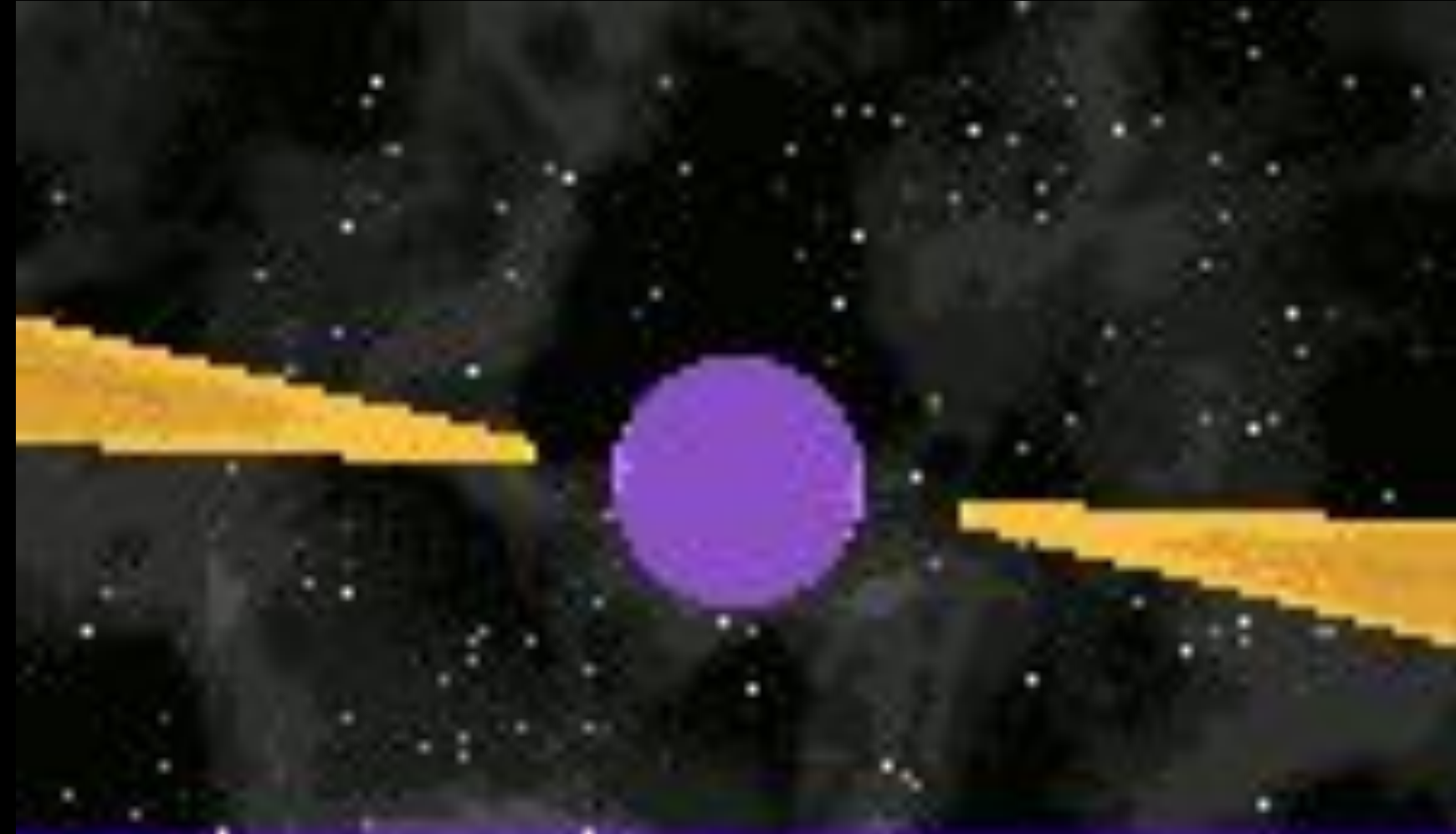




Радиопульсар



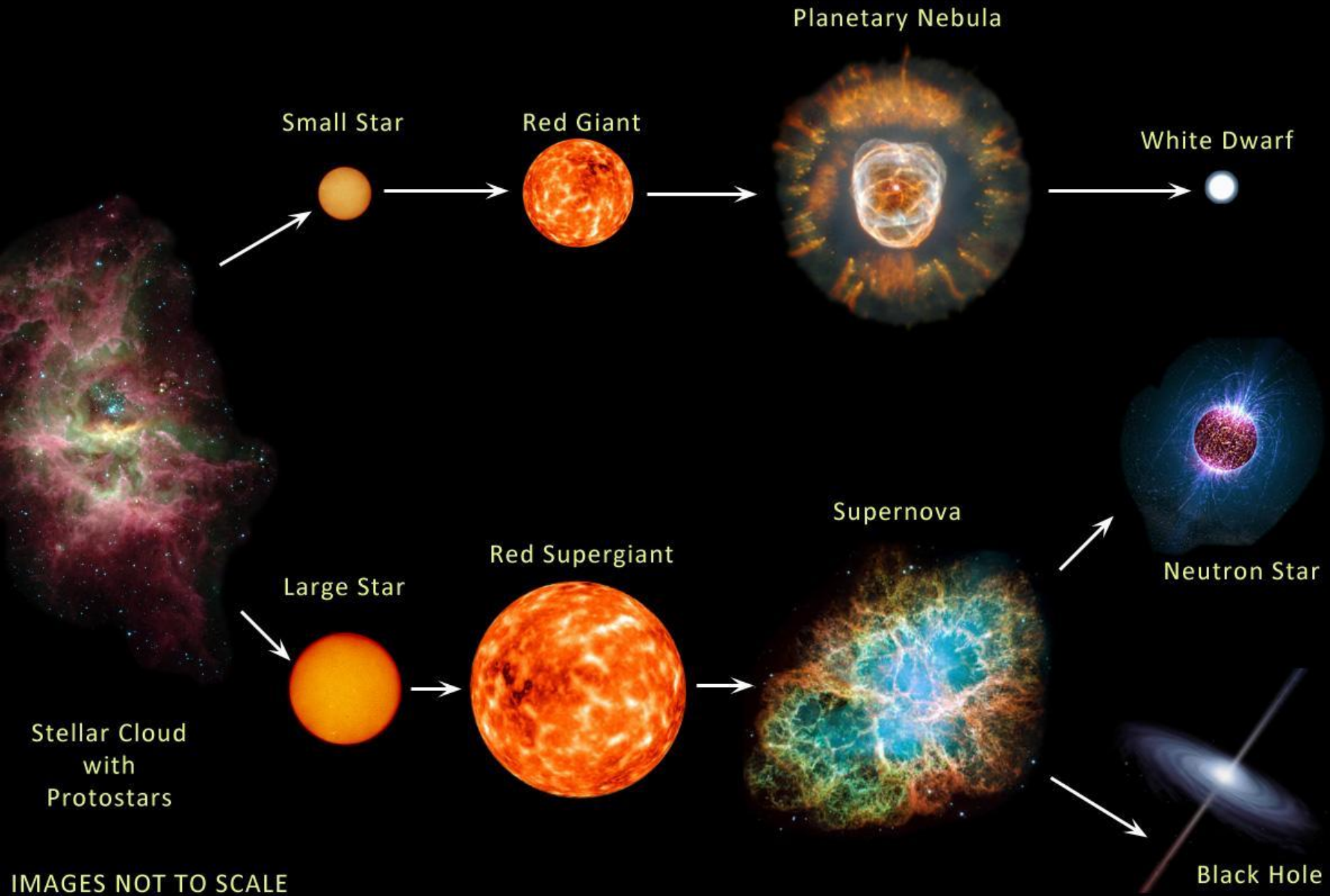
Jocelyn Bell Burnell, who discovered the first neutron star in 1967. (Photograph courtesy of S. Jocelyn Bell Burnell.)



(a) H. Kromer

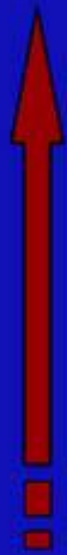


EVOLUTION OF STARS



IMAGES NOT TO SCALE

Коричневые карлики



0.08

Белые карлики, He, $\leq 10\%$



0.5

Белые карлики, C+O, $\leq 90\%$



8

Нейтронные звезды, $> 90\%$



40

Черные дыры, $> 90\%$



100

Полный разлет



<150

M / M_{\odot}