

# Астрофизические лаборатории для исследования Вселенной

*М. Ревнивцев*

*Институт Космических Исследований РАН*

+

Во Вселенной существуют  
сверхбольшие/сверхмалые  
температуры, плотности,  
давления, магнитные поля....

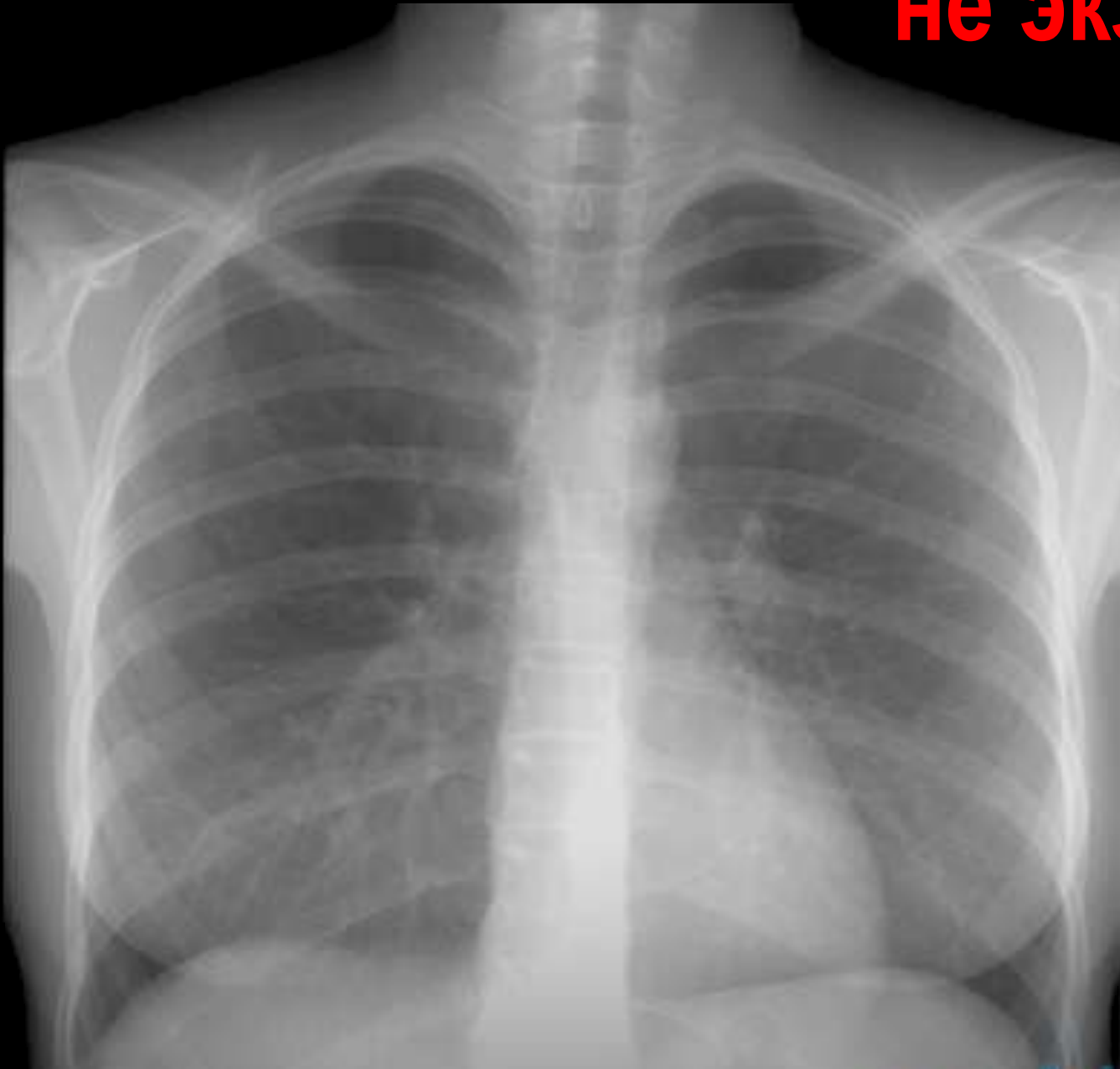
■

Безконтактные методы  
исследования, нет влияния на  
постановку эксперимента

+ безопасно

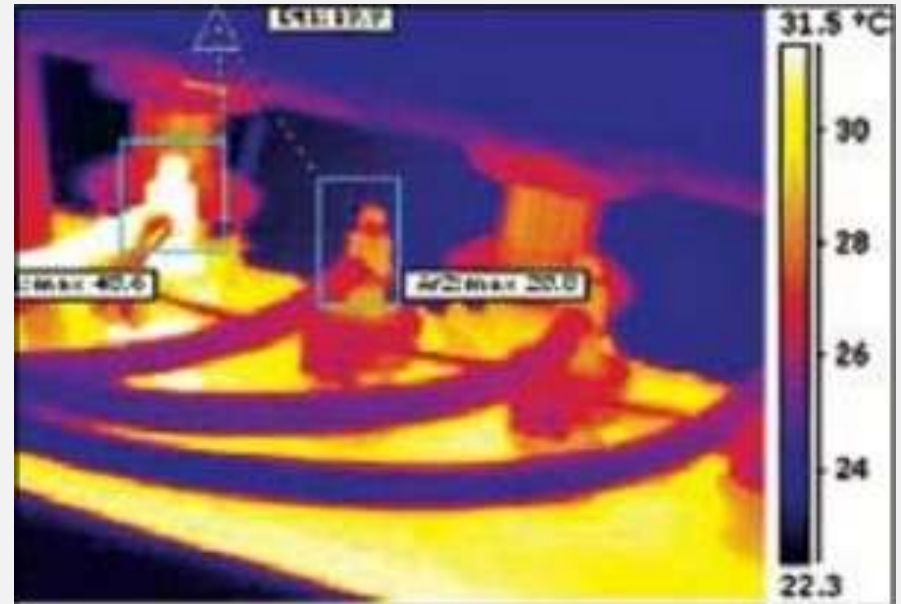
# Бесконтактные методы – не экзотика

PATIENT: 3941 399820471 1

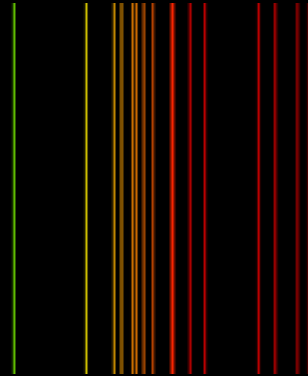




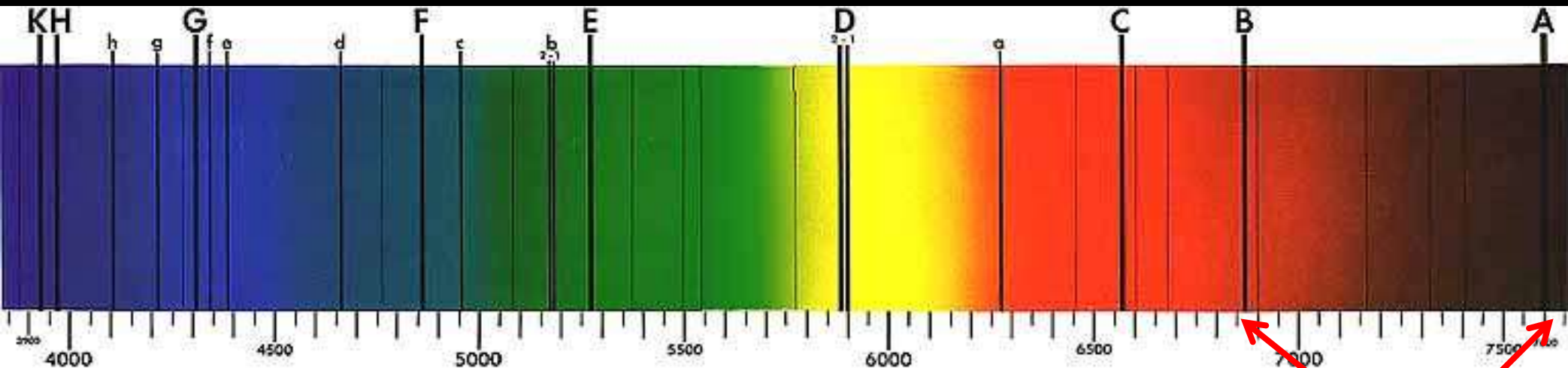
# Бесконтактные методы – не экзотика



# Бесконтактные методы – не экзотика



Спектр Солнца



Ca

H

Fe

Na

H

O<sub>2</sub>

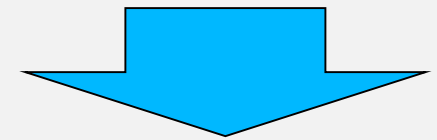
# Измерения масс небесных тел

$$\frac{a^3}{(P/2\pi)^2} = G(M + m),$$

расстояние

+

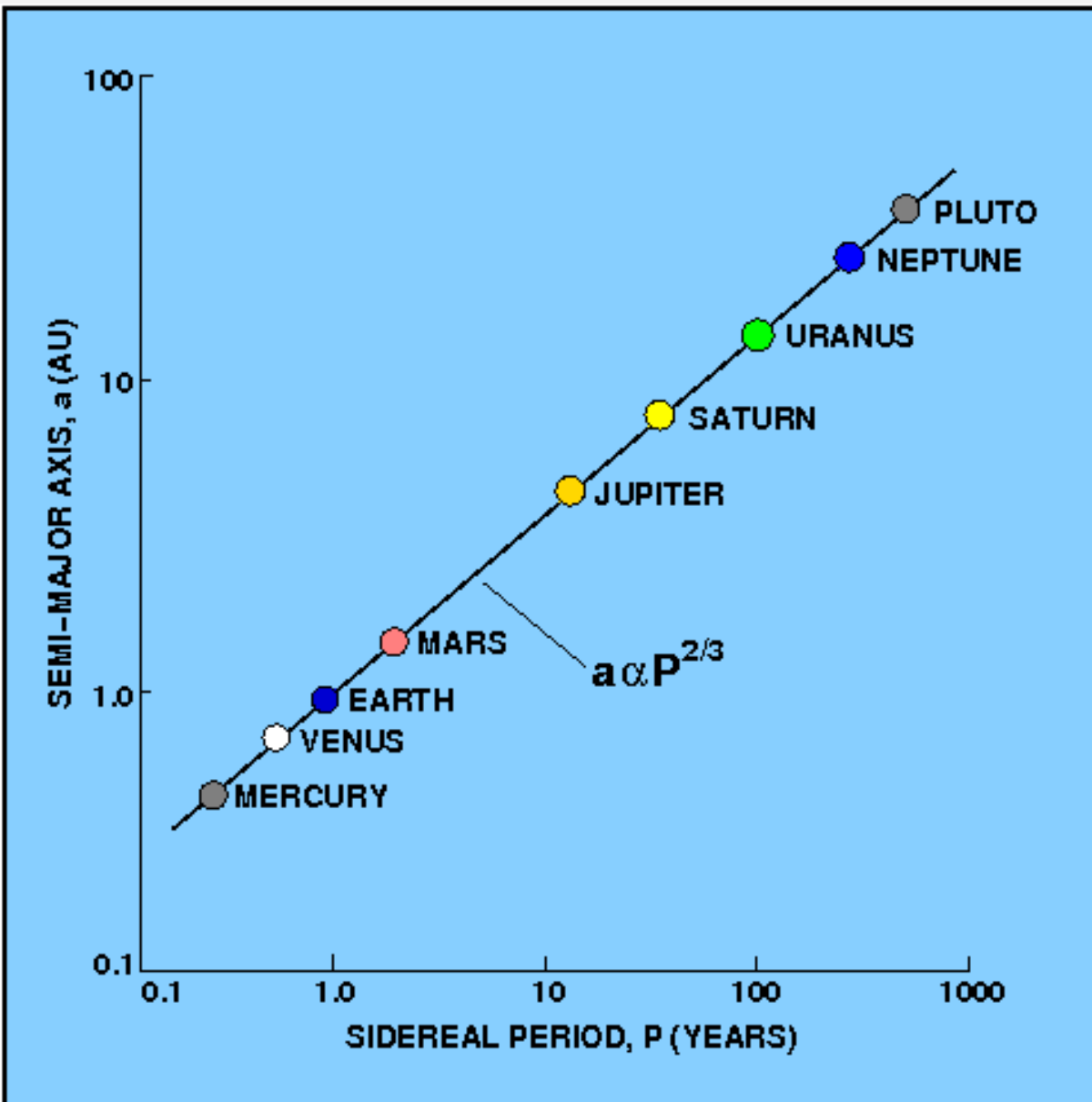
период  
обращения



Масса  
центрального  
тела



# Измерения масс небесных тел

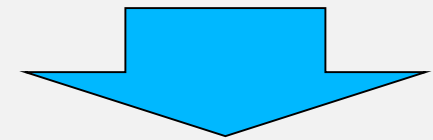


$$\frac{a^3}{(P/2\pi)^2} = G(M + m),$$

расстояние

+

период  
обращения

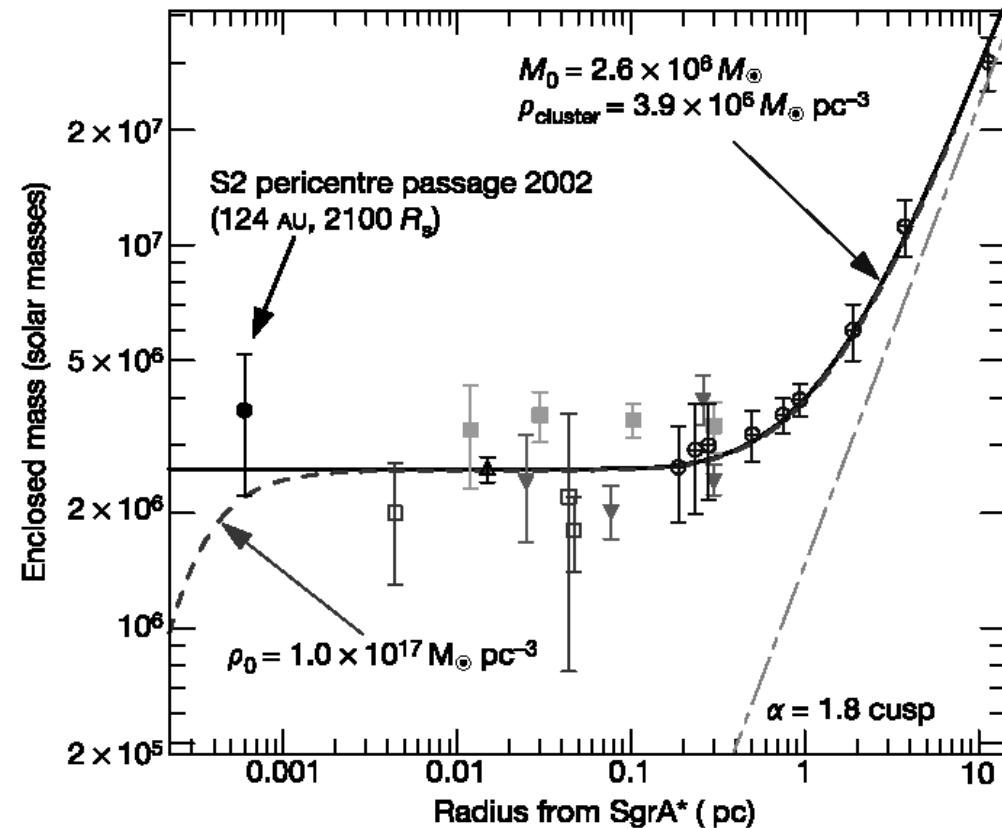


Масса  
центрального  
тела

# Сверхмассивная черная дыра в нашей Галактике: Стрелец А\*

## Черные дыры

$$G(M+m)=a^3 (2\pi)^2/P^2$$





# Непосредственное измерение траекторий звезд

1992

10 light days

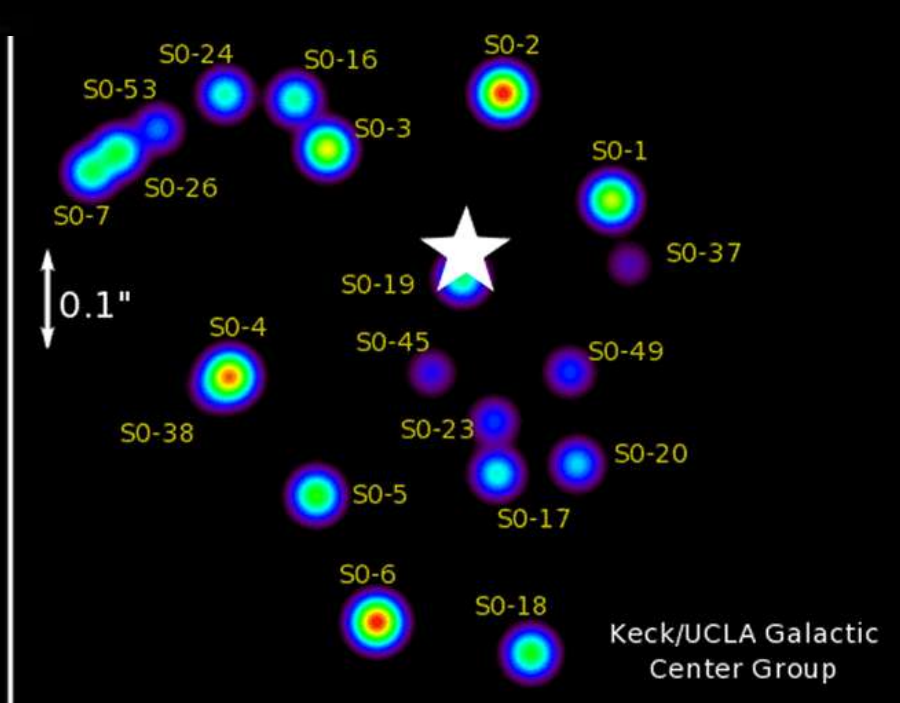
Телескоп  
VLT (8м)

вокруг  
Sgr A\*

1995.5

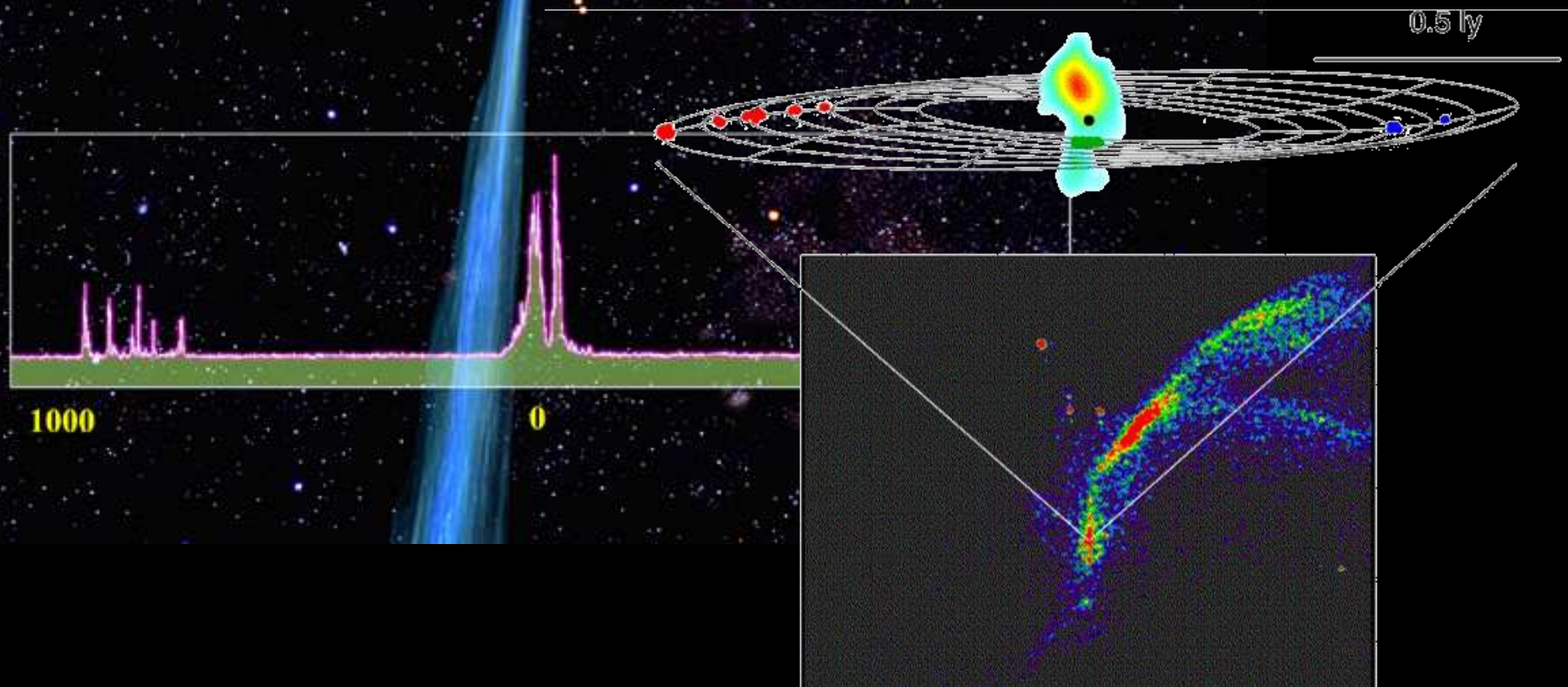
Внутри размера  
~солнечной системы  
~3 миллиона  
Солнечных масс

Телескоп  
Кекс (10м)



# NGC 4268

Измерение скоростей  
в диске по мазерам

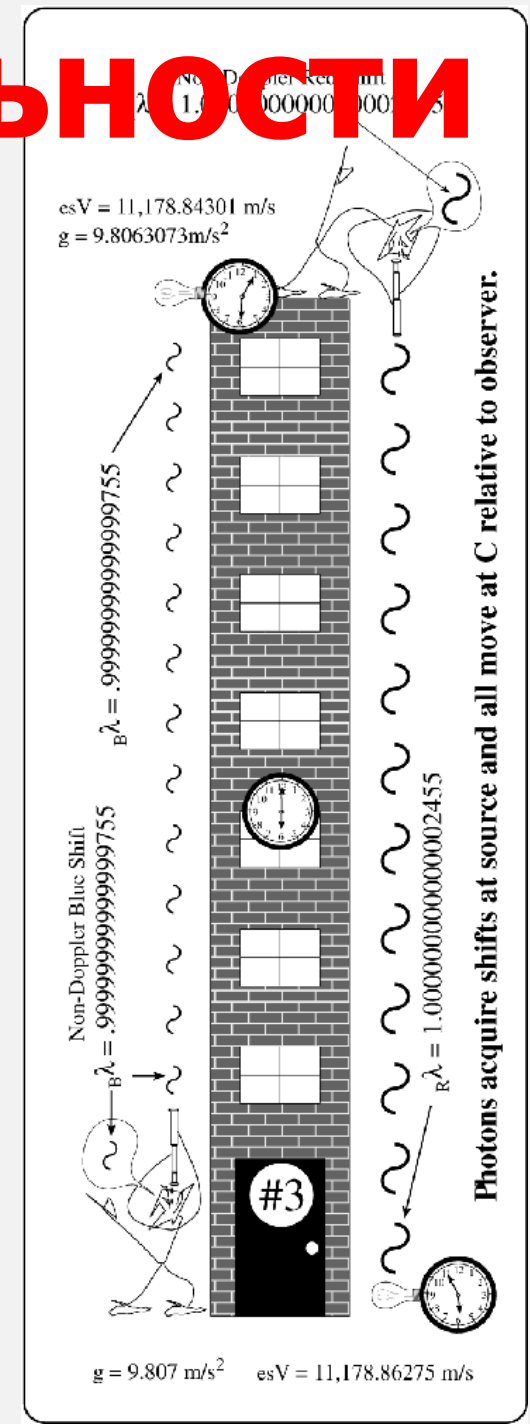


# Проверка общей теории относительности



## Эксперимент Паунда и Ребки

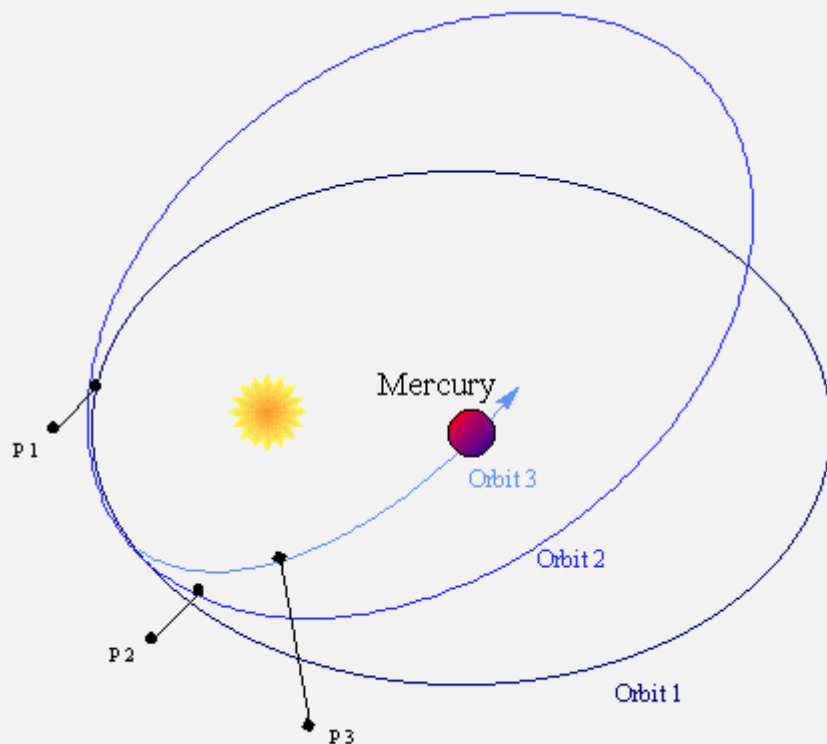
$$\Delta\phi = -\frac{gh}{c^2} = -2,46 \times 10^{-15}$$



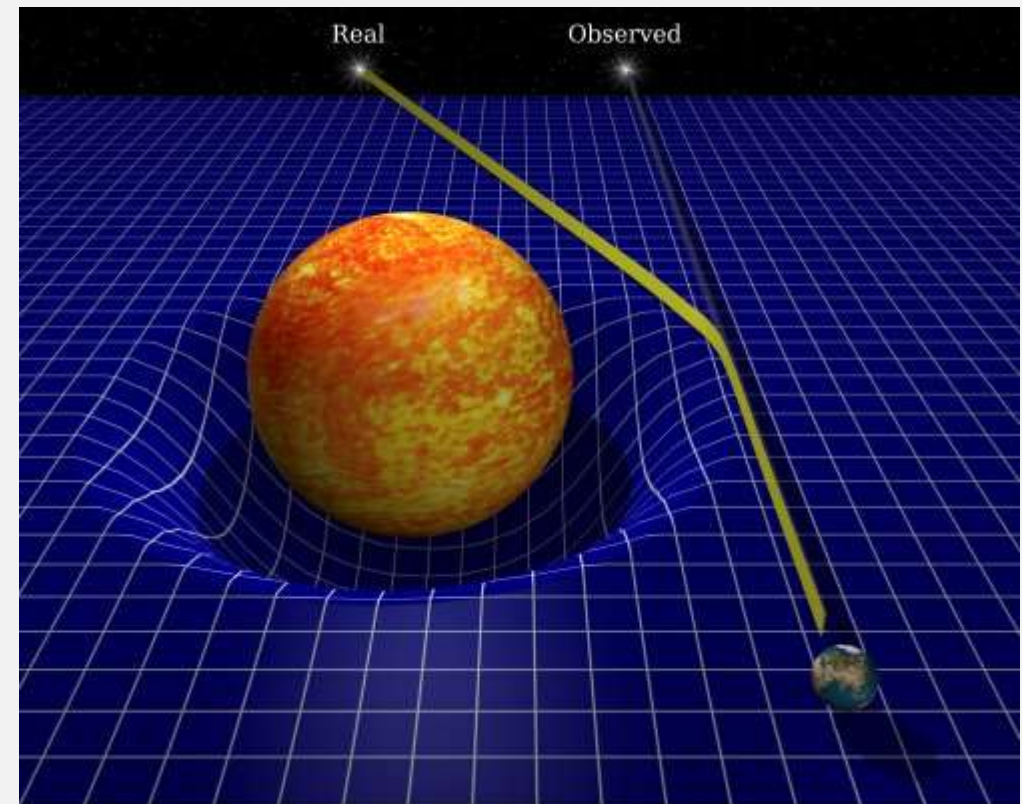


# Тесты в Солнечной системе

Орбита Меркурия



Отклонение света

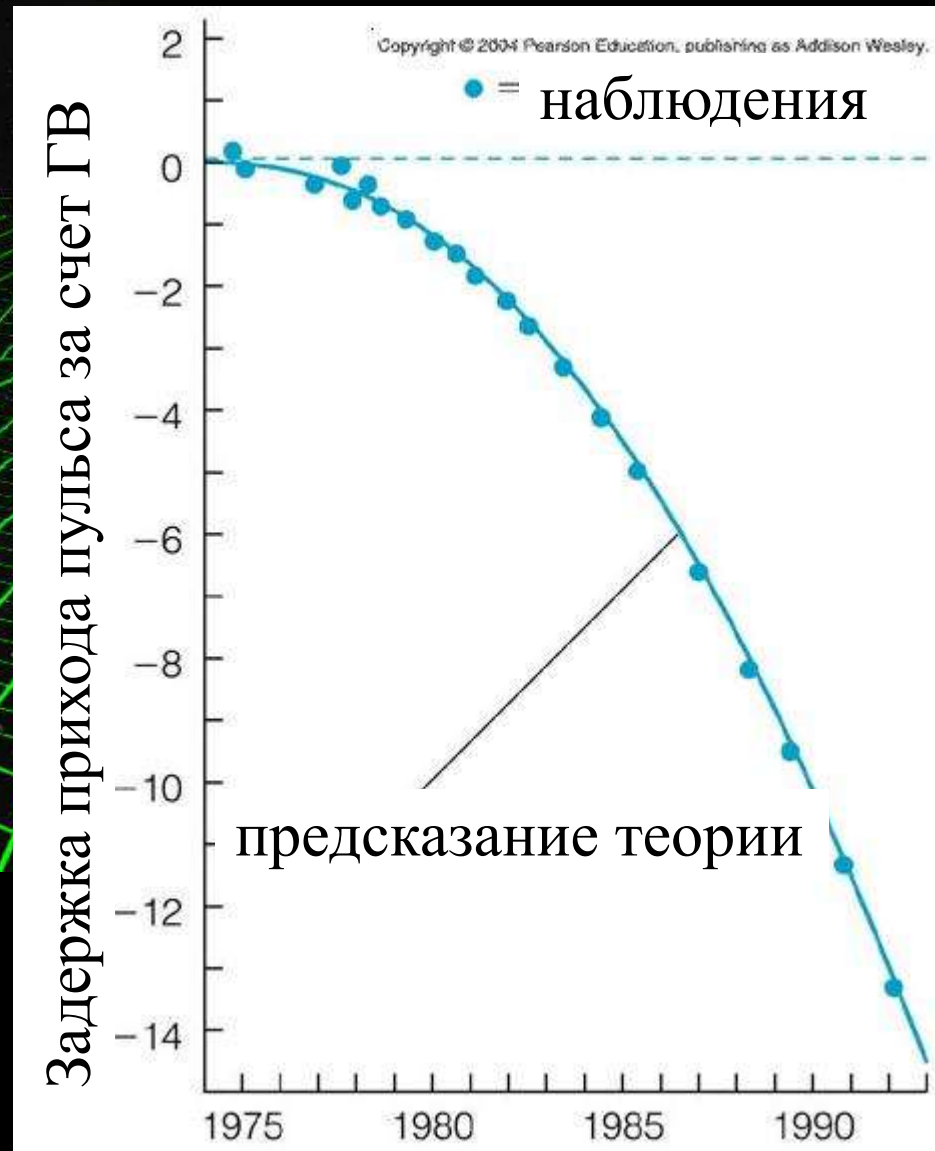
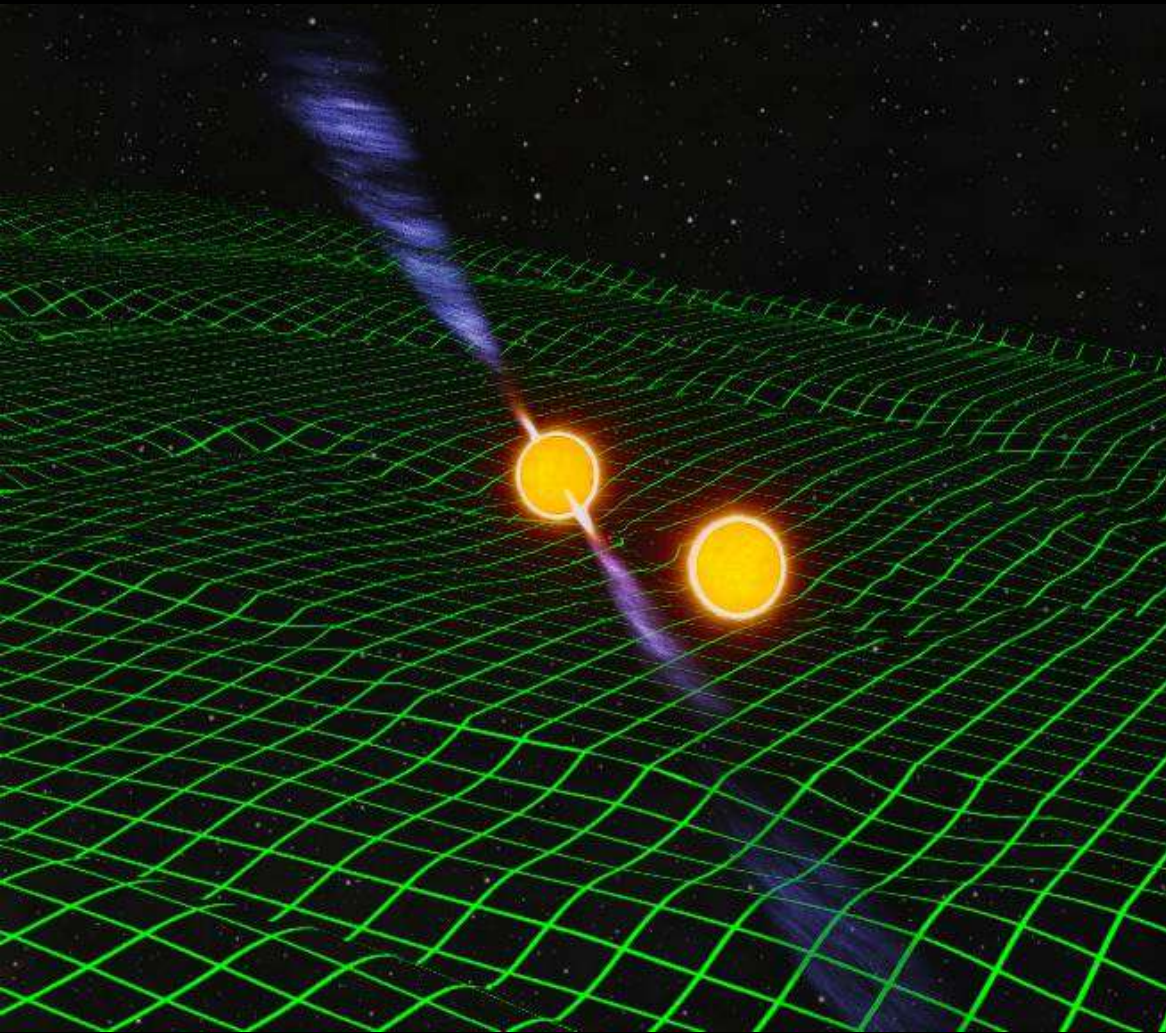


20 May 1947	Brazil	$2.01 \pm 0.27$
25 Feb 1952	Sudan	$1.70 \pm 0.10$
30 Jun 1973	Mauritania	$1.66 \pm 0.19$

расчет = 1.75 угл.секунд



# Гравитационные волны



# Лучший случай - PSR J0737-3039

## Две нейтронные звезды

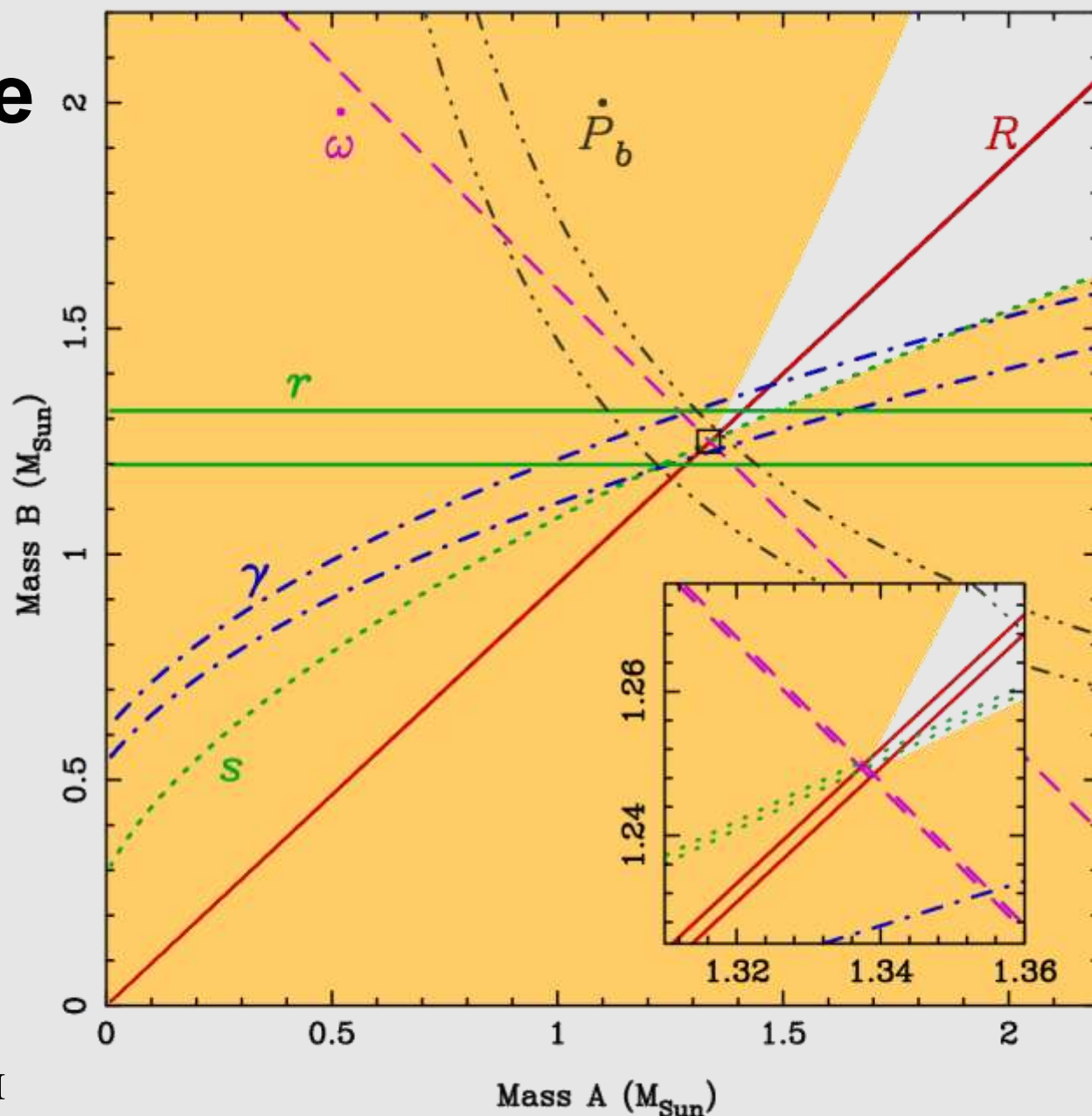
R-отношение масс  
(орбиты)

$\dot{\omega}$ -прецессия орбиты

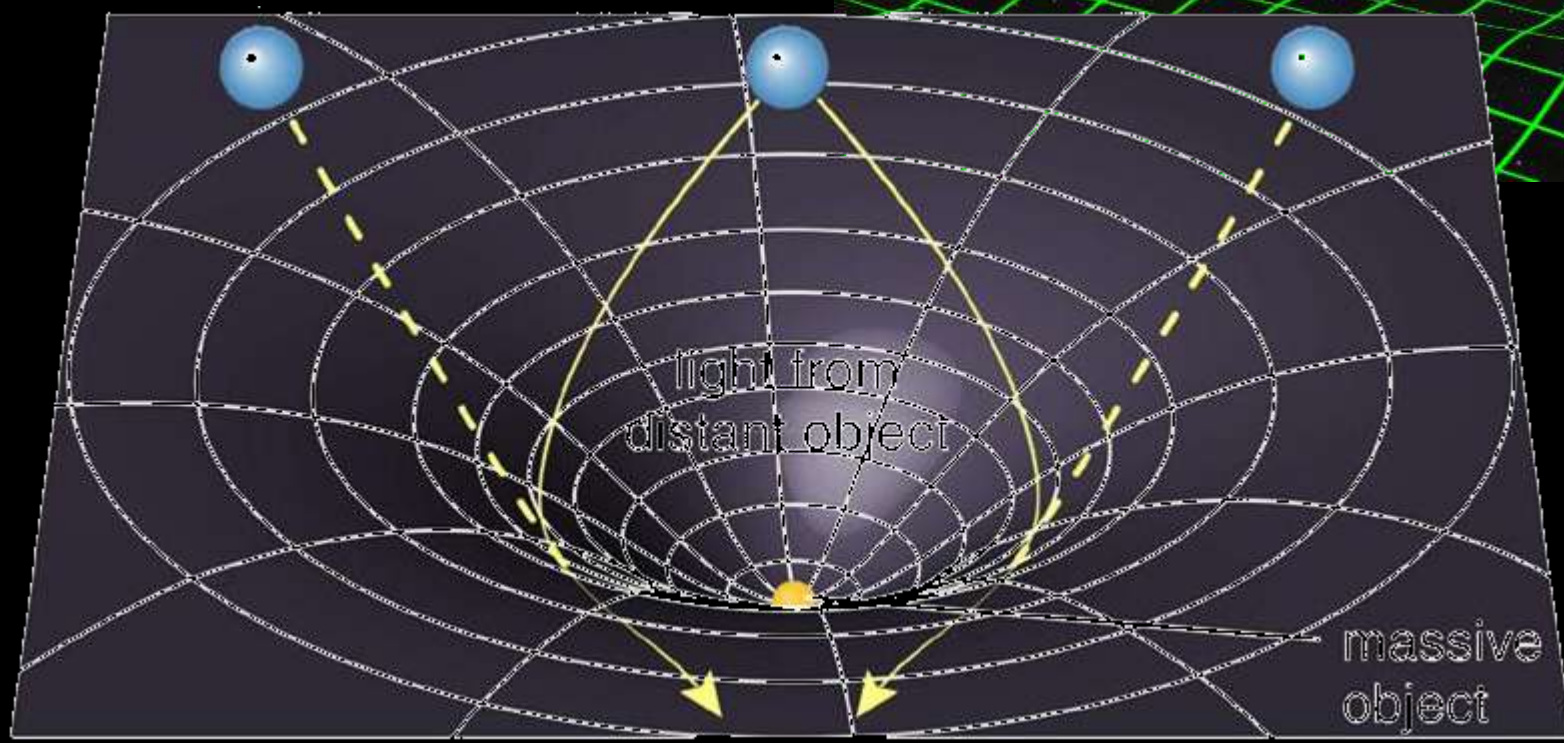
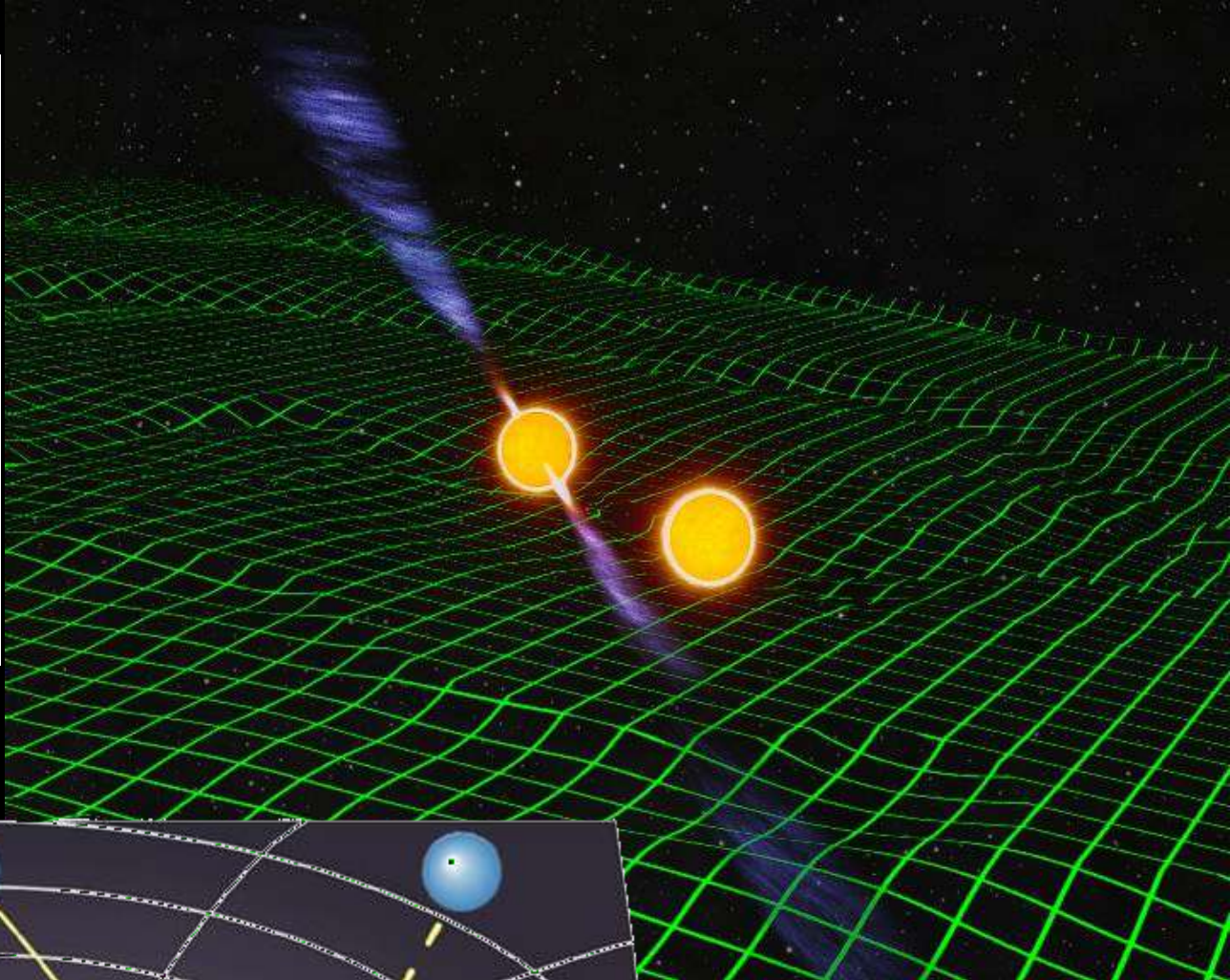
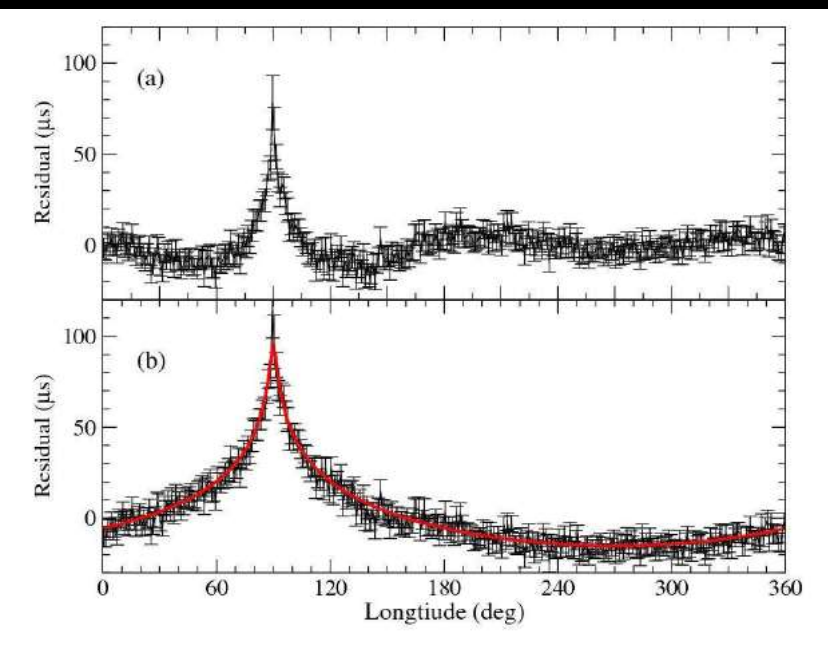
$\dot{P}_b$ -торможение за  
счет ГВ

$r, s$  – задержка сигнала  
времени вблизи  
одной НЗ

$\gamma$  – грав.замедление времени



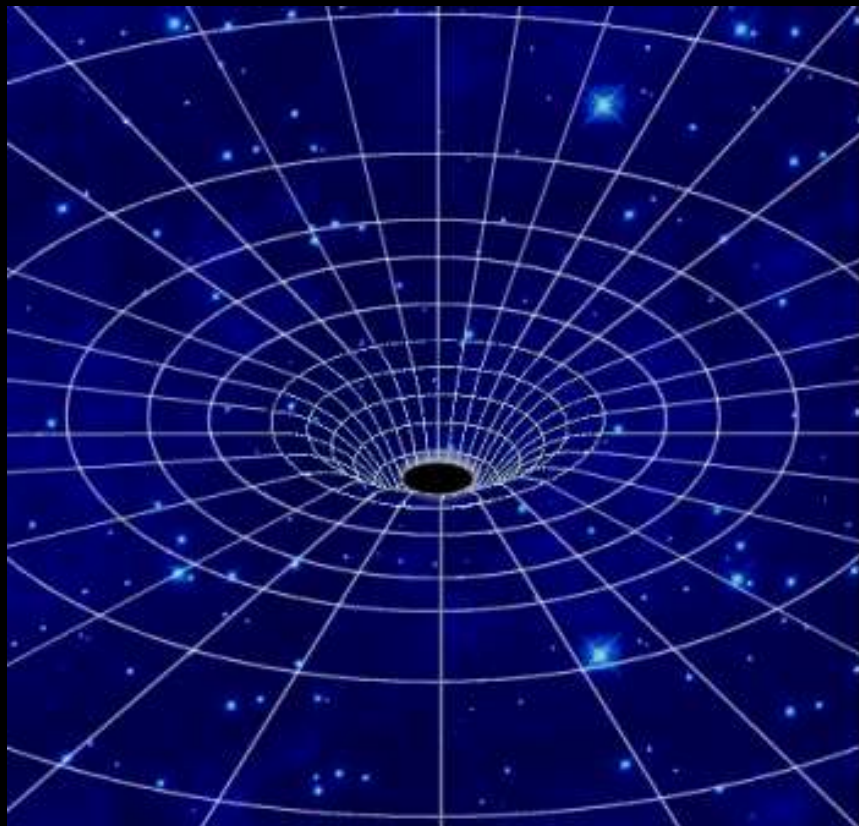




Timing parameter	PSR J0737–3039A	PSR J0737–3039B
Right Ascension $\alpha$	07 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 51 <sup>s</sup> .24927(3)	—
Declination $\delta$	−30°39′40″.7195(5)	—
Proper motion in the RA direction (mas yr <sup>−1</sup> )	−3.3(4)	—
Proper motion in Declination (mas yr <sup>−1</sup> )	2.6(5)	—
Parallax, $\pi$ (mas)	3(2)	—
Spin frequency $\nu$ (Hz)	44.054069392744(2)	0.36056035506(1)
Spin frequency derivative $\dot{\nu}$ (s <sup>−2</sup> )	$−3.4156(1) \times 10^{-15}$	$−0.116(1) \times 10^{-15}$
Timing Epoch (MJD)	53156.0	53156.0
Dispersion measure DM (cm <sup>−3</sup> pc)	48.920(5)	—
Orbital period $P_b$ (day)	0.10225156248(5)	—
Eccentricity $e$	0.0877775(9)	—
Projected semi-major axis $x = (a/c) \sin i$ (s)	1.415032(1)	1.5161(16)
Longitude of periastron $\omega$ (deg)	87.0331(8)	87.0331 + 180.0
Epoch of periastron $T_0$ (MJD)	53155.9074280(2)	—
Advance of periastron $\dot{\omega}$ (deg/yr)	16.89947(68)	[16.96(5)]
Gravitational redshift parameter $\gamma$ (ms)	0.3856(26)	—
Shapiro delay parameter $s$	0.99974(−39, +16)	—
Shapiro delay parameter $r$ ( $\mu$ s)	6.21(33)	—
Orbital period derivative $\dot{P}_b$	$−1.252(17) \times 10^{-12}$	—
Timing data span (MJD)	52760 – 53736	52760 – 53736
Number of time offsets fitted	10	12
RMS timing residual $\sigma$ ( $\mu$ sec)	54	2169
Total proper motion (mas yr <sup>−1</sup> )	4.2(4)	
Distance $d$ (DM) (pc)	$\sim 500$	
Distance $d(\pi)$ (pc)	200 – 1000	
Transverse velocity ( $d = 500$ pc) (km s <sup>−1</sup> )	10(1)	
Orbital inclination angle (deg)	88.69(−76,+50)	
Mass function ( $M_\odot$ )	0.29096571(87)	0.3579(11)
Mass ratio, $R$	1.0714(11)	
Total system mass ( $M_\odot$ )	2.58708(16)	
Neutron star mass ( $m_\odot$ )	1.3381(7)	1.2489(7)



# Можно ли обнаружить черные дыры?



# Основной механизм выделения энергии – аккреция на компактный объект

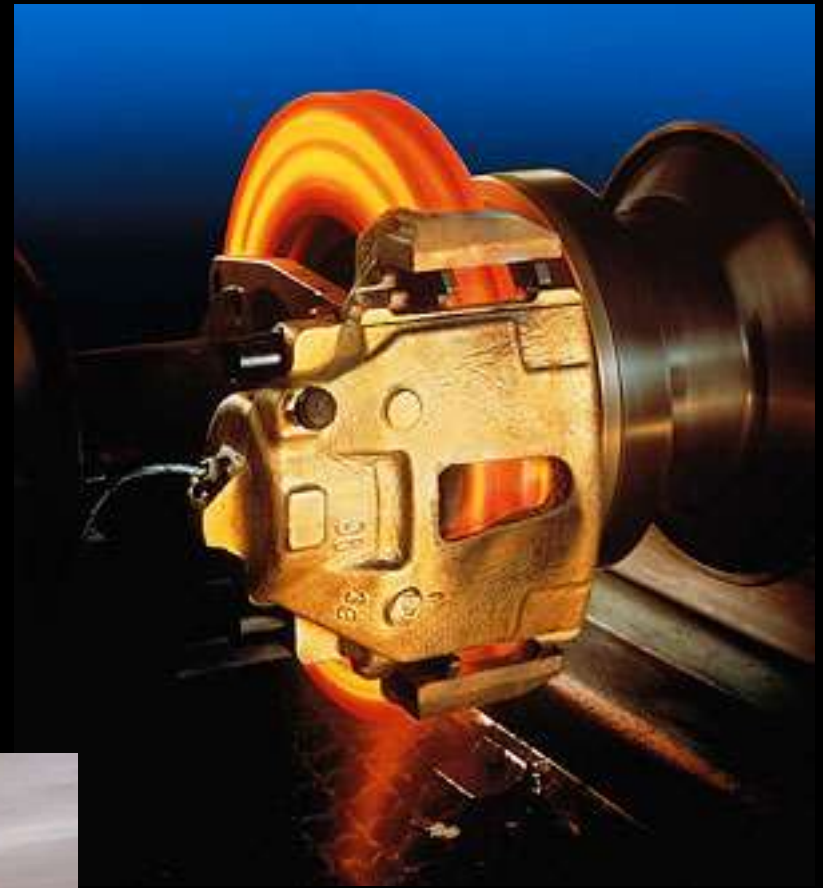
Простейший пример аккреции



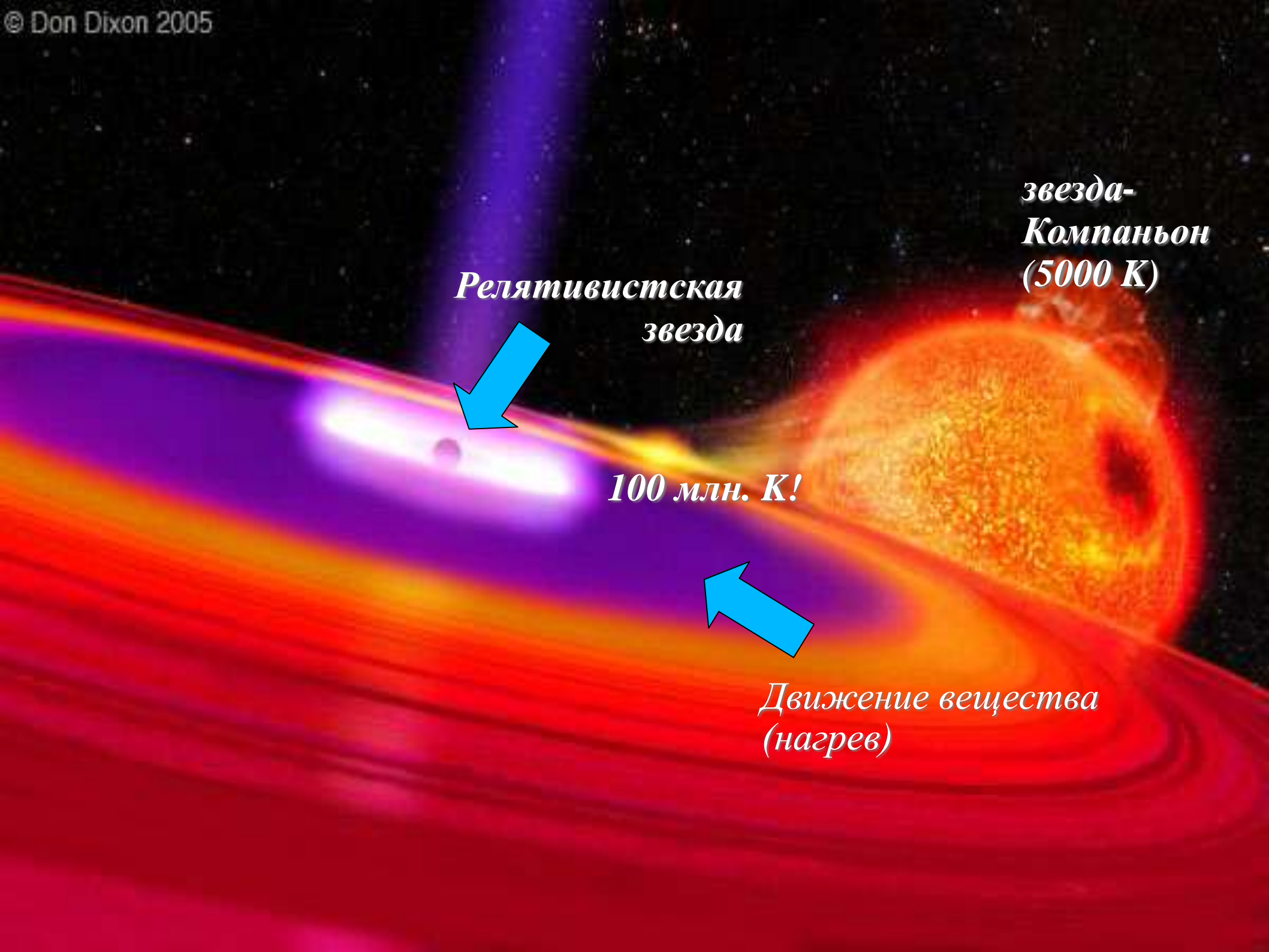
Здесь потенциальная энергия гравитационного поля  
переводится в кинетическую энергию воды

**А уж перевод кинетической  
энергии в тепло –  
самое привычное дело:**

**нагрев тормозных колодок,  
покрышек, дороги...**







звезда-  
Компаньон  
(5000 K)

Релятивистская  
звезда

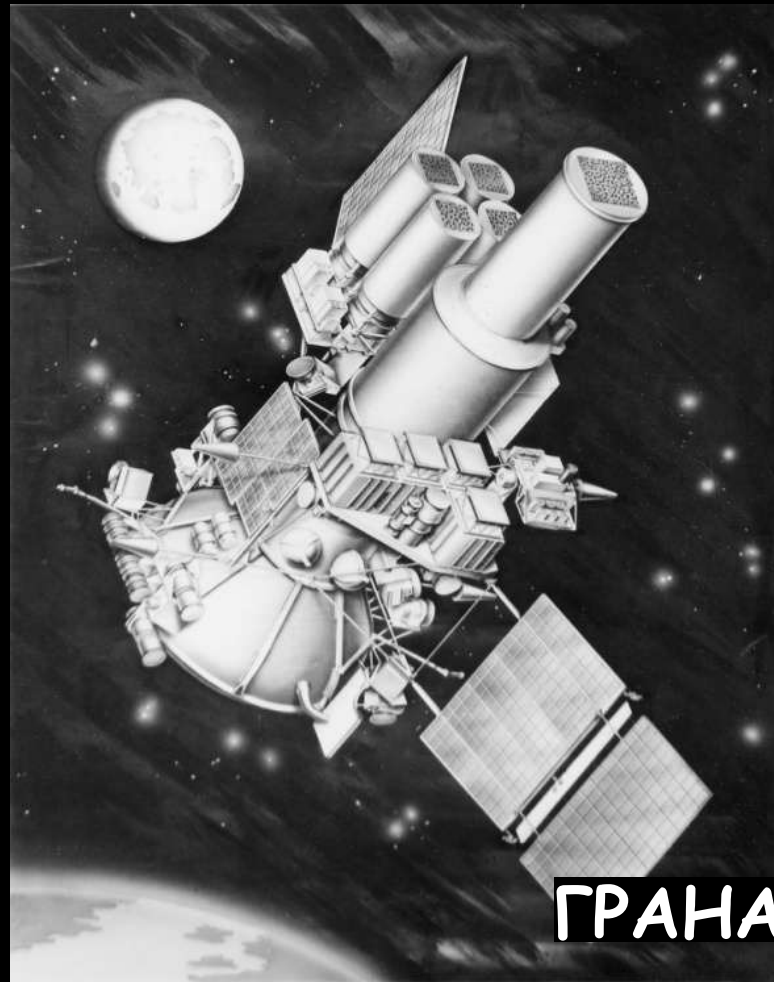
100 млн. K!

Движение вещества  
(нагрев)

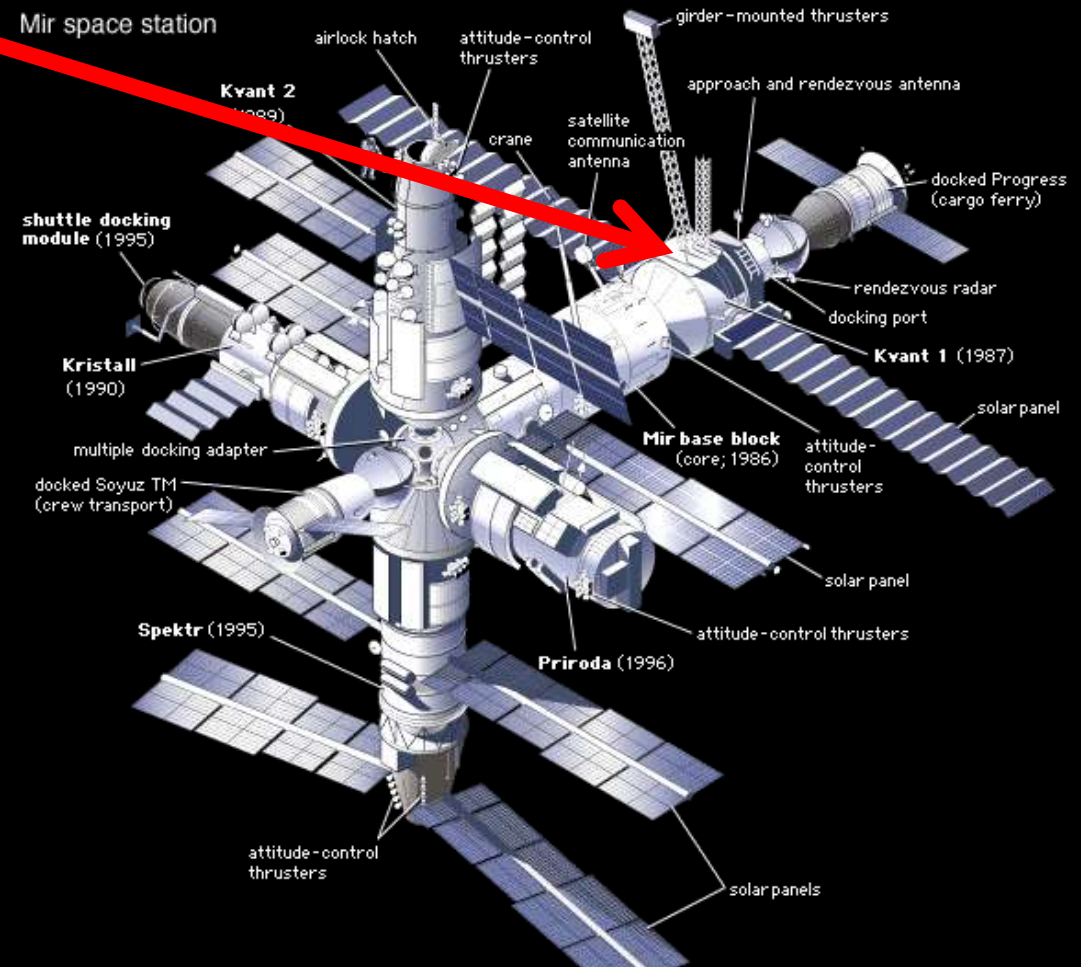


# Такие системы открывались и на советских/российских аппаратах

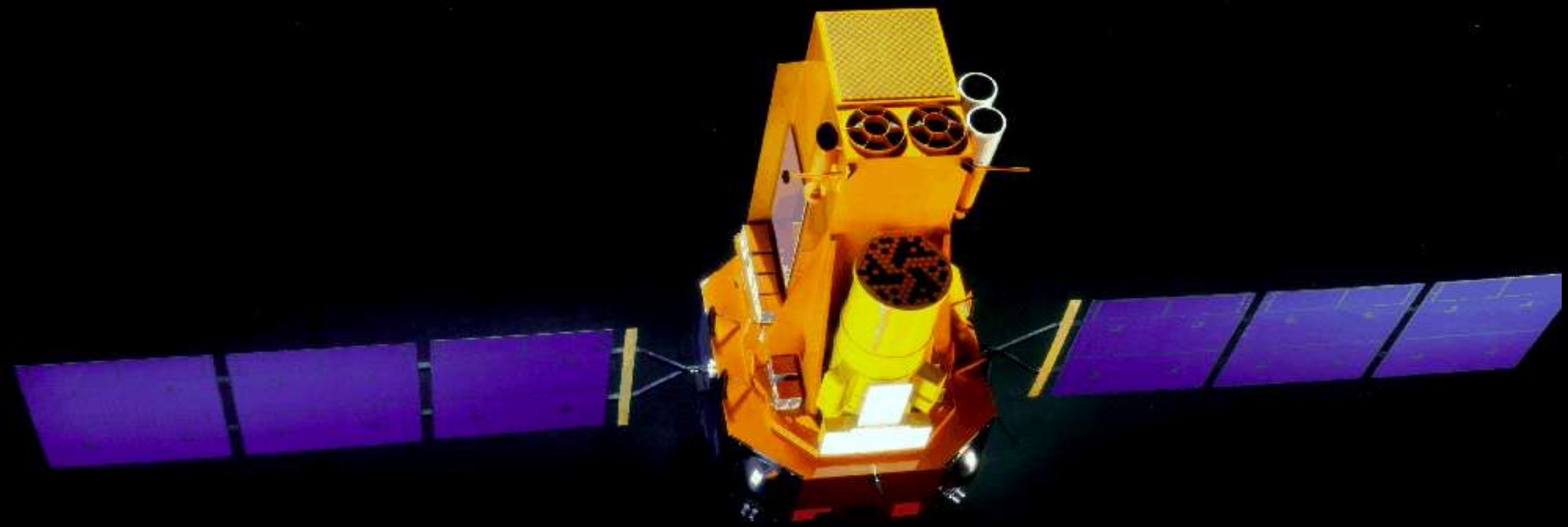
**МИР-КВАНТ (1987-2001)**



**ГРАНАТ (1989-1999)**



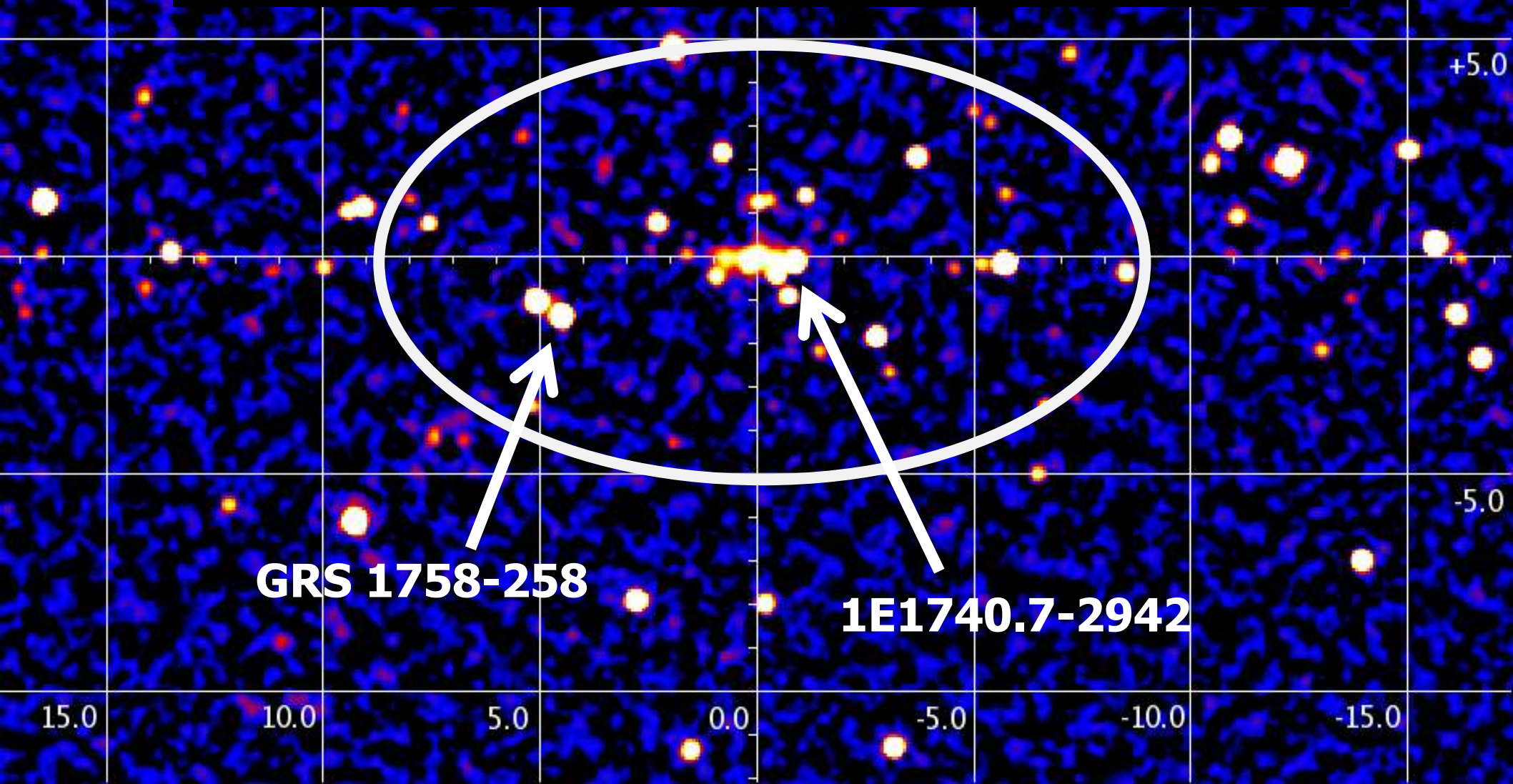
**Действующая обсерватория,  
созданная с участием Российского  
Космического Агенства**



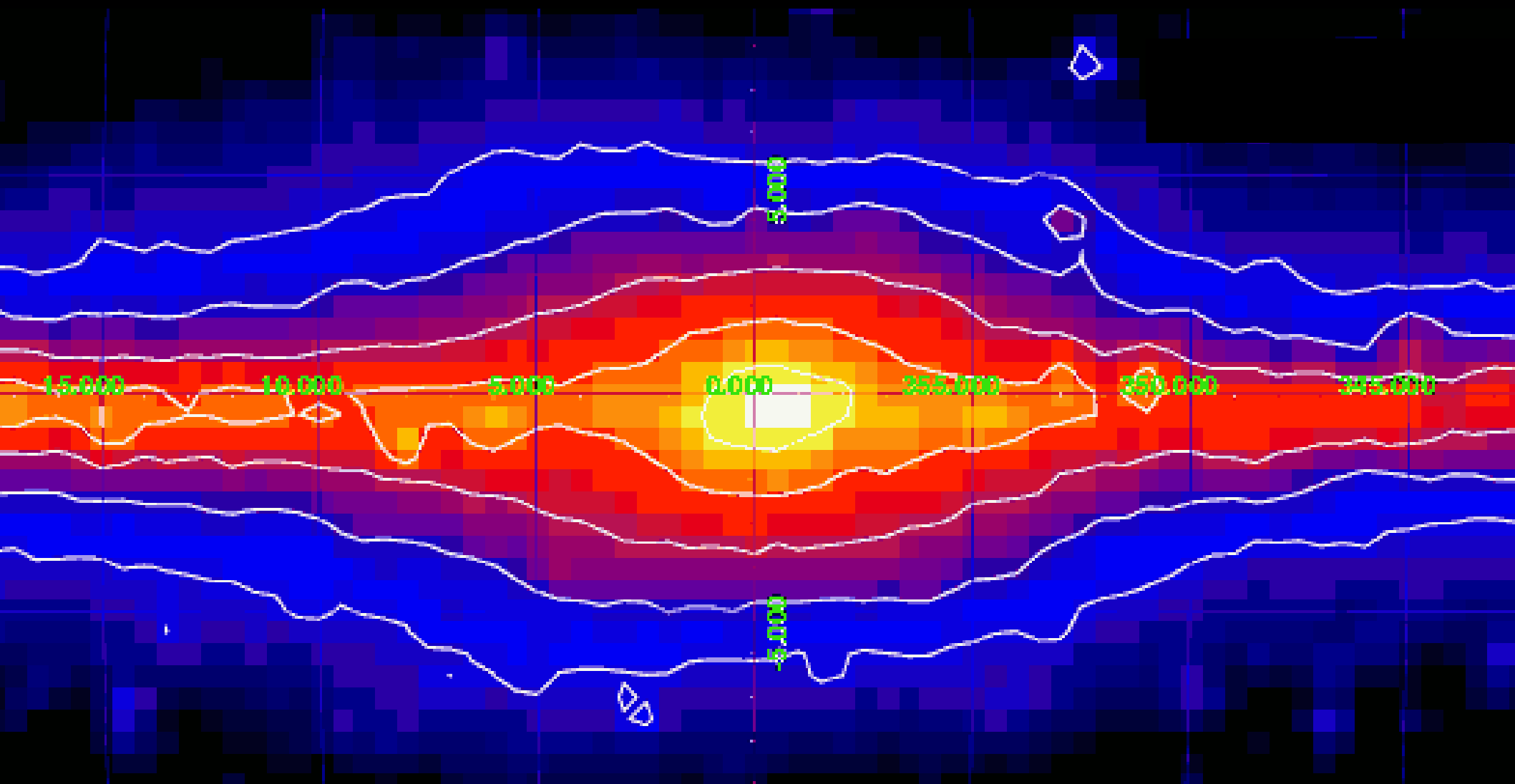
**ИНТЕГРАЛ (ЕКА/РКА)  
(2002- .... )**



# Черные дыры и нейтронные звезды в нашей Галактике по результатам обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ



# Распределение звезд



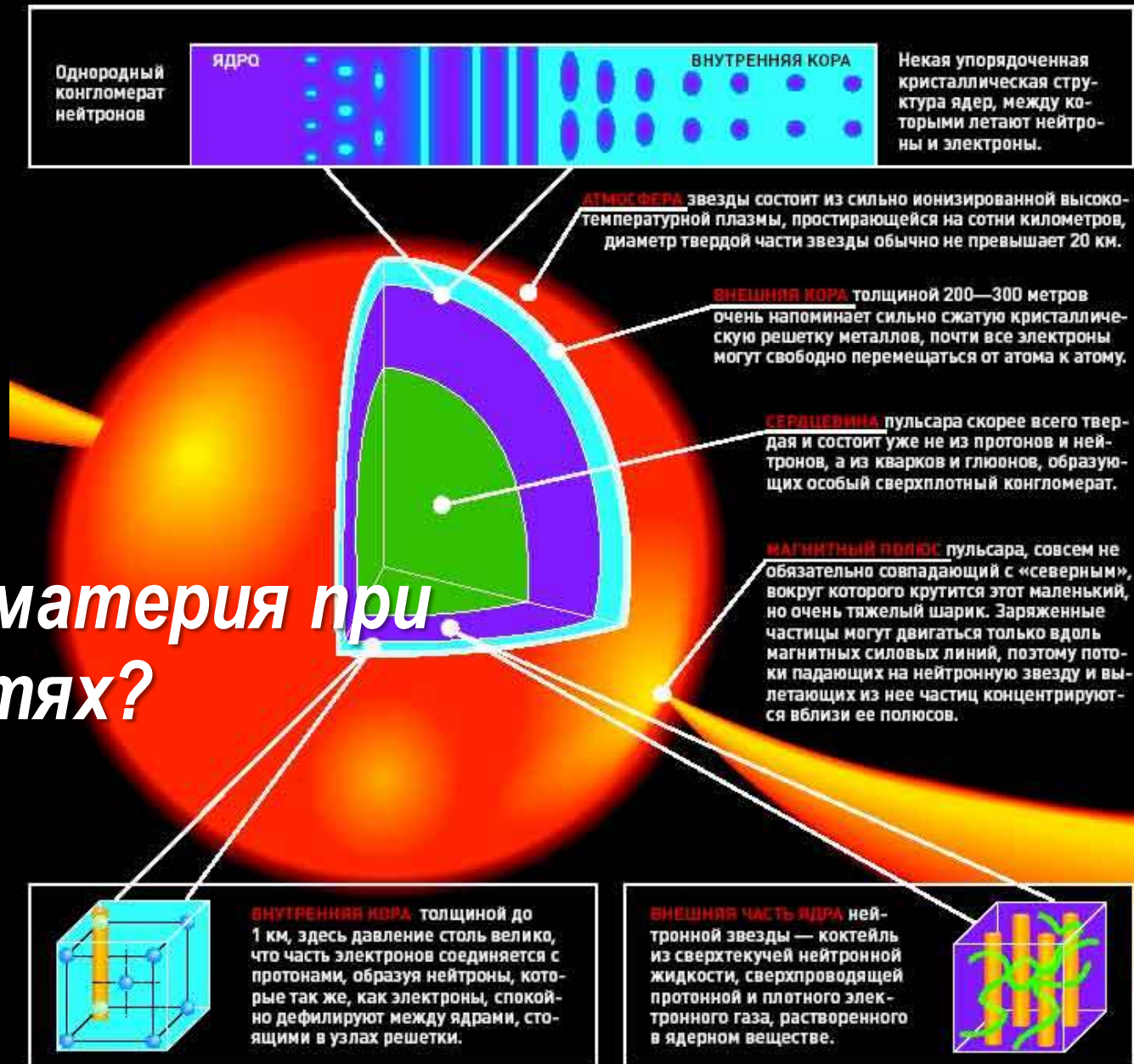


# Сверхвысокие плотности

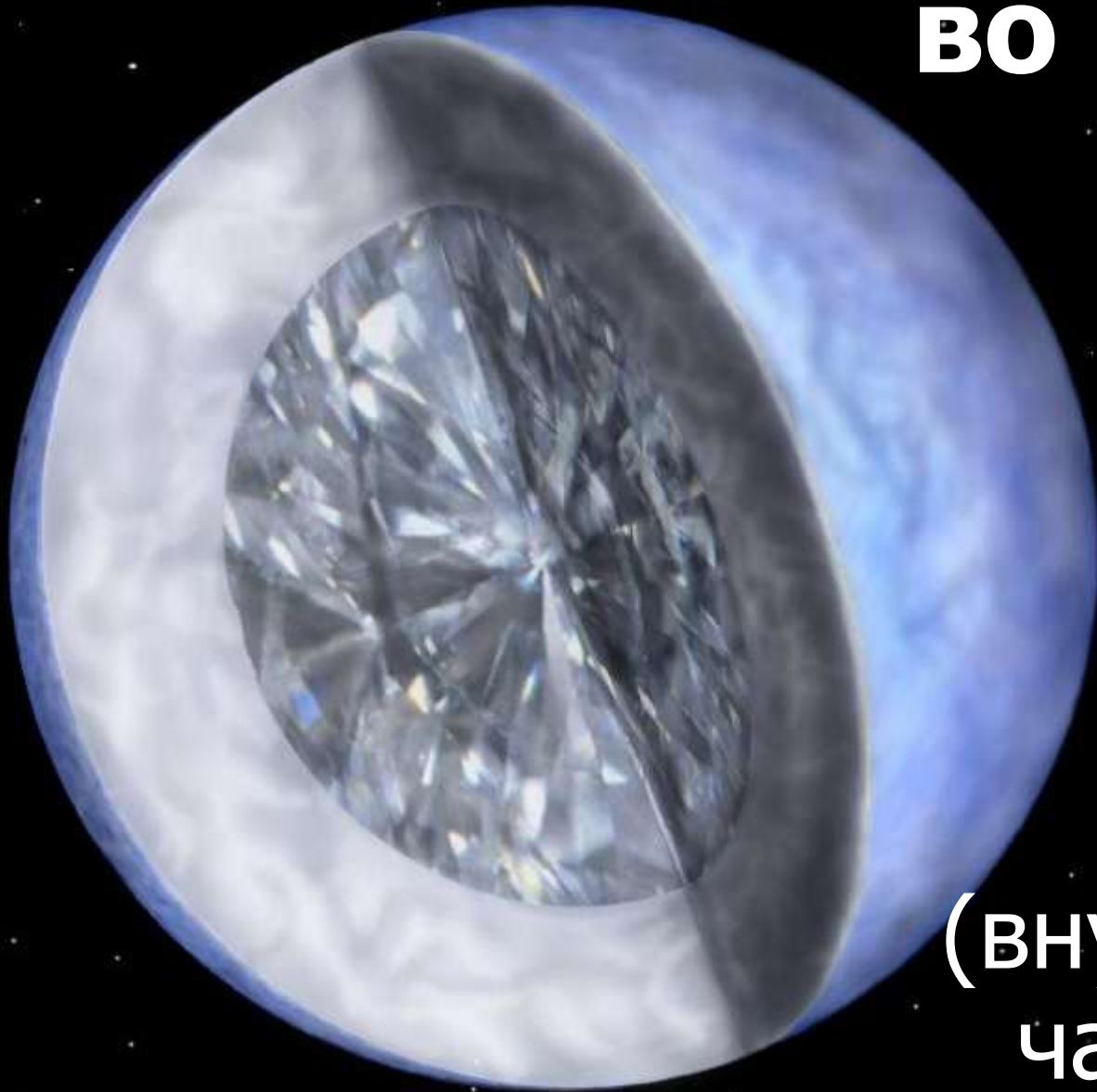
Белый карлик: плотность  
 $\sim \text{тонны}/\text{см}^3$

Нейтронная звезда:  
плотность **сотни миллионов тонн/см<sup>3</sup>!**

*Как ведет себя материя при таких плотностях?*



# Белые карлики – самые большие алмазы во Вселенной



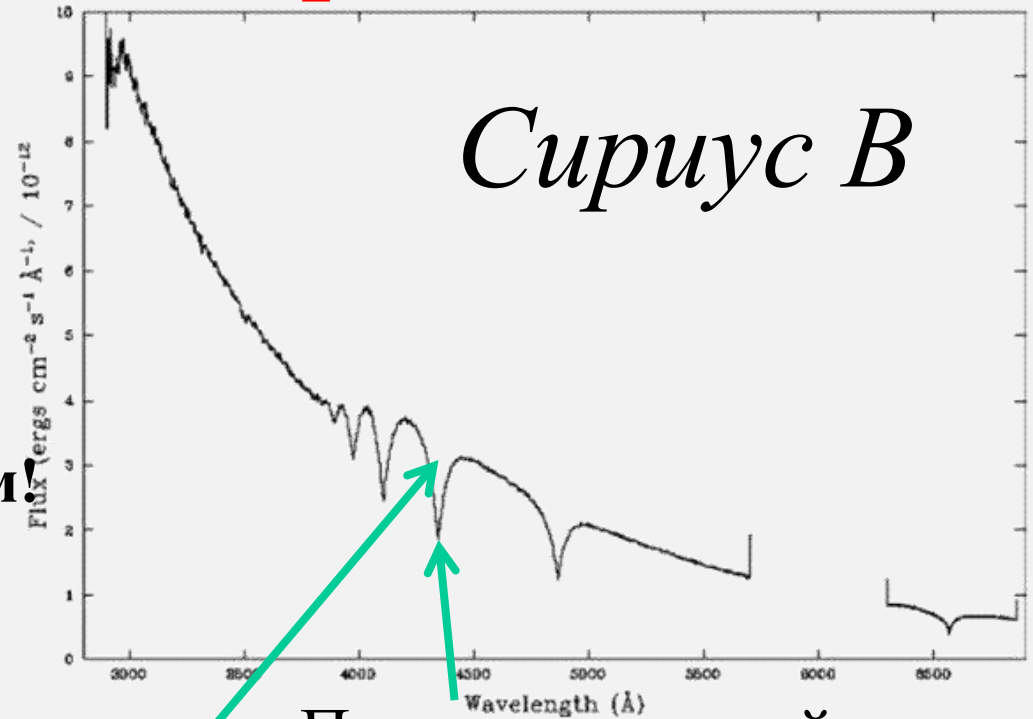
(внутренняя часть  
часто – углерод)

# Белые карлики

Вырожденный  
электронный газ

Оболочка  
идеального  
газа

Плотность  
тонны/куб.см



*Сириус В*

Положение линий ->  
гравитационное красное  
смещение (~20-80 км/сек)

Форма линий ->  
сила тяжести  
(давление)  
на поверхности  
(log g ~8.556)





# Нейтронные звезды (открыты 1967)

Только нейтронные  
звезды могут вращаться  
с такой скоростью!

$\nu \sim 0.1$  с на поверхности!

Сила тяжести

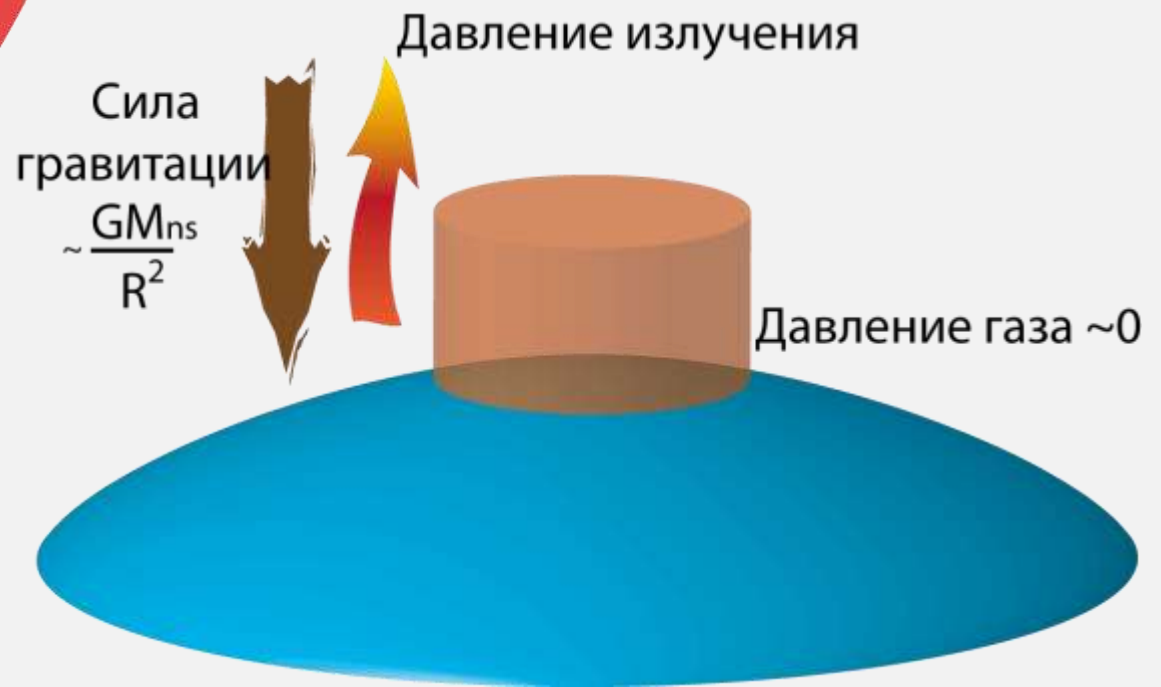
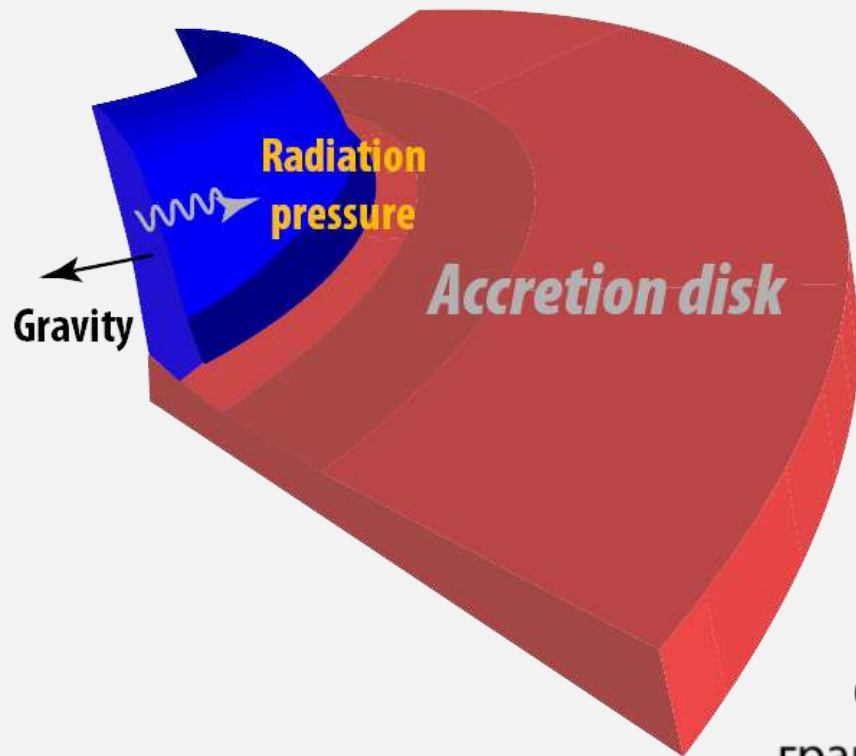
$\sim 100$  миллиардов *g*!  
(иначе –разрушение )



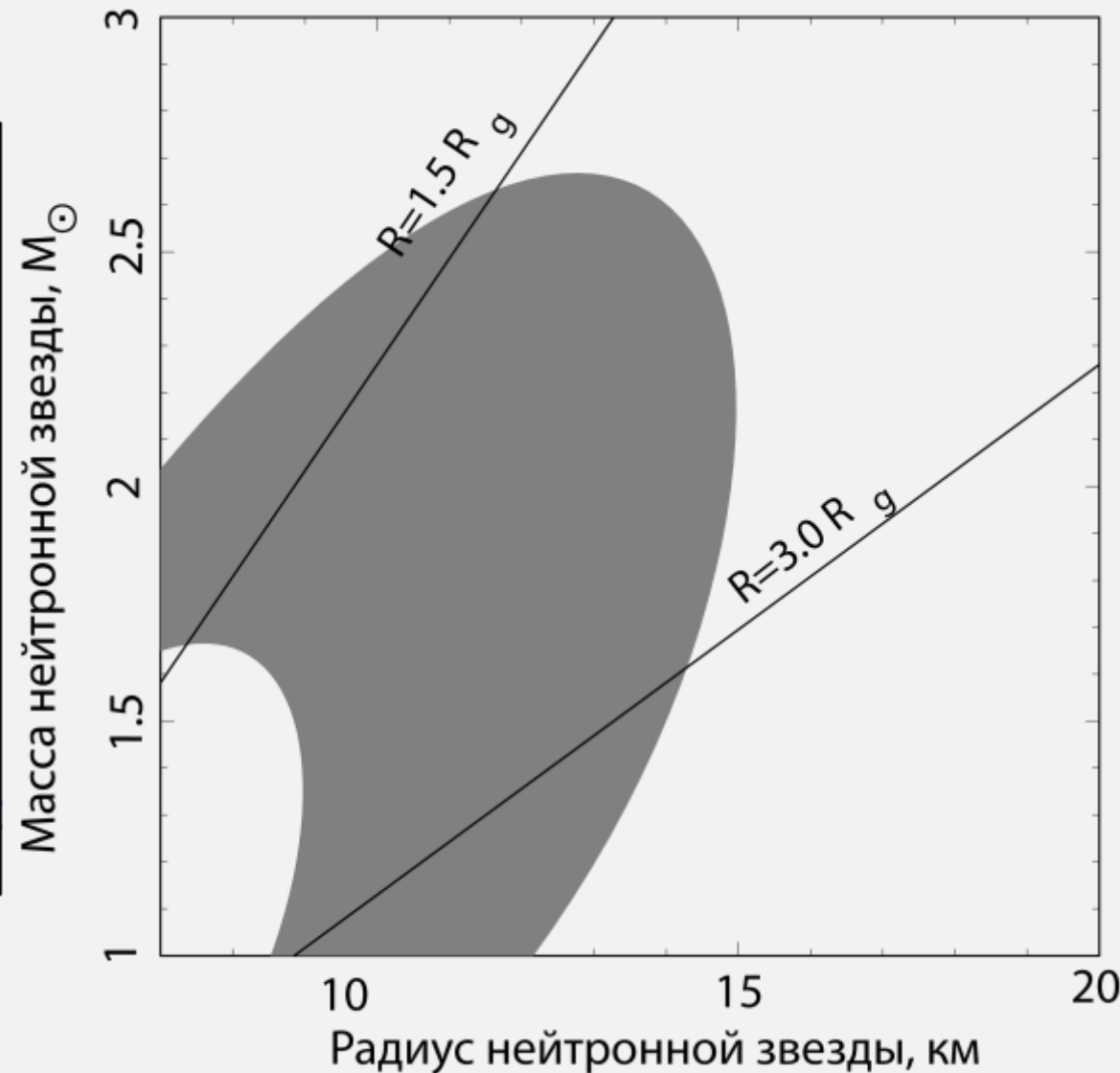
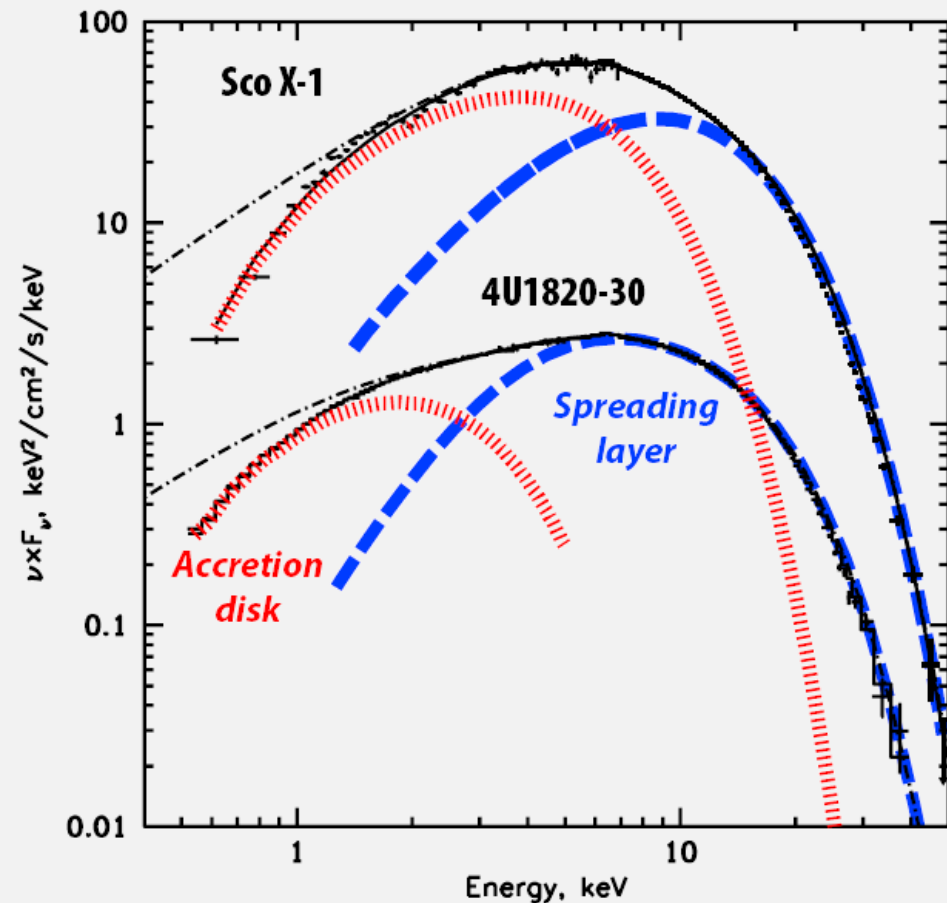
Пulsирующее  
излучение -  
"маяк"

# Измерение радиусов НЗ

*Spreading layer*




# Измерение радиусов НЗ -состояние материи при сверхядерных плотностях





# Термоядерное горение

A photograph of a massive thermonuclear explosion, showing a large, bright, white and yellow mushroom cloud rising from a dark, smoky base. The sky is a deep blue, and the ground is visible in the foreground, covered in a layer of dark, smoky material. The explosion is centered in the frame, with the cloud expanding outwards in all directions.

Первое испытание термоядерного  
устройства - 1951 г

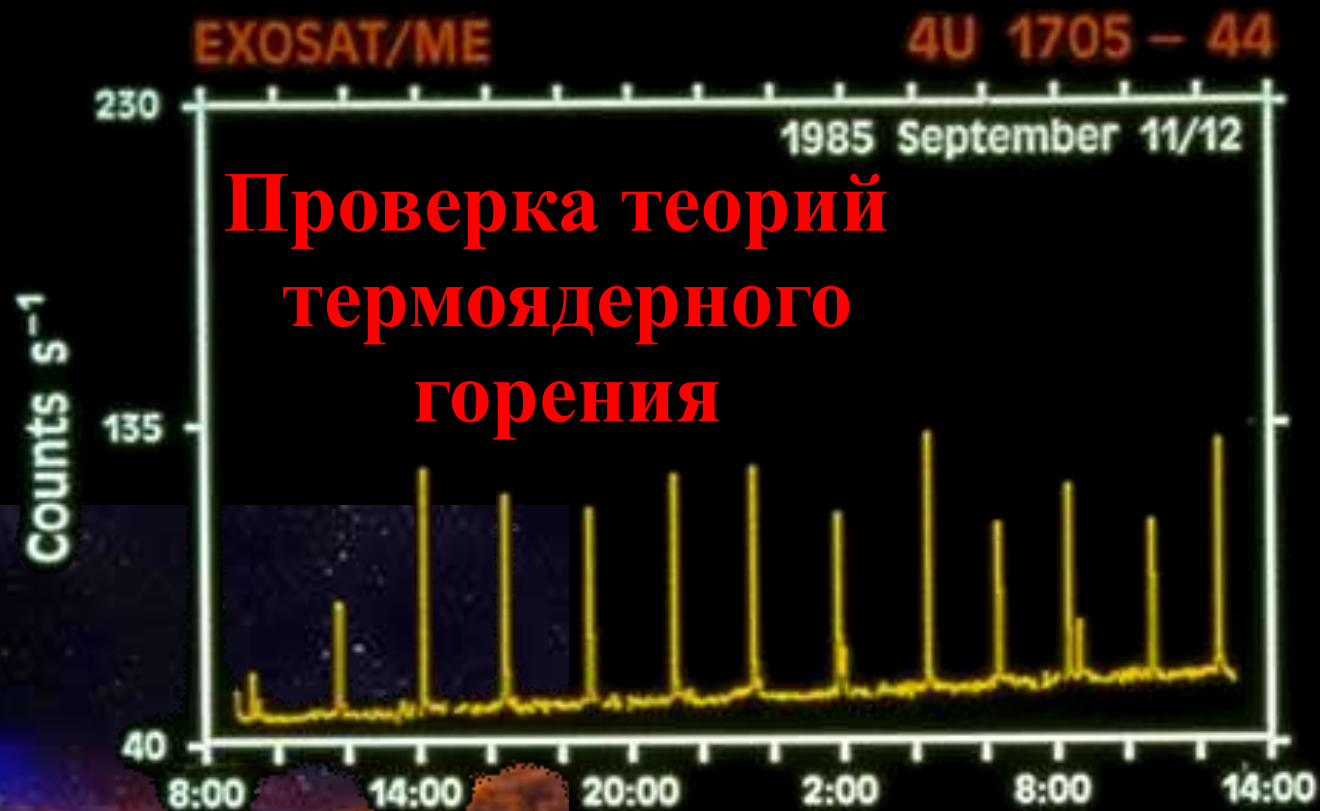
# Термоядерный взрыв на поверхности НЗ (рентгеновские барстеры)





200-300 терабомб ( $10^{12}$ )  
по 10 Мтонн TNT  
в секунду!

За взрыв сгорает  
около массы Луны



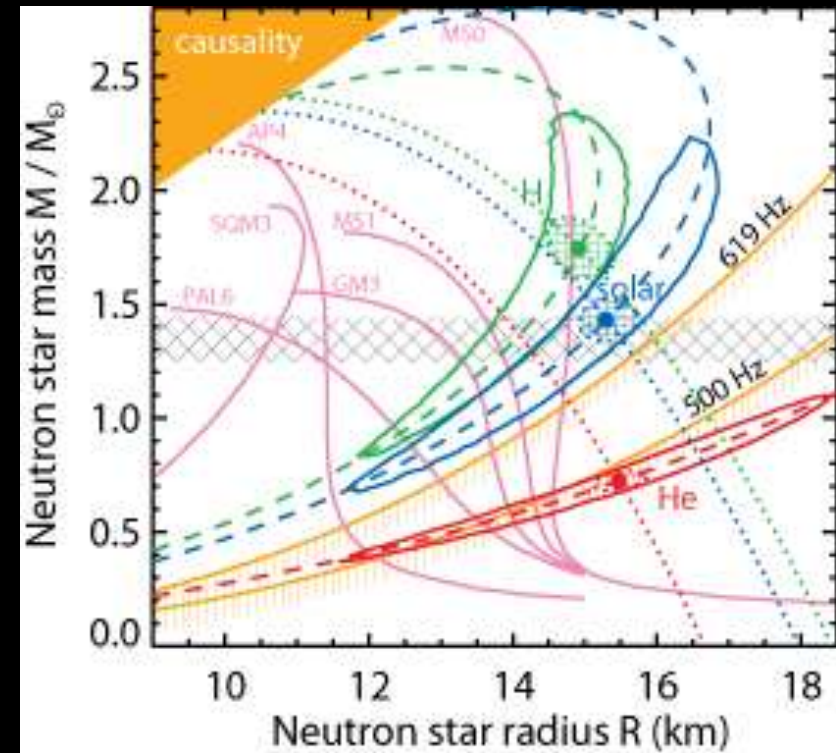
В Галактике известны  
системы в которых такие  
взрывы происходят  
каждые 3-4 часа!



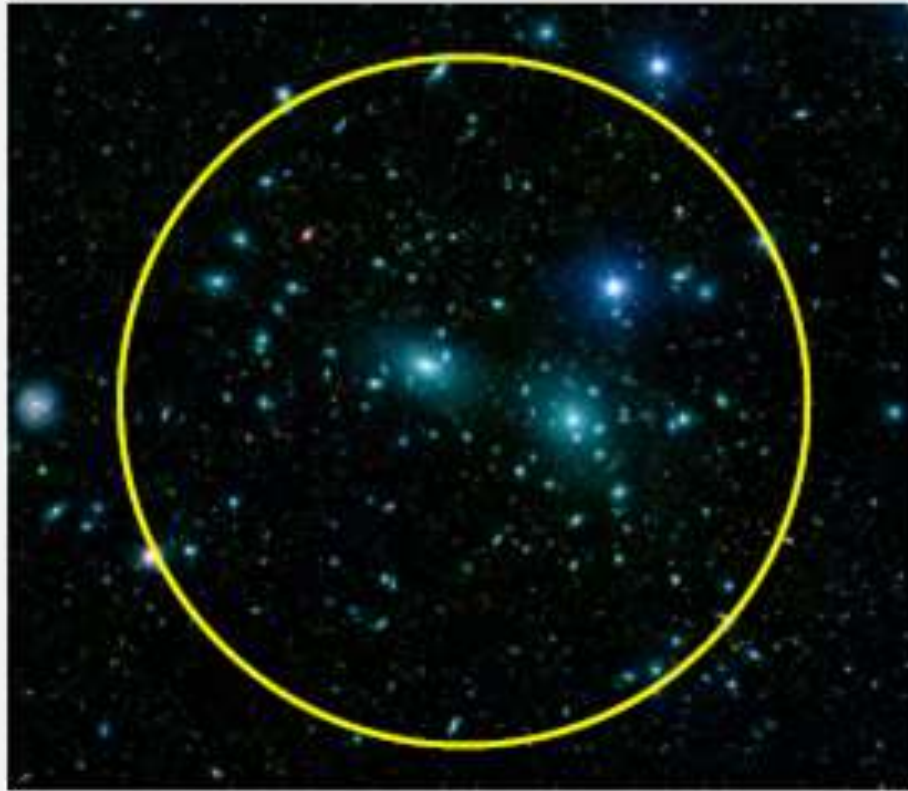
# Состояние вещества при сверхядерных плотностях



Кварковые звезды,  
основное состояние  
материи?



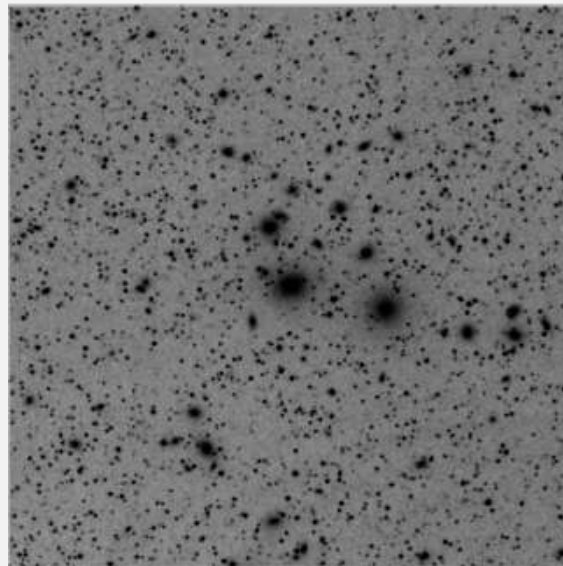
# Темная материя



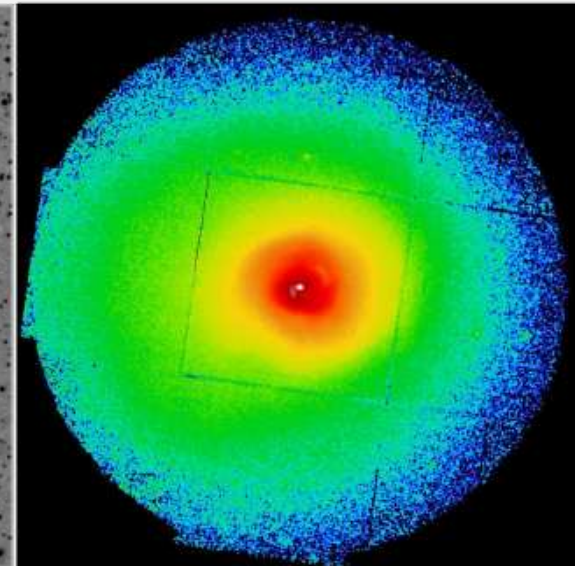
**Скорости движения галактик  
в связанных системах дают  
оценку массы скопления  
гораздо больше видимой  
массы**

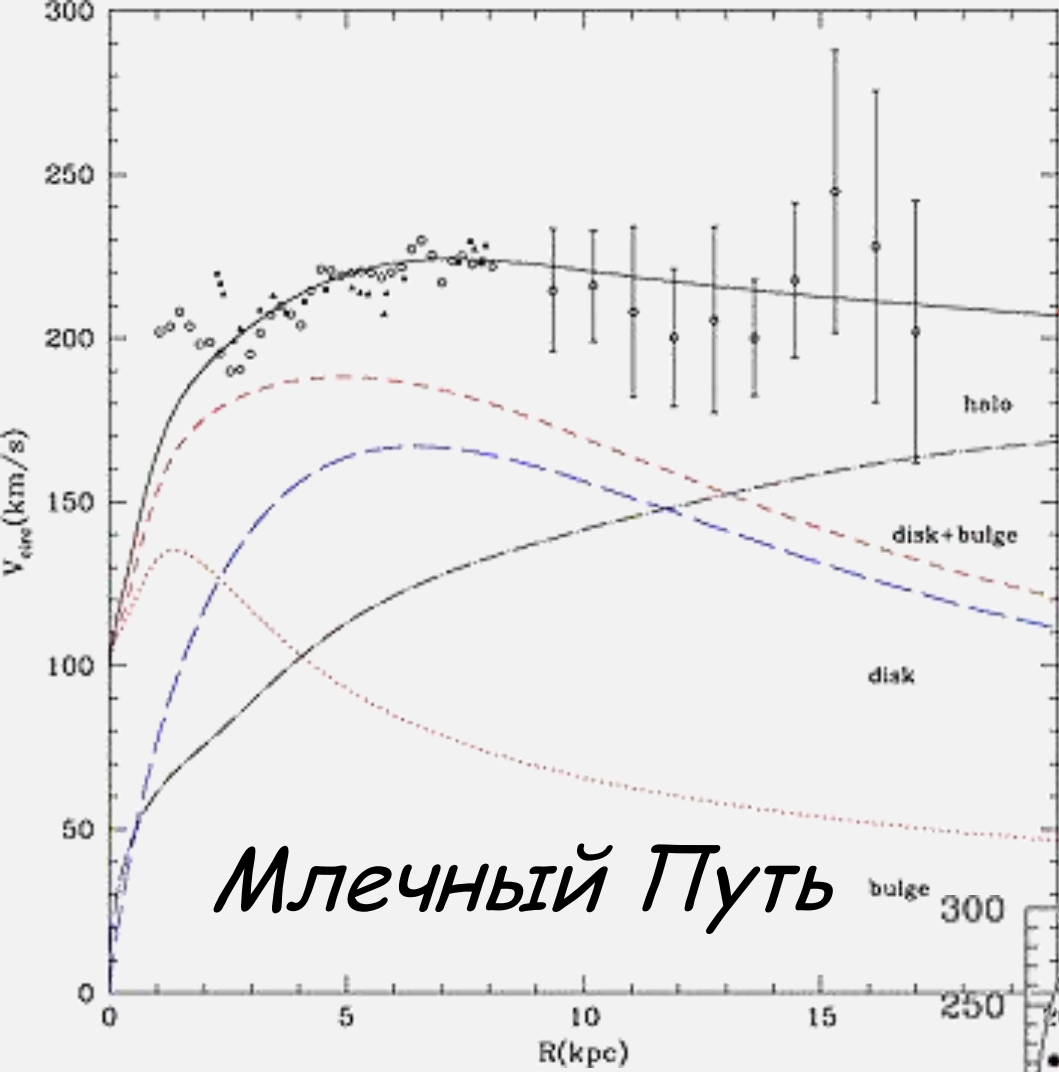
**Вид скоплений в  
разных диапазонах  
энергий**

Оптика



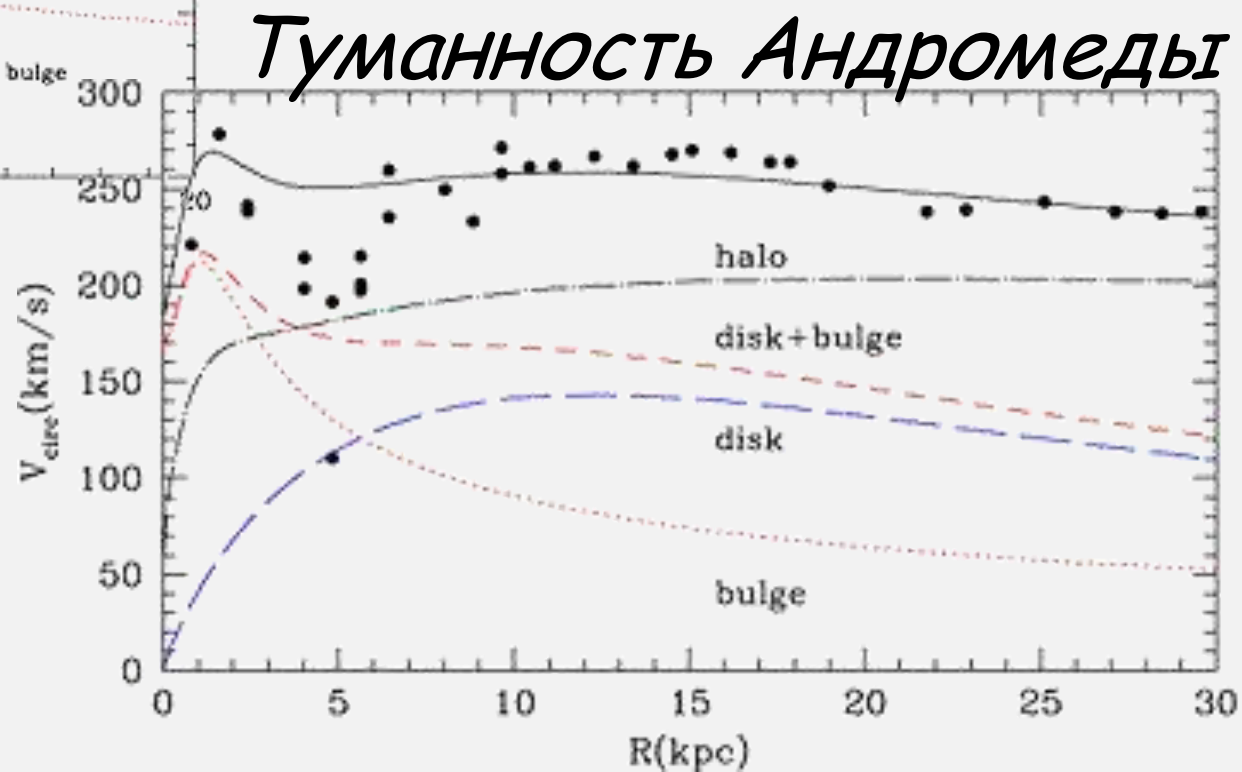
Рентген





*Млечный Путь*

Свидетельства о темной  
материи из кривых  
вращения галактик

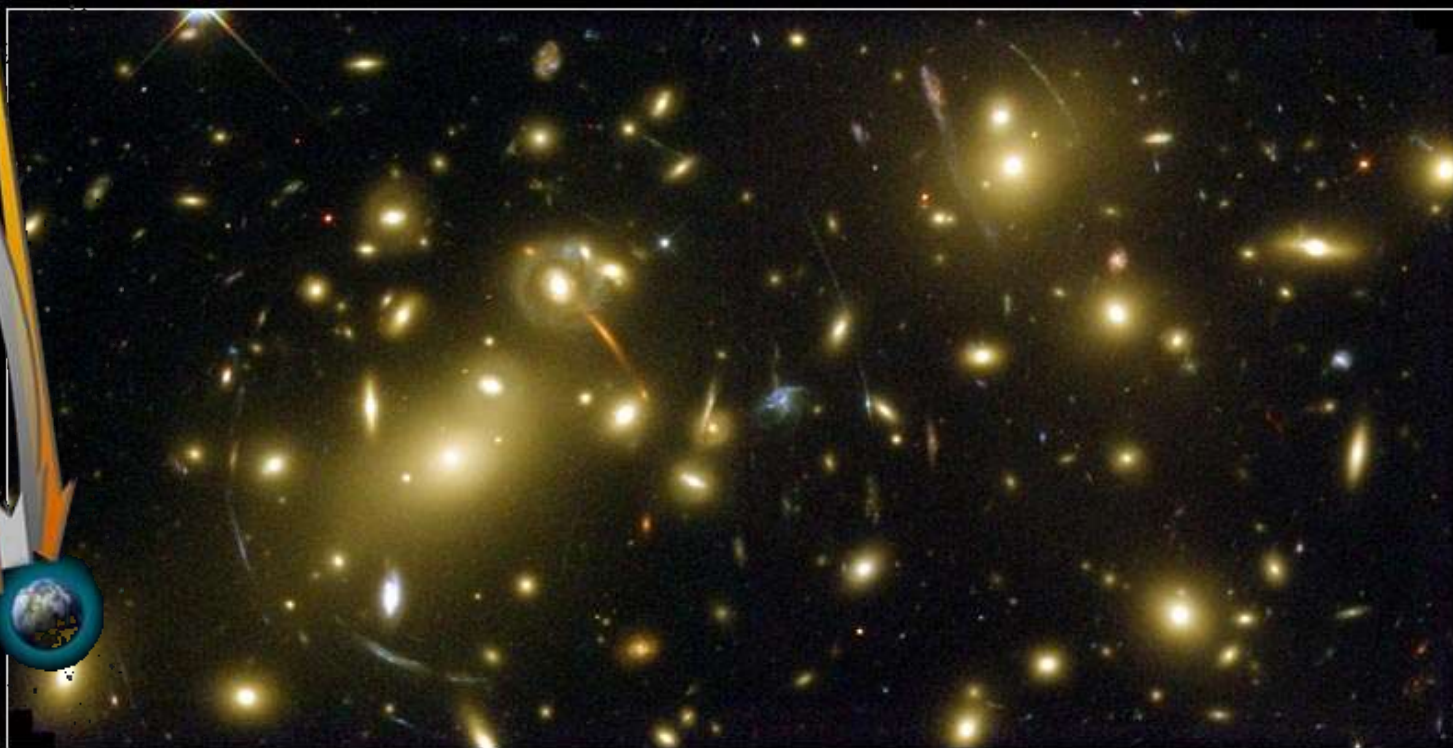
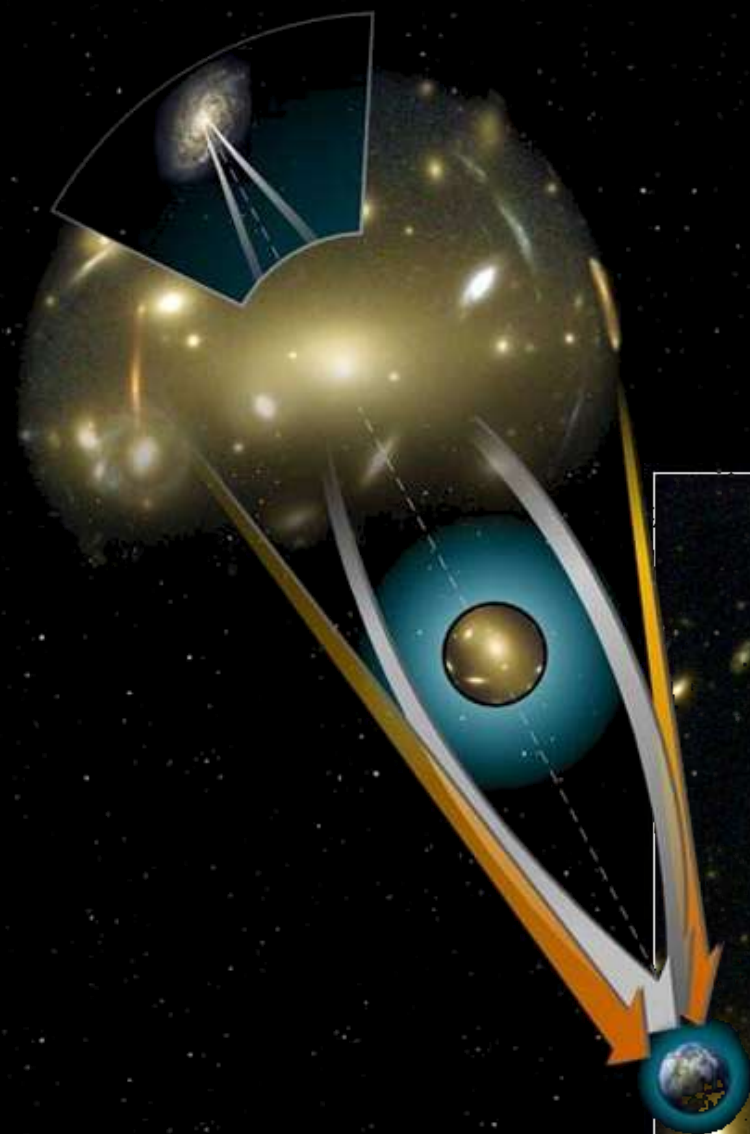


*Туманность Андромеды*



# Линза — скопление галактик A2218

Основная масса — темная материя

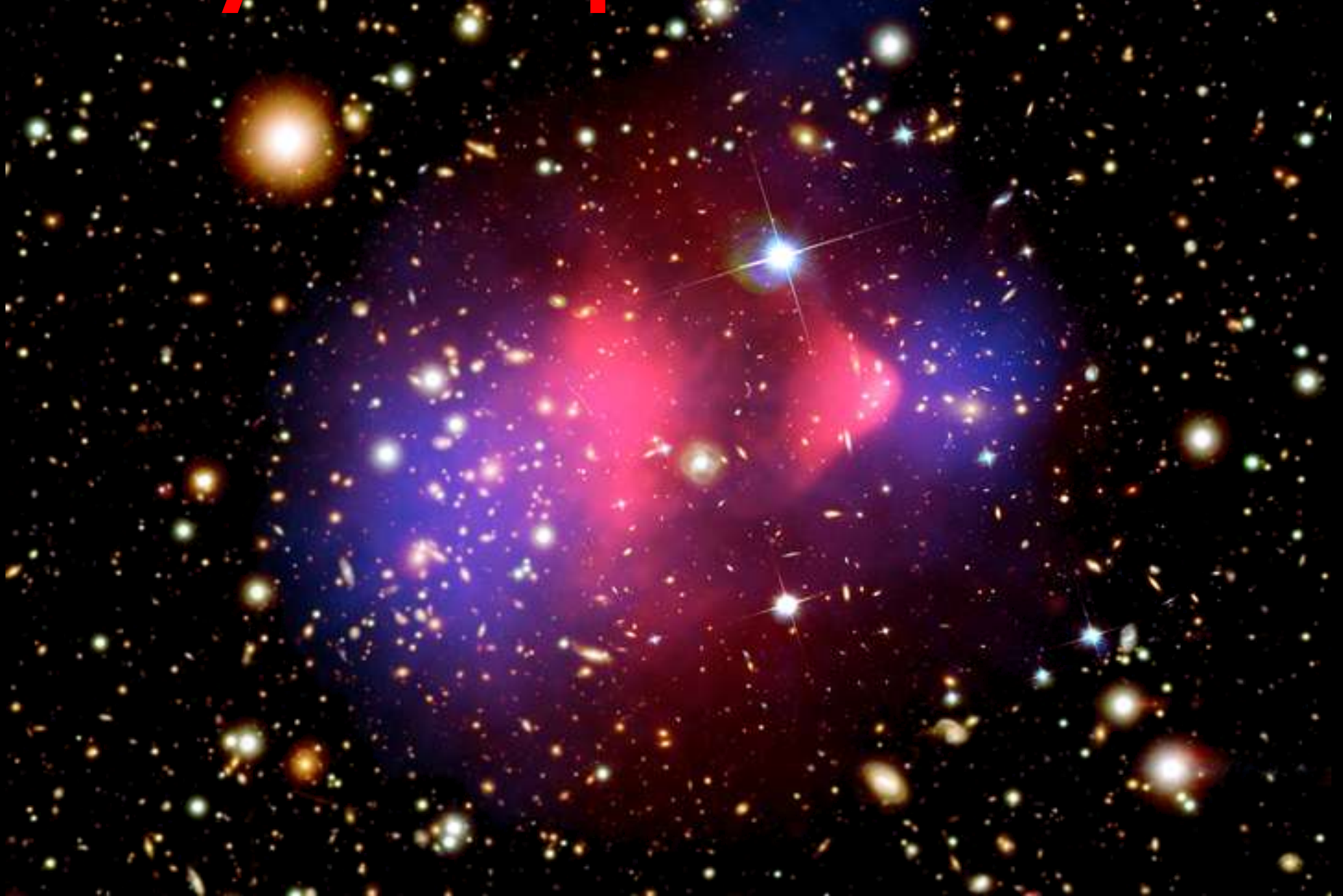


**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

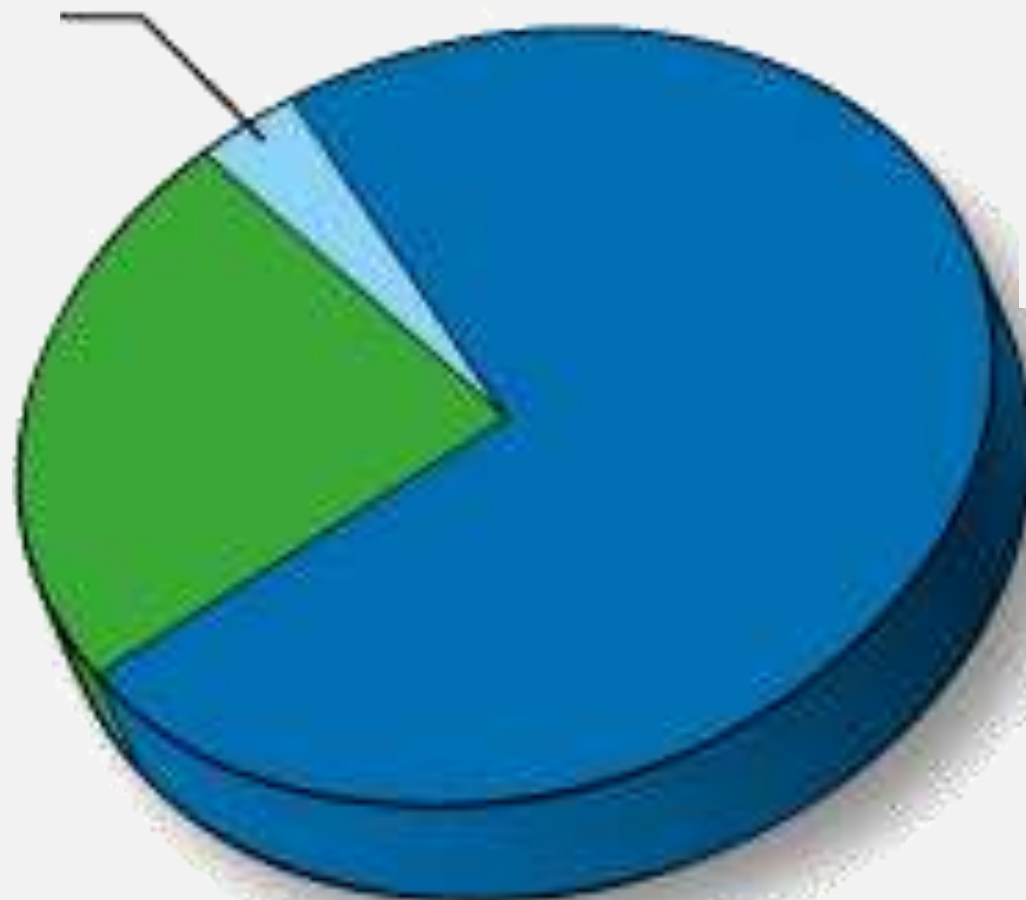
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

**Столкновения отделили  
темную материю от обычной**



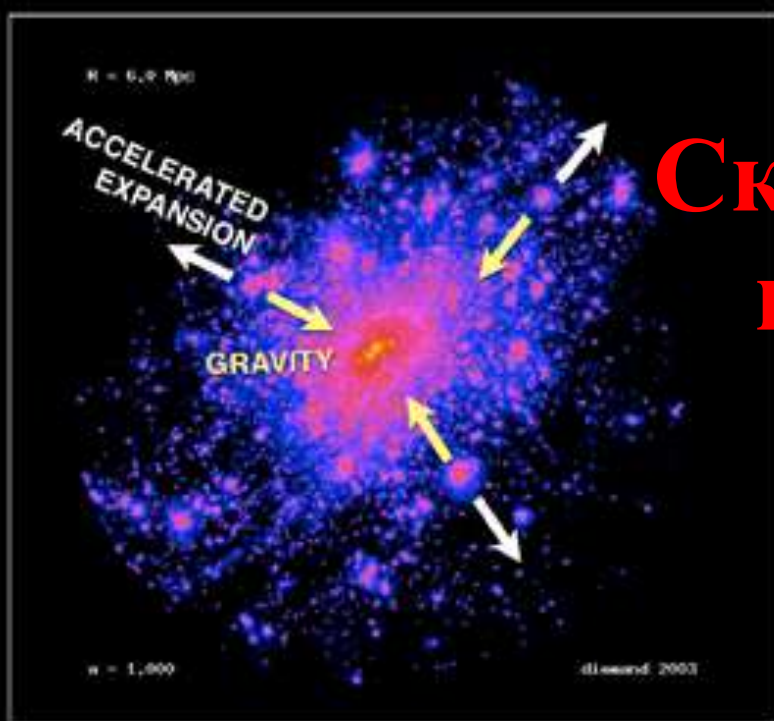
**Обычная  
материя  
4.6%**

**Темная  
материя  
23%**

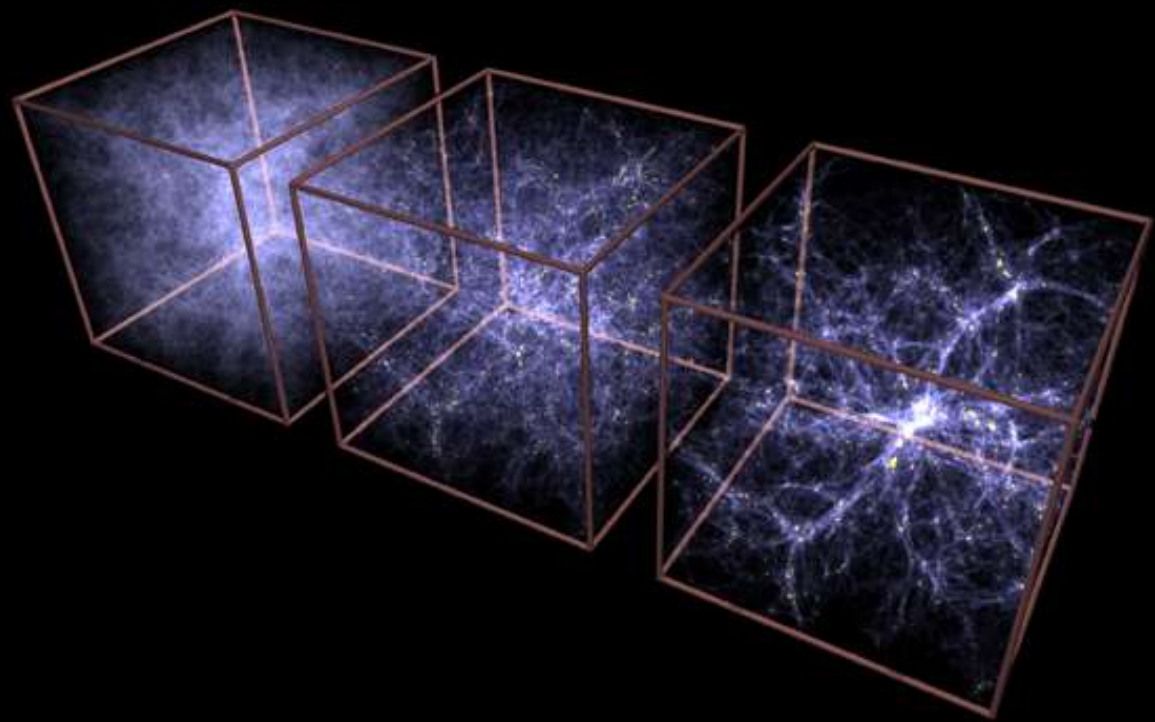
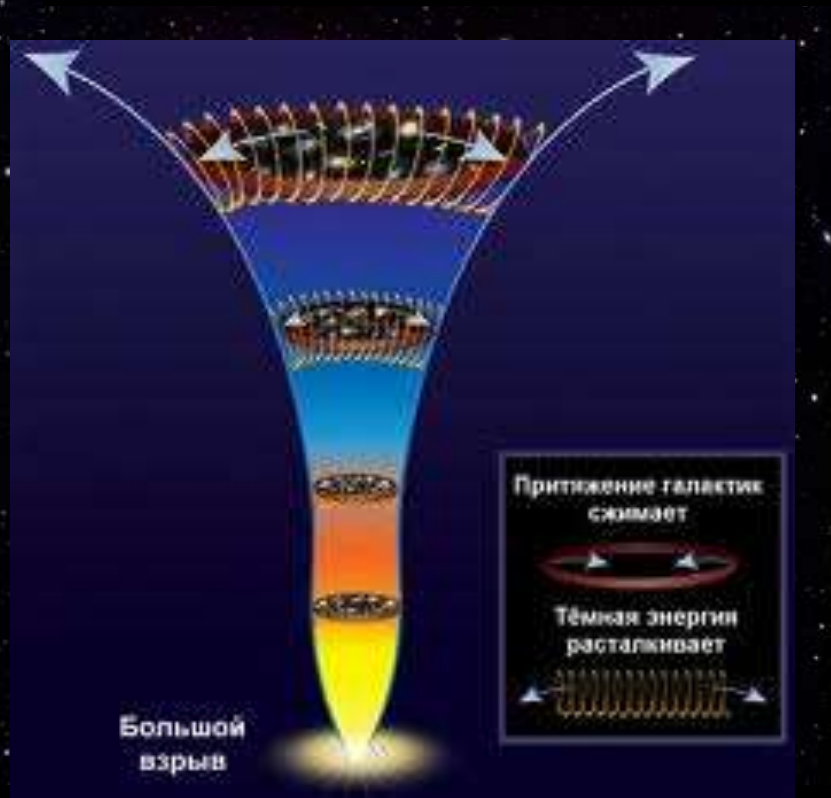


**Темная  
энергия  
72%**



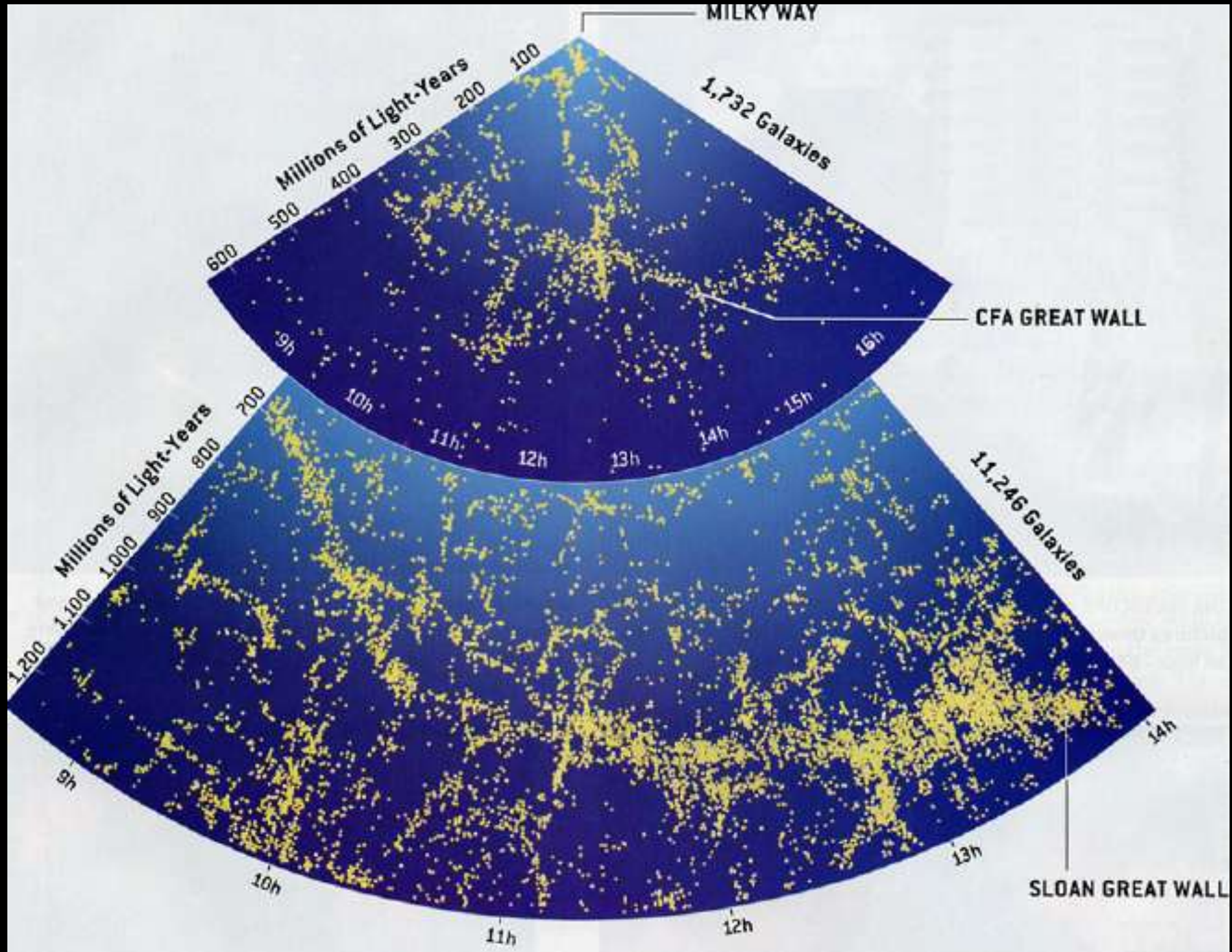


# Скорость роста структур – измерение параметров Вселенной



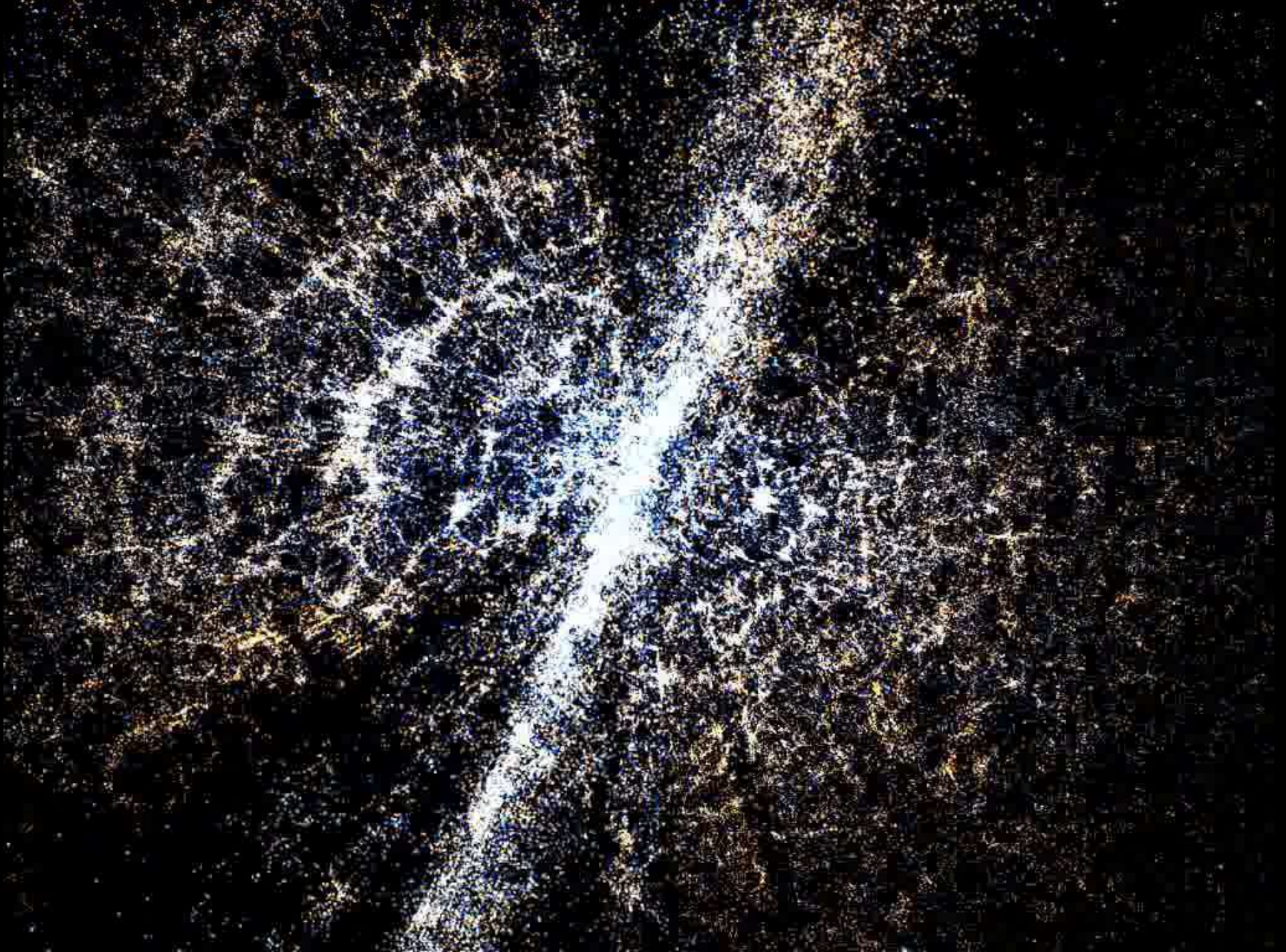






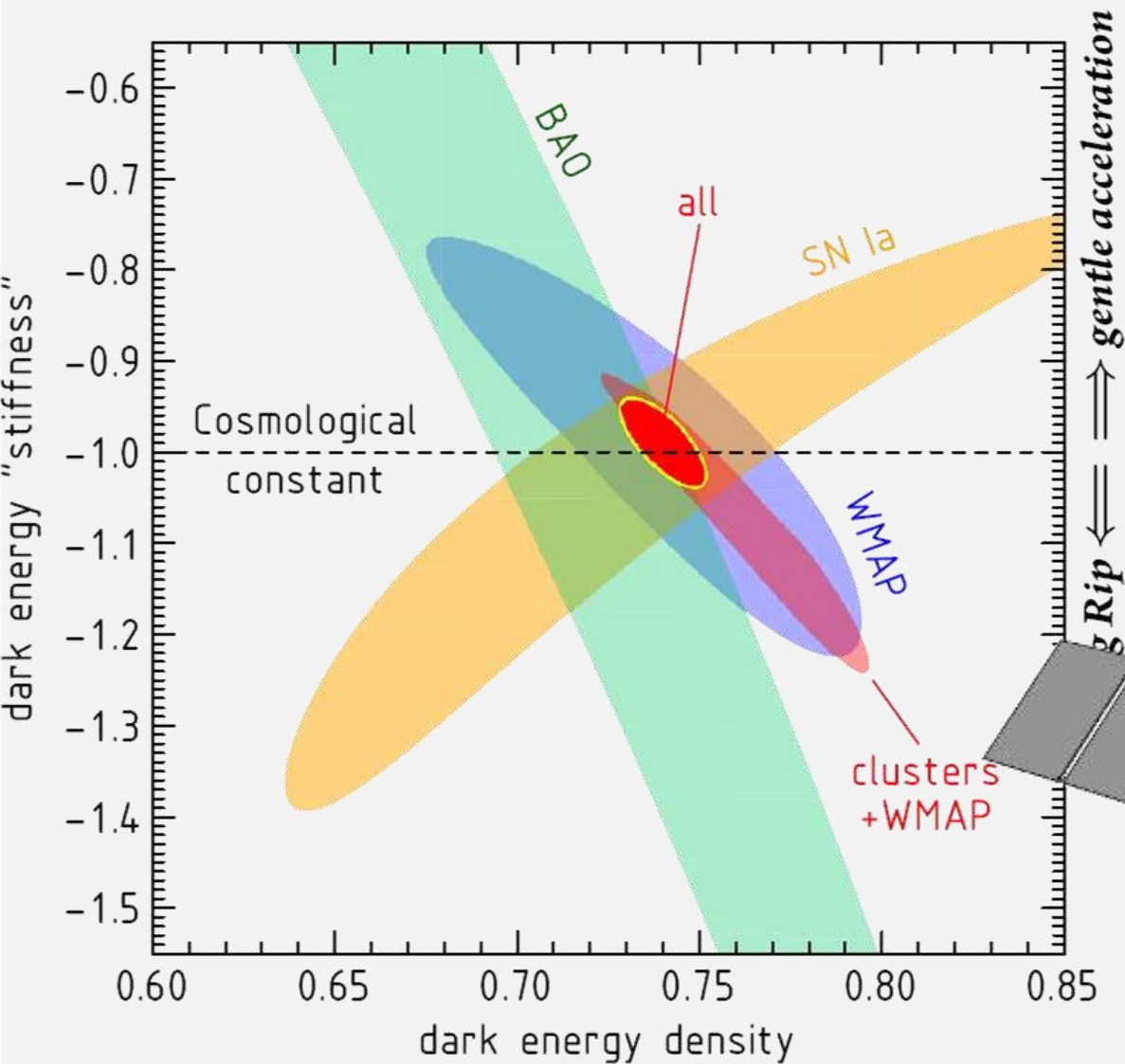


# Множество галактик. Обзор неба SDSS

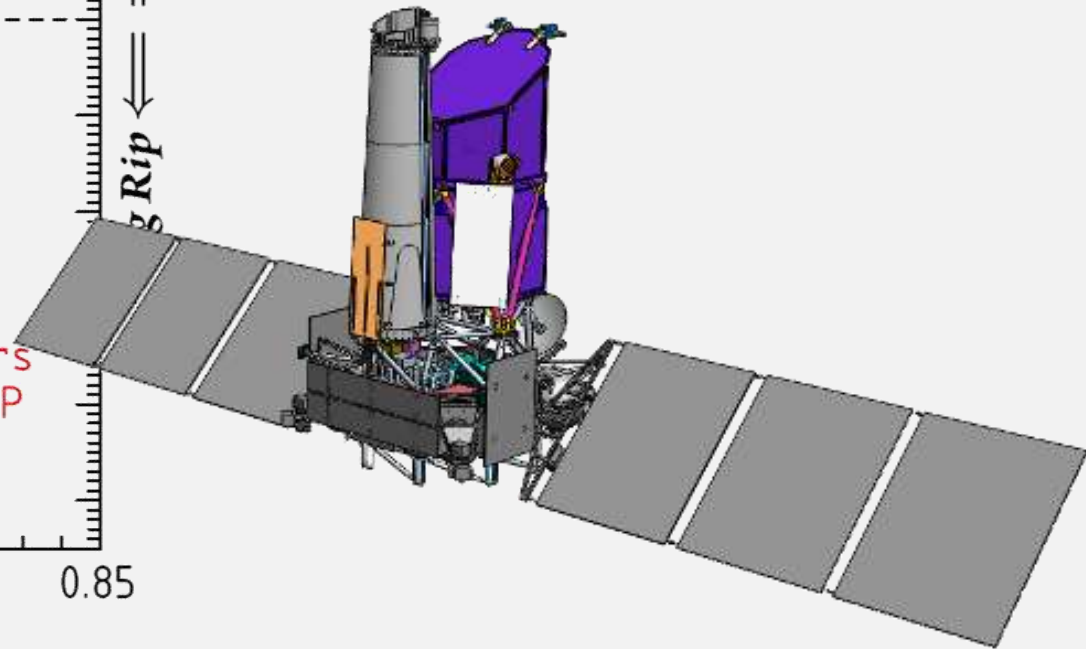




# Свидетельства существования темной энергии из подсчета скоплений галактик



Проект ФКП  
“Спектр-РГ”



# **Заключение:**

- 1) Вселенная – бесконечный набор физических лабораторий**
- 2) Астрофизические исследования дают нам знания о процессах, которые нельзя (пока) наблюдать на Земле**
- 3) Знания о Вселенной рано или поздно можно будет обернуть на пользу человечеству**