

# МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА»

(ВЕСНА 2022. ВШЭ)

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

# НЕМНОГО О СЕБЕ

- Антон Владимирович Бирюков
- Интересы: астрофизика нейтронных звёзд, приборы и методы астрономии высокого временного разрешения (в том числе в прикладных задачах), астрообразование.
- 2006 г. – Физический факультет МГУ (астроном)
- 2011 г. – к.ф.-м.н. («Циклическая и монотонная компоненты в эволюции периодов одиночных радиопульсаров», рук. д.ф.-м.н. Г.М. Бескин, САО РАН)
- 2011 г. + – Лаборатория космических проектов ГАИШ МГУ, снс.
- 2014 г. + – Лаборатория исследования быстропеременных объектов во Вселенной К(П)ФУ

# НЕМНОГО О СЕБЕ

- Антон Владимирович Бирюков
- Интересы: астрофизика нейтронных звёзд, приборы и методы астрономии высокого временного разрешения (в том числе в прикладных задачах), астрообразование.
- Подробнее о работе (публикации и пр.): <https://istina.msu.ru/profile/anton.biryukov/>
-  [ant.biryukov@gmail.com](mailto:ant.biryukov@gmail.com)
-   +7 910 424 2359
-  ant.biryukov

# КУРС «АСТРОФИЗИКА» (3-Й МОДУЛЬ)

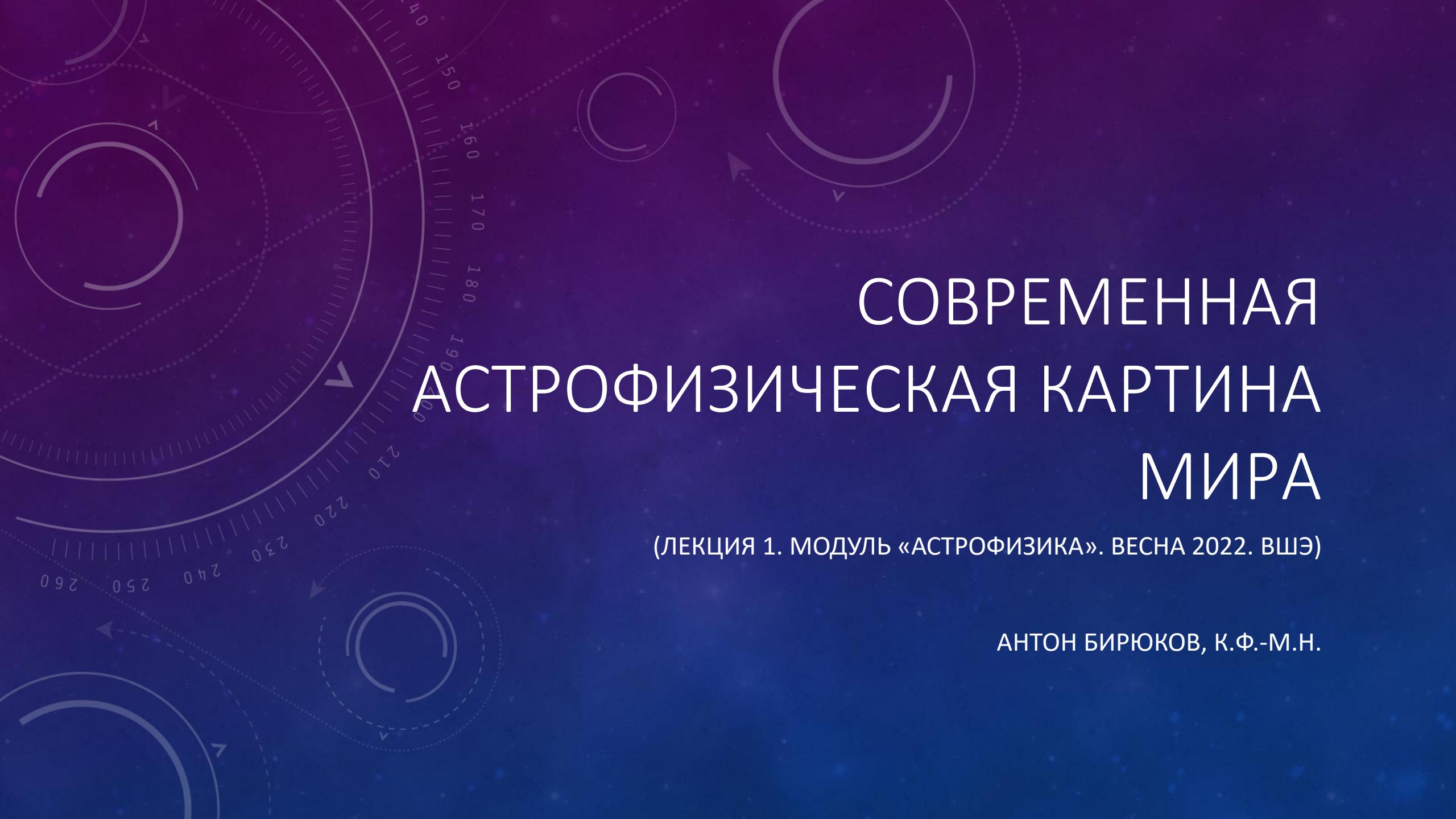
- Занятия по субботам, 9:30-12:30
- 10 занятий:
  1. Астрофизика: обзор
  2. Классическая (ньютоновская) теория гравитации
  3. Теория излучения 1 (описание и распространение)
  4. Теория излучения 2 (тепловое излучение)
  5. Звёзды: строение и эволюция
  6. Компактные объекты
  7. Астростатистика
  8. Гравитационные волны (Сергей Попов?)
  9. Сверхновые
  10. Галактика и внегалактическая астрономия

# ЛИТЕРАТУРА

- Основная:
  - А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (2011)  
[https://mipt.ru/upload/medialibrary/d26/general\\_astrophysics.pdf](https://mipt.ru/upload/medialibrary/d26/general_astrophysics.pdf)
  - К.А. Постнов «Лекции по общей астрофизике для физиков»  
<http://www.astronet.ru/db/msg/1176797>
  - Я.Б. Зельдович, С.И. Блинников, Н.И. Шакура «Физические основы строения и эволюции звёзд»  
<http://www.astronet.ru/db/msg/1169513>
- Дополнительная:
  - С.А. Ламзин «Физика и эволюция звёзд» (конспект лекций, github)
  - К.В. Холшевников, В.Б. Титов «Задача двух тел»  
<http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/TwoBody.pdf>
  - Rybicky, Lightman “Radiative processes in Astrophysics” (github)
- Также полезно просмотреть материалы к лекциям С. Б. Попова для МГУ и ВШЭ  
<http://xray.sai.msu.ru/~polar/html/presentations.html>

# ОТЧЁТНОСТЬ

- 2 контрольные работы: 19 февраля (по темам 2-6) и 19 марта (по темам 7-10). 3-5 задач, 80 мин.
- Экзамен по окончанию модуля: 2 устных вопроса.
- Оценка за каждую контрольную или экзамен:  $Q=0..10$  баллов.
- Текущая оценка  $Q_{\text{кр}} = 0.5 \cdot Q_{\text{кр1}} + 0.5 \cdot Q_{\text{кр2}}$
- Итоговая оценка:  $Q_{\text{tot}} = 0.5 \cdot Q_{\text{кр}} + 0.5 \cdot Q_{\text{экз}}$
- Способ округления: арифметический.
- Если  $Q_{\text{кр}} = 8, 9$  или  $10$ , то эту оценку можно (по желанию) зачесть как итоговую и не сдавать устный экзамен в конце семестра.

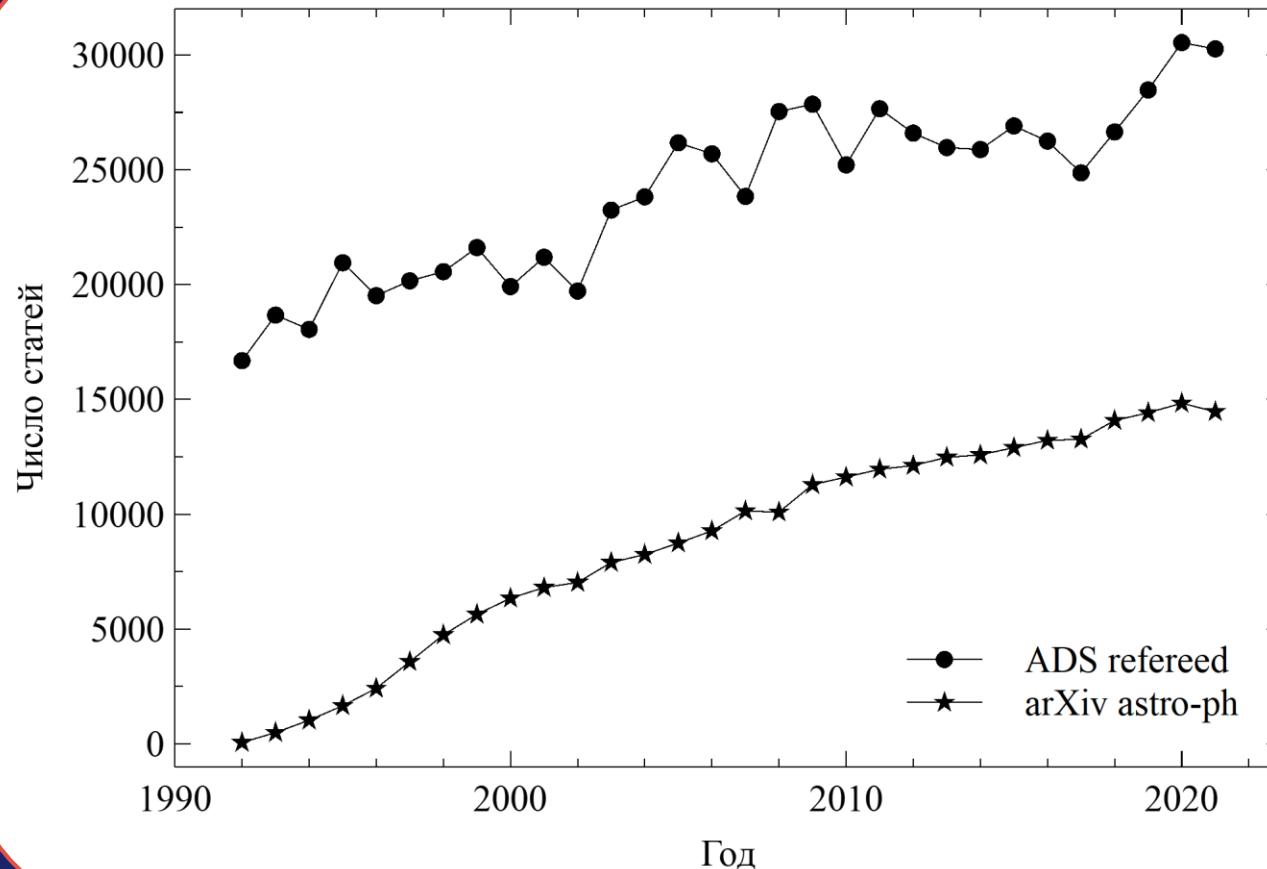


# СОВРЕМЕННАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

(ЛЕКЦИЯ 1. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

# АСТРОФИЗИКА И АСТРОФИЗИКИ



Cornell University

arXiv.org > astro-ph

**Astrophysics**

<https://arxiv.org/list/astro-ph/new>



**astrophysics data system**

<https://ui.adsabs.harvard.edu/>

Только ~60 тыс. из ~340 тыс. реферируемых работ по астрономии/астрофизике, опубликованные за последние 10 лет ни разу не цитировались.

# ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

*масштабный фактор*

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$$

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера (FRW)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + k \left(\frac{c}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho + \frac{\Lambda}{3}c^2$$

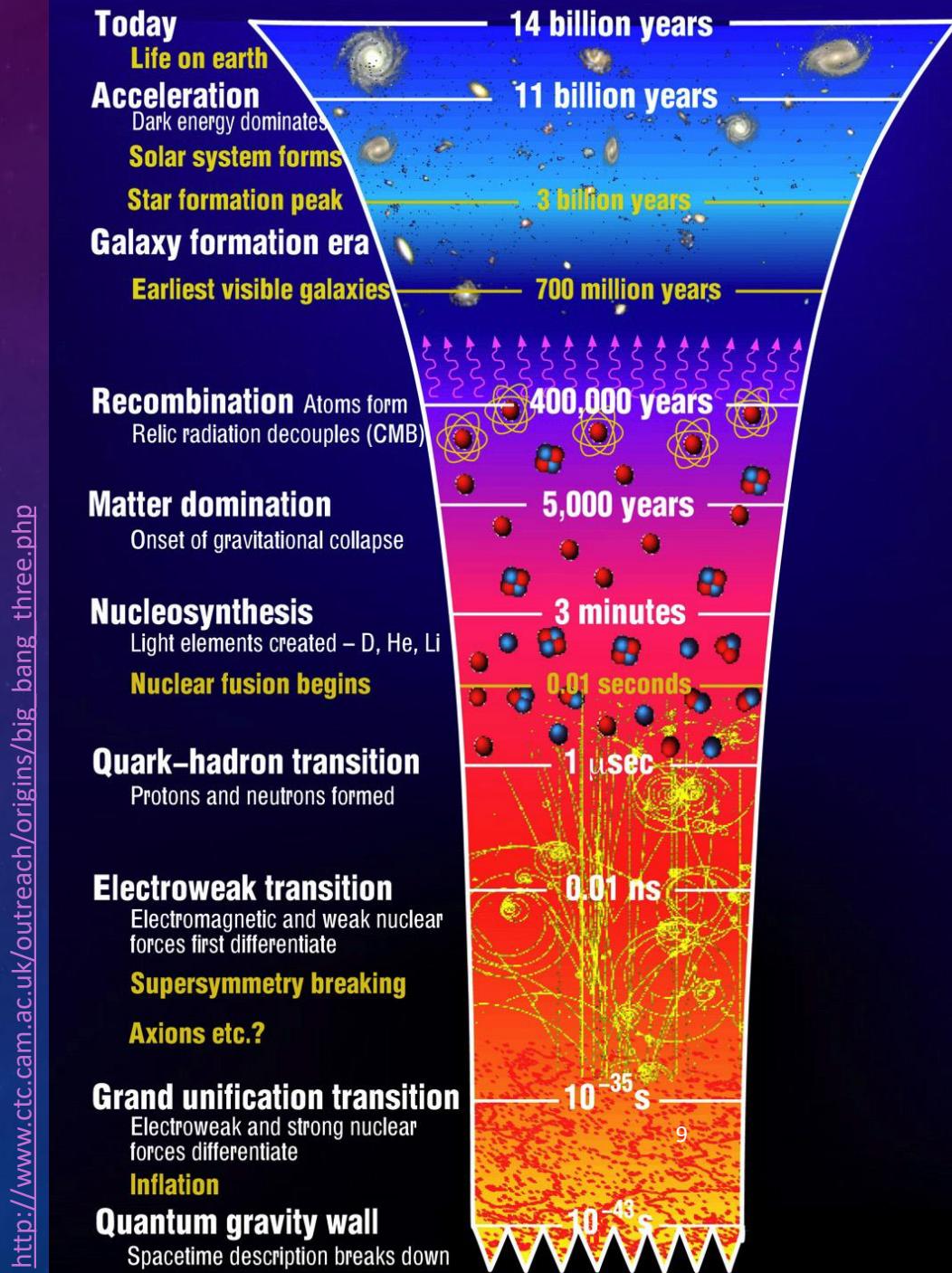
Уравнение Фридмана

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 2 \cdot 10^{-29} h^2 \text{ г см}^{-3}$$

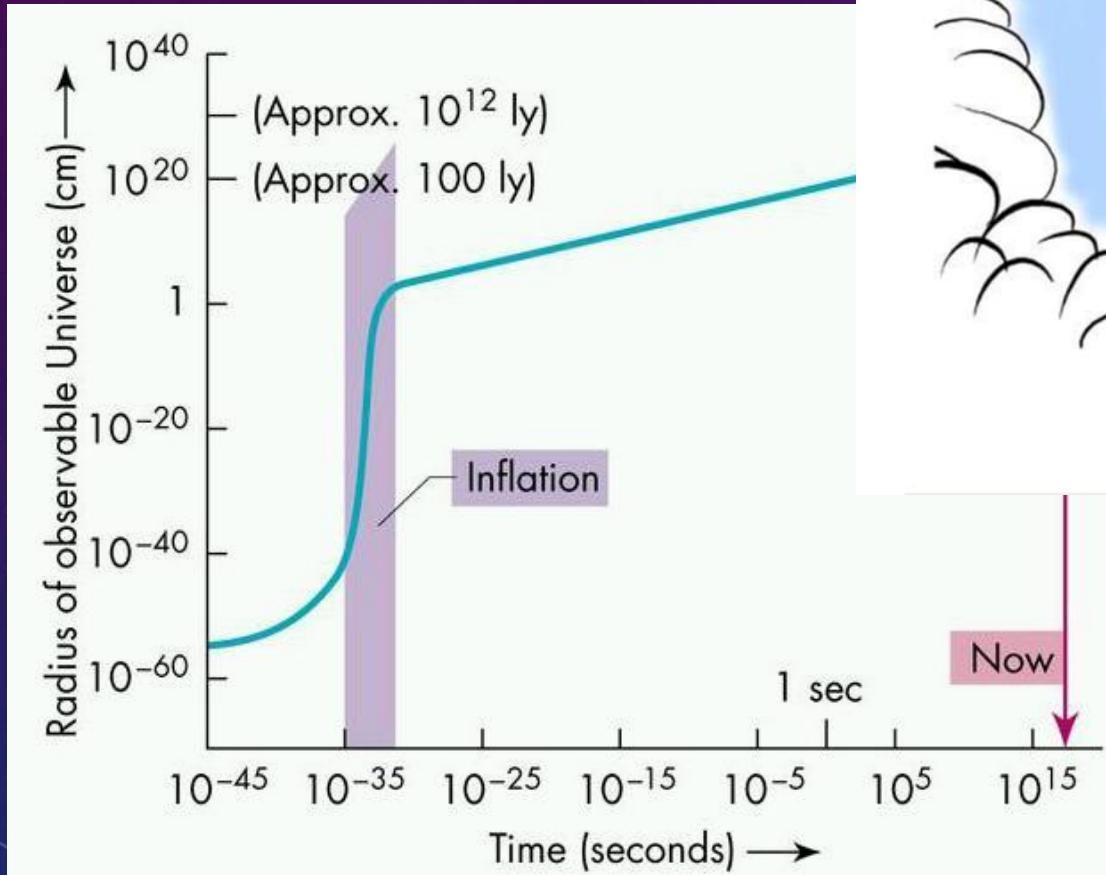
*dz*

$$\tau = -\frac{1}{H_0} \int_0^\infty \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^5 + \Omega_c(1+z)^3 + \Omega_\Lambda(1+z)^2}}$$

*Возраст Вселенной*



# ВСЕЛЕННАЯ



$$6 \cdot 10^{-35} \text{ m.}$$

$$5 \cdot 10^{-44} \text{ c.}$$

$$2 \cdot 10^{-8} \text{ кг.}$$

$$E_{\pi} = m_p \cdot c^2 \approx 10^{19} \text{ ГэВ.}$$

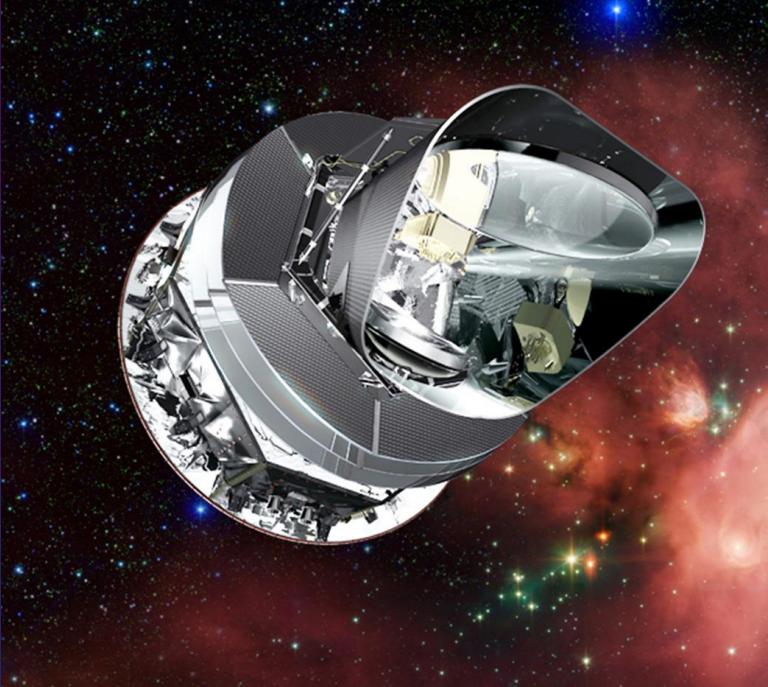
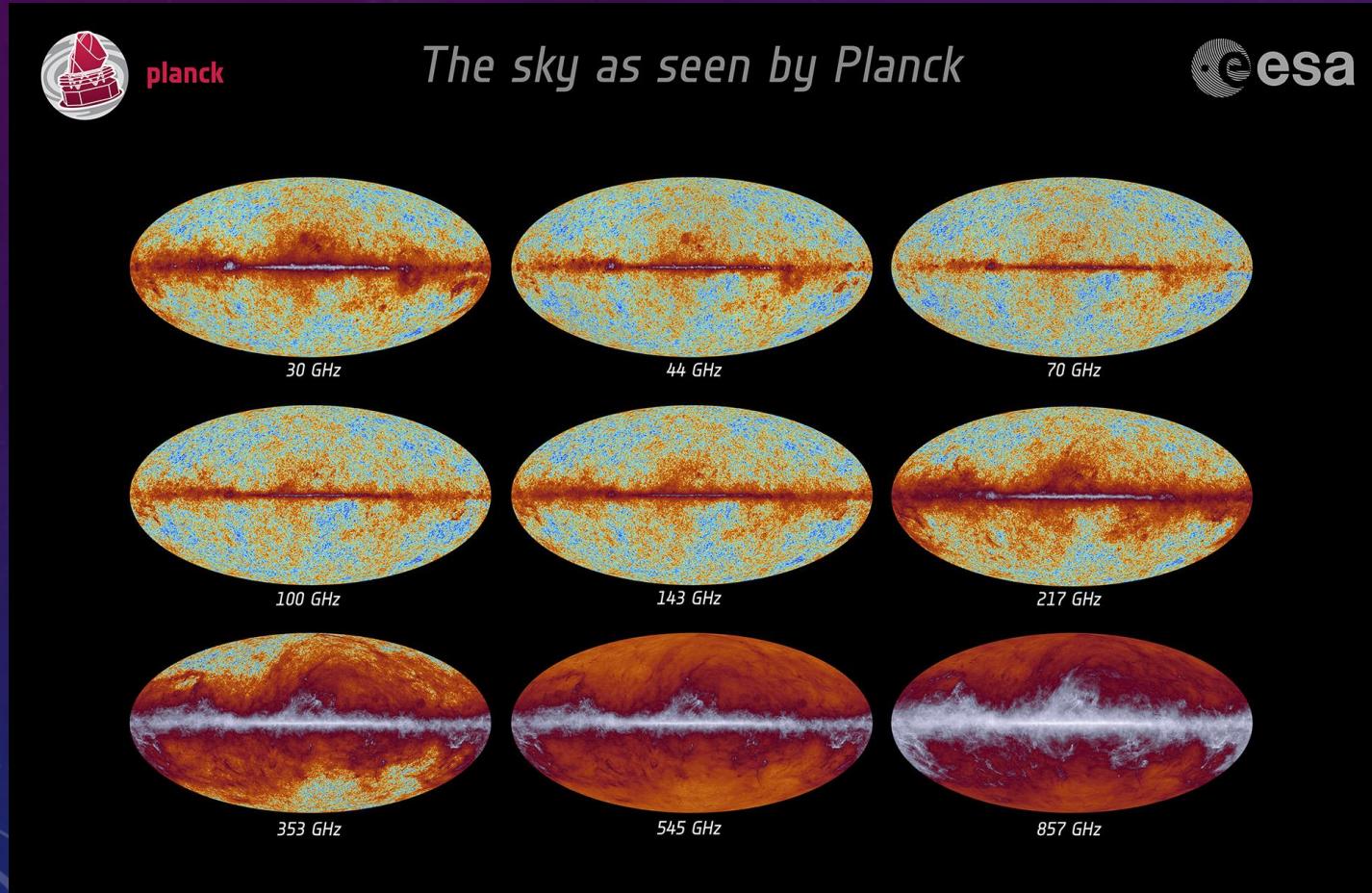
$$T_{\pi} = \frac{m_{\pi} c^2}{k} \approx 1,4 \cdot 10^{32} \text{ K.}$$

10

Планковские величины

$\emptyset = 2M$ , 2009 - 2013

# PLANCK



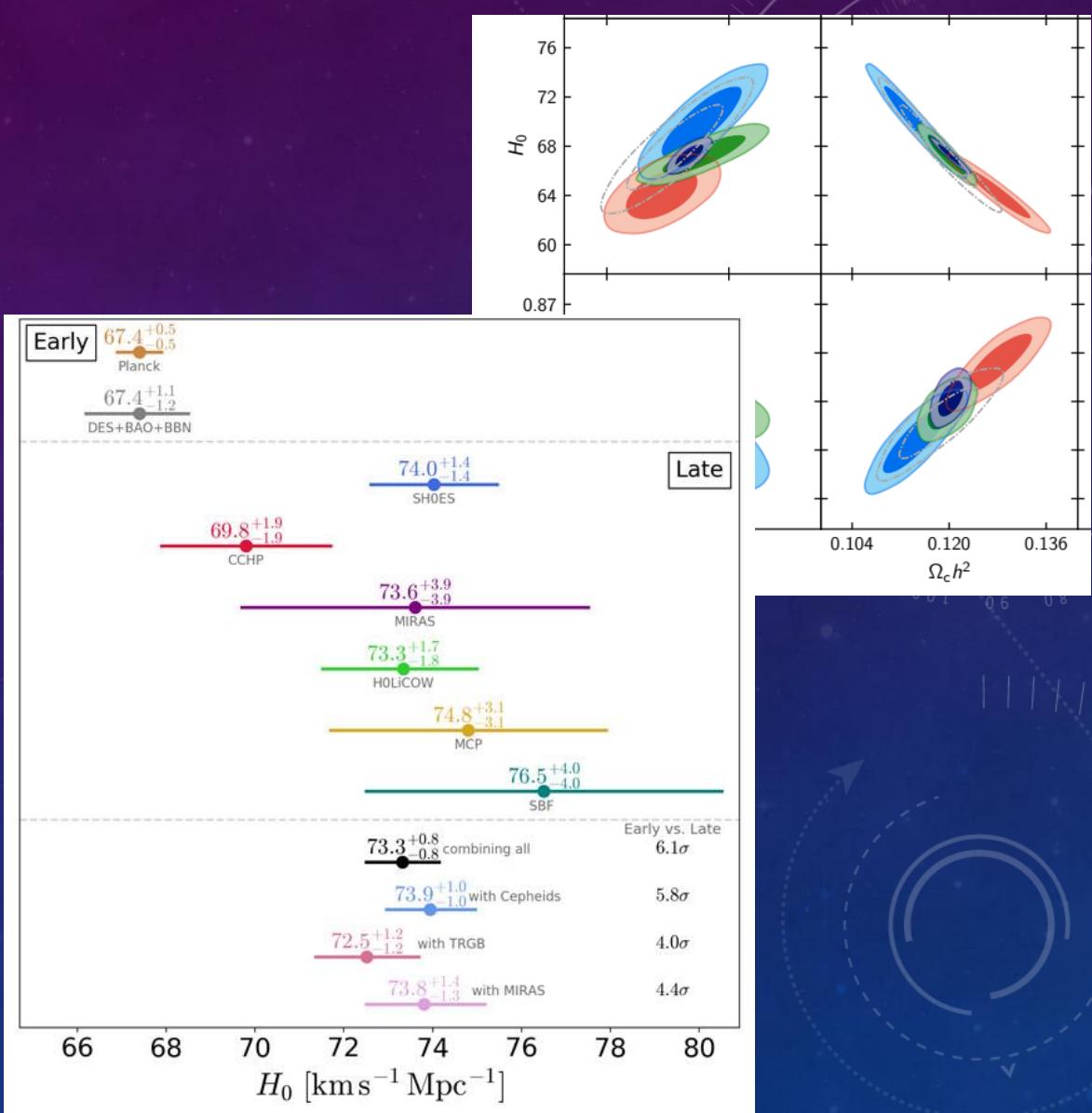
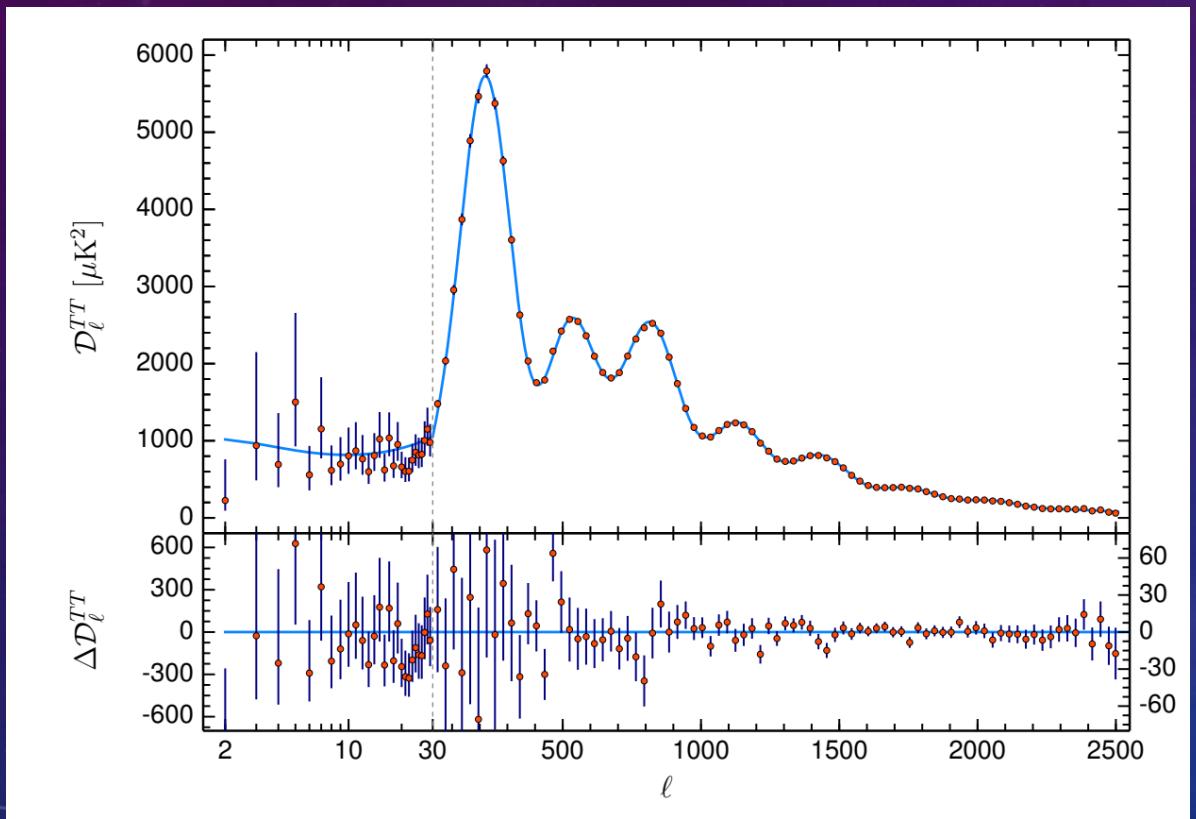
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/](https://www.nasa.gov/mission_pages/planck/)



11

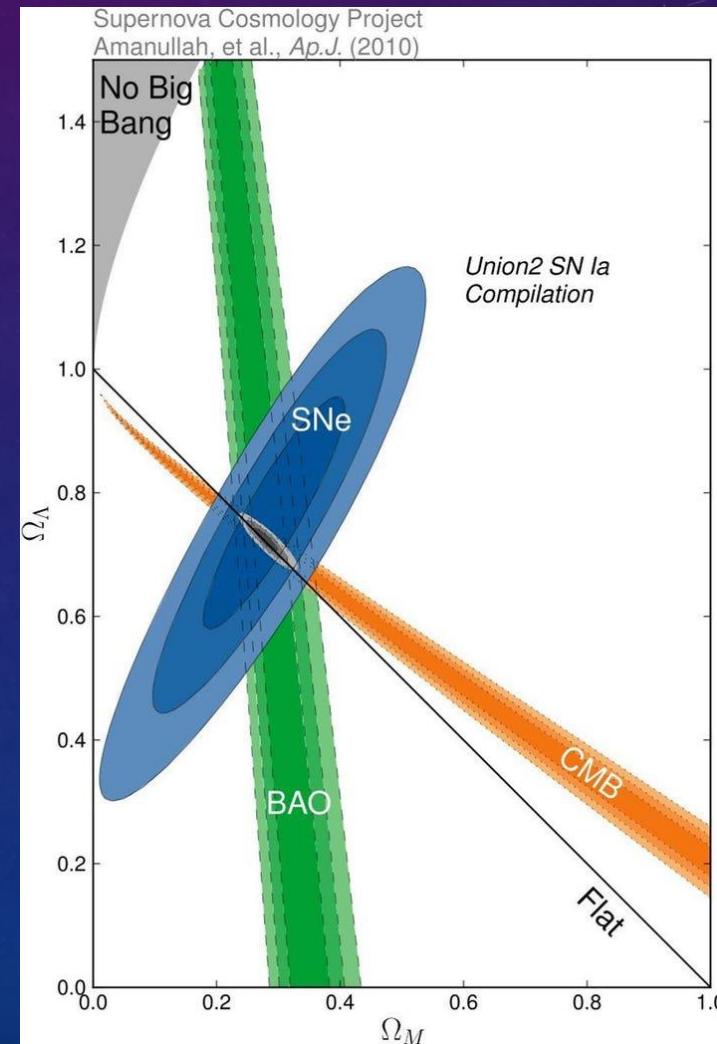
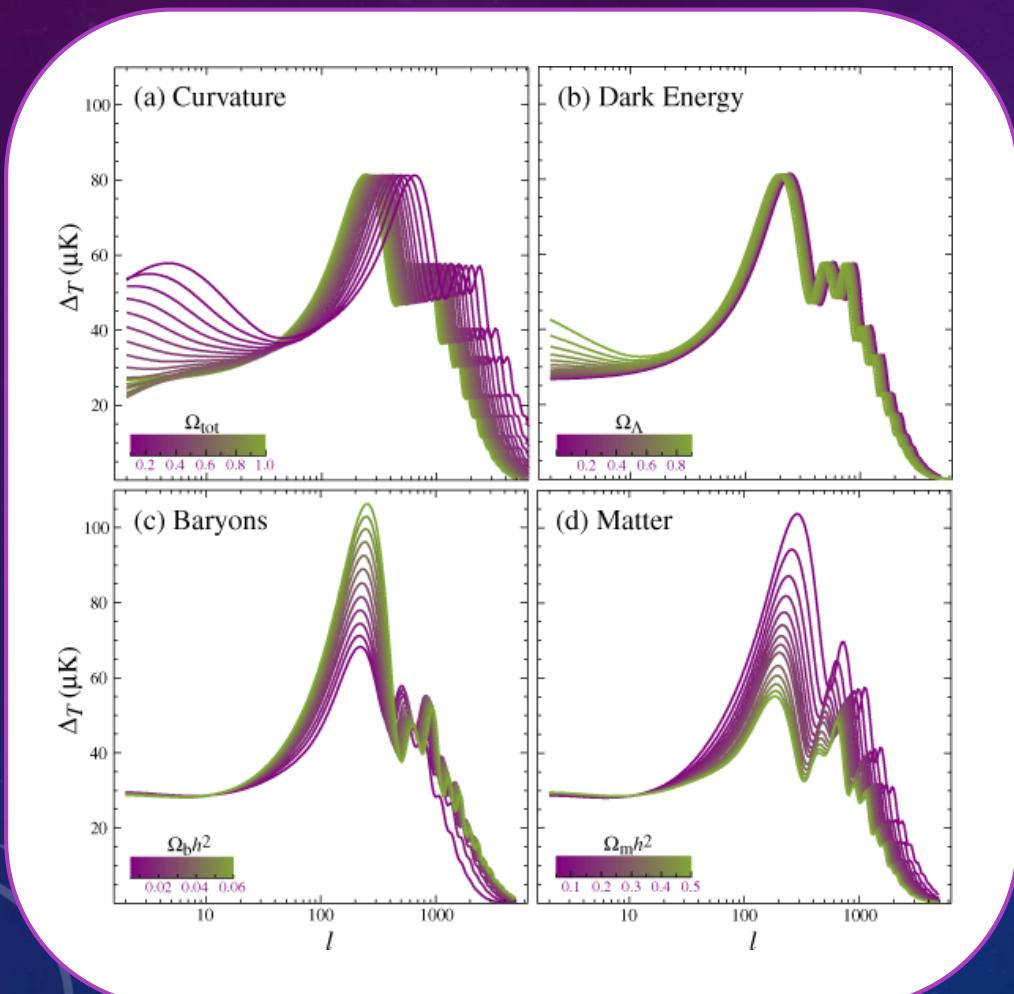
Tauber et al. 2010, A&A, 520, A2

# РЕЛИКТОВЫЙ ФОН

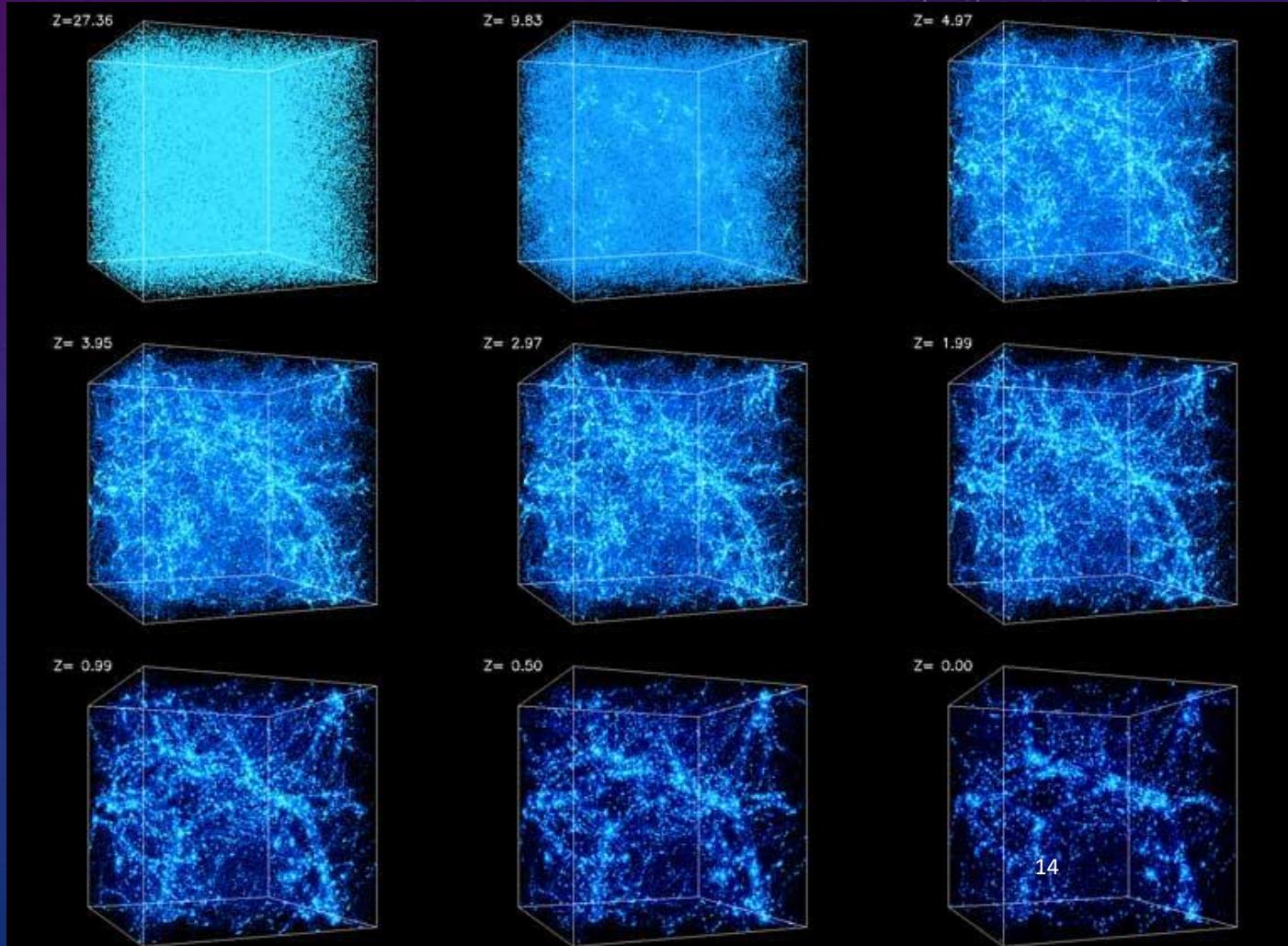
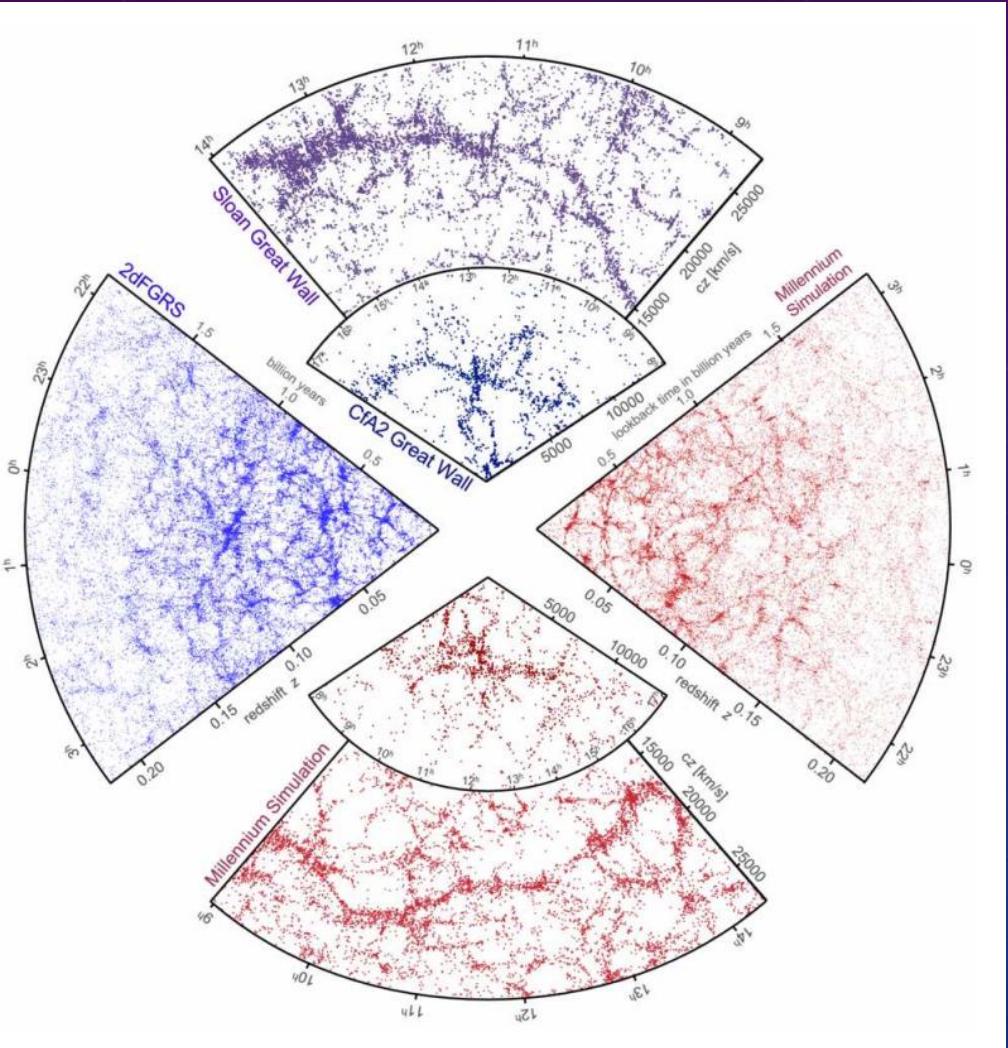


# РЕЛИКТОВЫЙ ФОН

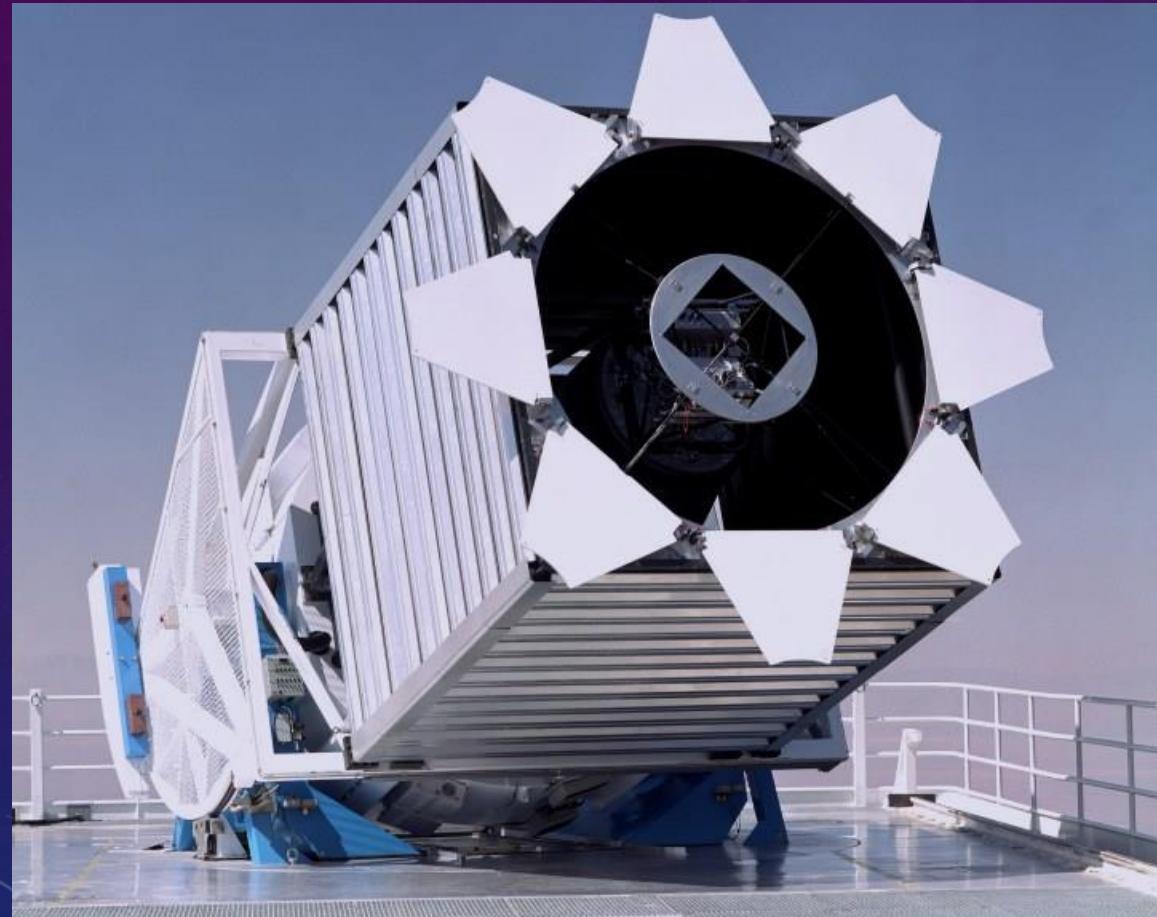
Parameter	TT+lowE 68% limits	TE+lowE 68% limits	EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing+BAO 68% limits
$\Omega_b h^2$ . . . . .	$0.02212 \pm 0.00022$	$0.02249 \pm 0.00025$	$0.0240 \pm 0.0012$	$0.02236 \pm 0.00015$	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02242 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	$0.1206 \pm 0.0021$	$0.1177 \pm 0.0020$	$0.1158 \pm 0.0046$	$0.1202 \pm 0.0014$	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.11933 \pm 0.00091$
$100\theta_{MC}$ . . . . .	$1.04077 \pm 0.00047$	$1.04139 \pm 0.00049$	$1.03999 \pm 0.00089$	$1.04090 \pm 0.00031$	$1.04092 \pm 0.00031$	$1.04101 \pm 0.00029$
$\tau$ . . . . .	$0.0522 \pm 0.0080$	$0.0496 \pm 0.0085$	$0.0527 \pm 0.0090$	$0.0544^{+0.0070}_{-0.0081}$	$0.0544 \pm 0.0073$	$0.0561 \pm 0.0071$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	$3.040 \pm 0.016$	$3.018^{+0.020}_{-0.018}$	$3.052 \pm 0.022$	$3.045 \pm 0.016$	$3.044 \pm 0.014$	$3.047 \pm 0.014$
$n_s$ . . . . .	$0.9626 \pm 0.0057$	$0.967 \pm 0.011$	$0.980 \pm 0.015$	$0.9649 \pm 0.0044$	$0.9649 \pm 0.0042$	$0.9665 \pm 0.0038$



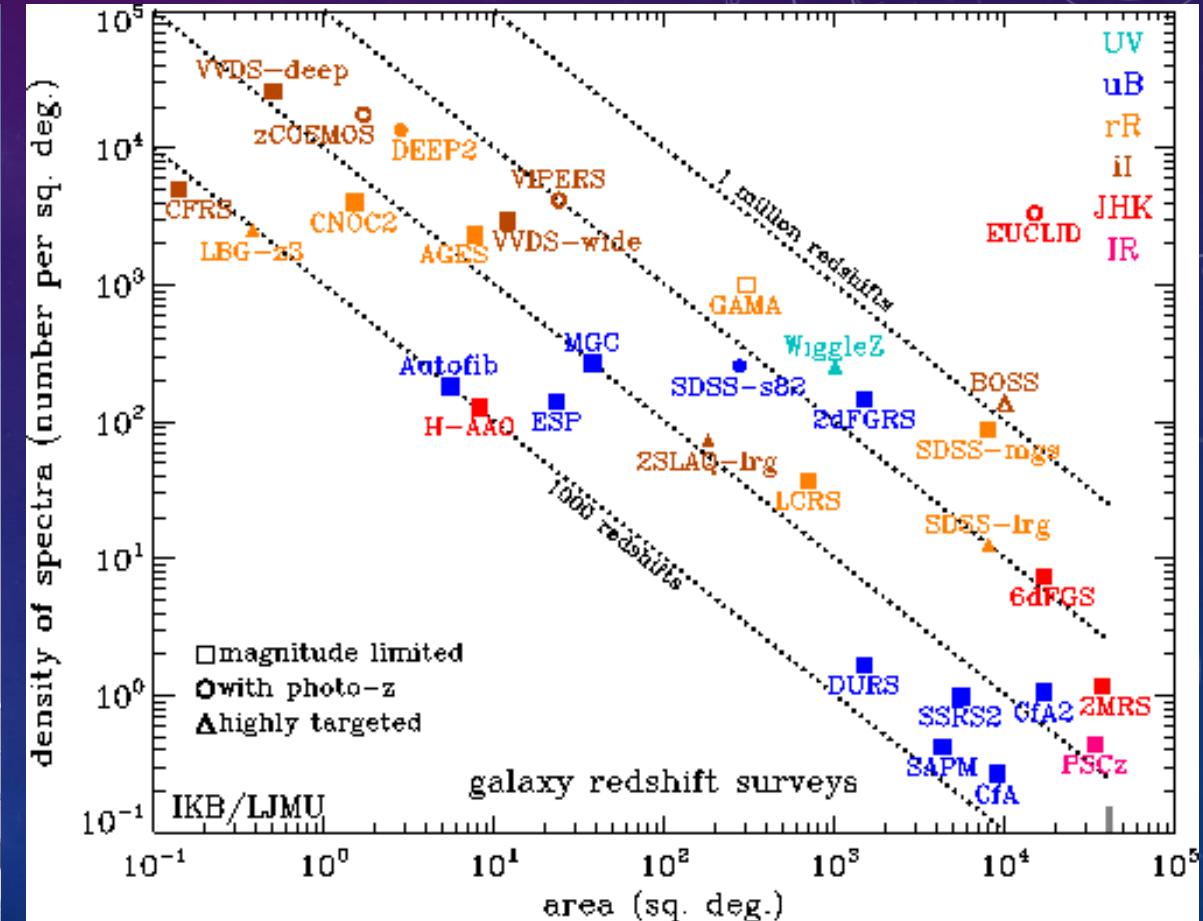
# КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА



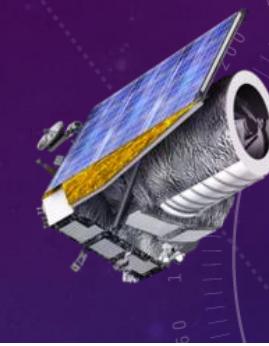
# ОБЗОРЫ



sdss.org



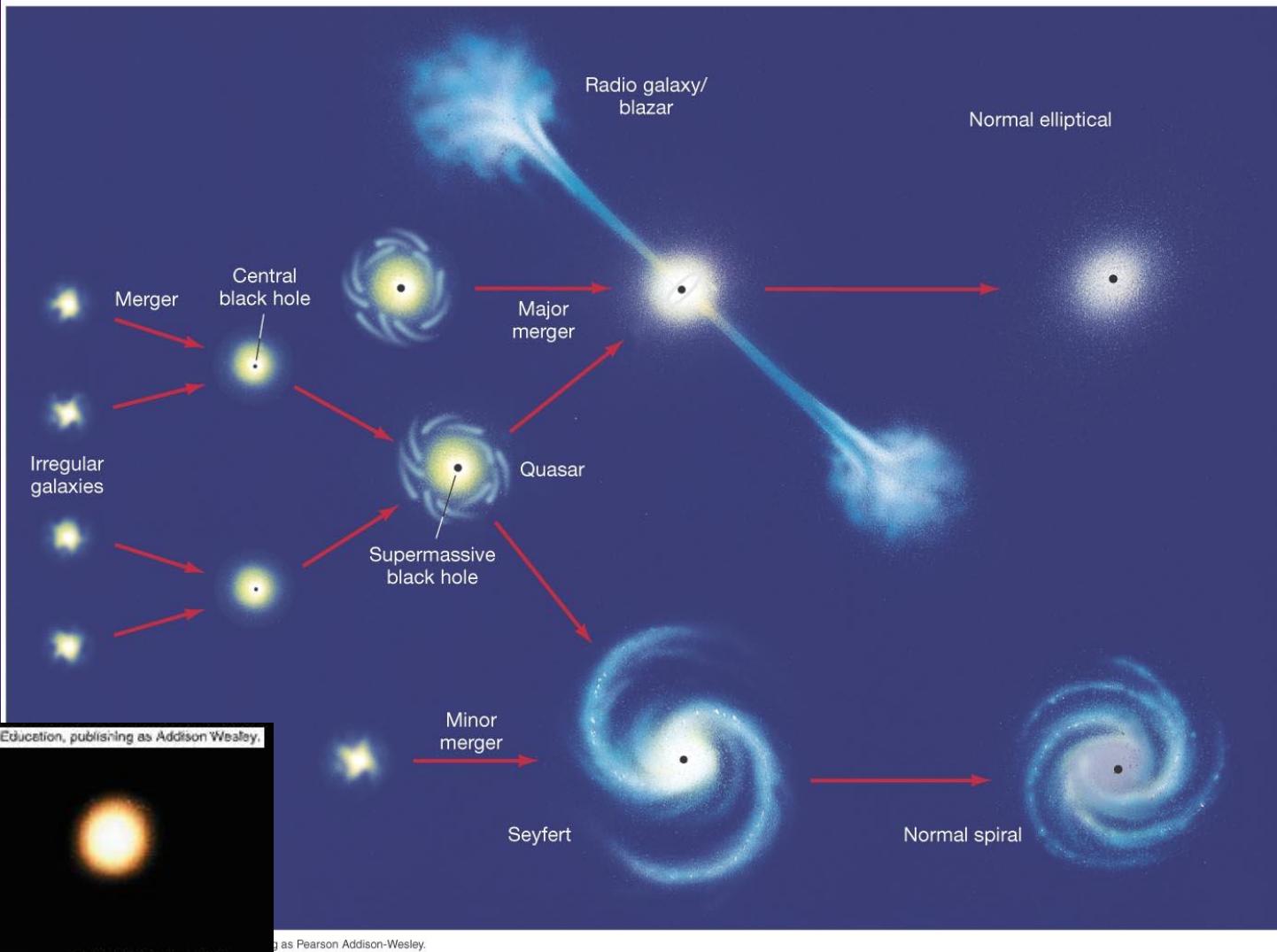
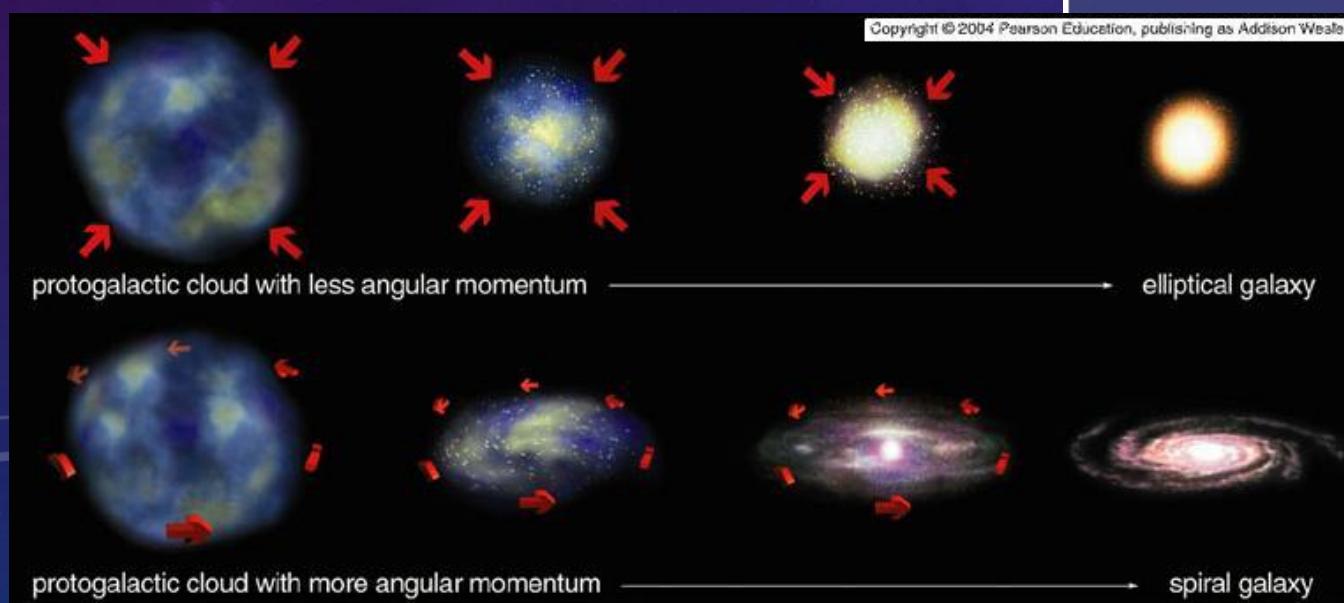
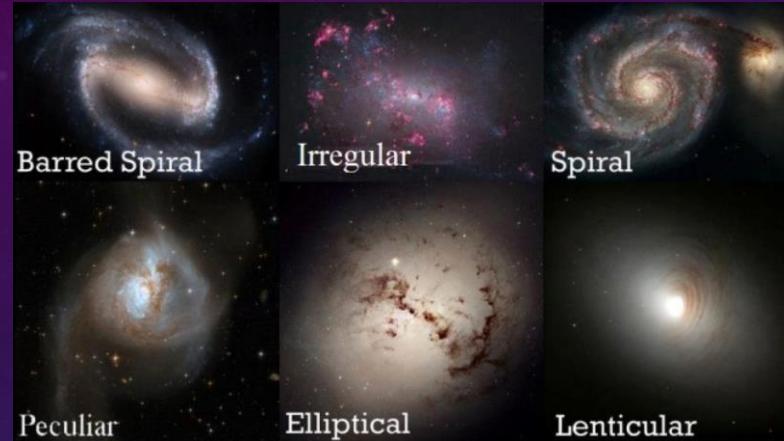
<https://www.astro.ljmu.ac.uk/~ikb/research/galaxy-redshift-surveys.html>



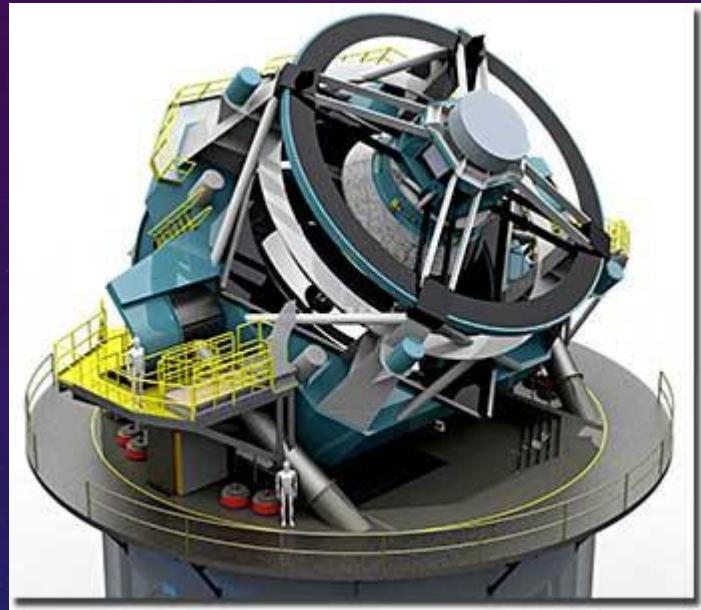
Euclid (ESA)

Старт:  
октябрь 2022?

# ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК



# SYNOPTIC SURVEY TELESCOPE

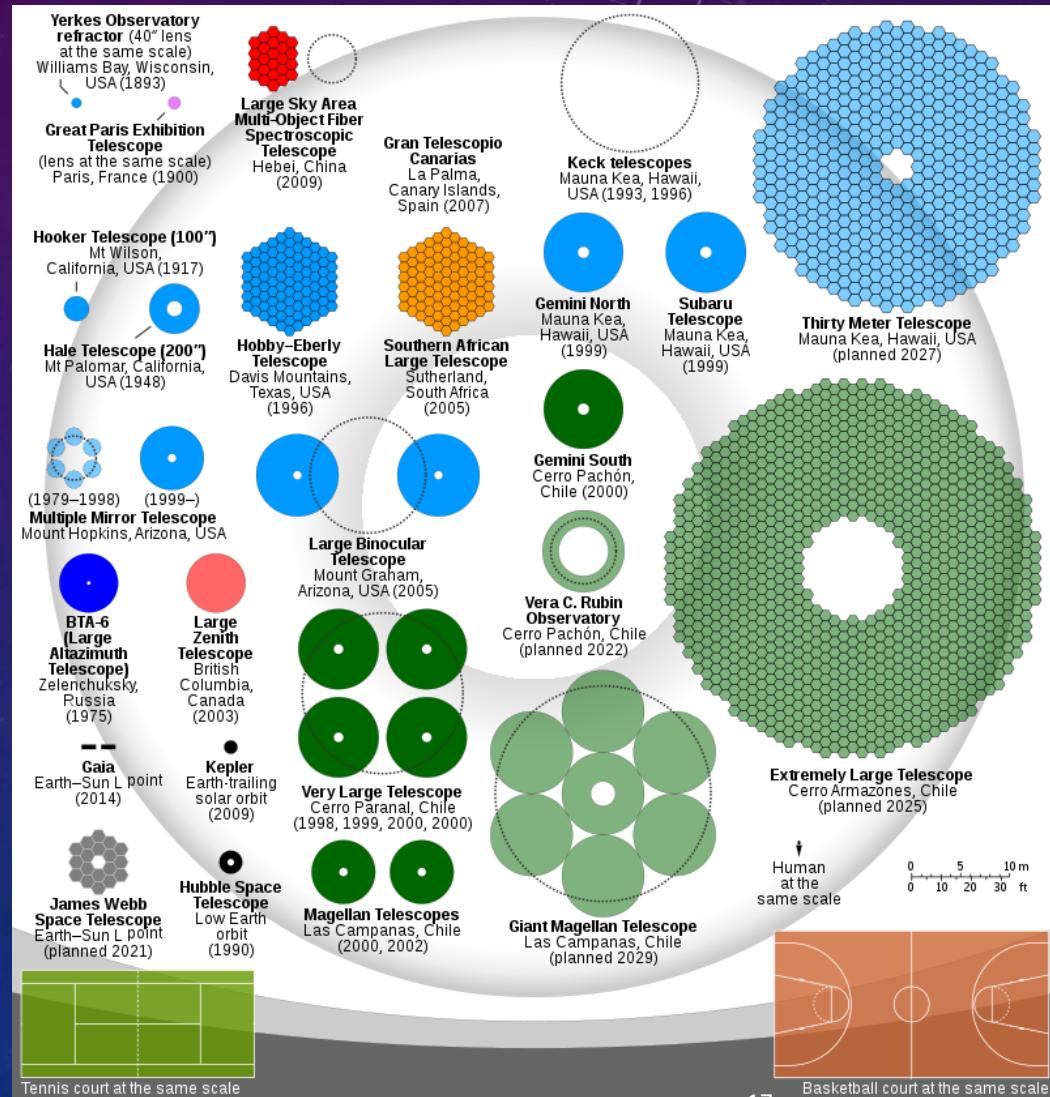


Phys.org

LSST (Vera Rubin Observatory),  
Ø8.5m, FOV = 9.5 sq. deg  
3.2 Gpix, 30 Tb/ночь

<https://www.lsst.org/>

Первый свет:  
октябрь 2022?



Wikipedia.org

# ГАЛАКТИКА

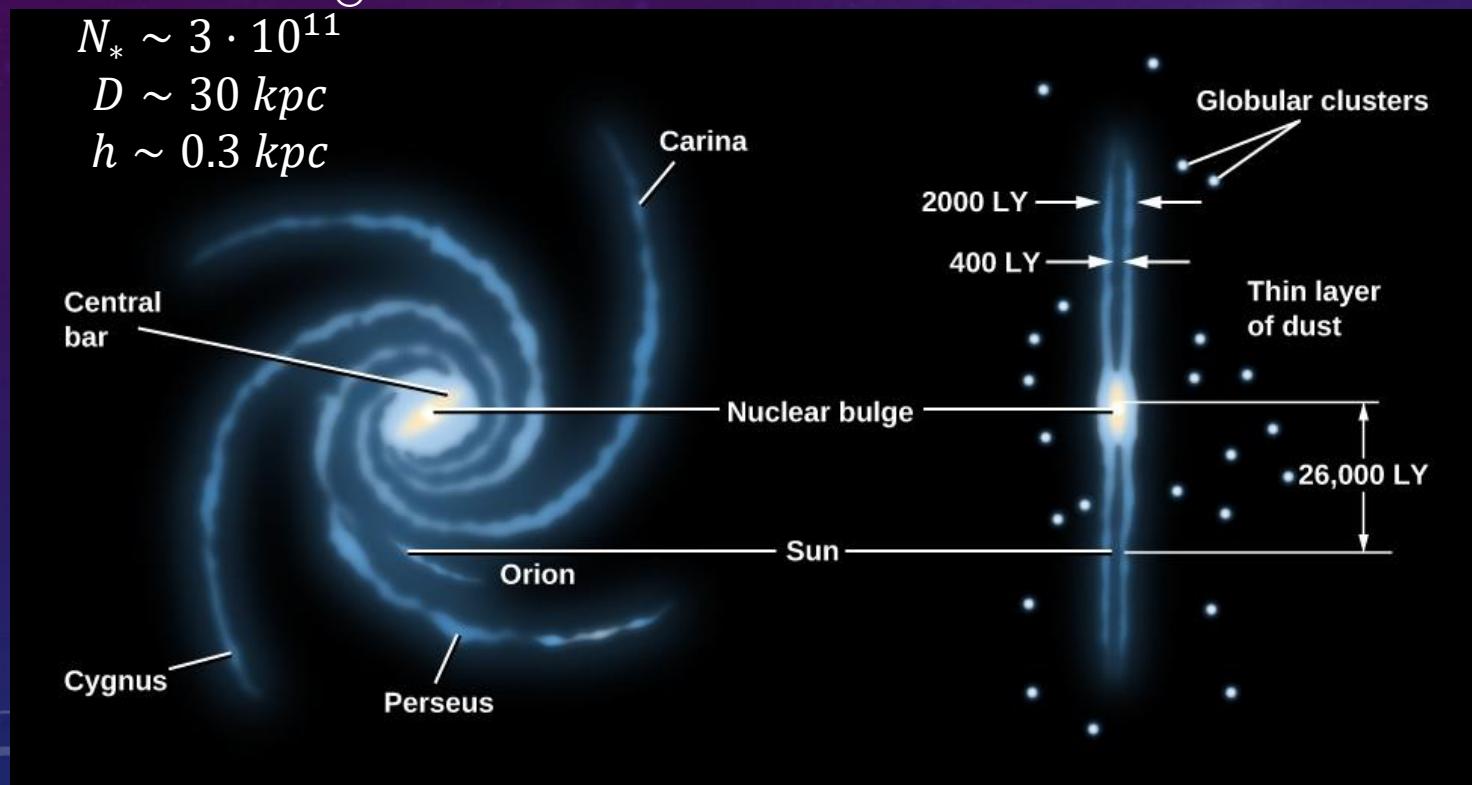
$$M \sim 5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$$

$$L \sim 2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$$

$$N_* \sim 3 \cdot 10^{11}$$

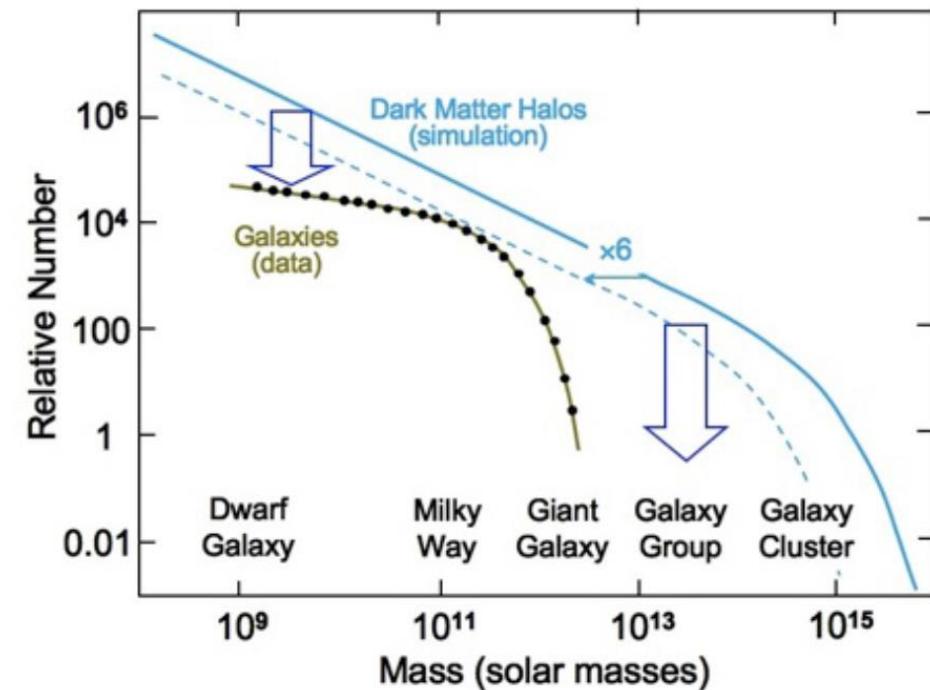
$$D \sim 30 \text{ kpc}$$

$$h \sim 0.3 \text{ kpc}$$

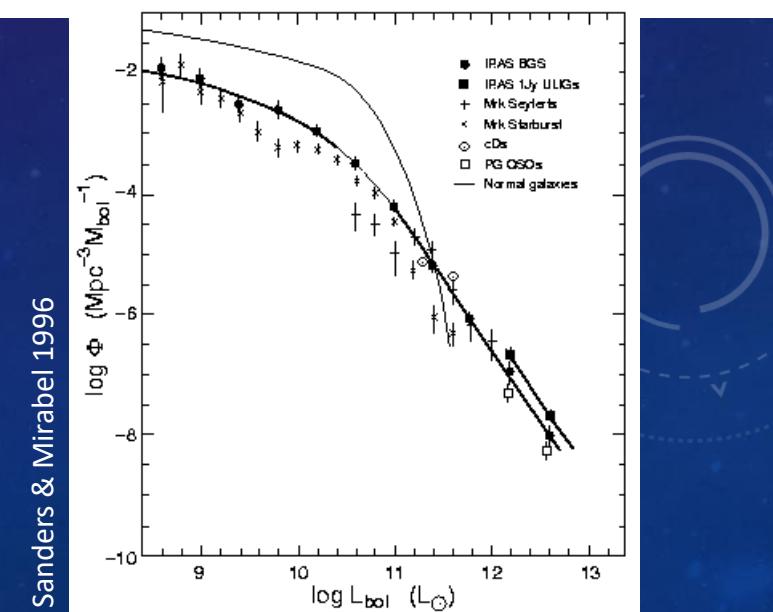


<https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-architecture-of-the-galaxy/>

## Halo and Galaxy Mass Distributions

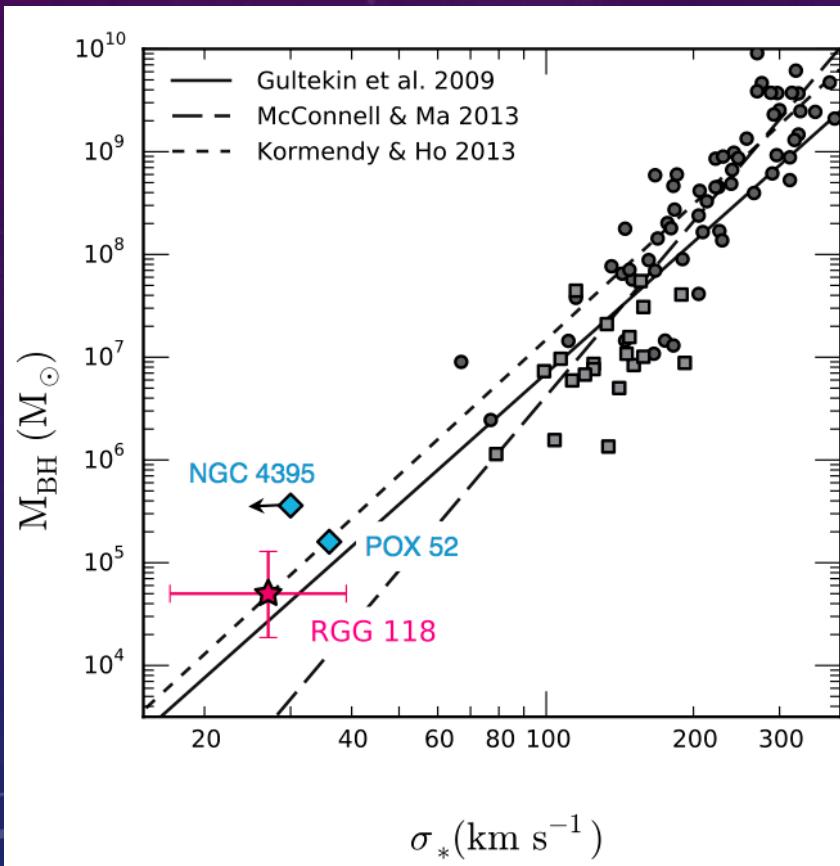


by J. Green

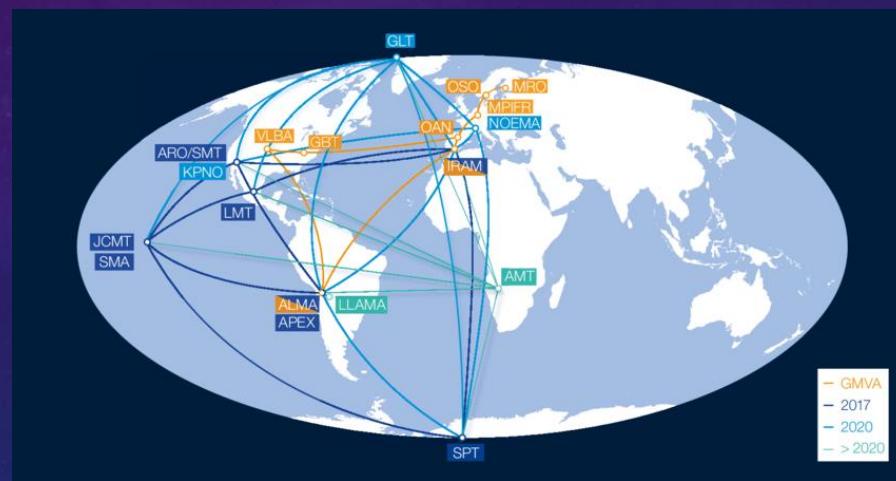


Sanders & Mirabel 1996

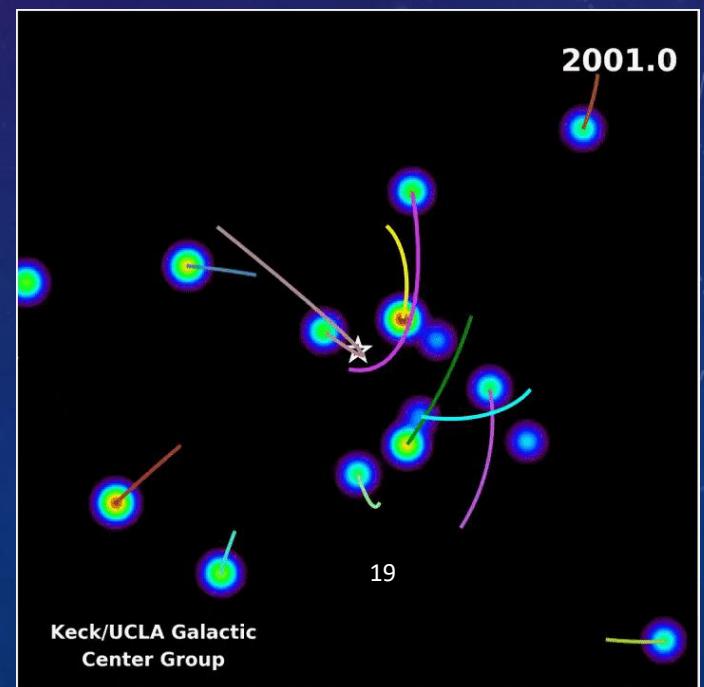
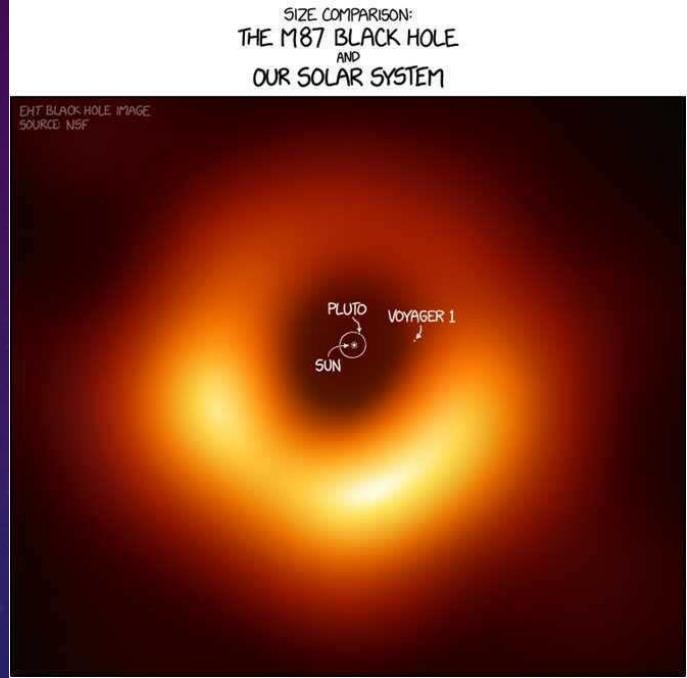
# СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ



Baldassare et al. 2015



<https://eventhorizontelescope.org/>

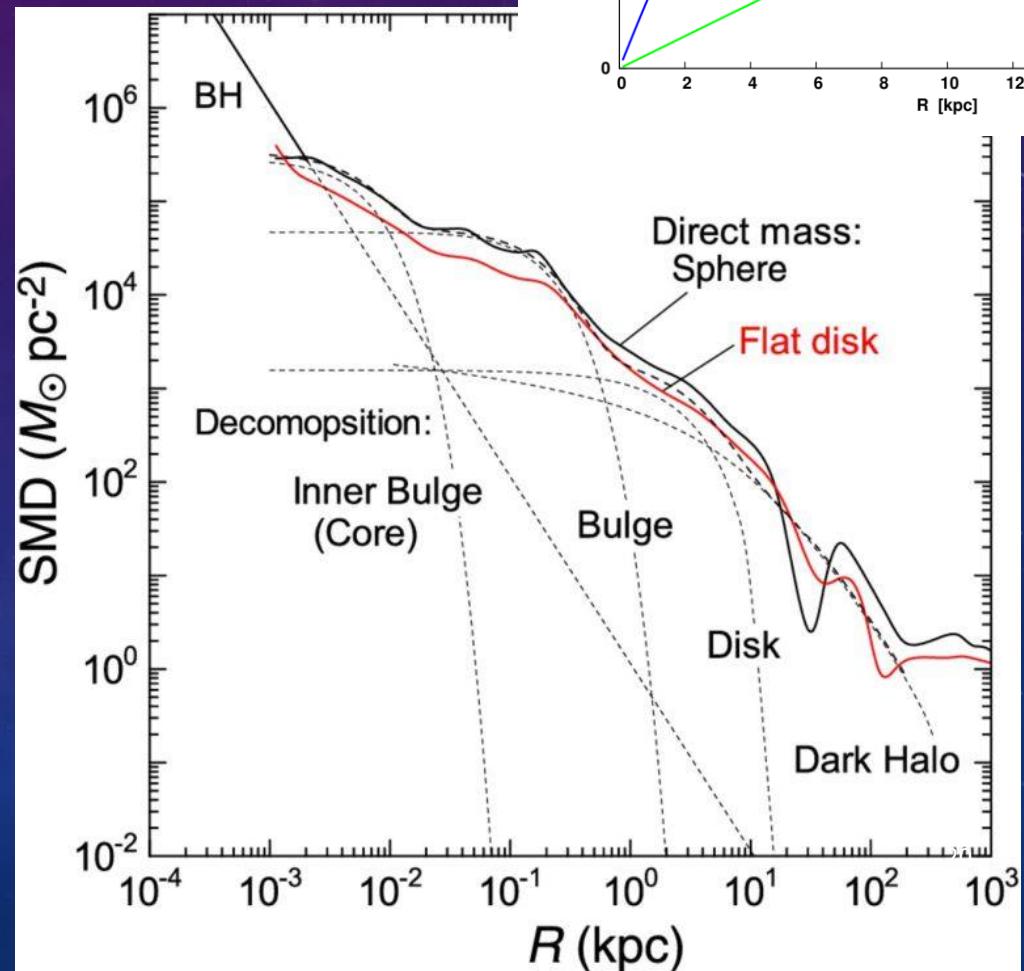
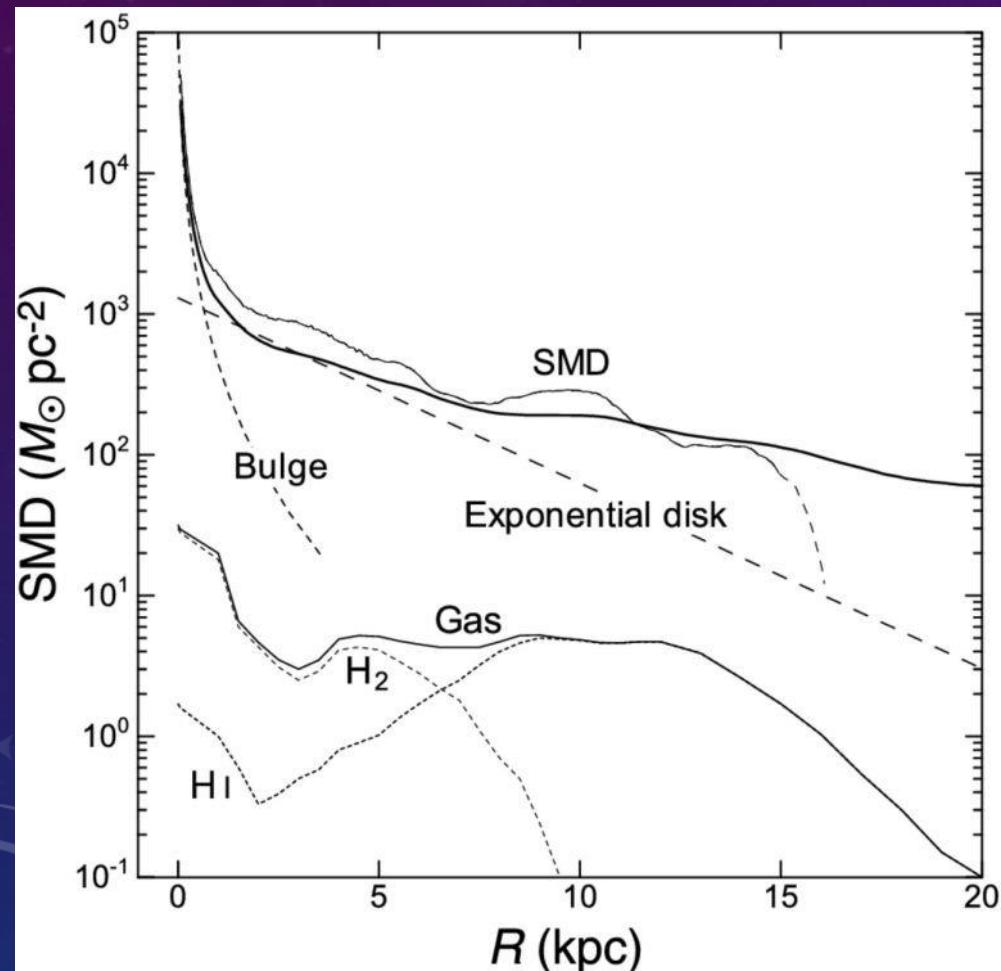


Keck/UCLA Galactic  
Center Group

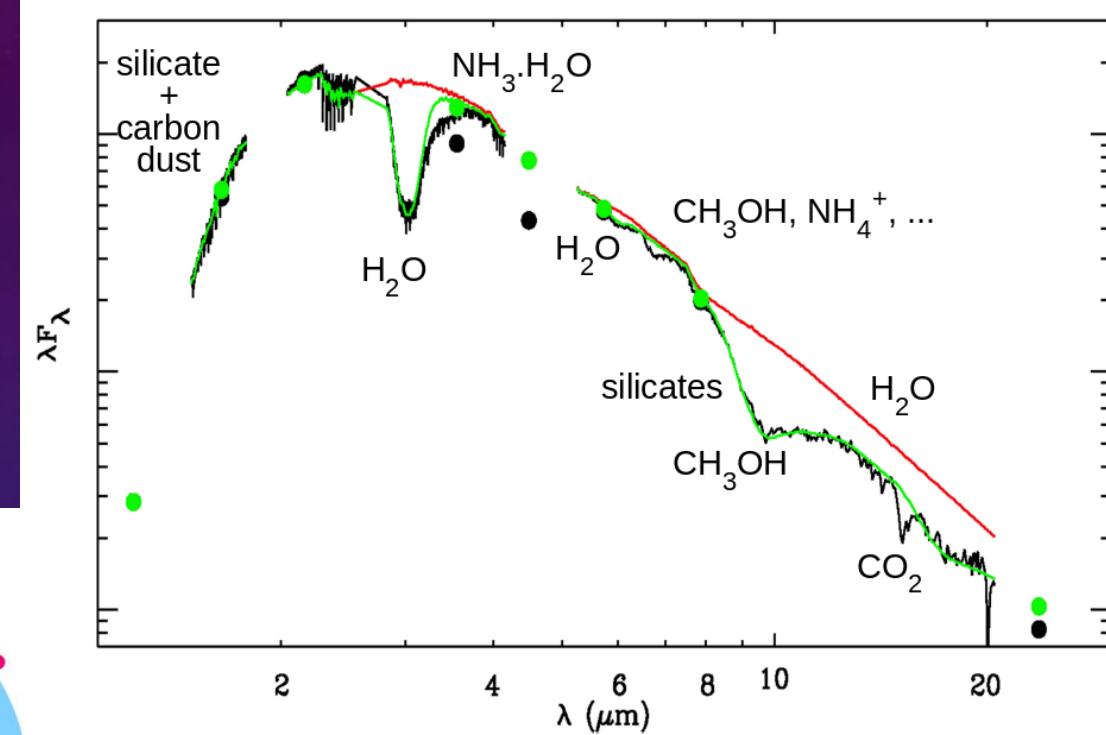
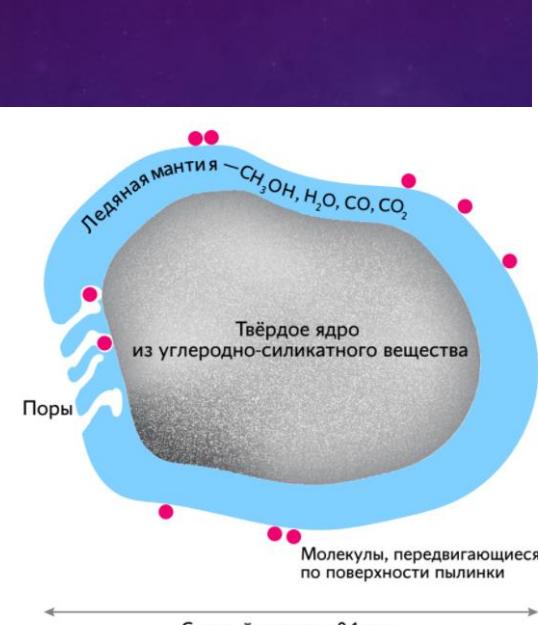
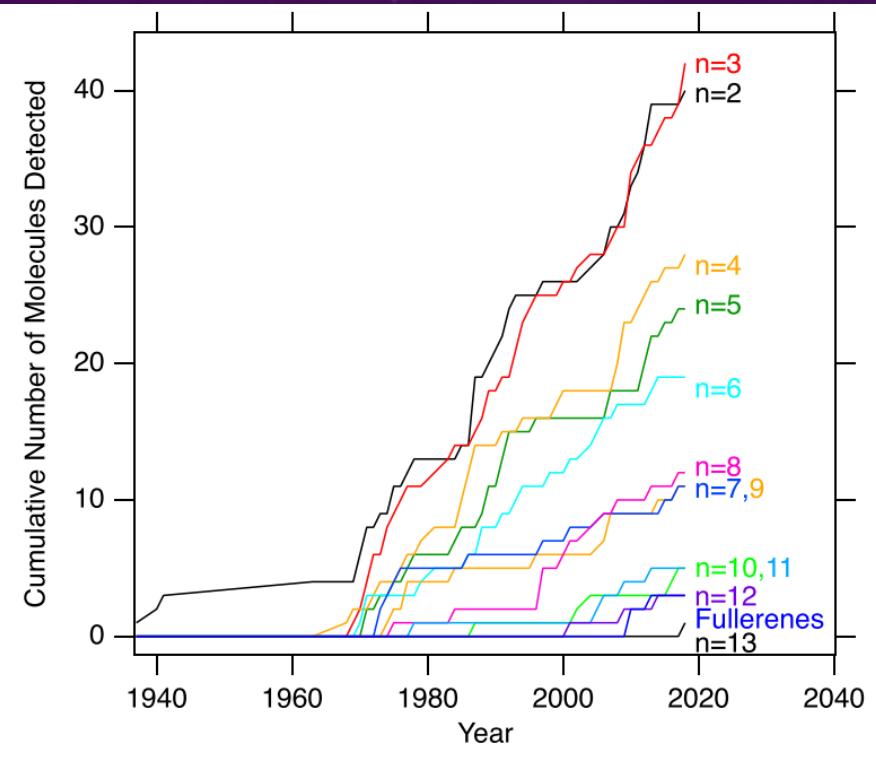
SIZE COMPARISON:  
THE M87 BLACK HOLE  
AND  
OUR SOLAR SYSTEM

EHT BLACK HOLE IMAGE  
SOURCE: NSF

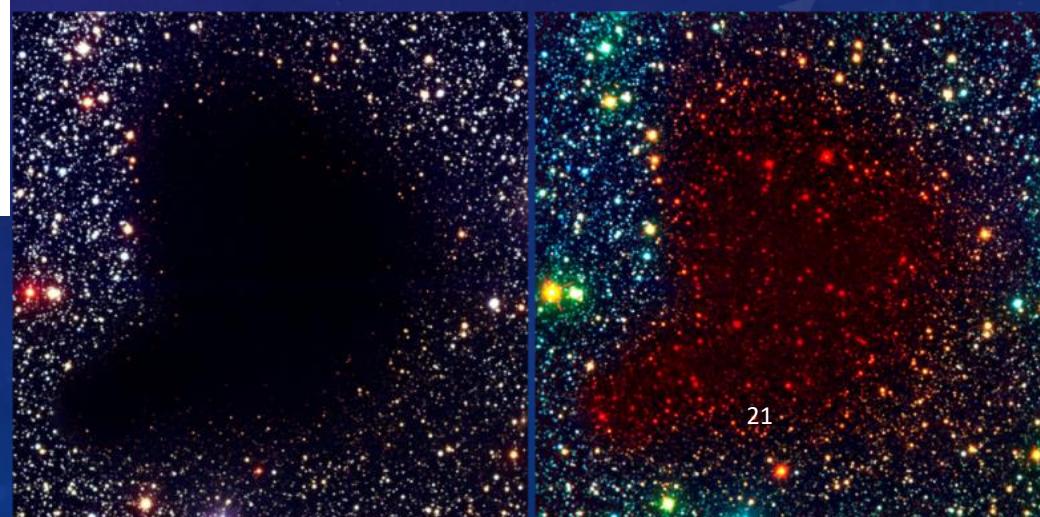
# ГАЗ И ЗВЕЗДЫ



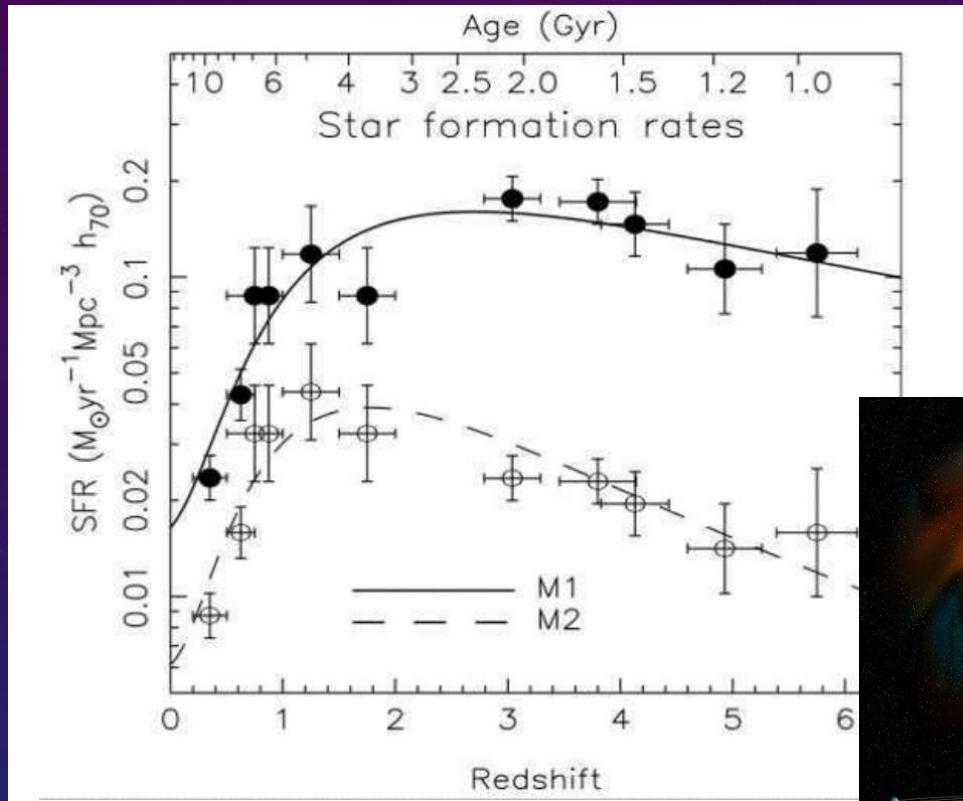
# МЕЖЗВЁЗДНАЯ СРЕДА



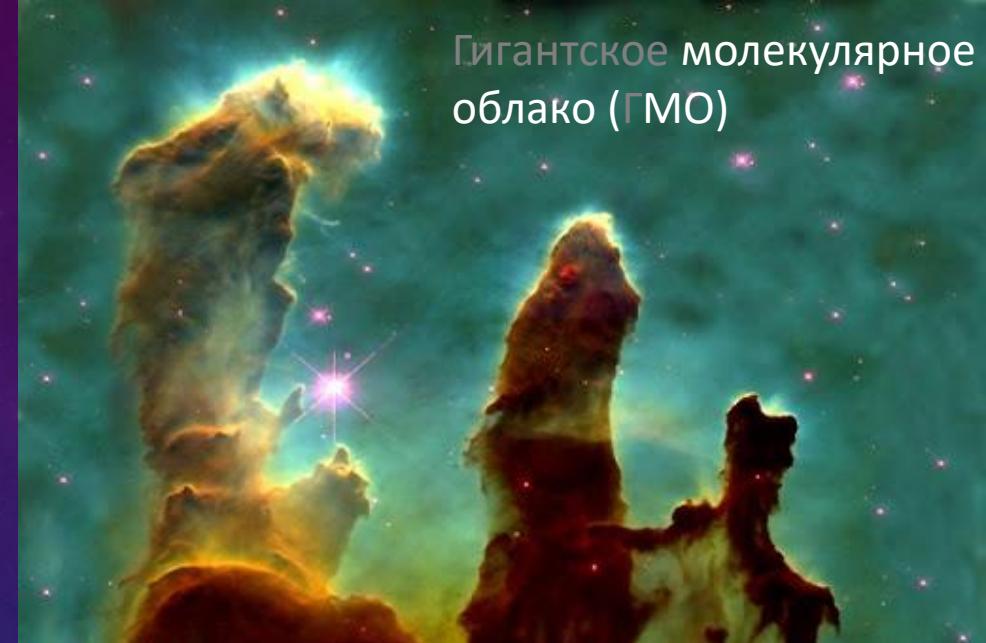
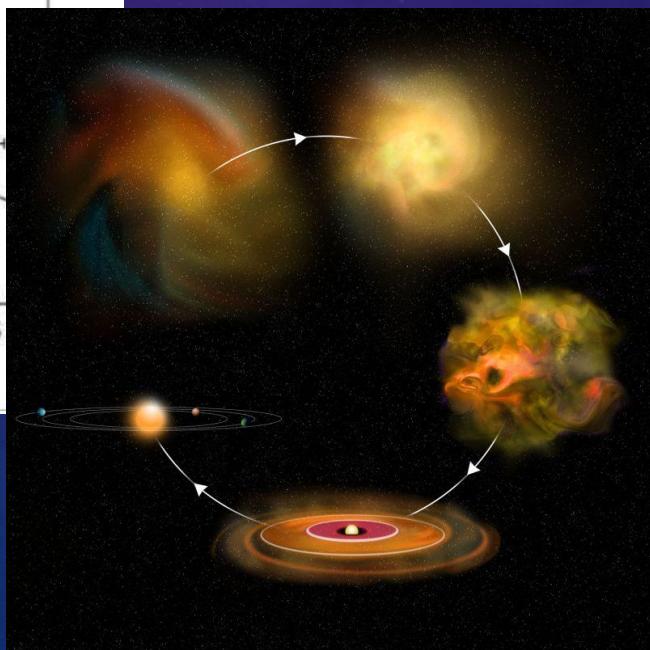
<https://www.ifa.hawaii.edu/research/ISM.shtml>



# ЗВЁЗДООБРАЗОВАНИЕ



arXiv:astro-ph/0406546



Гигантское молекулярное облако (ГМО)

$$\left. \begin{array}{l} n \sim 100 \text{ см}^{-3} \\ \rho_0 \sim 10^{-22} \text{ г см}^{-3} \end{array} \right\} t_{ff} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho_0}} \approx 10^7 \text{ лет}$$

Джинсовская длина:

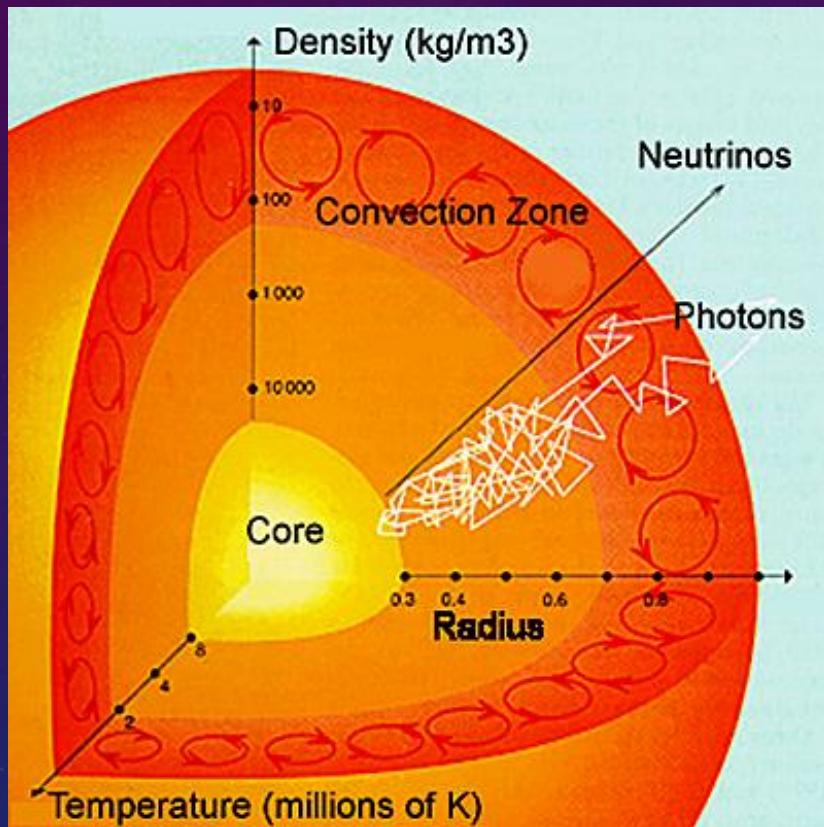
$$\lambda_J = c_s \left( \frac{\pi}{G\rho_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \sim 100 \text{ пк}$$

Джинсовская масса:

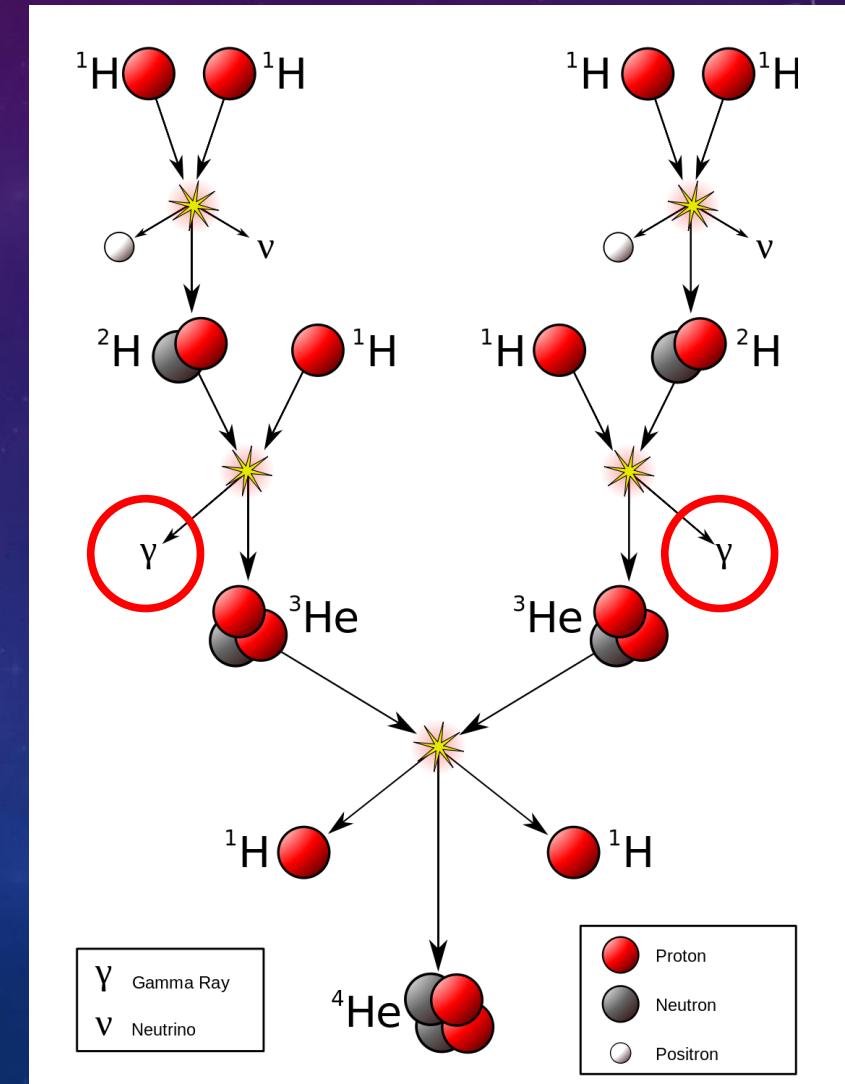
$$M_J = \rho_0 \lambda_J^3 \sim 5^{22} \cdot 10^4 M_\odot$$

В 90% звёзд Вселенной прямо сейчас горит водород.

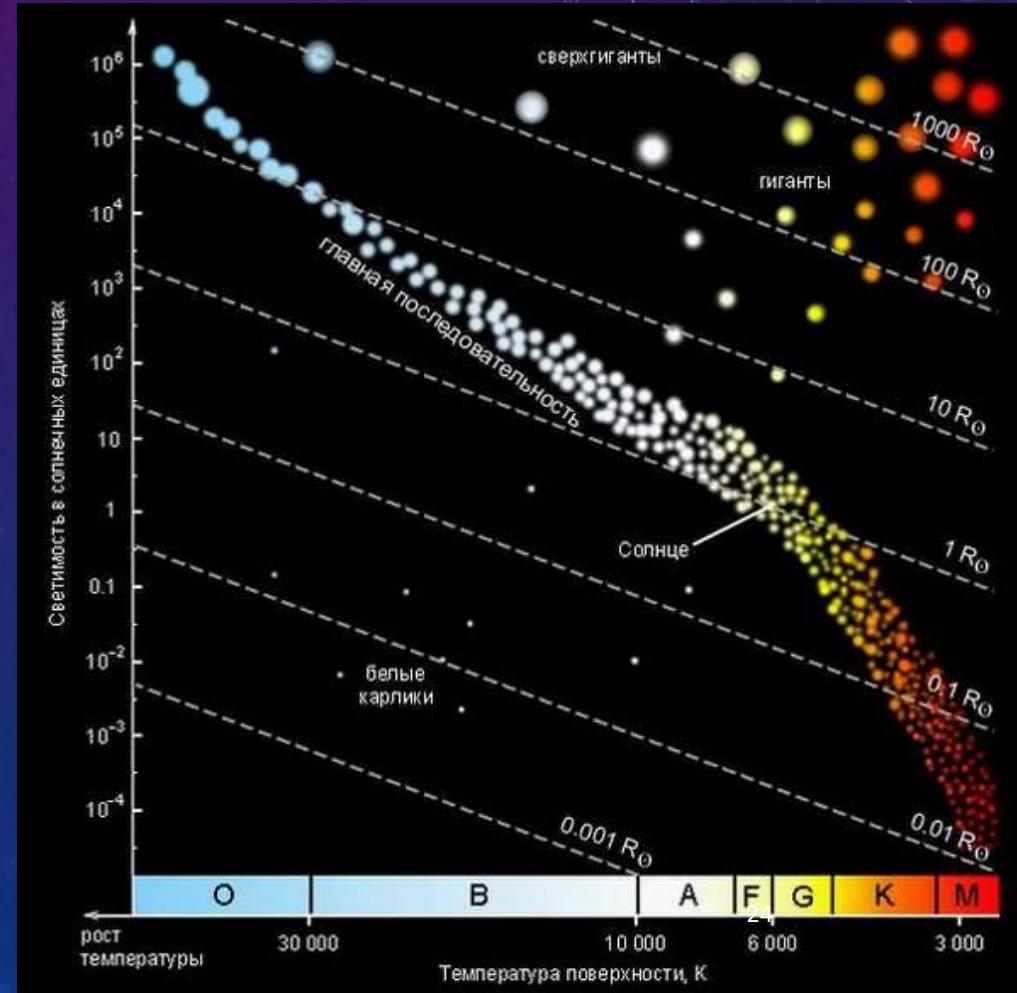
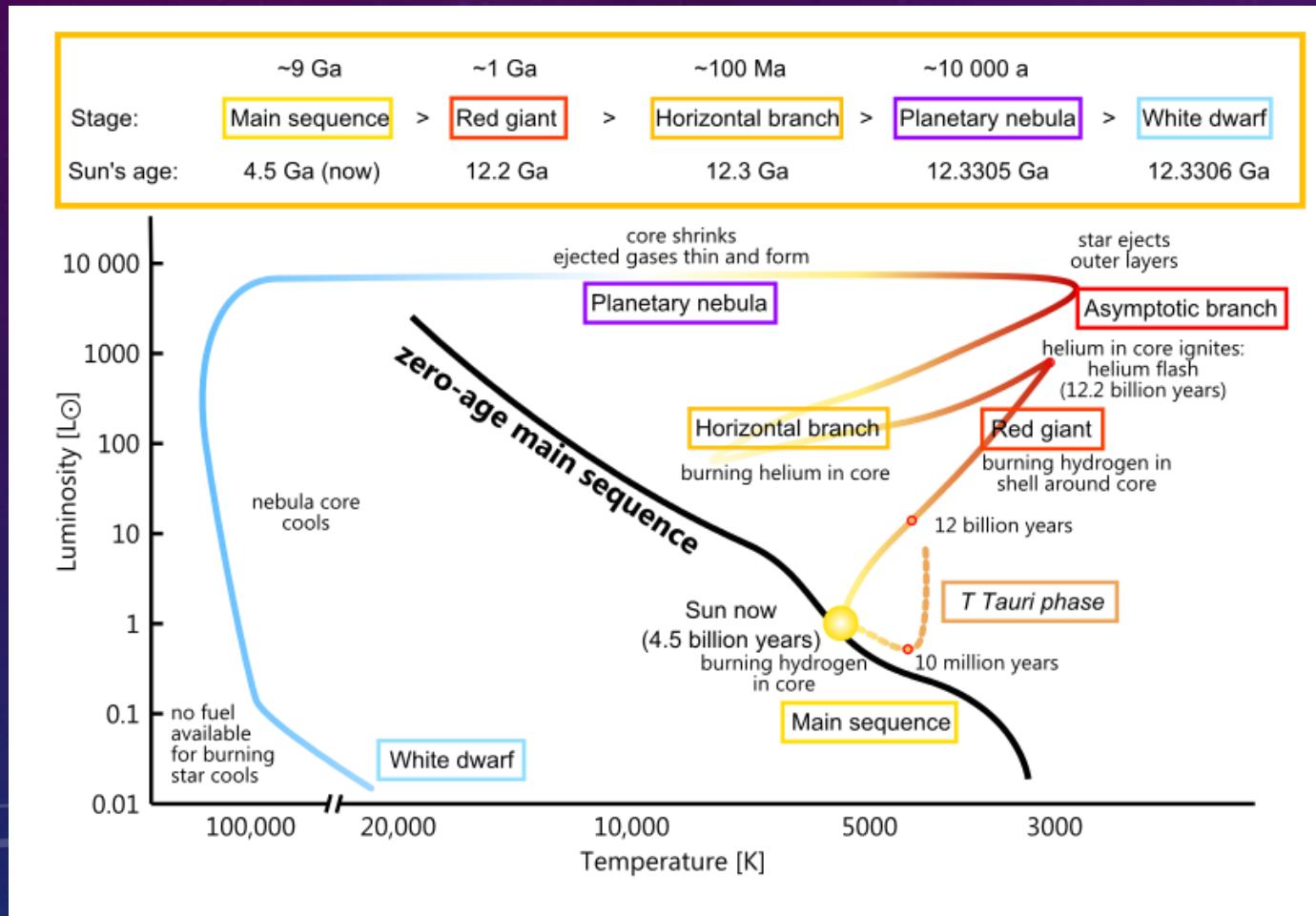
# ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ



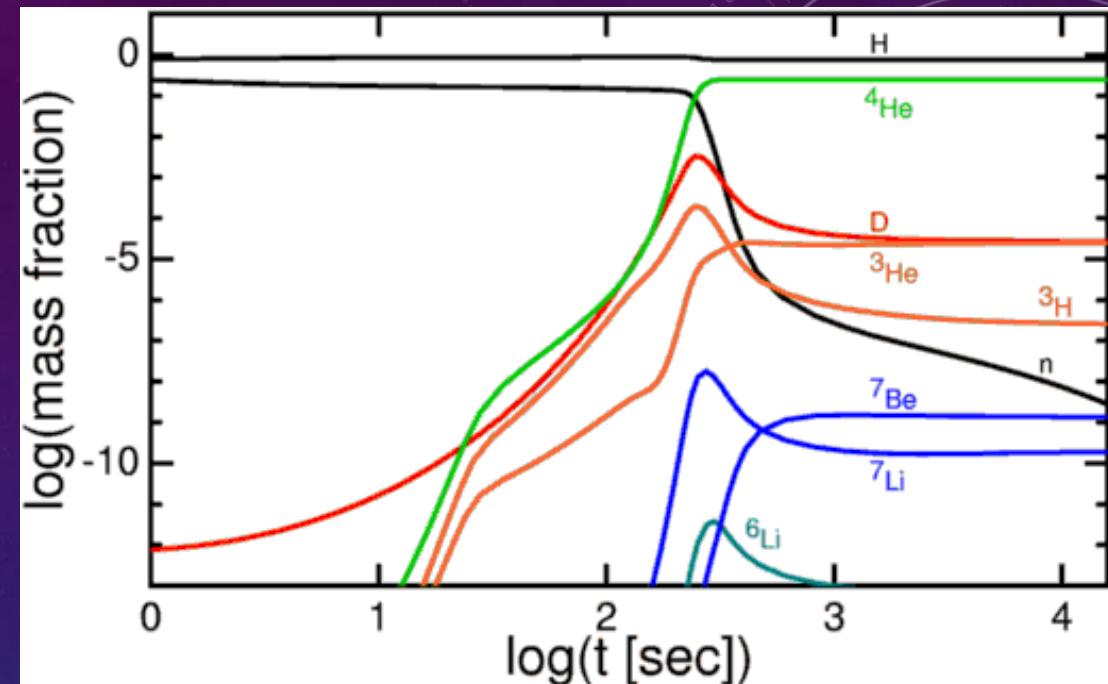
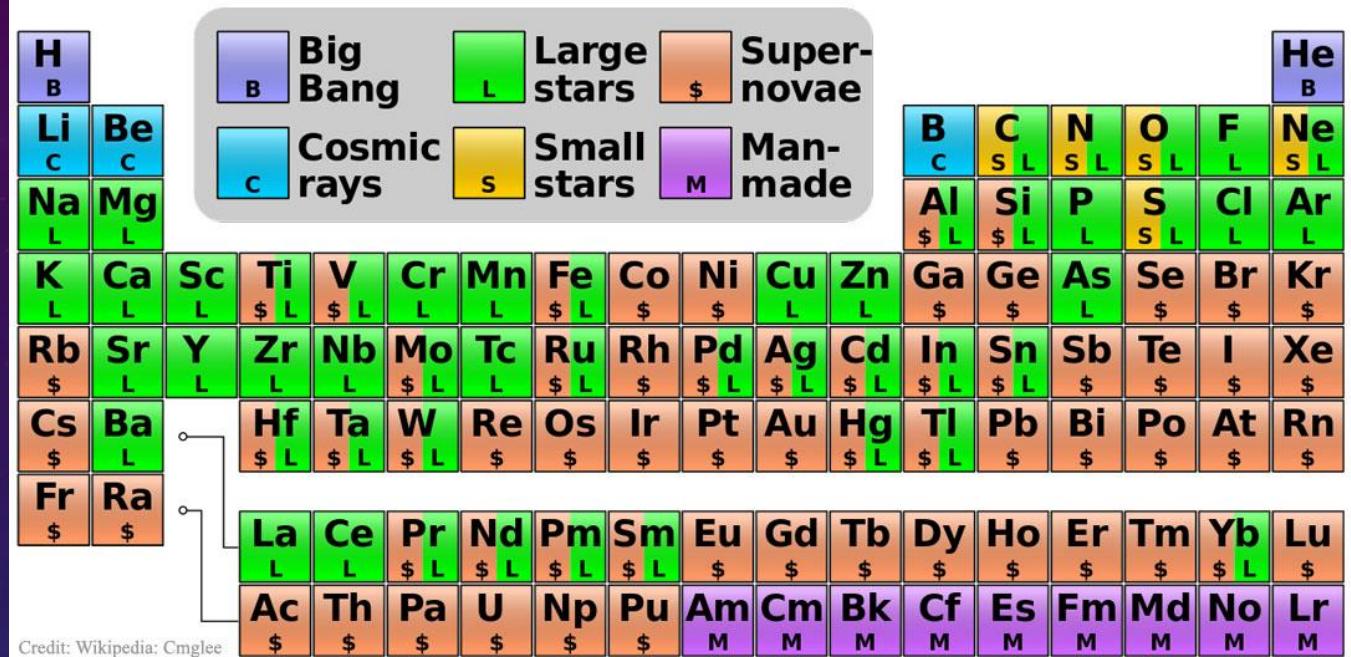
Состав: водород ( $\frac{3}{4}$ ), гелий (почти  $\frac{1}{4}$ ), углерод, кислород и т. д. (менее 1%)



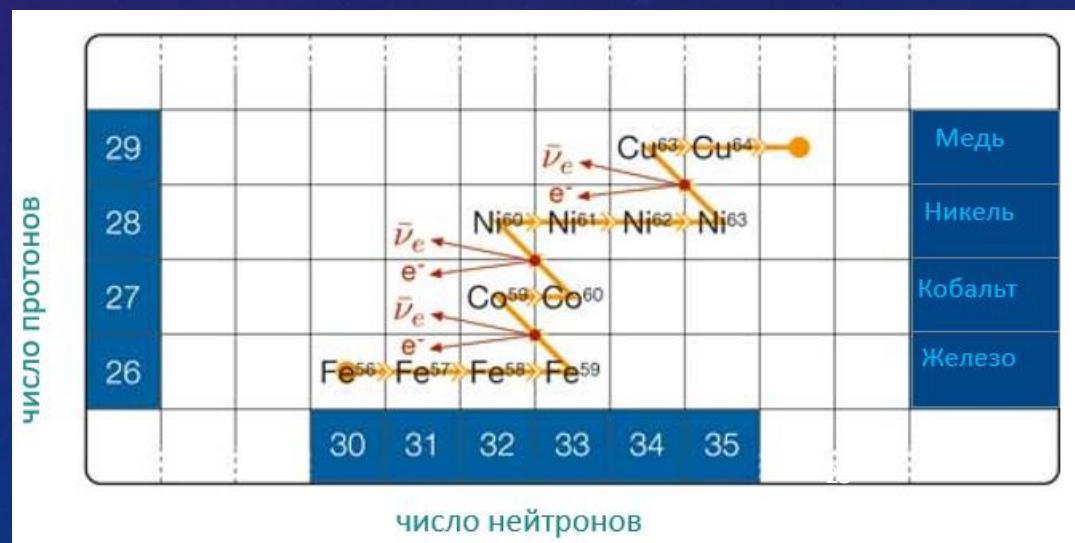
# ЗВЁЗДЫ



# НУКЛЕОСИНТЕЗ

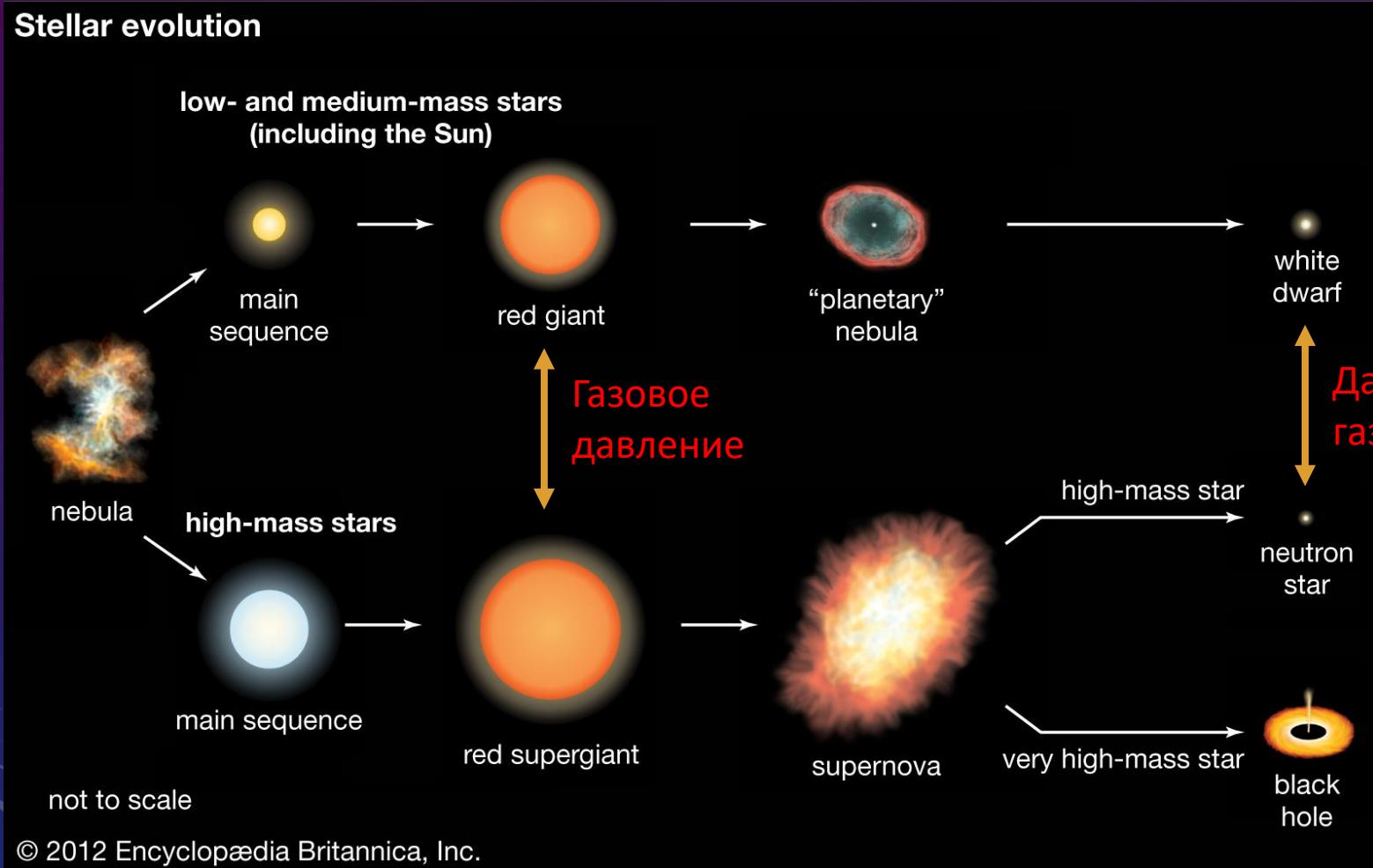


<http://www.astro.ucla.edu/~wright/BBNS.html>



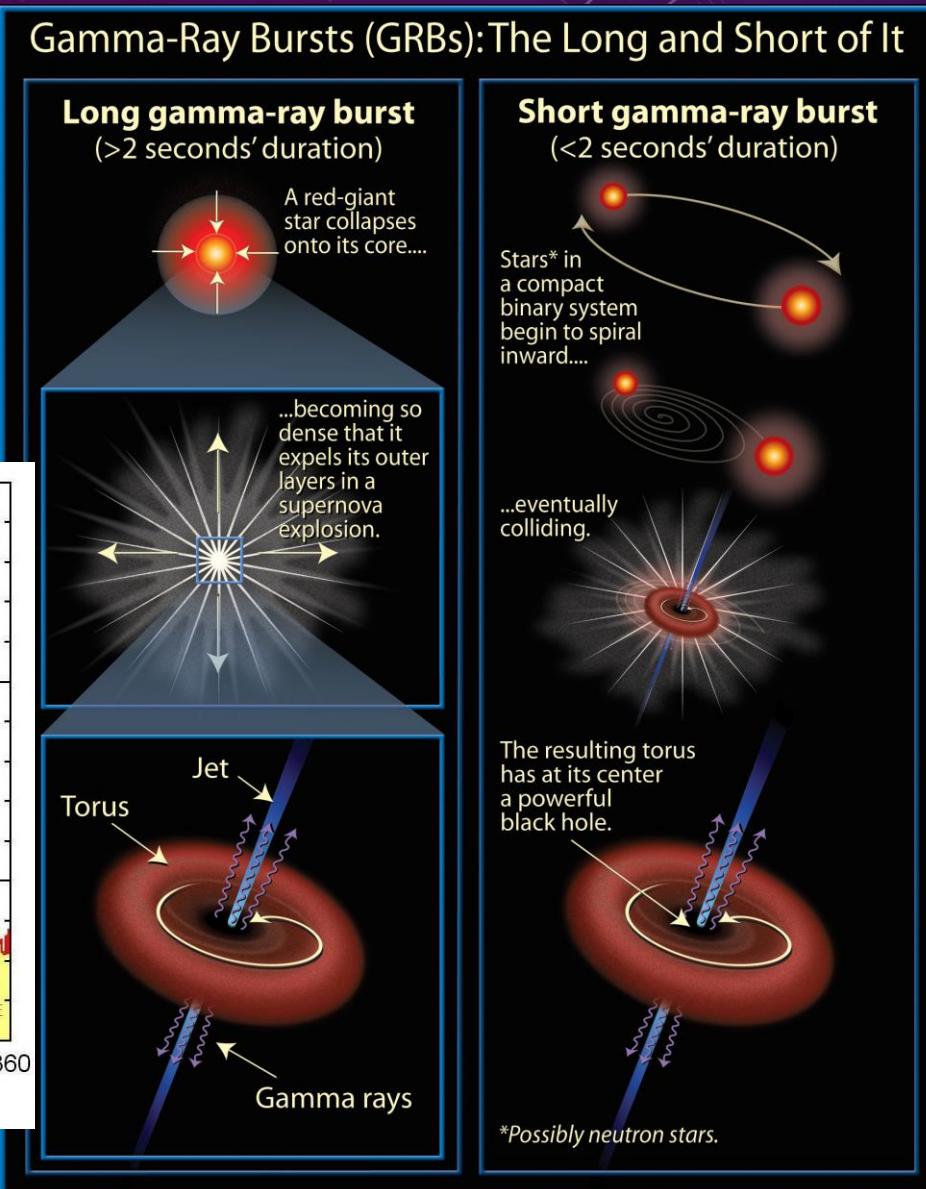
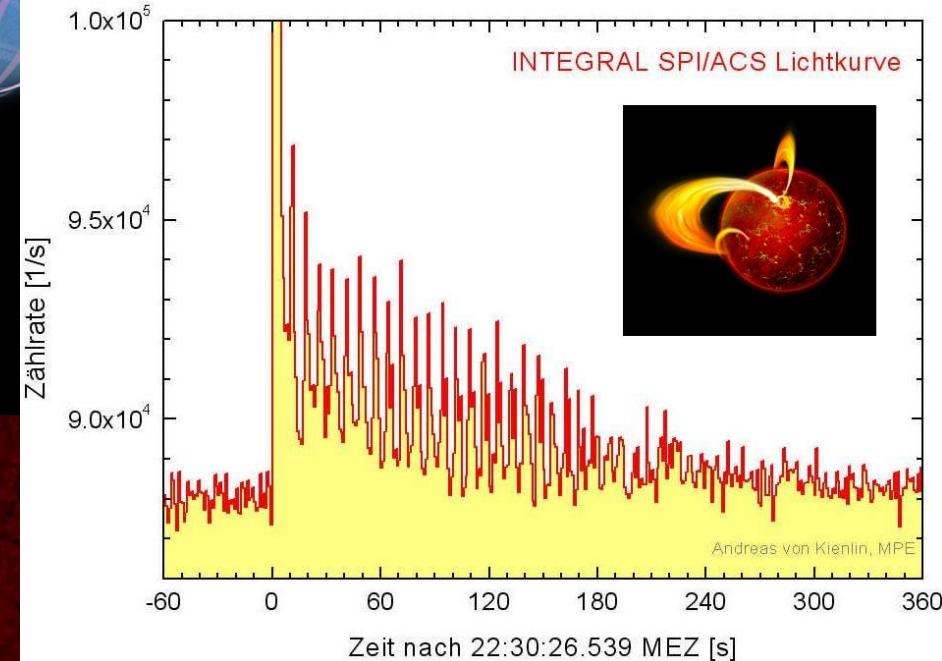
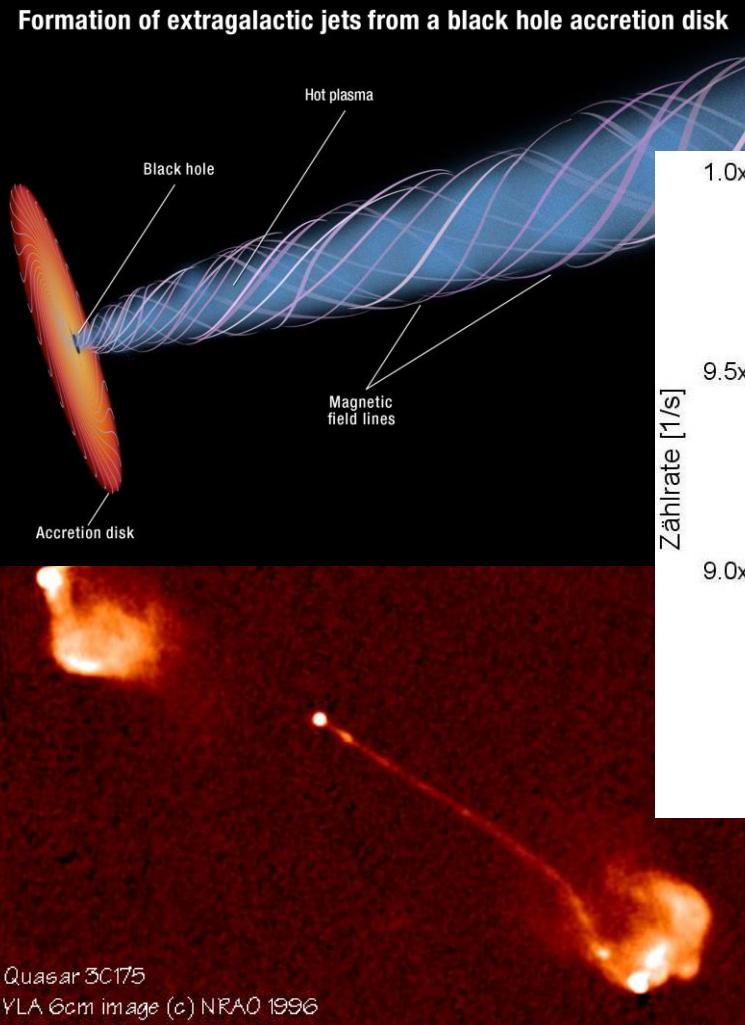
# ЗВЁЗДНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

## Stellar evolution

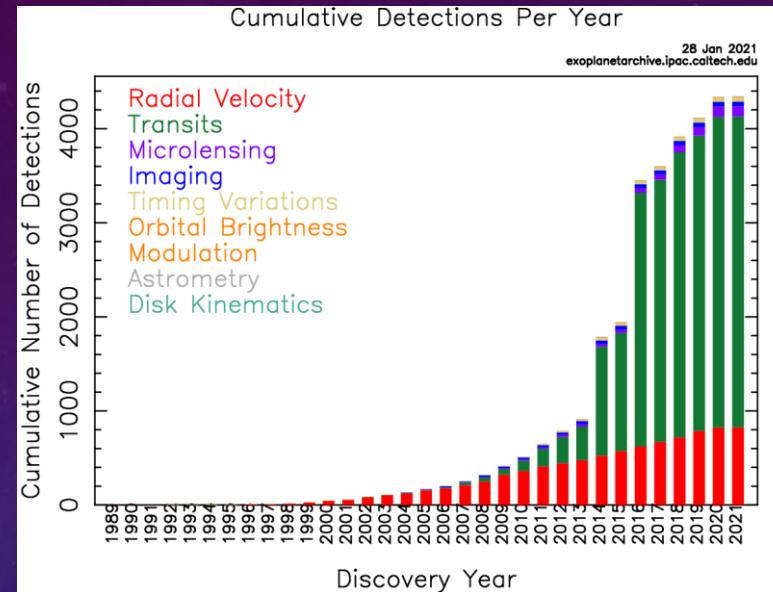
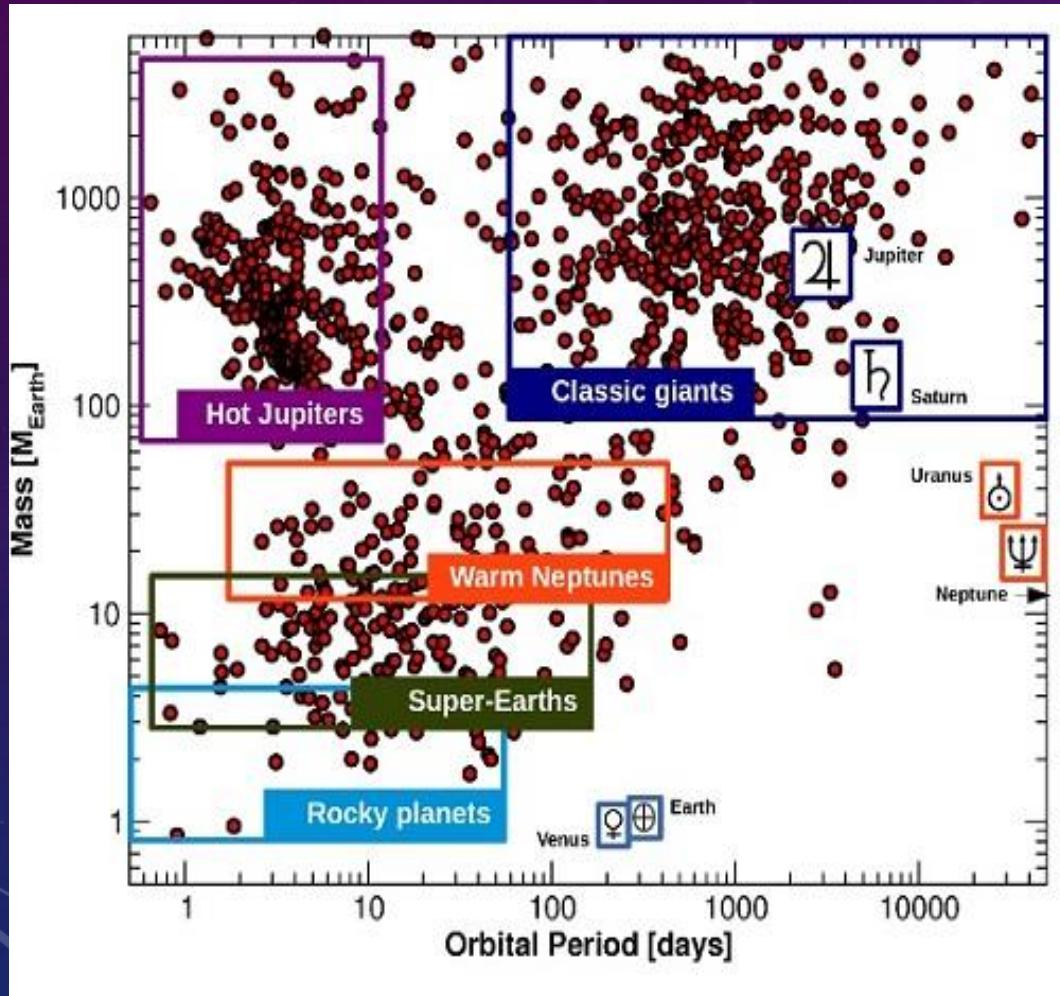


$$t_{MS} \approx 10^{10} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{-2} \text{ лет}$$

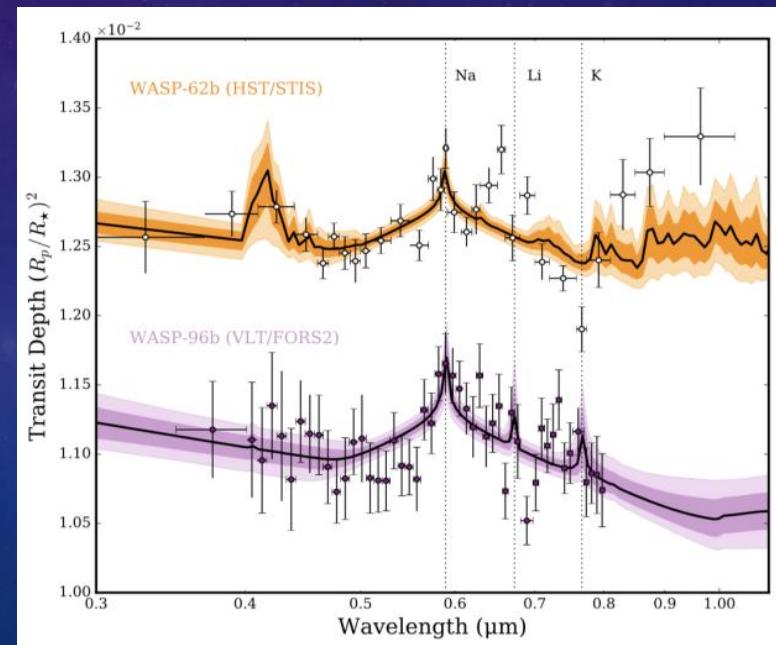
# КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



# ПЛАНЕТЫ

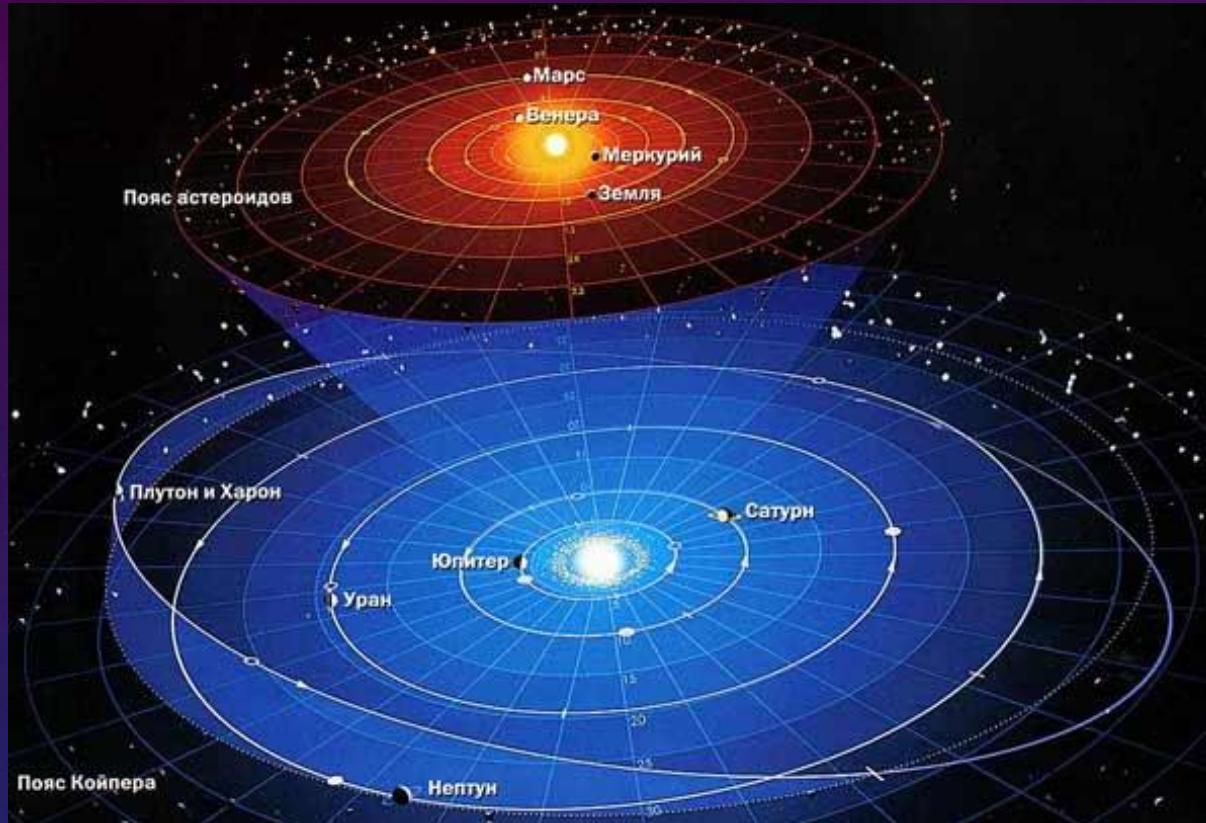


<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>



<https://wasp-planets.net/2020/11/13/wasp-62b-in-james-webbs-continuous-viewing-zone-has-a-clear-atmosphere/>

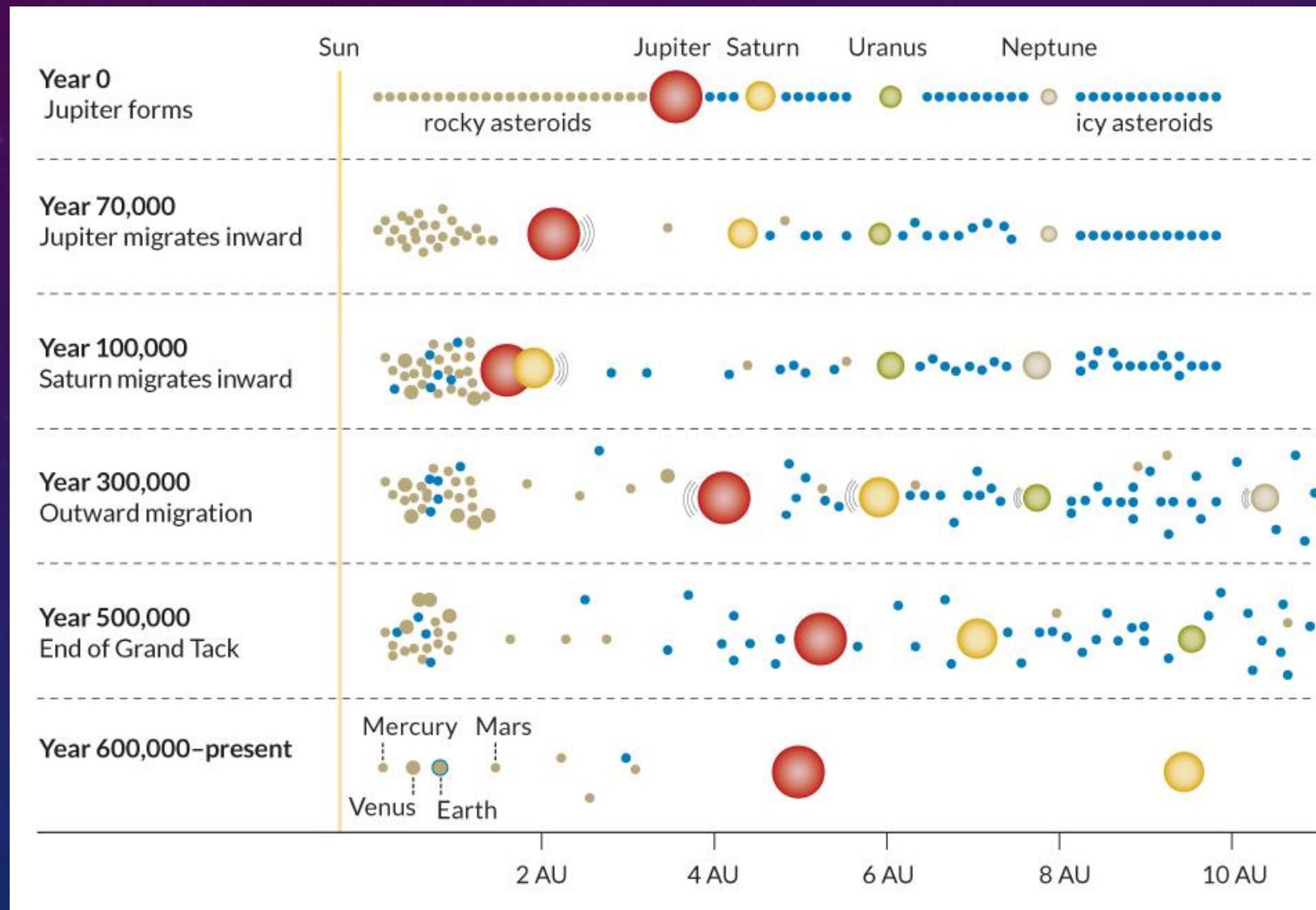
# СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА



Планеты СС:

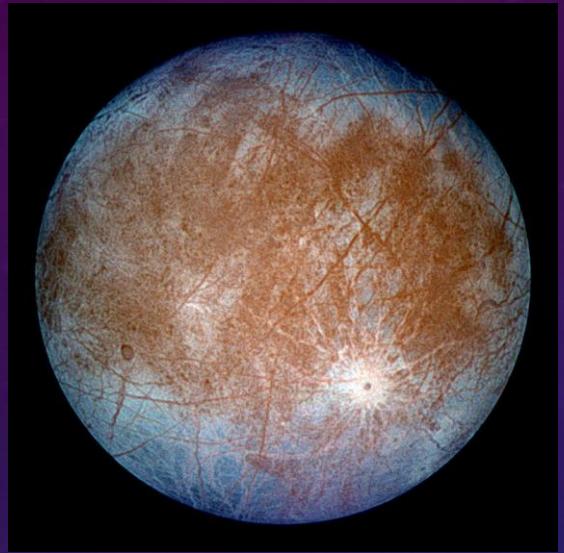
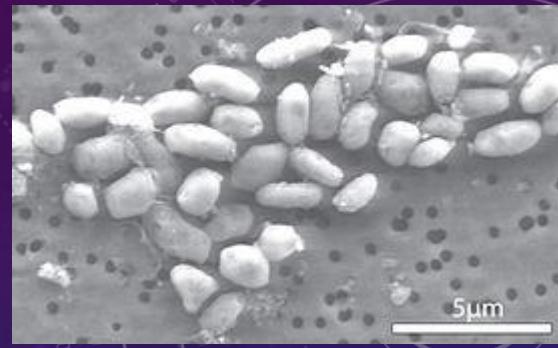
- 8 больших ( $M: 0.055 - 318$ ;  $R: 0.38 - 11.2$ )
- 5+ карликовых
- 600 тыс. малых (астероидов)
- 20 тыс. с именами
- 100 млн. всего «замеченных»

# СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА: ФОРМИРОВАНИЕ



# НАДЕЖДЫ НА ЖИЗНЬ

GFAJ-1: А как хорошо начиналось... :-(

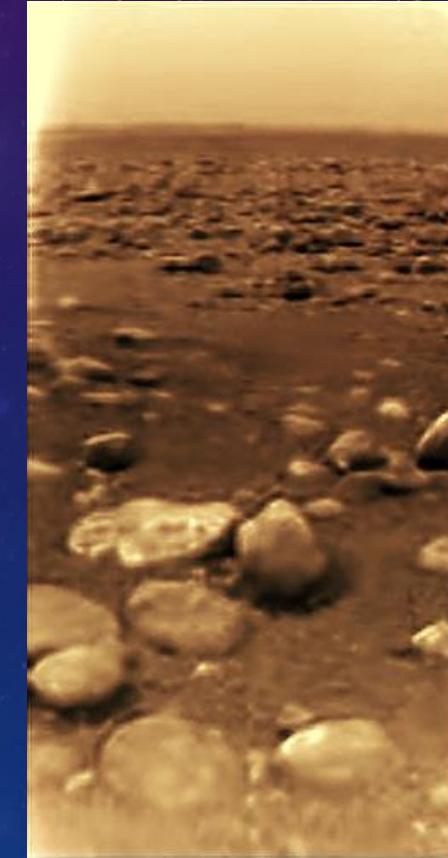


Спутники больших планет.

Поверхность – лед.

Разогреваются приливными взаимодействиями?

Европа: под слоем льда (10-30 км) находится жидкий водяной океан (глубиной до ~ 100 км)?

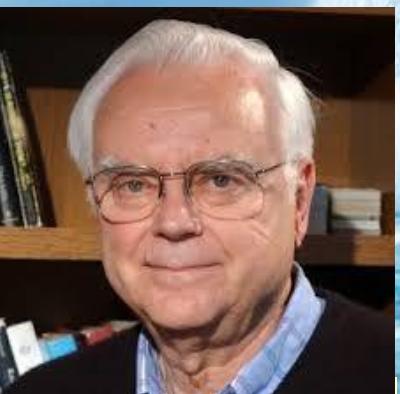
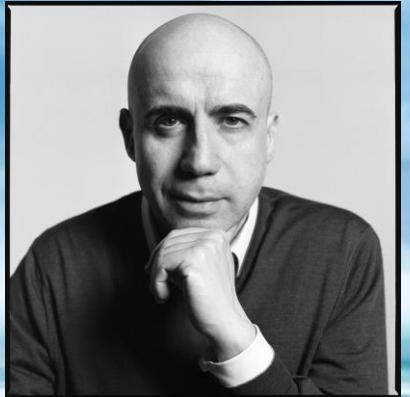


JUICE (ESA) – старт в июне 2022 г.?

Спасибо! ☺

# РАЗУМНАЯ ЖИЗНЬ?

<https://breakthroughinitiatives.org/>



$$N = R \times f_s \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

R average rate of star formation

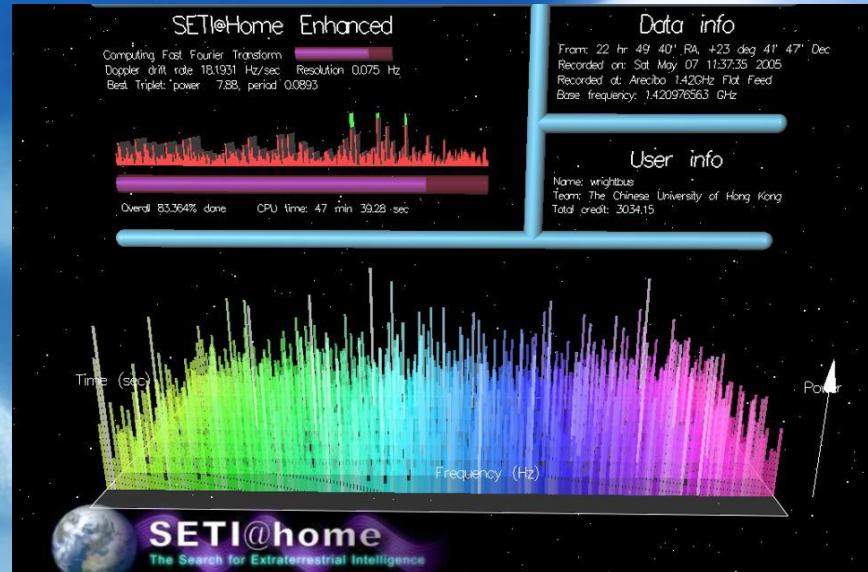
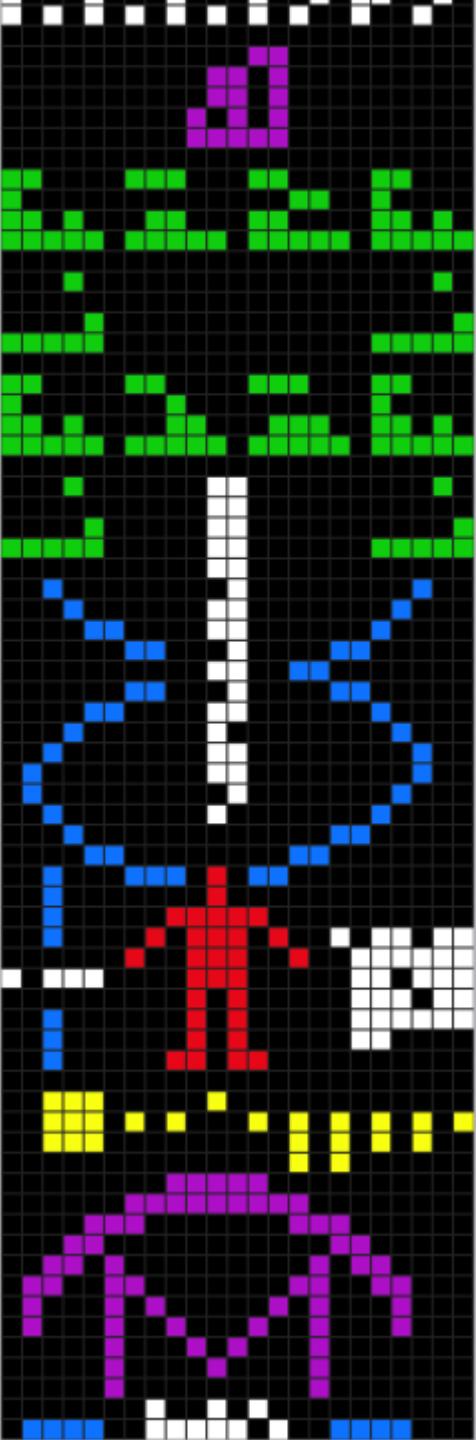
$f_s$  fraction of good stars that have planetary systems

$n_e$  number of planets around these stars within an “ecoshell”

$f_l$  fraction of those planets where life develops

$f_i$  fraction of living species that develop intelligence

$f_c$  fraction of intelligent species with communications technology



<https://boinc.berkeley.edu/projects.php>



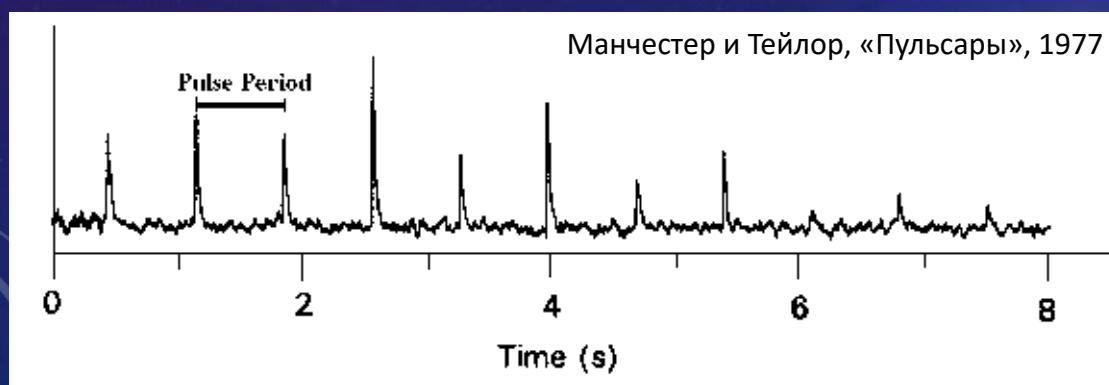
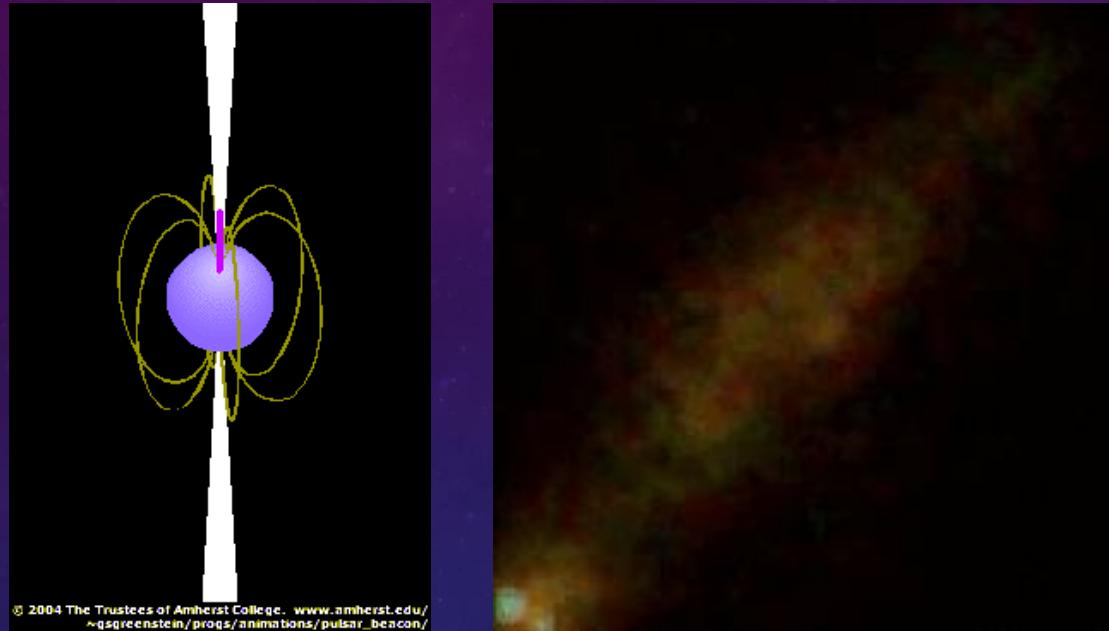
<https://www.seti.org/>

# ТАКАЯ РАЗНАЯ АСТРОФИЗИКА

(СЕМИНАР 1. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

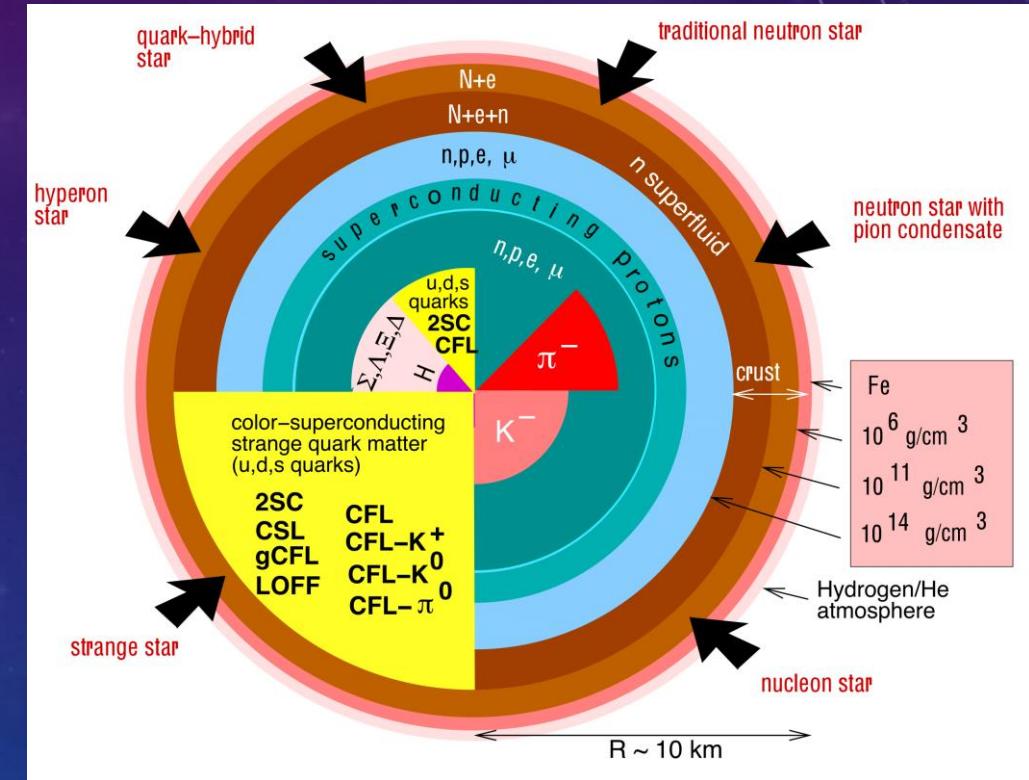
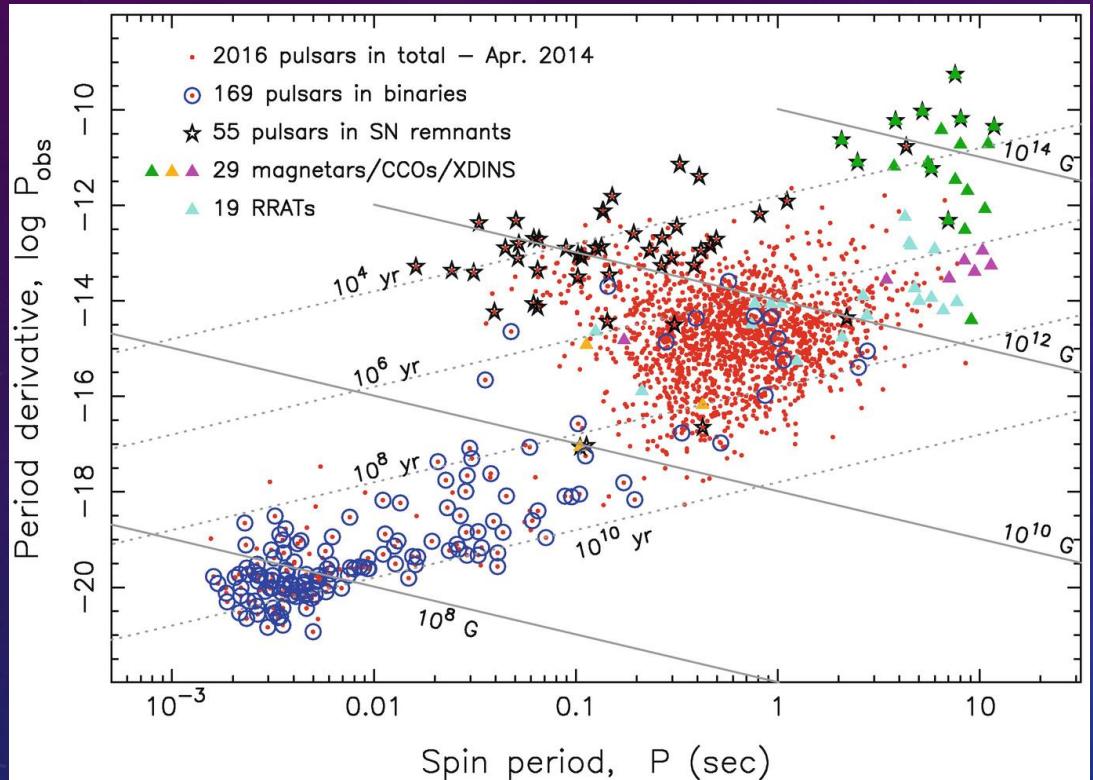
# ЗАДАЧА 1.1. НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА



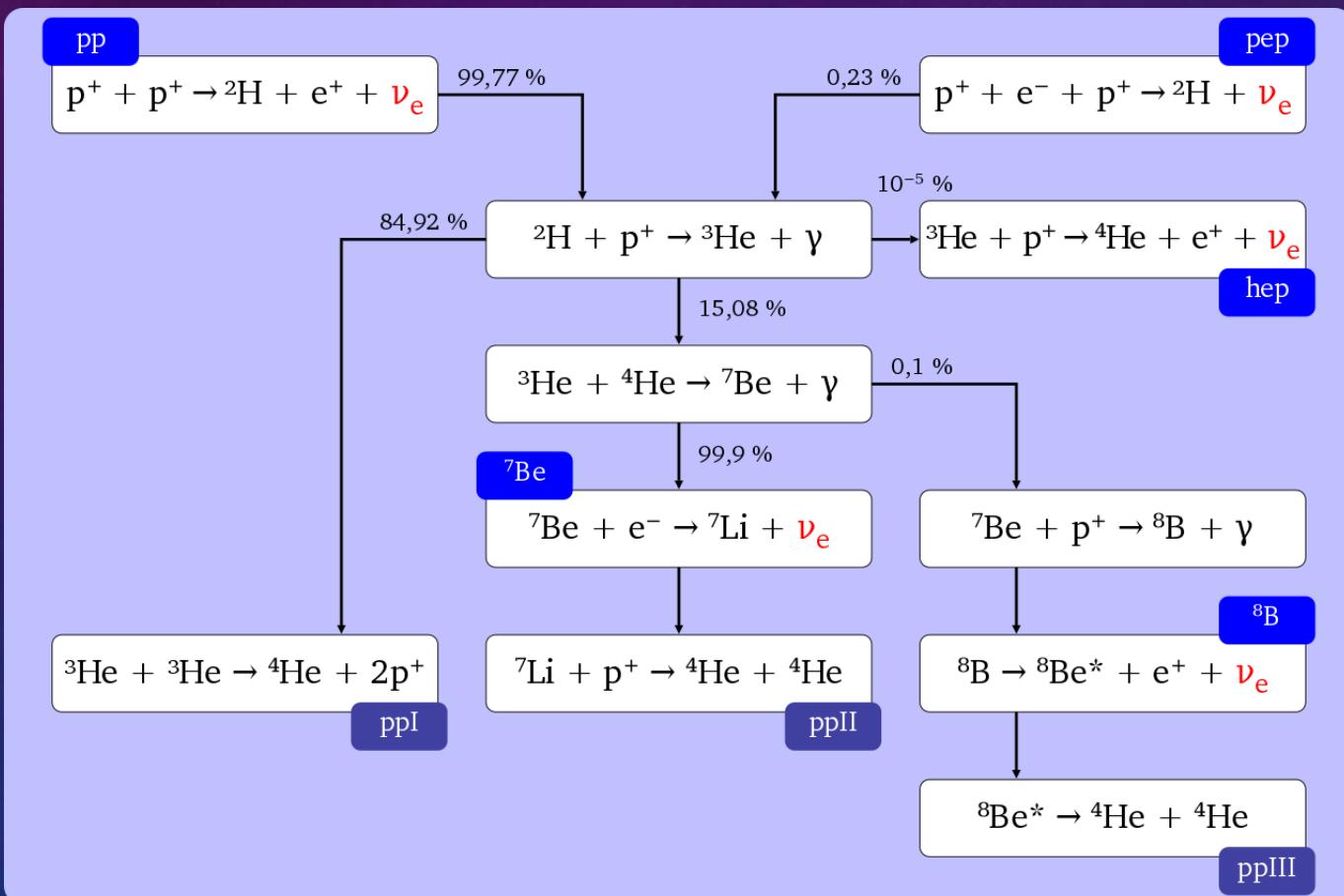
## Схема звёздной эволюции



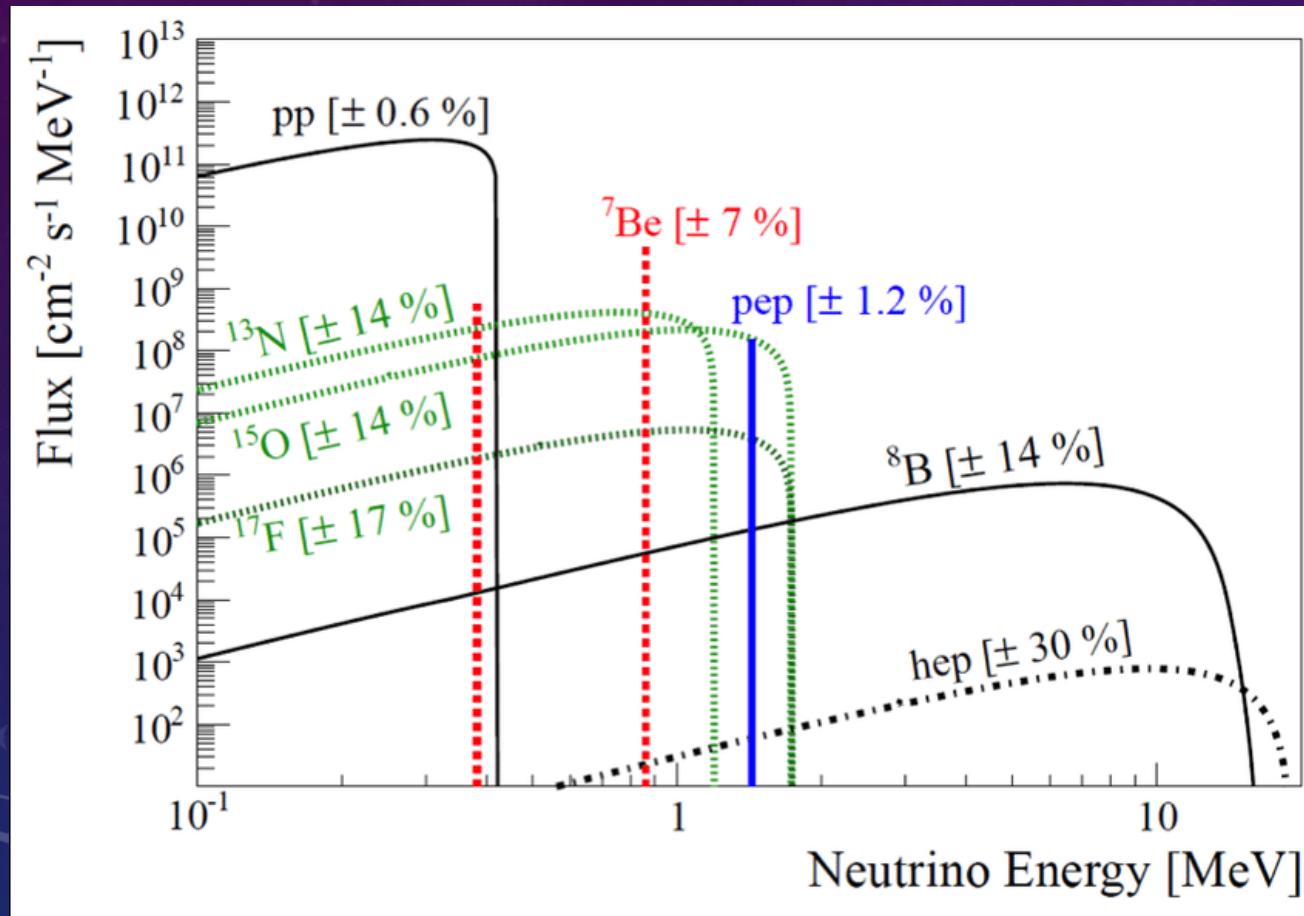
# ЗАДАЧА 1.1. НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА.



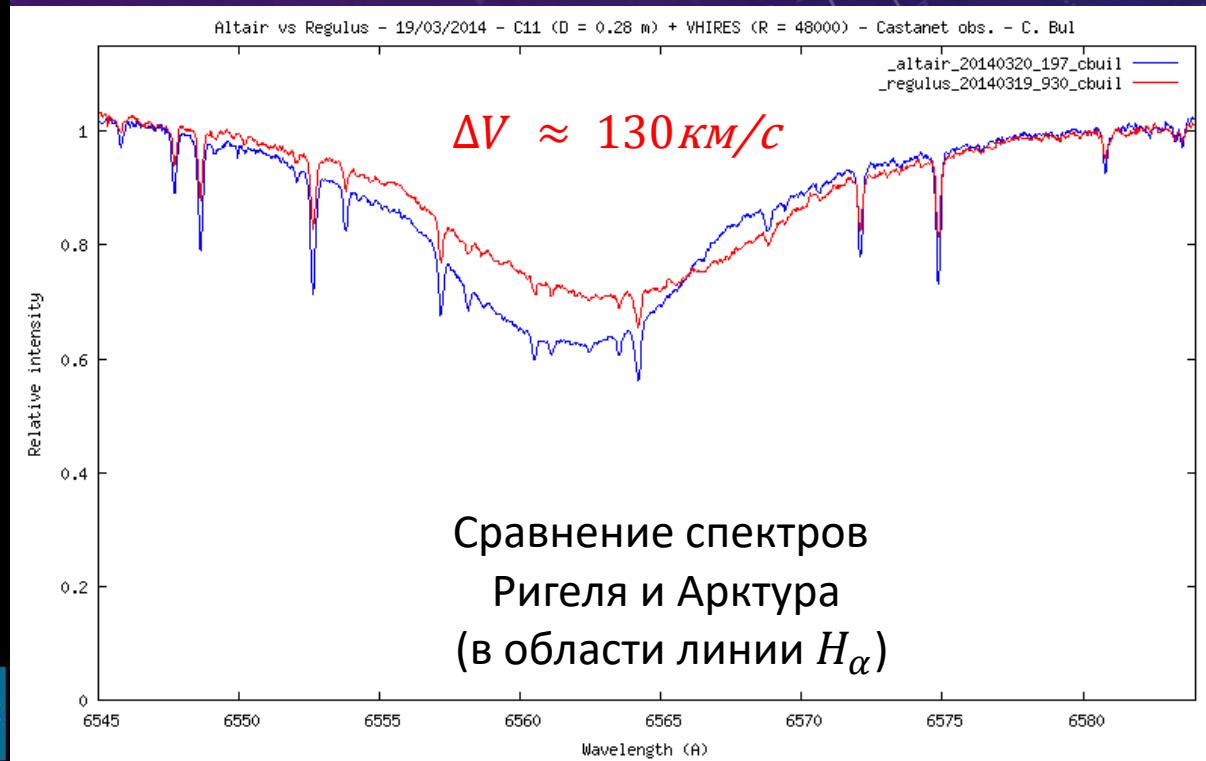
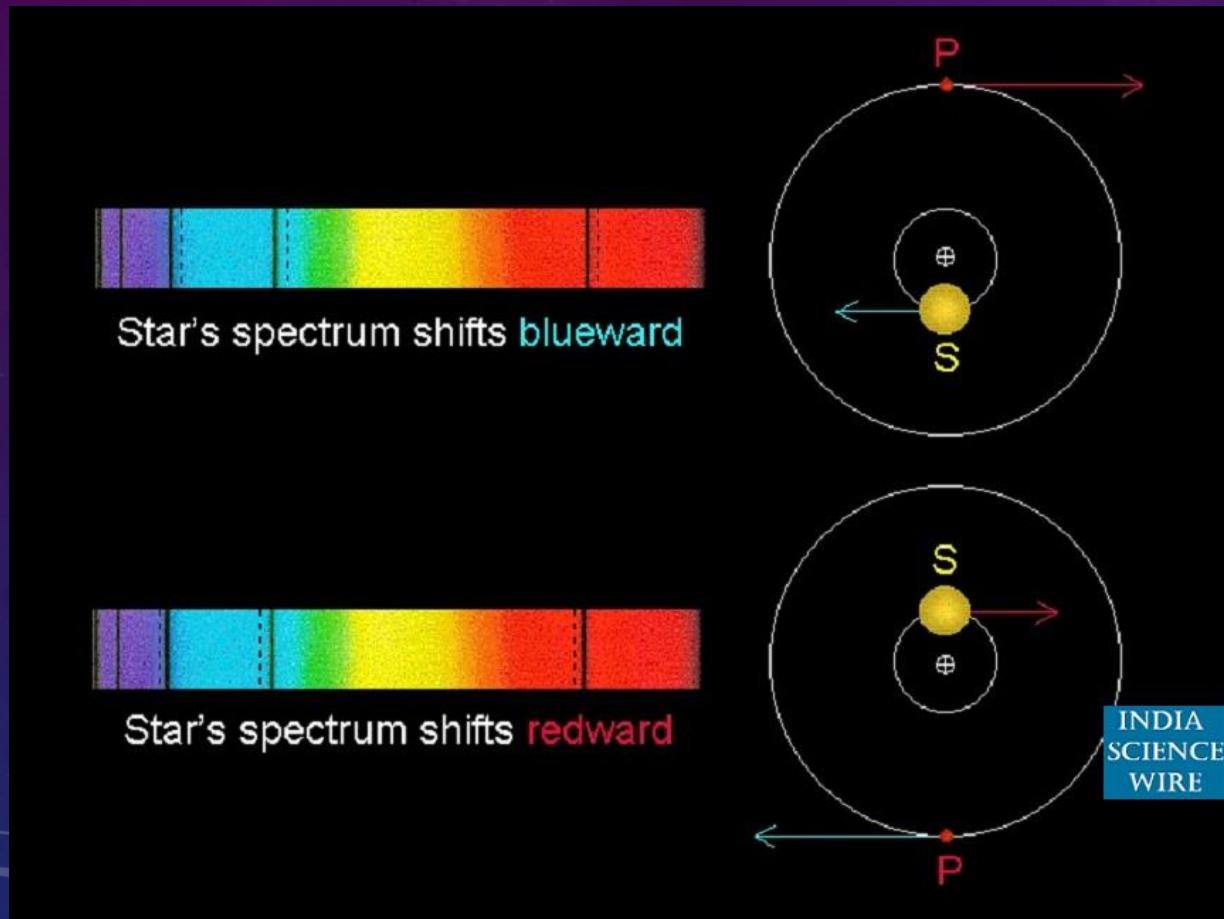
# ЗАДАЧА 1.2. ВРЕМЯ ЖИЗНИ СОЛНЦА



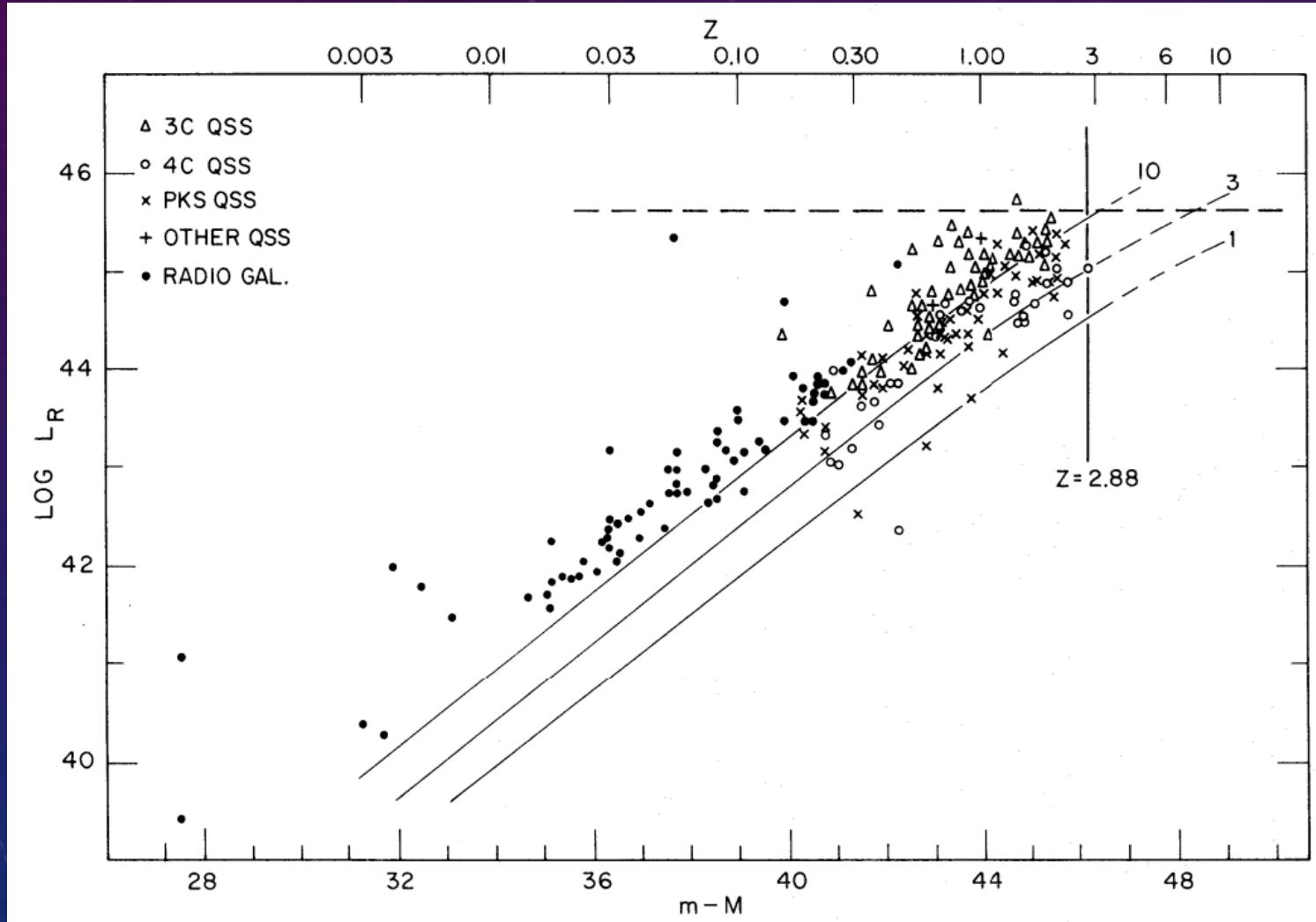
# ЗАДАЧА 1.3. СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО



# ЗАДАЧА 1.4. ЭКЗОПЛАНЕТА



## ЗАДАЧА 1.5: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ



Sandage, 1972,  
Astrophys. J., 178, 25

Спасибо! ☺

# КАК ЭТО ПОНИМАТЬ?

Math club (from Shaker Heights, OH) wrote a song from first 50 digits of pi:

B	middle C	D	E	F	G	A	B	C	D
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

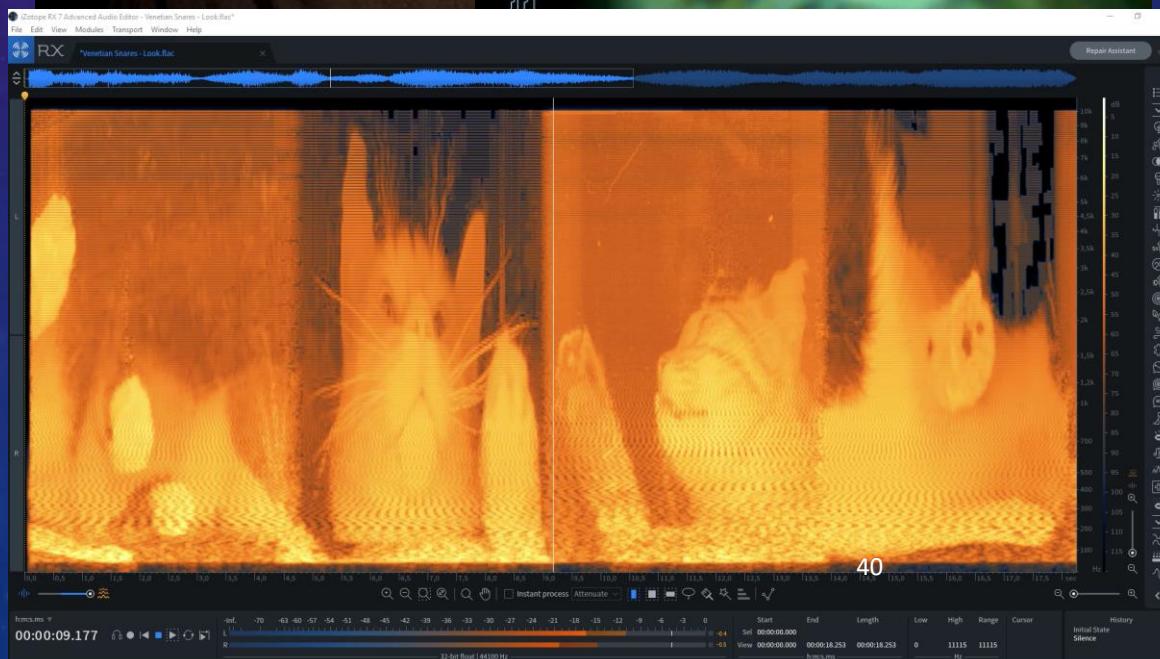
(see April 1987 Mathematics Teacher)

The musical score consists of three staves of music. The top staff starts with a treble clef, the middle with an alto clef, and the bottom with a bass clef. The notes are represented by dots on the staff, with stems and small circles indicating pitch and rhythm. Chords are indicated by Roman numerals and lowercase letters (e.g., Em7, Dm, G7). The lyrics are written below the notes, corresponding to the first 50 digits of pi. The lyrics include:  
3 1 4 1 5 9 2 6 5 3 5 8 9 7 9 3 2  
Math-e-ma-tics mu-sic holds a fan-ta-sy. Cir-cle round the an-swer;  
3 8 4 6 2 6 4 3 3 8 3 2 7 9 5 0 2 8  
soive the mys-ter-y. Mi-nus one is my co-sine; and my sine is ze-ro.  
8 4 1 9 6 1 6 9 3 9 9 3 7 5 0  
My co-tan-gent's in-fi-nite. Can you guess my name? I am pi!

Аарон Фанк (р. 1975)



venetian snares  
songs about my cats



<https://www.youtube.com/watch?v=wM-x3pUcdeo>

<https://www.youtube.com/watch?v=BHup81IEjqo>