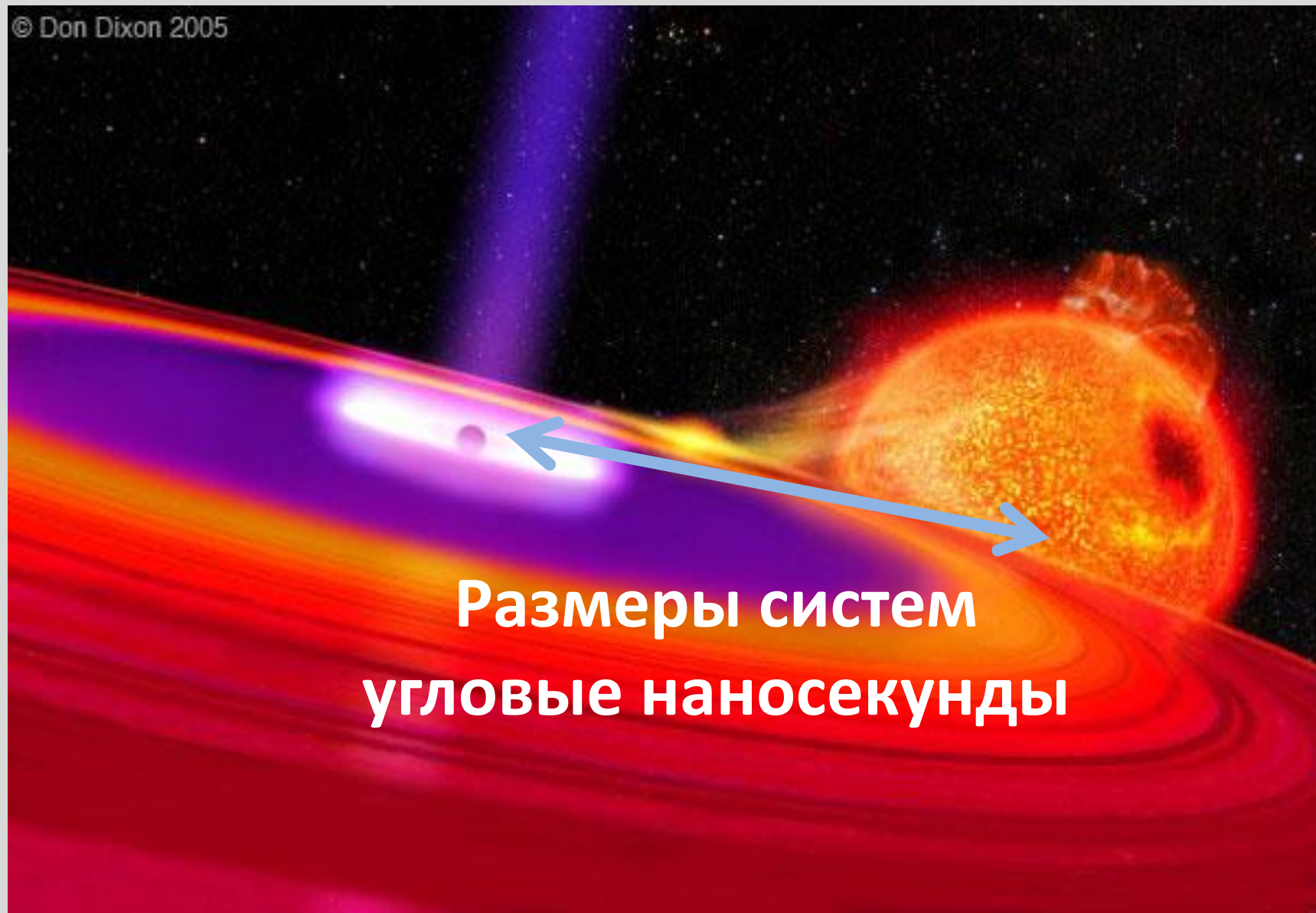


**Временная переменность как инструмент
исследования физических процессов
вблизи компактных объектов**

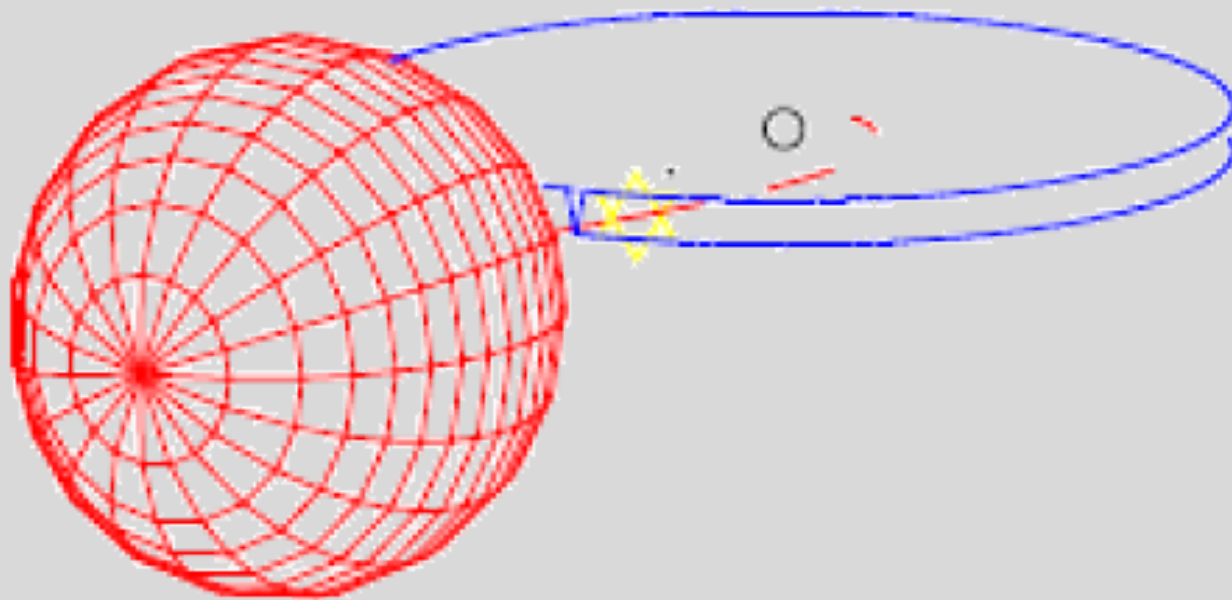
Лекция 3

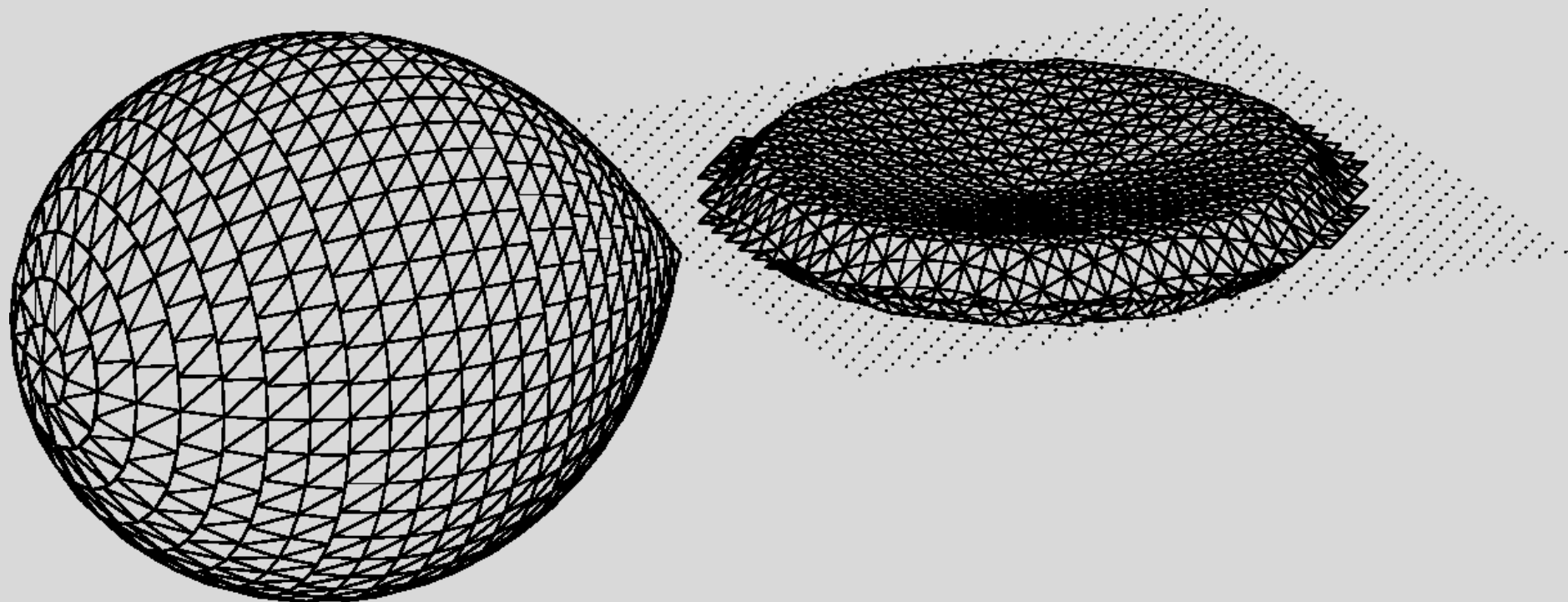
© Don Dixon 2005

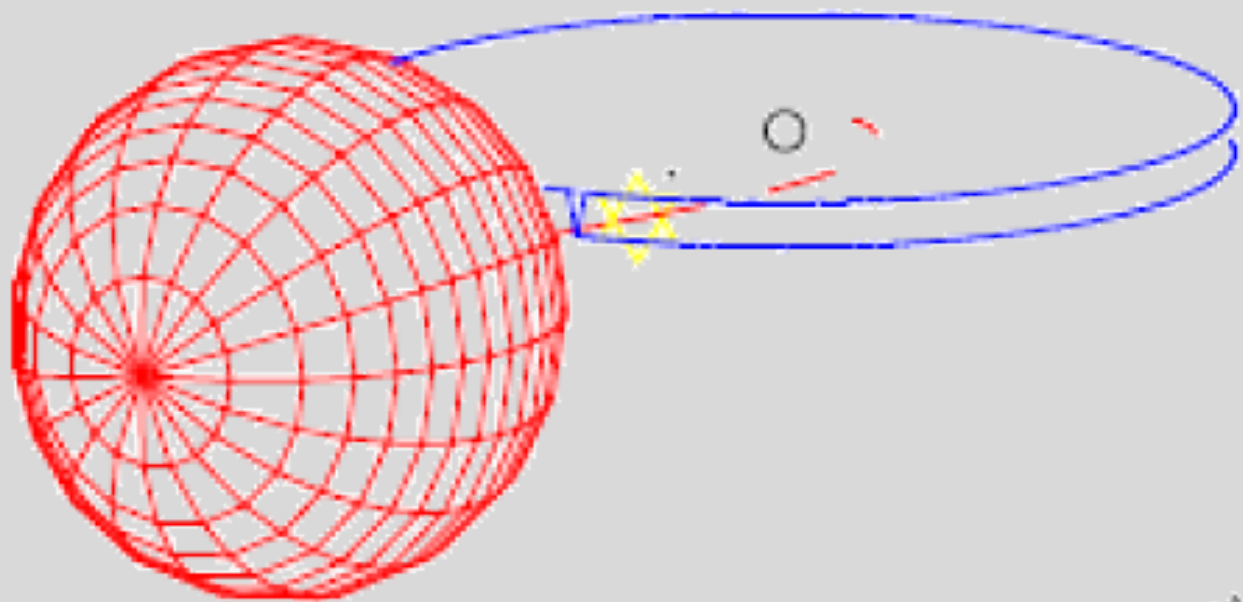


**Размеры систем
угловые наносекунды**

Периодические процессы: затмения







Затмения:

БК

горячее пятно

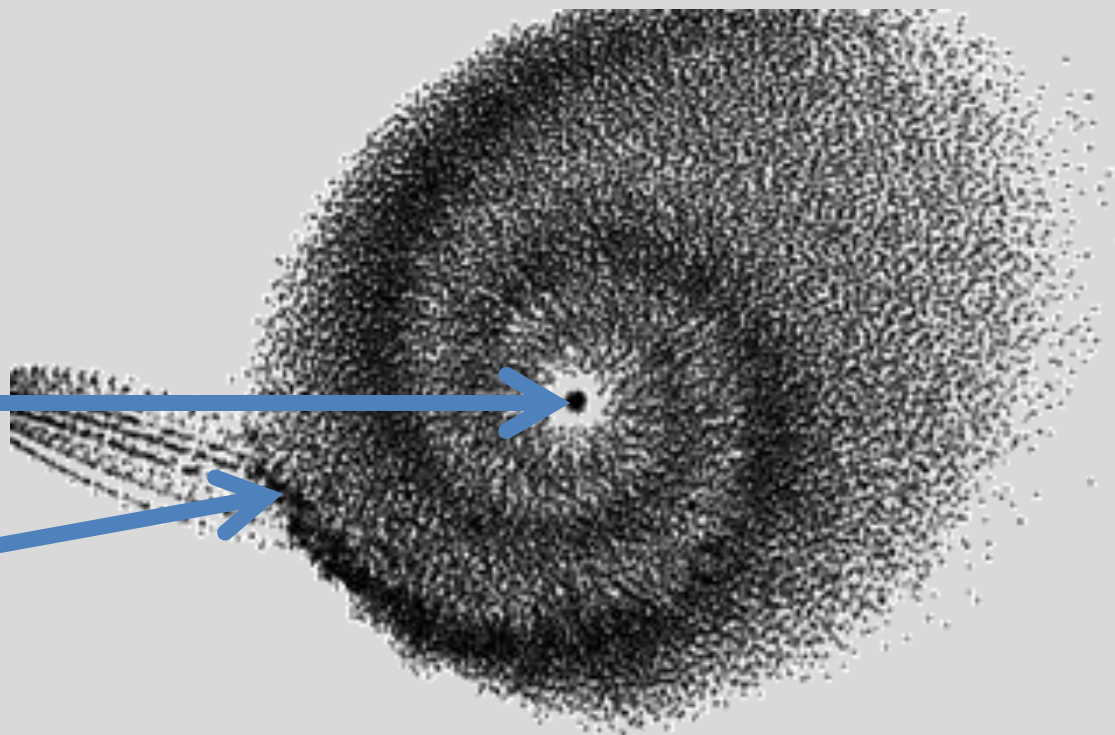
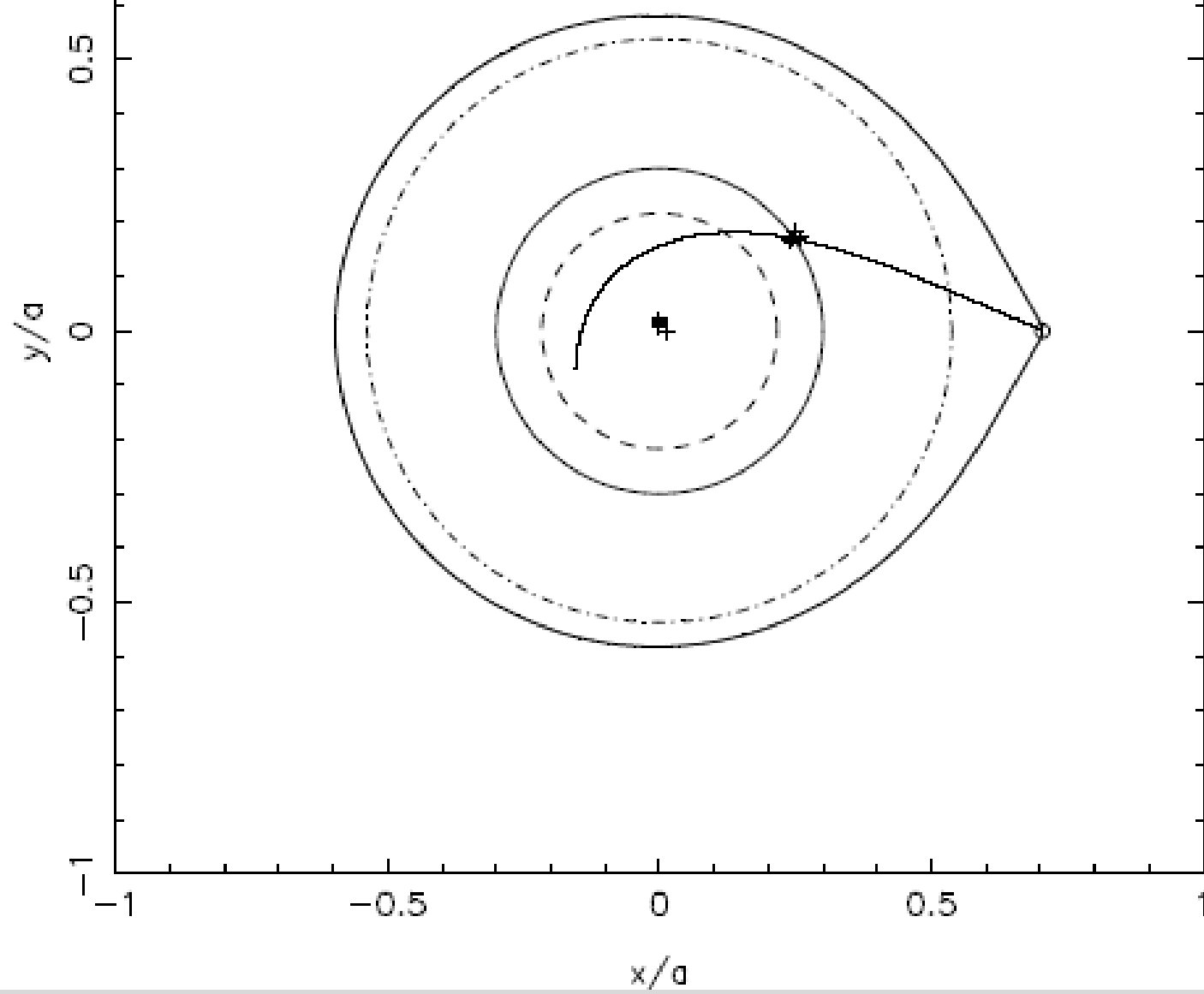
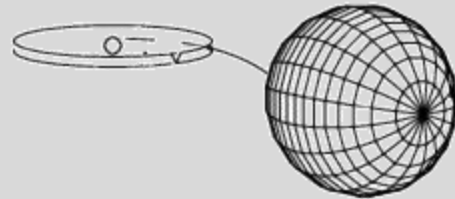
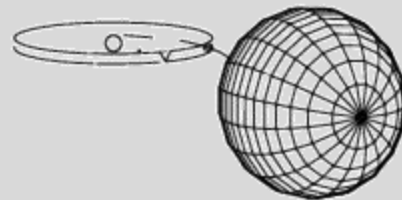
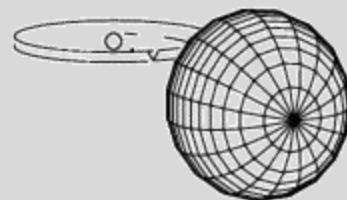
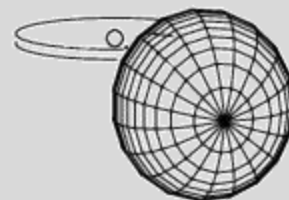
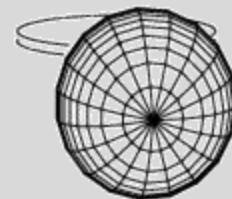
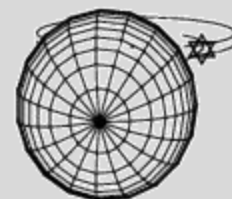
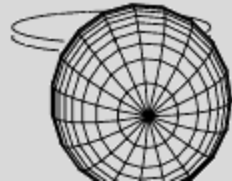
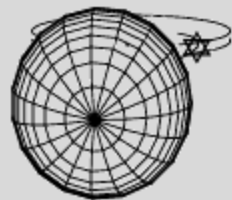
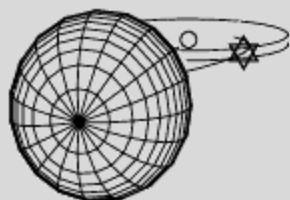
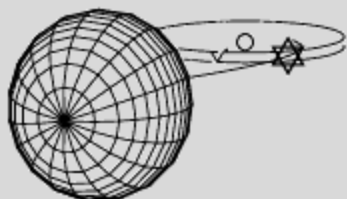
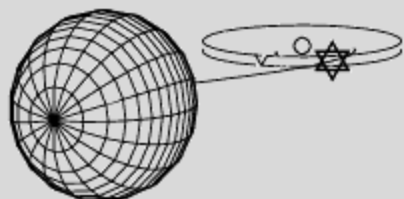
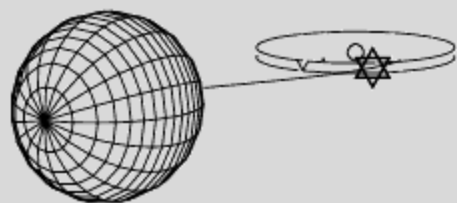


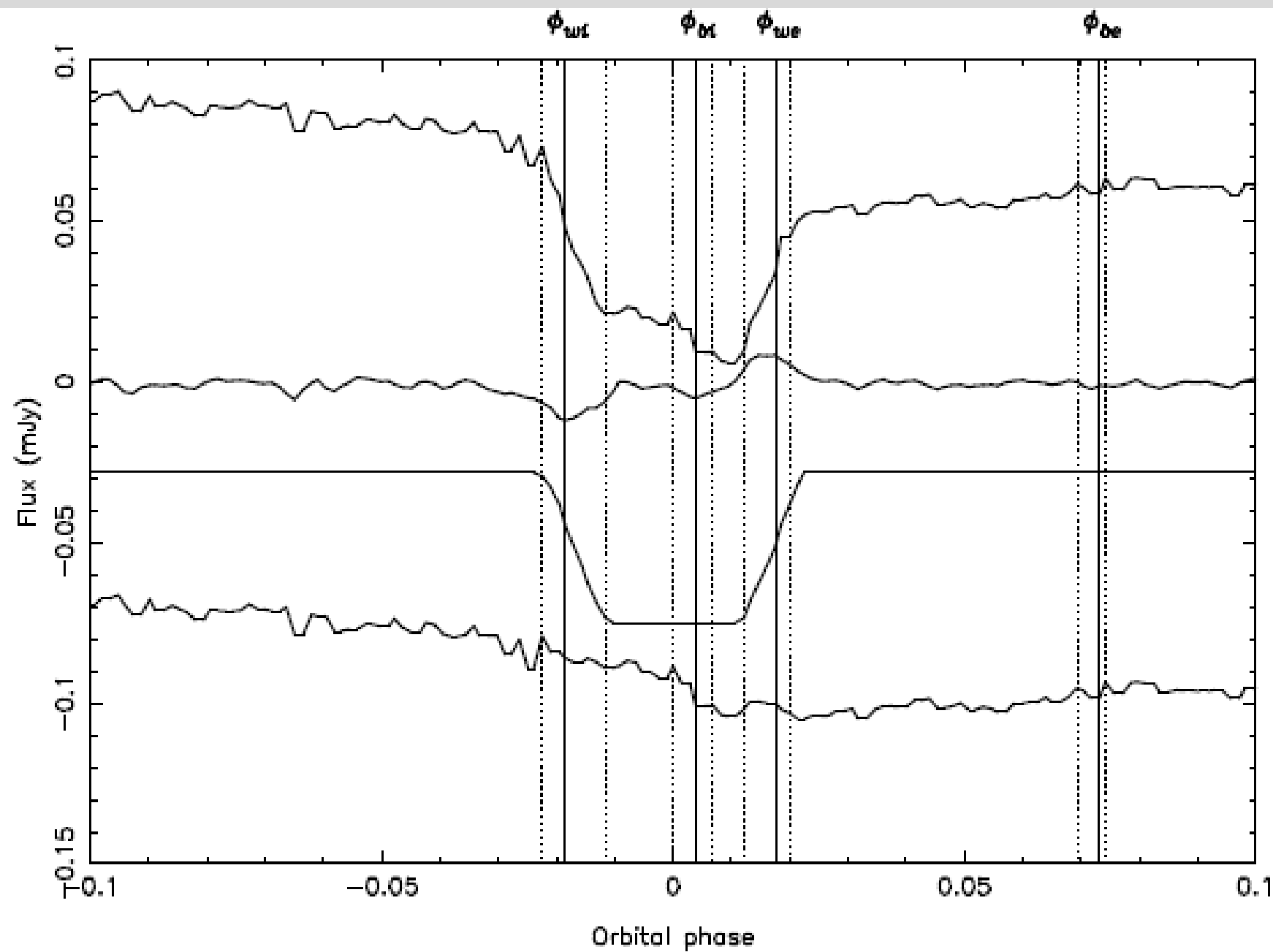
Схема аккреционного диска и горячего пятна



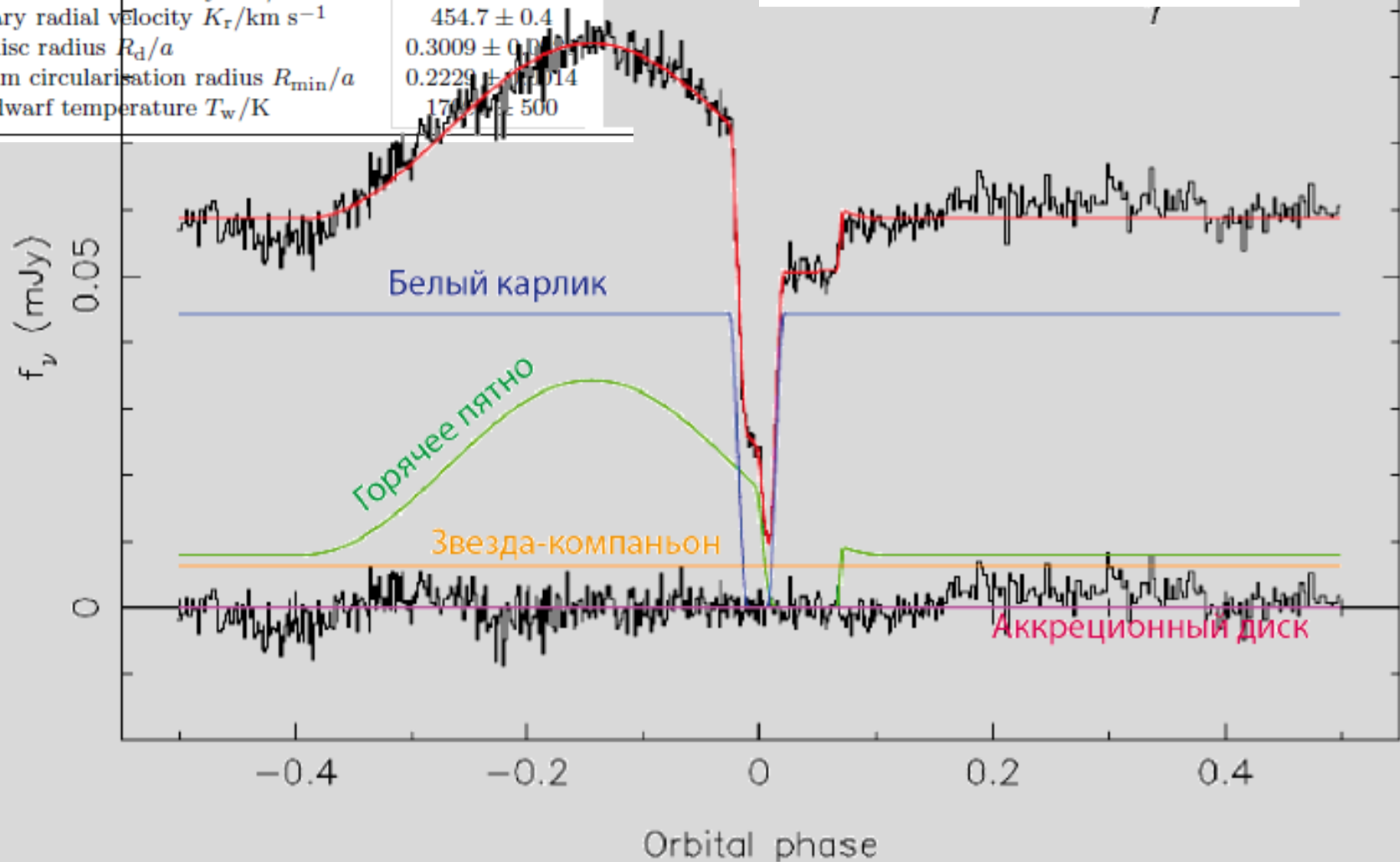
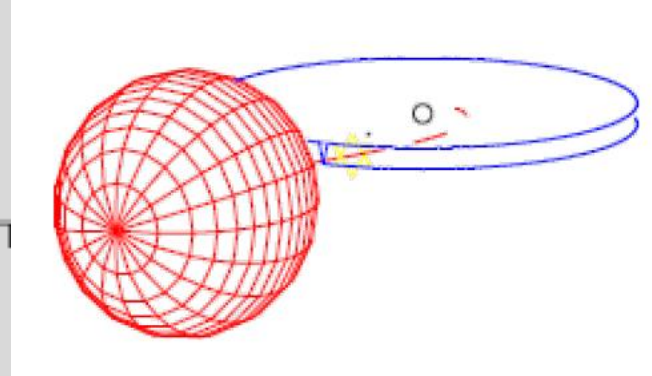
$$q = 0.15$$

$$i = 81$$





Parameter	Model
Inclination i	80.16 ± 0.09
Mass ratio $q = M_r/M_w$	0.1098 ± 0.0017
White dwarf mass $M_w/M_\odot$	0.767 ± 0.018
Secondary mass $M_r/M_\odot$	0.0842 ± 0.0024
White dwarf radius $R_w/R_\odot$	0.0112 ± 0.0003
Secondary radius $R_r/R_\odot$	0.1315 ± 0.0019
Separation $a/R_\odot$	0.619 ± 0.005
White dwarf radial velocity $K_w/\text{km s}^{-1}$	49.9 ± 0.9
Secondary radial velocity $K_r/\text{km s}^{-1}$	454.7 ± 0.4
Outer disc radius R_d/a	0.3009 ± 0.0014
Minimum circularisation radius $R_{\min}/a$	0.2229 ± 0.0014
White dwarf temperature T_w/K	17000 ± 500



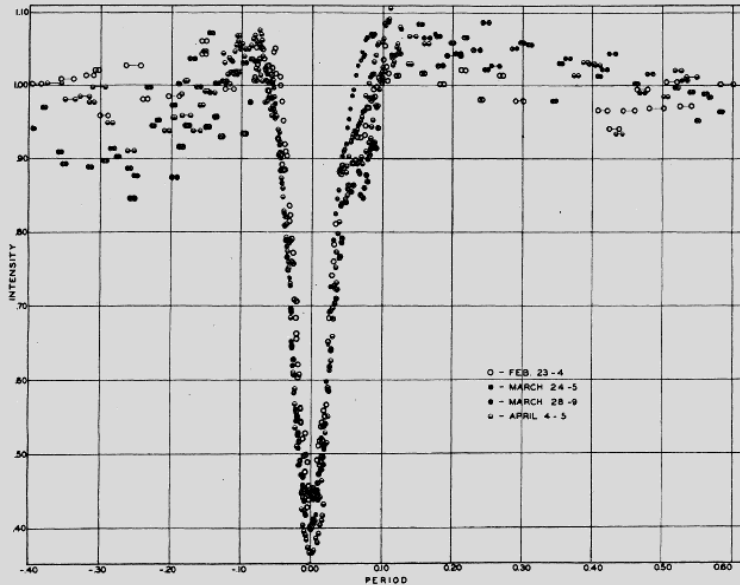
Шум – важный метод диагностики событий, которые сложно наблюдать

**Например,
шумы в двигателе**



Шум аккреции

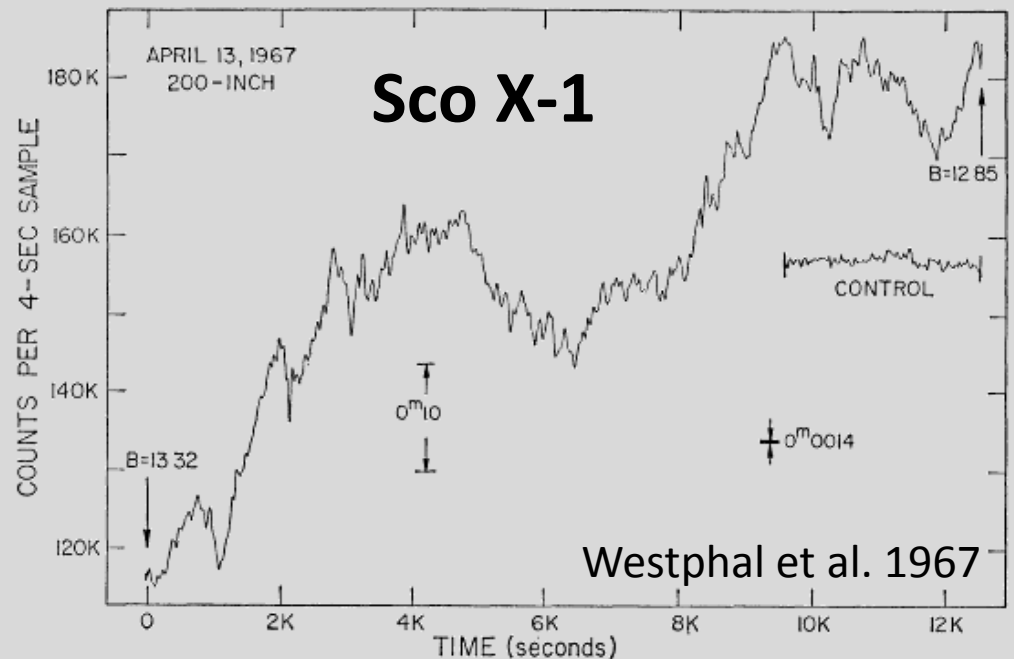
UX UMa



Открыт в аккрецирующих белых карликах. Сейчас наблюдается у практически всех аккреционных системах

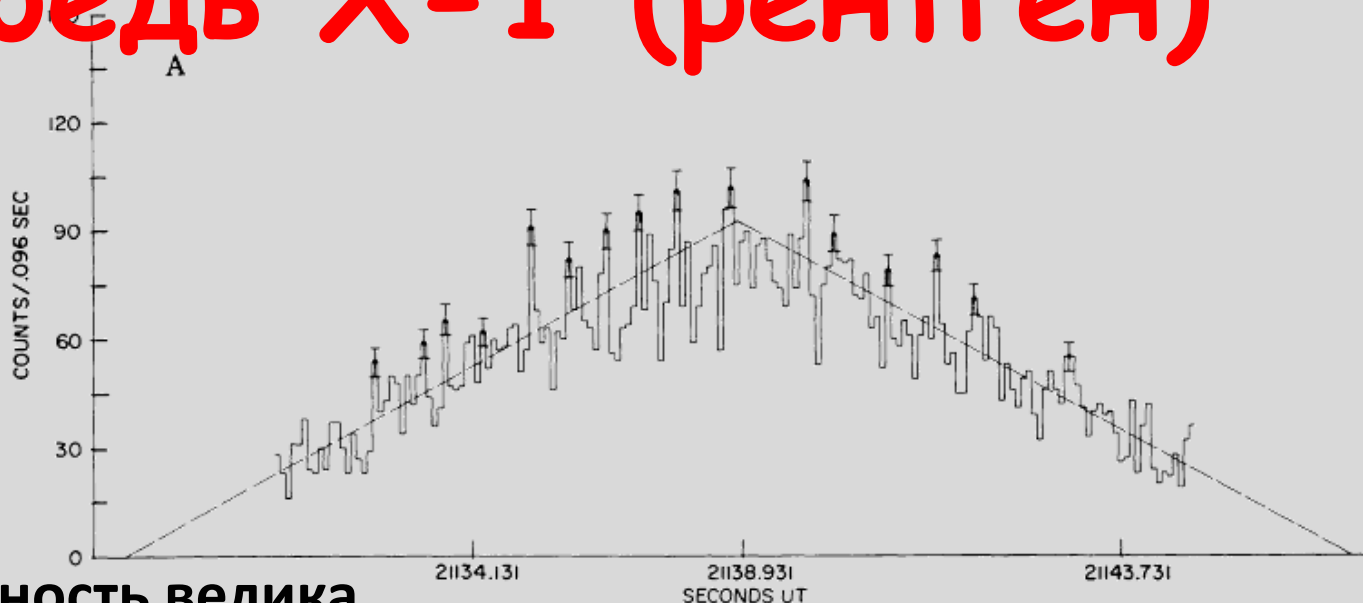
Linnell 1950

Фликкер-шум



Westphal et al. 1967

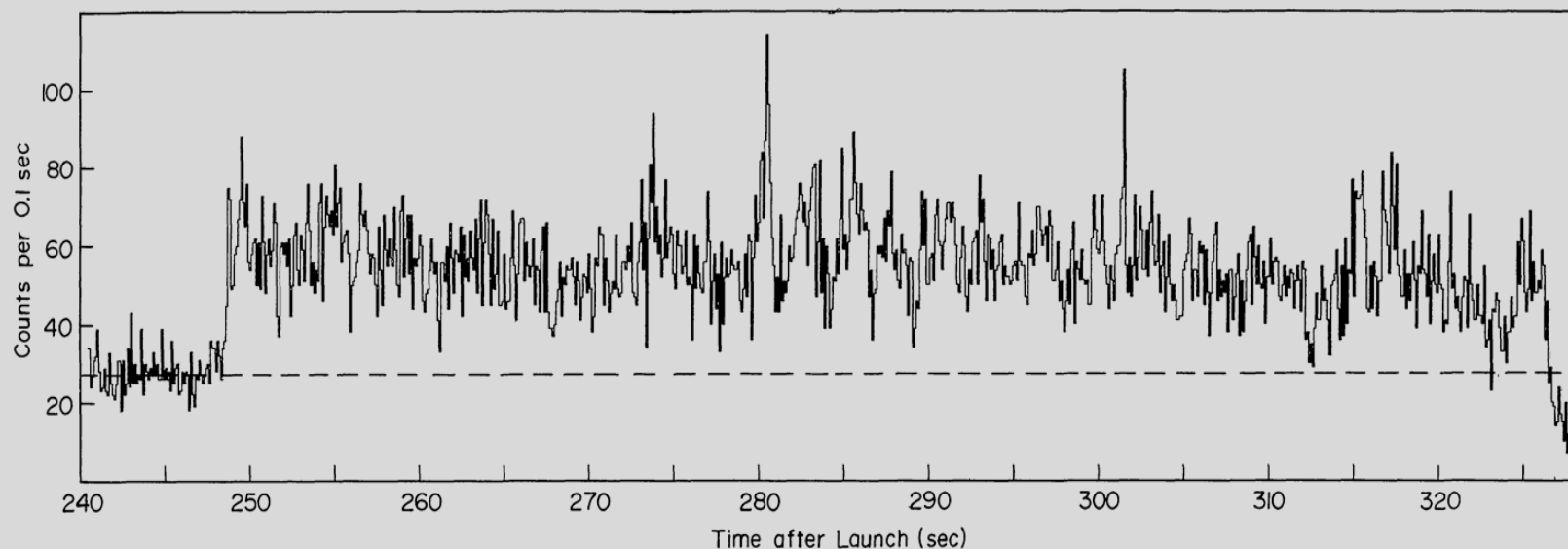
Лебедь X-1 (рентген) *Oda et al. 1971*



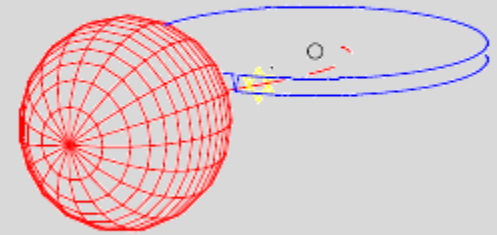
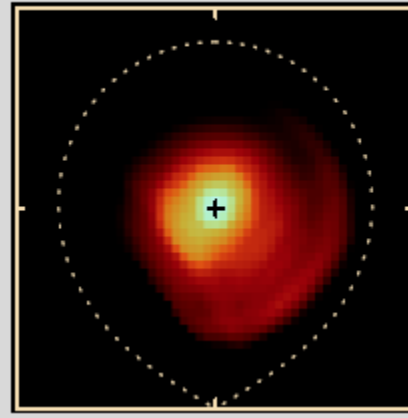
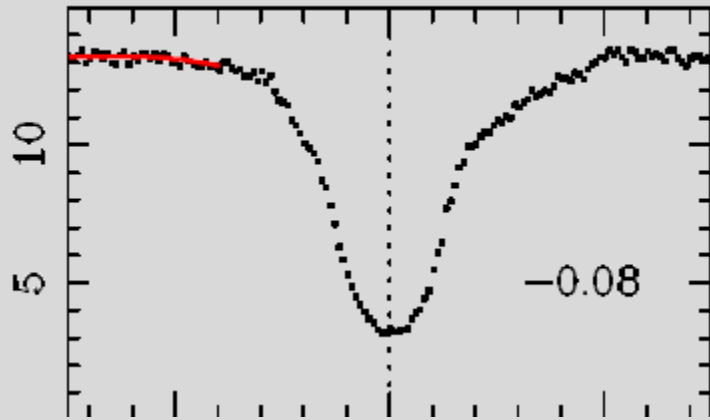
Переменность велика

-> задействованы центральные области

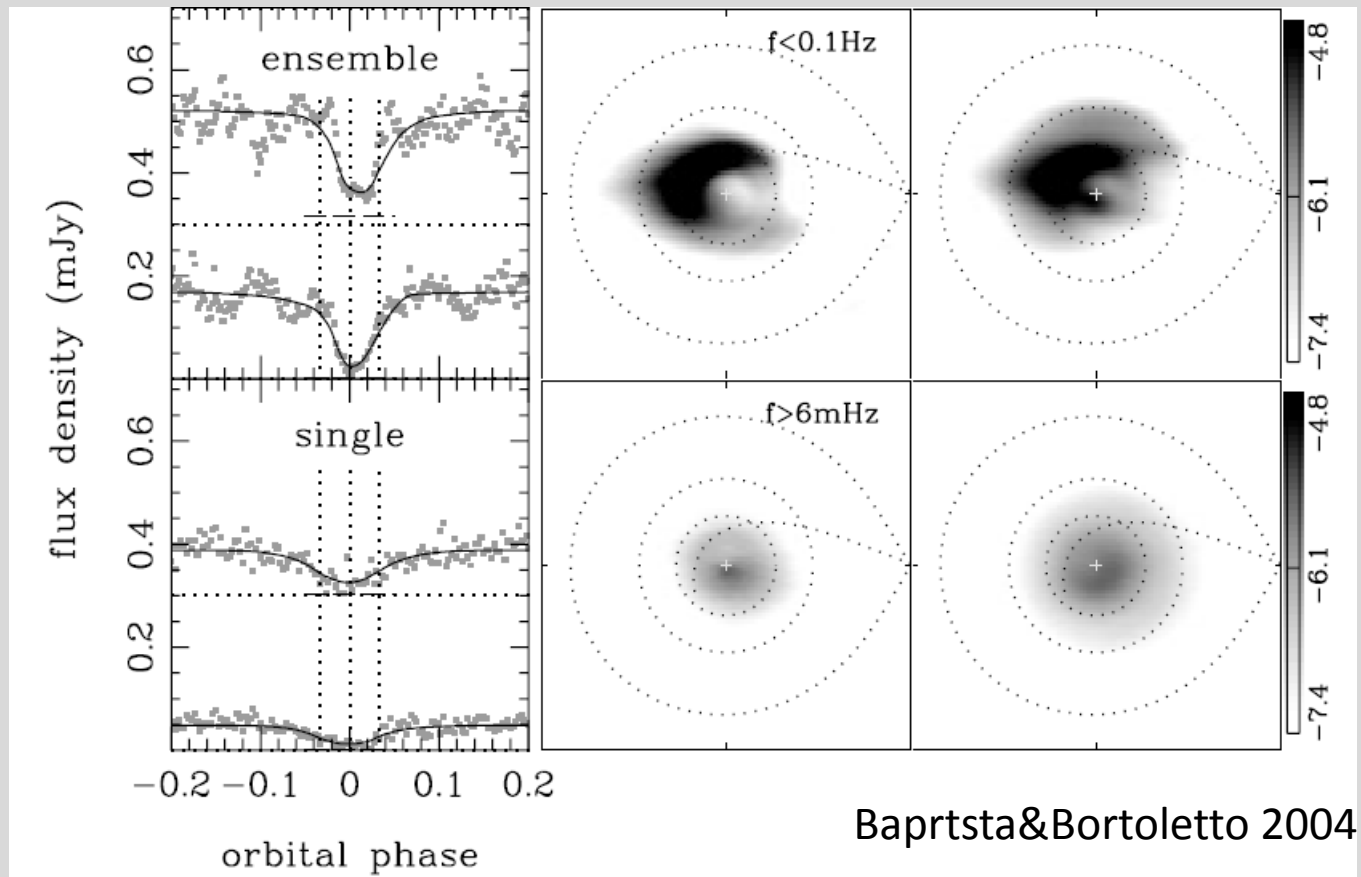
Rappaport et al. 1971



Eclipse mapping of steady light

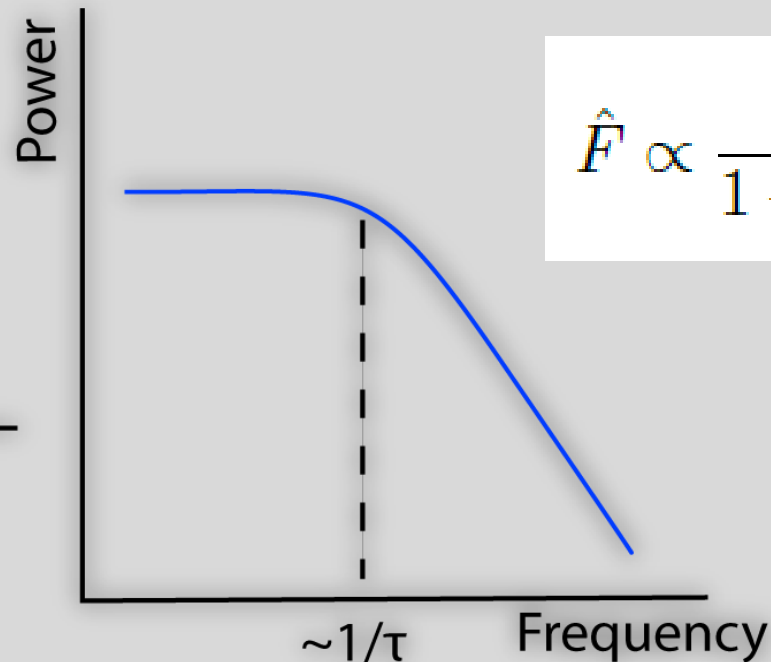
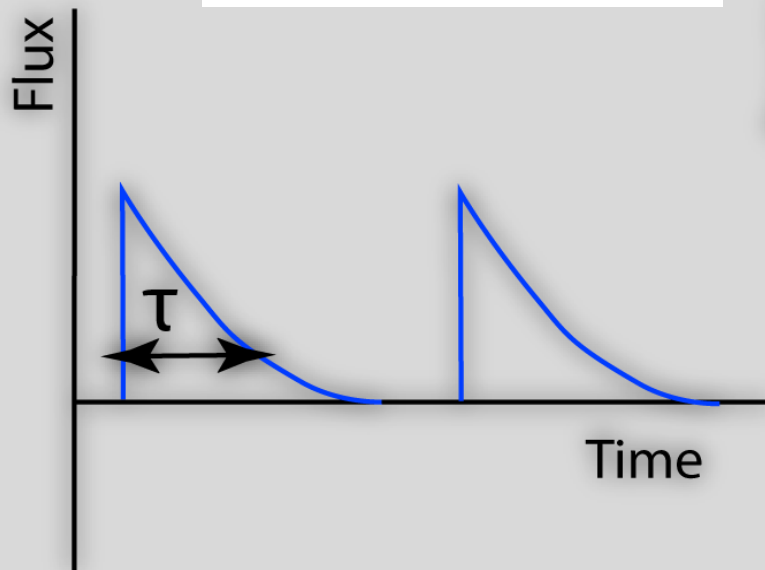


Eclipse mapping of flickering

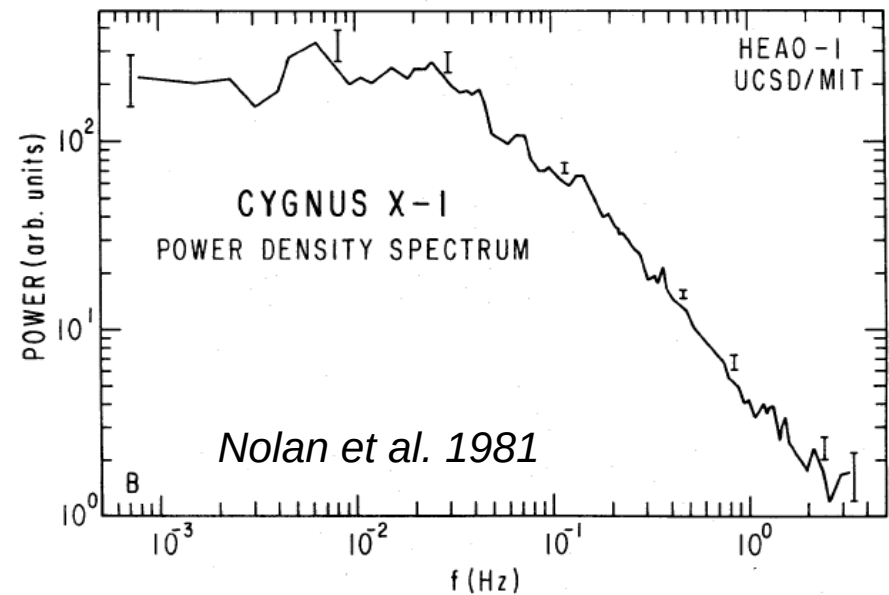


Модель случайных вспышек

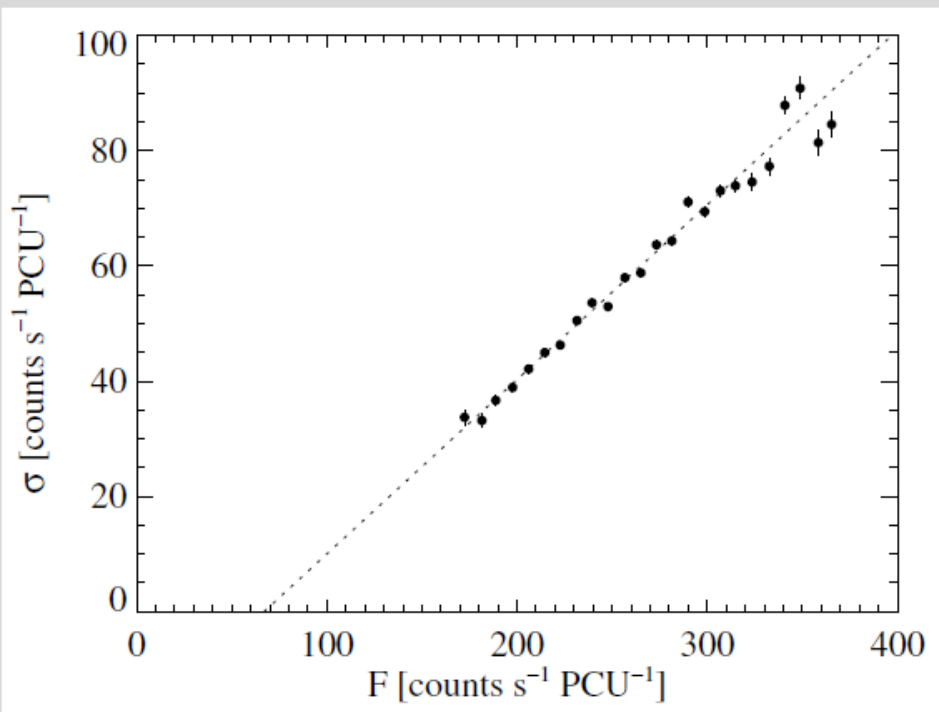
$$f(t) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t - t_i}{\tau}\right)$$



$$\hat{F} \propto \frac{1}{1 + (2\pi f \tau)^2}$$

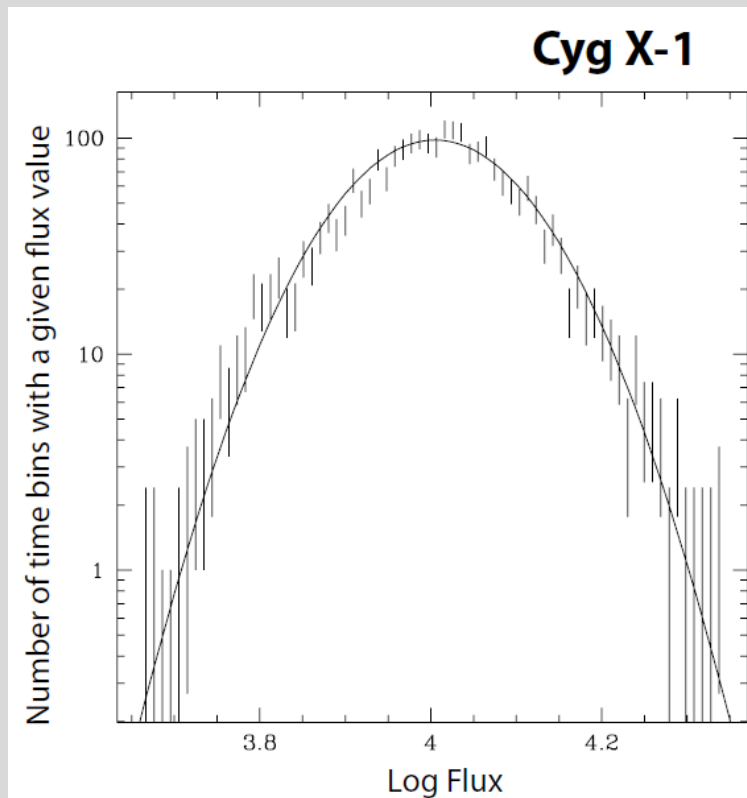


Проблемы модели случайных вспышек



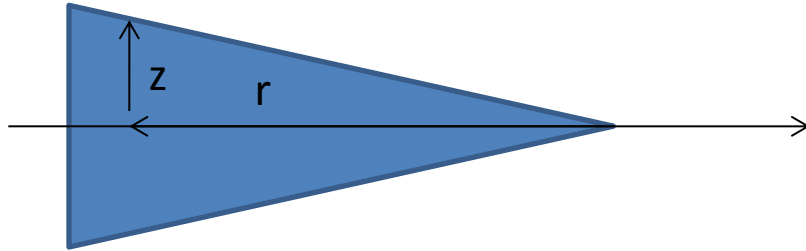
Распределение значения потока

**Амплитуда
переменности
как функция
среднего потока**



Уравнения тонкого аккреционного диска

$$\frac{dP}{dz} = \frac{GM}{r^2} z$$

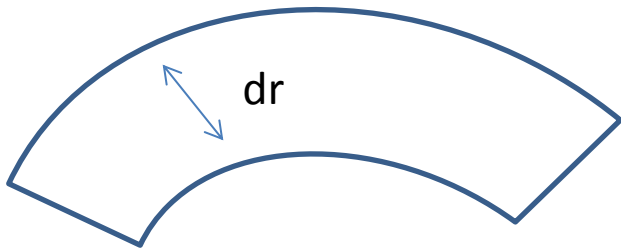


$$\Sigma = \int \rho dz \sim 2H_0 \rho_0$$

Рассмотрим движение малого кольца тонкого диска ($H \ll R$) с радиусом r и шириной Δr . Масса такого кольца $2\pi r \Sigma \Delta r$, а угловой момент $2\pi r \Sigma \Omega r^2$.

Изменение массы кольца из-за наличия радиального движения вещества в диске со скоростью $v_r(r, t)$ можно записать как:

$$\frac{\Delta}{\Delta t} (2\pi r \Sigma \Delta r) = 2\pi [v_r(r, t) r \Sigma(r, t) - v(r + \Delta r, t) (r + \Delta r) \Sigma(r + \Delta r, t)]$$



$$\frac{\partial}{\partial t} (r \Sigma dr) = dr \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r)$$

Аналогичным образом запишем закон сохранения углового момента для кольца:

$$\frac{\partial}{\partial t}(2\pi r \Sigma \Omega r^2 \Delta r) = 2\pi [v_r(r, t) r^3 \Sigma(r, t) \Omega - v_r(r + \Delta r, t) (r + \Delta r)^3 \Sigma(r + \Delta r, t) \Omega(r + \Delta r)]$$

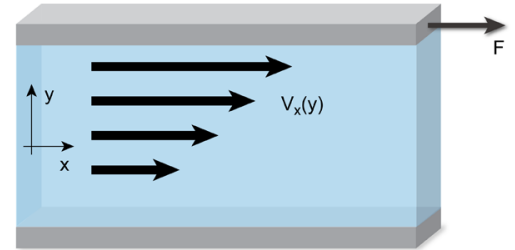
$$\frac{\partial}{\partial t}(\Sigma \Omega r^3 dr) = dr \frac{\partial}{\partial r}(v_r r^3 \Sigma \Omega)$$

В случае, если на кольцо действует момент сил G , то закон сохранения углового момента запишется как:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Sigma \Omega r^3) + \frac{\partial}{\partial r}(v_r r^3 \Sigma \Omega) = G(r)$$

Вязкие силы в простых картезианских координатах:

$$\frac{dF_x}{dS_y} = \eta \frac{dv_x}{dy}$$



η – динамический коэффициент вязкости, $\nu = \eta/\rho$ – кинематический коэффициент вязкости.

Тензор напряжений в цилиндрических координатах запишется как:

$$\sigma_{r\phi} = \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right) = \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + r \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right), \quad \Omega = v_\phi / r$$

При аксиальной симметрии первый член в выражении обнуляется.

$$\sigma_{r\phi} = \eta r \frac{\partial \Omega}{\partial r}$$

В случае Кеплеровского диска

$$t_{r\phi} = \nu \rho r \frac{d\Omega}{dr}, \quad T_{r\phi} = 2H t_{r\phi} = \frac{3}{2} \nu \Sigma \Omega_K$$

Интересно, что используя $\nu = \alpha H c_s$

можно записать $t_{r\phi} = \nu \rho r \frac{d\Omega}{dr} = \alpha H c_s \rho \frac{3v_K}{2r} \sim \alpha r \frac{c_s^2}{v_K} \rho \frac{v_K}{r} = \alpha c_s^2 \rho \approx \alpha P$

Момент сил $G(r) = 2\pi r H_0 r \nu \rho r \frac{\partial \Omega}{\partial r}$

Для стационарного случая ($\partial/\partial t = 0$):

$$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2})$$

$$v_r \sim \frac{\nu}{r} \approx \alpha c_s \frac{H}{r}$$

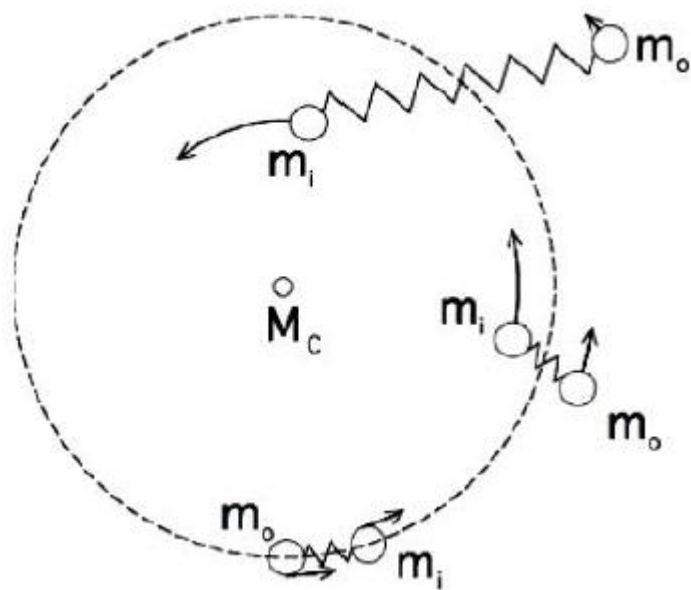
выделение энергии за счет вязкости

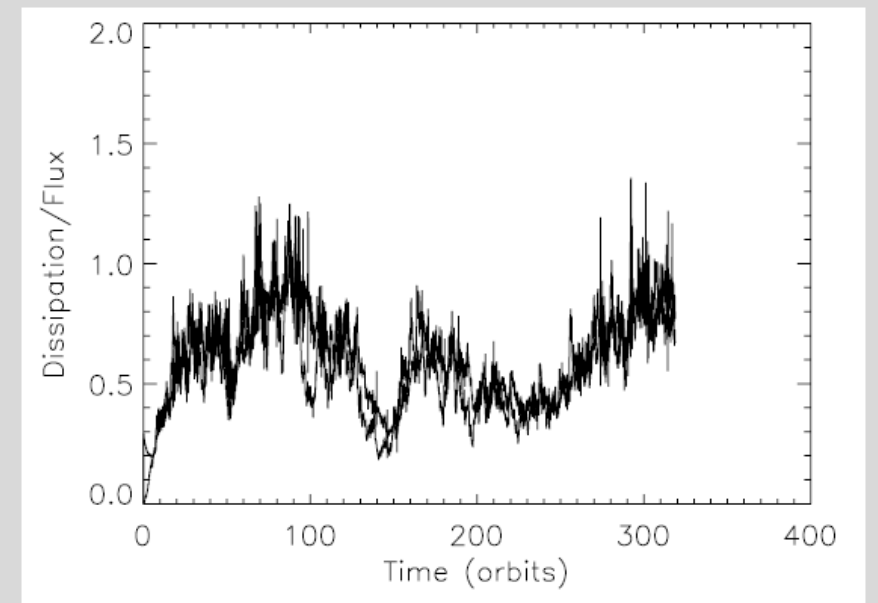
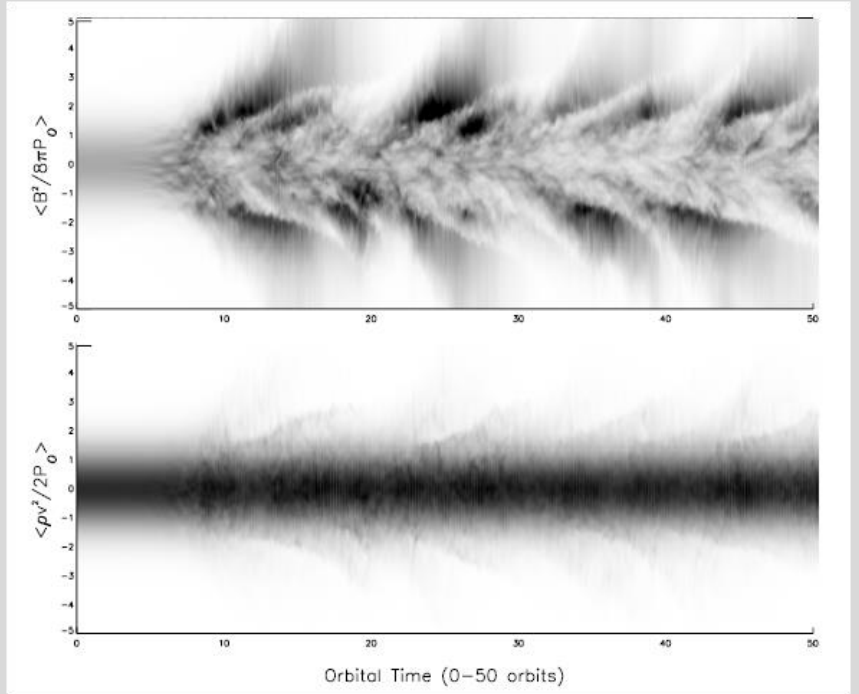
$$F^+ = T_{r\phi} r \frac{\partial \Omega_K}{\partial r} = \frac{3}{2} T_{r\phi} \Omega_K = \frac{9}{4} \nu \Sigma \Omega_K^2$$

$$\alpha = \alpha_0 [1 + \beta(t, r)]$$

$$\dot{M} = \dot{M}_0 [1 + \dot{m}(r, t)]$$

Вязкость и магнито-ротационная неустойчивость





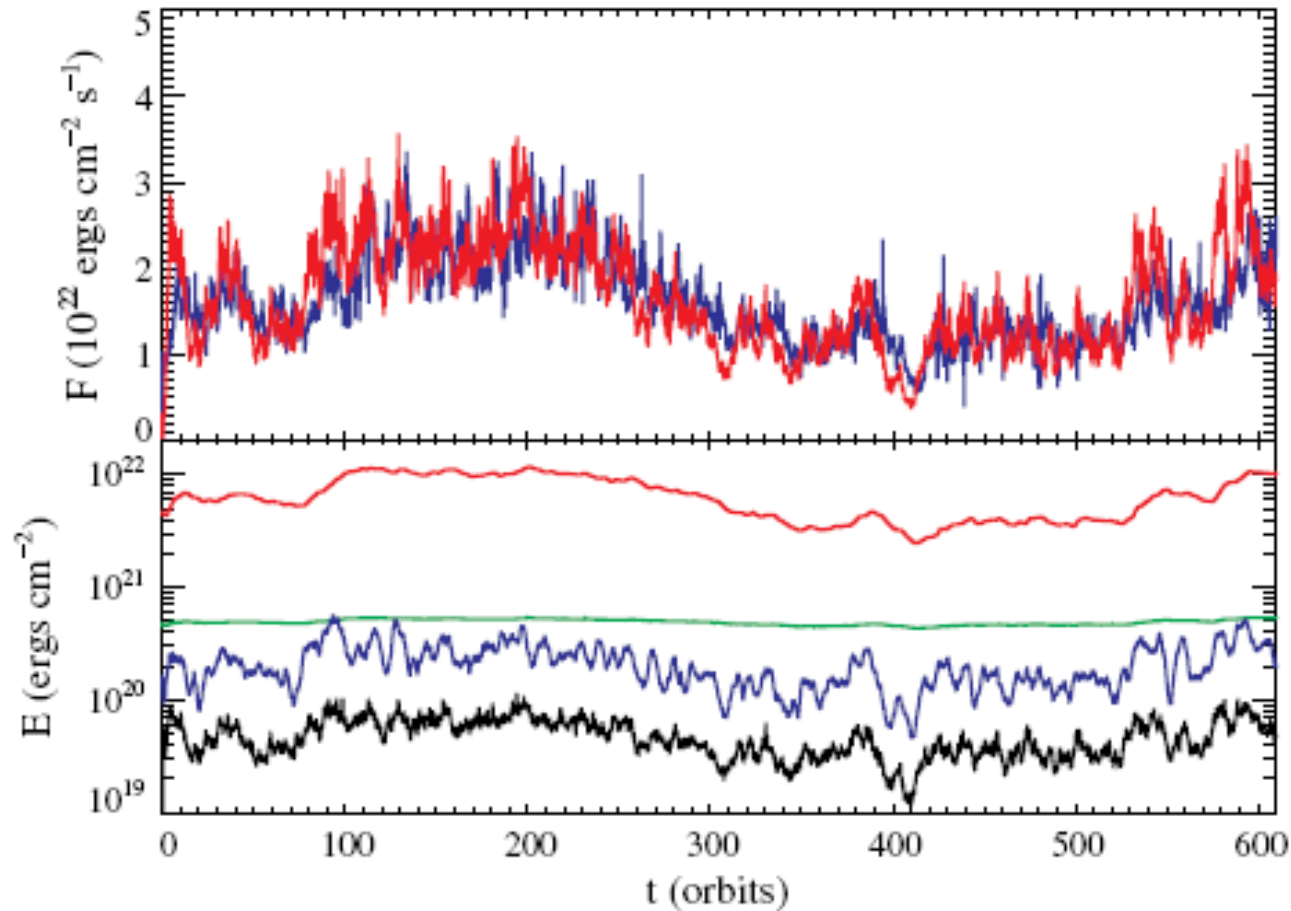
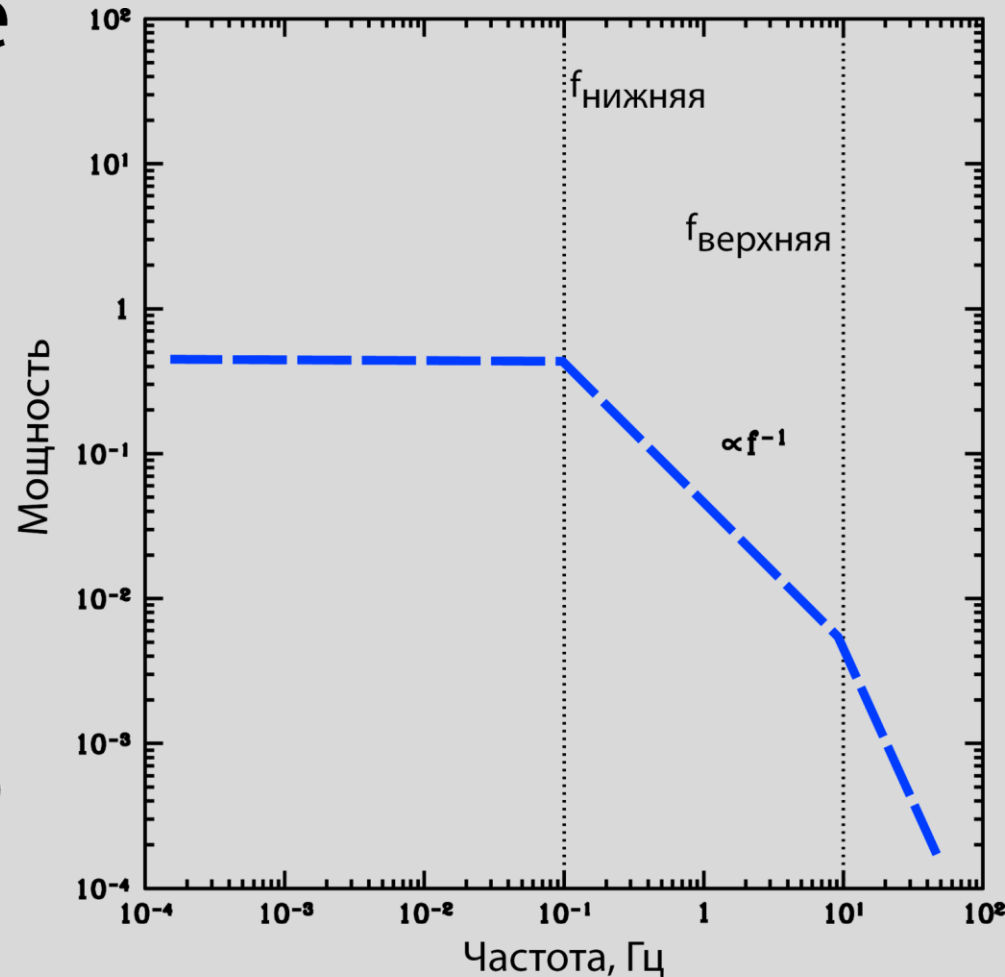


Figure 3. Top panel: total volume-integrated dissipation (red) and radiative cooling (blue) rates as a function of time in simulation 1112a, plotted on a linear vertical scale. Bottom panel: total energy content in the box as a function of time in simulation 1112a, in the form of radiation energy (red), gas internal energy (green), magnetic energy (blue), and turbulent kinetic energy (black). (The turbulent kinetic energy is defined as the kinetic energy associated with the fluid velocity measured relative to the background shear flow.) Note that the bottom panel is plotted on a logarithmic vertical scale.

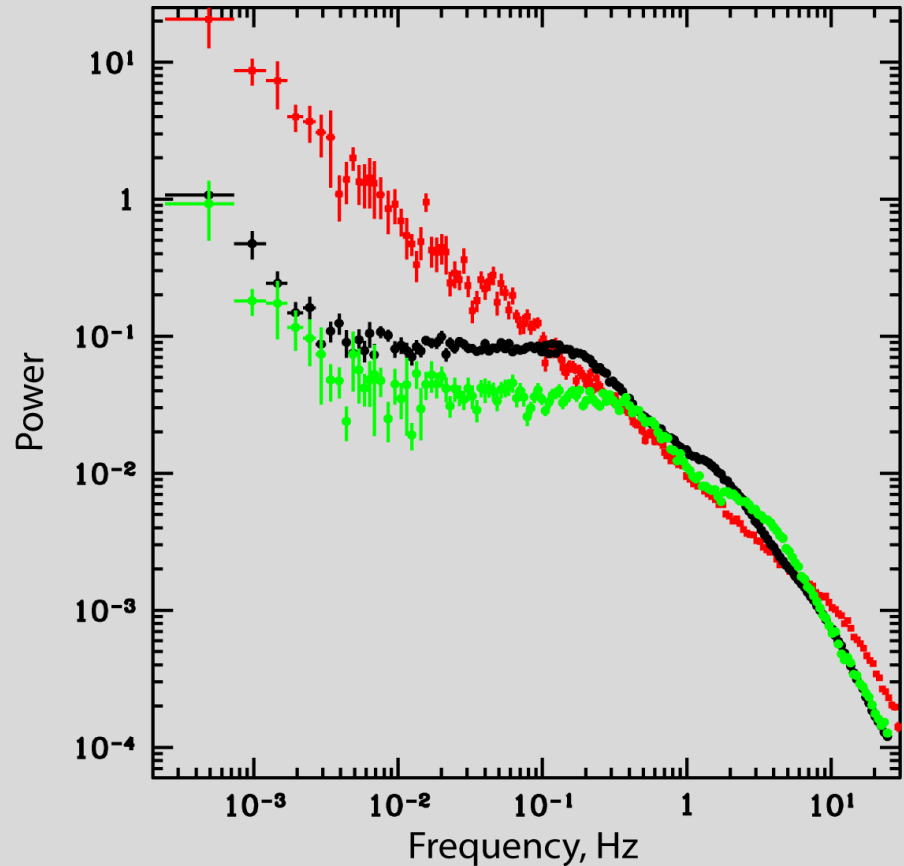
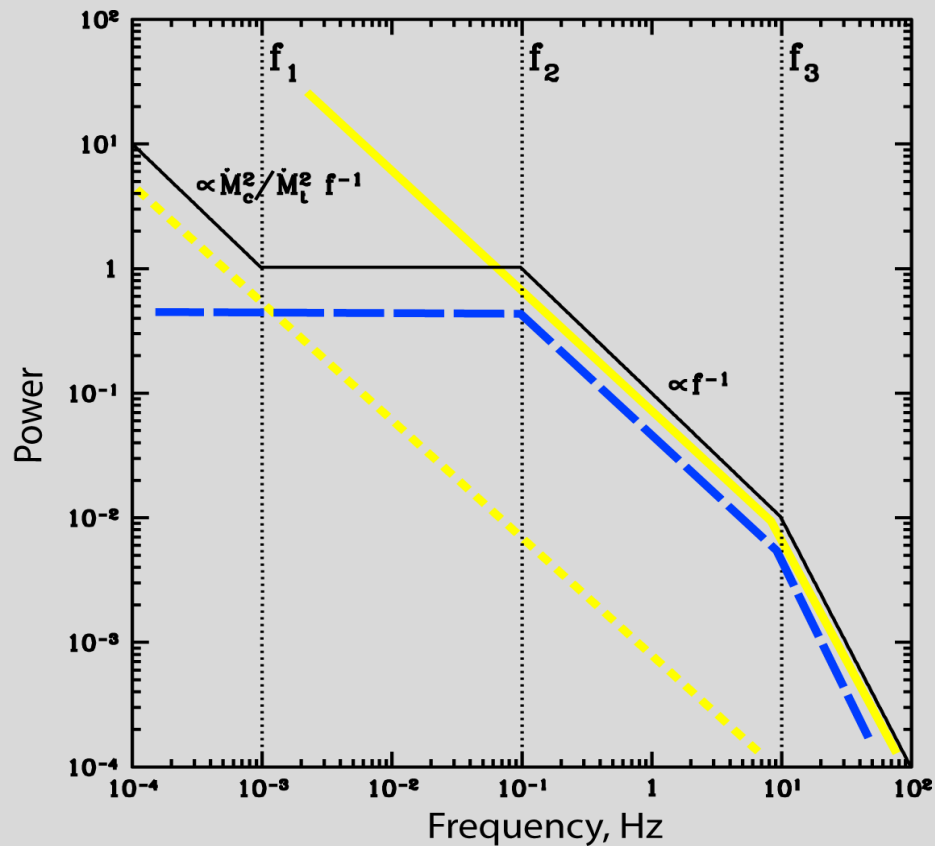
Источник фликкер-шума



$$\dot{M}(r_i, t) = \dot{M}_o \prod_{j=0}^i 1 + \dot{m}(r_j, t),$$

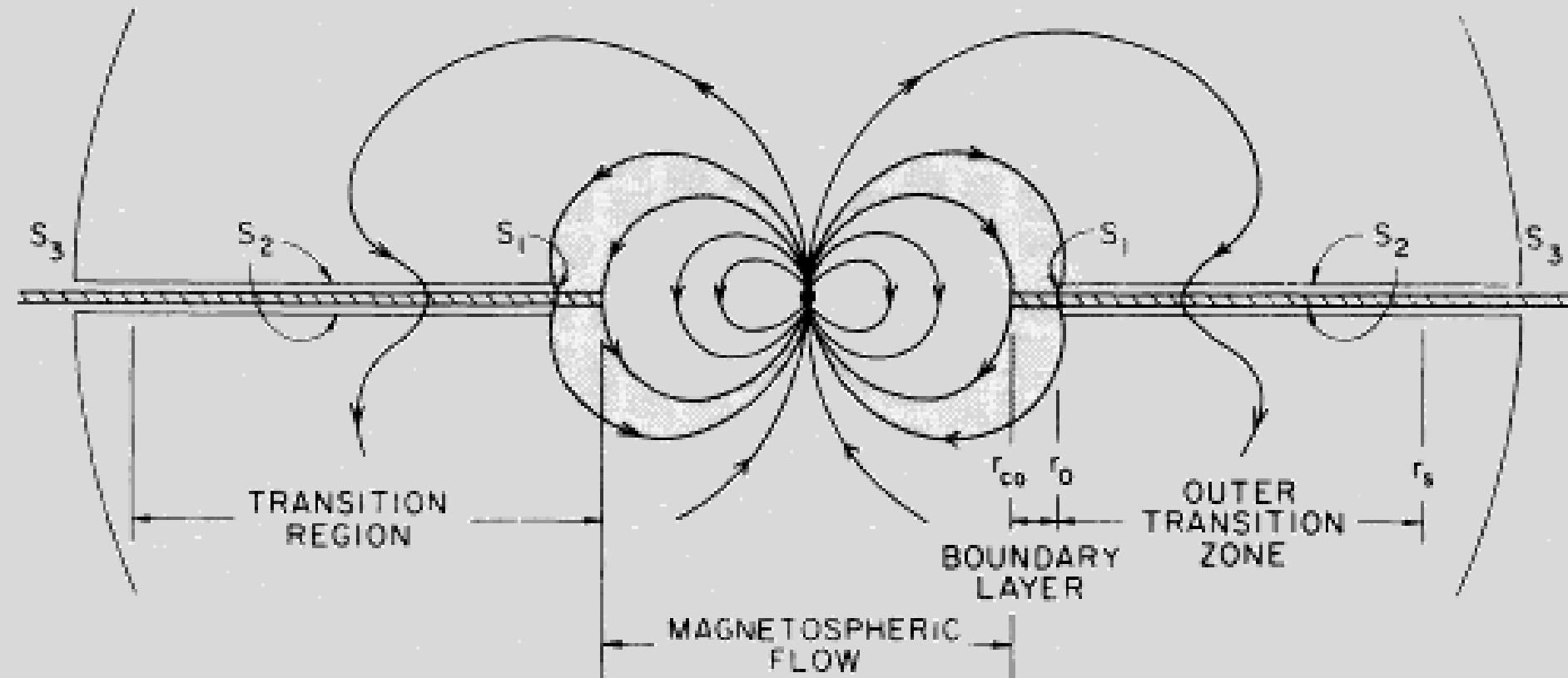


Power spectra of Cyg X-1 in high and low states

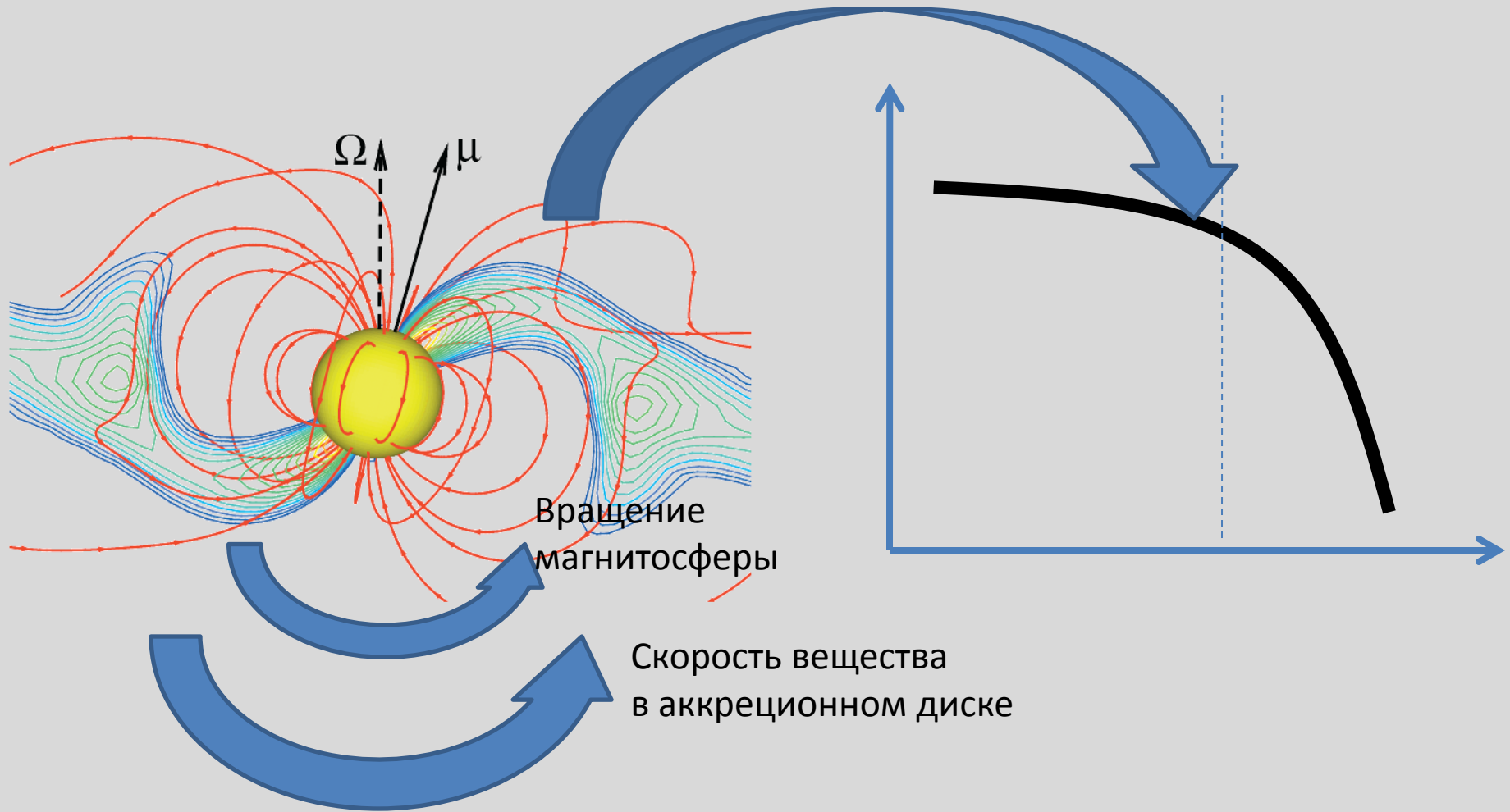


В каких системах можем ожидать
аккреционные диски с внутренней границей ?

Магнитные аккреторы



Аккреционные диски с внутренней границей



***Постоянные аккрецирующие
пульсары в коротации с диском***

Граница магнитосферы

$$\frac{B^2}{8\pi} \approx \frac{\rho v_r^2}{2}$$

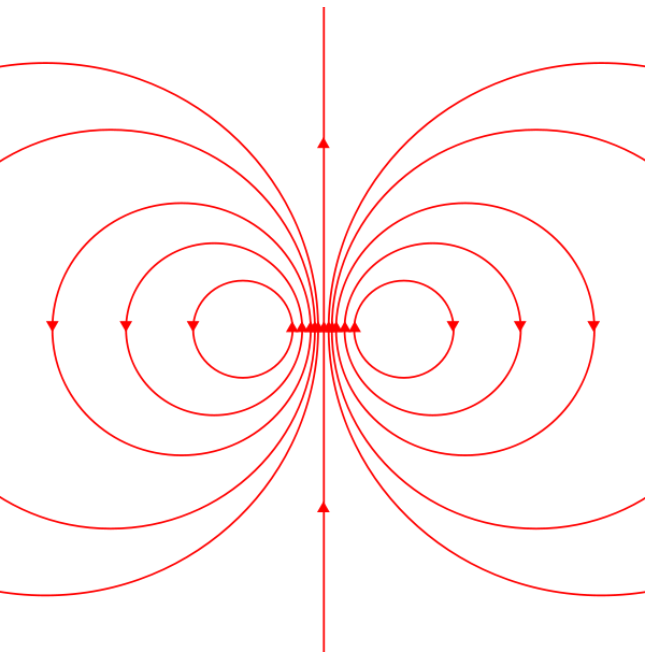
$$v_r \propto v_{ff} = \sqrt{GM/r}$$

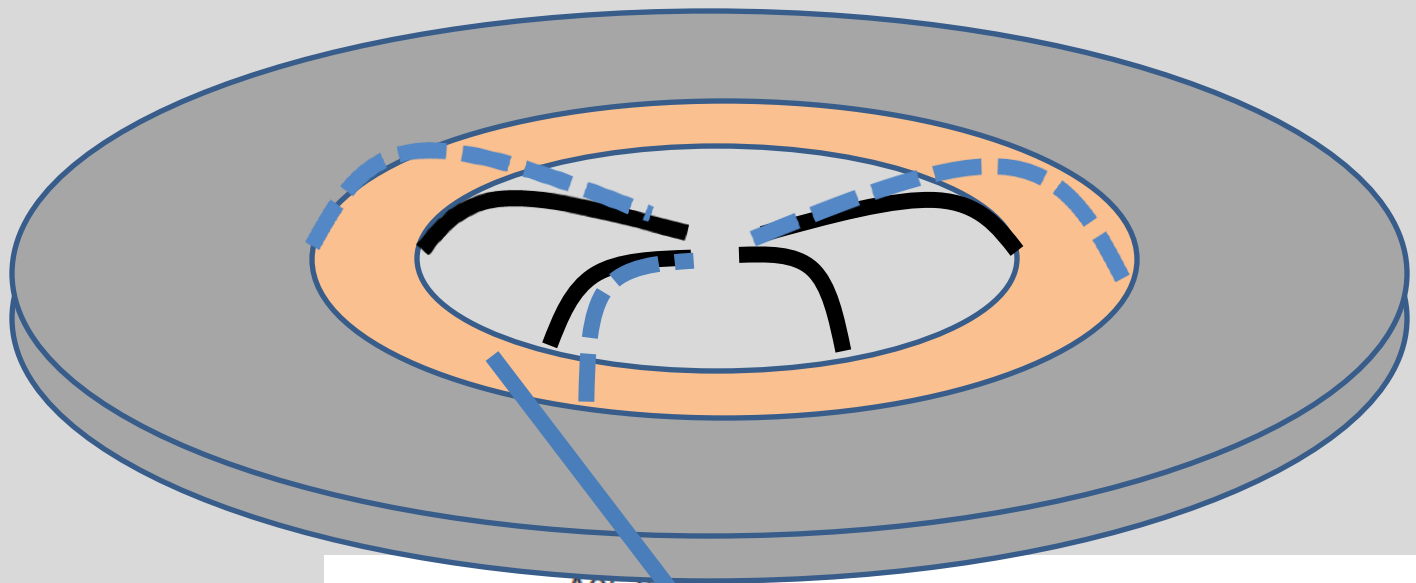
$$B = \frac{\mu}{r^3}$$

$$\rho \sim \frac{\dot{M}}{4\pi v_r r^2} = \frac{\dot{M}}{4\pi r^{3/2}}$$

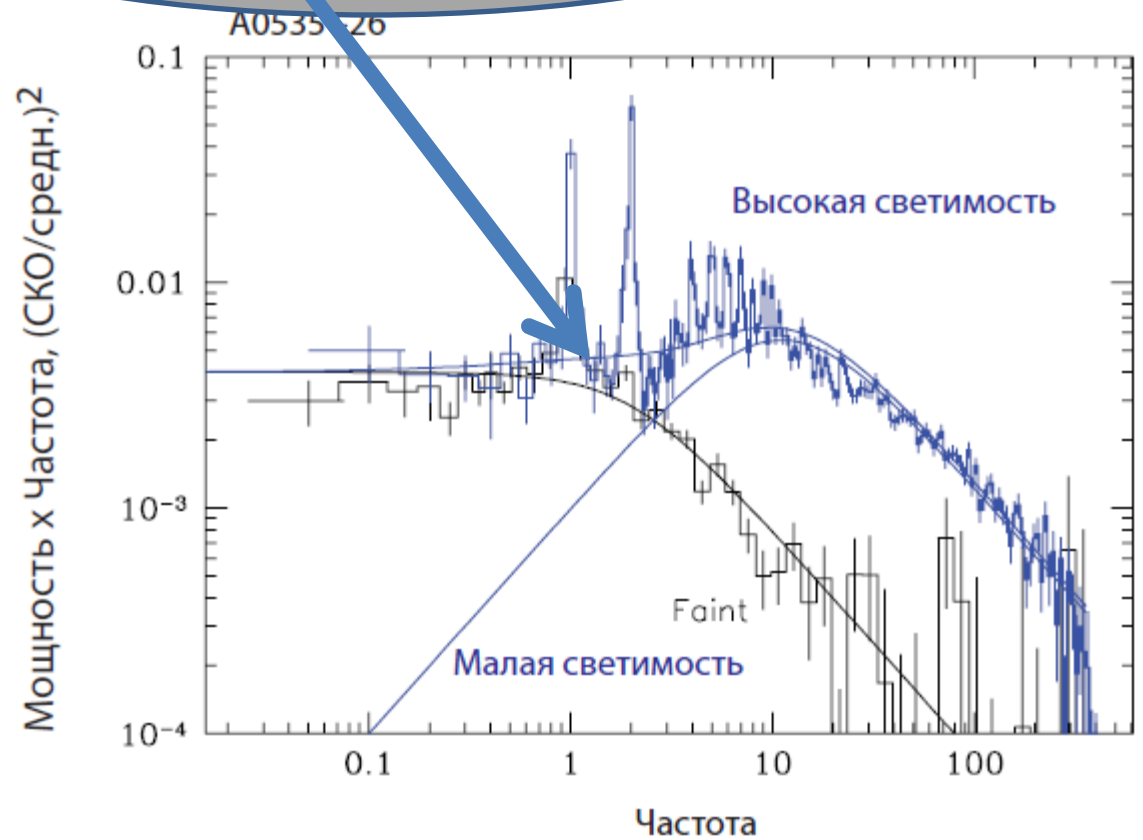
$$r_m = \left(\frac{\mu^2}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7}$$

$$f_K \propto \mu^{-6/7} \dot{M}^{3/7}$$

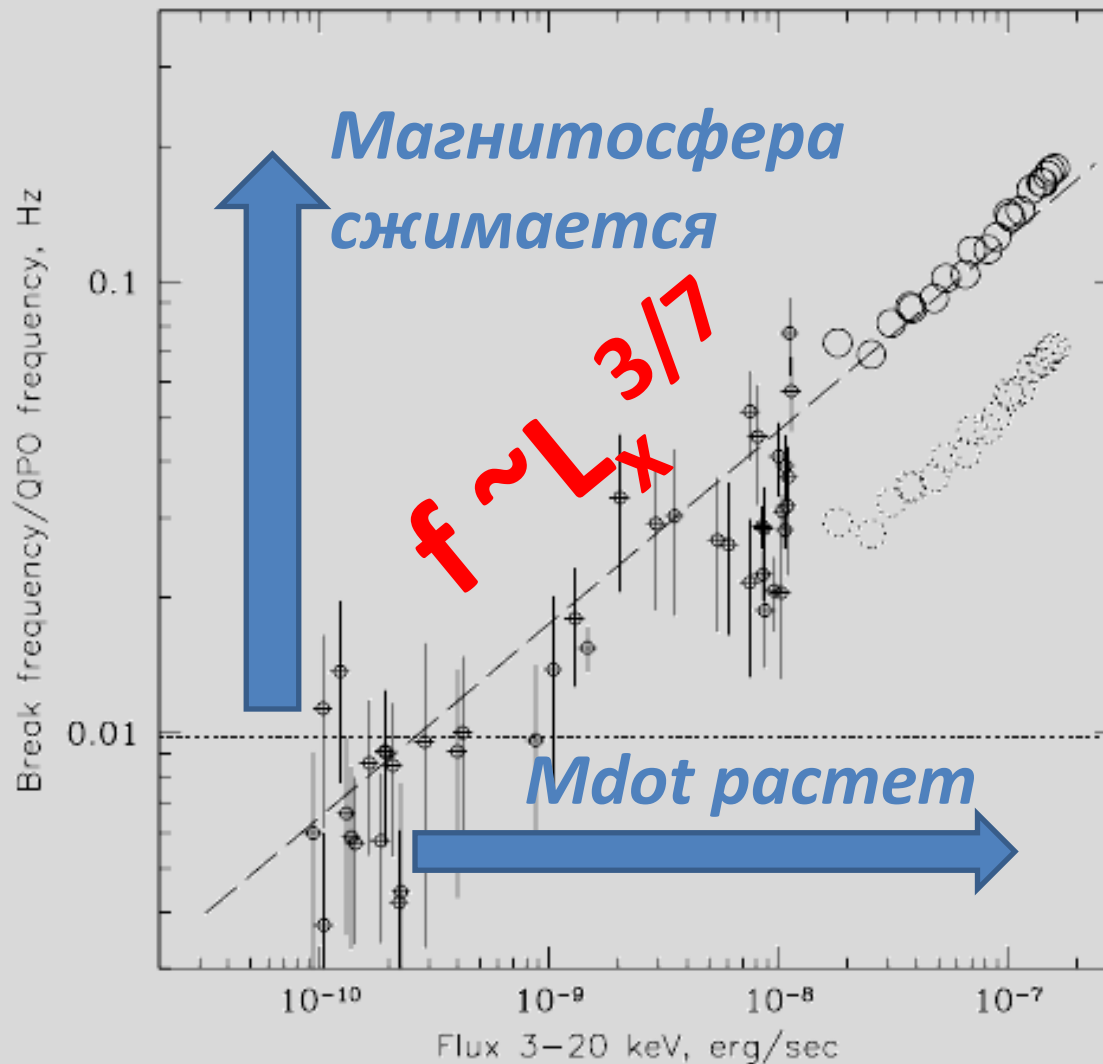




Изменение темпа аккреции



Изменение частоты слома при изм. темпа аккреции A0535+26



Определение магнитного поля НЗ по хаотической переменности

