Строение и эволюция звезд II

900igr.net

Звезды из вырожденного вещества

1. Коричневые карлики (T~700-2000K)
2. Белые карлики (T~10000-100000K)
3. Нейтронные звезды (T~0.1-0.3 кэВ)

Средний импульс электронов

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

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~0.03R(Sun) объем становится ~ 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

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

$$U = -\Omega$$

Индифферентное равновесие

Предел массы белого карлика (нейтронной звезды)

Плотность фермионов в звезде

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

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)

Предельное число фермионов, удерживаемых гравитацией

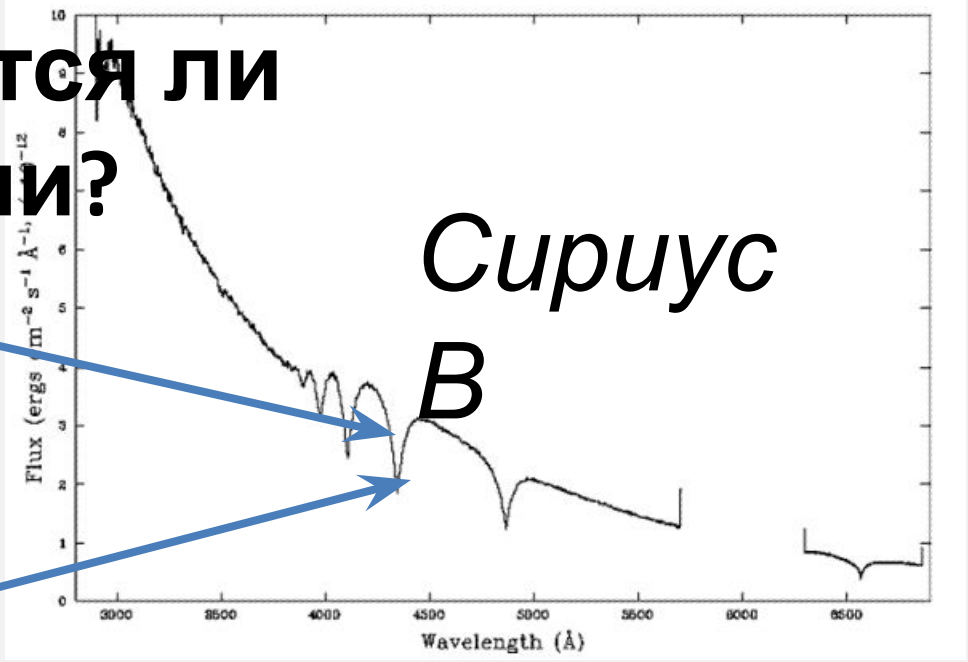
$$E_F = E_G -> \frac{\hbar c N^{1/3}}{R} = \frac{GNm_p^2}{R}$$

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

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

Подтверждается ли наблюдениями?

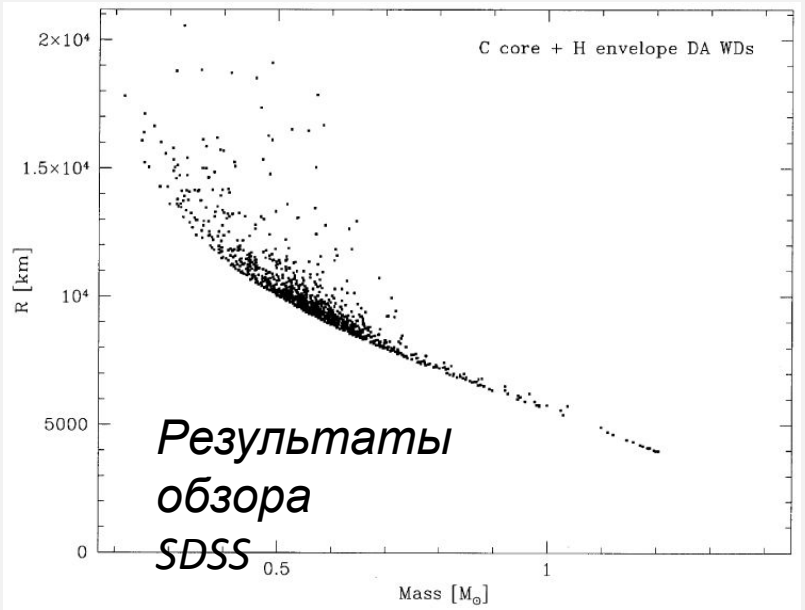
Форма линий
->
сила тяжести
(давление)
на
поверхности
(log g ~8.556)



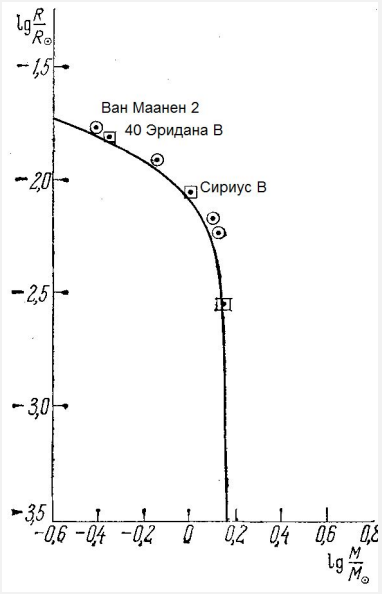
Сириус B

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

Форма спектра и
параллакс ->
радиус



Результаты обзора SDSS



Общая теория относительности

Метрика Шварцшильда

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

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

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

Для пов.Земли (относительно бесконечности)

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

Для БК

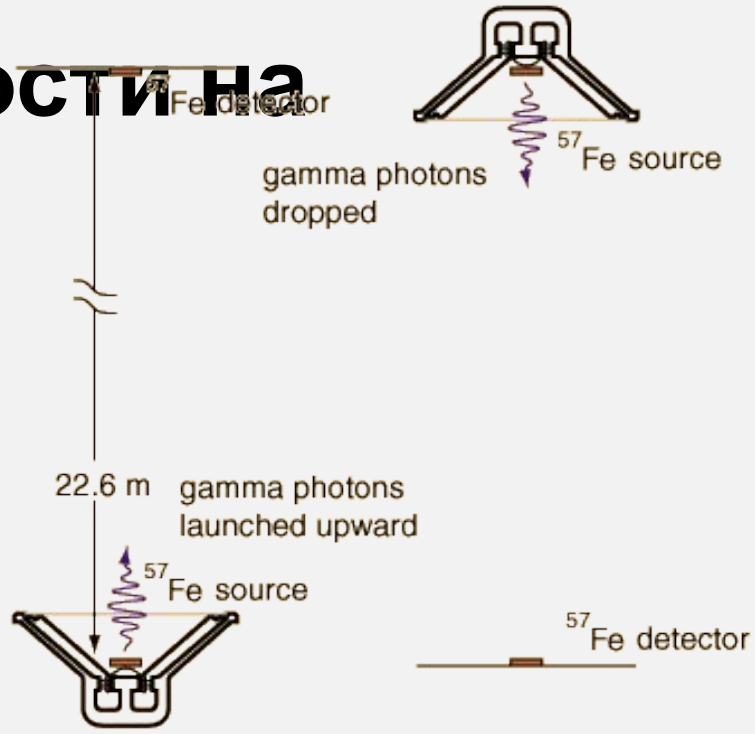
$$\frac{\Delta E}{E_0} \sim 7 \times 10^{-6} \sim 20 - 80км/сек$$

Эффекты общей теории относительности на Земле

Опыт Паунда и Ребки (1960)

$$\frac{\Delta E(22.5м)}{E_0} \sim 2.5\times10^{-15}$$

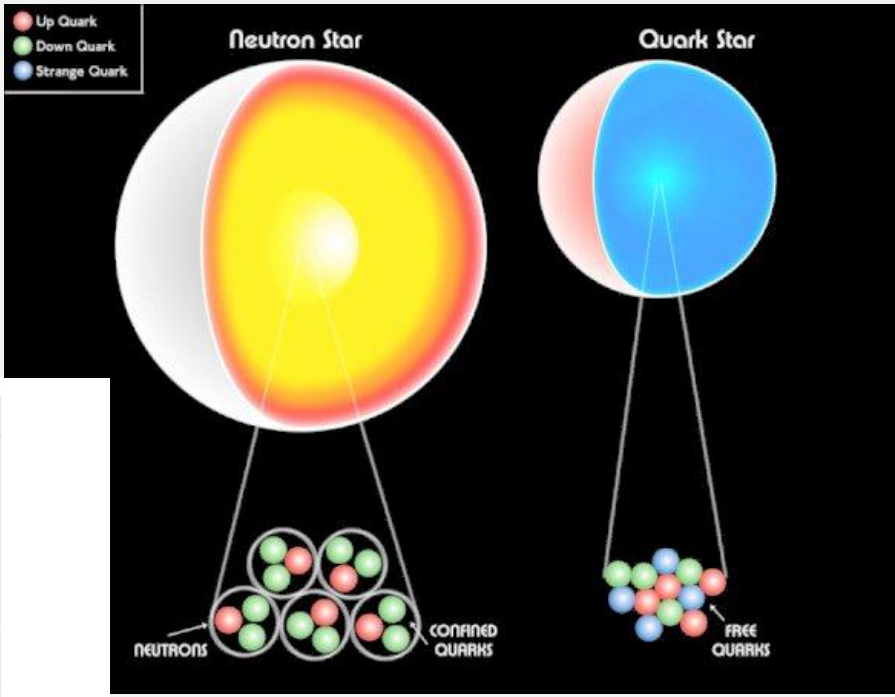
Подтвердил правильность ОТО с точностью 10%

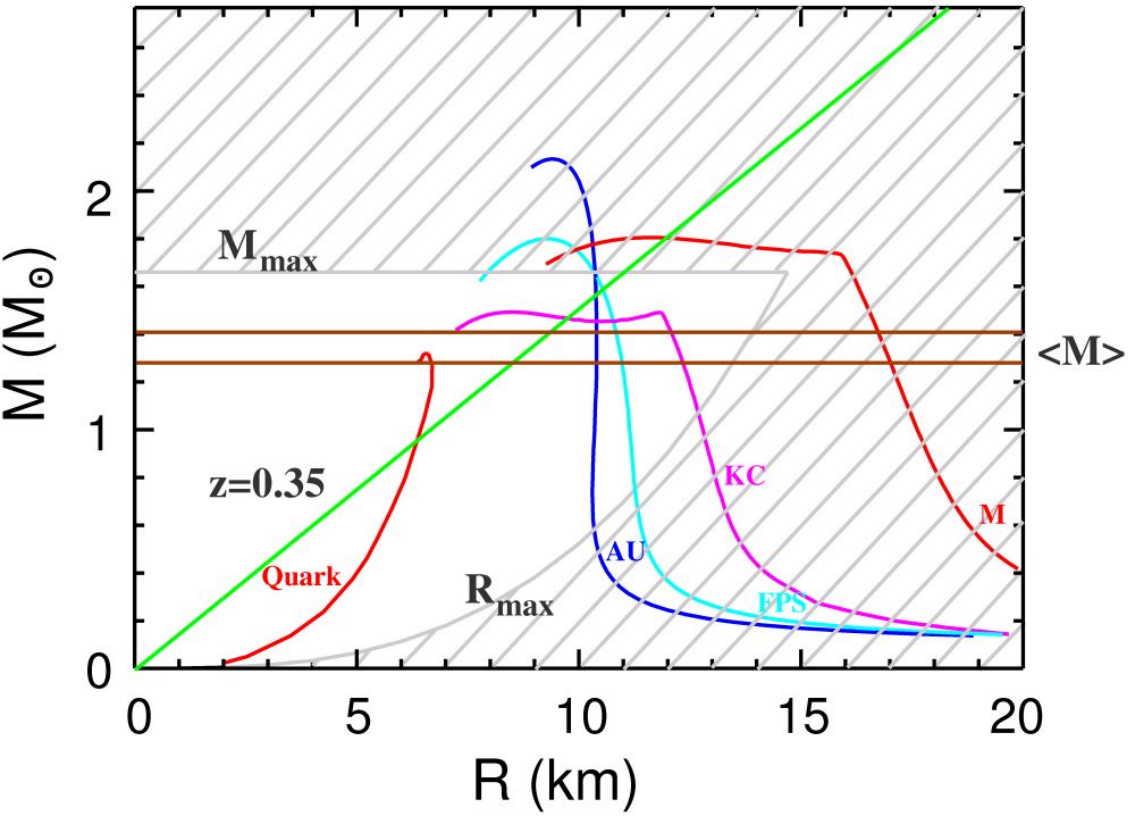


На спутниках время уходит на ~8.5 мсек в год

Без ОТО навигаторы работать не будут

Для нейтронных/ кварковых звезд?

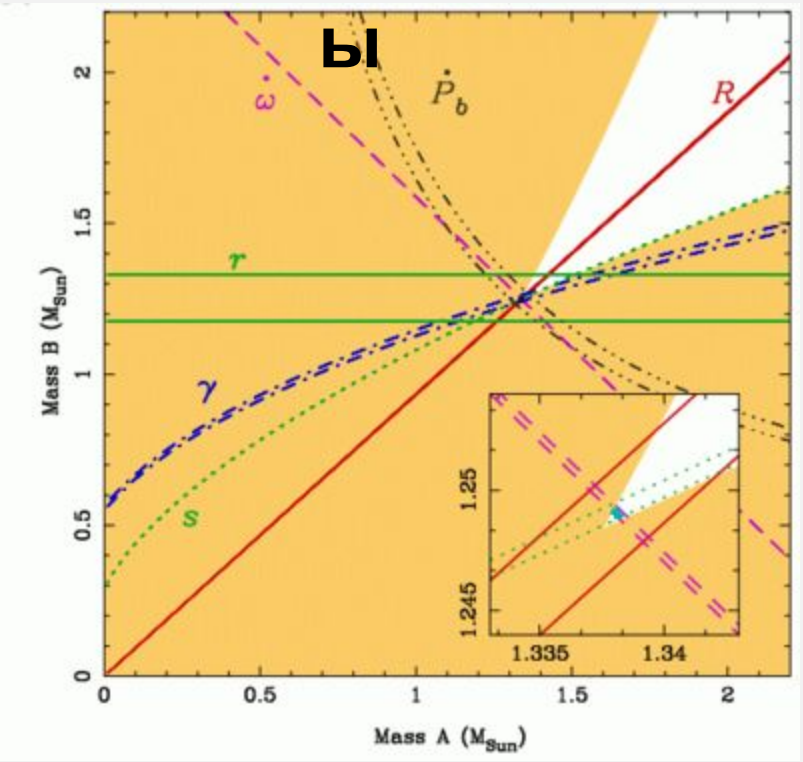


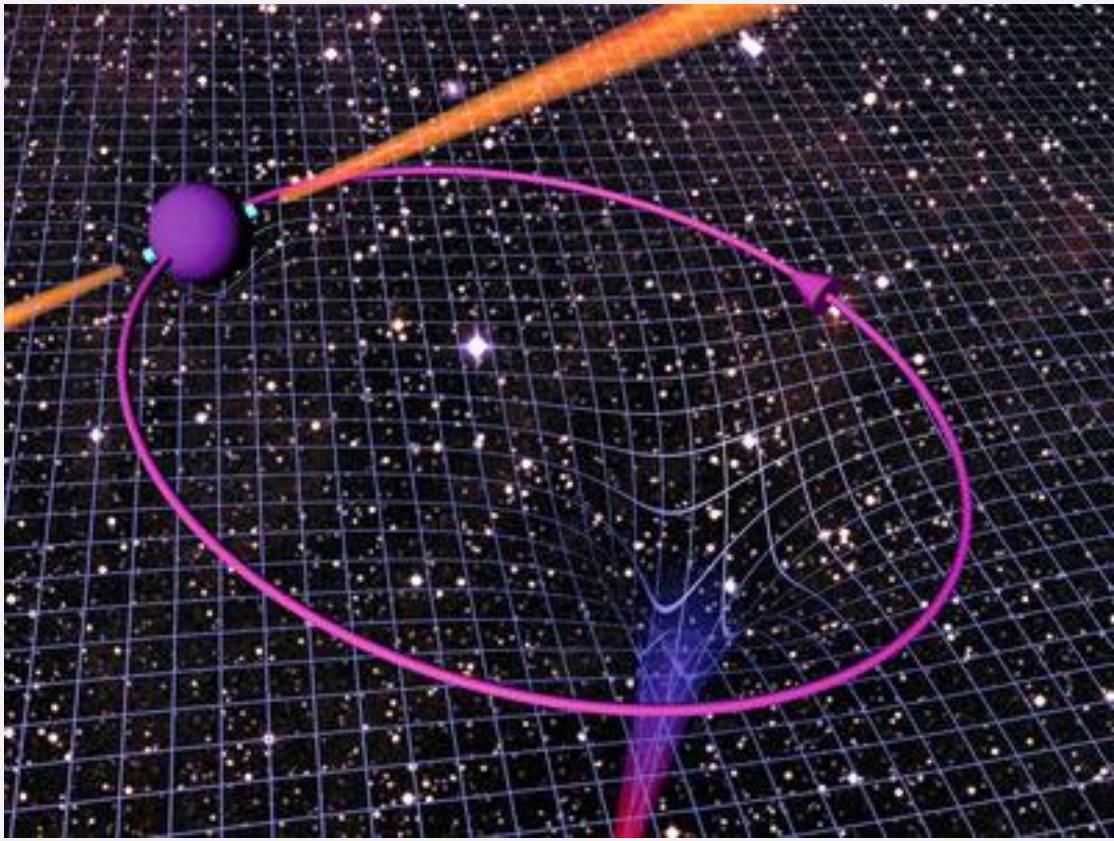


Кварковое состояние вещества энергетически выгоднее барионного?

Для нейтронных звезд?

Масс
ы

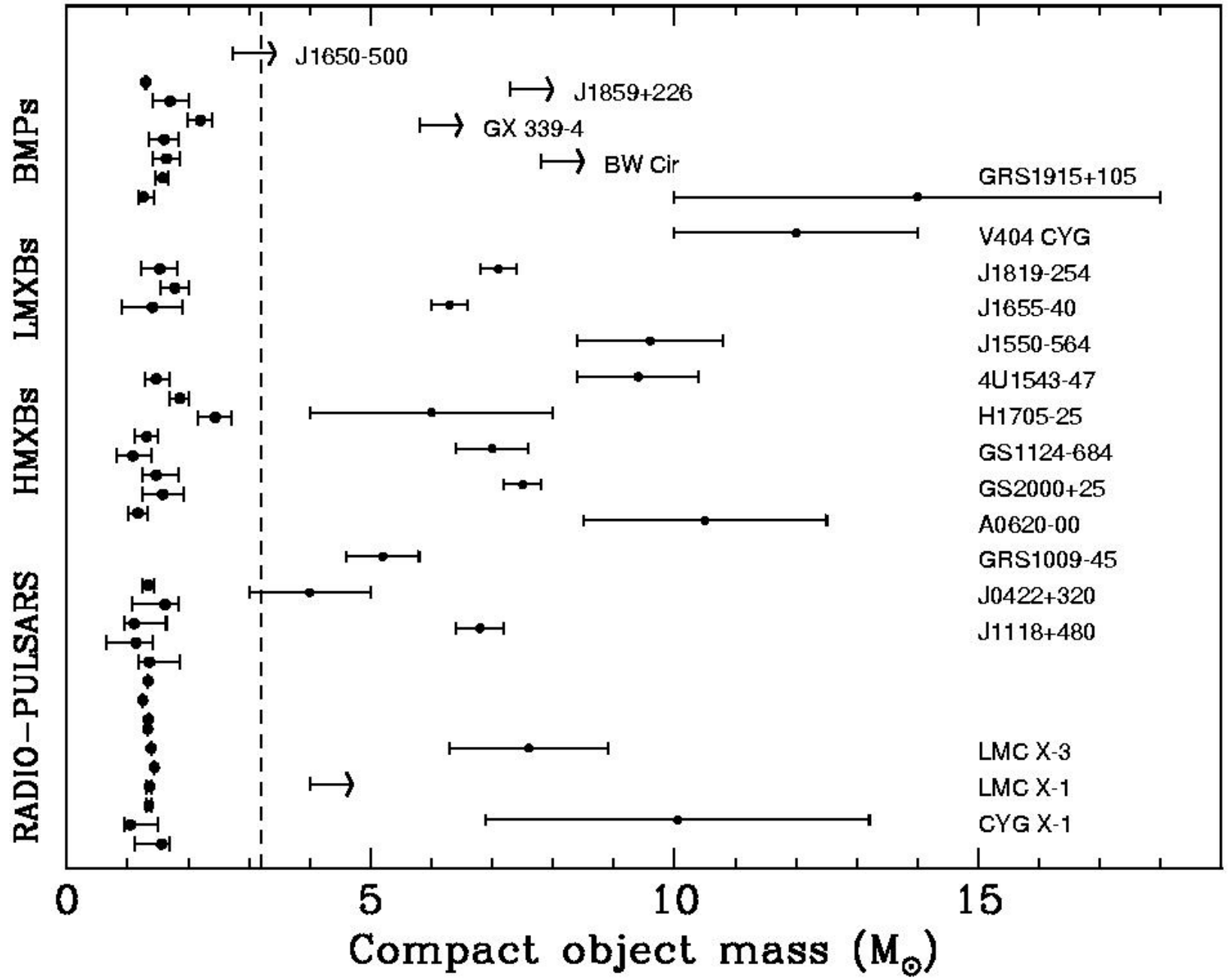




PSR J0737-3039A/B

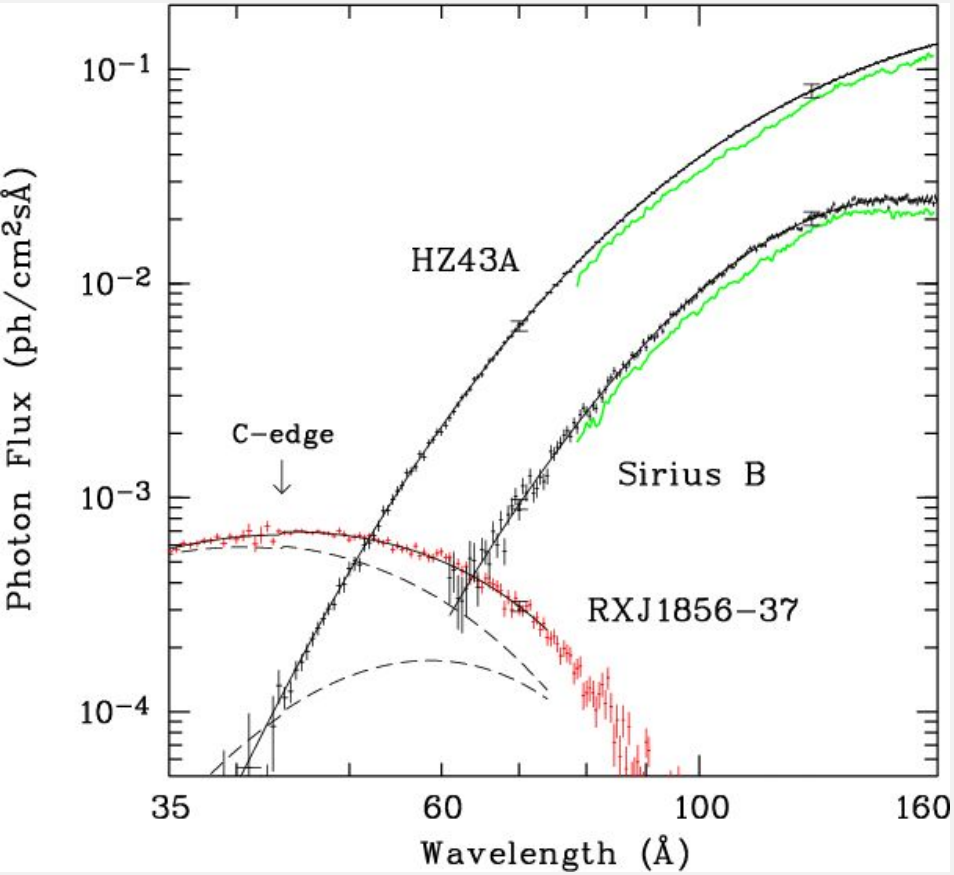
Системы из двух нейтронных звезд

Массы НЛ и НЗ в двойных системах



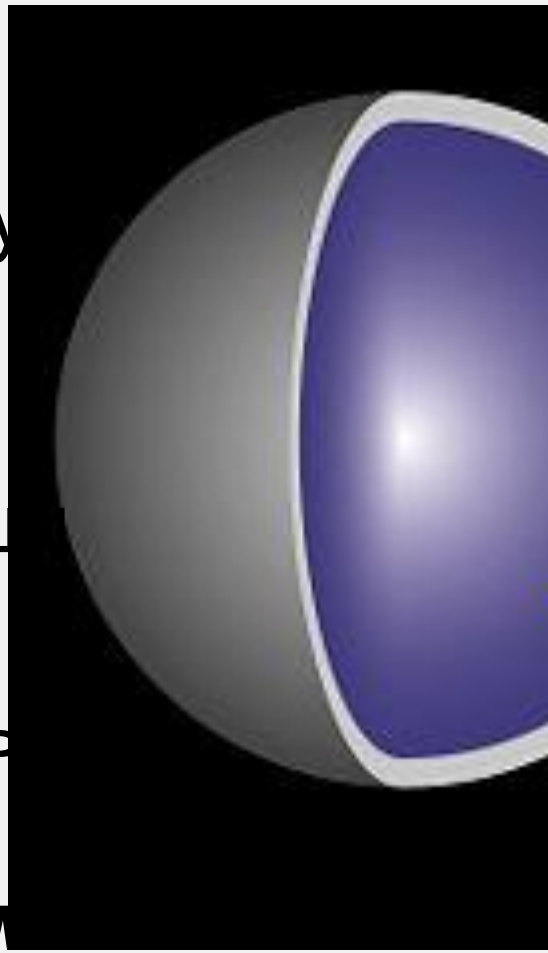
Для нейтронных звезд?

Размеры?

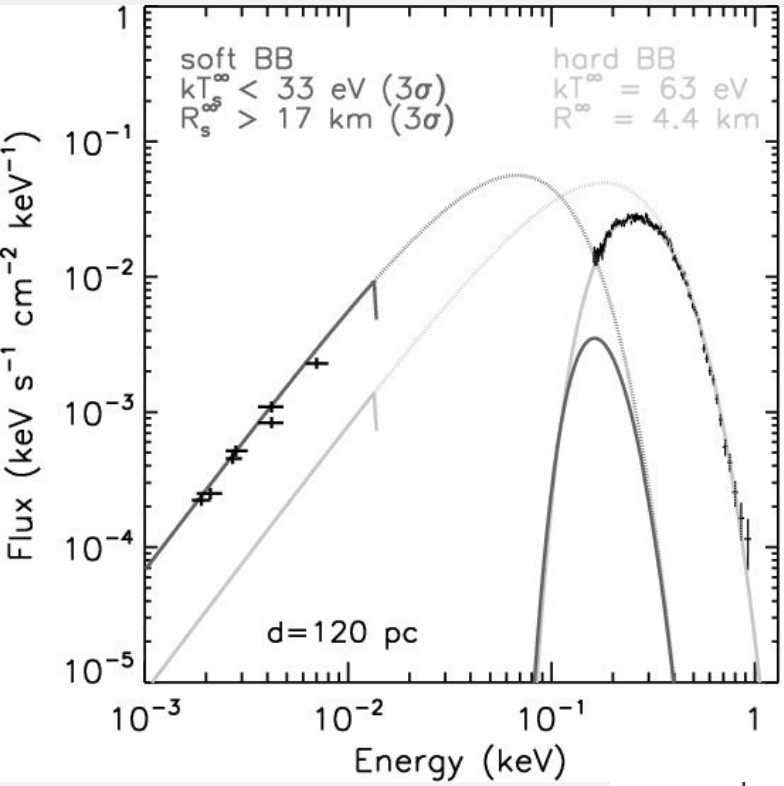


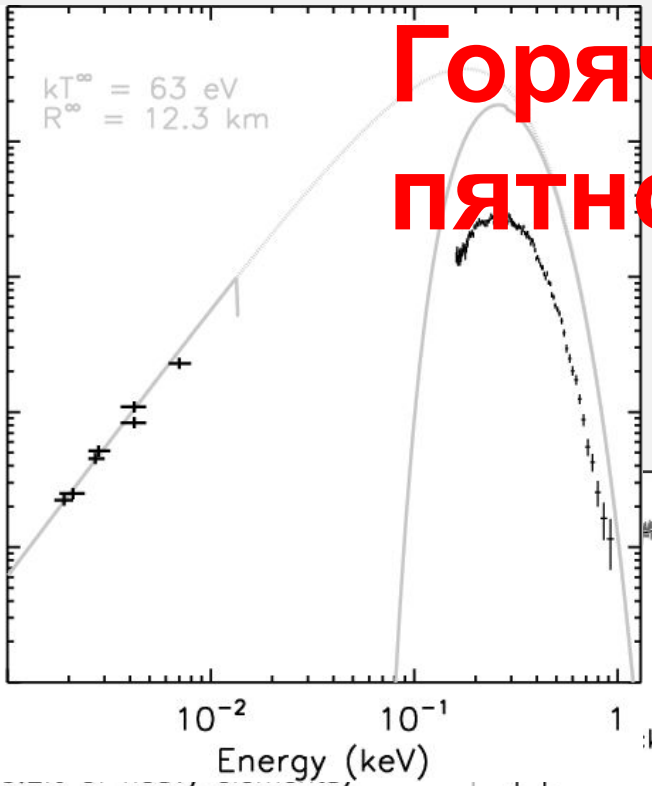
Температура
и радиус
остывающ
х
нейтронны
звезд

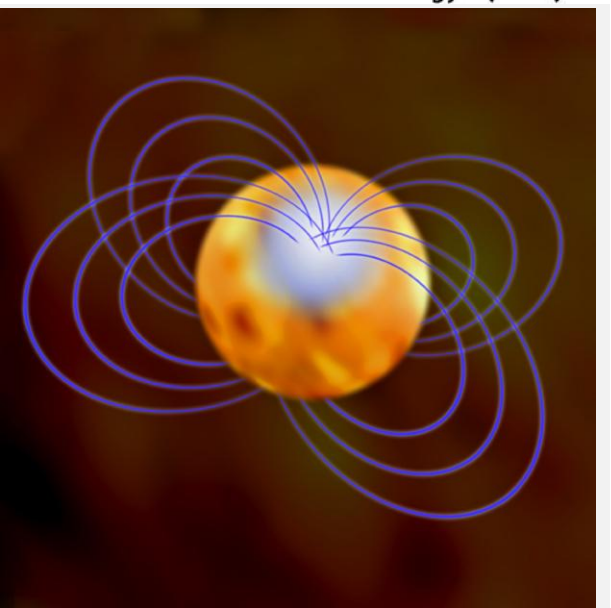
12-15км

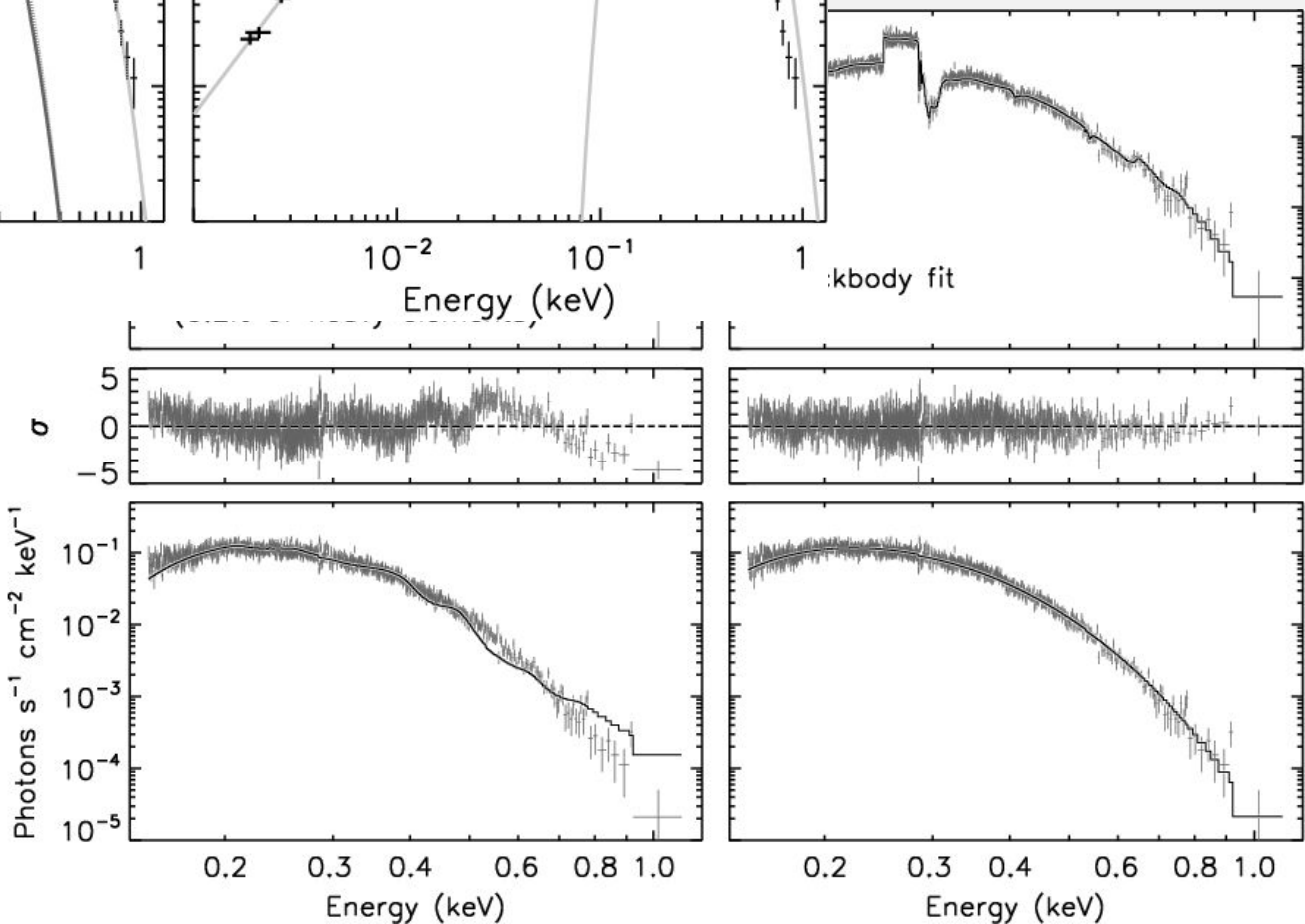


Горячее пятно?









Вспомним условия в центре Солнца

$P_{c\odot}$>4.5 x 10^8 атмосфер, $T_c > \frac{GM_s \mu m_p}{6kr_s} = 2.3 \cdot 10^6 K$

Плотность ~150 г/см^3

И в атмосфере НЗ

При типичной аккреции
Mdot~10^{-9}Msun/год~5000г/см^2/сек

Темп накопления

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

Высота однородной атмосферы НЗ

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \qquad P = \frac{\rho kT}{m_p}$$

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

$$g = \frac{GM_{ns}}{R^2} \sim 2\times 10^{14} \qquad h_{ns} \sim 5см$$

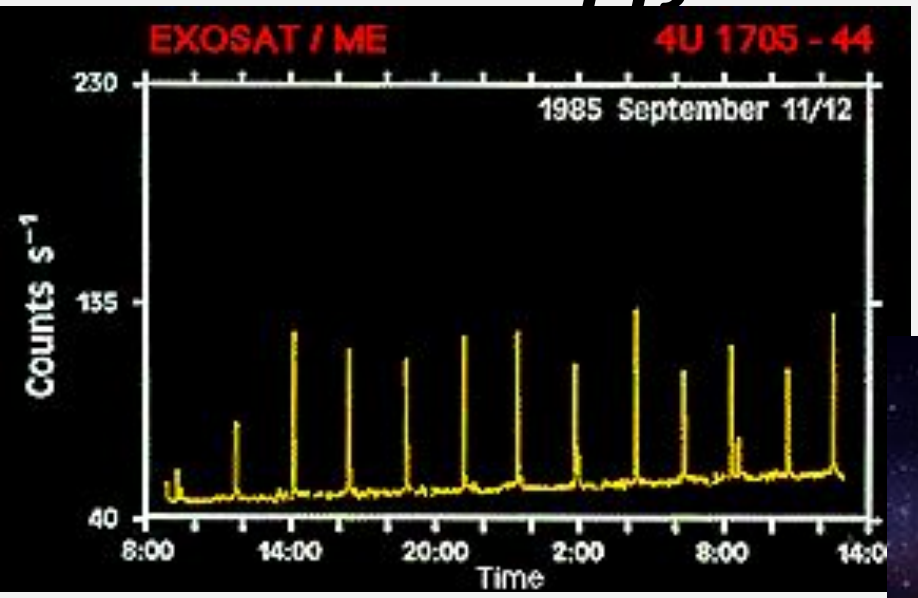
kT~1 кэВ

На глубине порядка 10 см за сутки копится плотность >10^7 г/см^3

Термоядерные

Для нейтронных звезд?

Размер



Термоядерное горение атмосферы (взрыв)

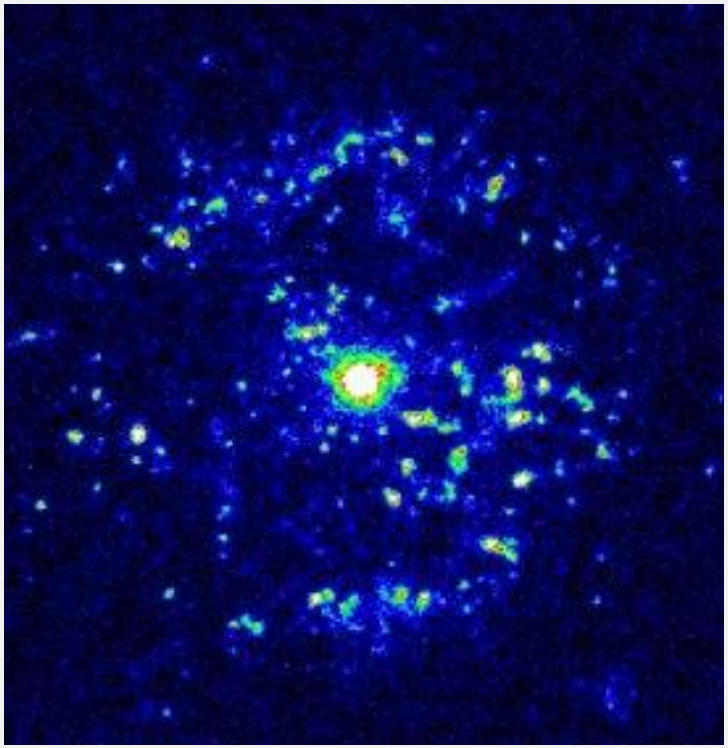
$$\frac{\sigma T^4}{c}\frac{\sigma_{\rm T}}{m_{\rm p}} = \frac{GM(1-R_{\rm g}/R)^{3/2}}{R^2}$$

12-15км

Всплески первого типа на НЗ

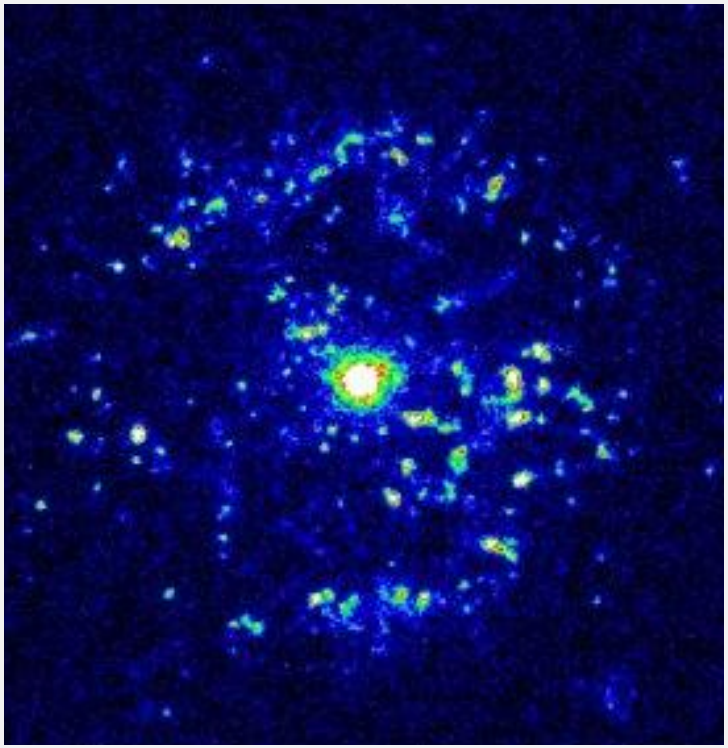
Взрывы классических Новых на БК

В чем разница?



Термоядерные взрывы на комп. объектах

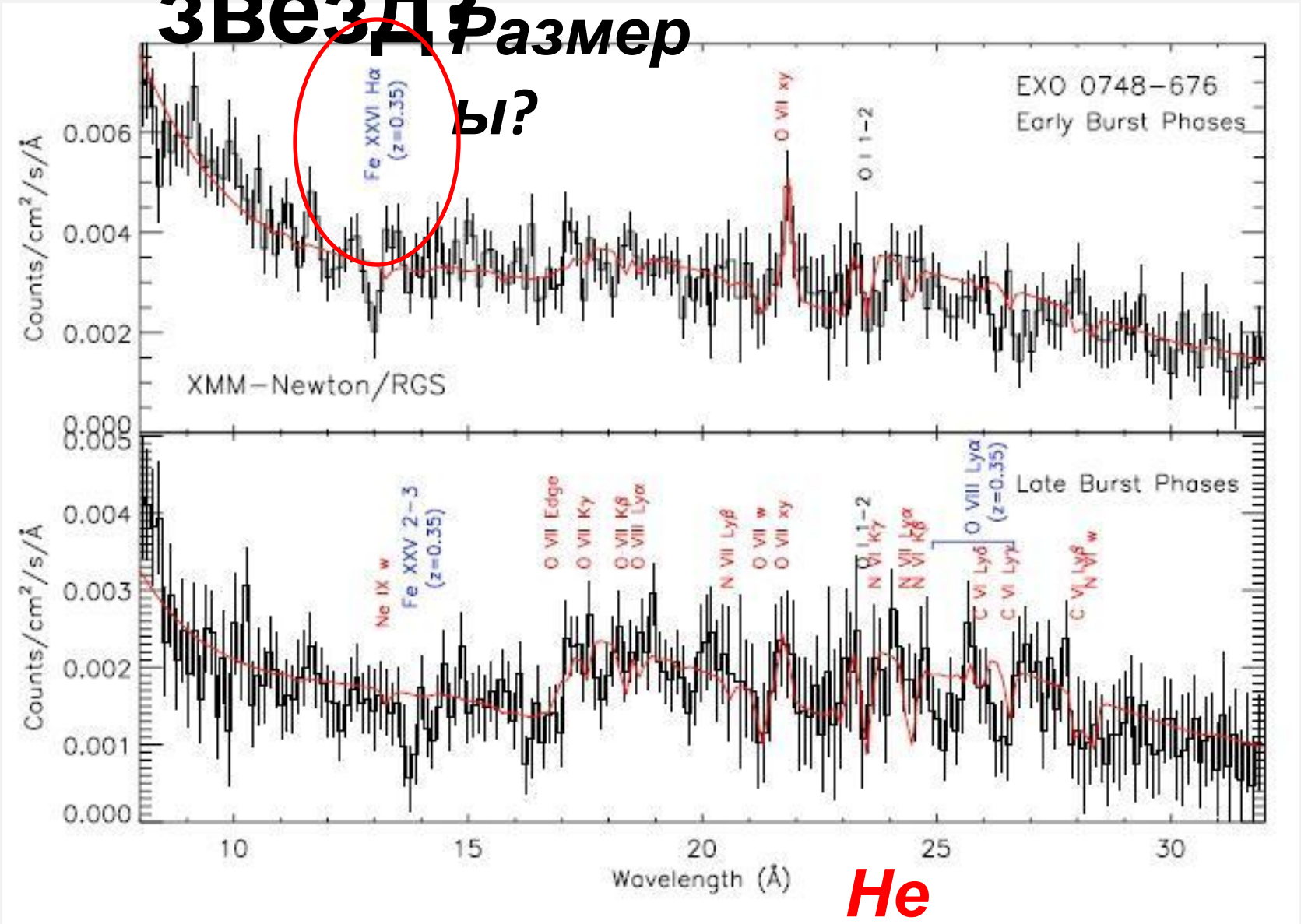
$$E_{гр} \sim \frac{GM}{R}, E_{тя} \sim 0.007mc^2$$



Для нейтронных звезд?

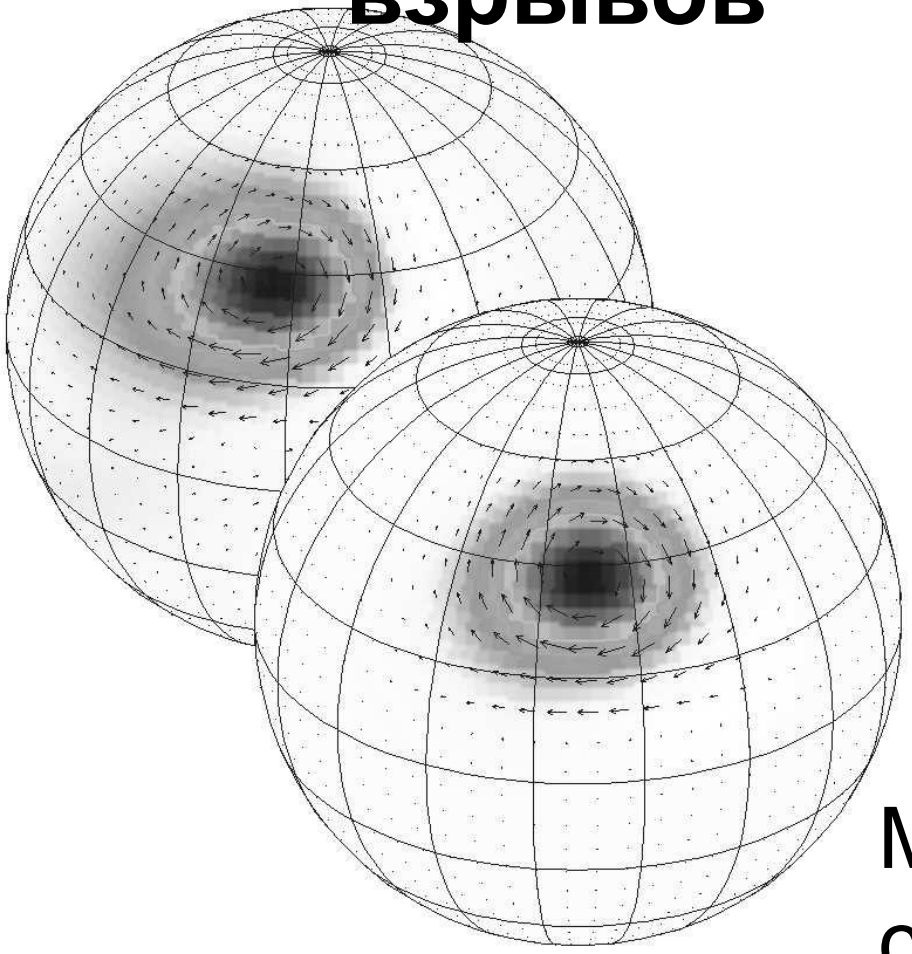
Размер

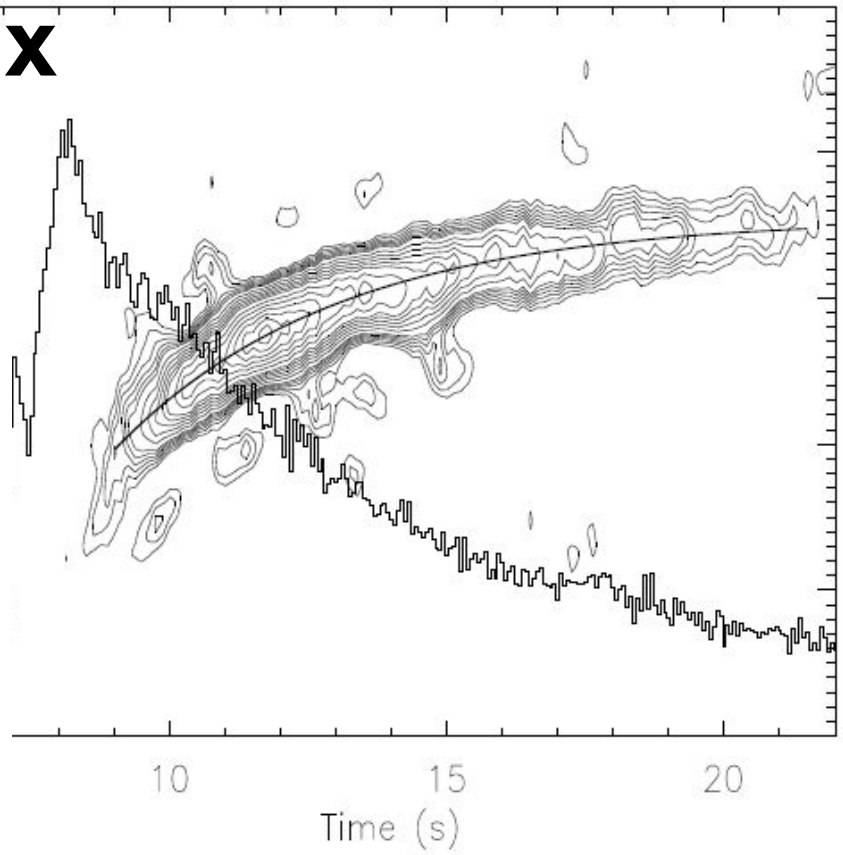
ы?



He

Осцилляции во время термоядерных взрывов





Многообещающий способ

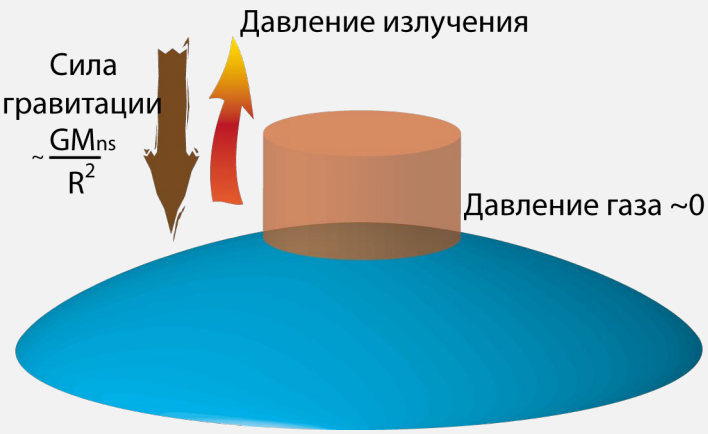
Для нейтронных звезд?

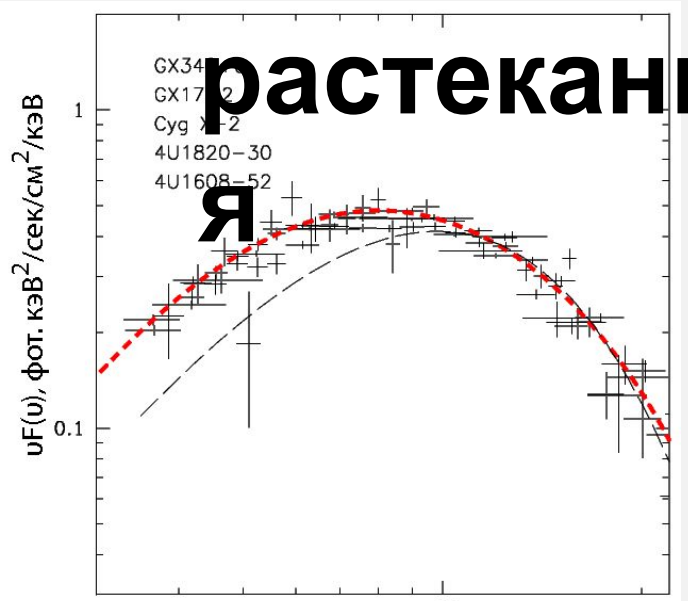
Спектр

слоя

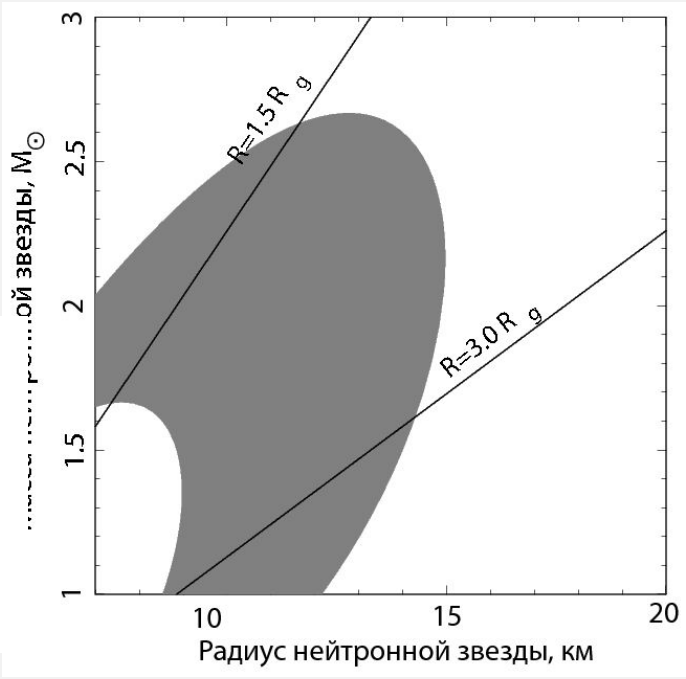
растекани

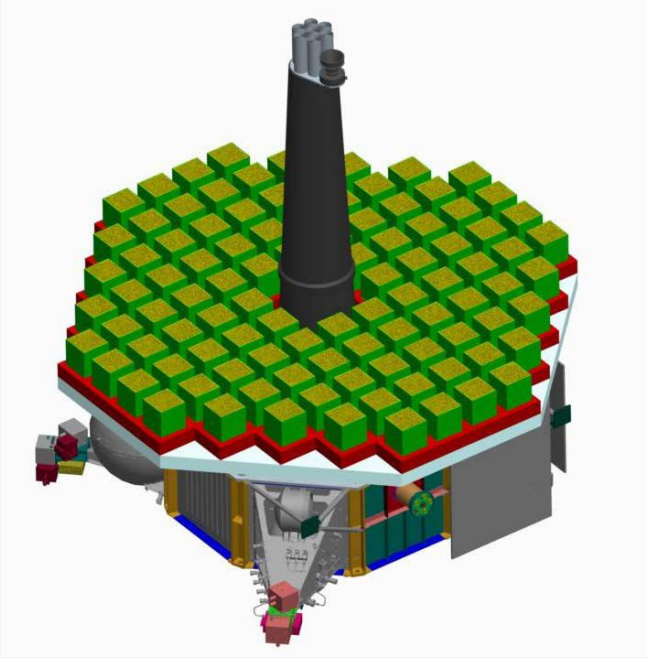
я

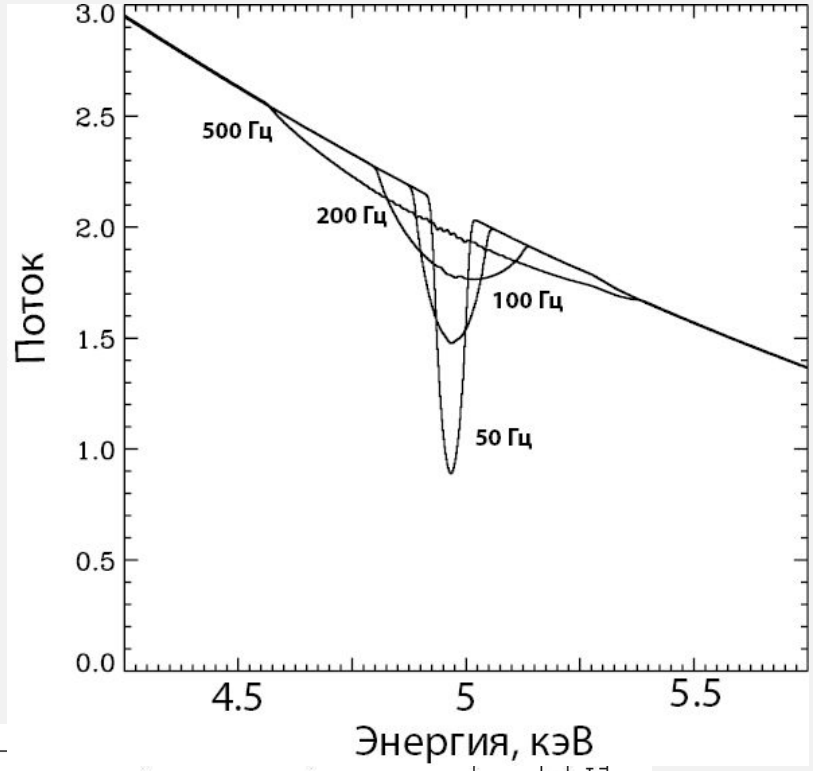




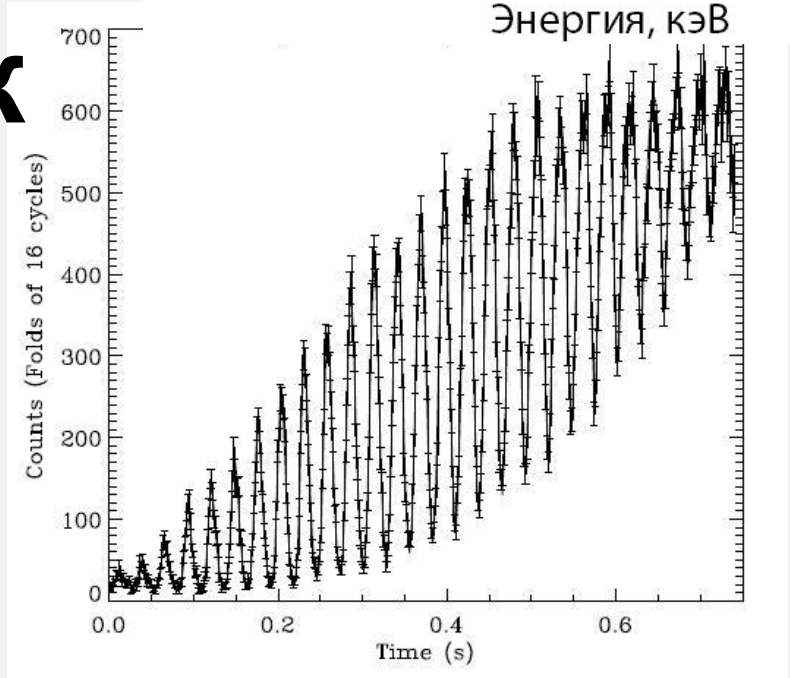
$$\frac{\sigma T^4}{c}\frac{\sigma_{\rm T}}{m_{\rm p}} = \frac{GM(1-R_{\rm g}/R)^{3/2}}{R^2}$$



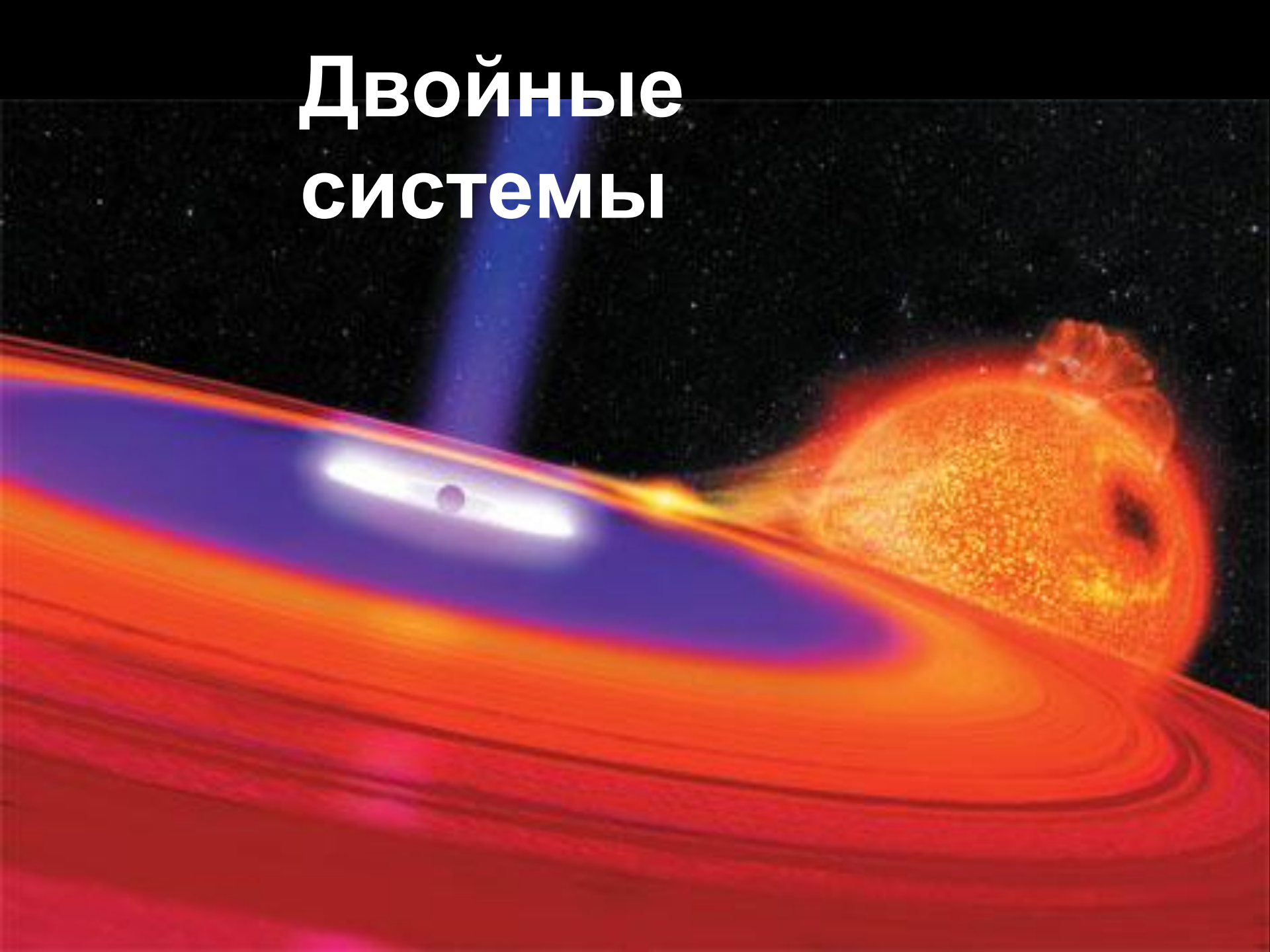




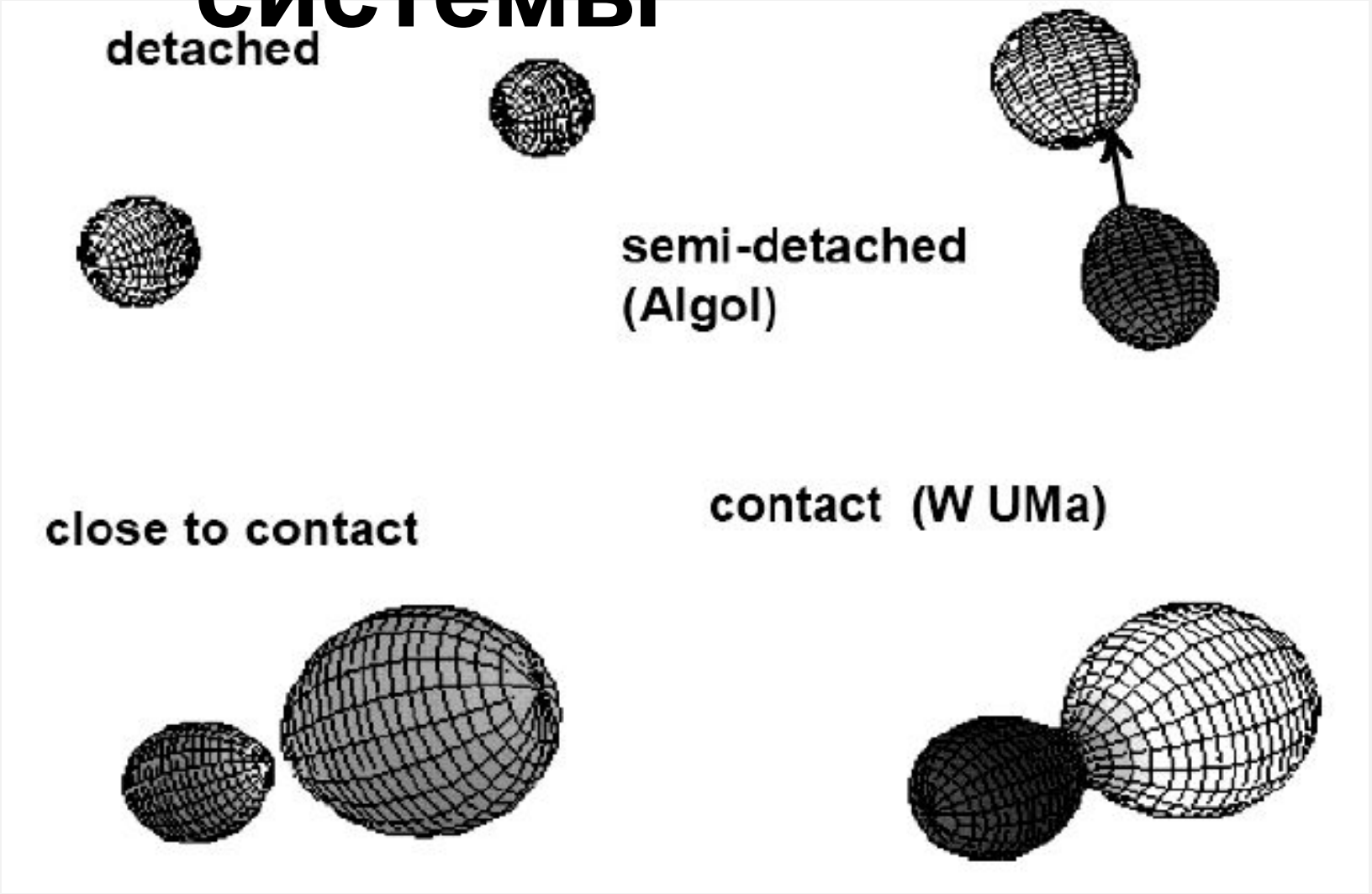
Проект “Рентгеновский Микрофон” Эфф.

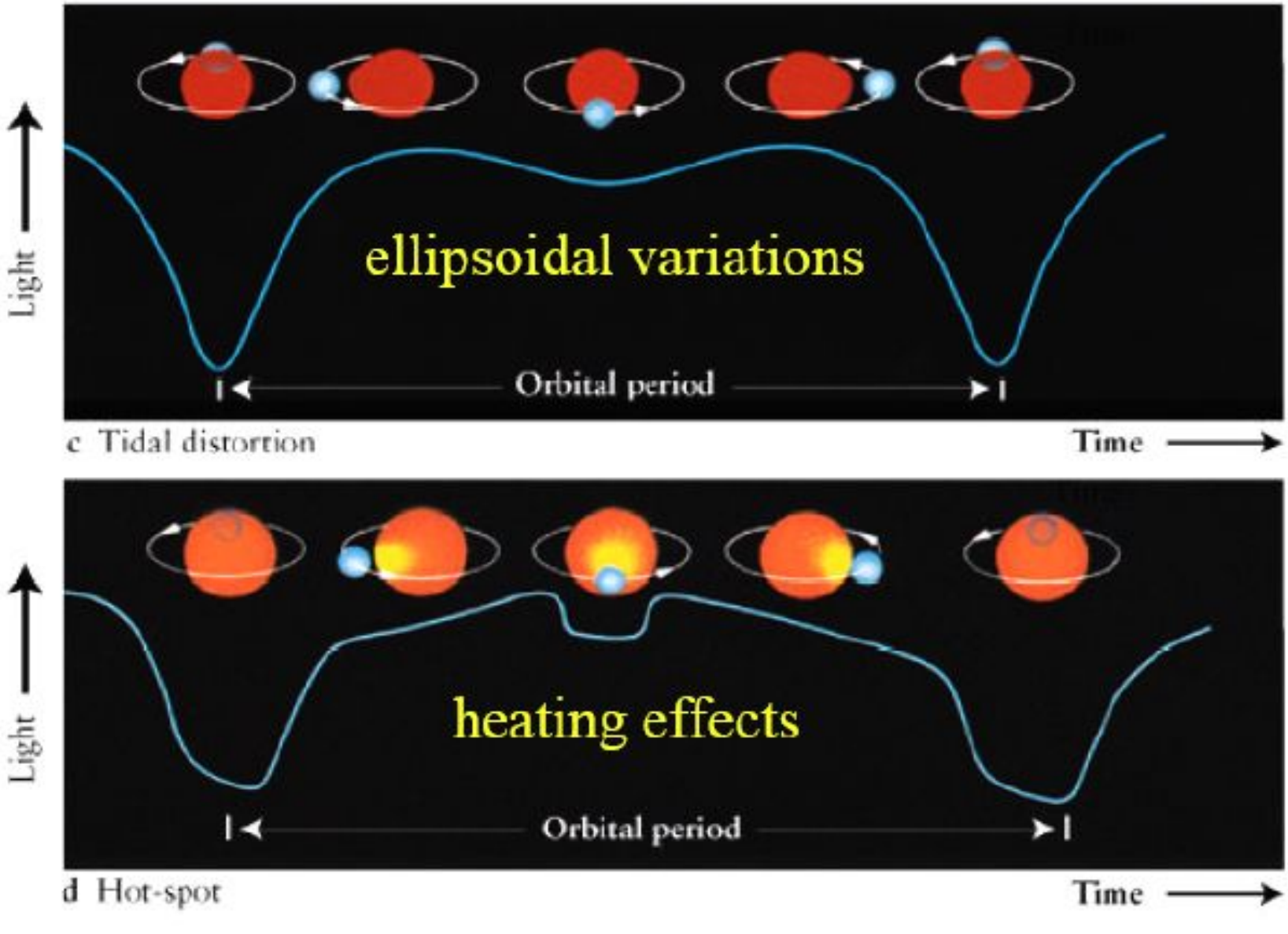


Двойные системы



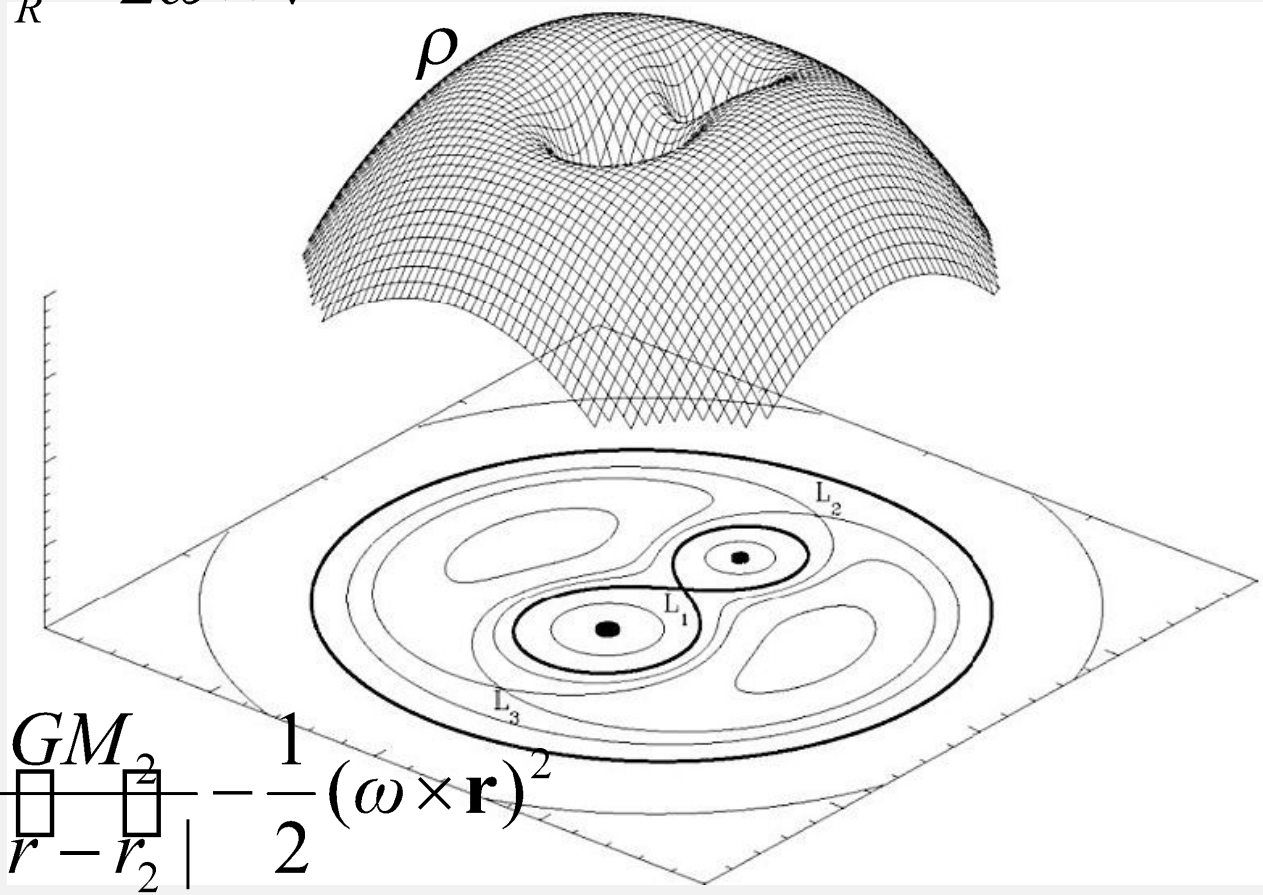
Двойные системы




Light
ellipsoidal variations
Orbital period
c Tidal distortion
Time
Light
heating effects
Orbital period
d Hot-spot
Time

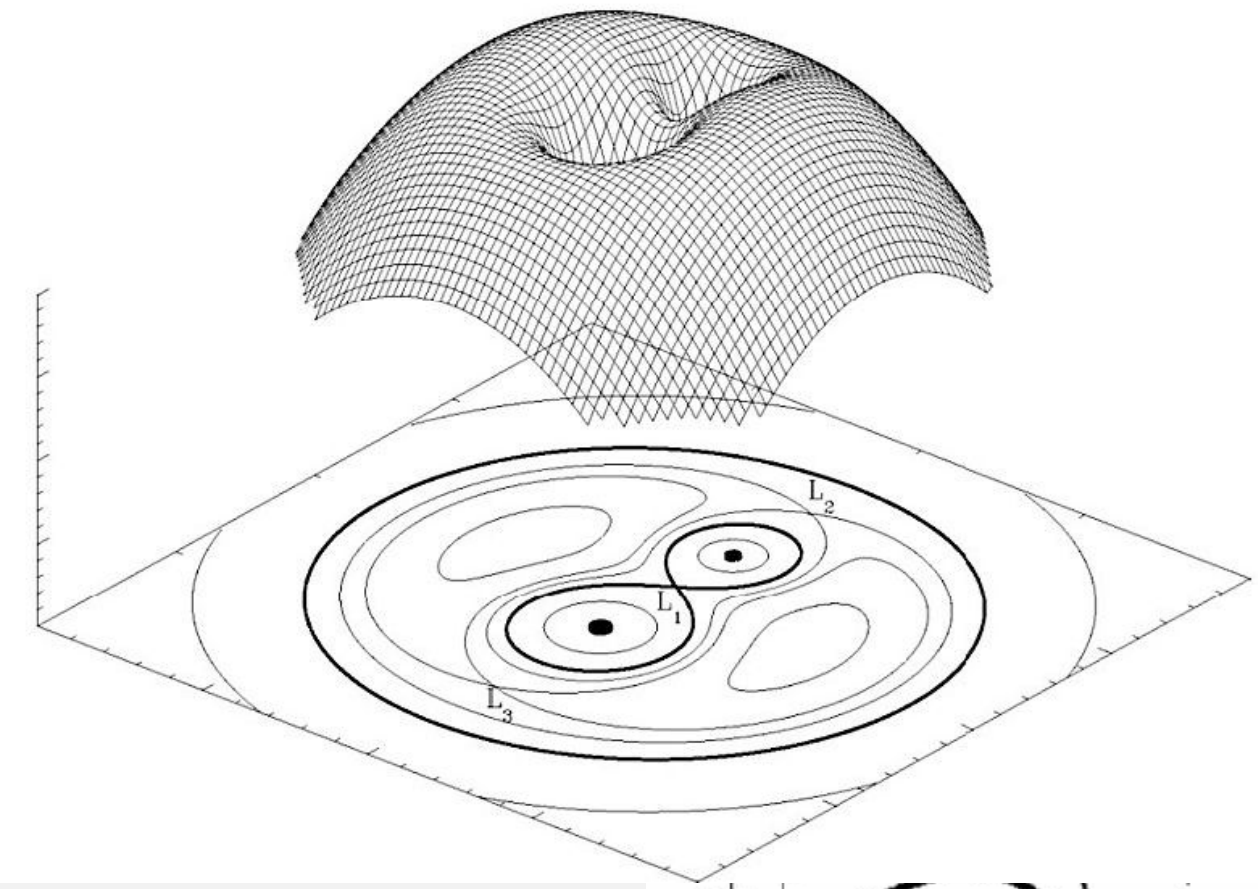
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\cdot\nabla)\mathbf{v} = -\nabla\Phi_R - 2\omega\times\mathbf{v} - \frac{\nabla P}{\rho}$$

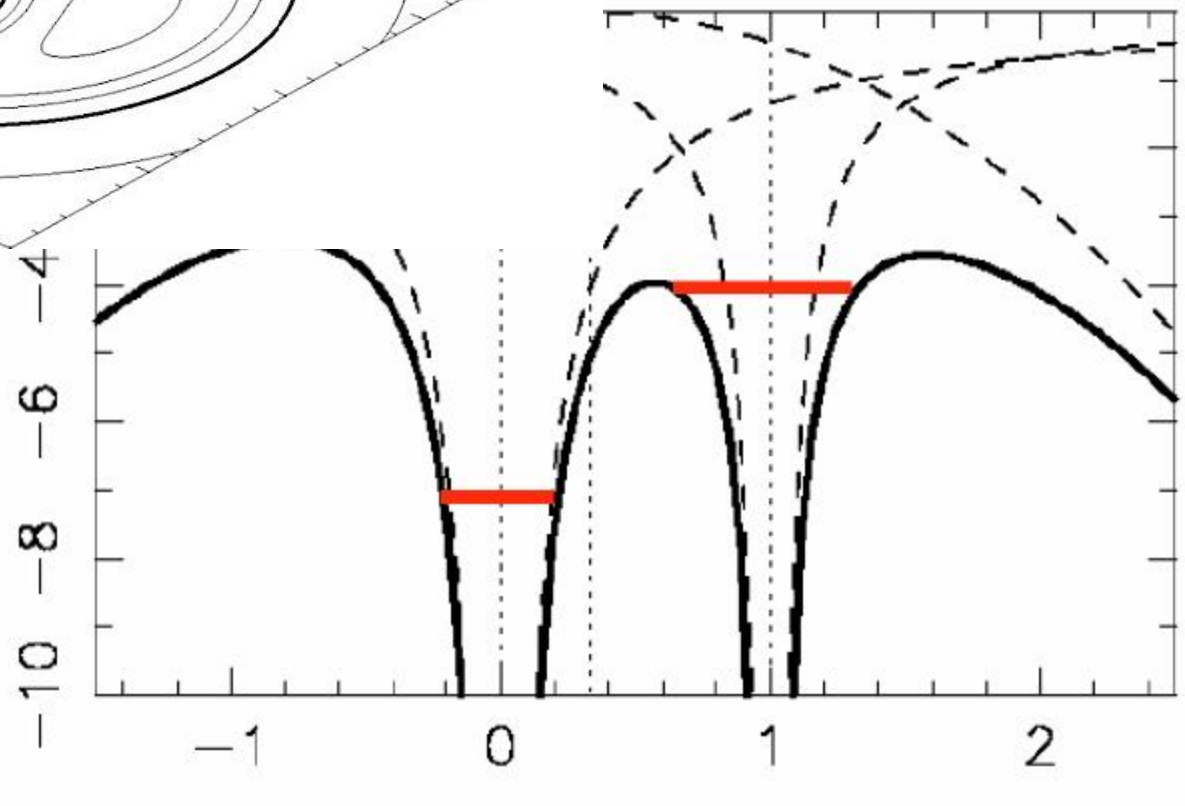
$2\omega \times v$ - сила Кориолиса



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

потенциал Роша


L2
L1
L3


−10
−8
−6
−4
−1
0
1
2

Угловой момент двойной системы

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

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

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

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

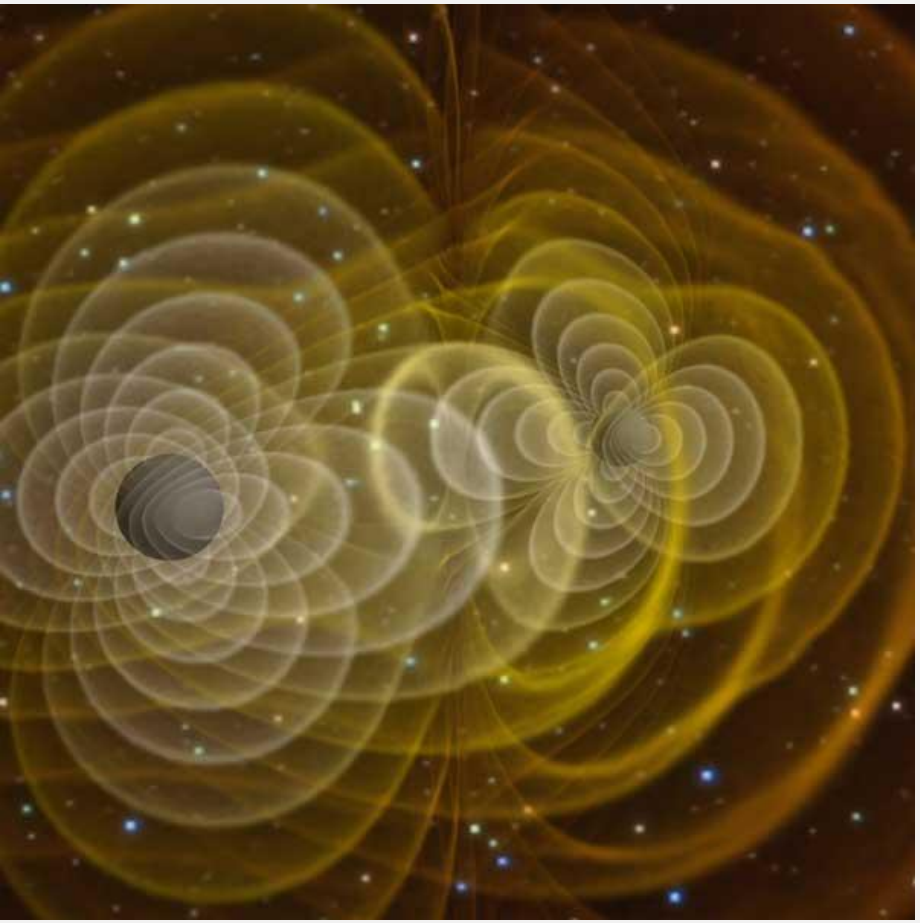
$$\frac{R_2}{a} = 0.462\left(\frac{M_2}{M_1 + M_2}\right)^{1/3}$$

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

размер полости Роша и его эволюция

Если $\frac{M_2}{M_1} > \frac{5}{6}$ → Самоподдерживающееся перетекание

Если $\frac{M_2}{M_1} < \frac{5}{6}$ → Для поддержки перетекания необходим отвод углового момента



Гравитационные волны

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

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

$$\tau(GW) = \left(\frac{d\ln L_{orb}}{dt}\right)^{-1} = 1.2\times10^9\left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)^{-1}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1}\left(\frac{M_2}{M_\odot}\right)^{-1}\left(\frac{a}{R_\odot}\right)^4$$

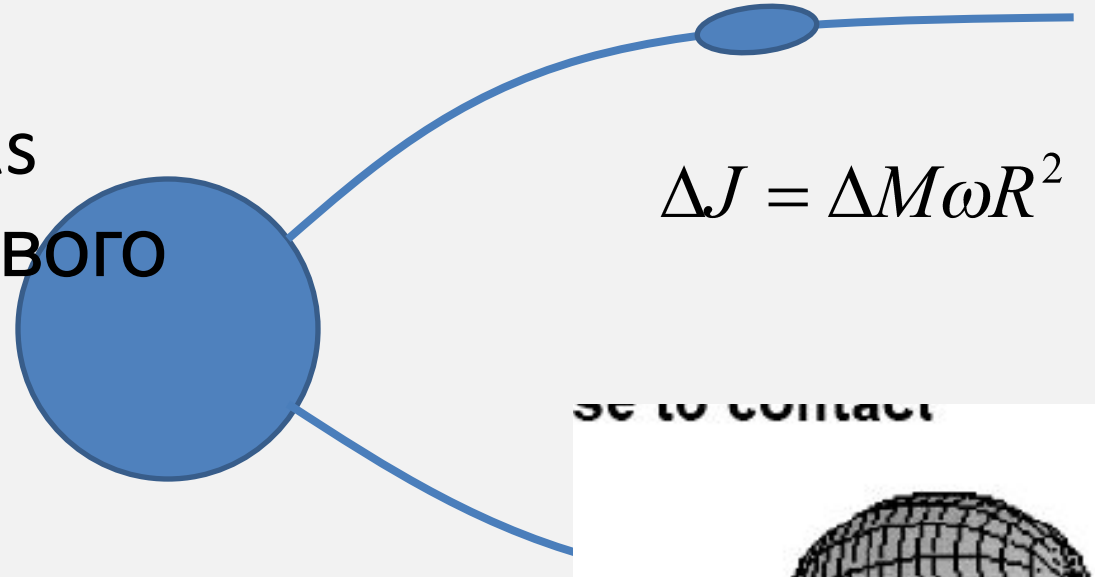
Магнитный звездный ветер

Вещество “отцепляется” от зв. ветра
на расстоянии >>Rs
Уносит много углового момента

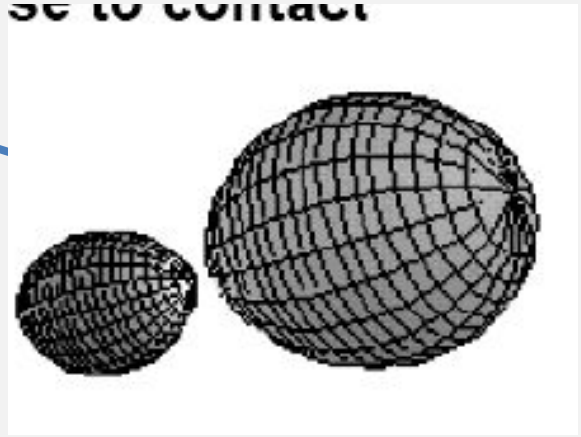
$V \propto t^{-1/2}$

из наблюдений

$\omega_2 = \omega$ (приливные силы)

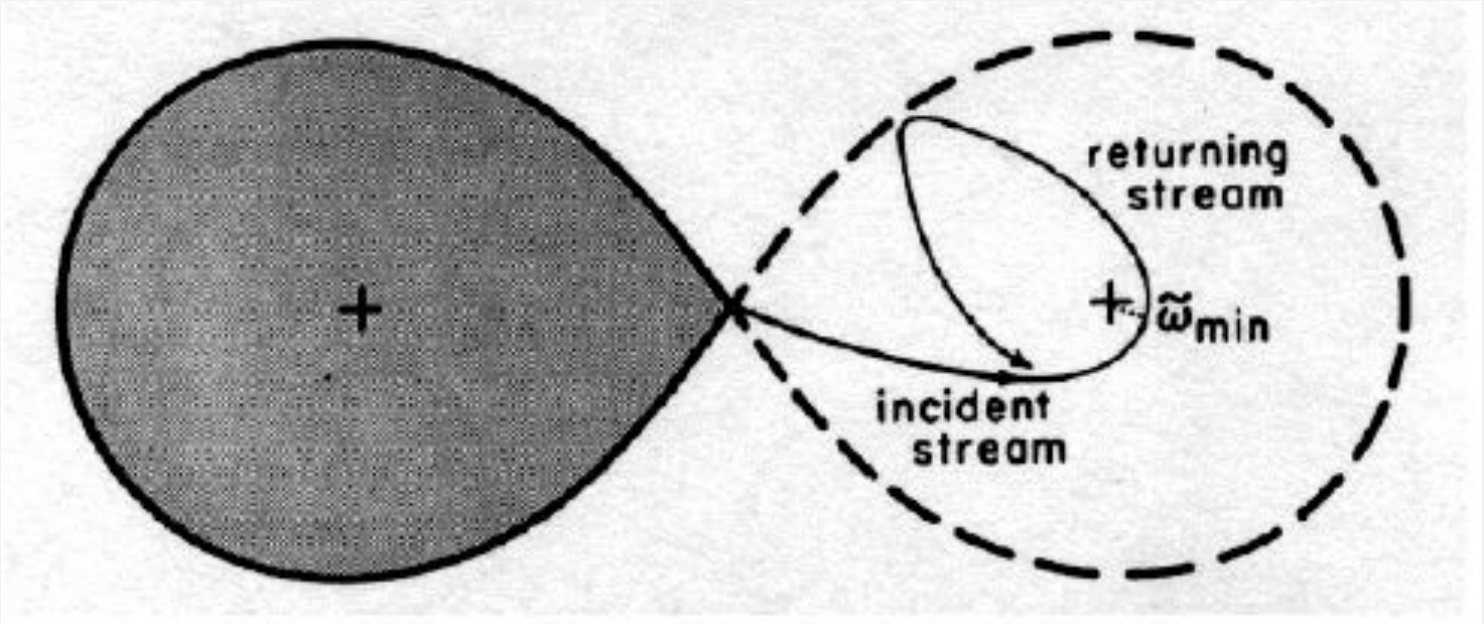


$$\Delta J = \Delta M \omega R^2$$



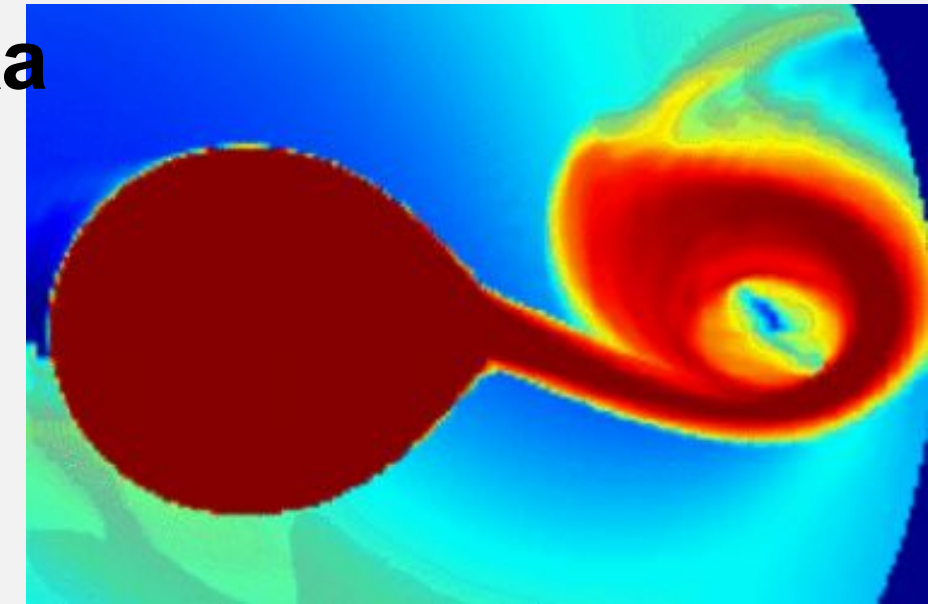
$$\frac{dL_{orb}(=\mu\omega a^2)}{dt} = J_2$$

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

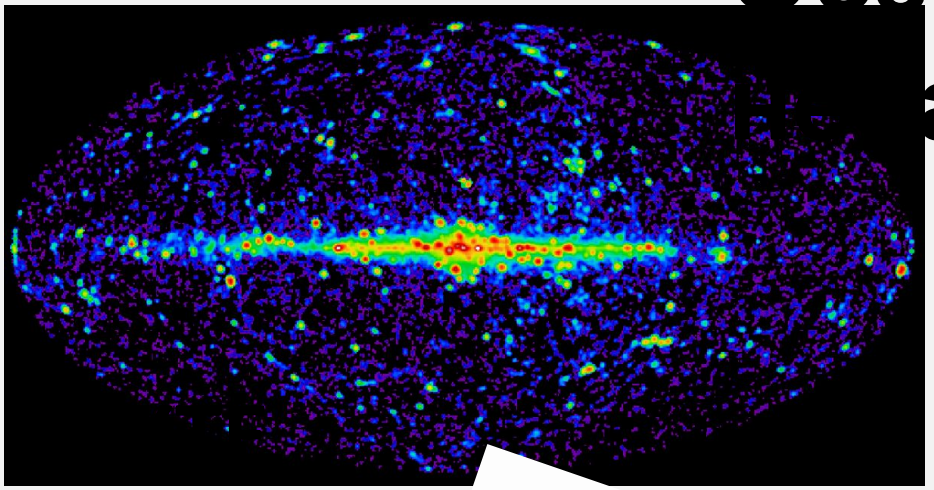


Звезда заполняет полость Роша:

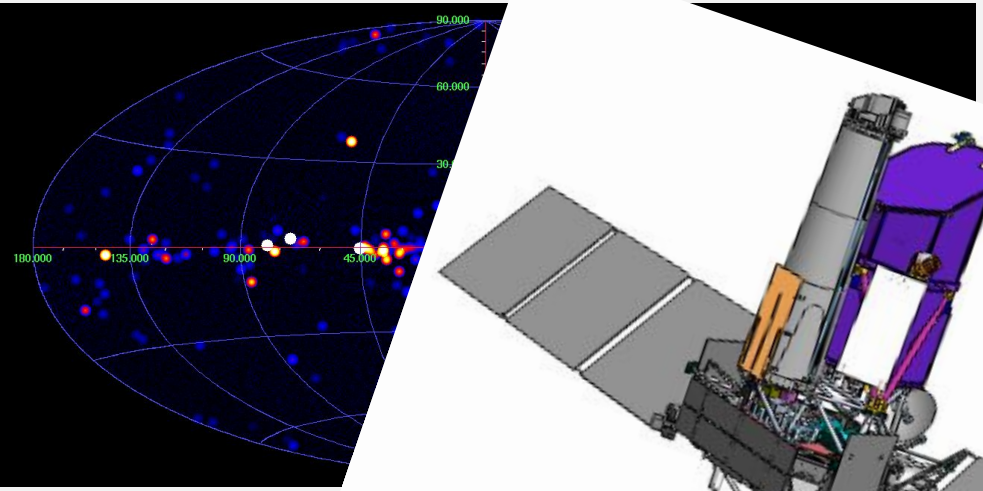
Образование диска



Обзоры всего неба



Слоан SDSS



INTEGR

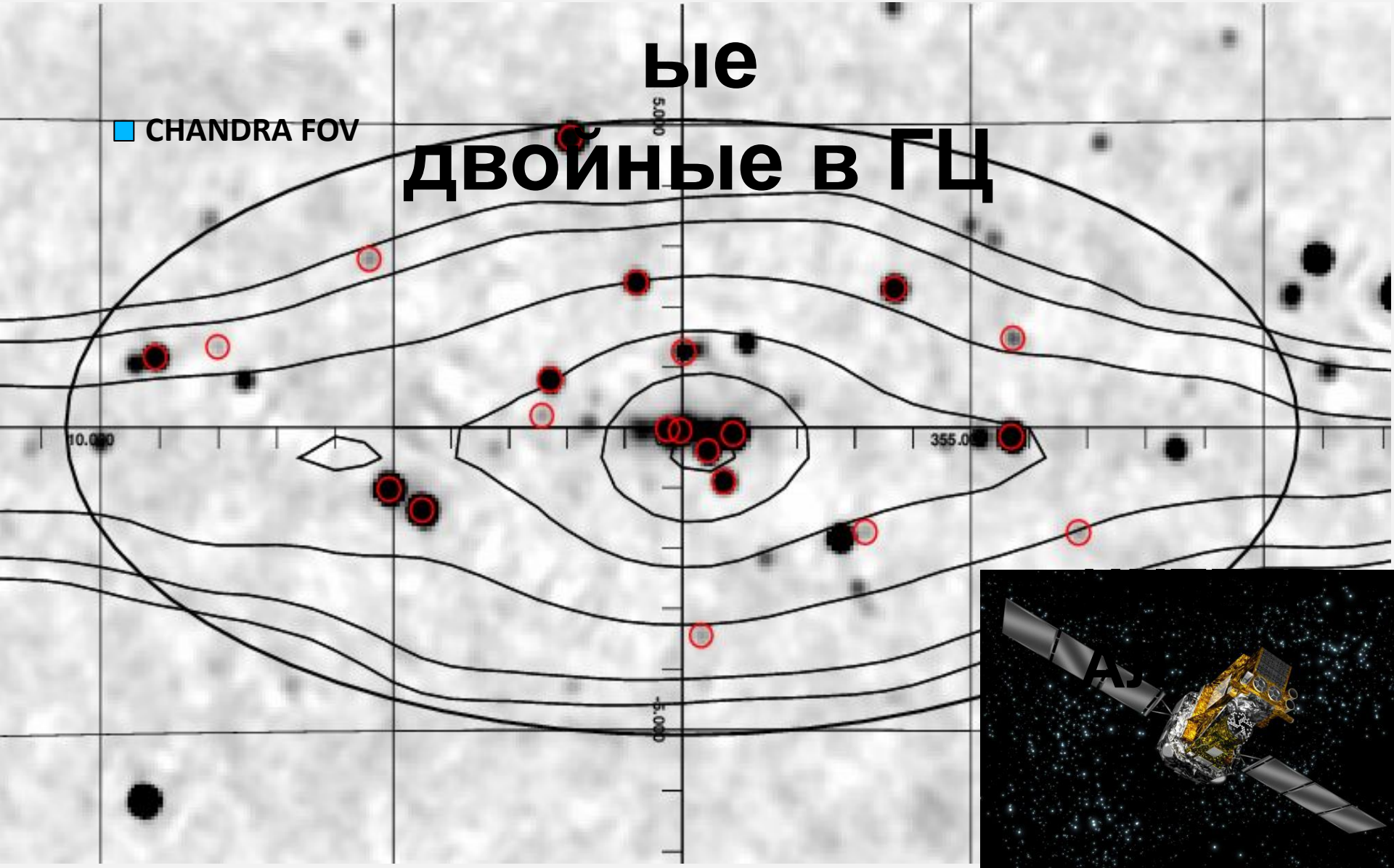
PanSTARRS

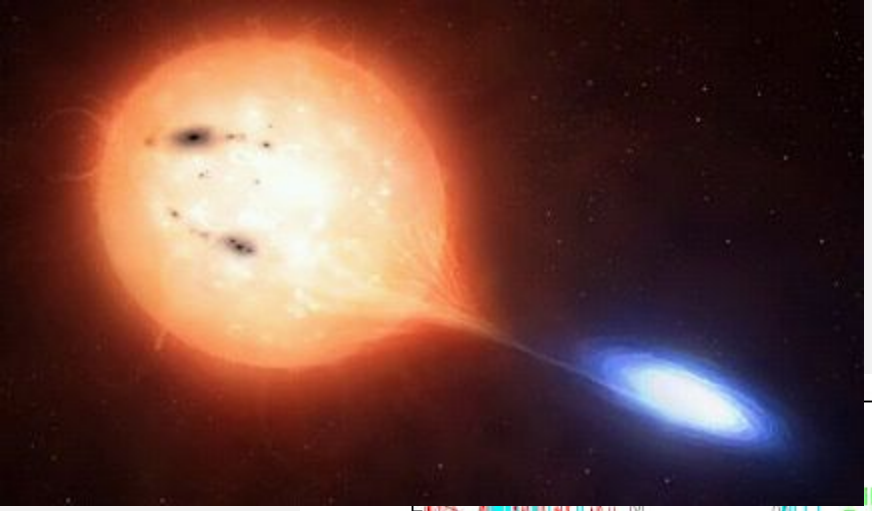
LSST..

ближайший проект

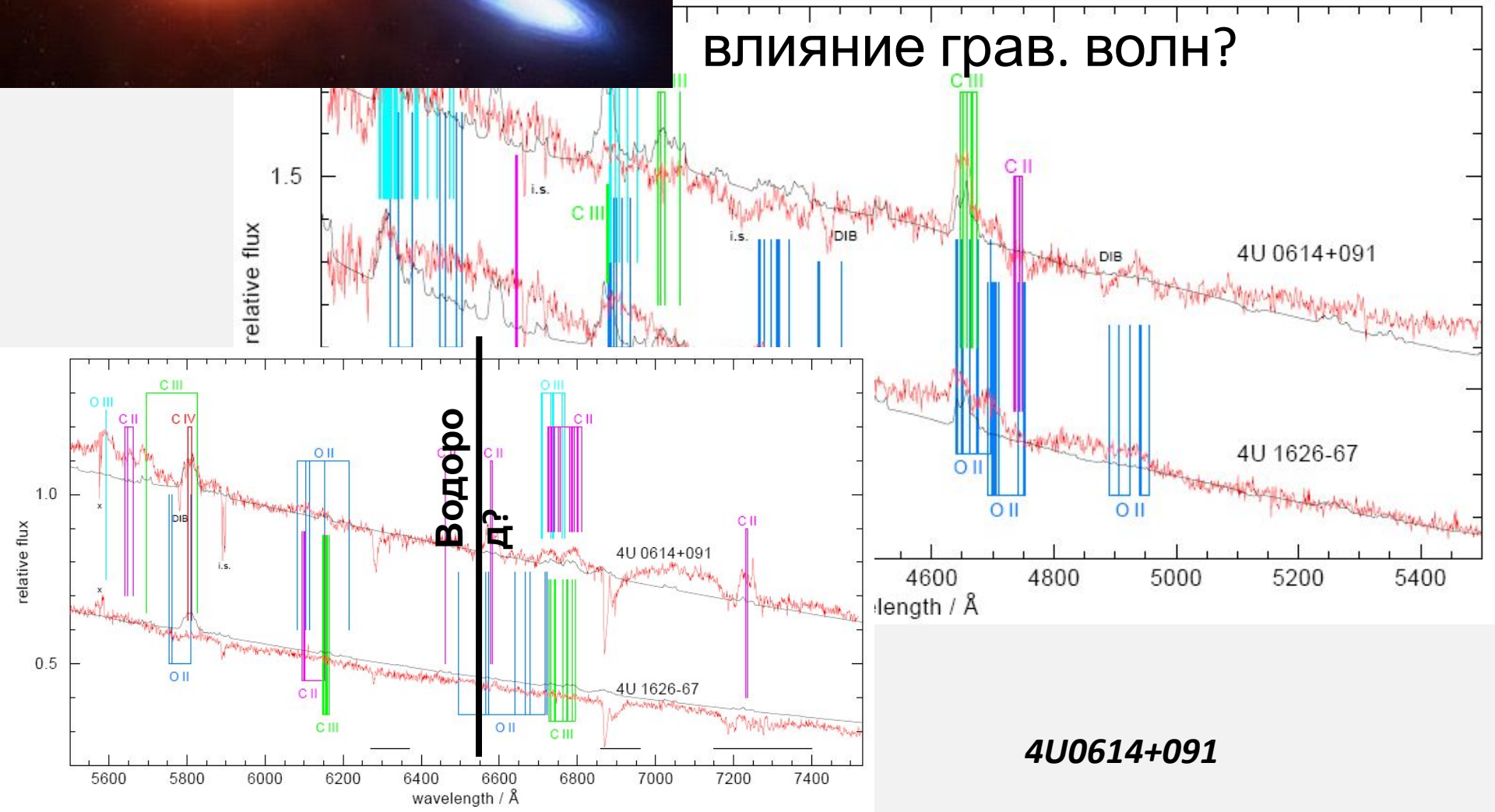
Спектр-рентген-

Маломассивные двойные в ГЦ



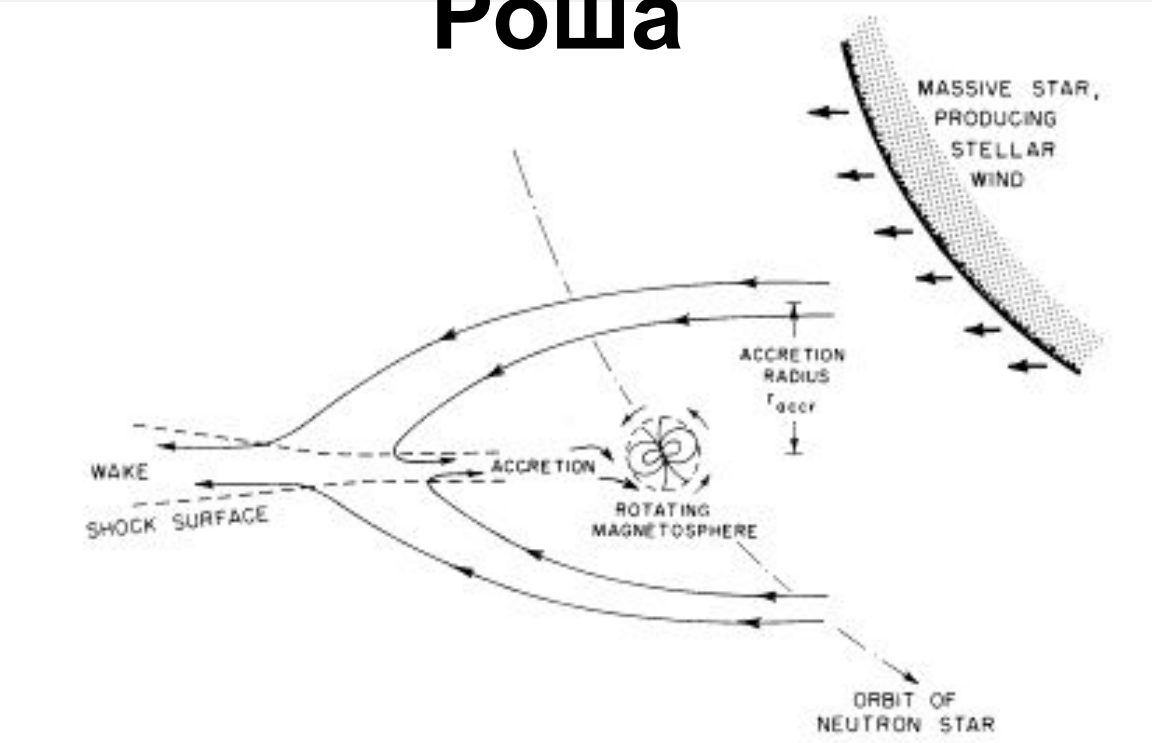


Пример: как минимум некоторые из таких систем действительно очень тесные – влияние грав. волн?



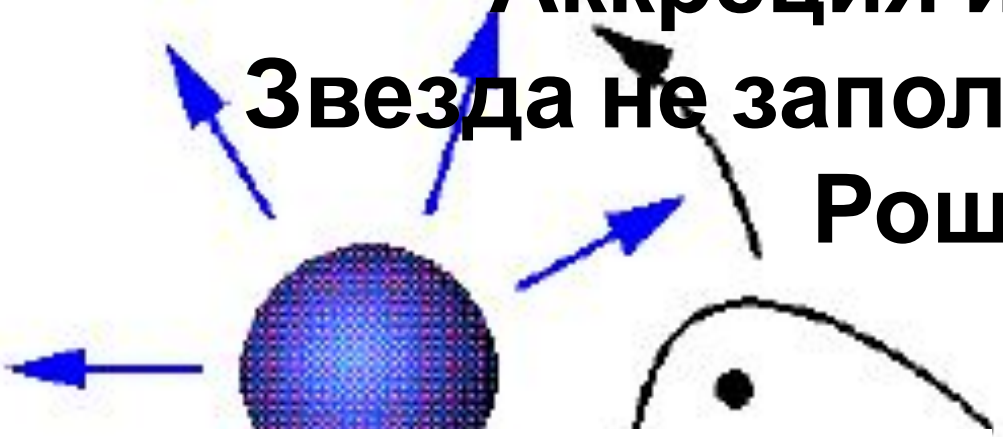
4U0614+091

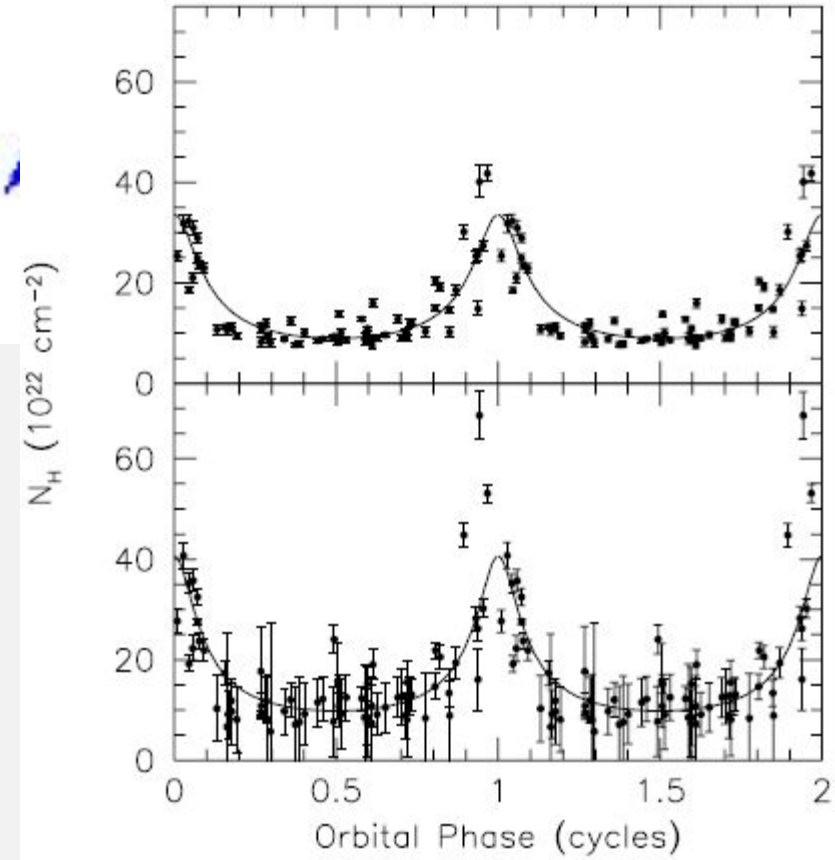
Аккреция из ветра: Звезда не заполняет полость Роша

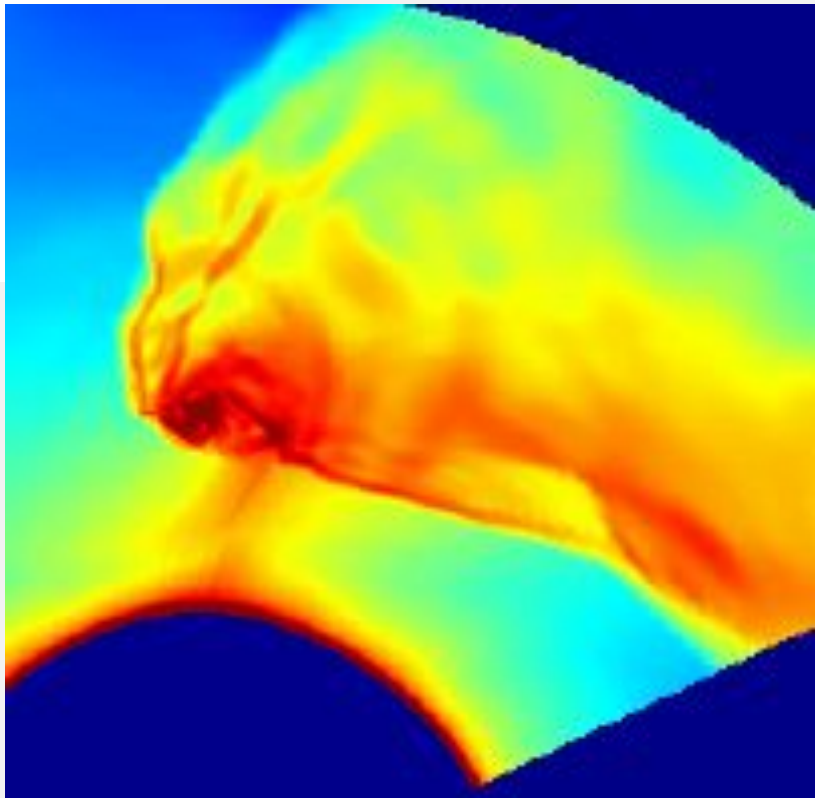


$$r_{acc} = \frac{GM_x}{v_{rel}^2} = \frac{GM_x}{v_w^2 + v_x^2}$$

Аккреция из ветра: Звезда не заполняет полость Роша



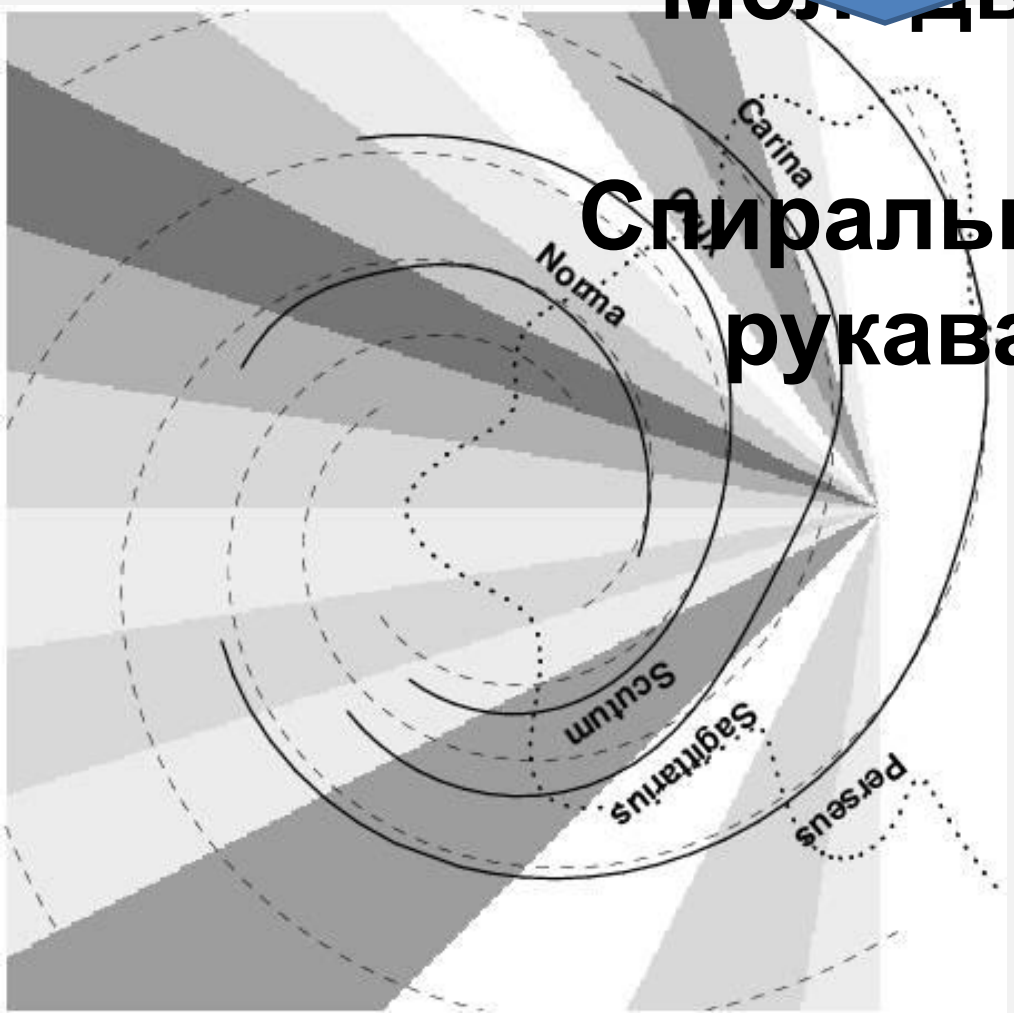


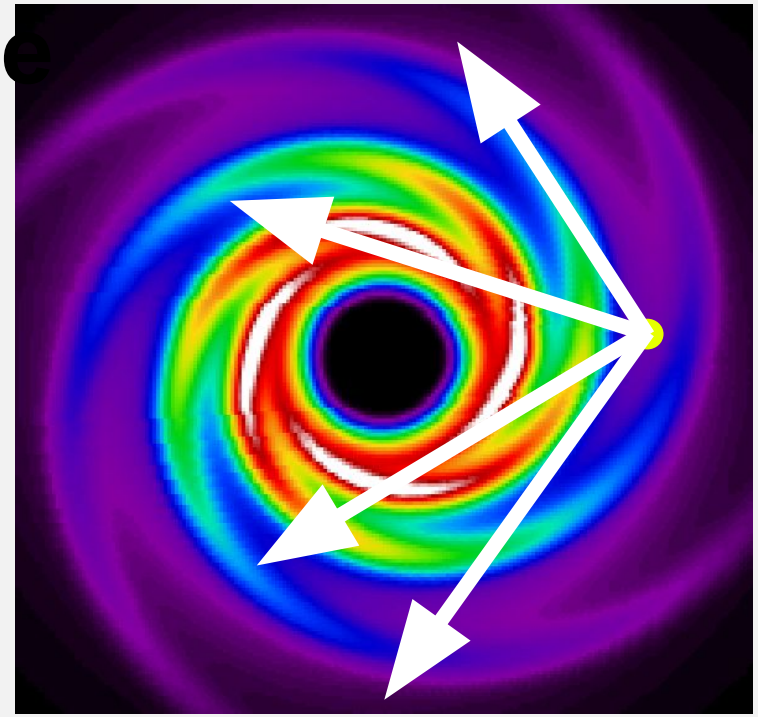


Массивные двойные

Молодые

Спиральные рукава



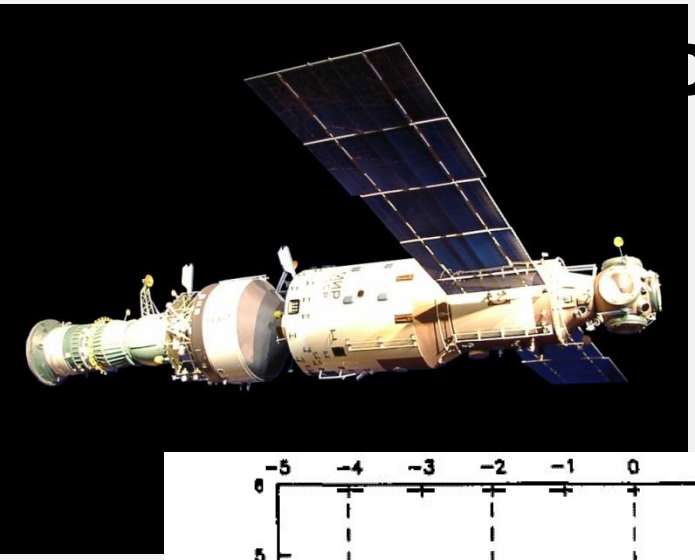


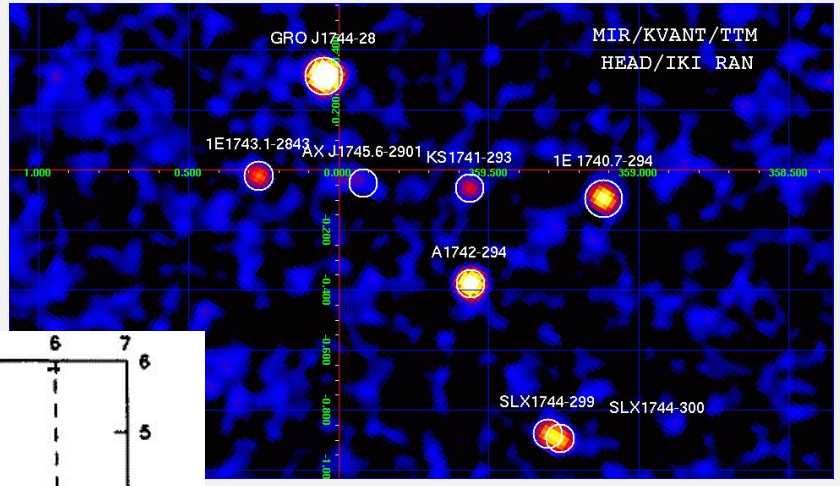
Массивные двойные

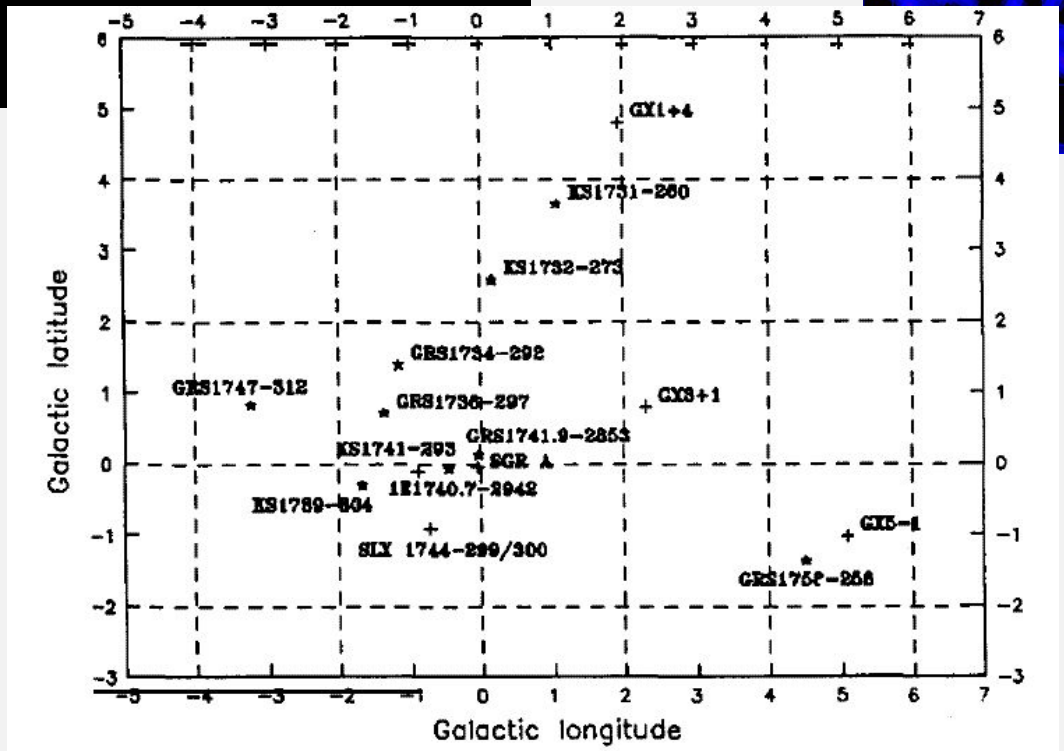
Молодые

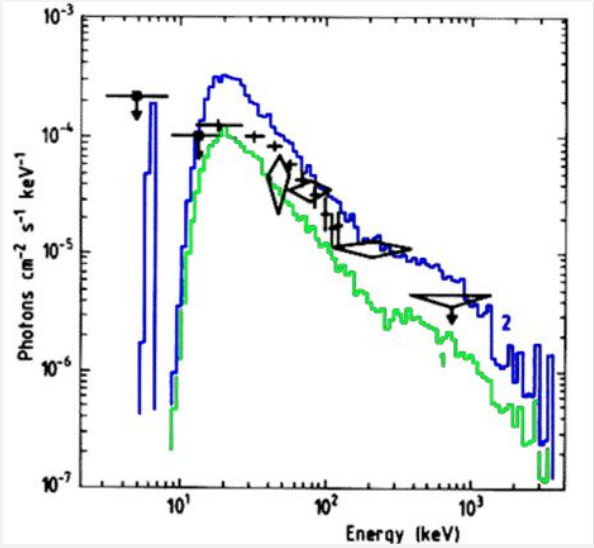
Спиральные рукава

Орбитальные обсерватории ИКИ РАН (1987-2001)



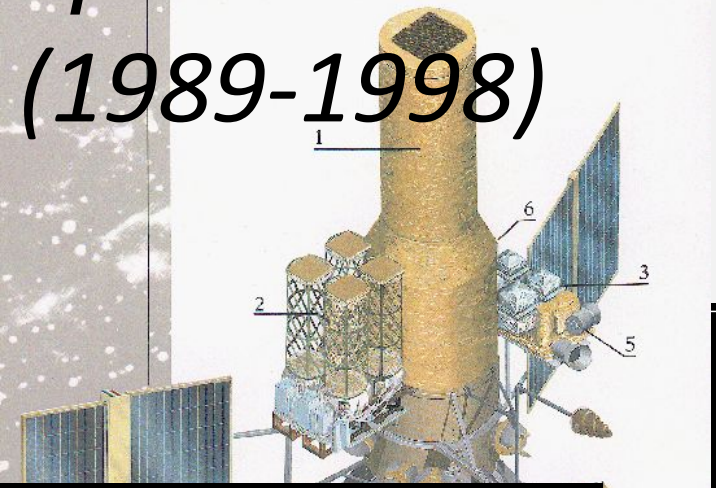


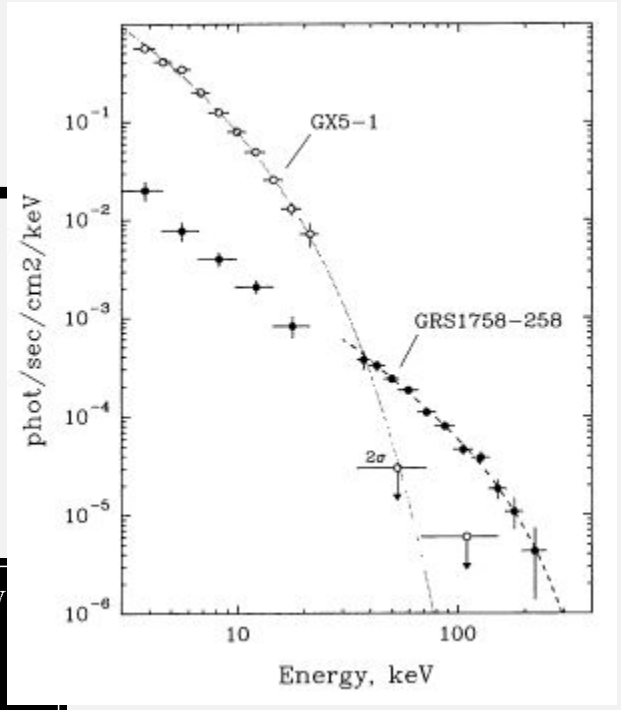


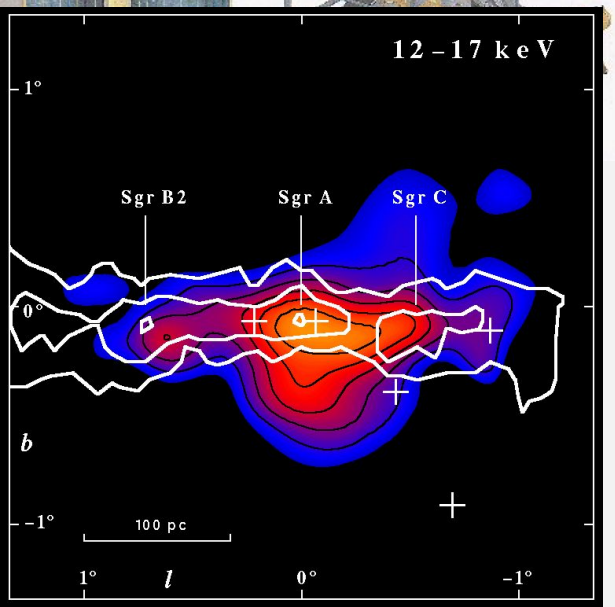


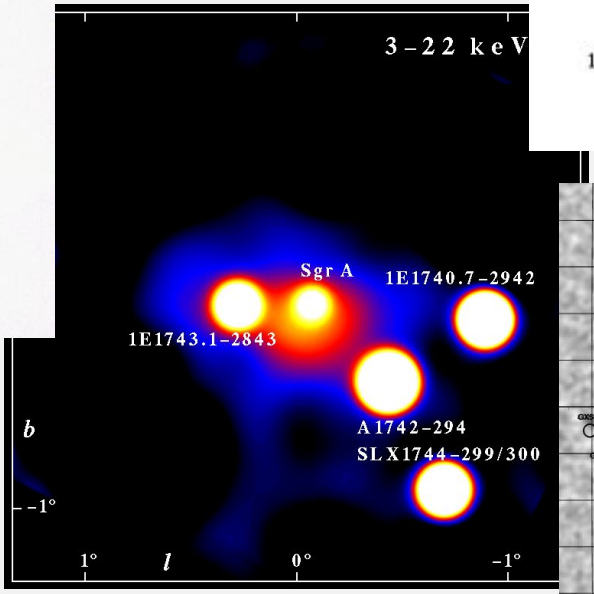
Орбитальные обсерватории с участием ИКИ РАН

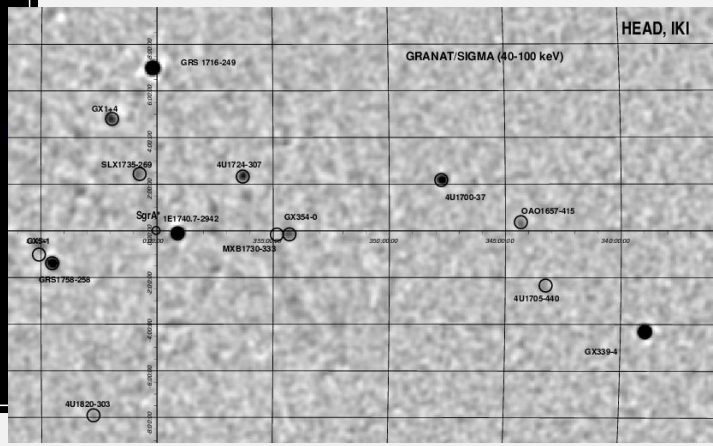
Гранат (1989-1998)



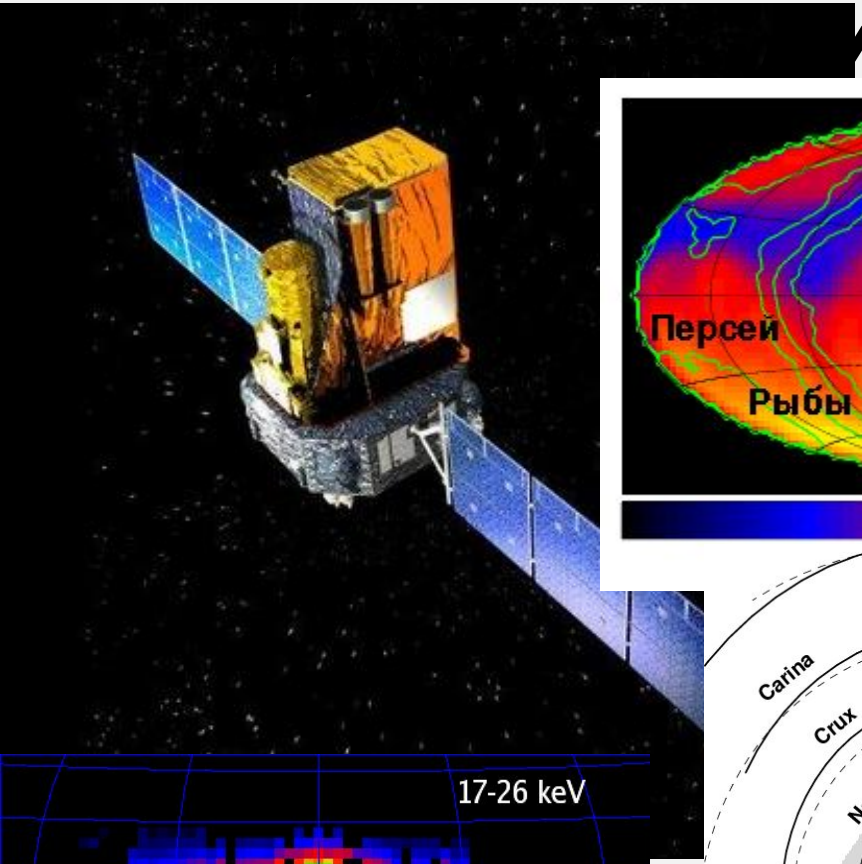


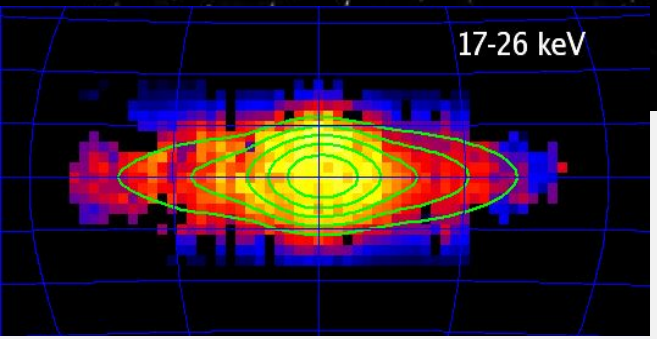




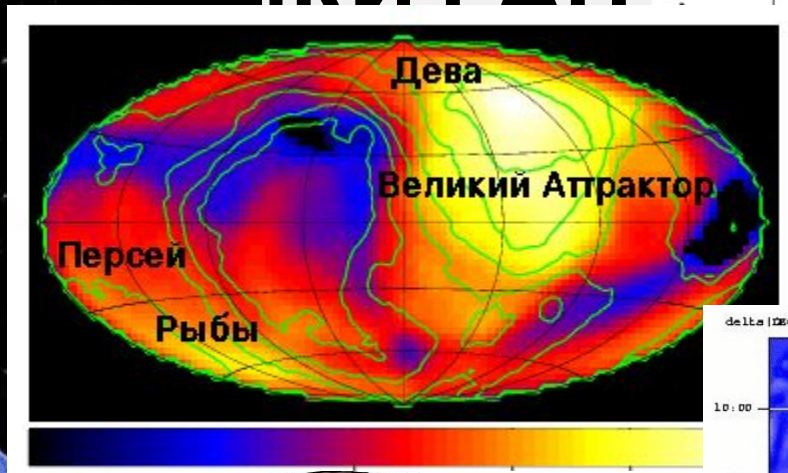


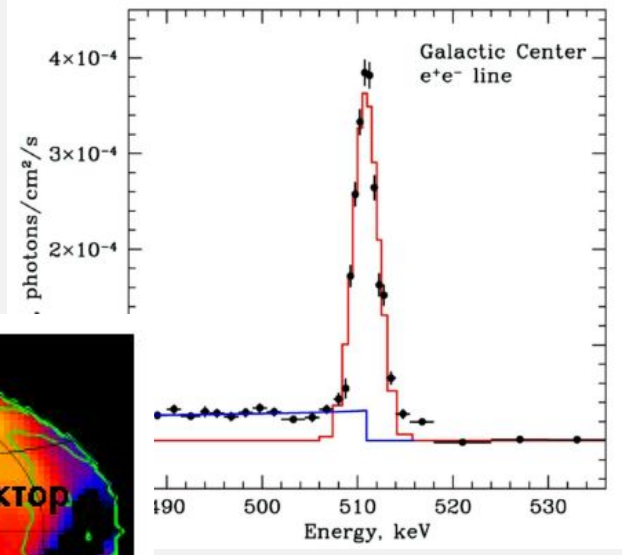
Орбитальные обсерватории ики РАН

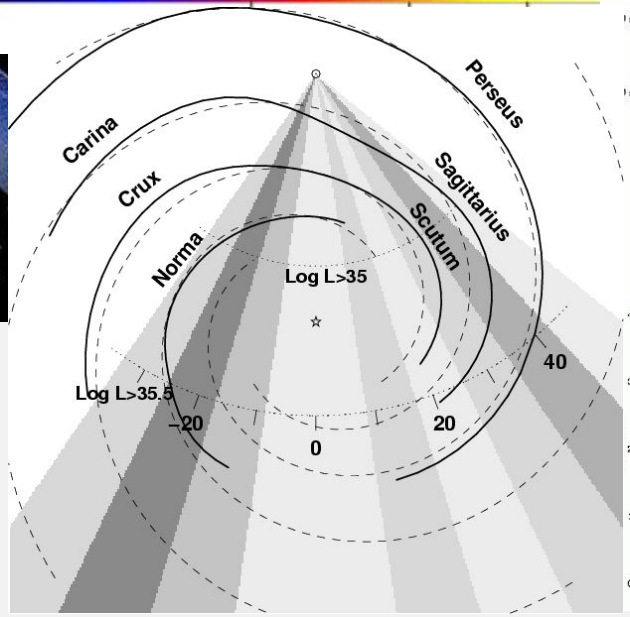


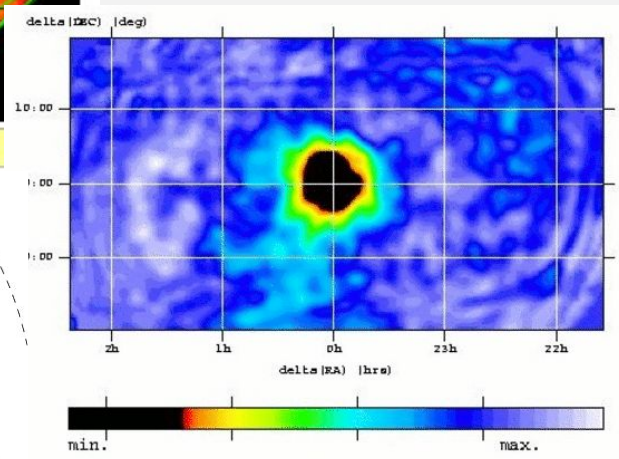


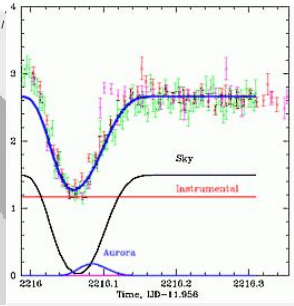
ИНТЕГРАЛ

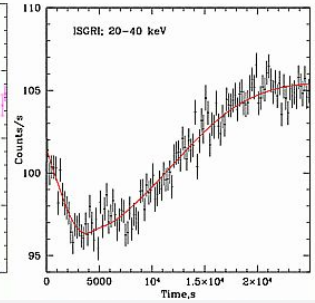




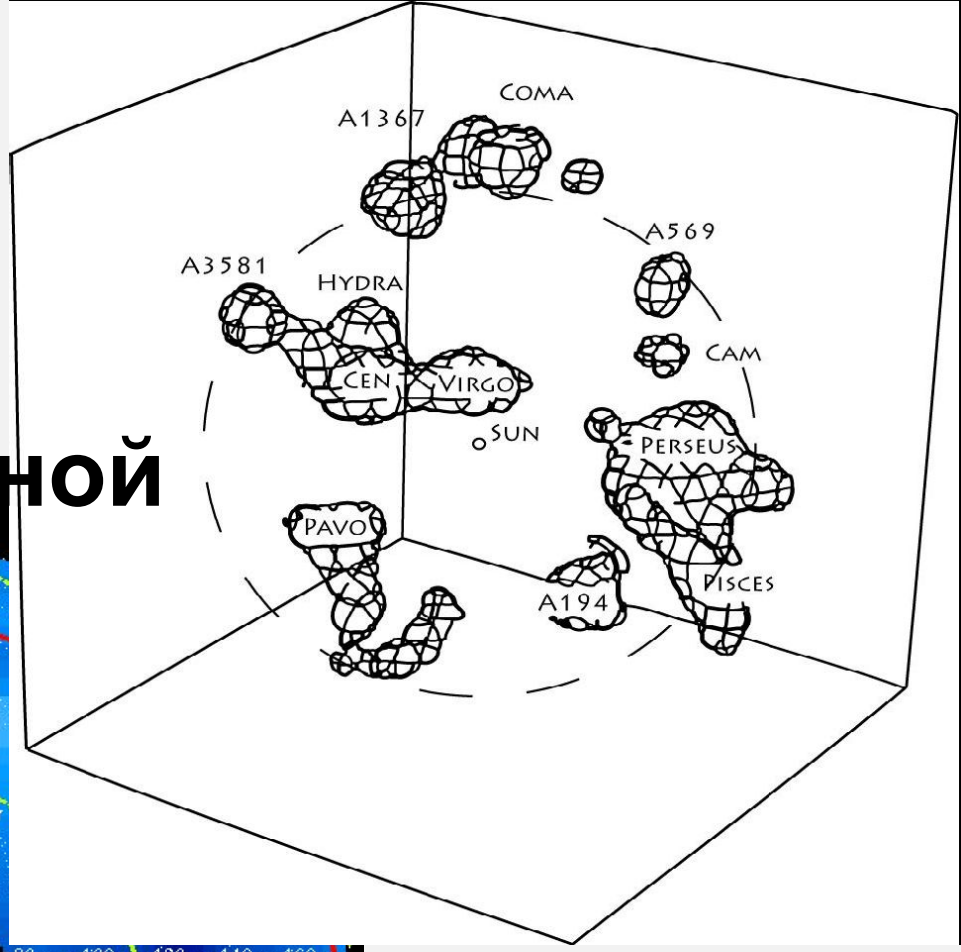


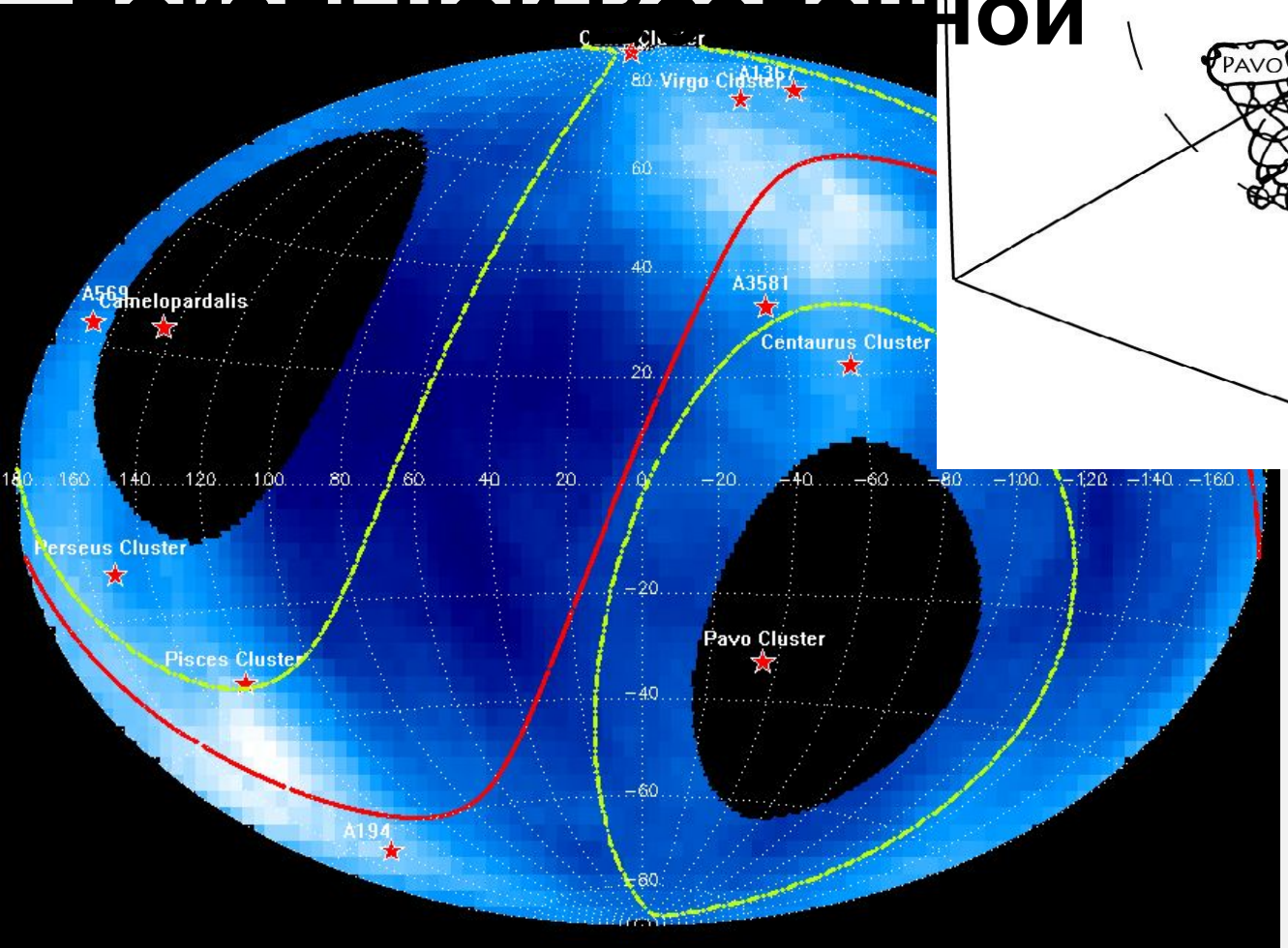


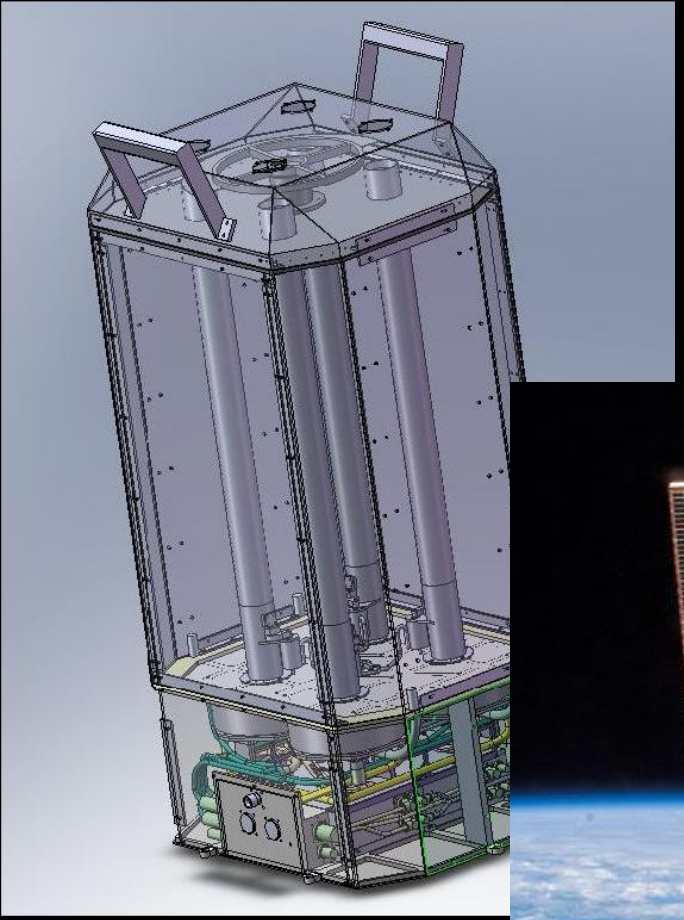




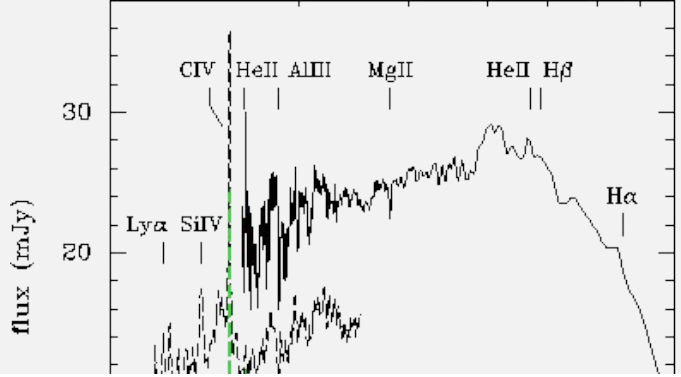
Измерение излучательной способности

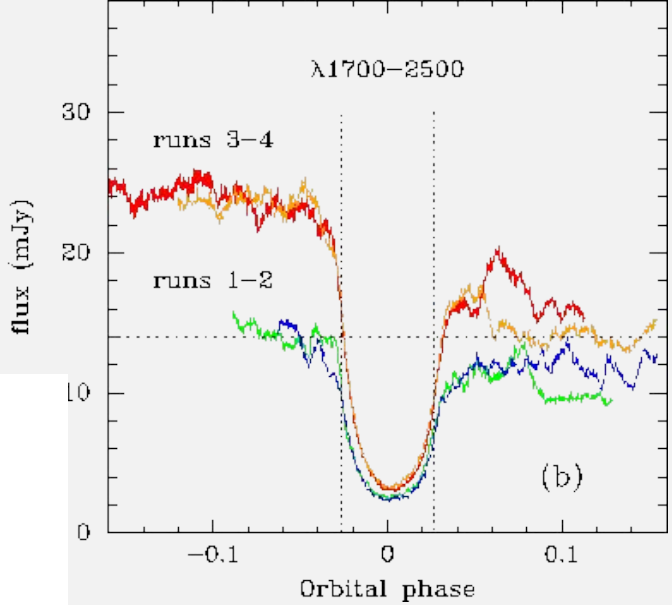


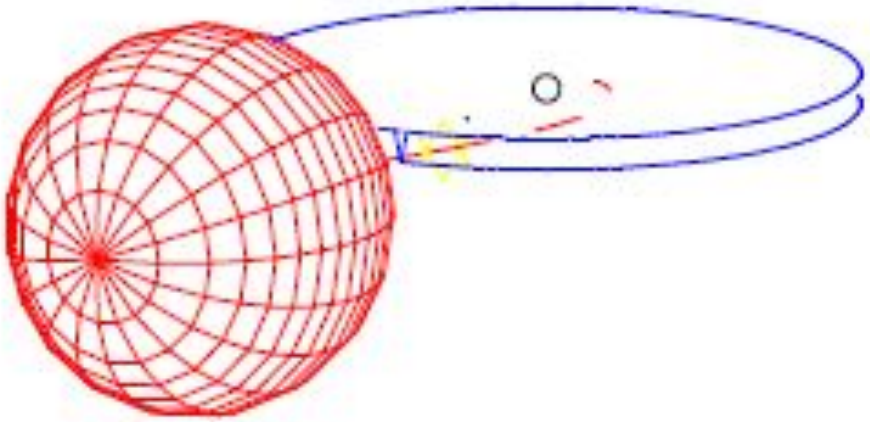


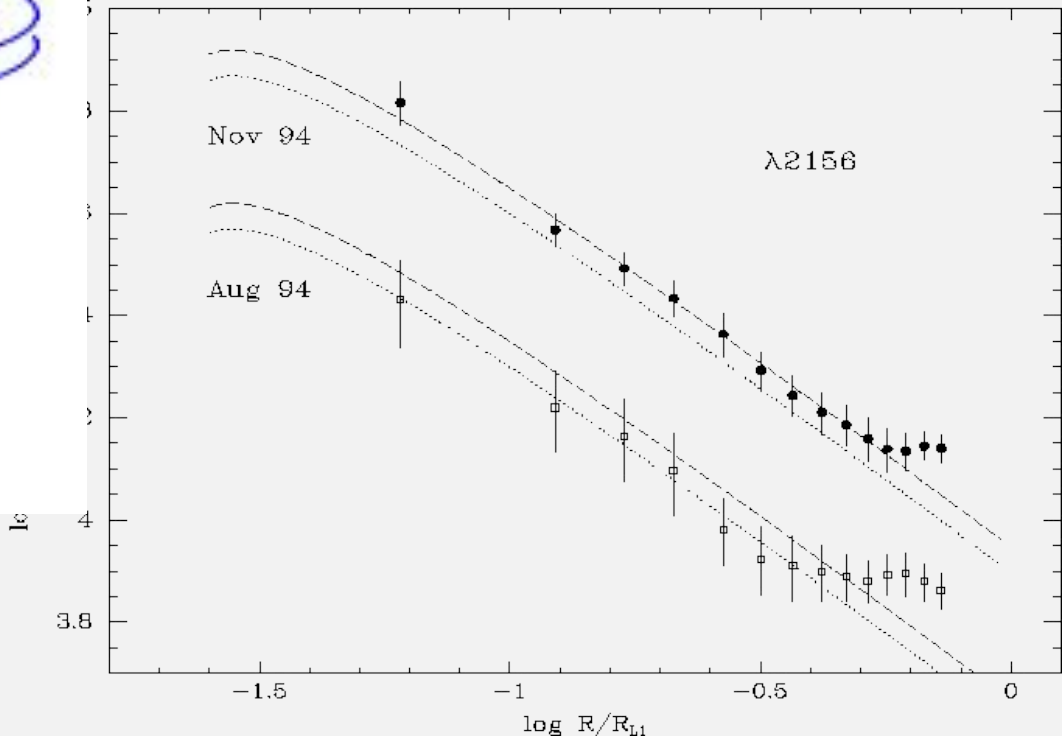


Монитор Всего Неба (МВН) на МКС (2012?)

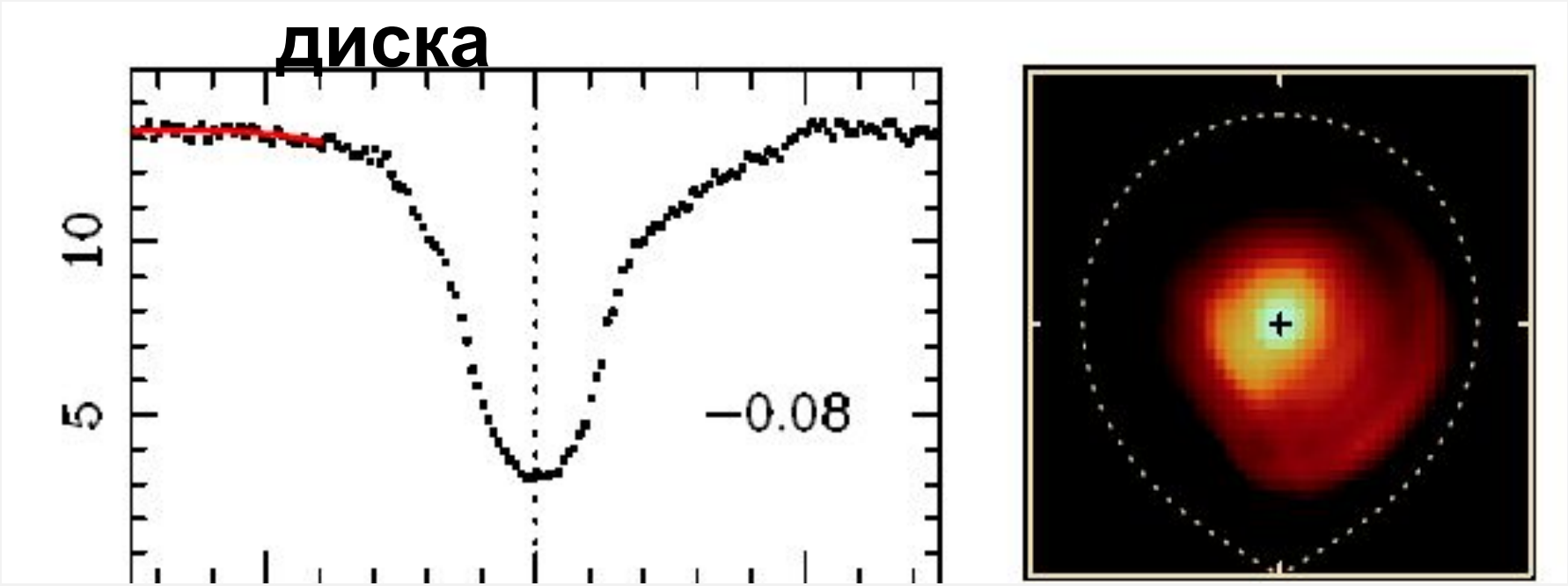

CIV
HeII
AlIII
MgII
HeII
Hβ
Hα
Lyα
SiIV
30
20
flux (mJy)

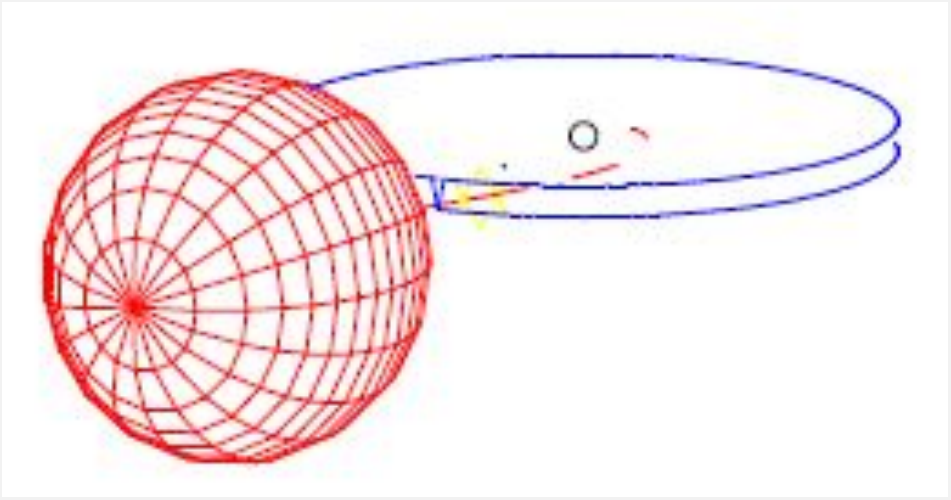

λ1700−2500
runs 3−4
runs 1−2
(b)
30
20
10
0
flux (mJy)
−0.1
0
0.1
Orbital phase



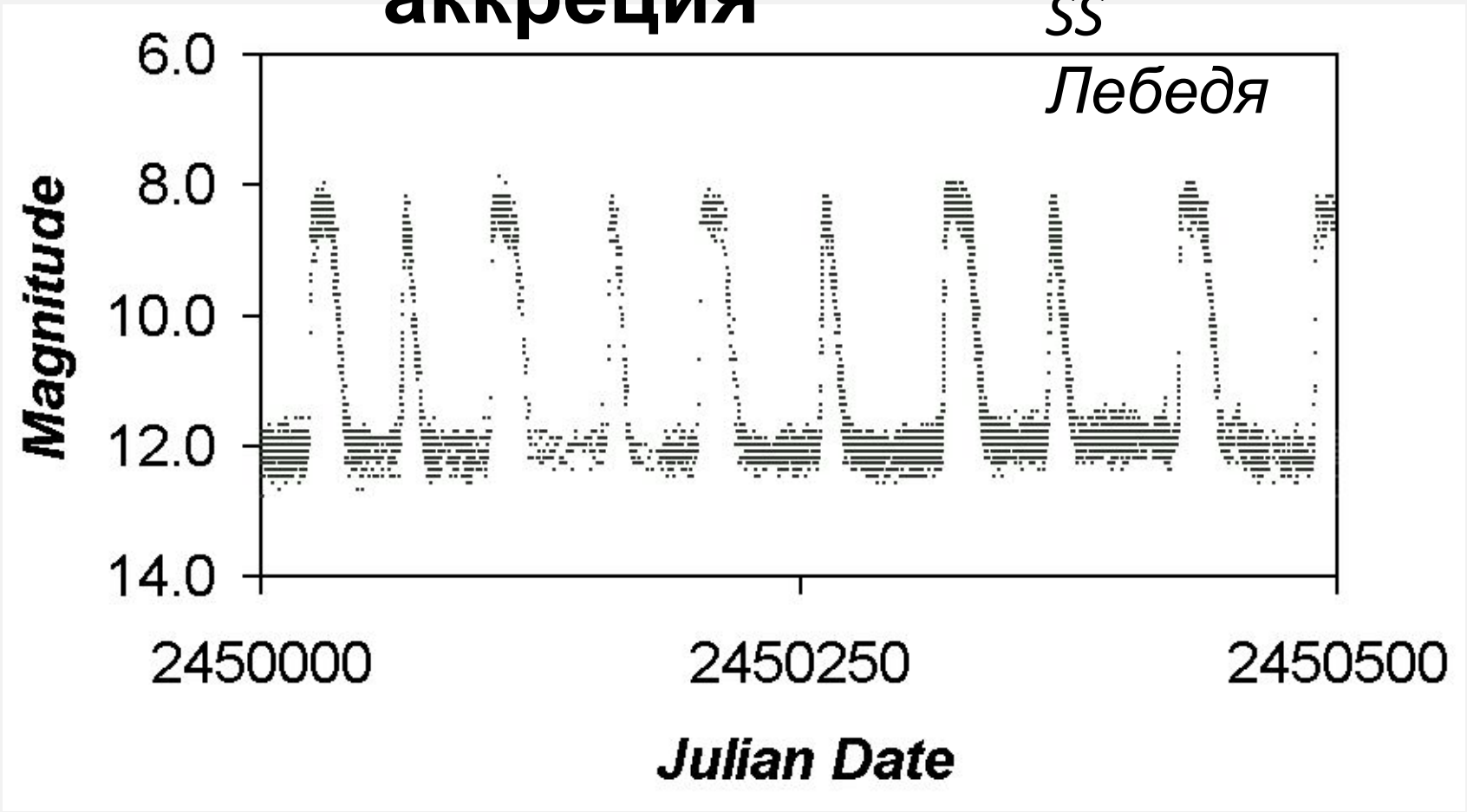

Nov 94
Aug 94
λ2156
4
3.8
−1.5
−1
−0.5
0
log R/R$_{L1}$

Картографирование аккр. диска



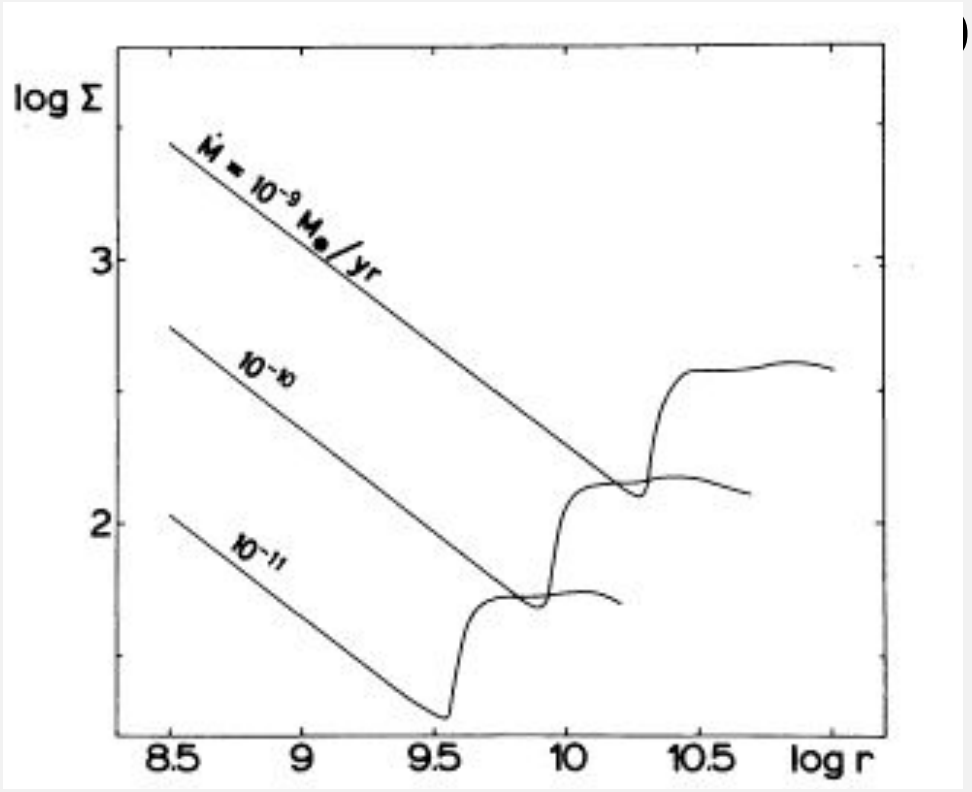


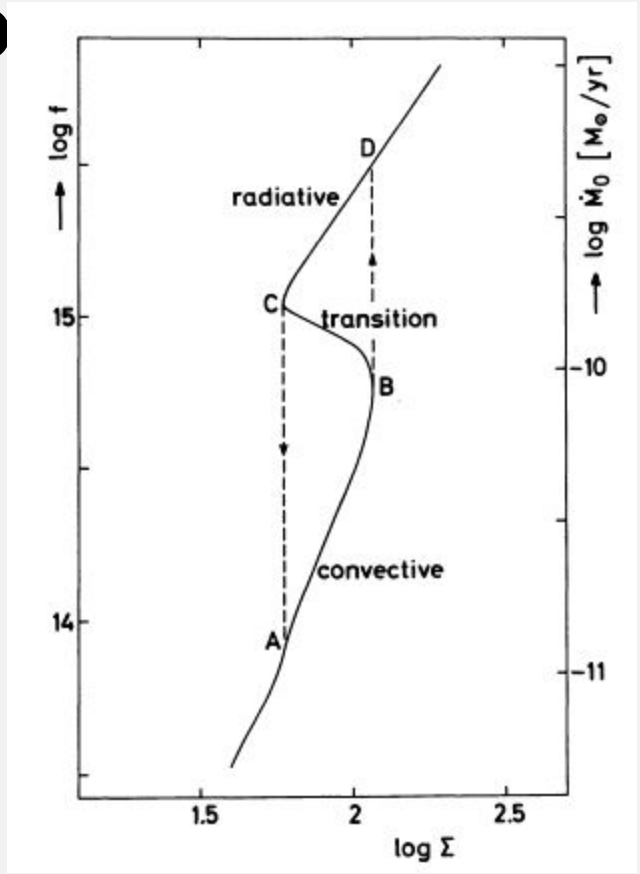
Вспышечная аккреция



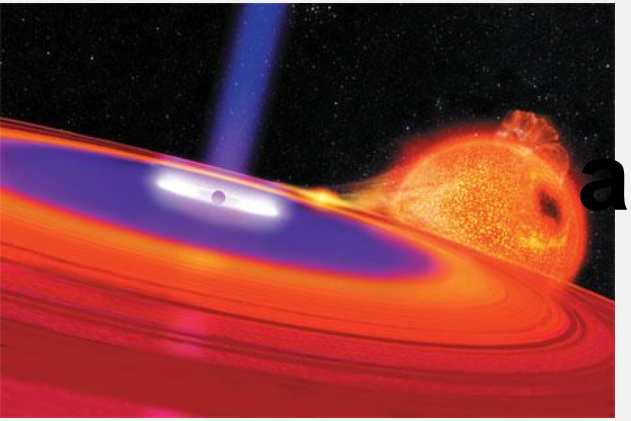
“неустойчивости карликовых Новых”

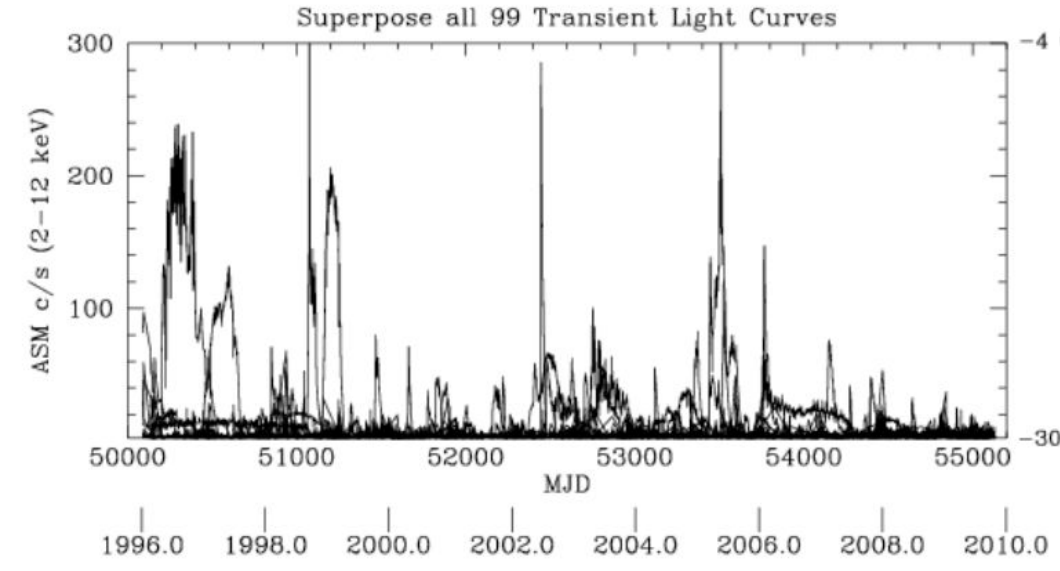
Две ветви состояния аккреционного диска - влияние ионизации

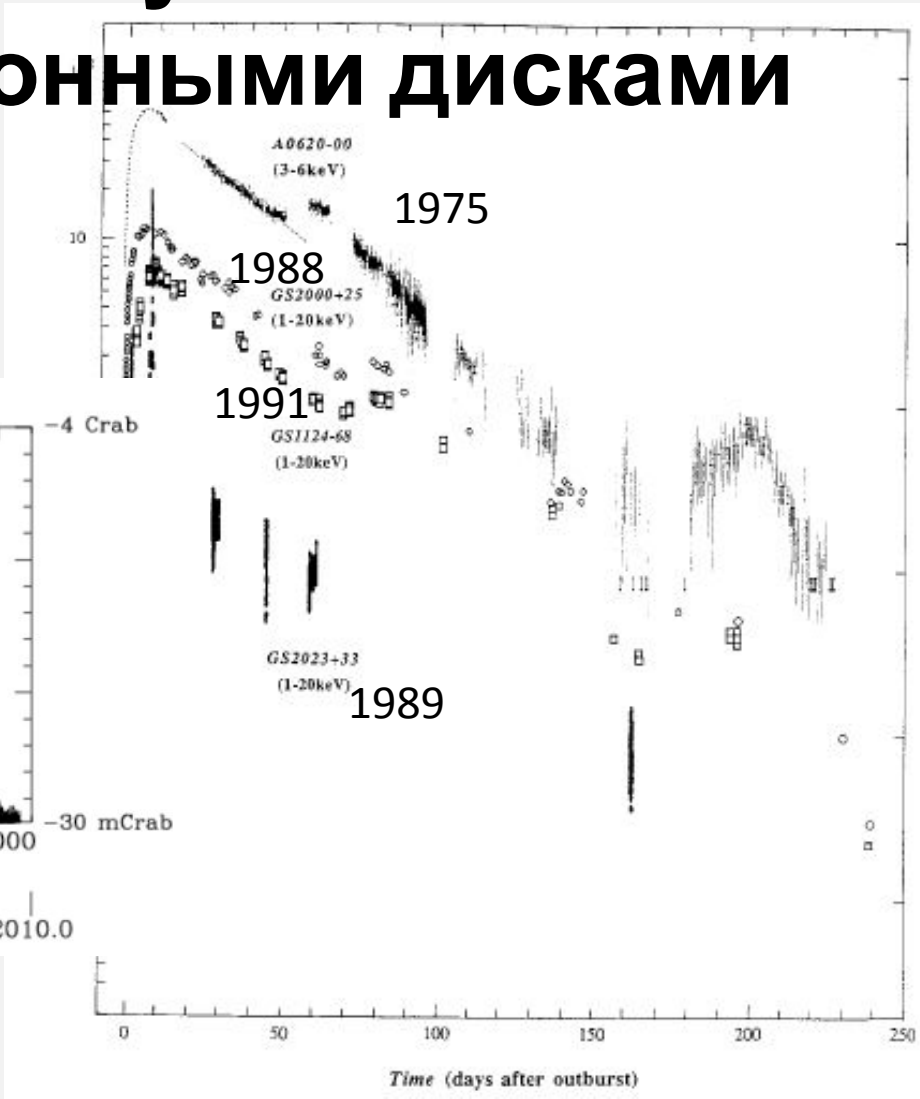




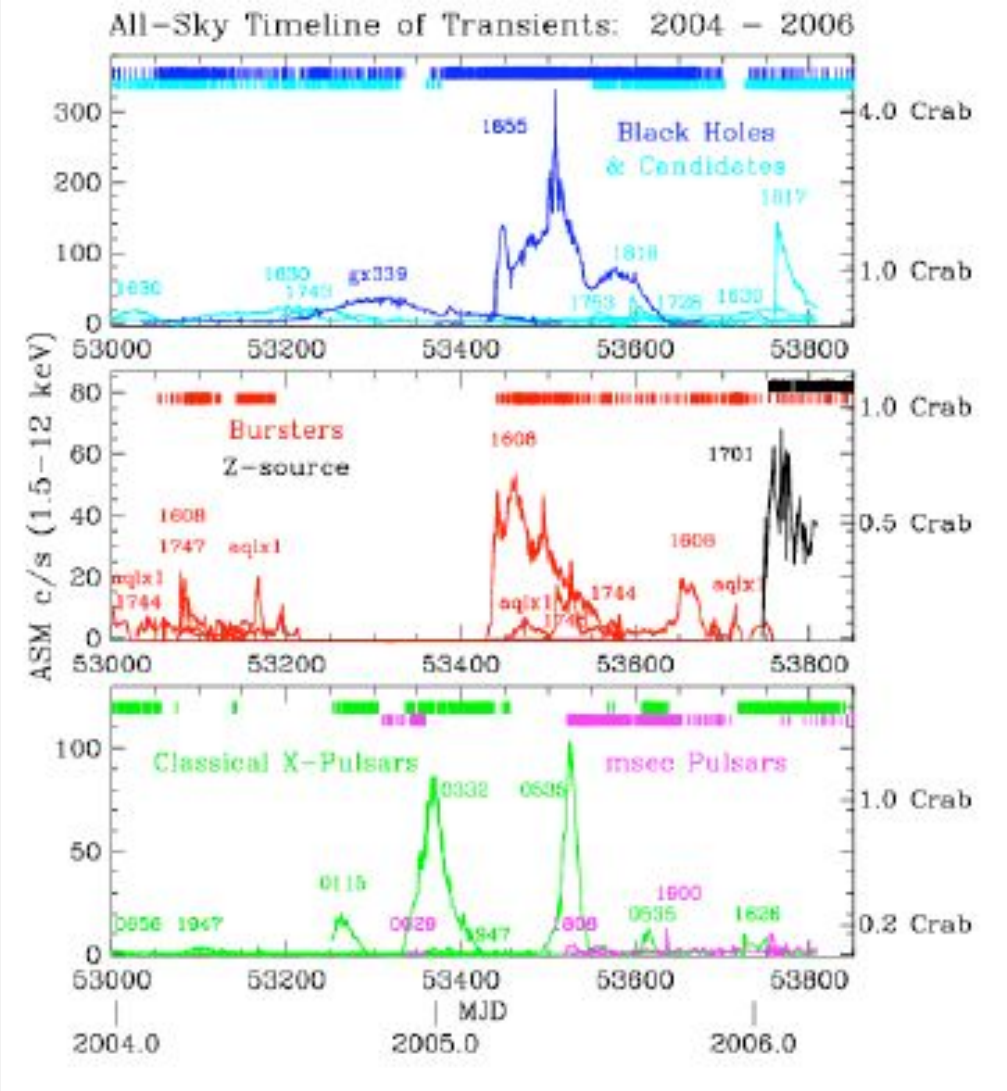
Рентгеновские Новые – двойные системы с ЧД или НЗ с неустойчивыми аккреционными дисками





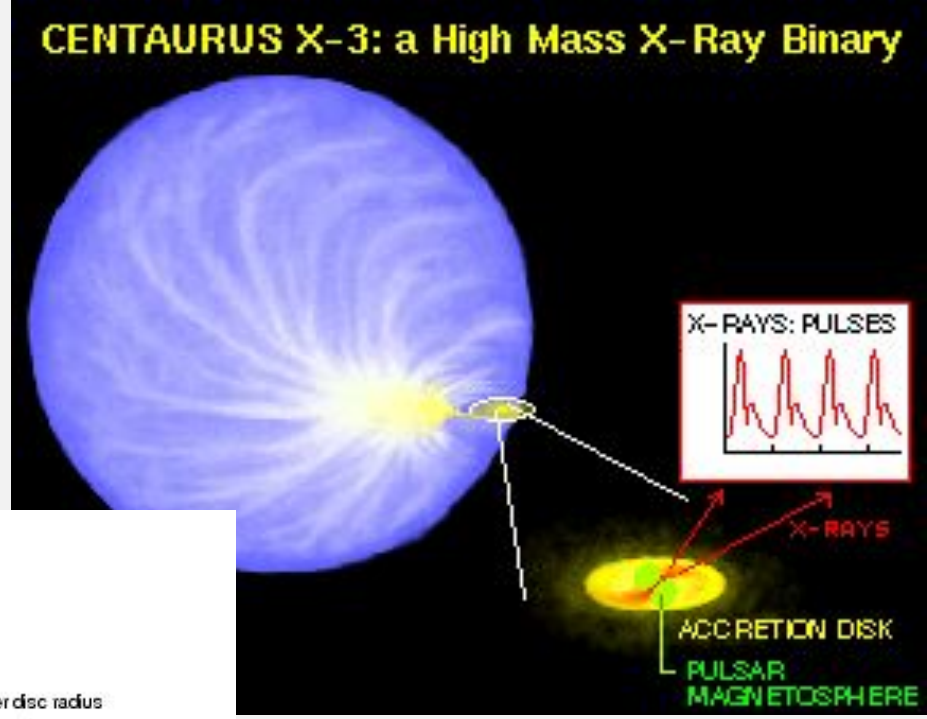


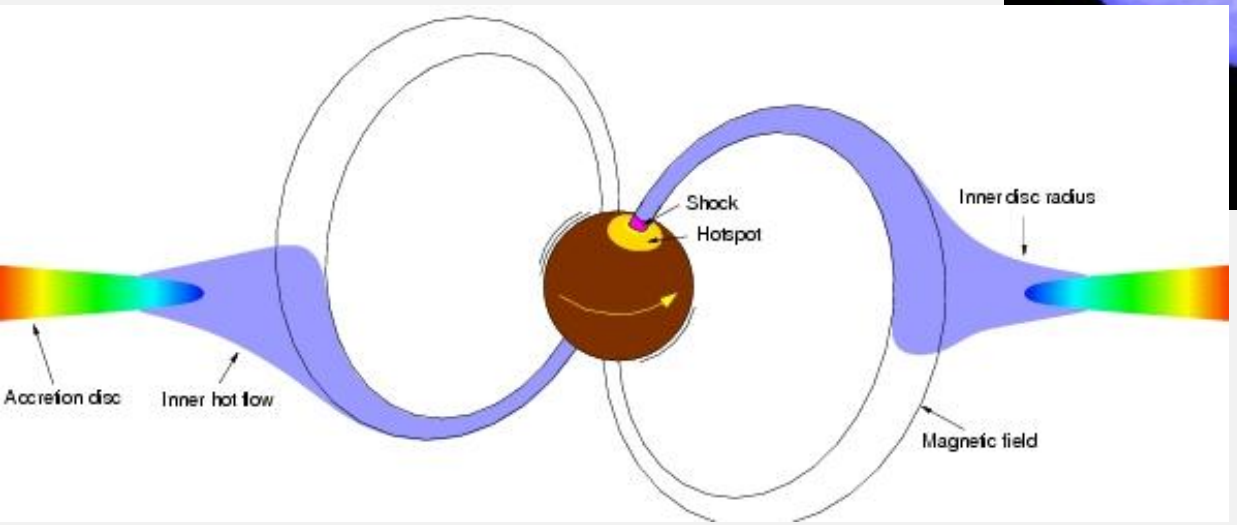
Рентгеновские Новые – двойные системы с ЧД или НЗ с неустойчивыми исками

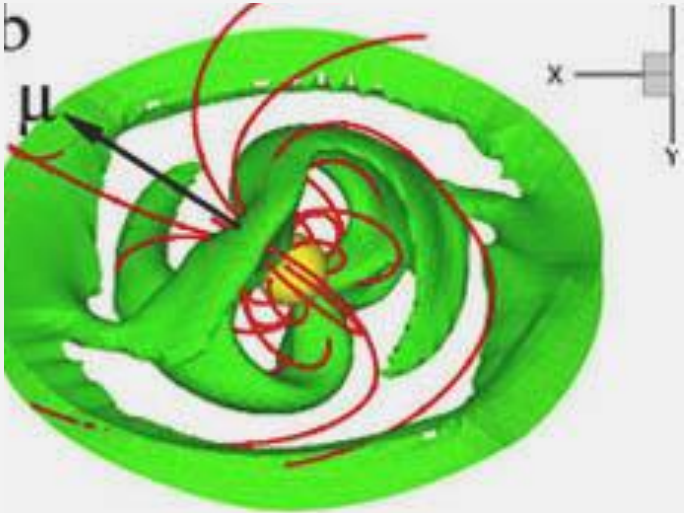


Небо в 2004-2007 по результатам наблюдений монитора всего неба обсерваториии RXTE

Аккреция на замагниченные компактные объекты







Магнитные поля ~10^{12}-10^{15} Гаусс

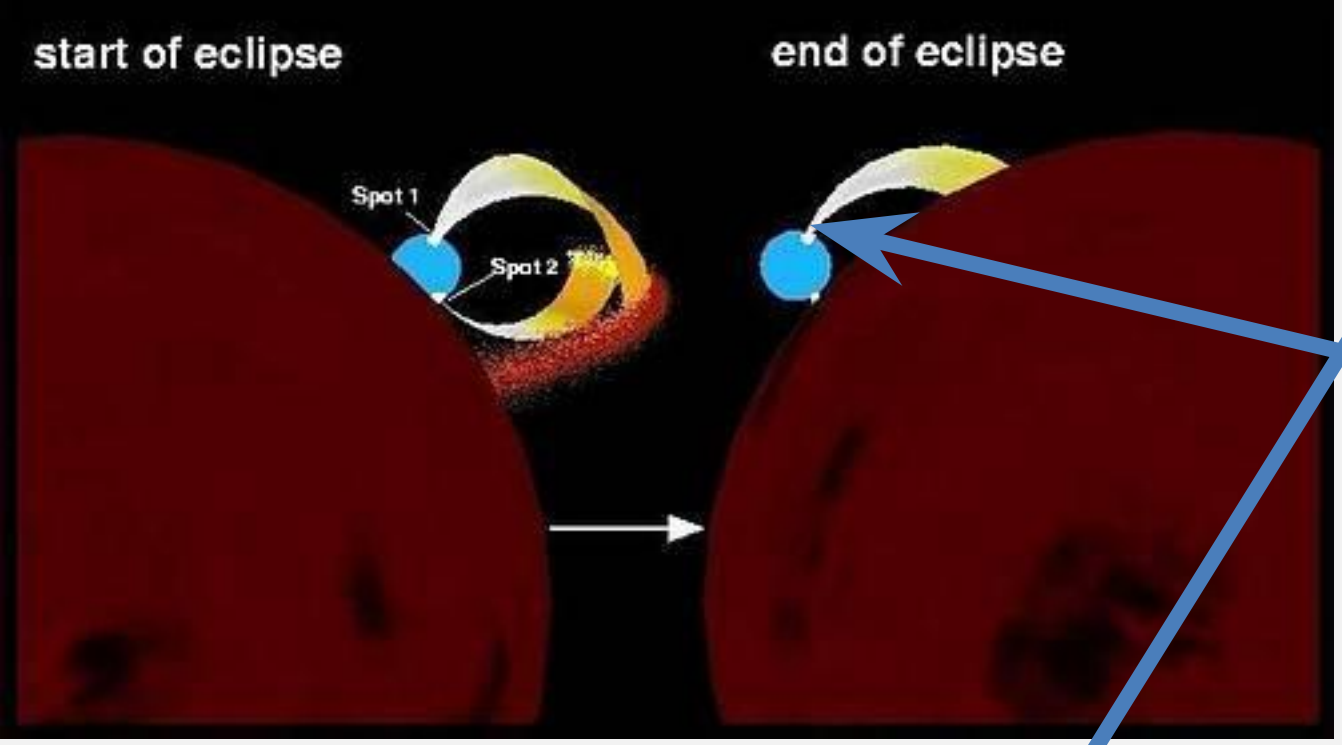
Температура плазмы ~10-100x10^{6} К

Осцилляции фотонных пузырей

Диапазон частот - ~кГц

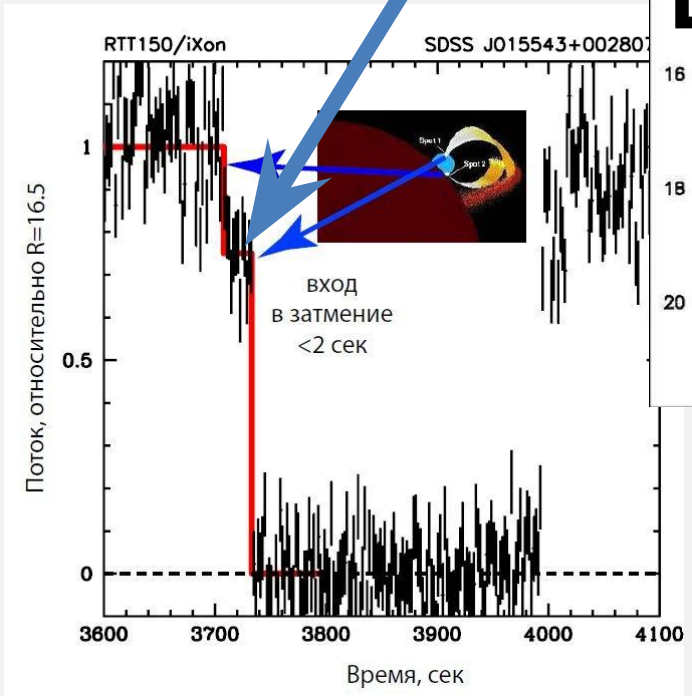
(а) вещество со звезды компаньона формирует аккреционный поток
(б) аккреция на нейтронную звезду с мощной магнитосферой
(с) аккреционная колонка со всплывающими фотонными пузырями, дающими быстрые осцилляции яркости рентгеновской светимости

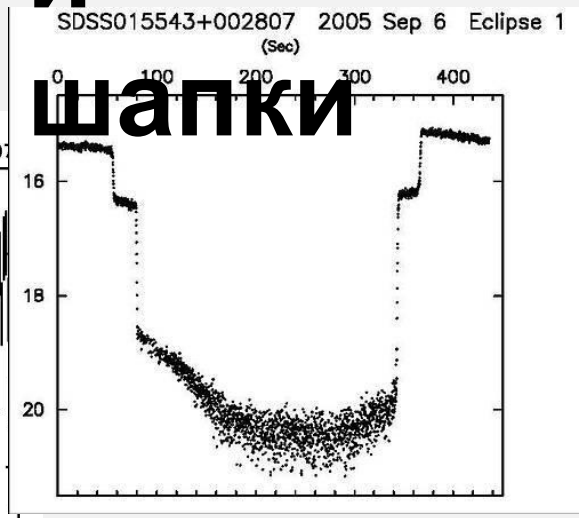
Затмения в катаклизмических переменных (аккрецирующих БК)



Структура полярной шапки

Телескоп РТТ150





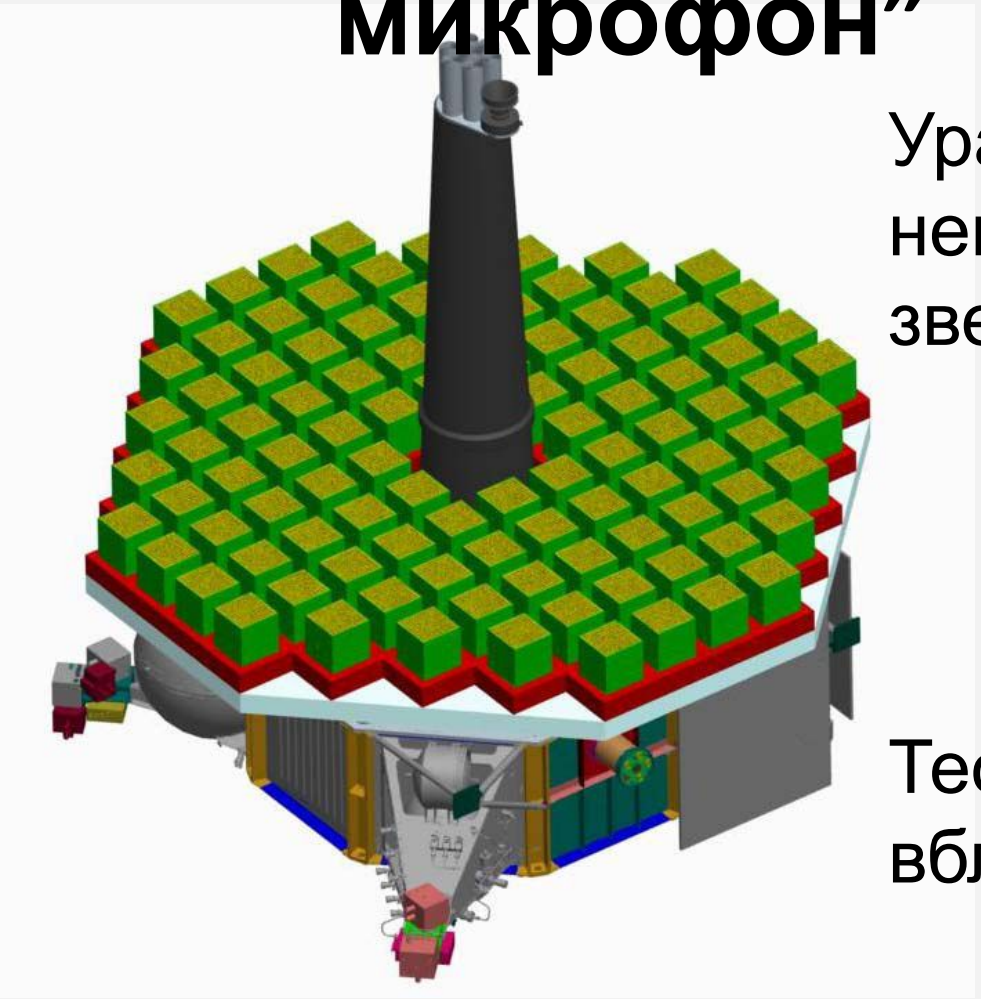
Ближайший большой проект

Спектр-Рентген-Гамма (СРГ)

Обзор неба с рекордной чувствительностью – десятки скоплений галактик, миллионы АЯГ

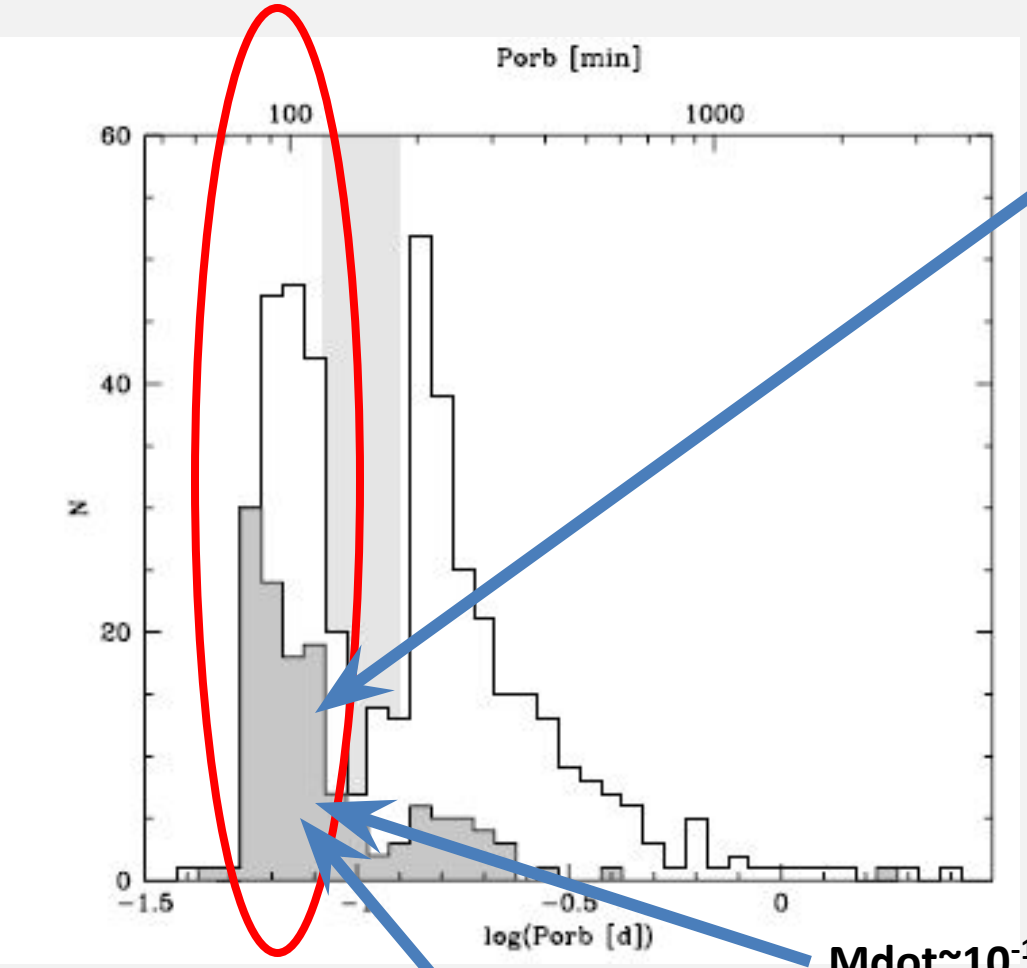
Темная энергия, эволюция ЧД, их влияние на галактики, перепись населения нашей Галактики

“Рентгеновский микрофон”



Уравнение состояния нейтронных/кварковых звезд

Теория относительности вблизи горизонта событий

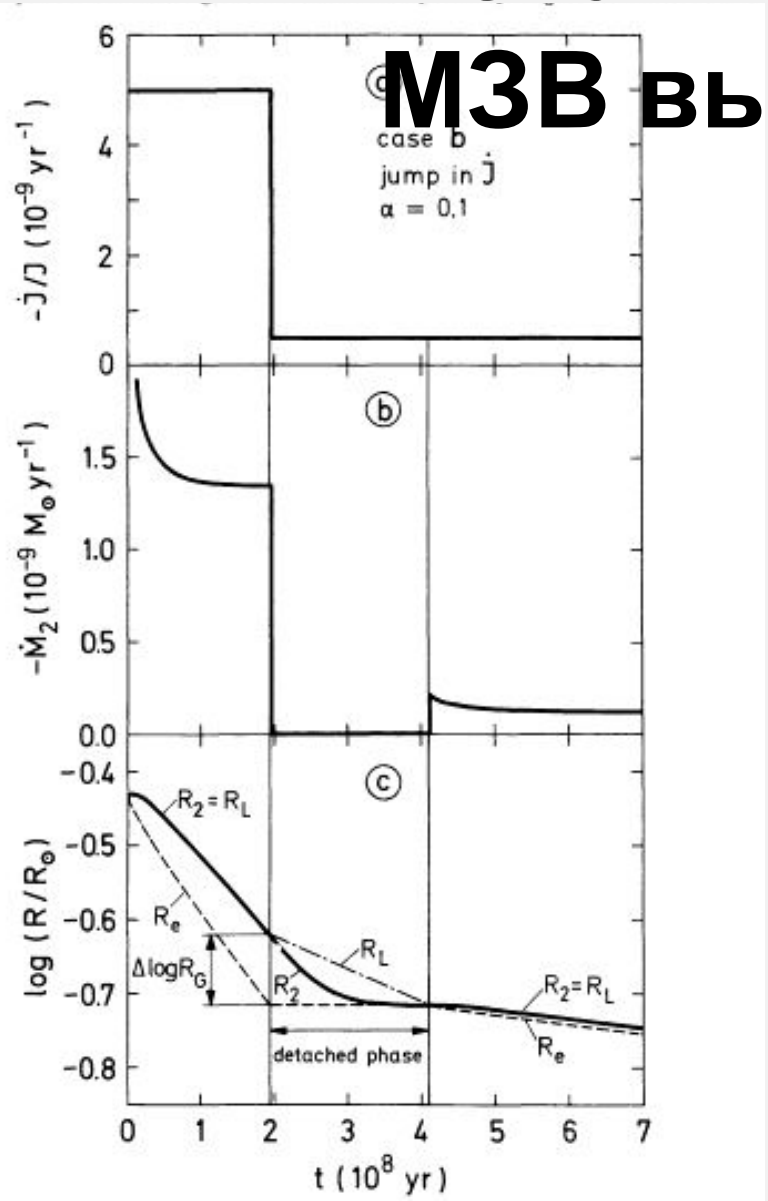


Слабые системы систематическ и пропускаются в простых обзорах

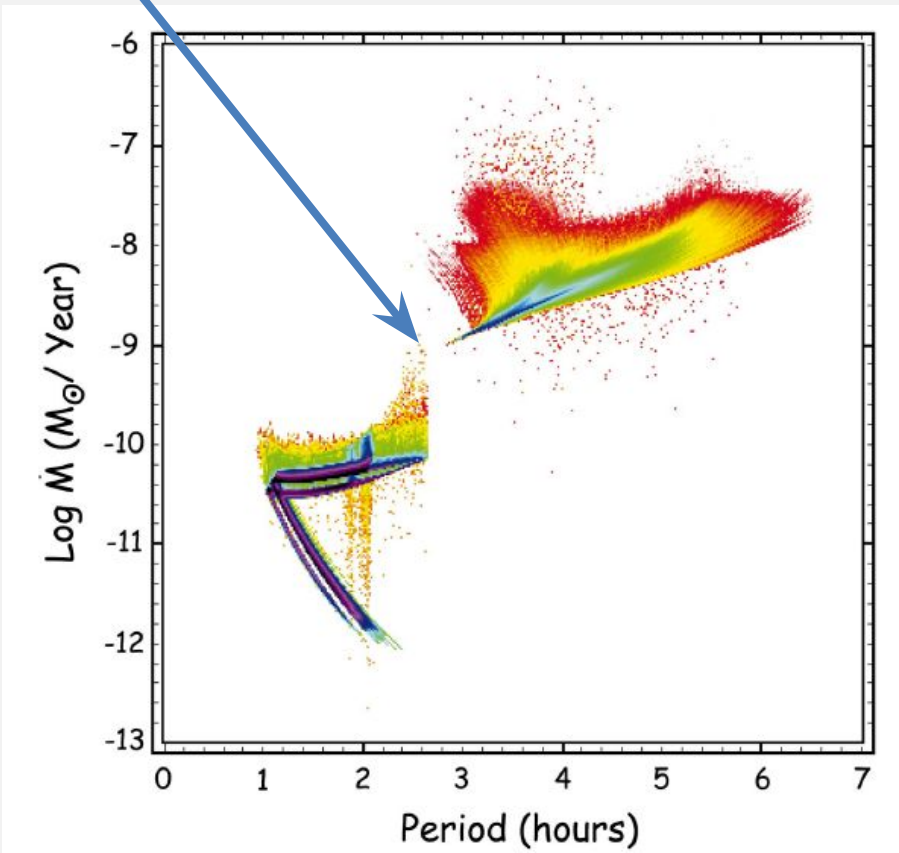
Mdot~10^{-11} Msun/год

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

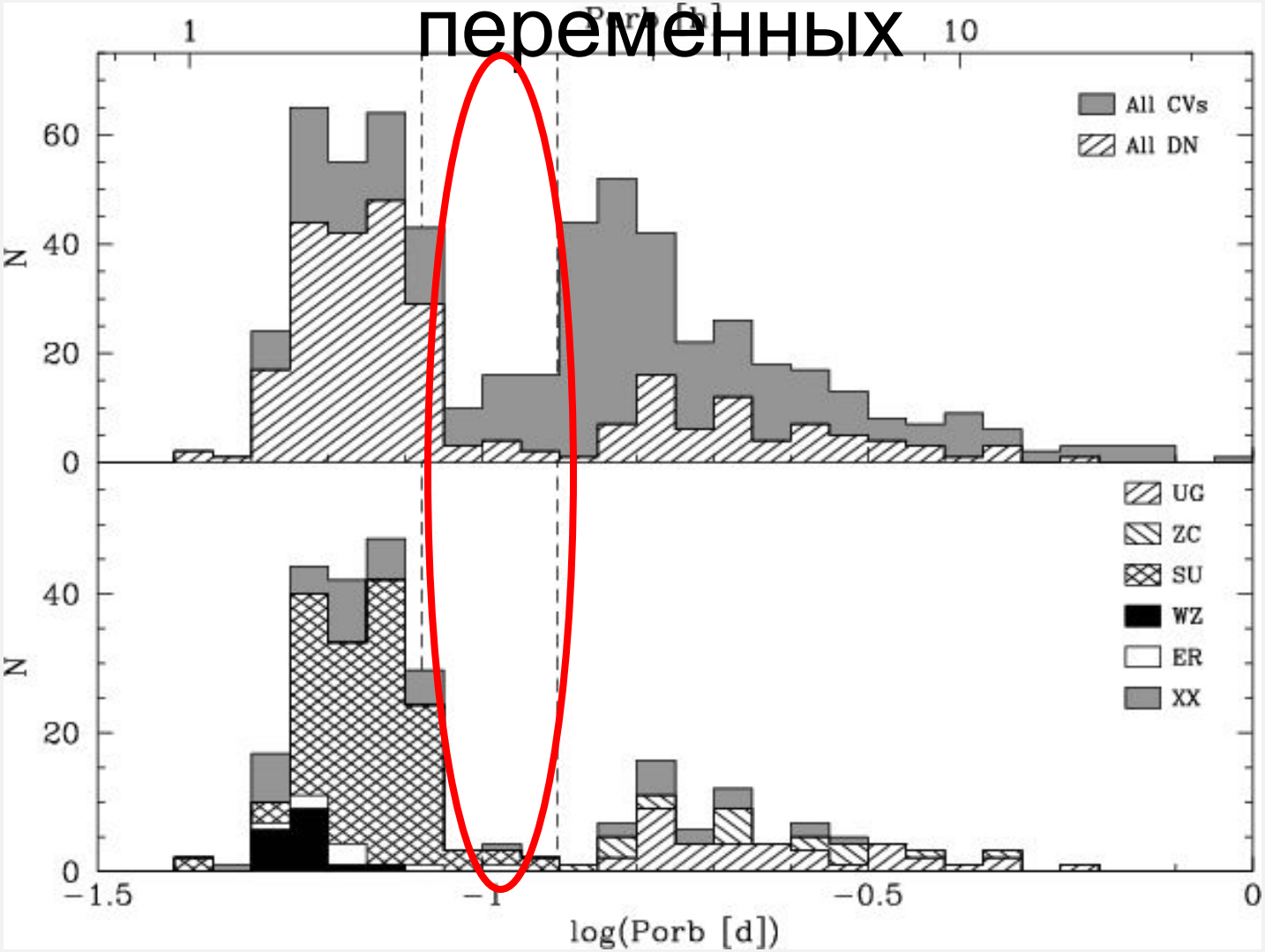
При массе <0.3Msun механизм МЗВ выключается



Переход между Механизмами МЗВ и ГВ



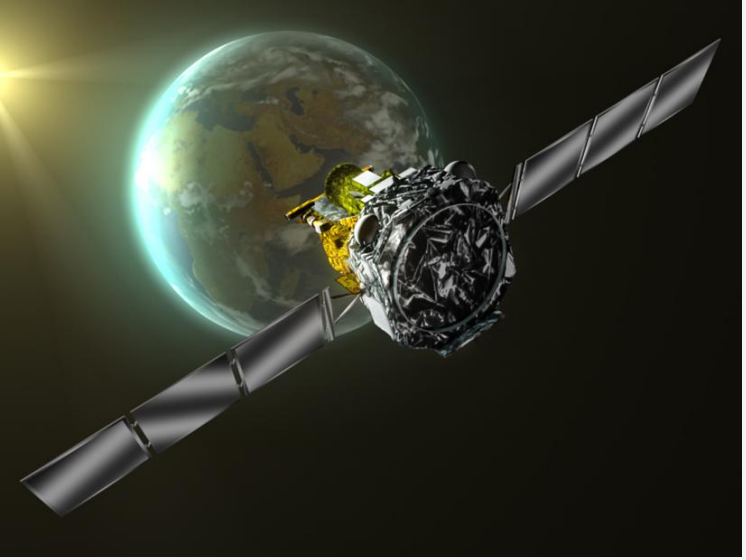
Провал в периодах катаклизмических переменных



Временной масштаб эволюции системы за счет магнитного ветра

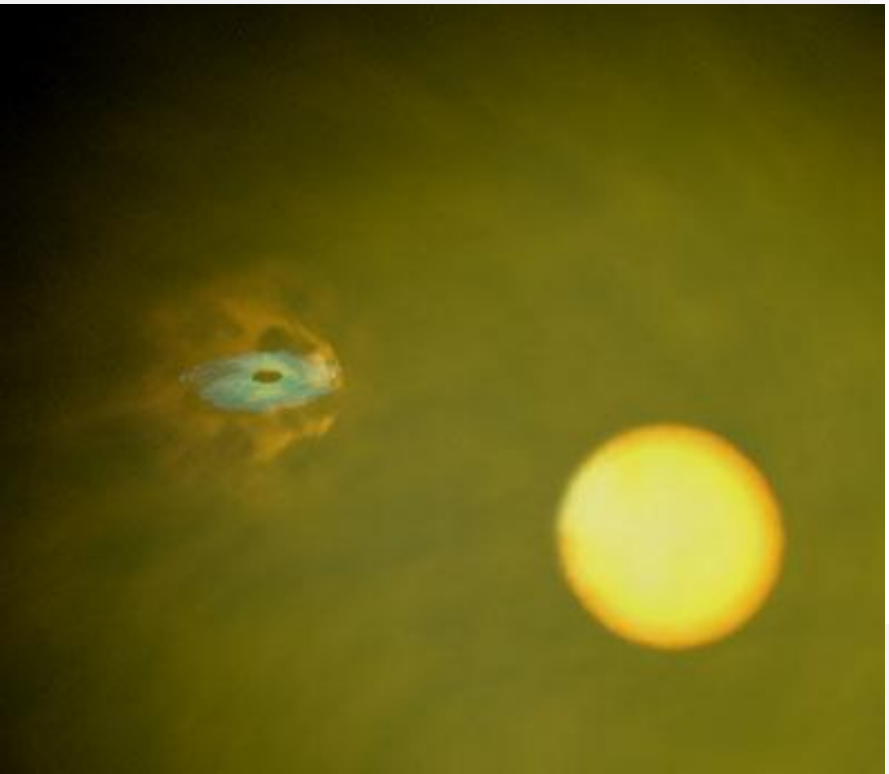
$$\frac{d \ln L_{orb}}{dt} = -\frac{R_2^4}{M_1}\frac{GM^2}{a^5}$$

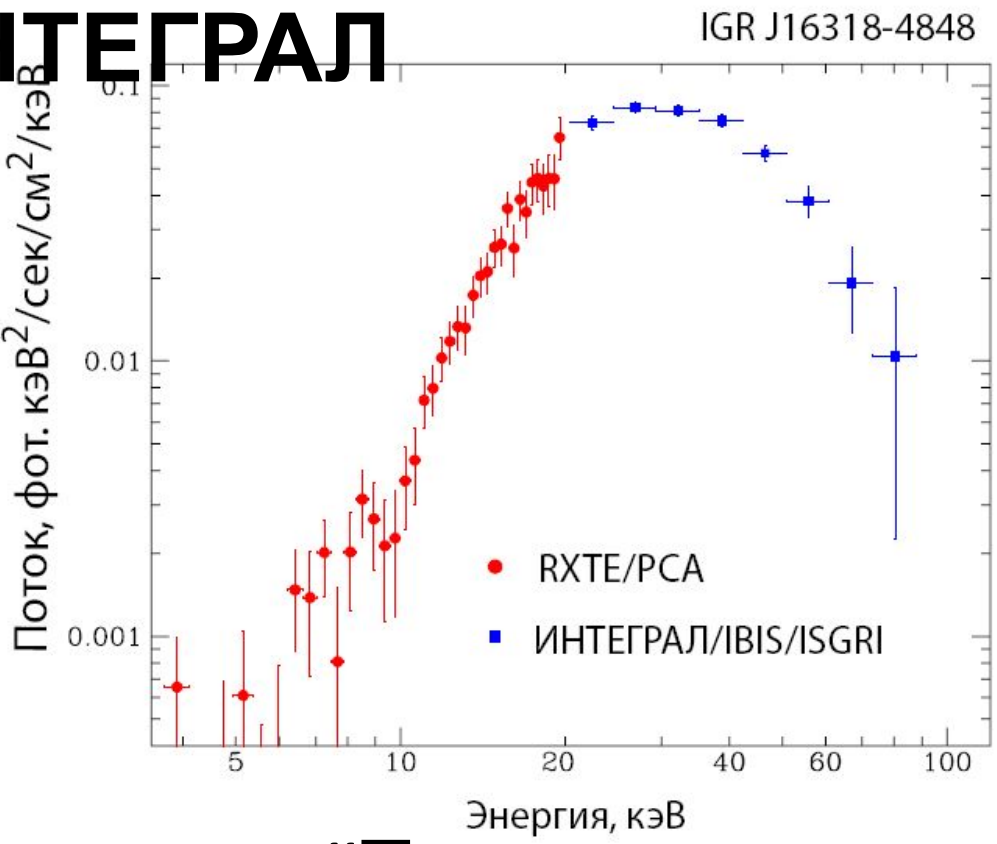
$$\tau(MSW) = \left(\frac{d \ln L_{orb}}{dt}\right)^{-1} = 1.5\times10^6 \left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-2}\left(\frac{a}{R_\odot}\right)^5\left(\frac{R_2}{R_\odot}\right)^{-4}$$



Из последних интересных открытий

Обсерватория ИНТЕГРАЛ





“Поглощенные” источники