

Строение и эволюция звезд II



Звезды из вырожденного вещества

1. Коричневые карлики
($T \sim 700-2000\text{K}$)
2. Белые карлики ($T \sim 10000-100000\text{K}$)
3. Нейтронные звезды ($T \sim 0.1-0.3$
кэВ)

**Средний
импульс
электронов**

$$\Delta p \sim (m_e k \bar{T}_s)^{1/2} \sim \left(\frac{m_e G M m_p \mu}{7R} \right)^{1/2}$$

**Среднее
расстояние
между
электронами**

$$\Delta q \sim \left(\frac{\mu m_p}{\rho} \right)^{1/3} \sim \left(\frac{4 \mu m_p R^3}{M} \right)^{1/3}$$

**Занимаемый
фазовый
объем**

$$(\Delta q \Delta p)^3 \sim \left(\frac{4 \mu m_p R^3}{M} \right) \left(\frac{m_e G M m_p \mu}{R} \right)^{3/2}$$

$$\sim 180 h^3 \left(\frac{M}{M_{Sun}} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_{Sun}} \right)^{3/2}$$

**При $R \sim 0.03 R_{Sun}$ объем становится
 $\sim h^3$**

Вырожден

Давление нерелятивистского
вырожденного
электронного газа

$$p = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2}{5m_e} \left(\frac{\rho}{\mu m_p} \right)^{5/3}$$

Давление релятивистского
вырожденного электронного
газа

$$p = \frac{(3\pi^2)^{1/3} \hbar c}{4} \left(\frac{\rho}{\mu m_p} \right)^{4/3}$$

Индифферентное
равновесие

$$U = -\Omega$$

Предел массы белого карлика

Плотность фермионов в звезде (нейтронной звезды)

$$\rho \sim N/R^3$$

Объем на фермион $\Delta V \sim R^3/N$

Значит импульс фермиона

$$\Delta p \sim \hbar n^{1/3}$$

Энергия Ферми релятивистского фермиона

$$E_F \sim \hbar n^{1/3} c \sim \frac{\hbar c N^{1/3}}{R}$$

Гравитационная энергия фермиона

$$E_G \sim -\frac{GMm_p}{R}$$

Предел массы белого карлика (нейтронной звезды)

Пределное число
фермионов,
удерживаемых
гравитацией

$$E_F = E_G \rightarrow \frac{\hbar c N^{1/3}}{R} = \frac{GNm_p^2}{R}$$

$$N_{\max} \sim \left(\frac{\hbar c}{Gm_p^2} \right)^{3/2} \sim 2 \cdot 10^{57}$$

$$M_{\max} \sim N_{\max} m_p \sim 1.5 M_{\text{Sun}}$$

Подтверждается ли наблюдениями?

Форма линий

->

сила тяжести (давление)

на

поверхности

($\log g \sim 8.556$)

Положение линий ->

гравитационное

красное

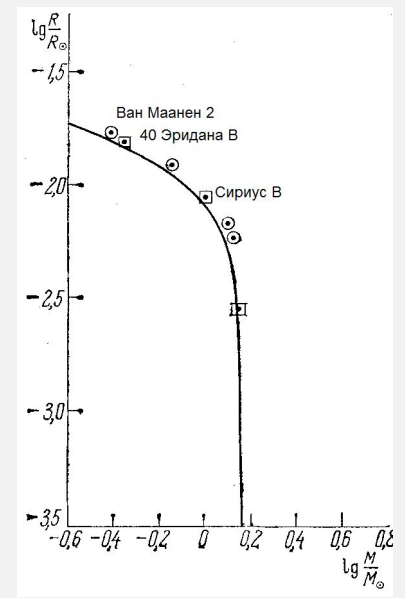
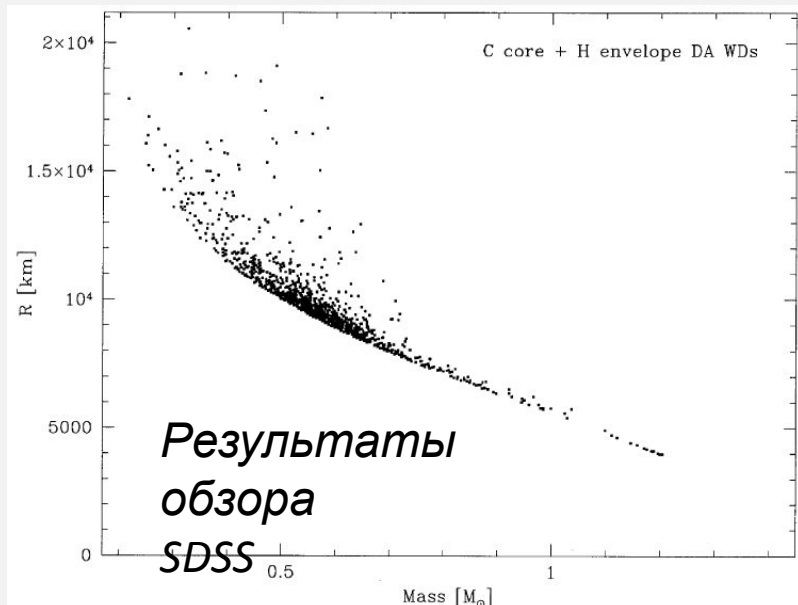
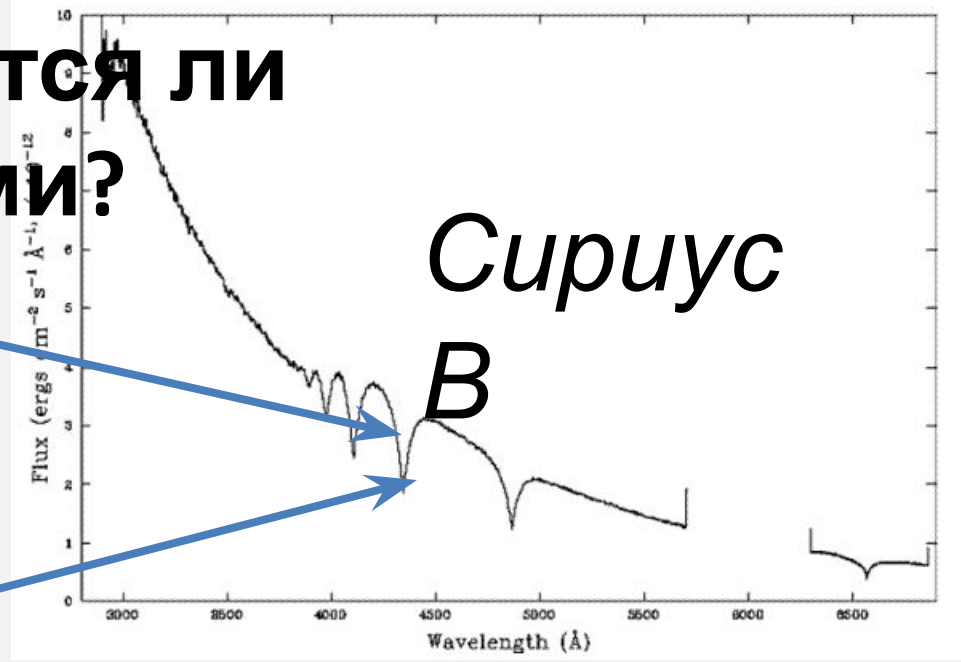
смещение ($\sim 20-80$

км/сек)

Форма спектра и

параллакс ->

радиус



Общая теория относительности

$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

Метрика Шварцшильда

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Шварцшильдовский

радиус

$$\frac{E}{E_0} = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}$$

Гравитационный сдвиг
энергии

Для пов. Земли
(относительно
бесконечности
)

$$r_s = 9 \text{ мм}, \frac{\Delta E}{E_0} \sim 7 \times 10^{-10}$$

Для
БК

$$\frac{\Delta E}{E_0} \sim 7 \times 10^{-6} \sim 20 - 80 \text{ км / сек}$$

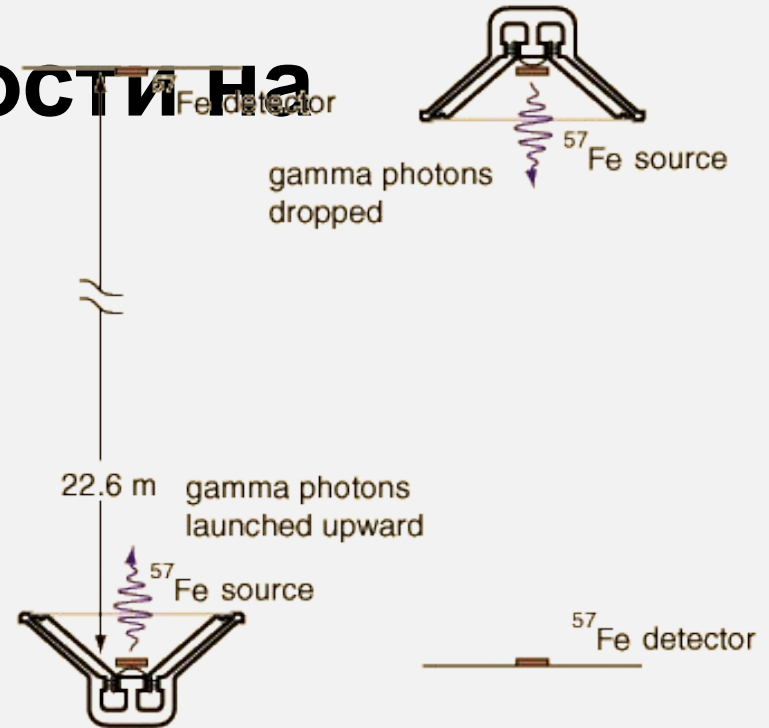
Эффекты общей теории

относительности на Земле

Опыт Паунда и Ребки

$$\frac{\Delta E(22.5\text{ м})}{E_0} \sim 2.5 \times 10^{-15}$$

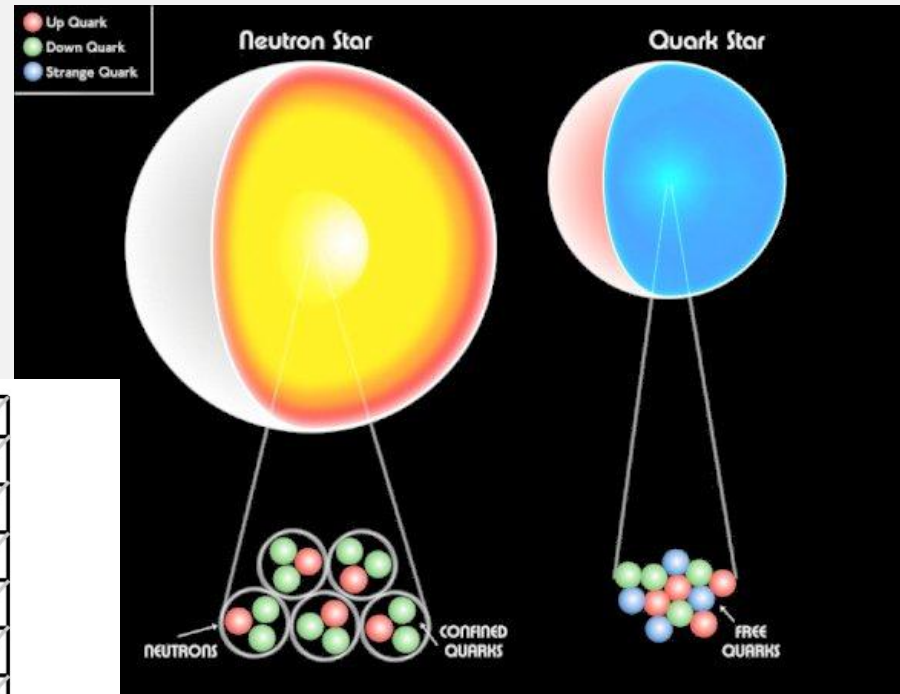
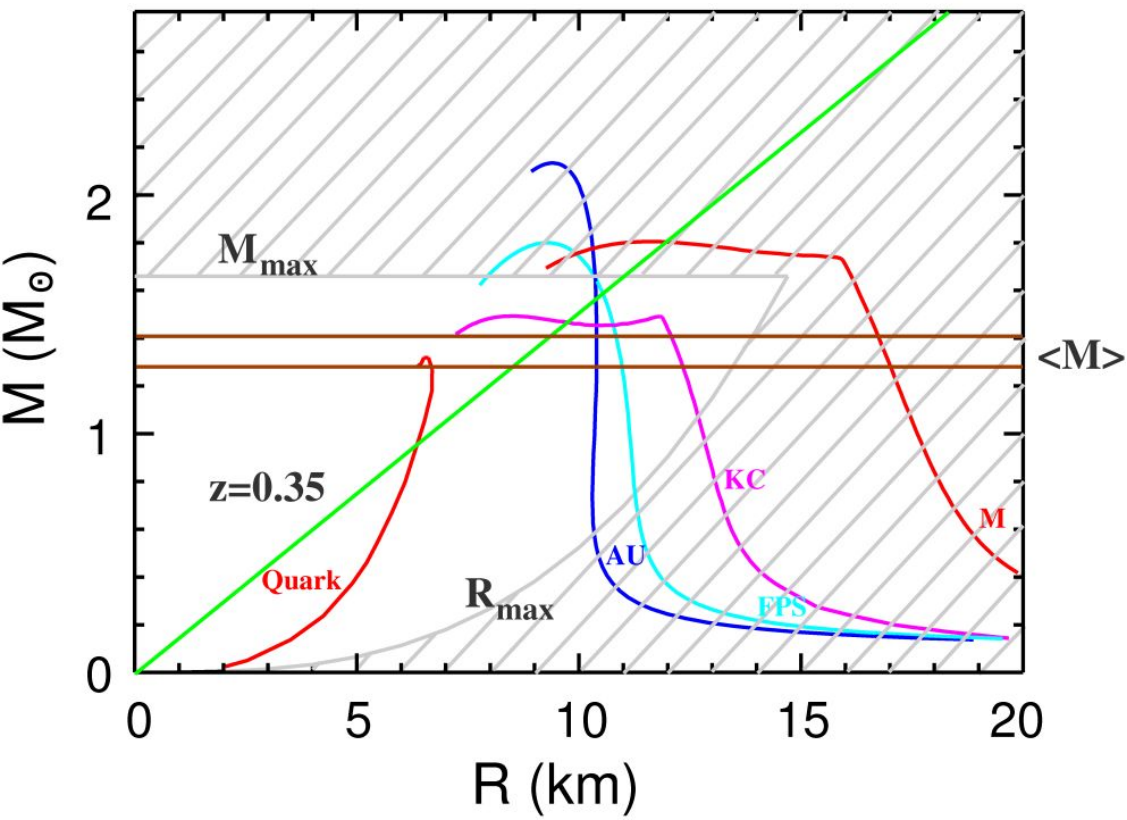
Подтвердил
правильность
ОТО с точностью 10%



На спутниках время уходит на ~8.5 мсек в
год

Без ОТО навигаторы работать не
будут

Для нейтронных/ кварковых звезд?

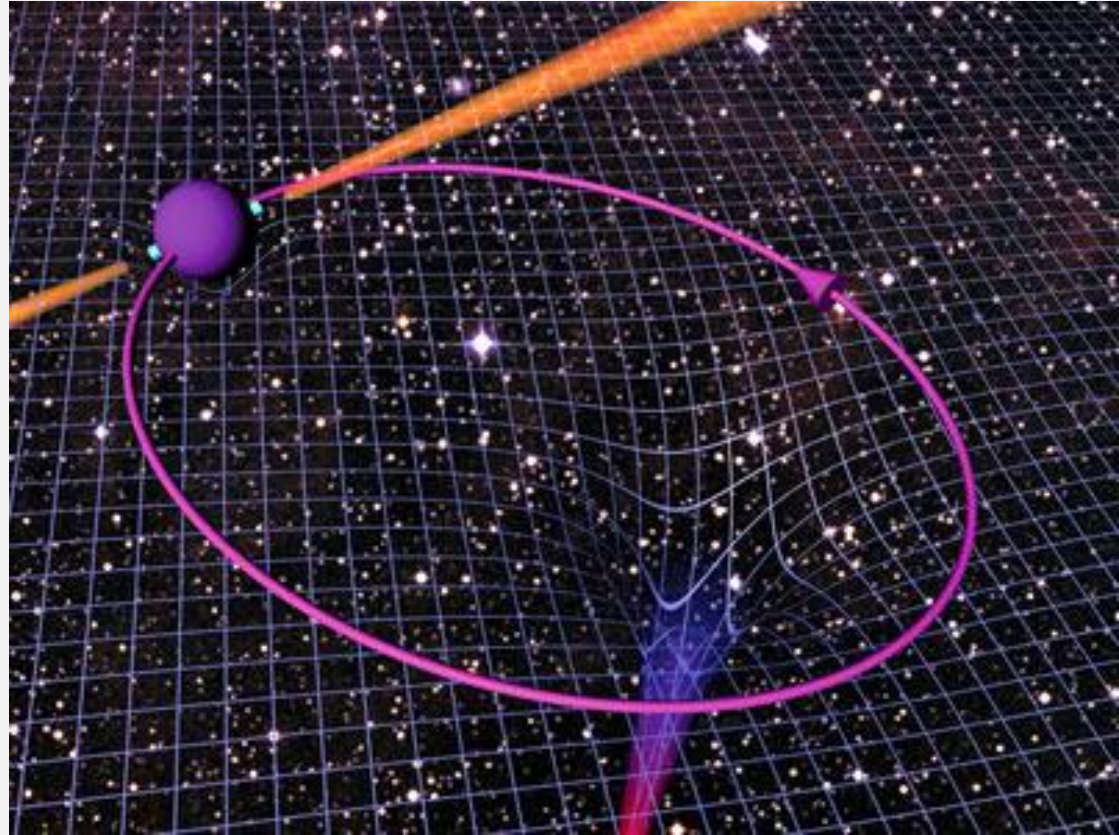
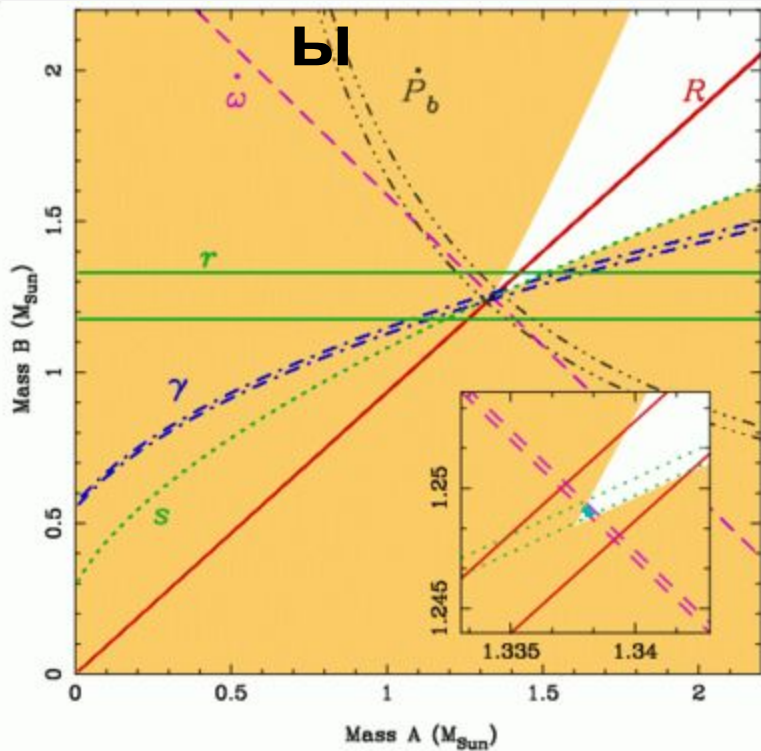


Кварковое состояние
вещества
энергетически
выгоднее барионного?

Для нейтронных звезд?

масс

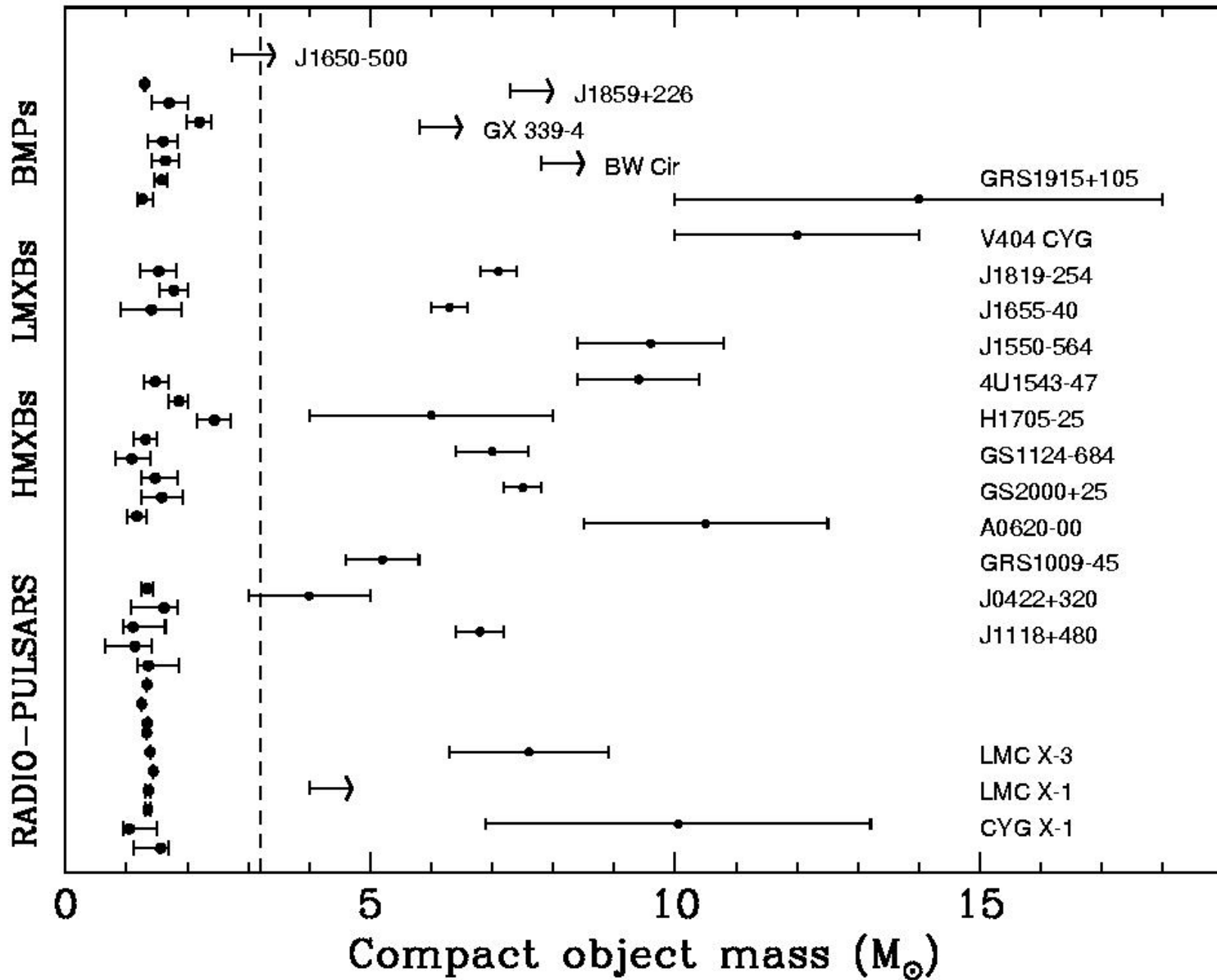
ы



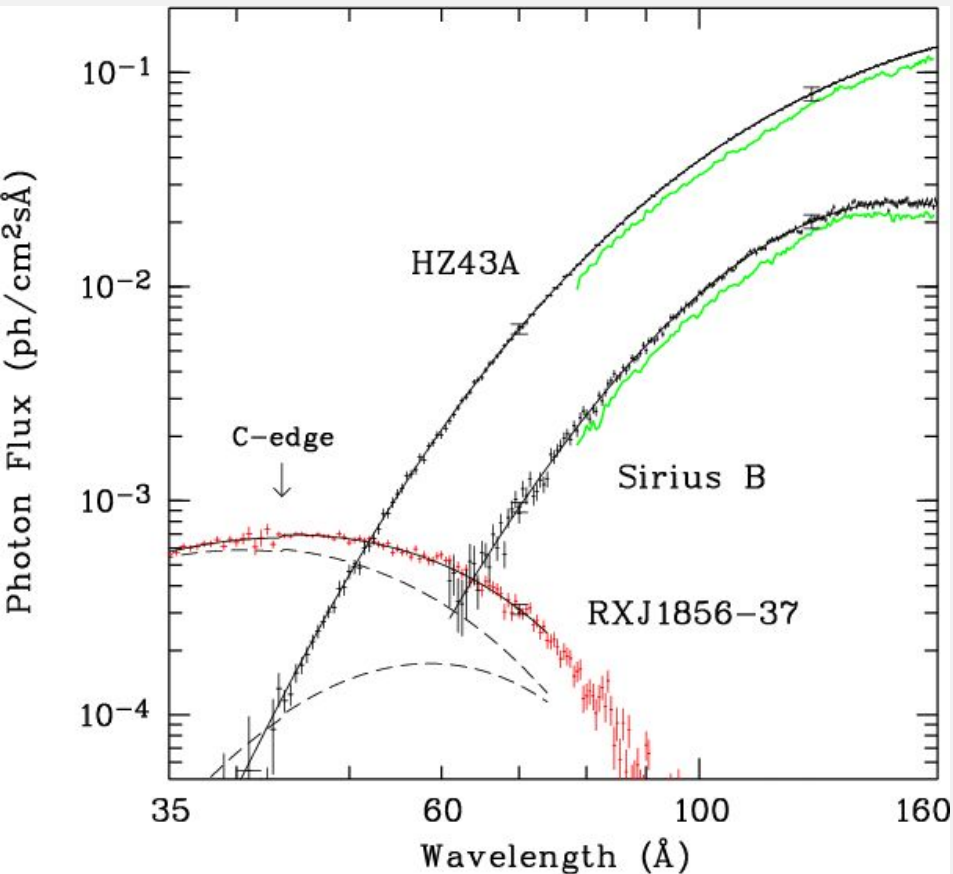
PSR J0737-3039A/B

Системы из двух нейтронных
звезд

Массы ЧЛ и НЗ в двойных системах

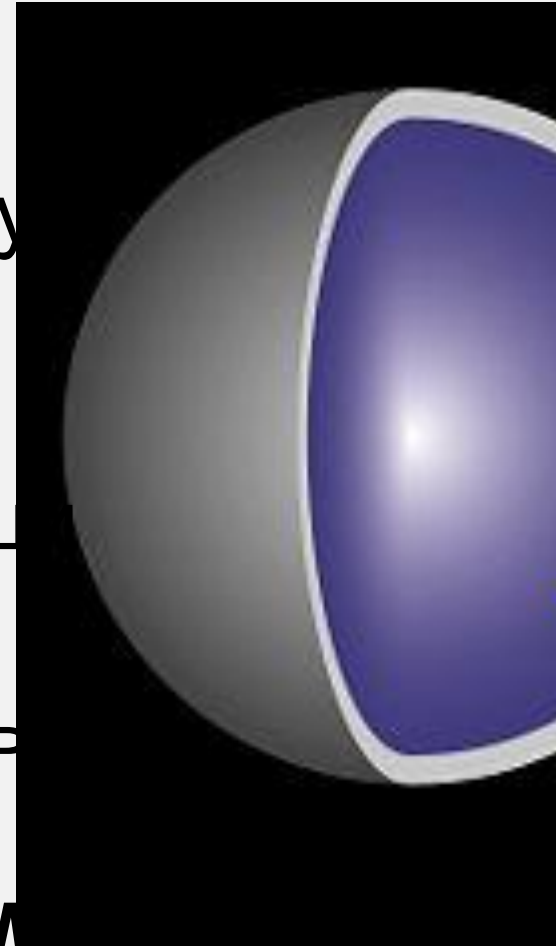


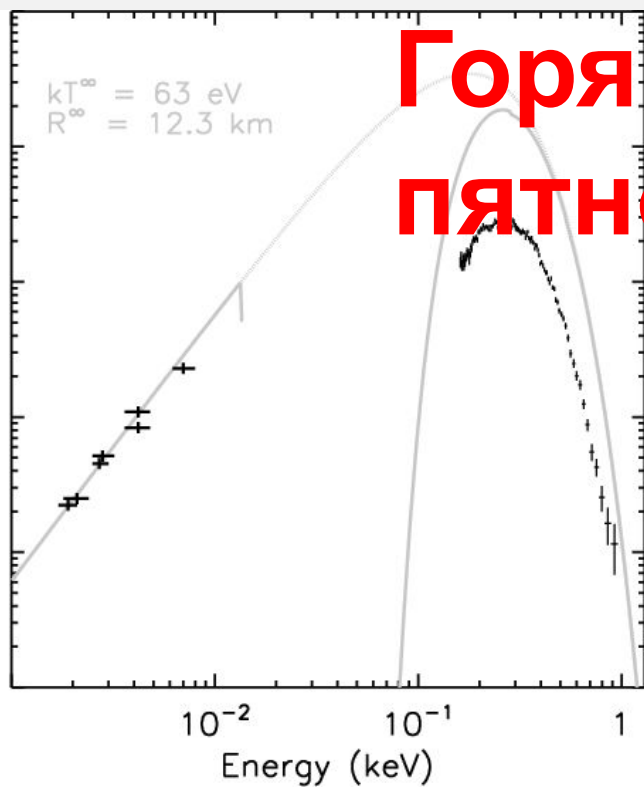
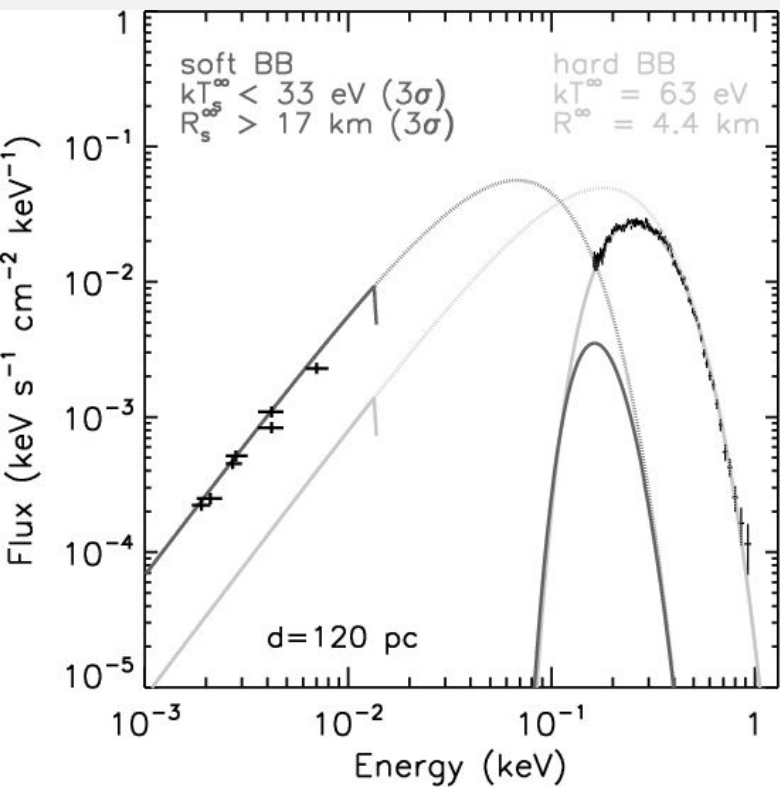
Для нейтронных звезд? Размер ы?



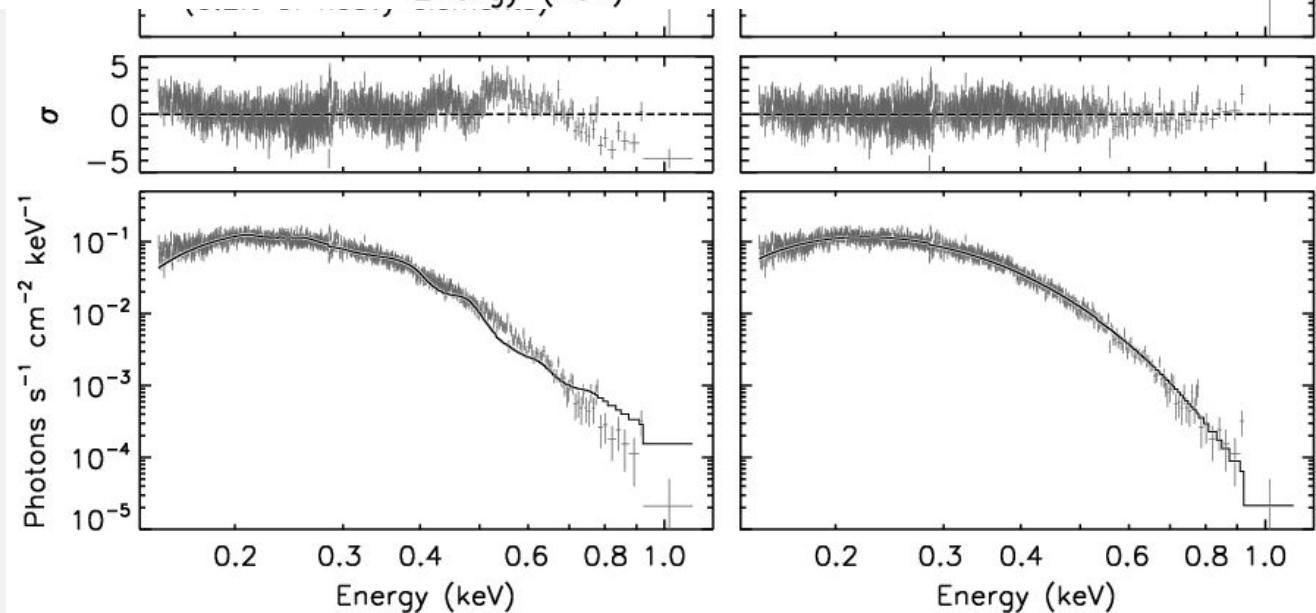
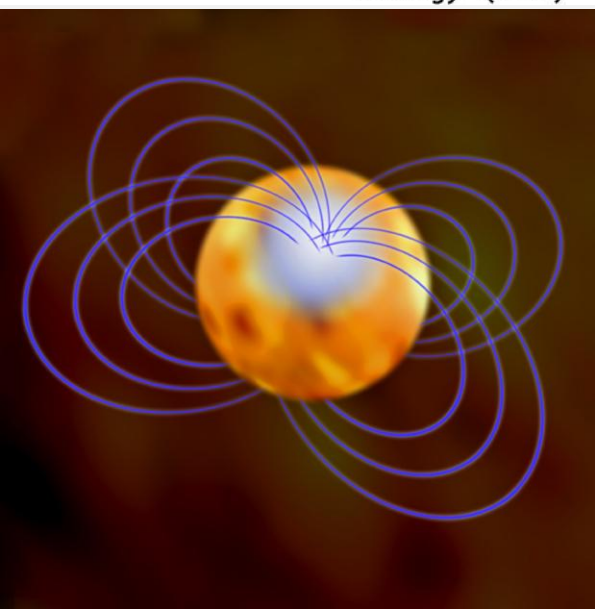
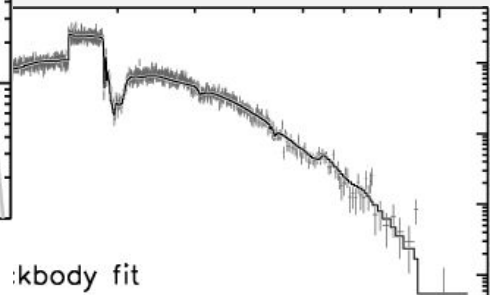
Температура
и радиус
остывающих
нейтронных
звезд

12-15 км





**Горячее
 пятно?**



Вспомним условия

$P_{c\odot} > 4.5 \times 10^8$ атм в центре, $T_c > \frac{GM_s \mu m_p}{6kr_s} = 2.3 \cdot 10^6 K$
Плотность ~ 150 Солнца

И в атмосфере НЗ

При типичной аккреции

$\dot{M} \sim 10^{-9} M_{\text{sun}} / \text{год} \sim 5000 \text{ г} / \text{см}^2 / \text{сек}$

Темп

$$\Sigma > \frac{10^{-9} Ms / year}{4\pi R^2} > 5 \times 10^3 \text{ г} / \text{см}^2 / \text{сек}$$

накопления

Высота однородной атмосферы НЗ

$$\frac{dP}{dz} = \rho g$$

$$P = \frac{\rho k T}{m_p}$$

$$P = P_0 \exp\left[-\frac{m_p g h}{k T}\right]$$

$$g = \frac{GM_{ns}}{R^2} \sim 2 \times 10^{14} \text{ кТ} \sim 1$$

$$h_{ns} \sim 5 \text{ см} \text{ кЭВ}$$

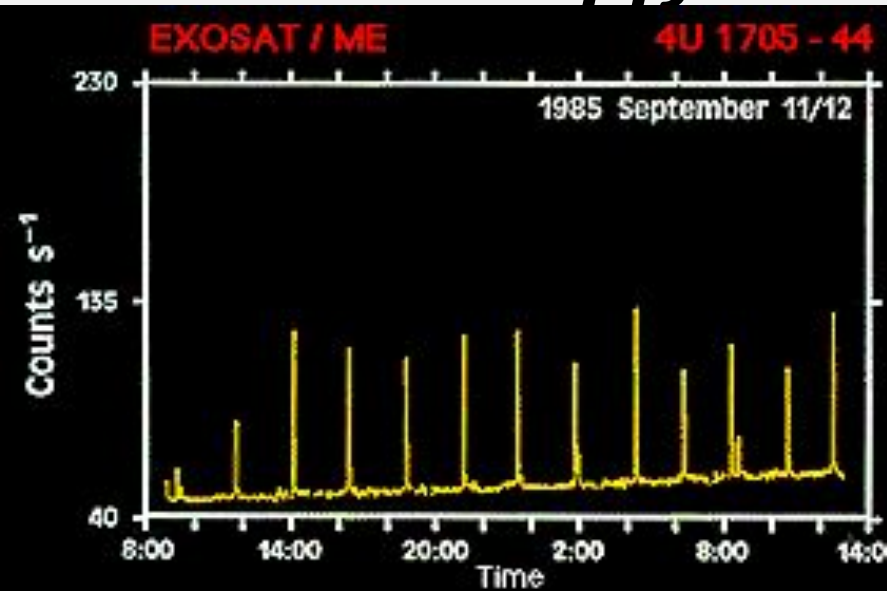
На глубине порядка 10 см за
сутки

копится плотность $> 10^7 \text{ г/см}^3$

Термоядерные

Для нейтронных

звезд ^{Размер}
Д?



Термоядерное
горение
атмосферы (взрыв)

$$\frac{\sigma T^4}{c} \frac{\sigma_T}{m_p} = \frac{GM(1 - R_g/R)^{3/2}}{R^2}$$

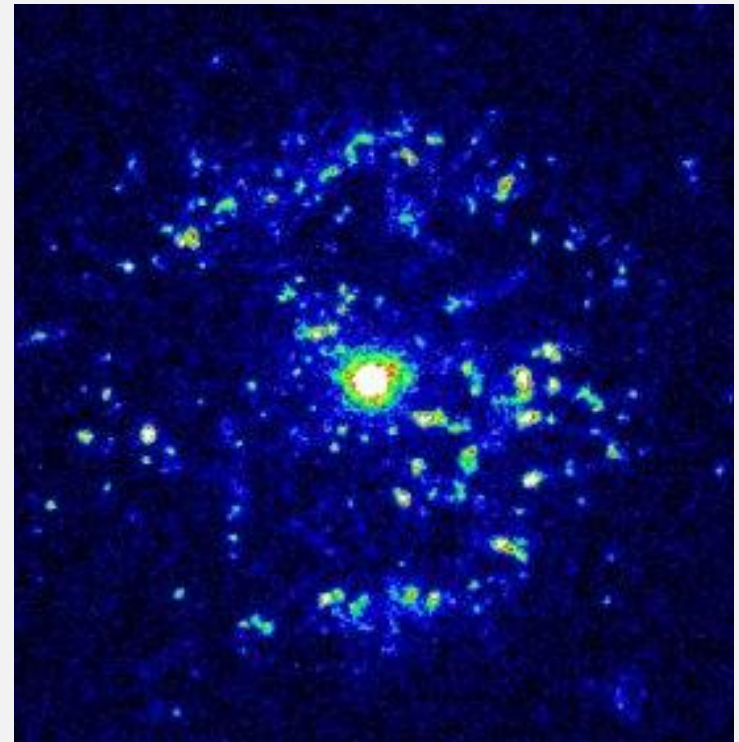
12-15км





Всплески
первого
типа на НЗ

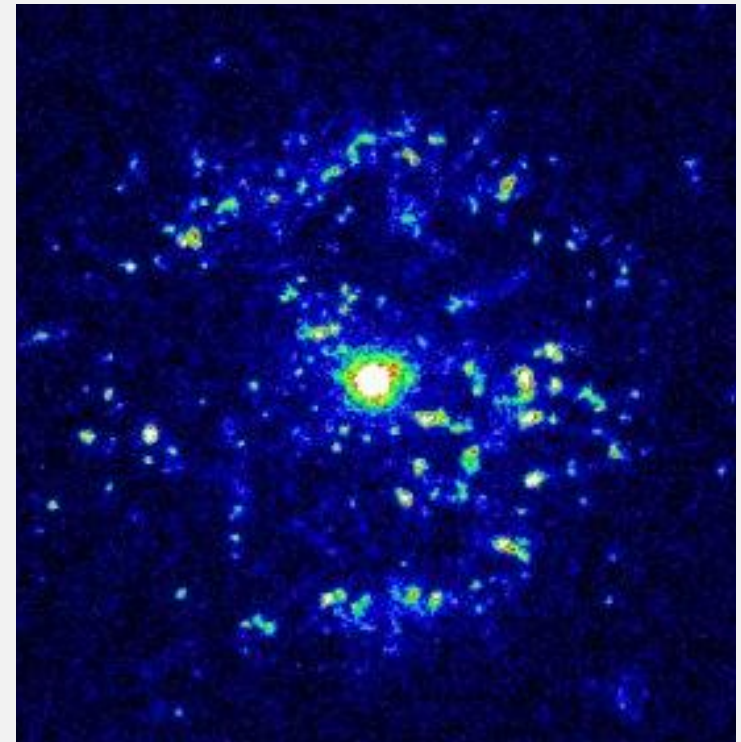
Взрывы
классических
Новых на БК
**В чем
разница?**





Термоядерны е взрывы на КОМП. объектах

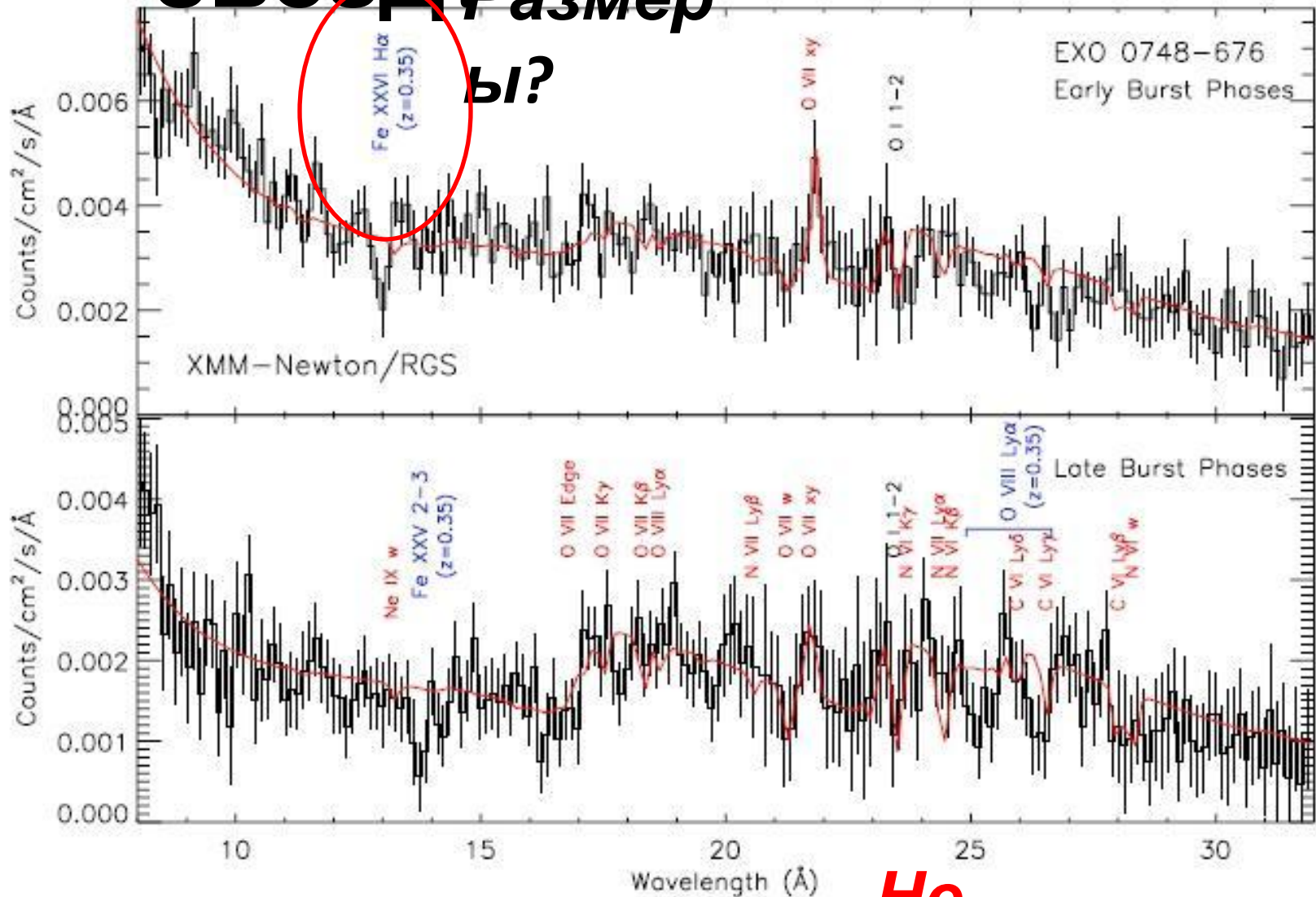
$$E_{гр} \sim \frac{GM}{R}, E_{тя} \sim 0.007 mc^2$$



Для нейтронных

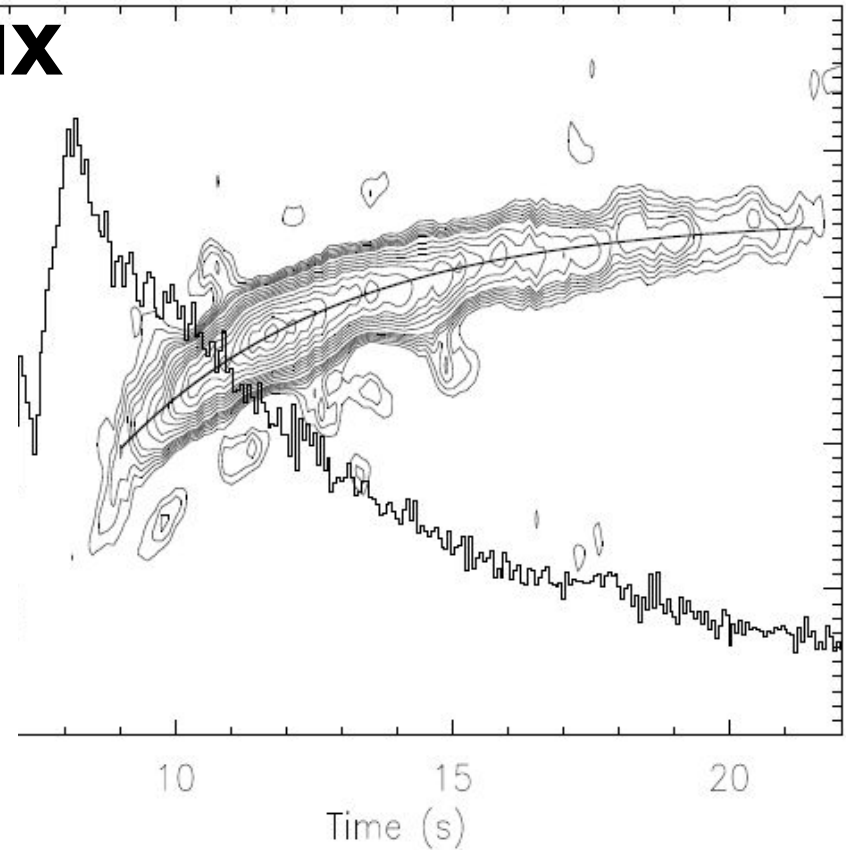
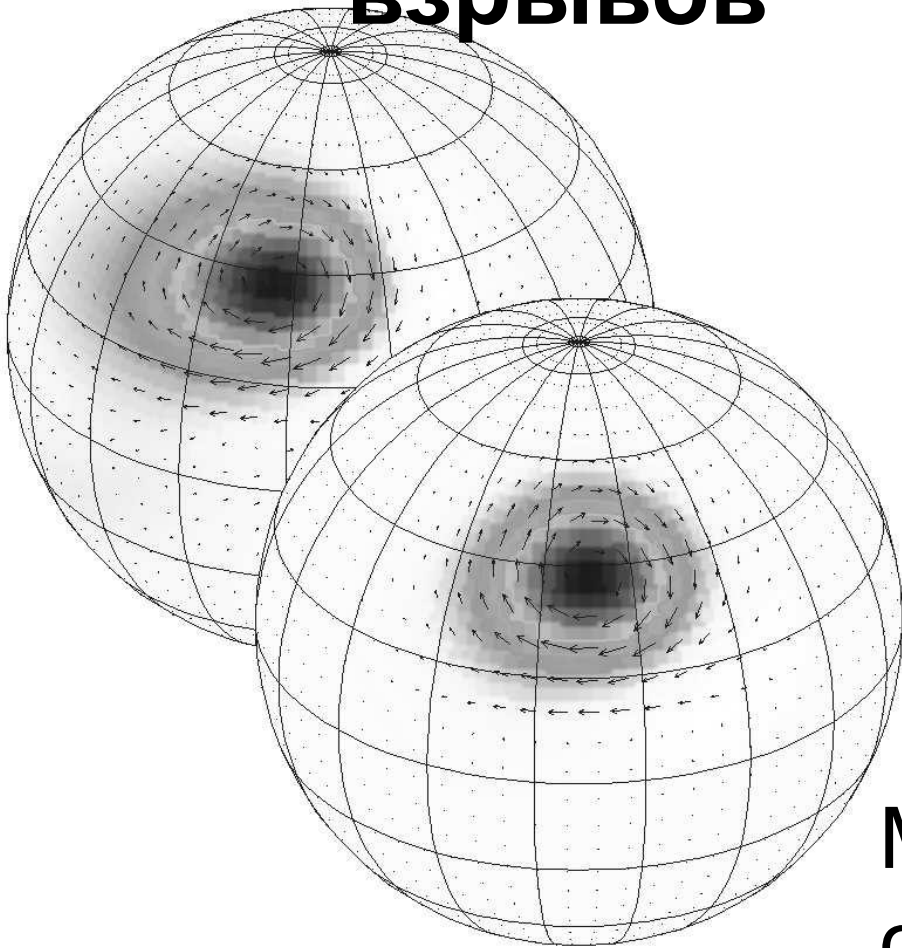
звезд? Размер

ы?



He

Осцилляции во время термоядерных взрывов



Многообещающий
способ

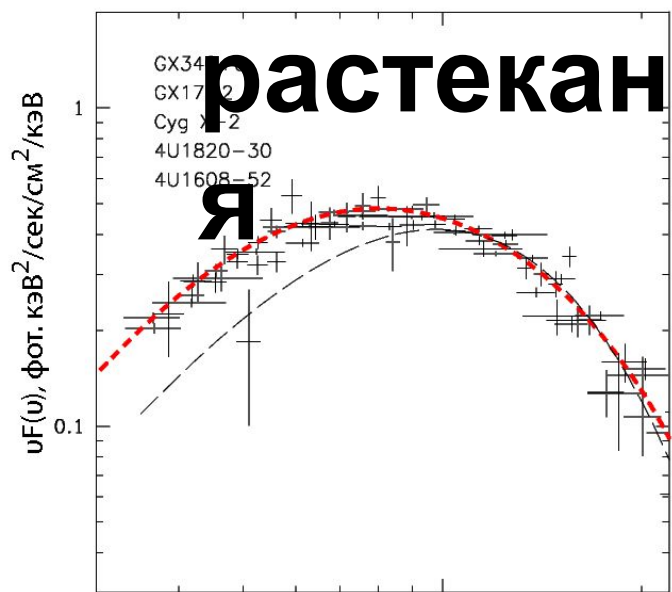
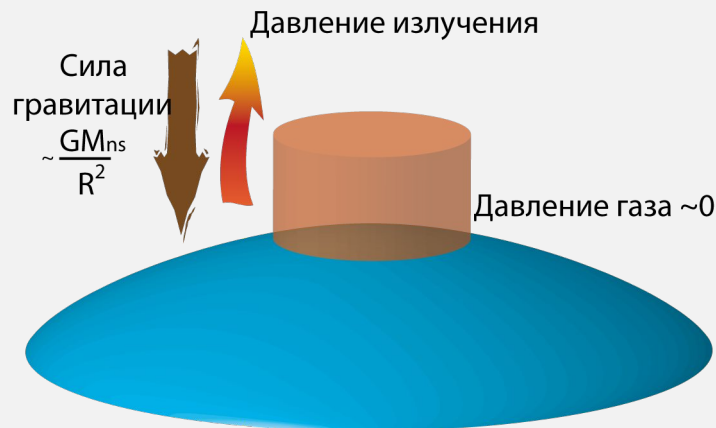
Для нейтронных

Сверх?

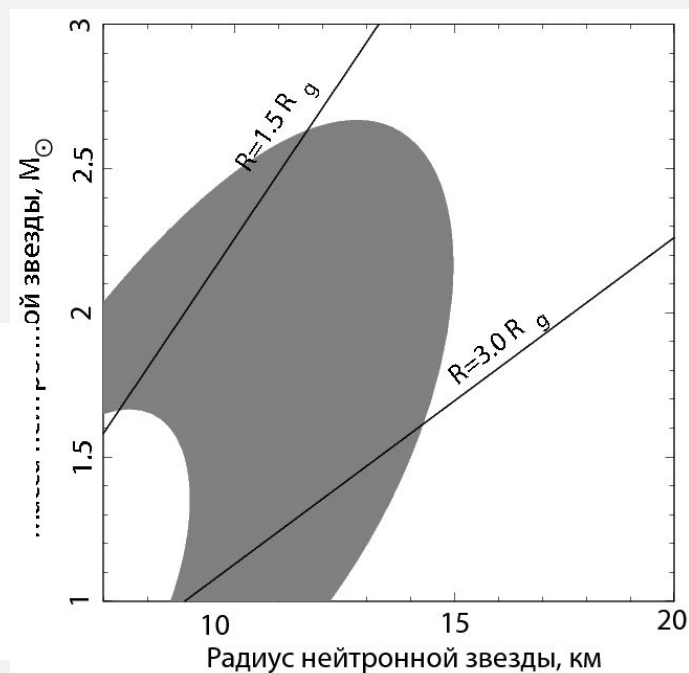
слоя

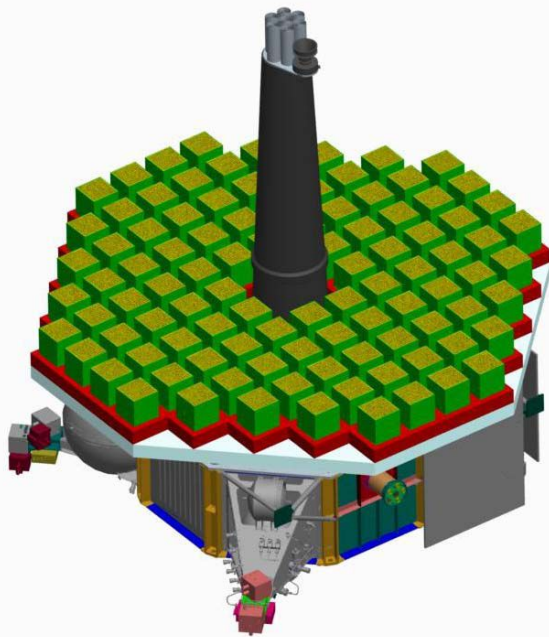
растекани

Я

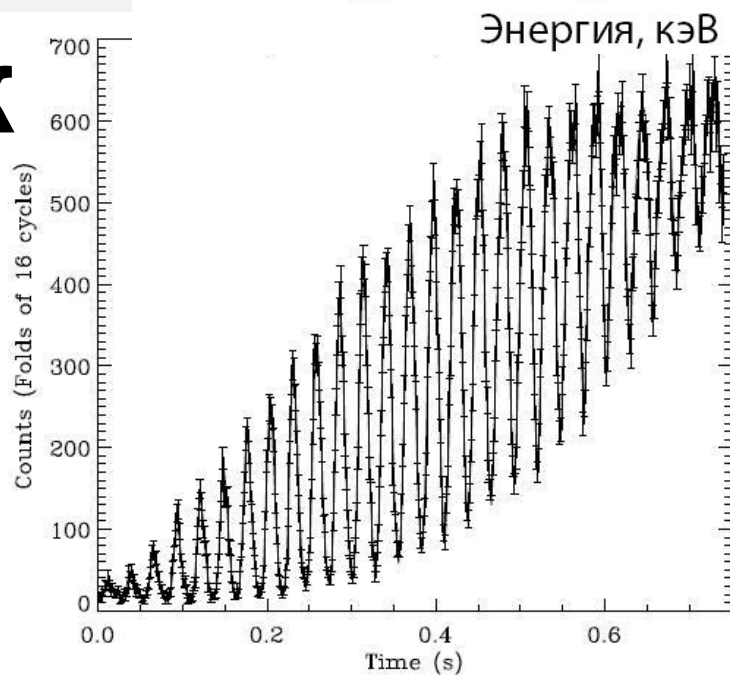
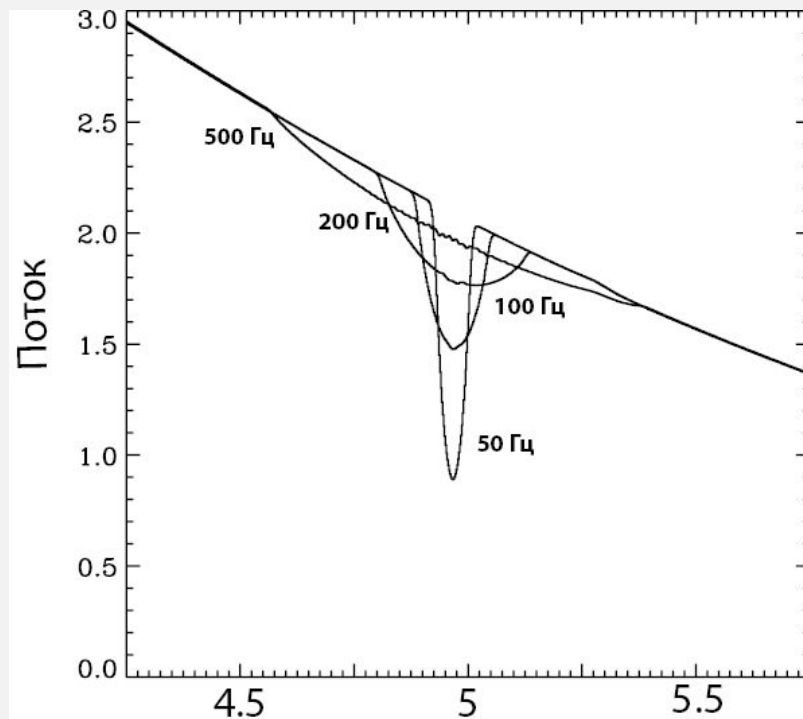


$$\frac{\sigma T^4}{c} \frac{\sigma_T}{m_p} = \frac{GM(1 - R_g/R)^{3/2}}{R^2}$$





Проект “Рентгеновский Микрофон” Эфф.



Двойные системы



Двойные СИСТЕМЫ

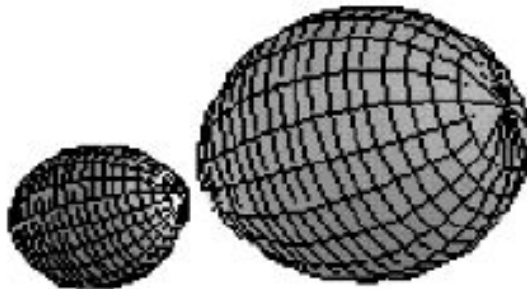
detached



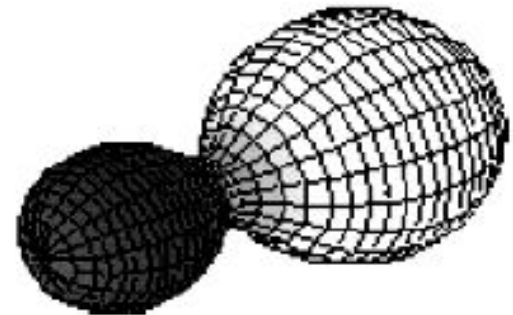
semi-detached
(Algol)

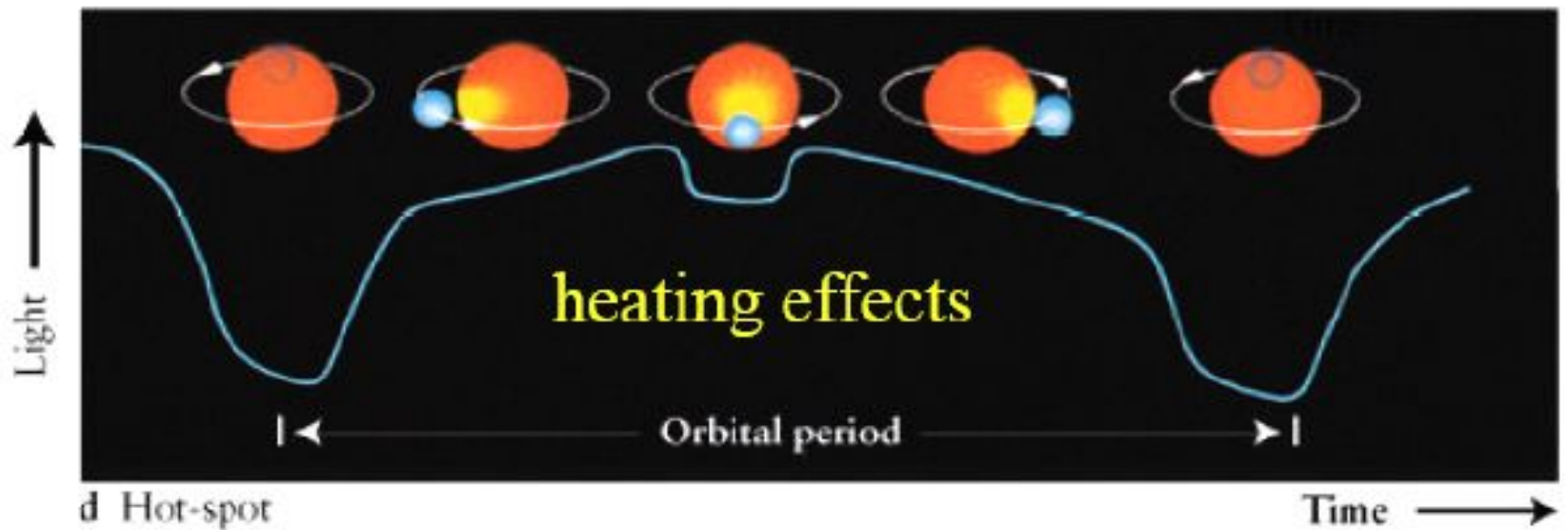
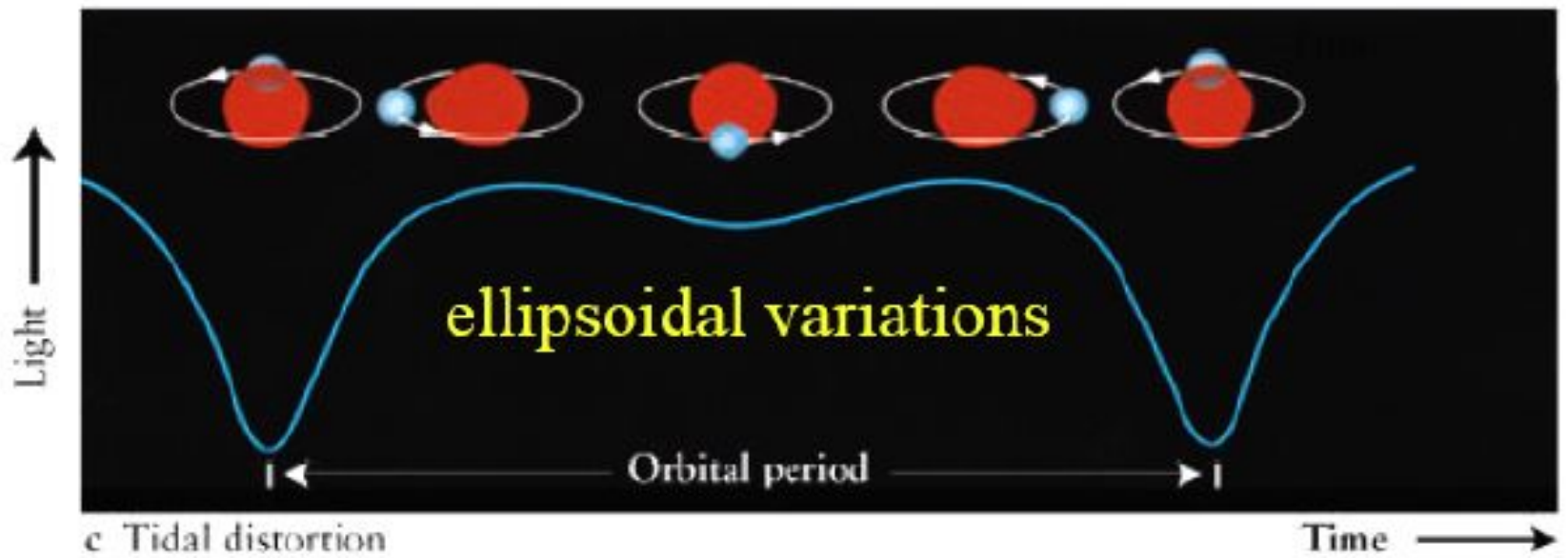


close to contact



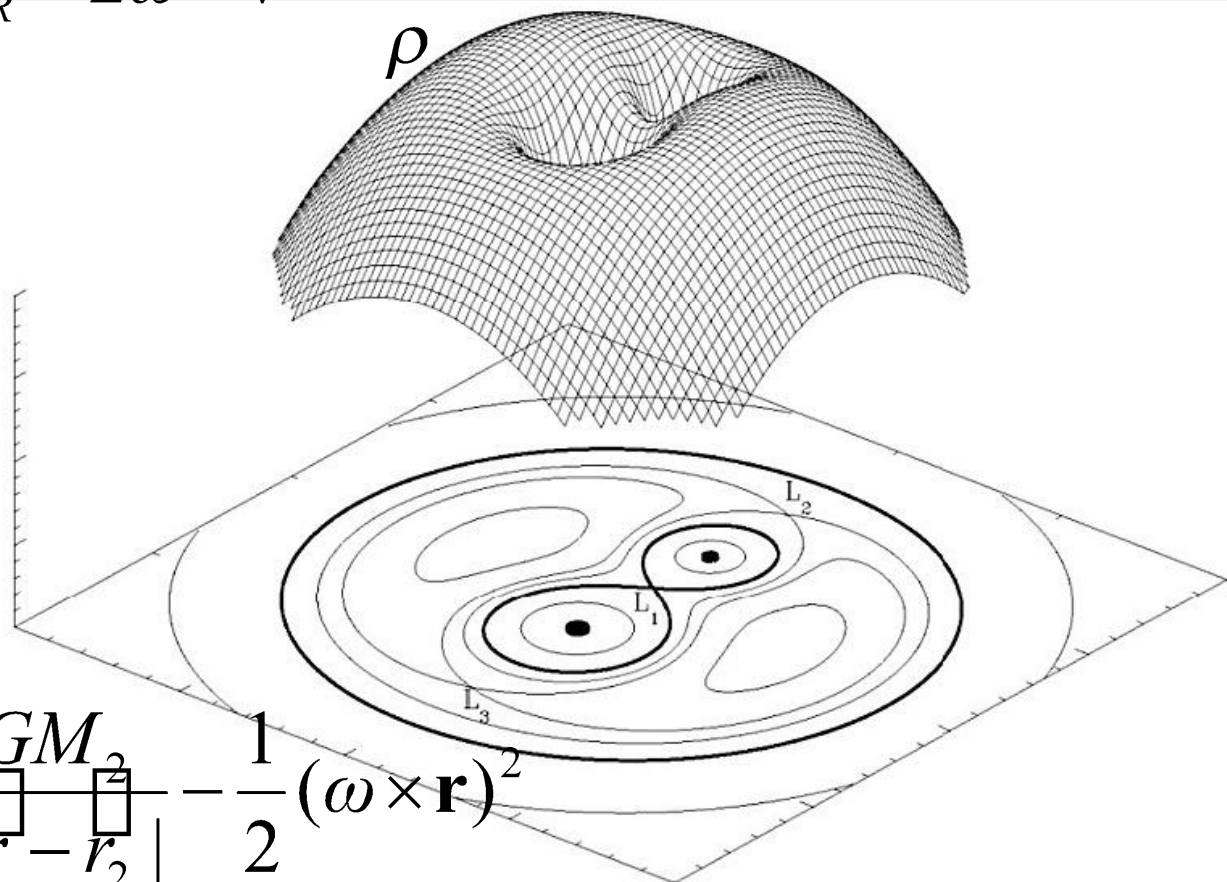
contact (W UMa)





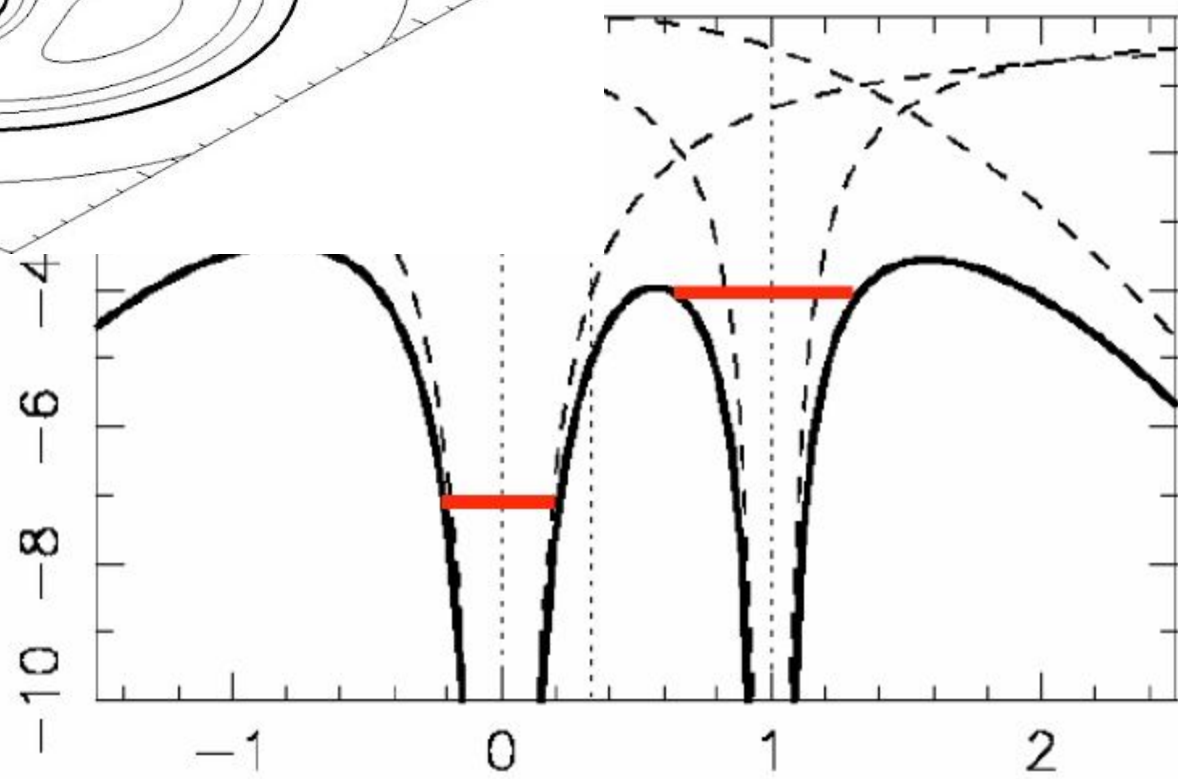
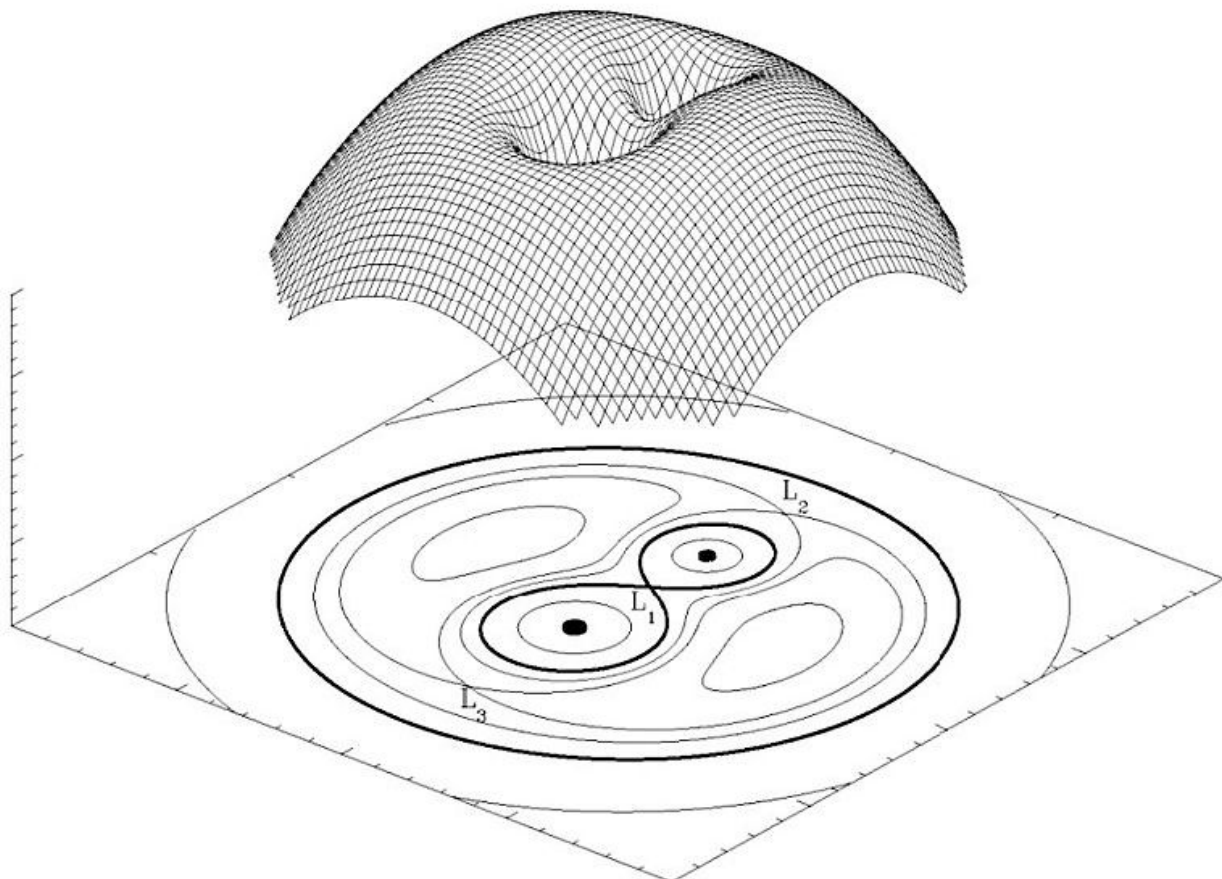
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla \Phi_R - 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} - \frac{\nabla P}{\rho}$$

$2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$ - сила
Кориолиса



$$\Phi_R = -\frac{GM_1}{|r - r_1|} - \frac{GM_2}{|r - r_2|} - \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$$

потенциал
Роша



Угловой момент двойной системы

$$J = (M_1 a_1^2 + M_2 a_2^2) \omega, a_{1,2} = \left(\frac{M_{1,2}}{M} \right) a \quad \omega^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}$$

$$J = M_1 M_2 \left(\frac{Ga}{M_1 + M_2} \right)^{1/2}$$

При консервативном обмене массой $M = M_1 + M_2 = \text{const}$

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2\dot{J}}{J} + \frac{2(-\dot{M}_2)}{M_2} \left(1 - \frac{M_2}{M_1} \right)$$

$$\frac{R_2}{a} = 0.462 \left(\frac{M_2}{M_1 + M_2} \right)^{1/3}$$

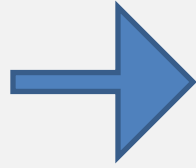
$$\frac{\dot{R}_2}{R_2} = \frac{2\dot{J}}{J} + \frac{2(-\dot{M}_2)}{M_2} \left(\frac{5}{6} - \frac{M_2}{M_1} \right)$$

размер полости Роша и его

эволюция

Если
и

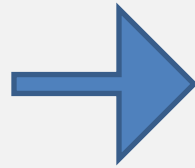
$$\frac{M_2}{M_1} > \frac{5}{6}$$



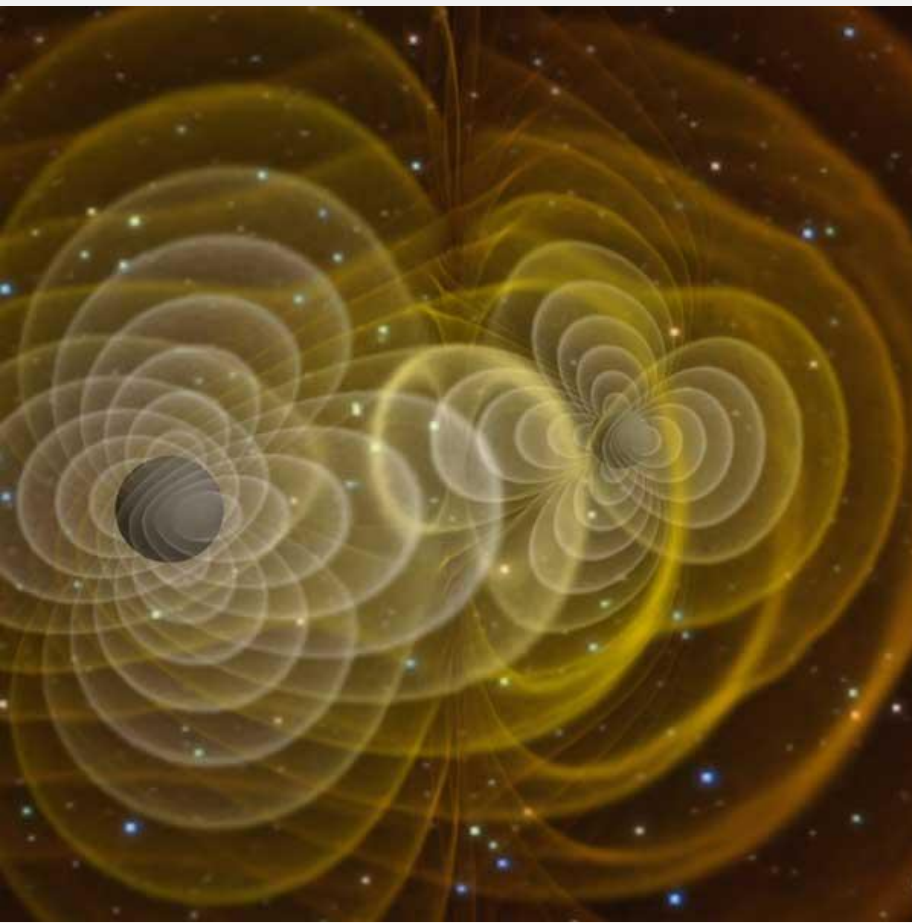
Самоподдерживающееся
перетекание

Если
и

$$\frac{M_2}{M_1} < \frac{5}{6}$$



Для поддержки
перетекания
необходим
отвод
углового
момента



Гравитационные волны

$$\frac{dE_{orb}}{dt} = - \frac{32G^4}{5c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5}$$

$$\frac{dJ_{orb}}{dt} = - \frac{32G^{7/2}}{5c^5} \frac{\mu^2 M^{5/2}}{a^{7/2}}$$

$$\tau(GW) = \left(\frac{d \ln L_{orb}}{dt} \right)^{-1} = 1.2 \times 10^9 \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{M_2}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{a}{R_\odot} \right)^4$$

Магнитный звездный ветер

Ветер

Вещество "отщепляется" от зв.

ветра

на расстоянии $\gg R_s$

Уносит много углового
момента $t^{-1/2}$

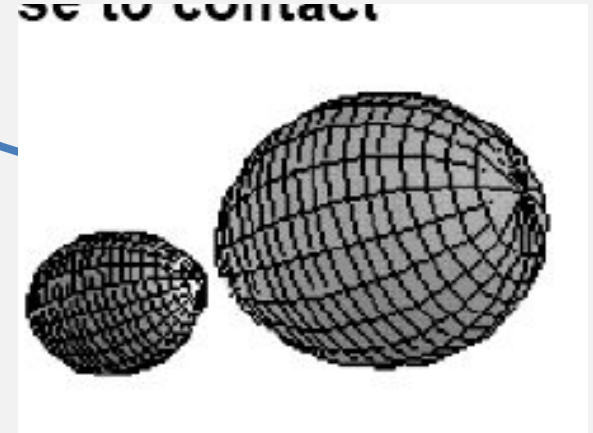
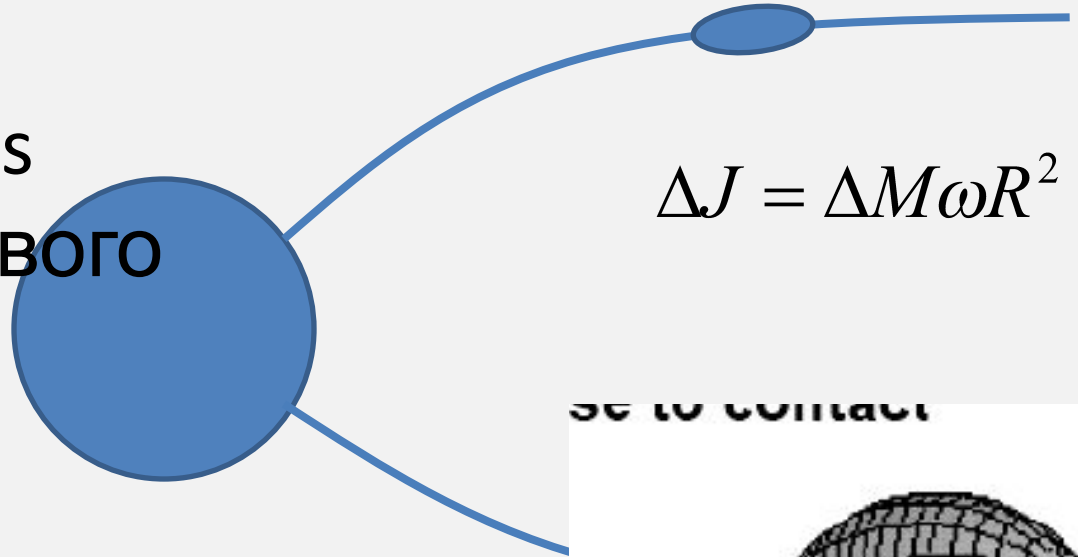
из

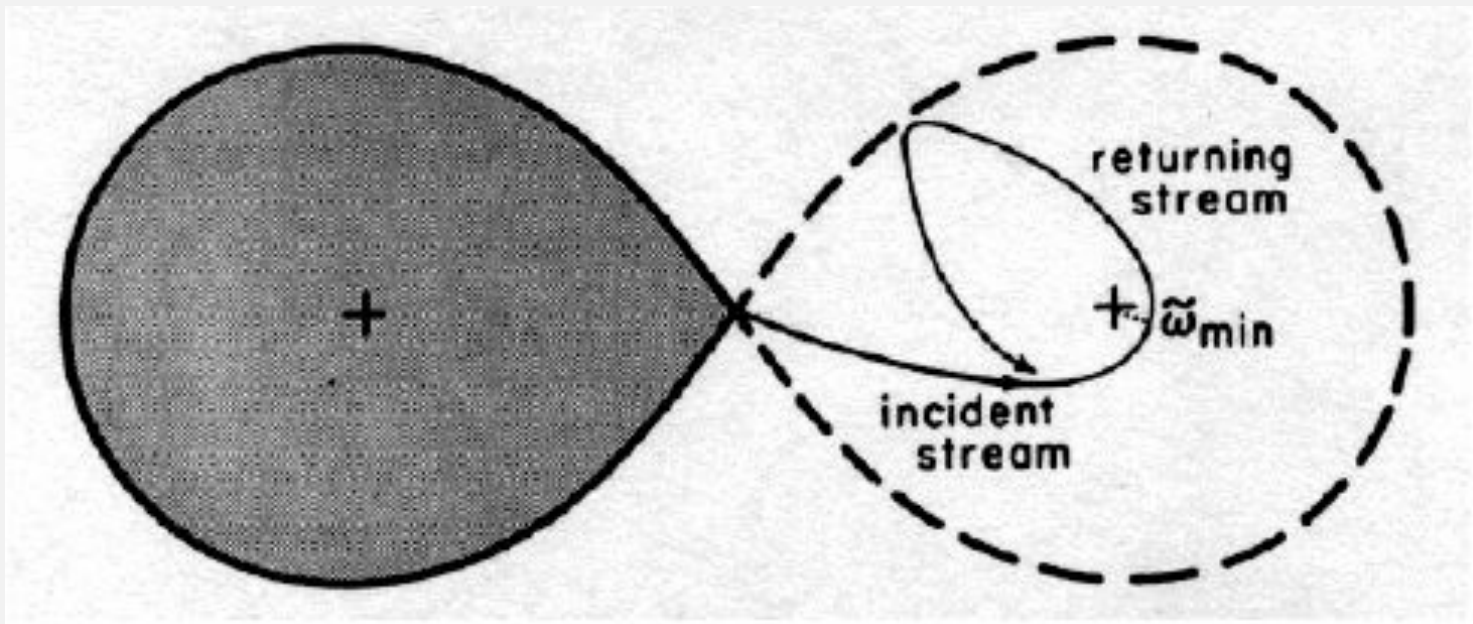
наблюдений

$\omega_2 = \omega$ (приливные
силы)

$$\frac{dL_{orb} (= \mu \omega a^2)}{dt} = \mathcal{J}_2$$

$$\frac{d \ln L_{orb}}{dt} = - \frac{R_2^4}{M_1} \frac{GM^2}{a^5}$$

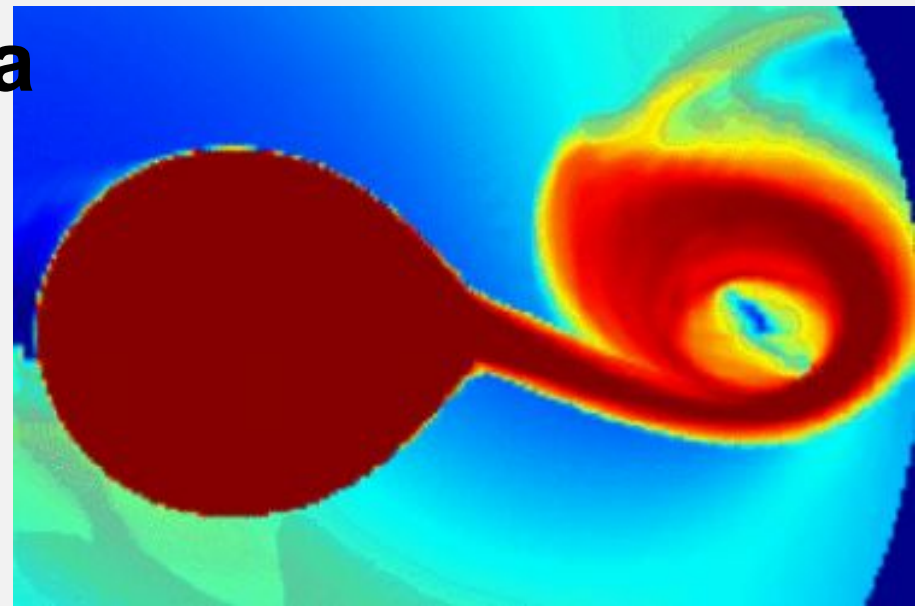




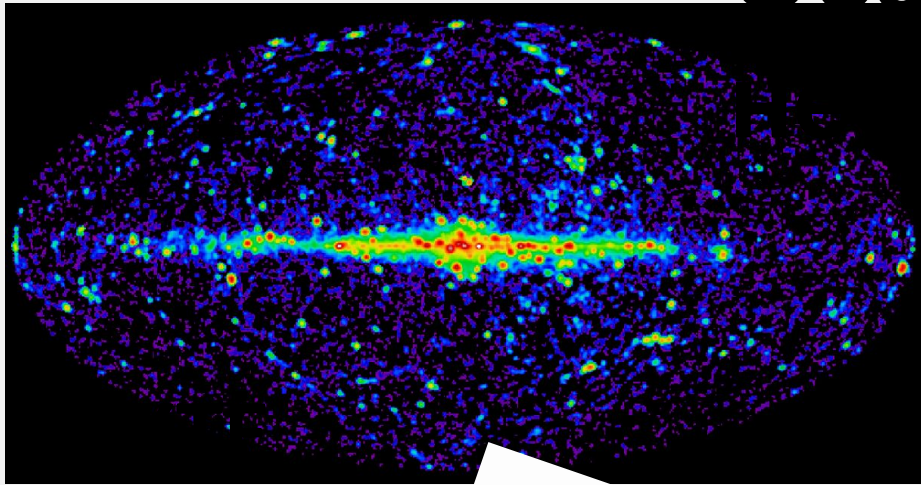
Звезда заполняет полость

Роша:

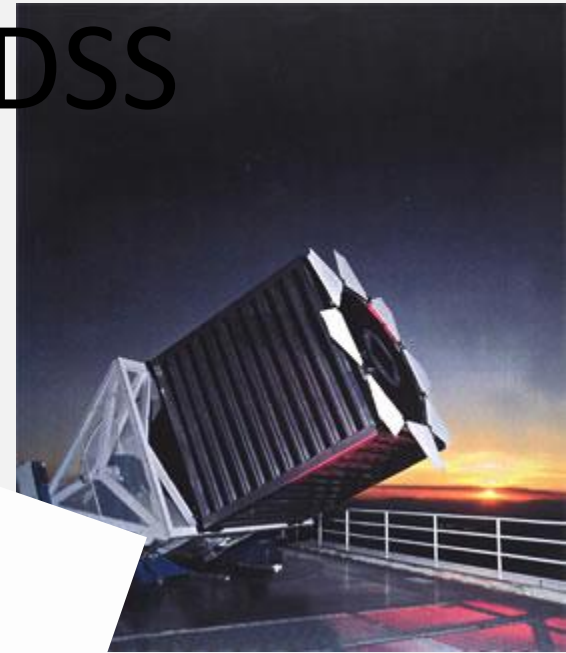
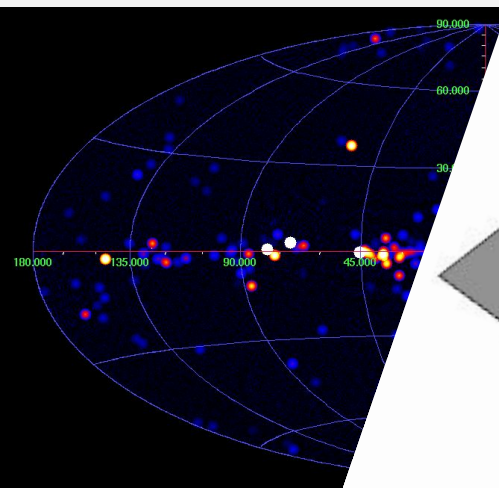
Образование диска



Обзоры всего



Слоан
SDSS



PanSTARRS
LSST..

INTEGR

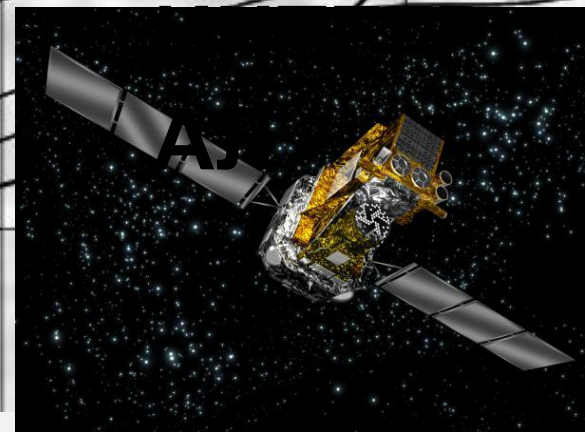
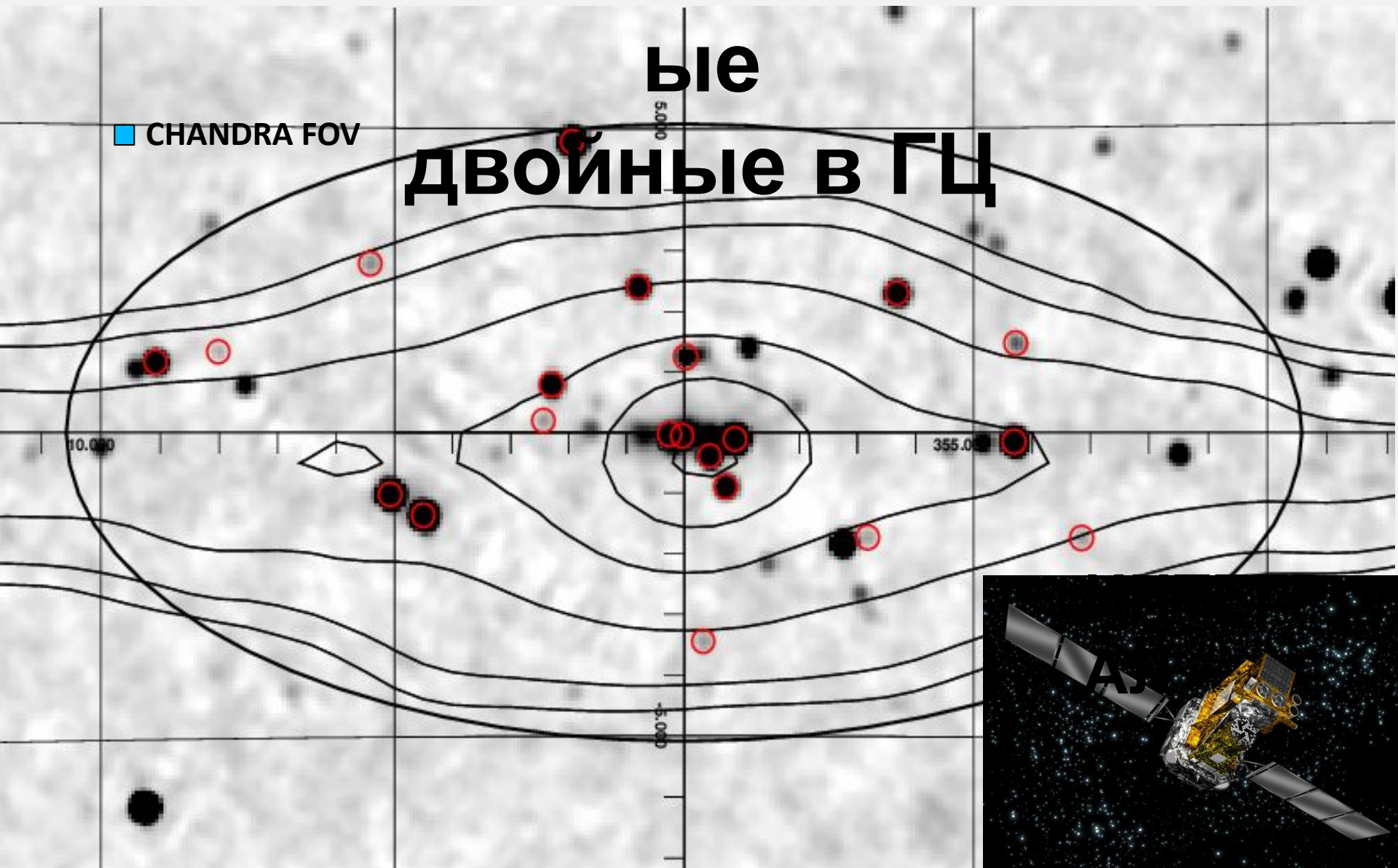
ближайший проект
Спектр-рентген-

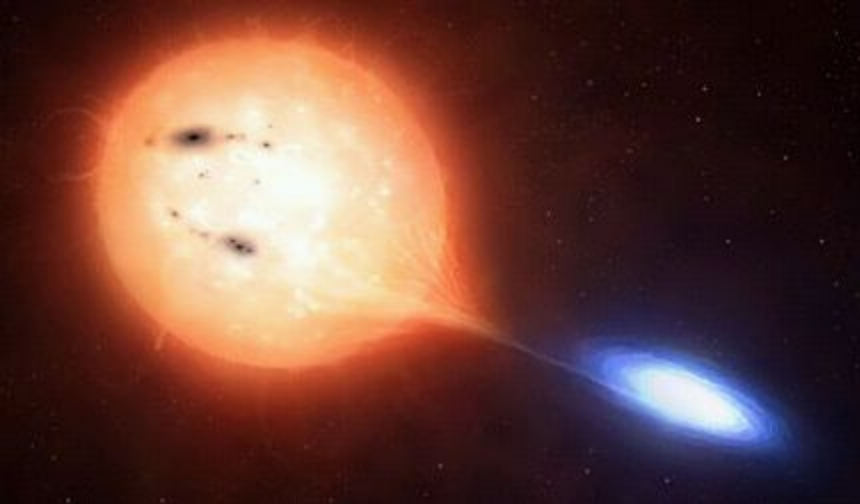
Маломассивн

ые

ДВОЙНЫЕ В ГЦ

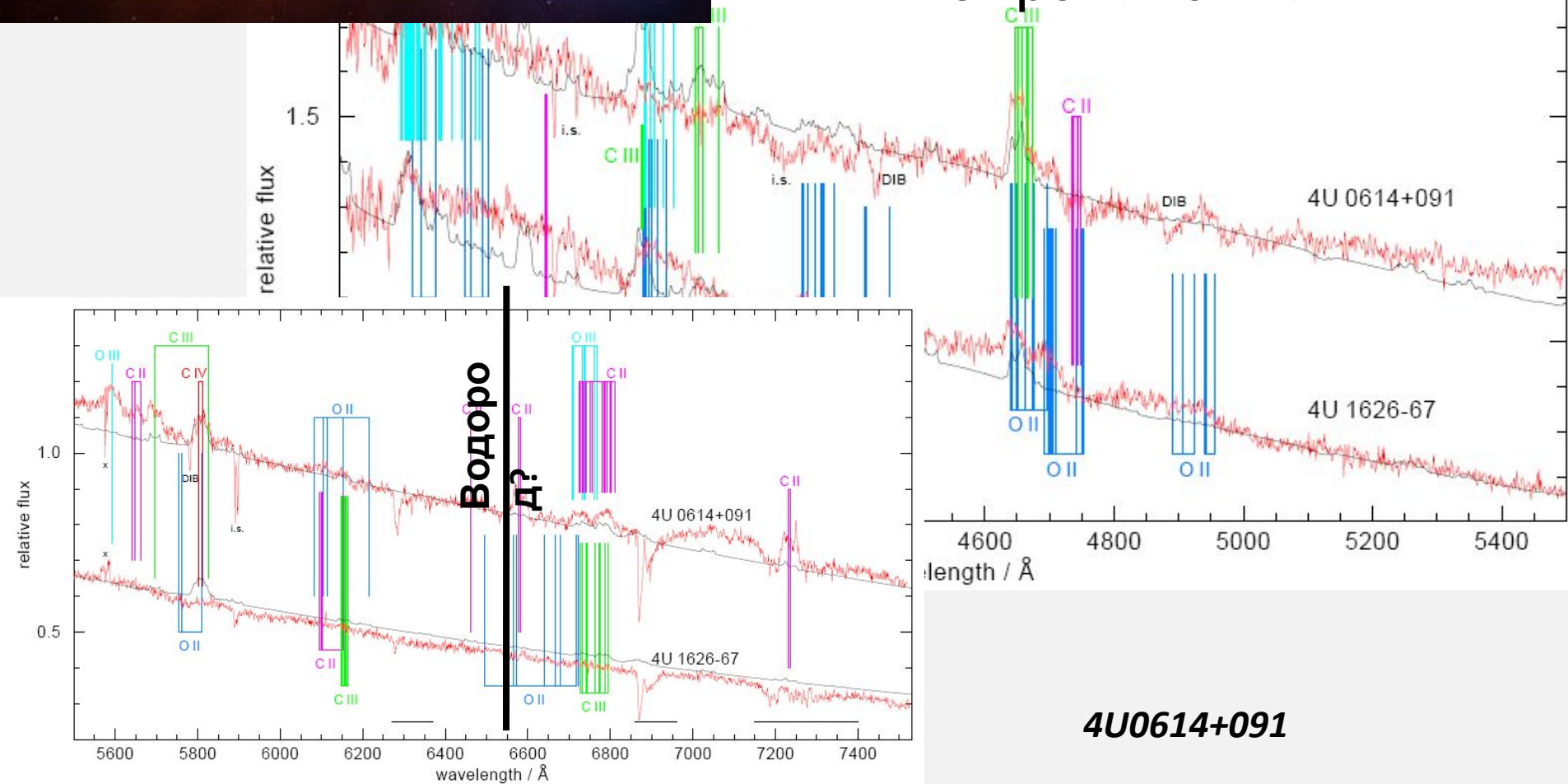
■ CHANDRA FOV





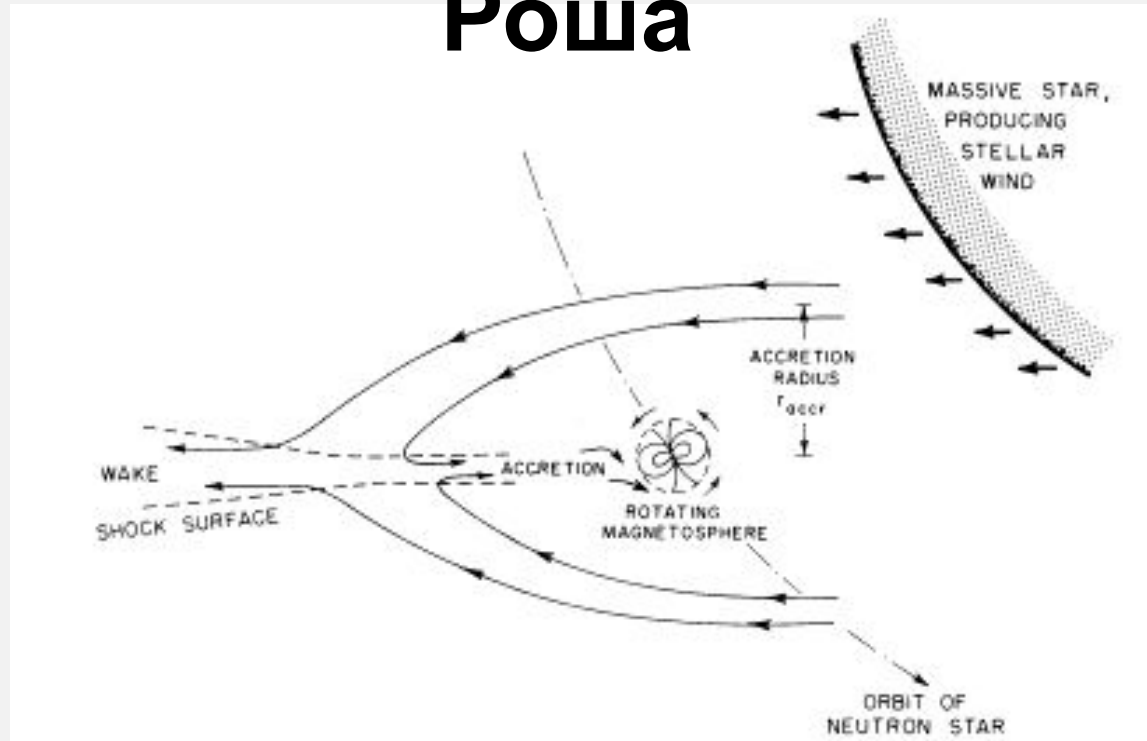
Пример: как минимум некоторые из таких систем действительно очень тесные –

влияние грав. волн?



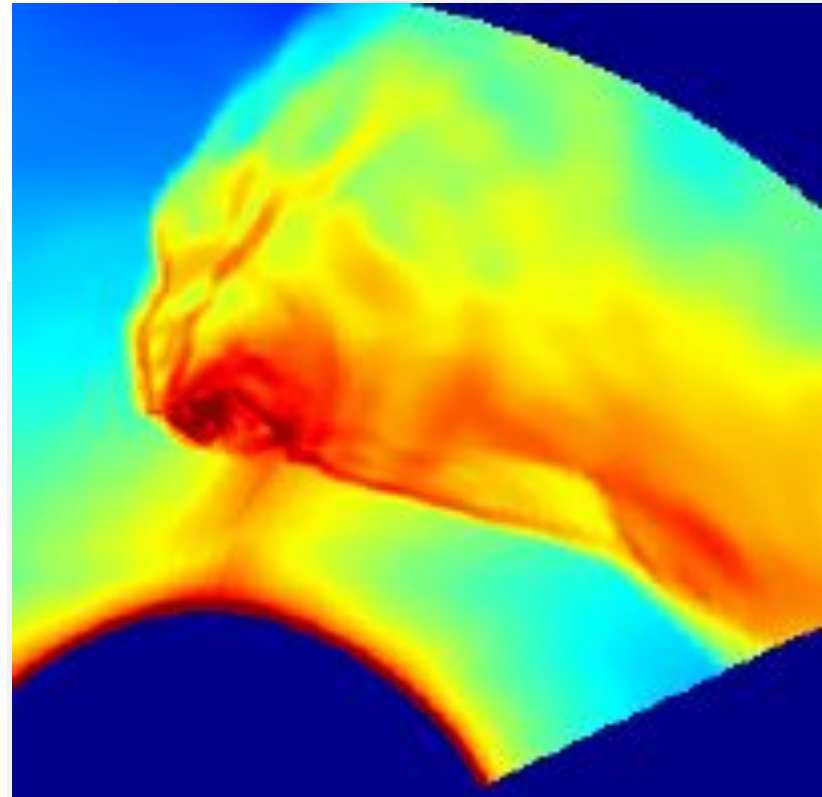
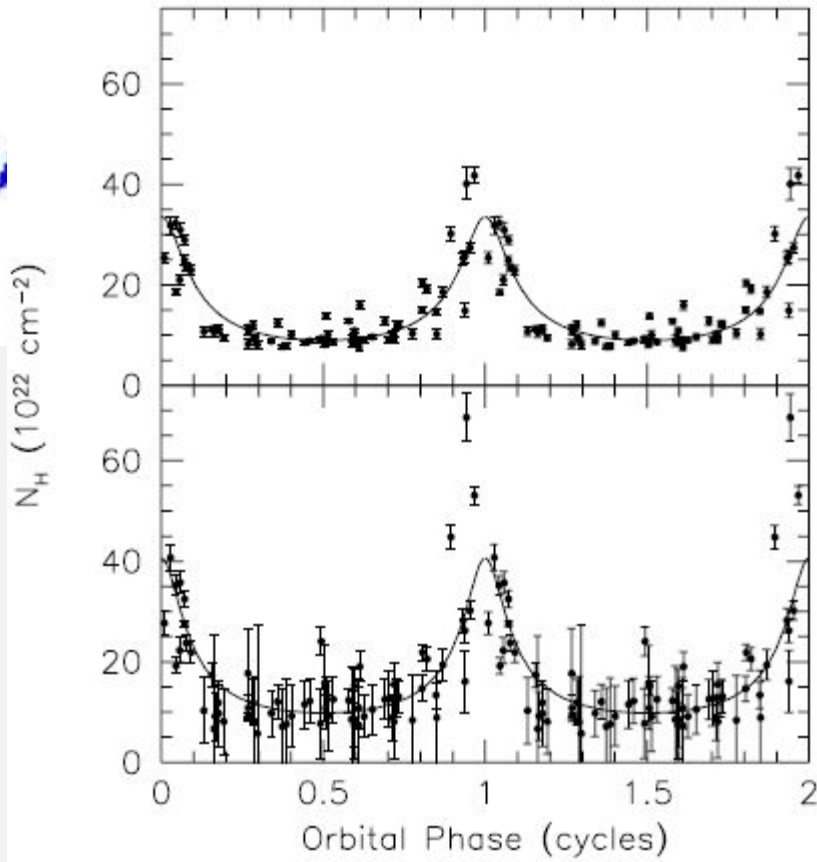
4U0614+091

Аккреция из ветра: Звезда не заполняет полость Роша



$$r_{acc} = \frac{GM_x}{V_{rel}^2} = \frac{GM_x}{V_w^2 + V_x^2}$$

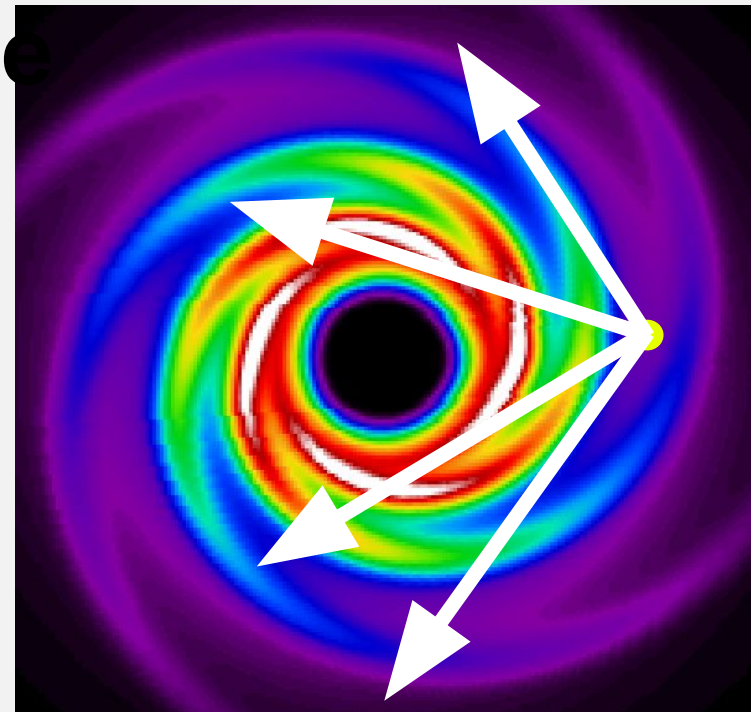
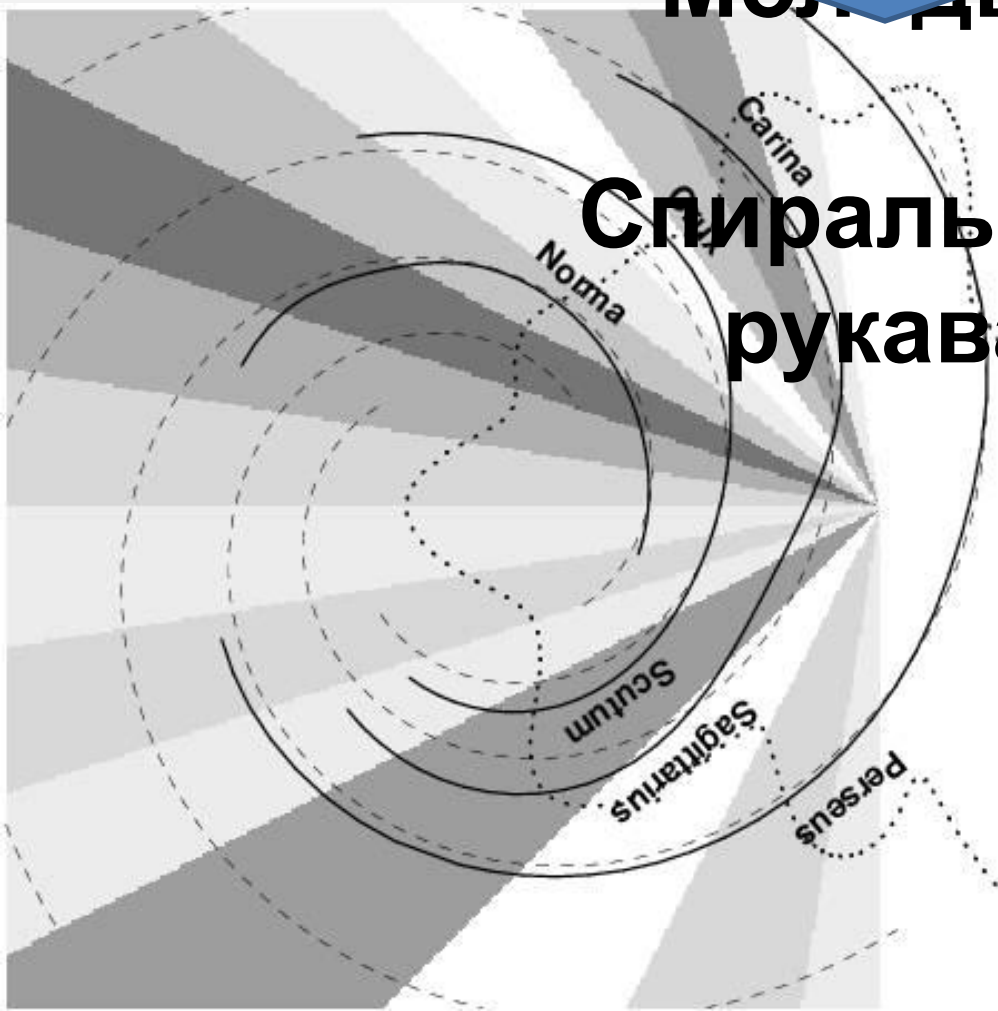
Аккреция из ветра: Звезда не заполняет полость Роша



**Массивные
двойные**

Молодые

**Спиральные
рукава**

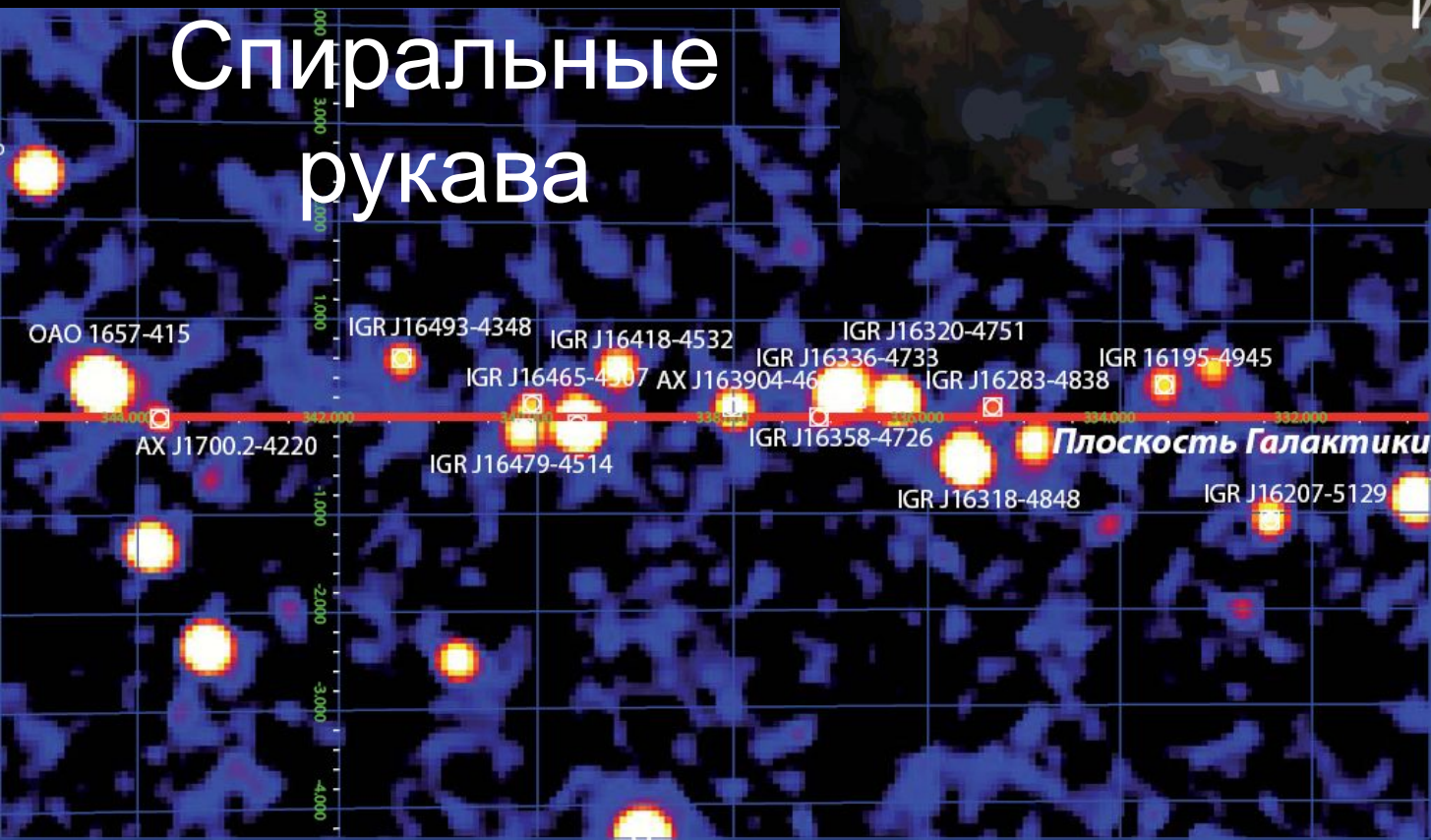


Массивные

двойные

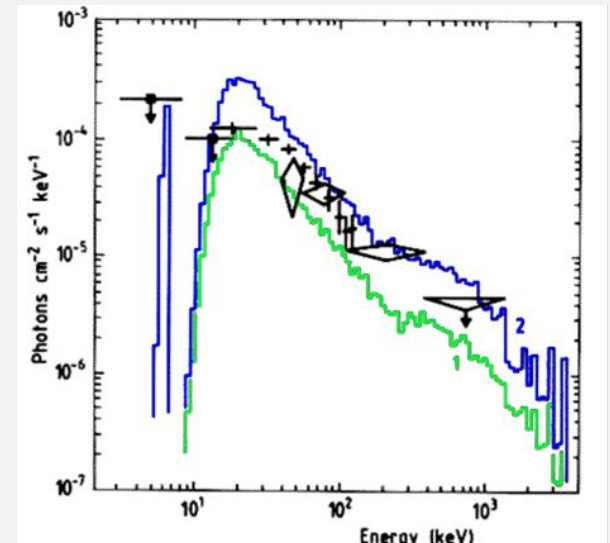
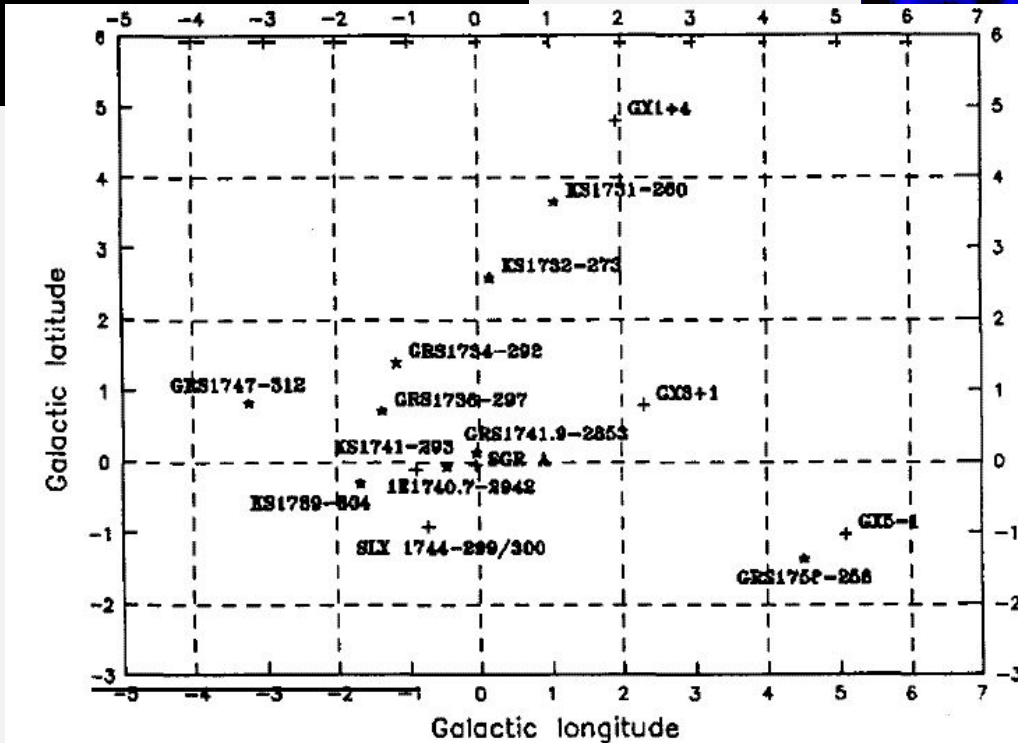
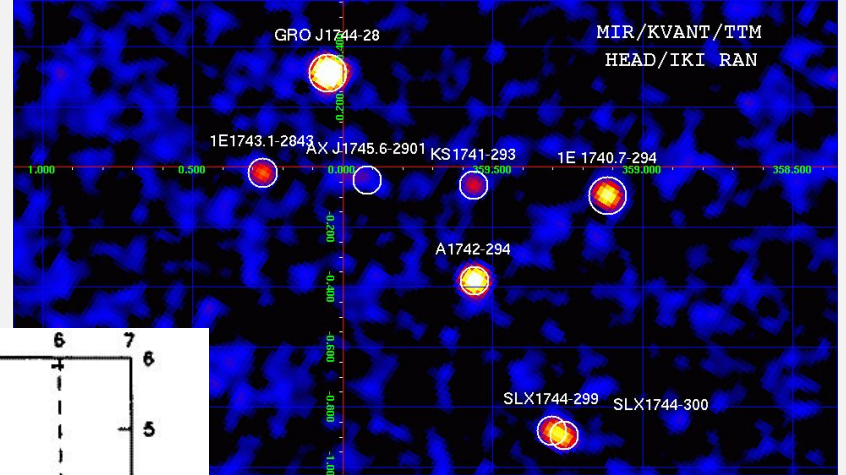
Молодые

Спиральные рукава



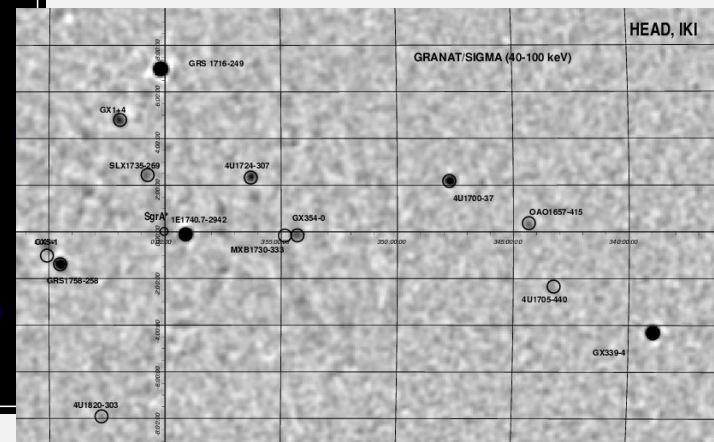
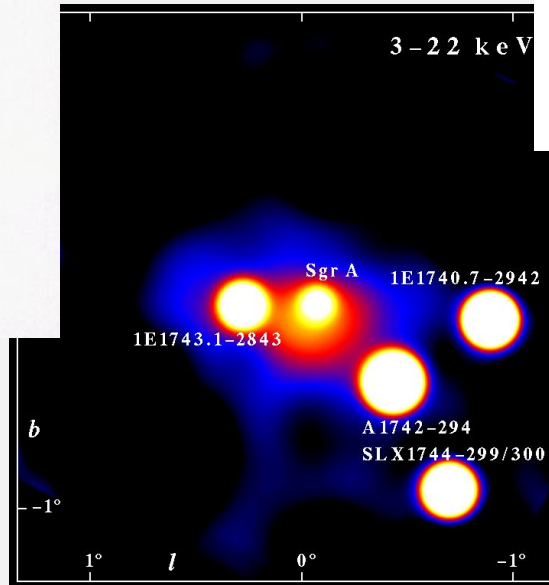
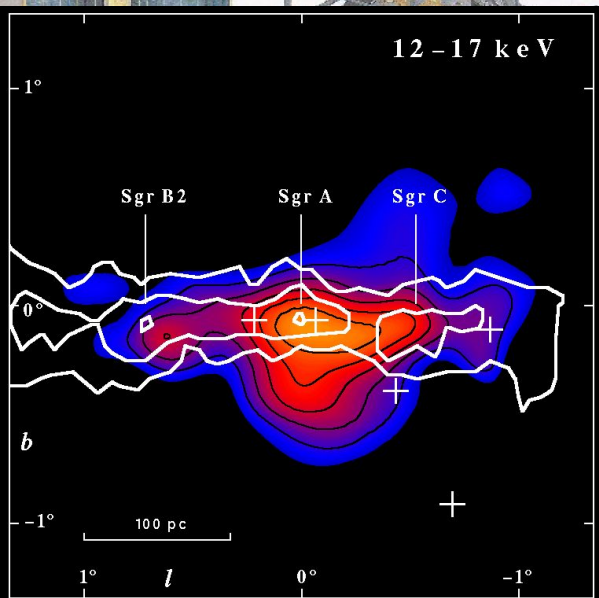
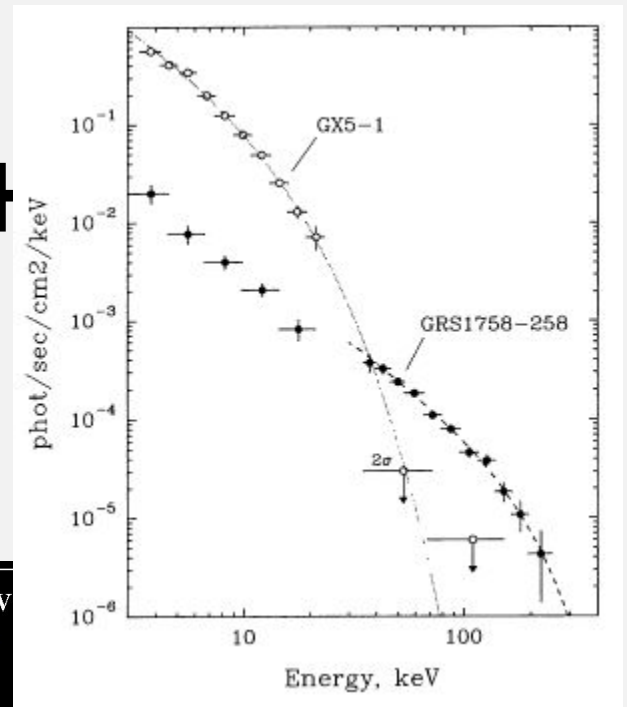
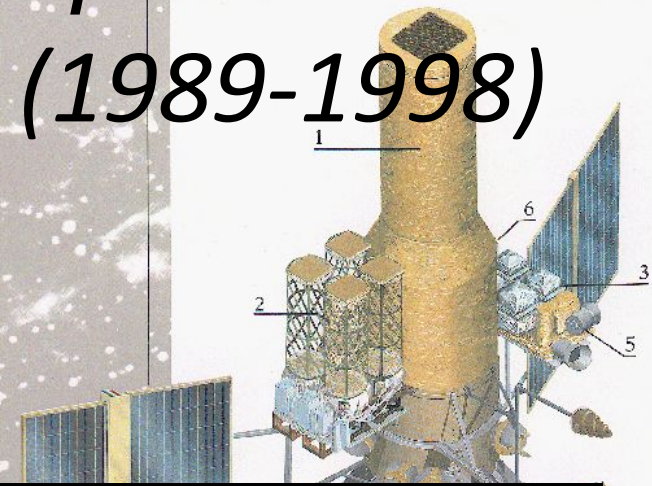
Орбитальные обсерватории

СТИЭМРИКВАРАН(1987-2001)



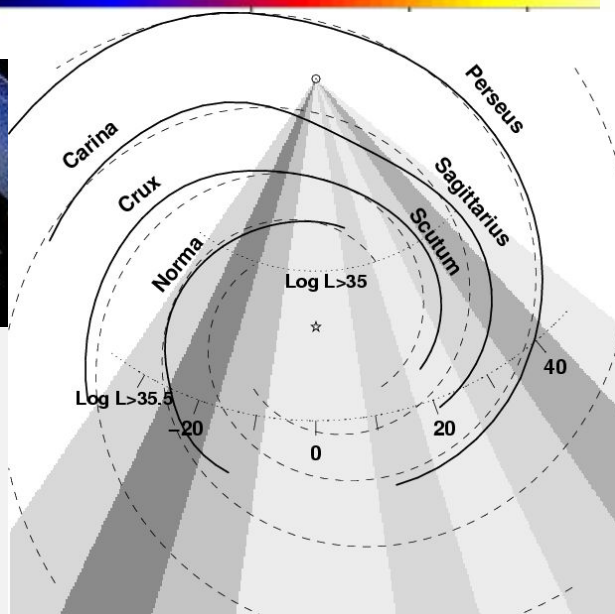
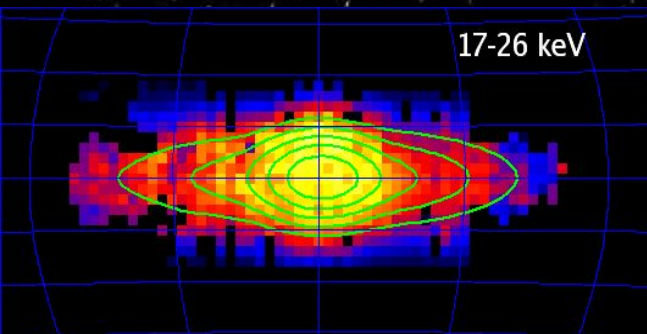
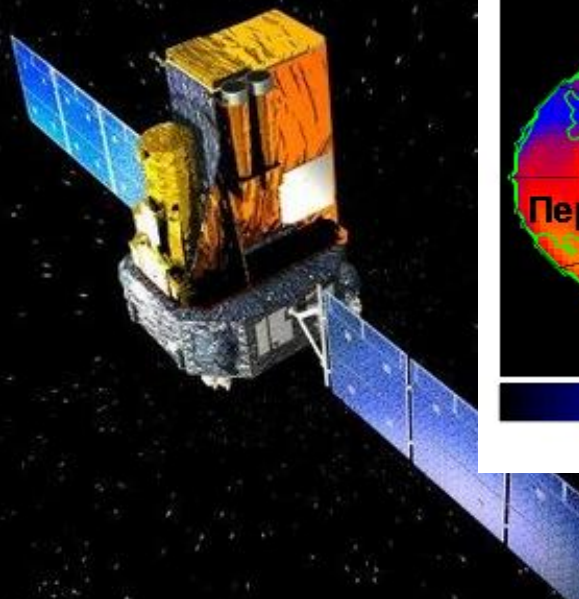
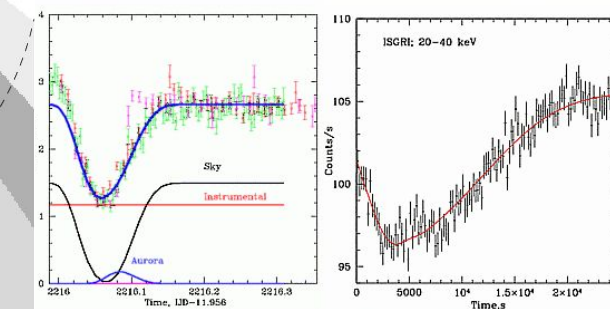
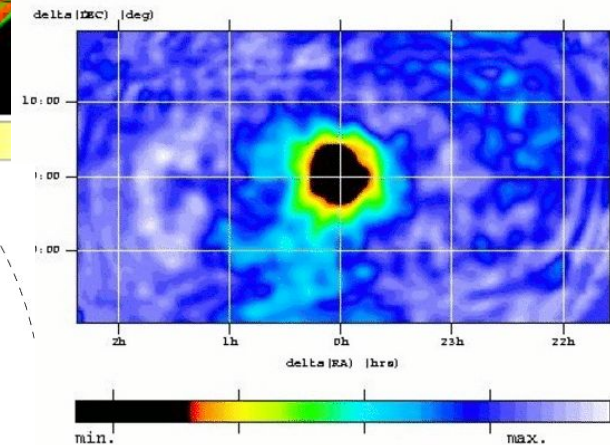
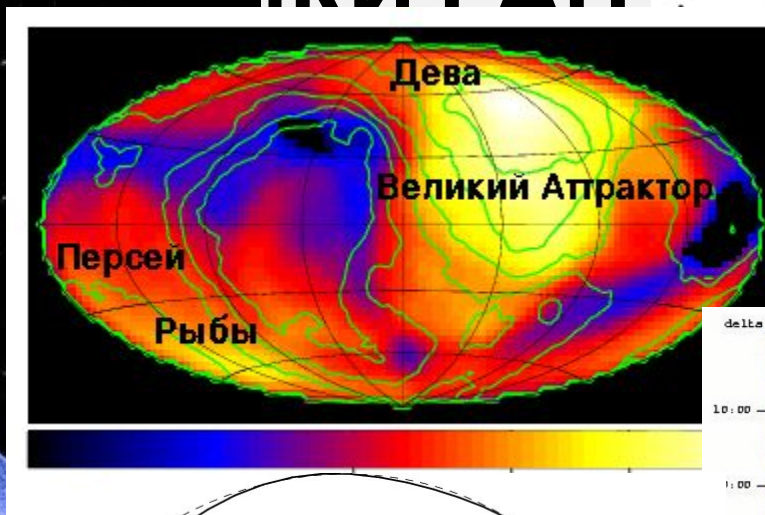
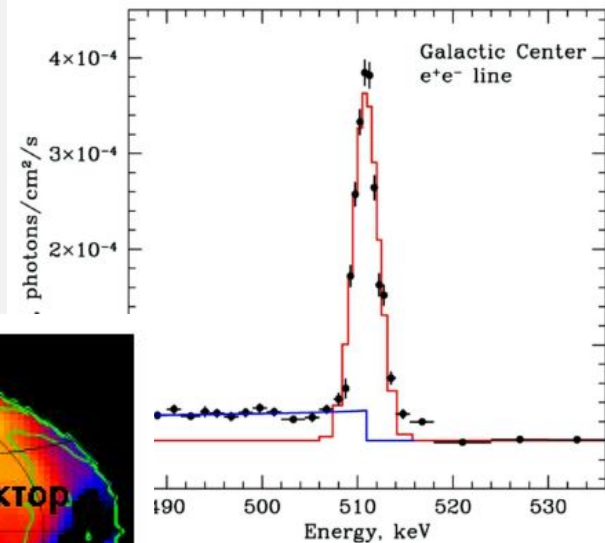
Орбитальные обсерватории

Гранат с участием ИКИ РАН (1989-1998)



Орбитальные обсерватории

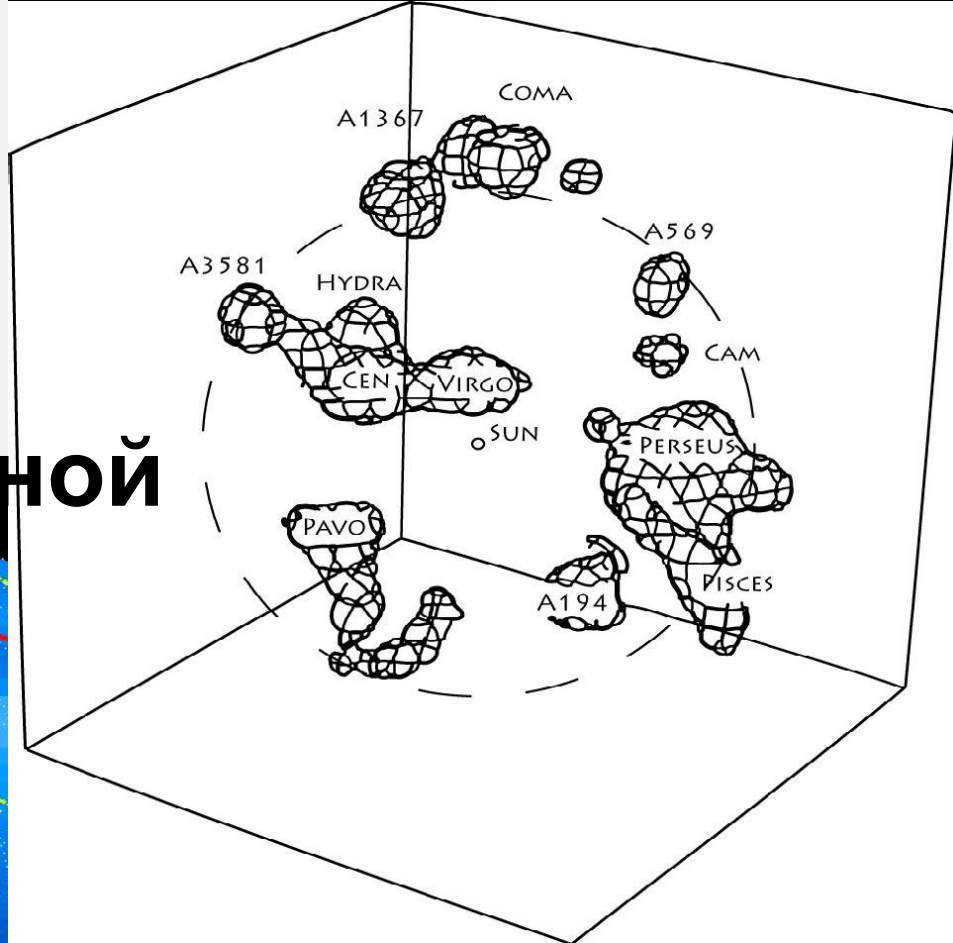
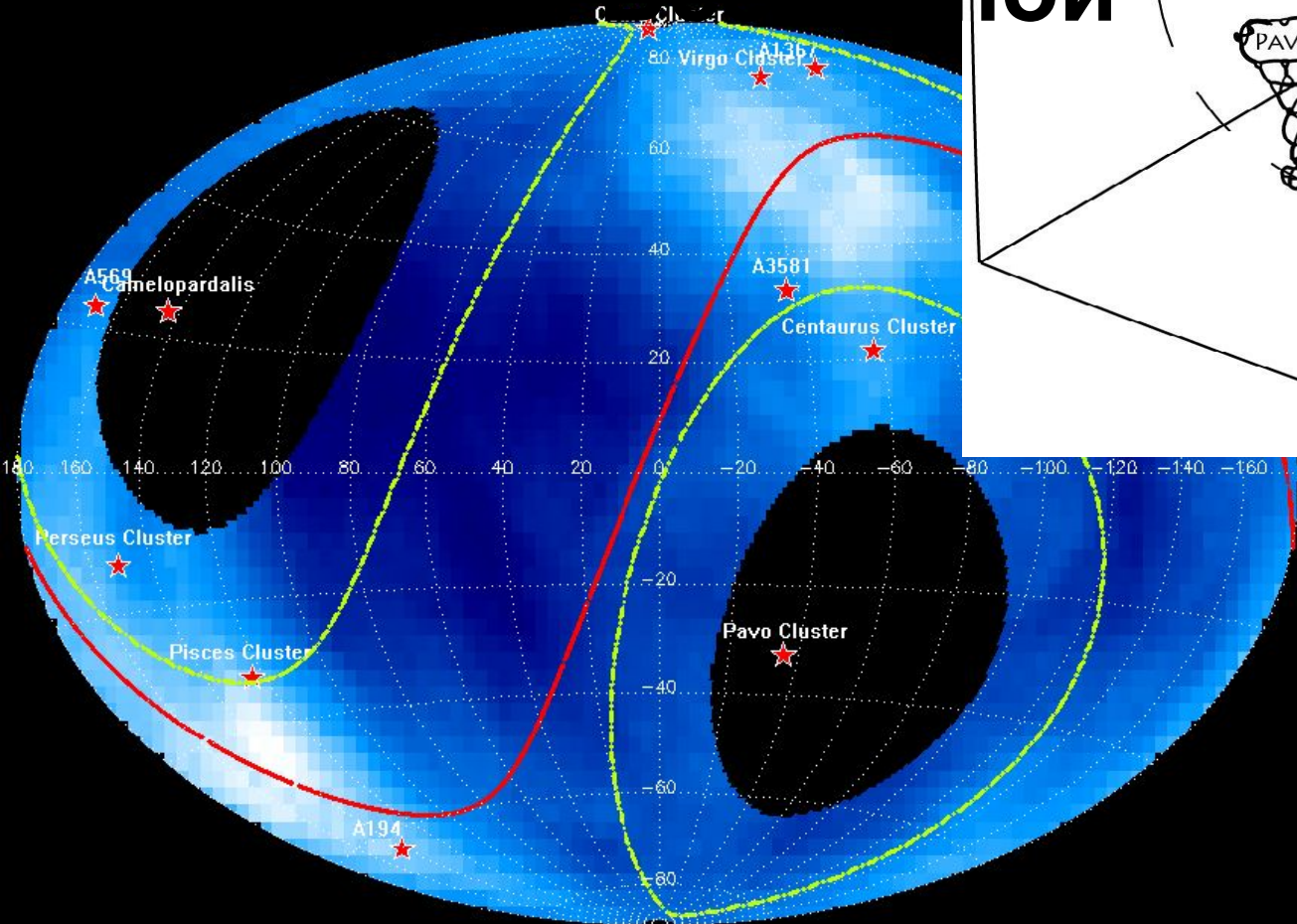
КИ РДН



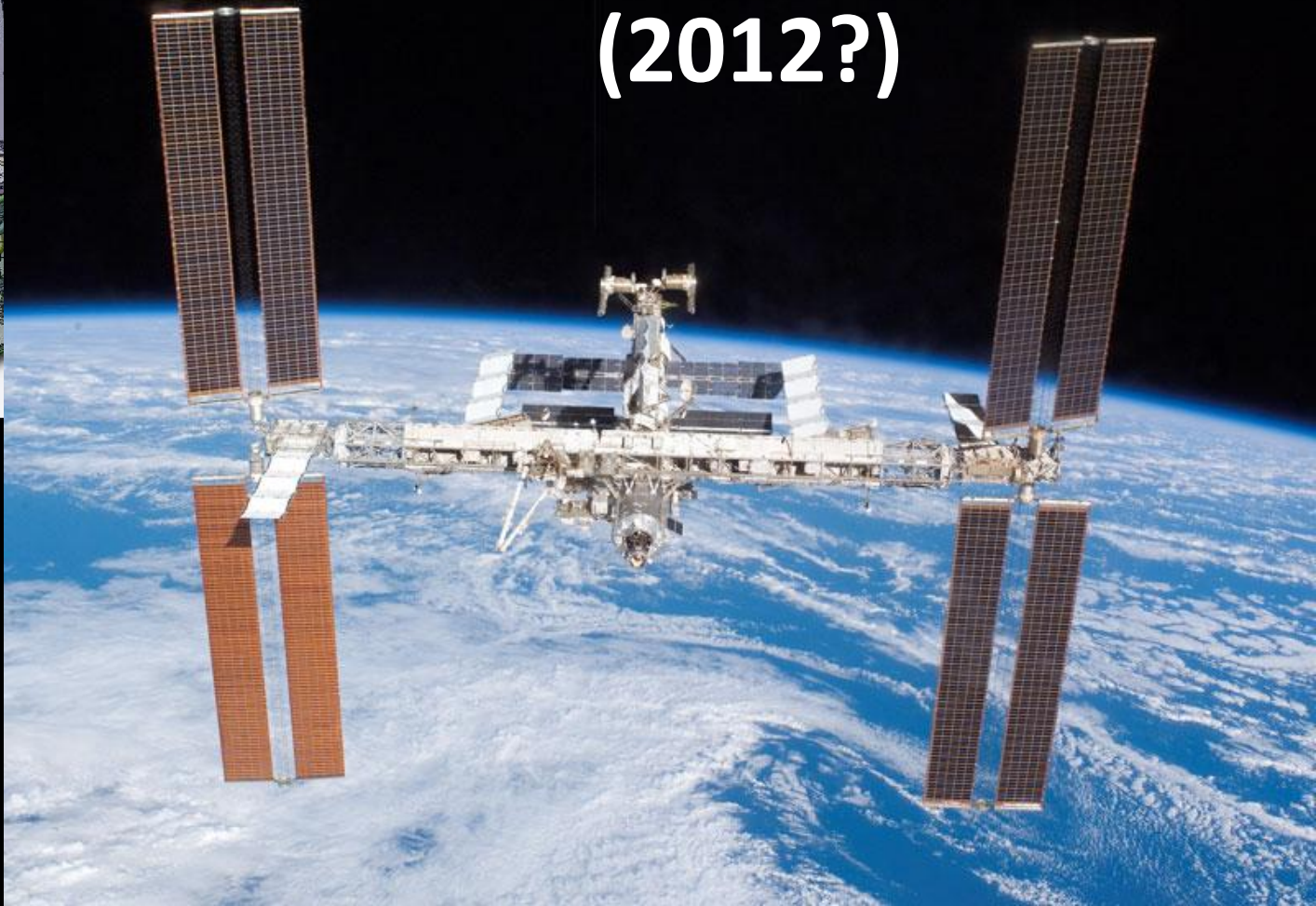
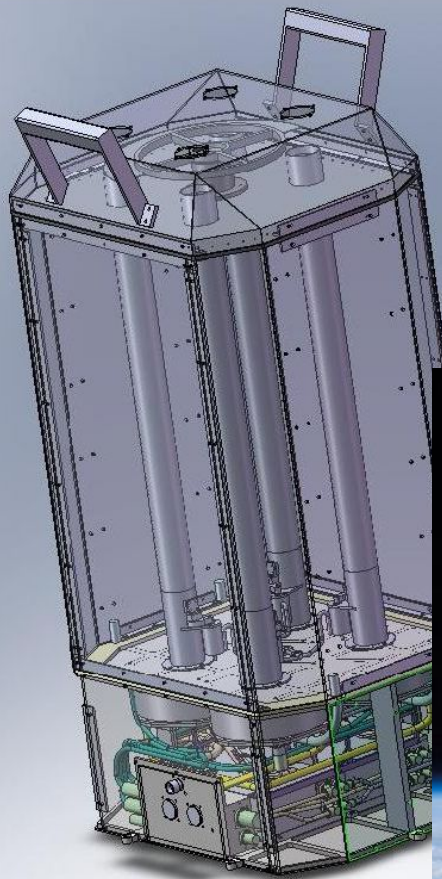
ИНТЕГРАЛ

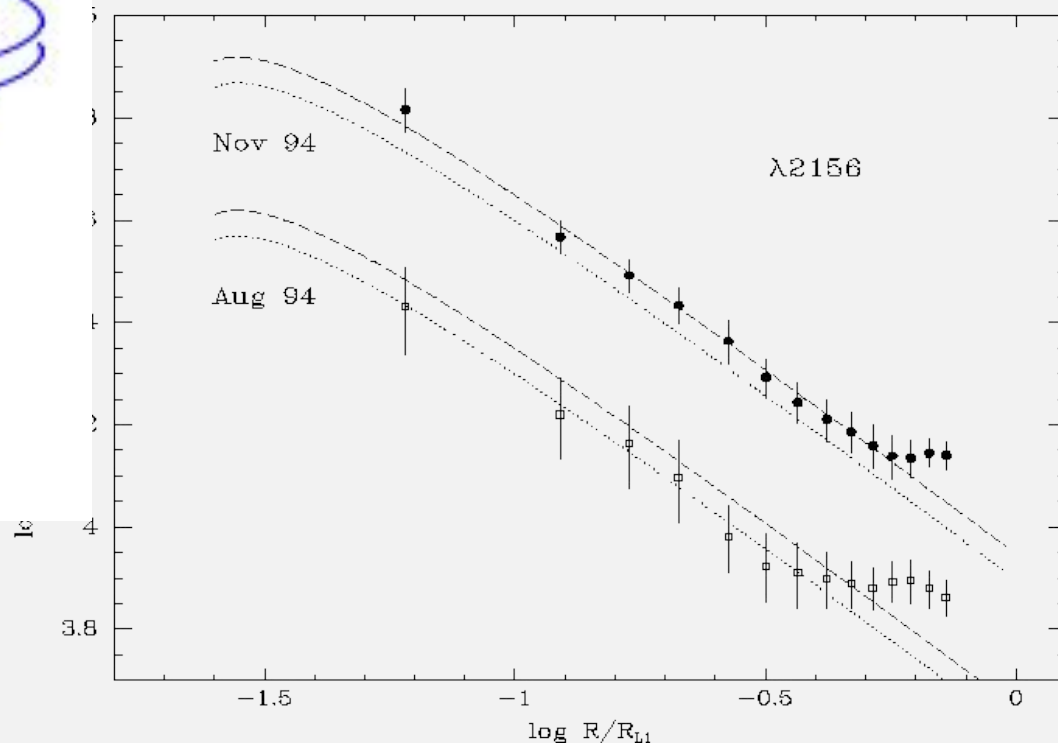
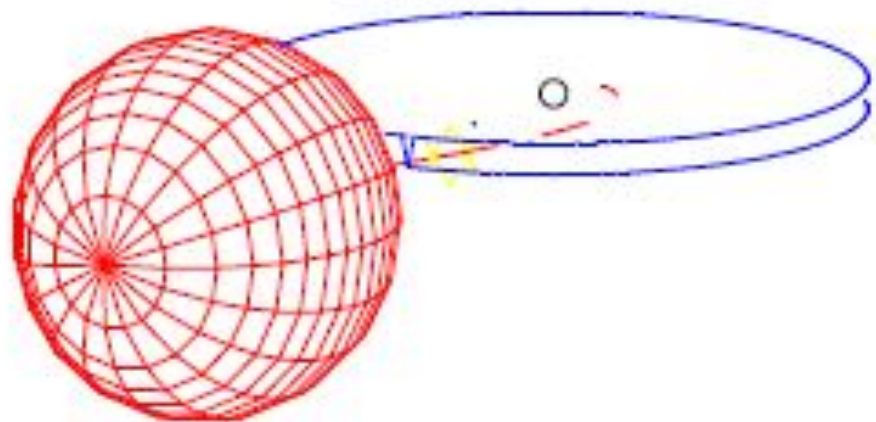
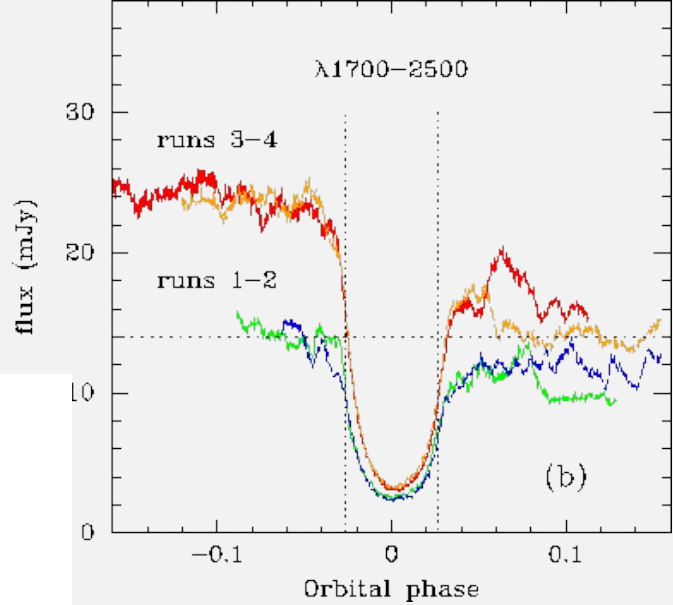
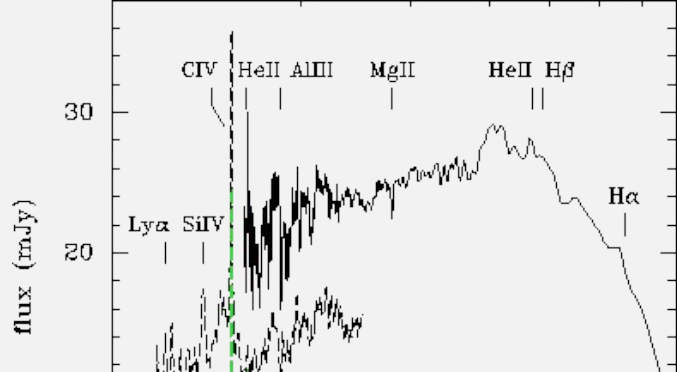
Измерение излучательной способности

галактической Вселенной



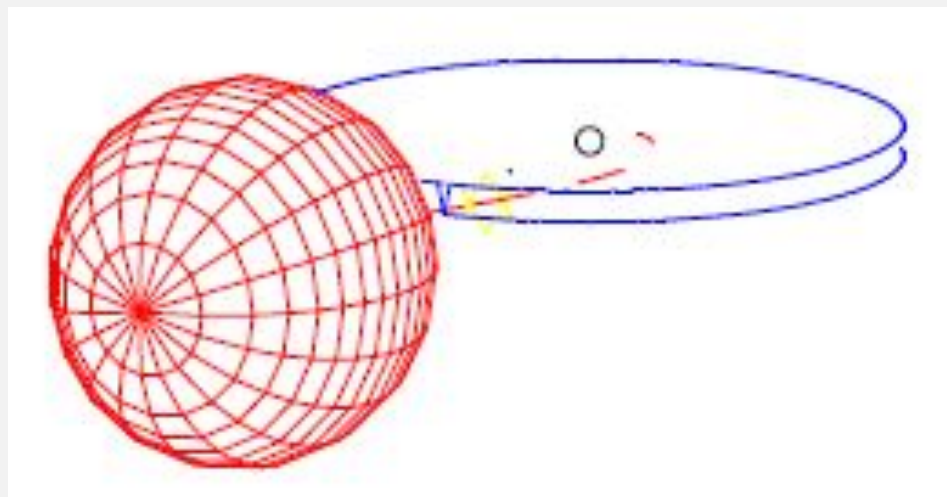
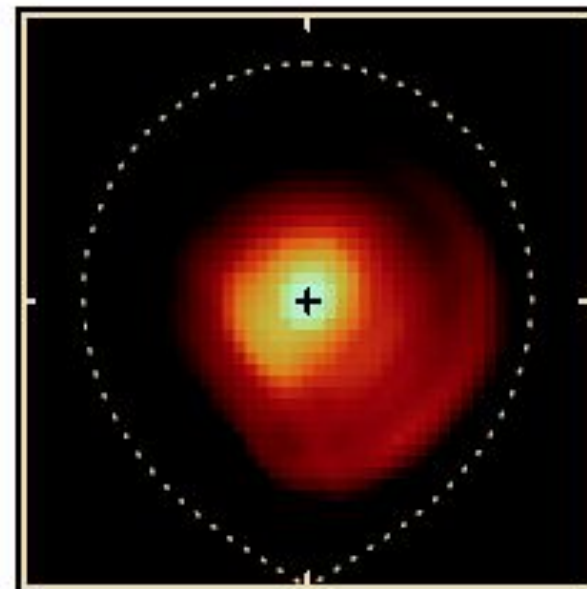
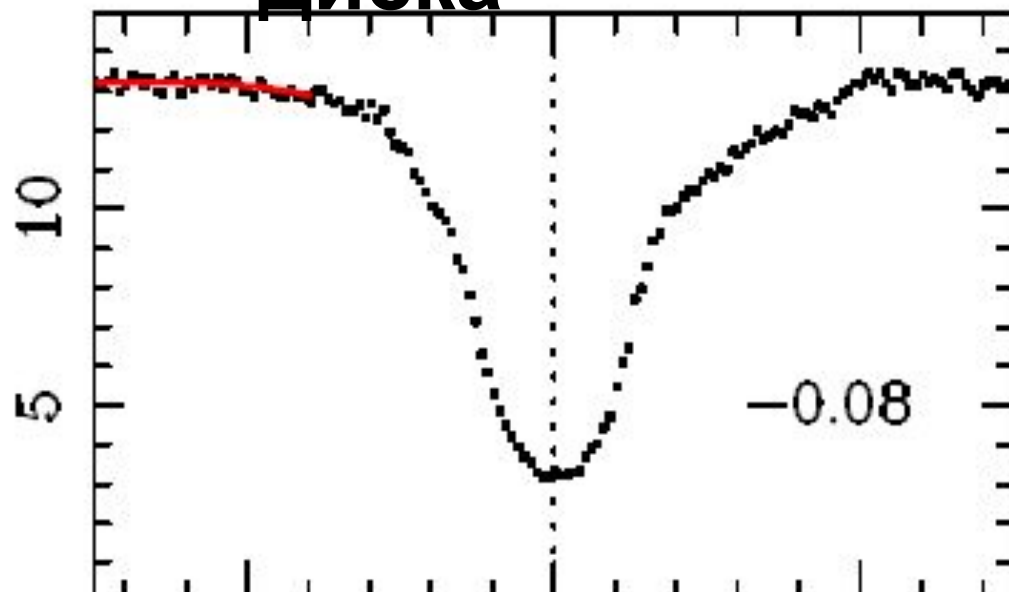
Монитор Всего Неба (МВН) на МКС (2012?)



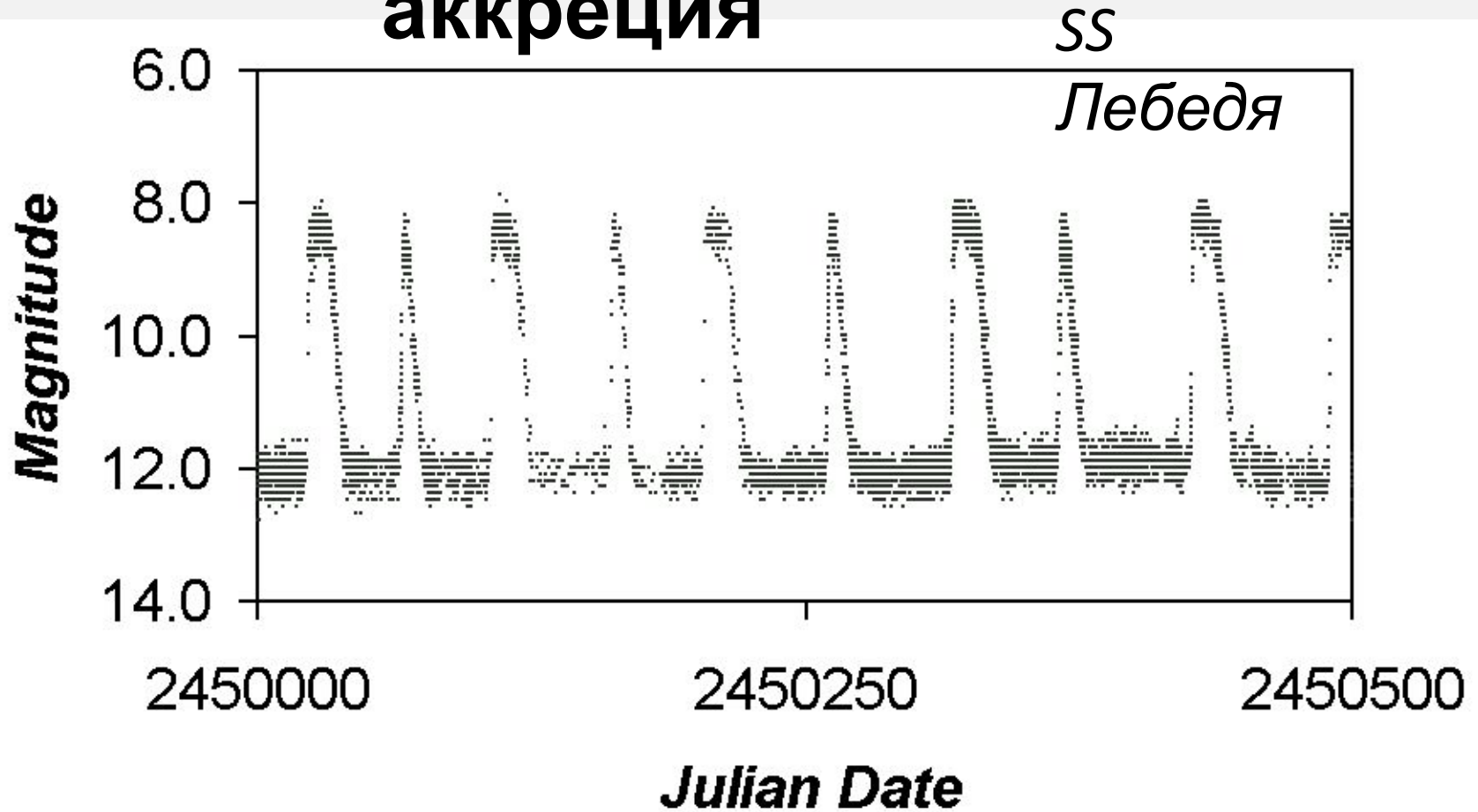


Картографирование аккр.

диска

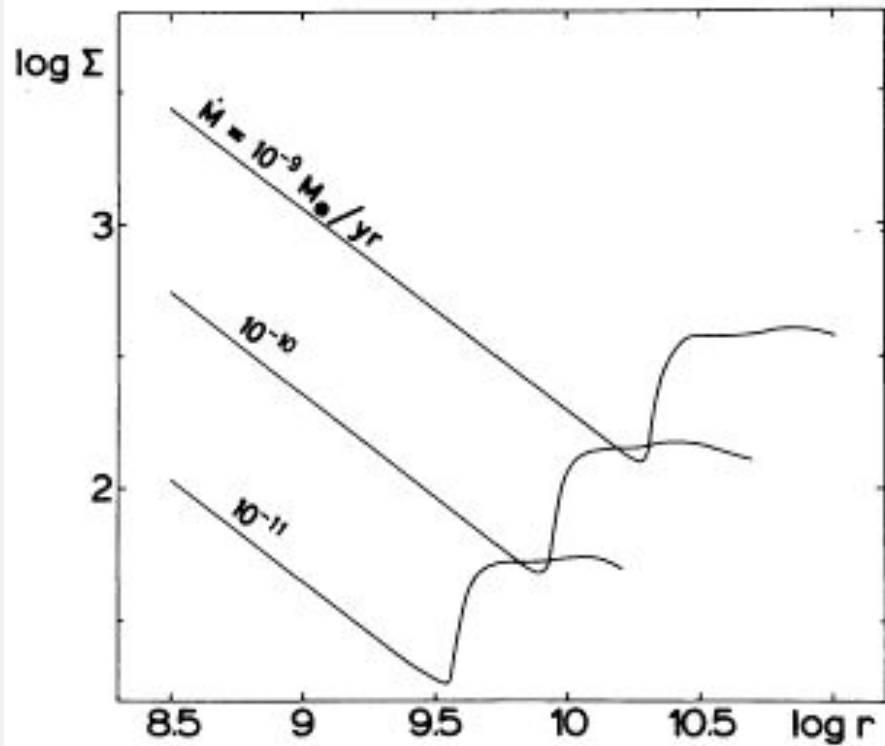


Вспышечная аккреция

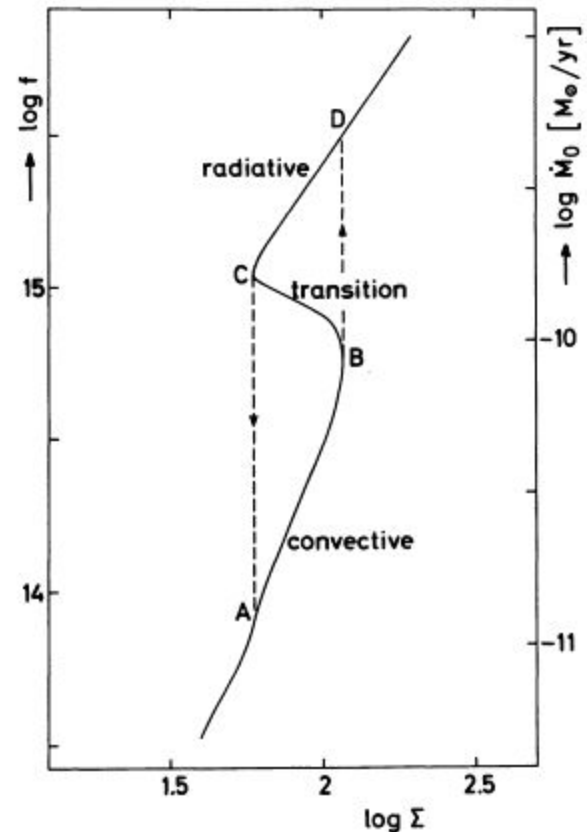


“неустойчивости карликовых
Новых”

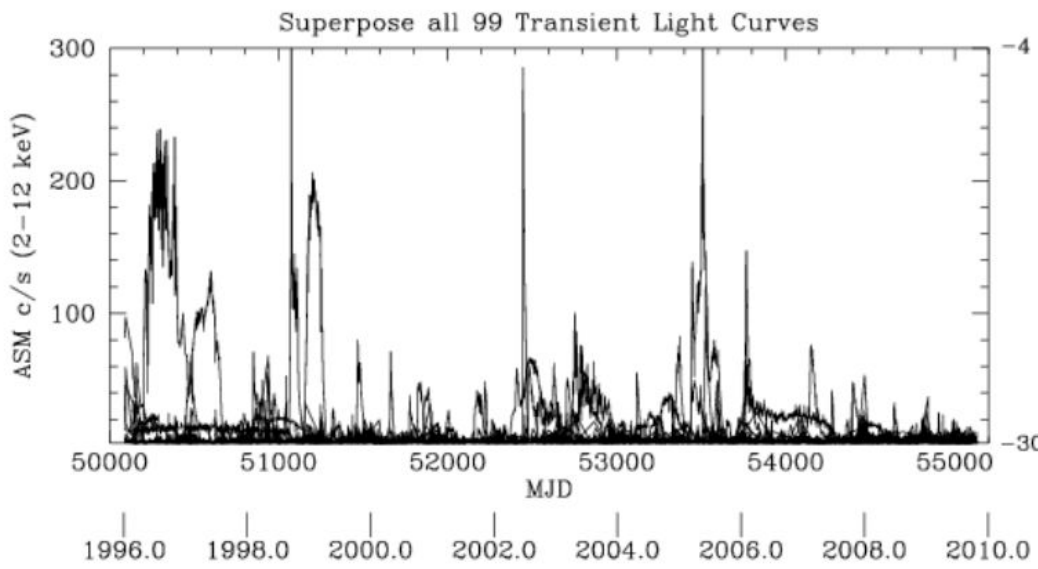
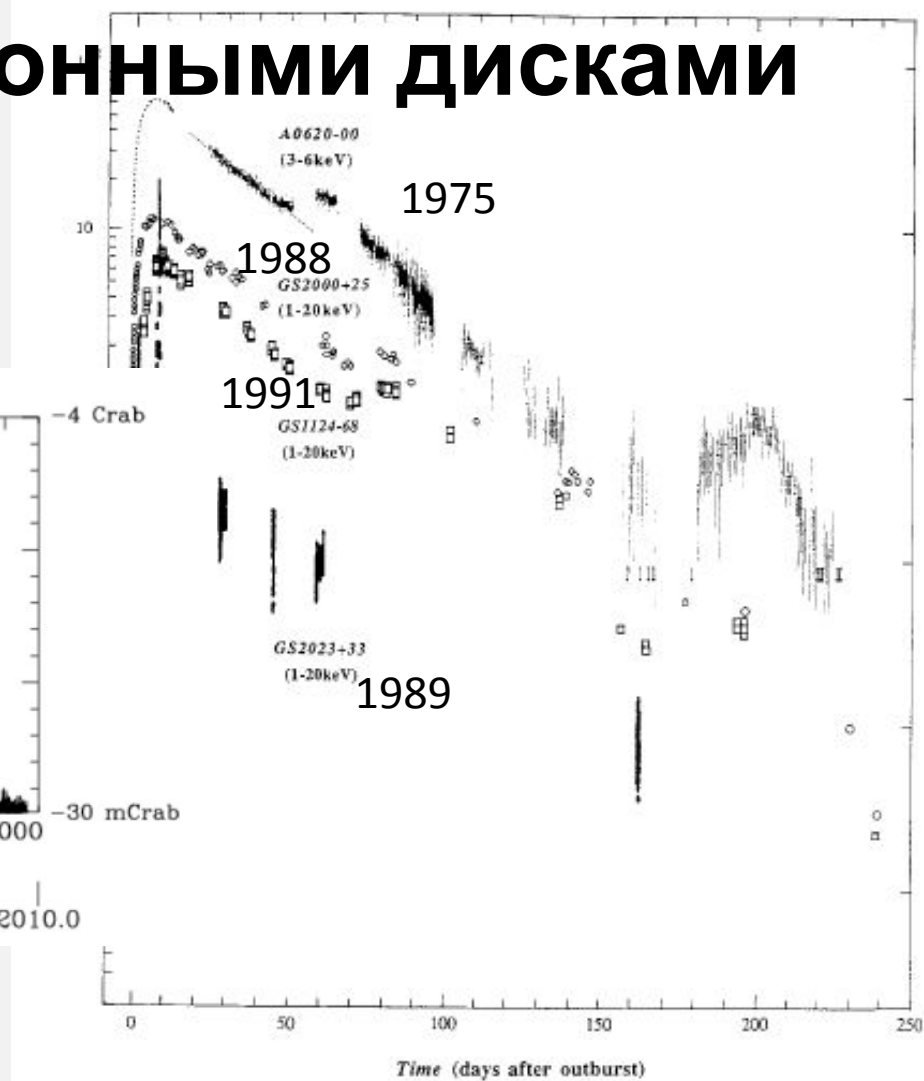
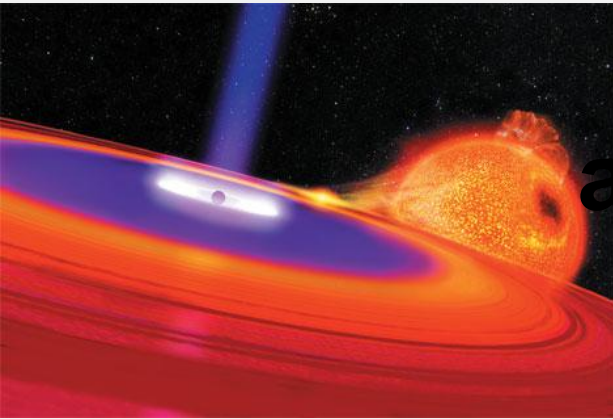
Две ветви состояния аккреционного диска - влияние ионизации



Ю

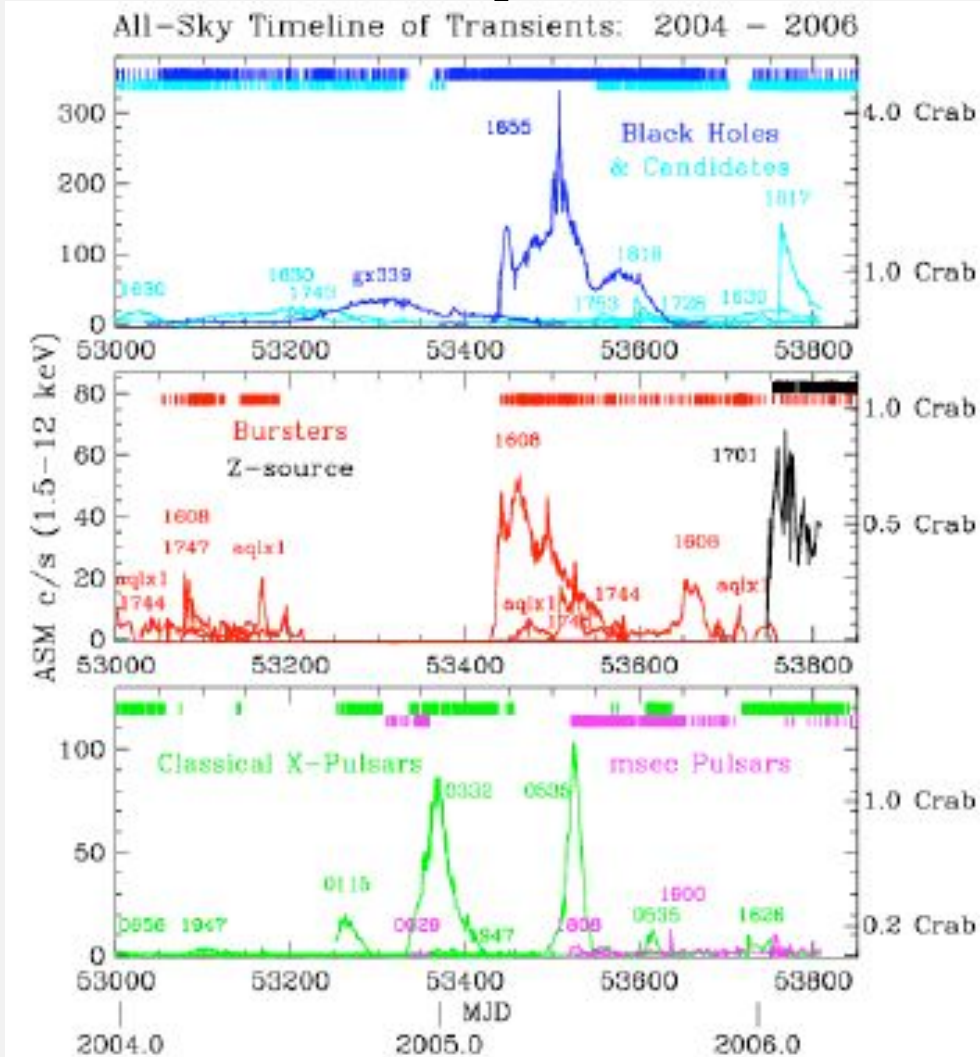


Рентгеновские Новые – двойные системы с ЧД или НЗ с неустойчивыми аккреционными дисками



-4 Crab
-30 mCrab

Рентгеновские Новые – двойные системы с ЧД или НЗ с неустойчивыми

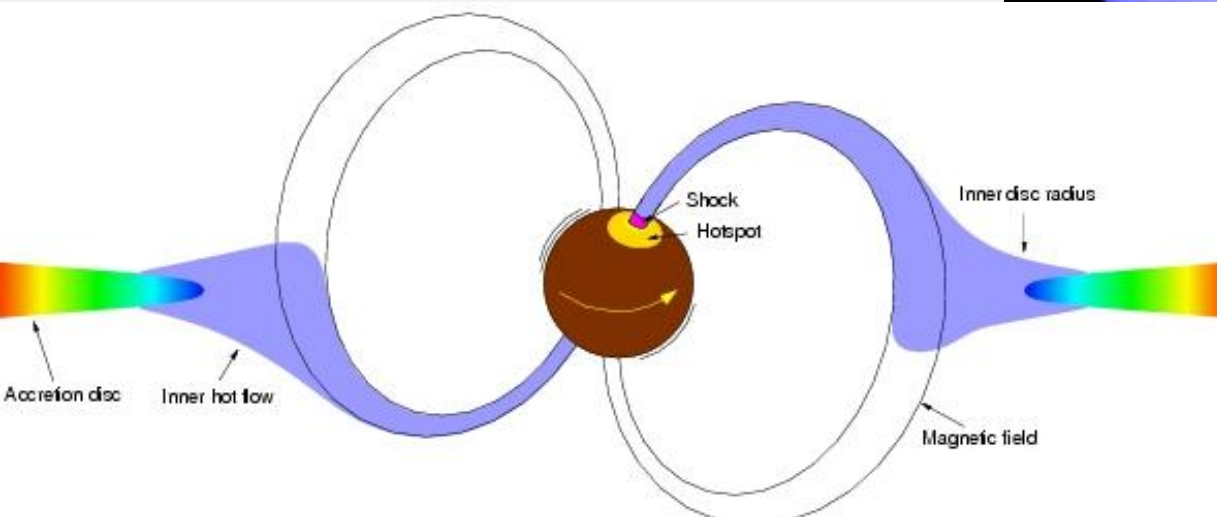
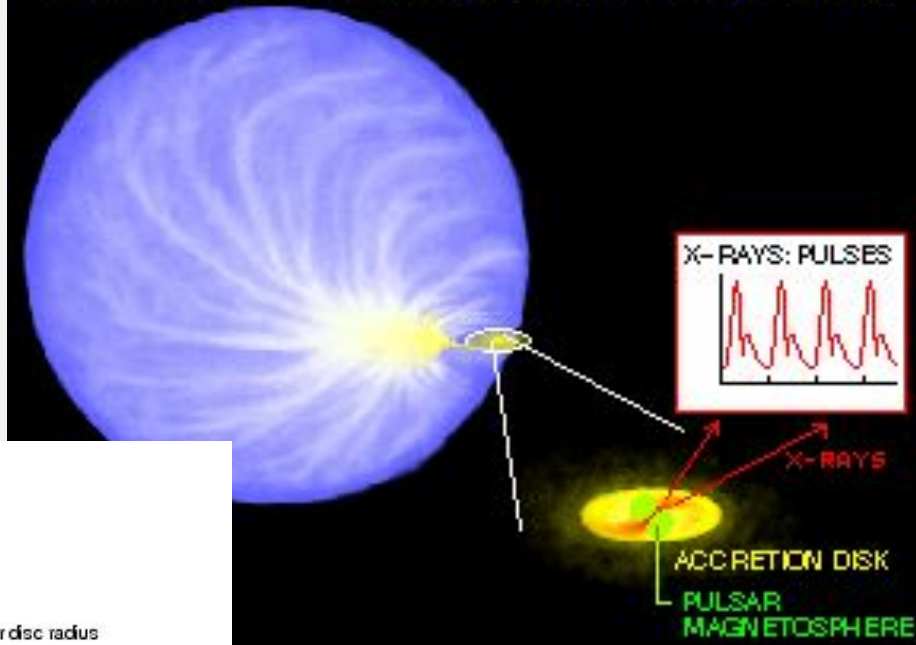


исками

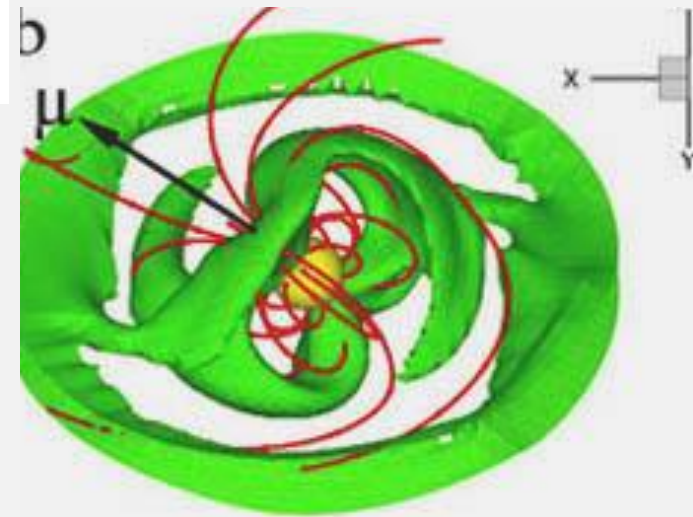
Небо в 2004-2007 по результатам наблюдений монитора всего неба обсерватории RXTE

Аккреция на замагниченные компактные объекты

CENTAURUS X-3: a High Mass X-Ray Binary

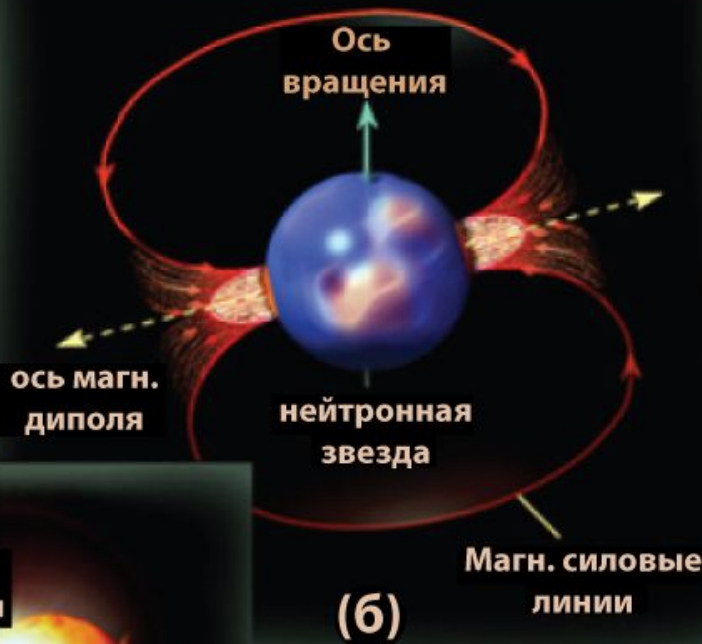


Магнитные поля $\sim 10^{12}-10^{15}$ Гаусс
Температура плазмы $\sim 10-100 \times 10^6$
К



Осцилляции фотонных пузырей

Диапазон частот -
 \sim кГц



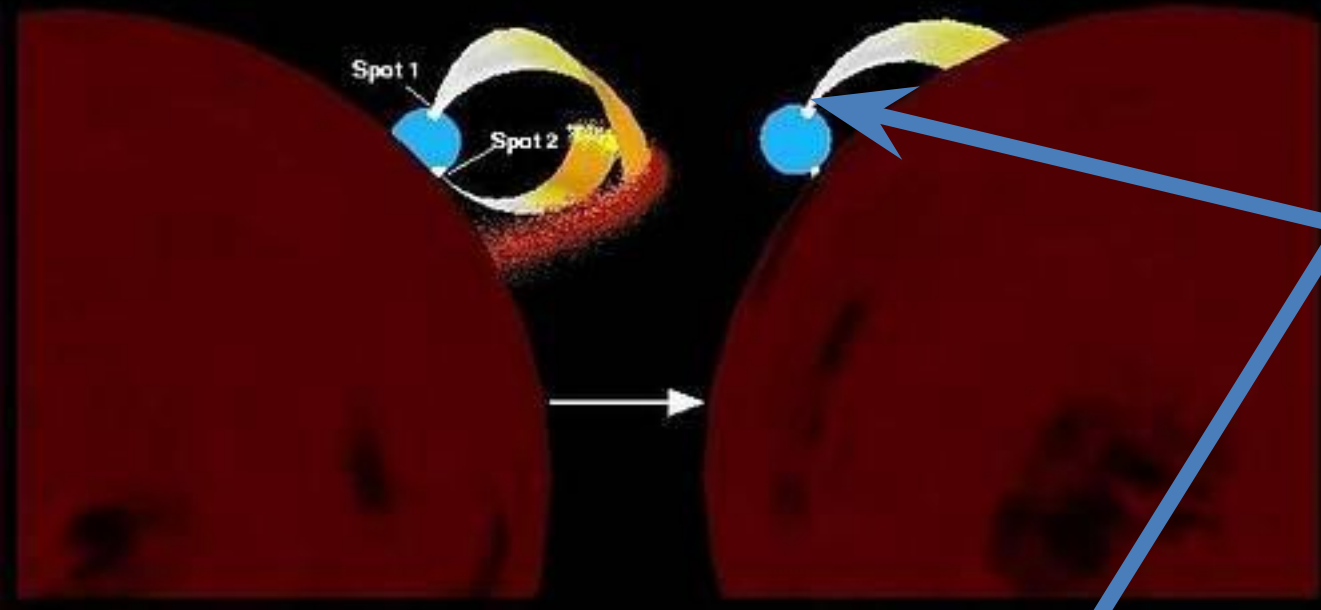
- (а) вещество со звезды компаньона формирует аккреционный поток
- (б) аккреция на нейтронную звезду с мощной магнитосферой
- (в) аккреционная колонка со всплывающими фотонными пузырями, дающими быстрые осцилляции яркости рентгеновской светимости

Затмения в катаклизмических переменных (аккрецирующих БК)



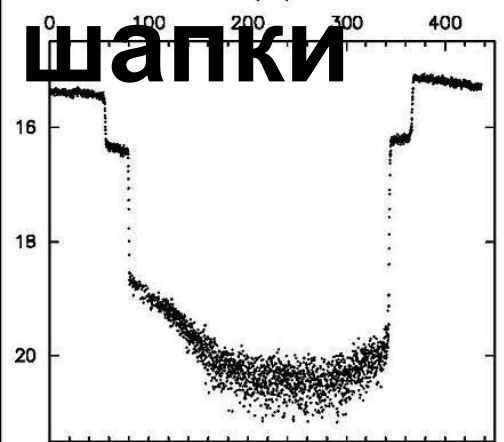
start of eclipse

end of eclipse

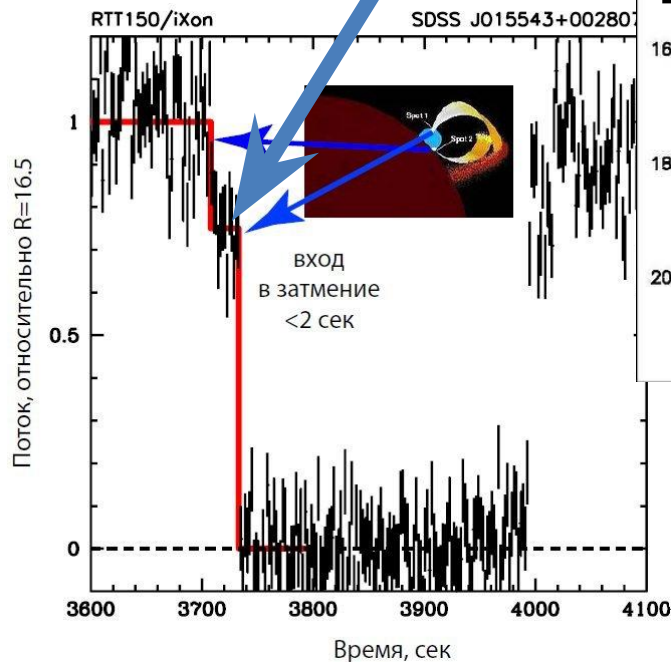


Структура полярной шапки

SDSS015543+002807 2005 Sep 6 Eclipse 1
(Sec)



**Телескоп
RTT150**



Ближайший большой проект

Спектр-Рентген-Гамма

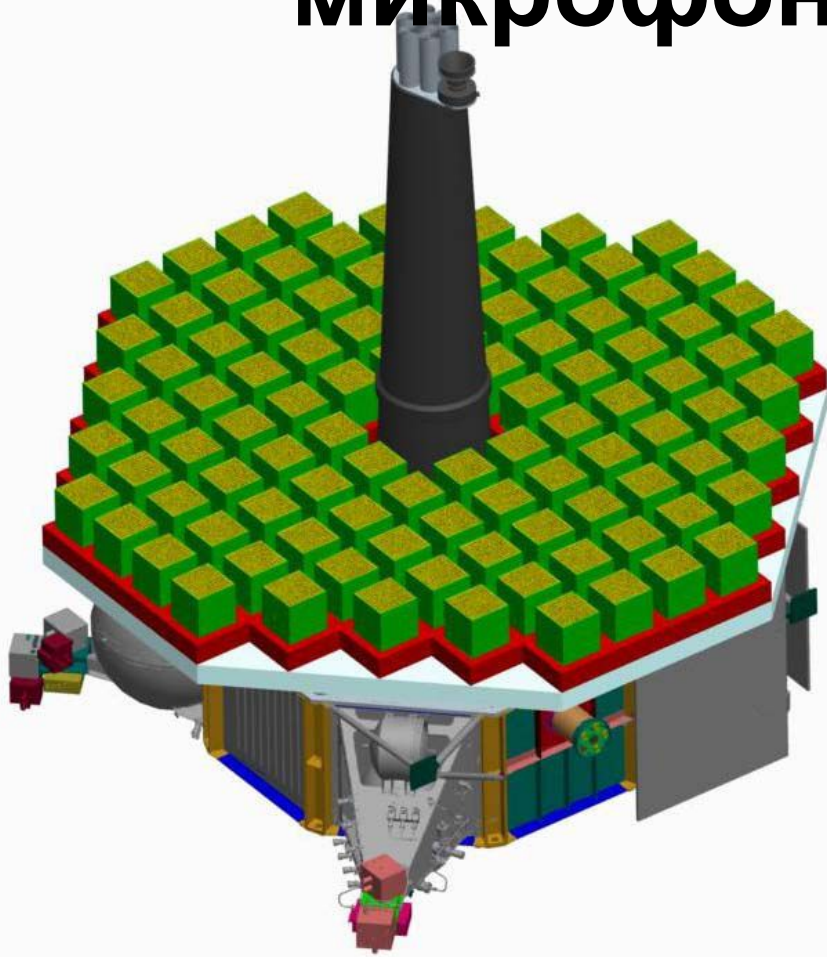
*Обзор неба с рекордной
чувствительностью — тысячи
скоплений галактик, миллионы
АЯГ*

*Темная энергия, эволюция ЧД,
их влияние на галактики,
перепись
населения нашей Галактики*

(СРГ)

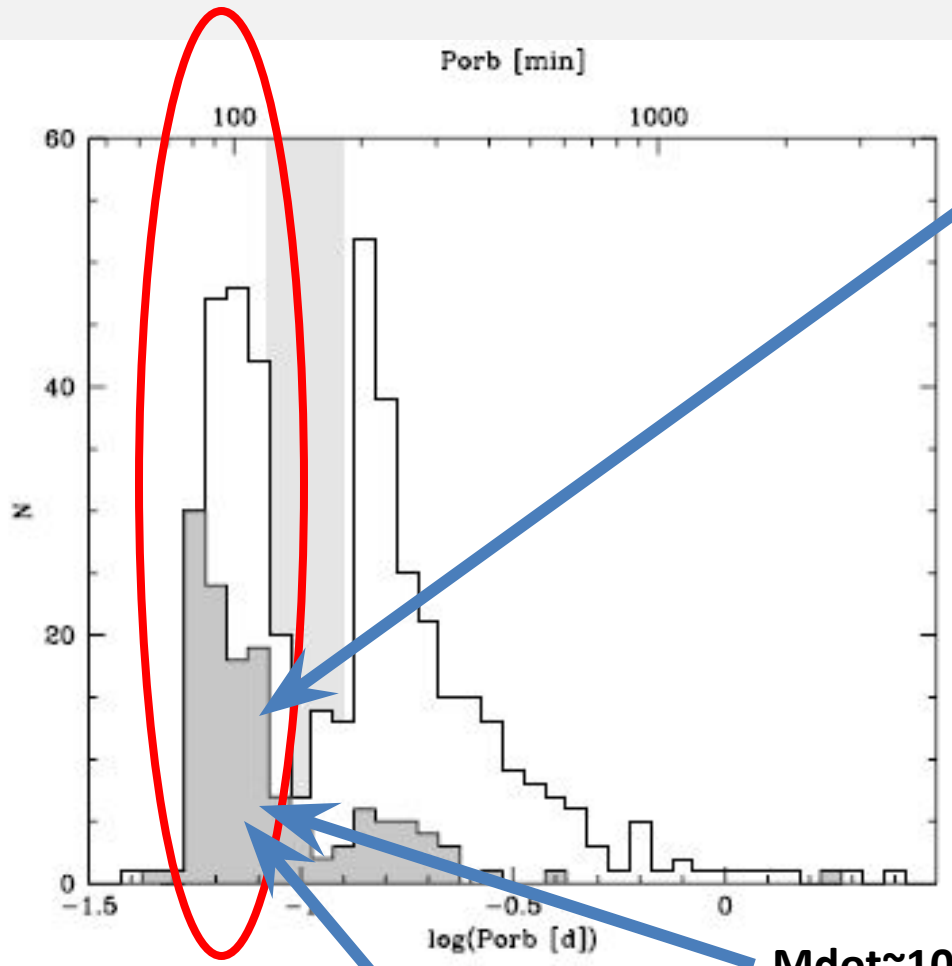


“Рентгеновский микрофон”



Уравнение состояния
нейтронных/кварковых
звезд

Теория относительности
вблизи горизонта событий



Слабые системы систематически пропускаются в простых обзорах

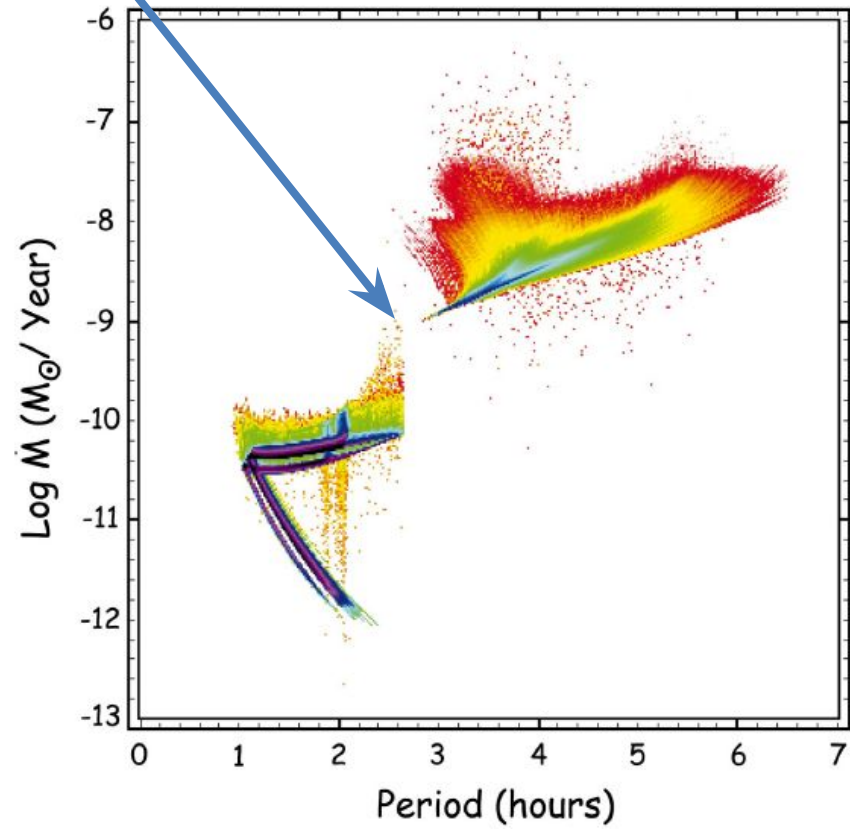
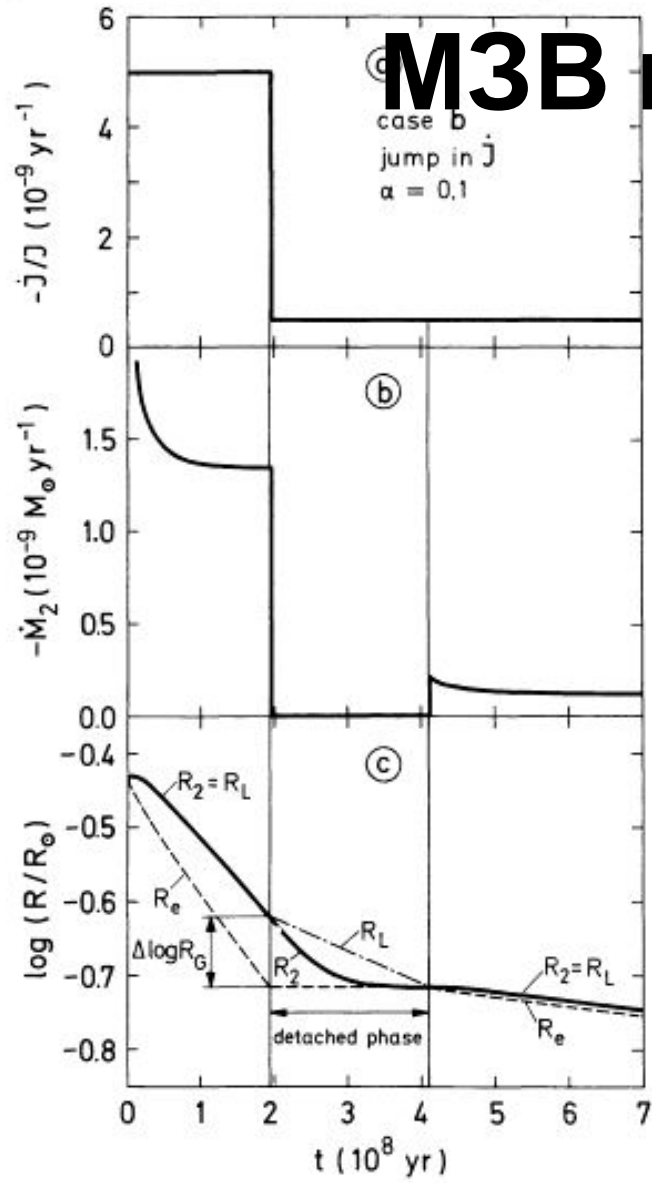
$\dot{M} \sim 10^{-11}$ Msun/год

Количество слабых объектов – ключ к эволюции двойных систем под влиянием грав. волн

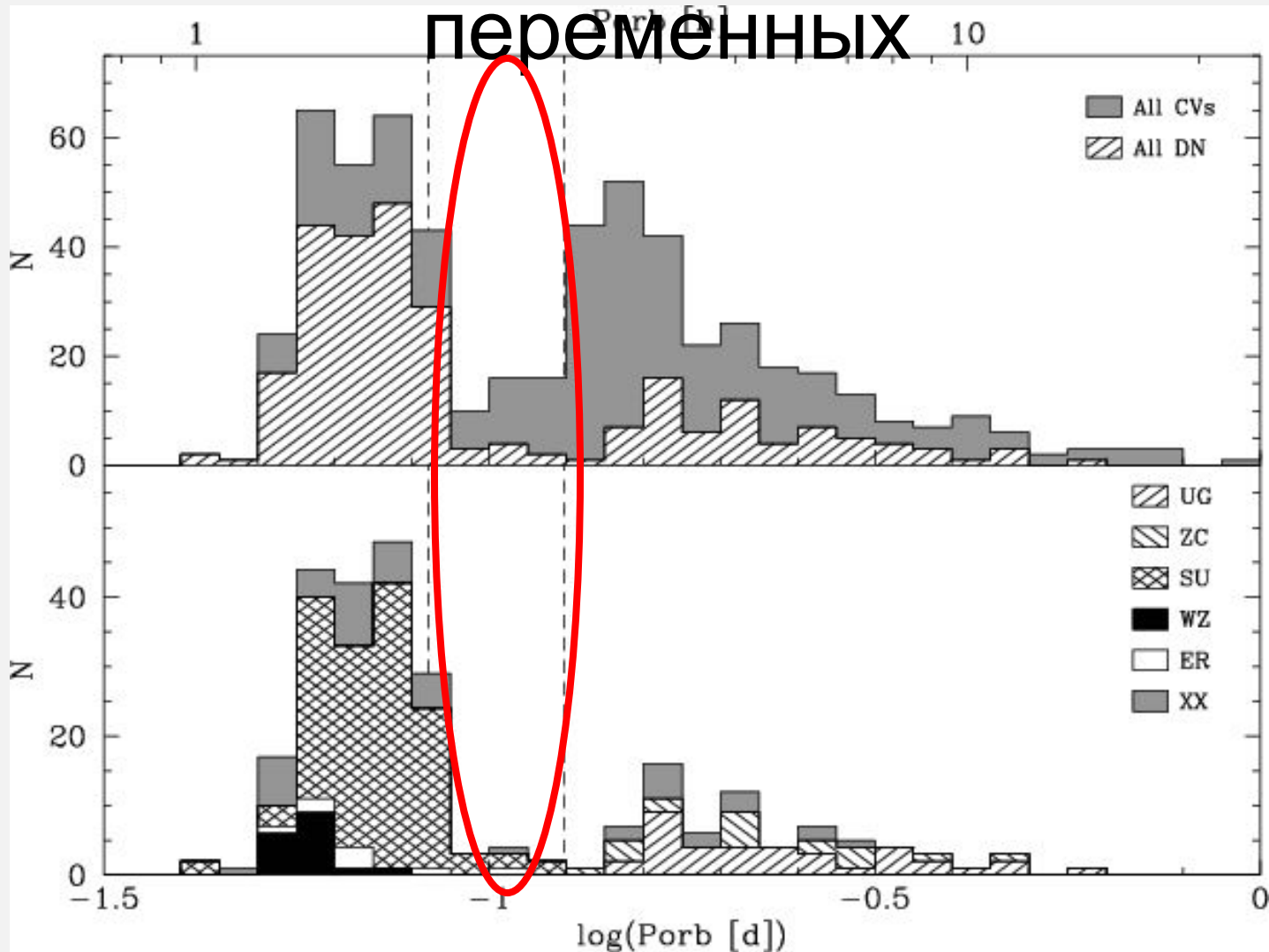
При массе $< 0.3 M_{\text{sun}}$ механизм

МЗВ выключается

Переход между
Механизмами МЗВ и
ГВ



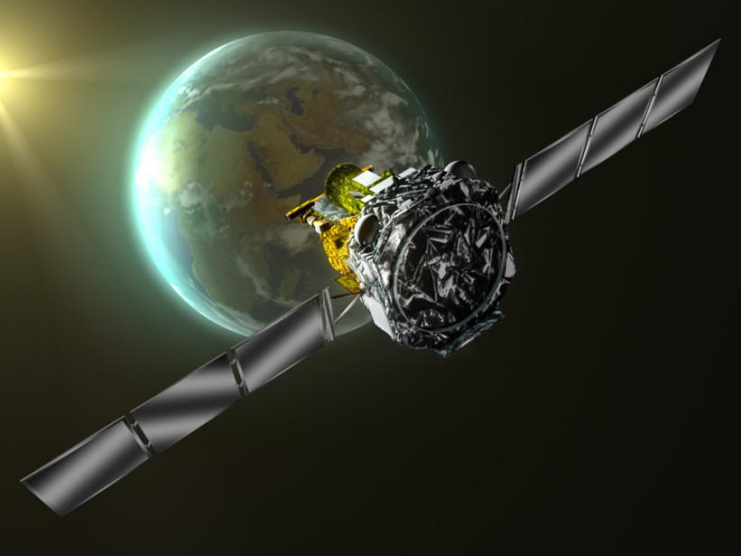
Провал в периодах катаклизмических переменных



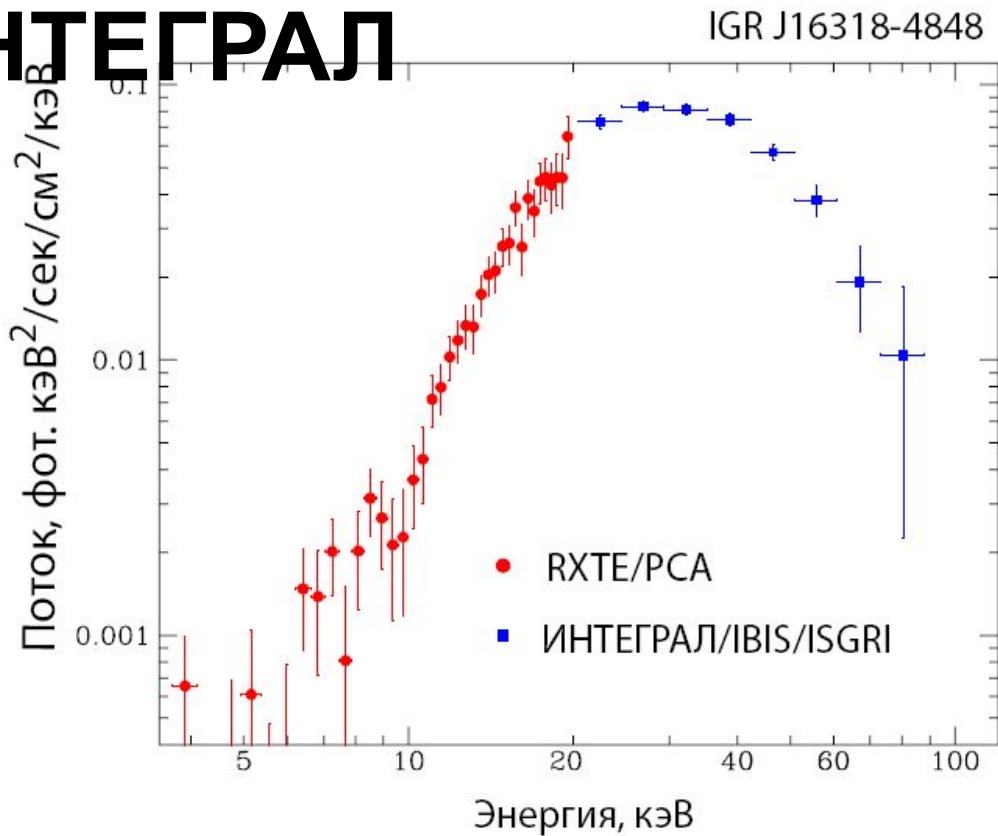
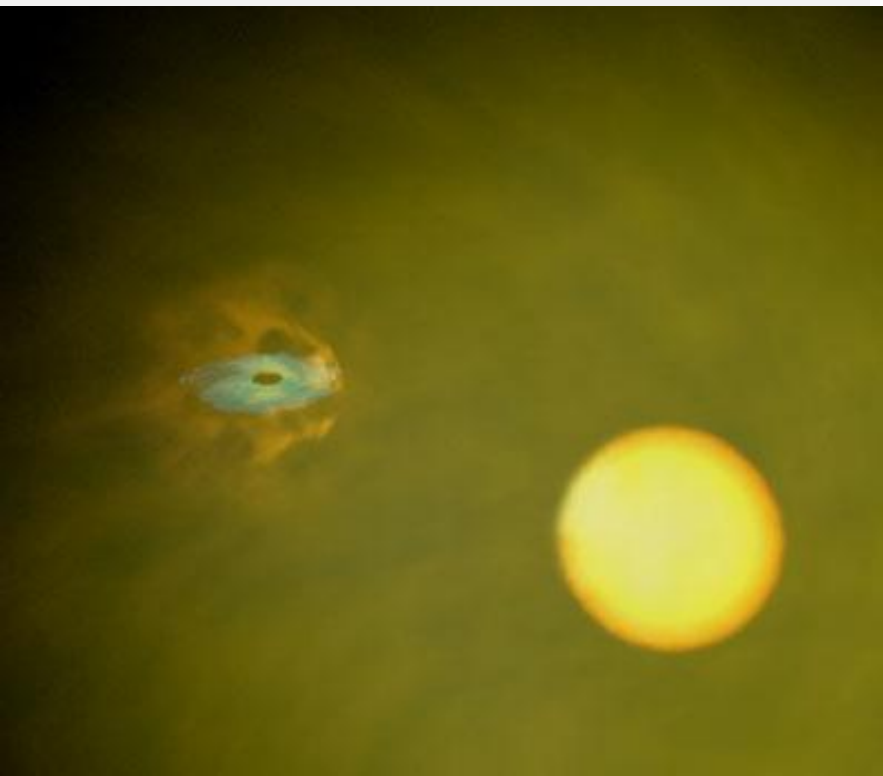
Временной масштаб эволюции системы за счет магнитного ветра

$$\frac{d \ln L_{orb}}{dt} = - \frac{R_2^4}{M_1} \frac{GM^2}{a^5}$$

$$\tau(MSW) = \left(\frac{d \ln L_{orb}}{dt} \right)^{-1} = 1.5 \times 10^6 \left(\frac{M_1}{M_\square} \right) \left(\frac{M}{M_\square} \right)^{-2} \left(\frac{a}{R_\square} \right)^5 \left(\frac{R_2}{R_\square} \right)^{-4}$$



Из последних
интересных
Открытий
Обсерватория
ИНТЕГРАЛ



**“Поглощенные
e”**