

**Формирование спектров рентгеновского
излучения в результате комптонизации.
Отражение рентгеновских лучей от
холодной среды**

Уравнение Компанейца

(для однородной бесконечной среды)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\sigma_T N_e h}{m_e c} \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial}{\partial \nu} \nu^4 \left(n + n^2 + \frac{kT_e}{h} \frac{\partial n}{\partial \nu} \right)$$

Отдача

Доплер

Вынужденное рассеяние

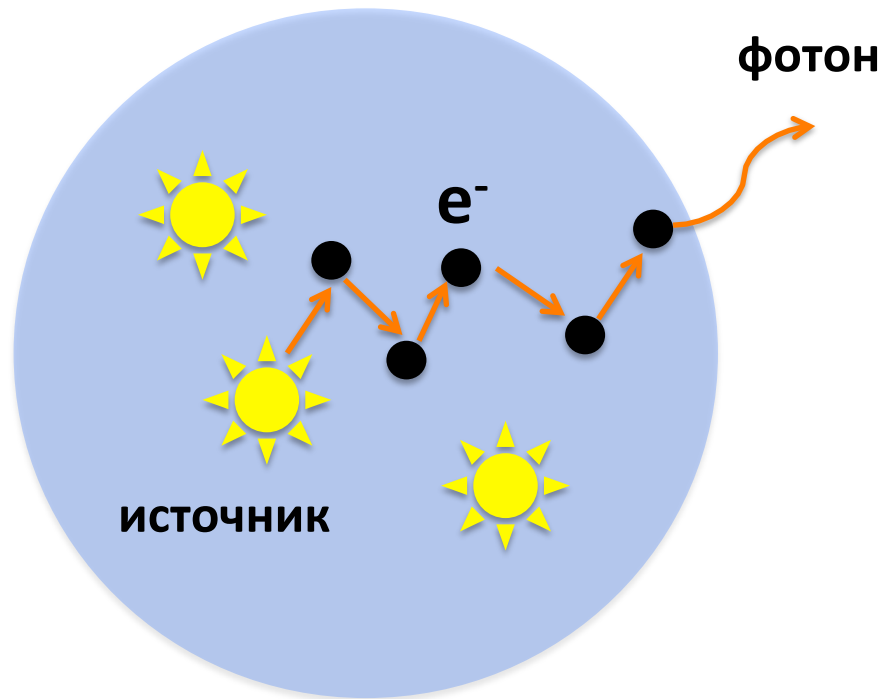
$$h\nu, kT_e \ll m_e c^2$$

Удобно перейти к безразмерным величинам:

$$x = \frac{h\nu}{kT_e} \quad y = \int \frac{kT_e(t)}{m_e c^2} \sigma_T N_e c dt \quad \text{- комптонизационный параметр}$$

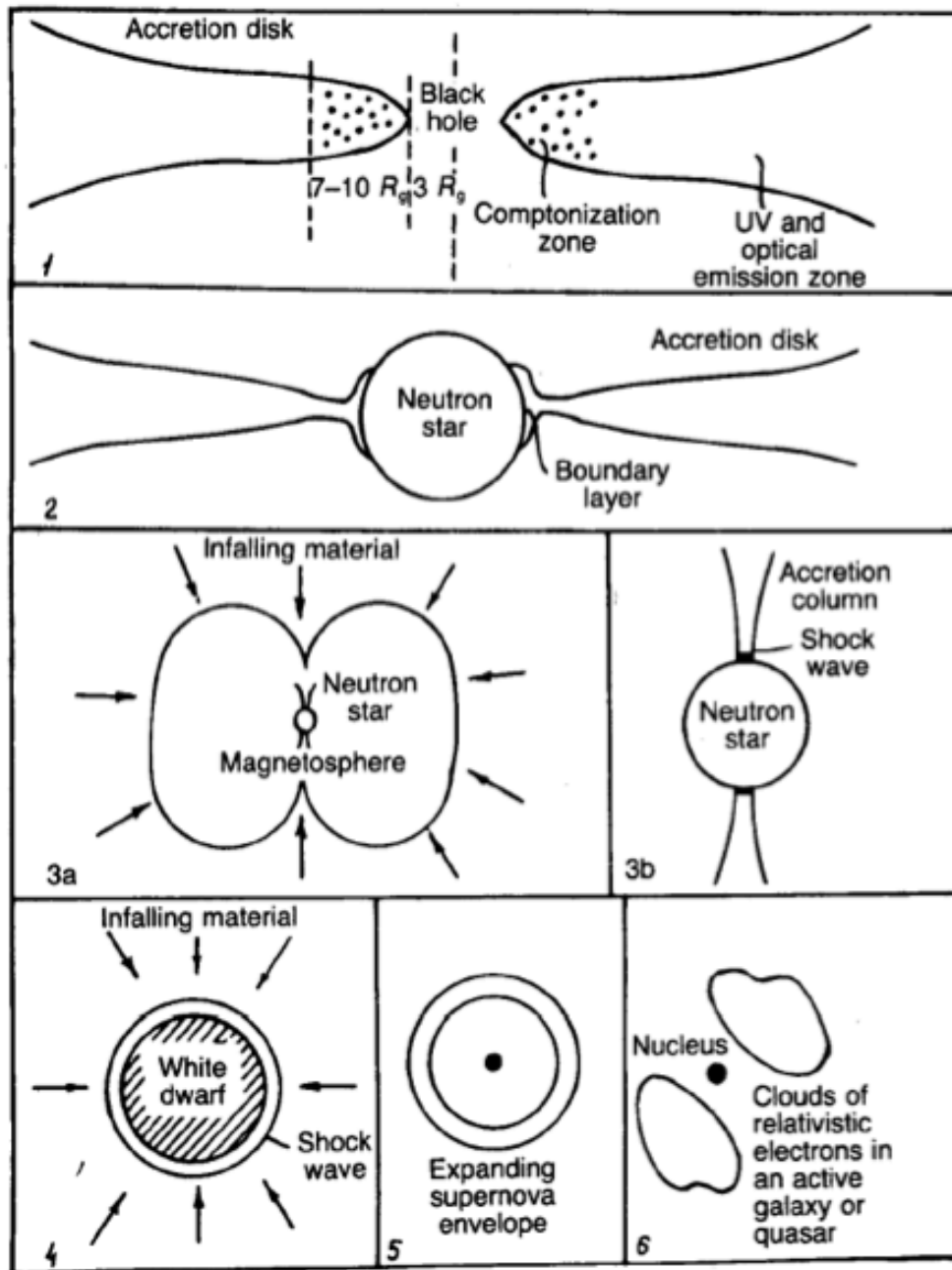
$$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} x^4 \left(n + n^2 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

Комптонизация излучения в облаке горячей плазмы



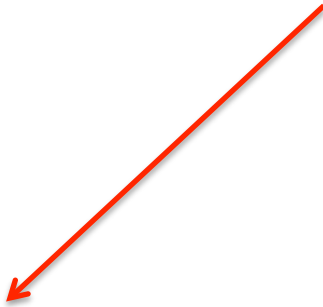
$$h\nu_0 \ll kT_e \ll m_e c^2$$

$$\tau_T = \sigma_T N_e R$$

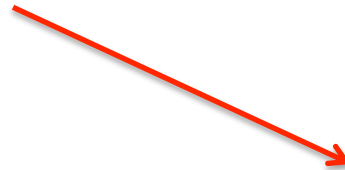


Спектр выходящего из облака излучения

$$F_{\nu}(\nu) = \int_0^{\infty} I_{\nu}(\nu, u) P(u) du$$



спектр в однородной
бесконечной среде спустя время



вероятность рассеяться
заданное число раз

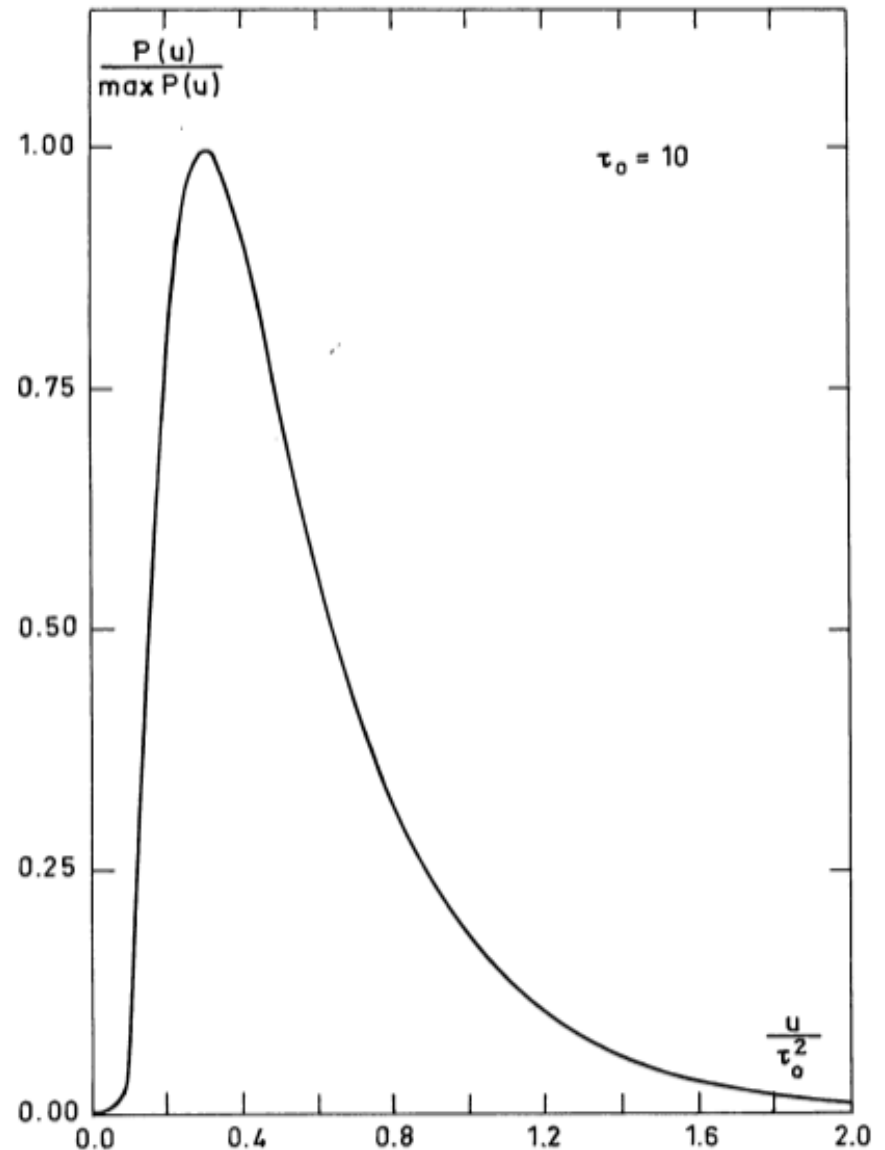
$$t = \frac{u}{\sigma_T N_e c}$$

- Если $\tau \gg 1$, средний фотон испытает $\langle u \rangle \sim \tau^2$ рассеяний в облаке

- Вероятность рассеяться много раз:

$$P(u \gg \langle u \rangle) = A \exp\left(-\frac{u}{\langle u \rangle}\right)$$

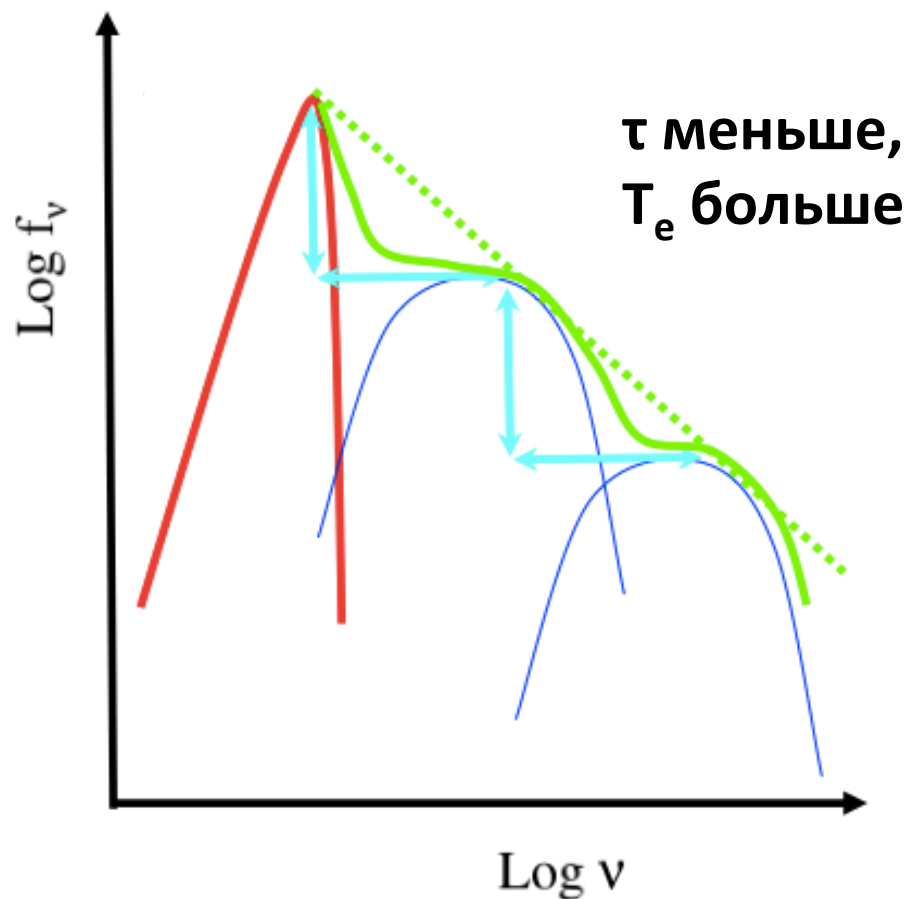
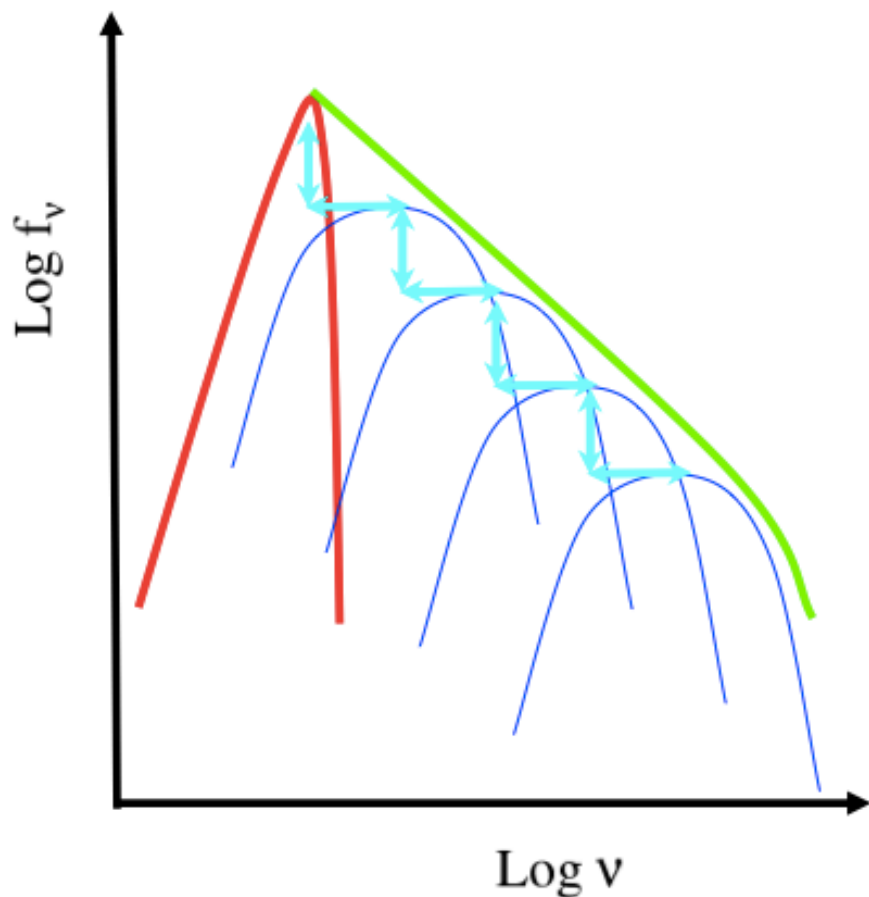
$$A \sim 1$$



$$\nu = \nu_0 \exp\left(\frac{3kT_e}{m_e c^2} u\right)$$



$$u = \frac{1}{3} \frac{m_e c^2}{kT_e} \ln \frac{\nu}{\nu_0}$$



В результате возникает (квази) степенной спектр
(аналогично ускорению Ферми)

Сюняев и Титарчук (1980) записали и решили стационарное уравнение Компанейца ($\tau \gg 1$):

$$\frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} x^4 \left(\frac{\partial n}{\partial x} + n \right) = \gamma n - \frac{\gamma f(x)}{x^3}$$

спектр источника

пространственная
диффузия фотонов

$$\gamma = A \frac{\pi^2}{3} \frac{m_e c^2}{(\tau + 2/3)^2 k T_e}$$

коэффициент зависит
от геометрии

◆ Решение при $x_0 \ll x \ll 1$:

$$F_\nu(x) = Cx^{-\alpha}$$

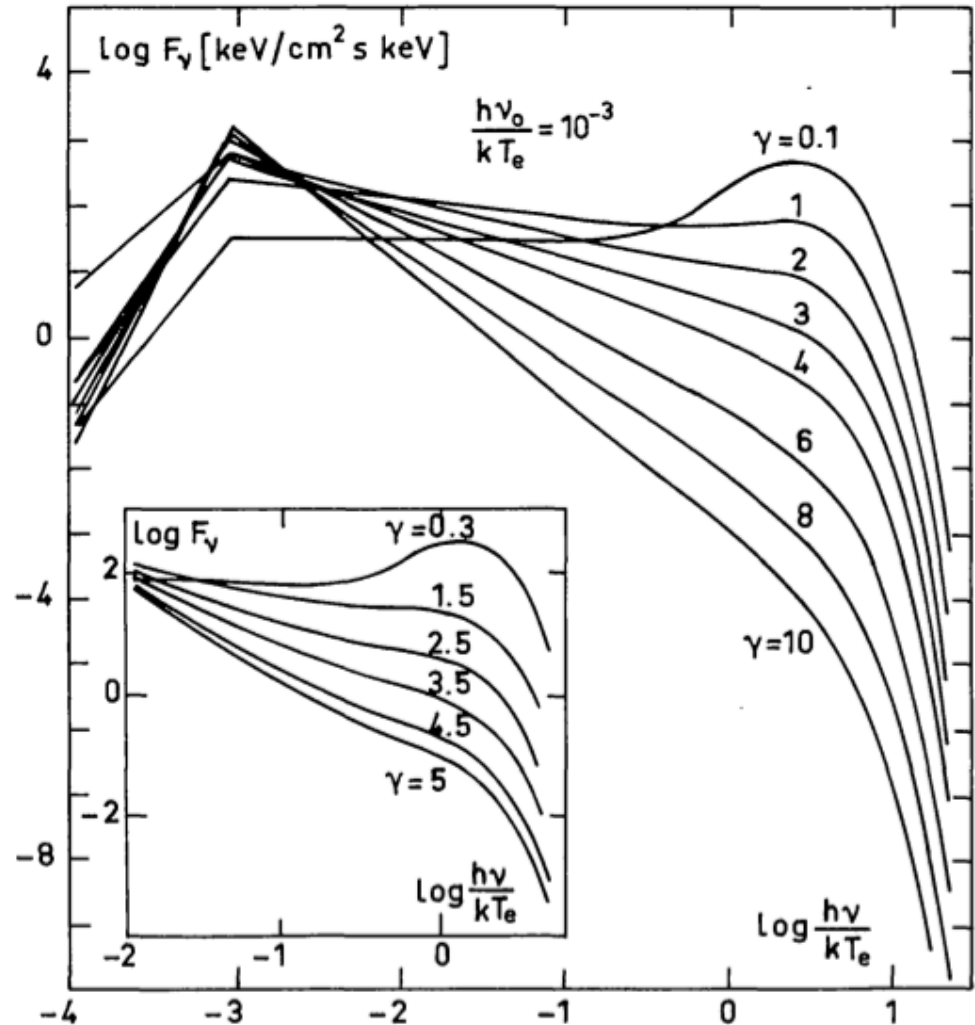
$$\alpha = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \gamma}$$

◆ При $x \gg 1$:

$$F_\nu(x) = Dx^3 e^{-x}$$

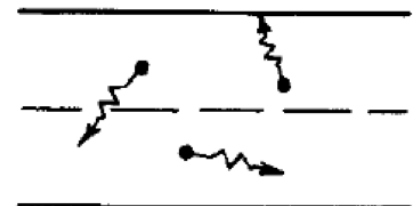
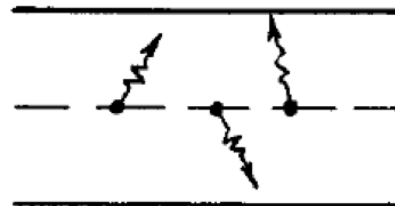
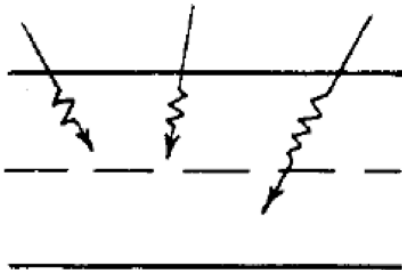
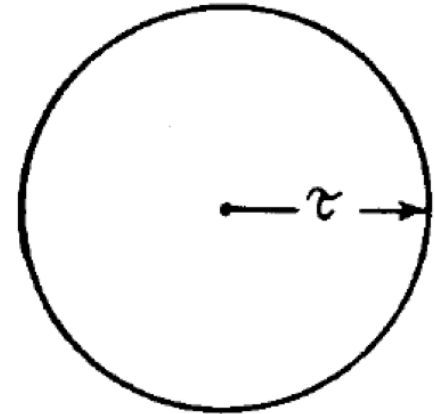
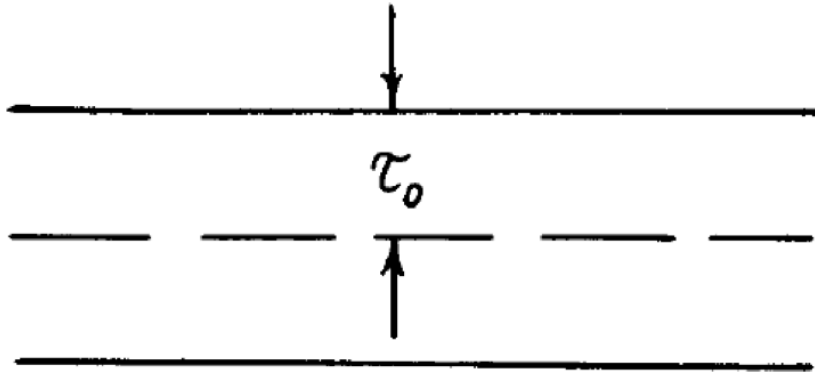
- спектр Вина

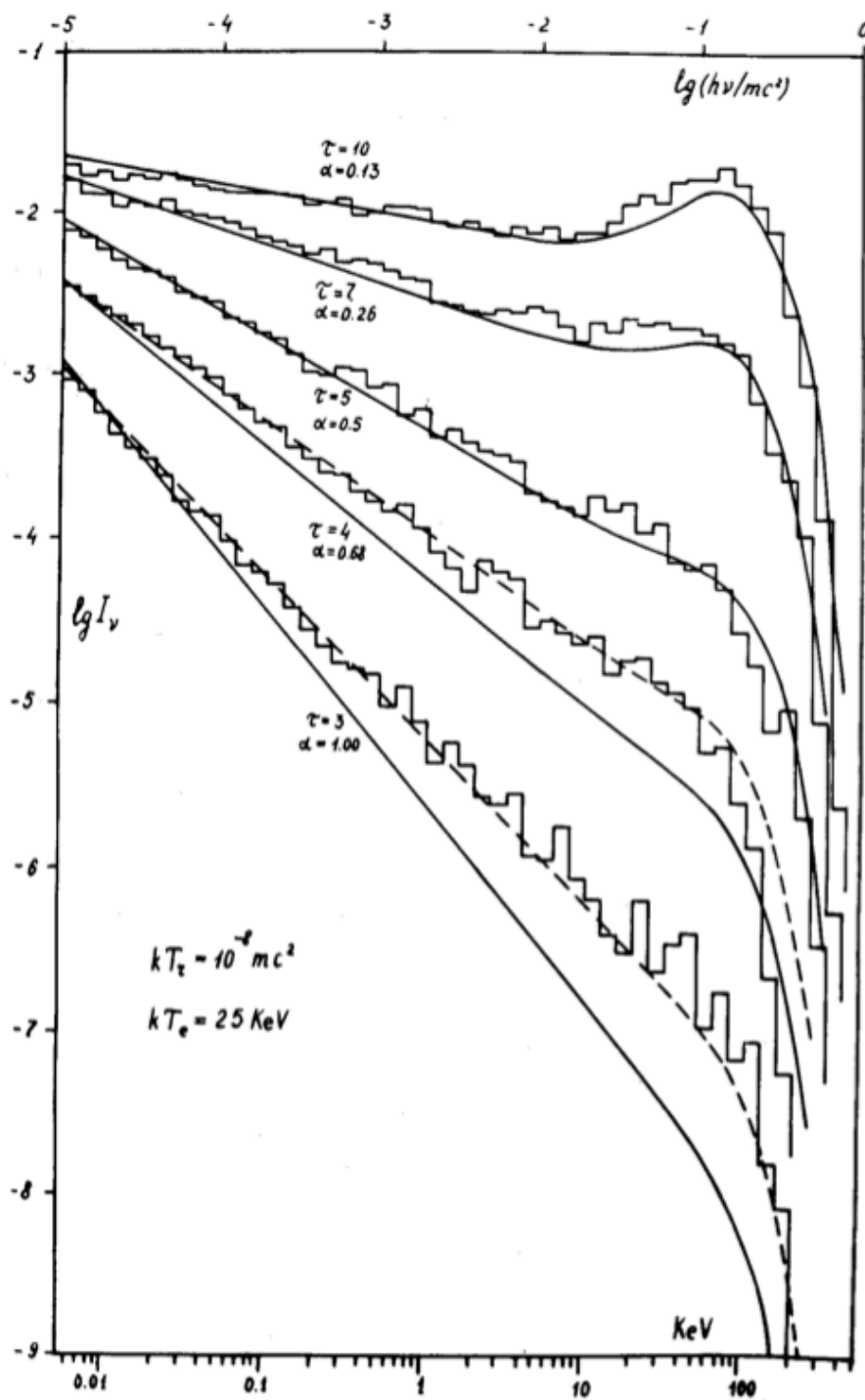
◆ При $\gamma \ll 1$ насыщение в спектр Вина

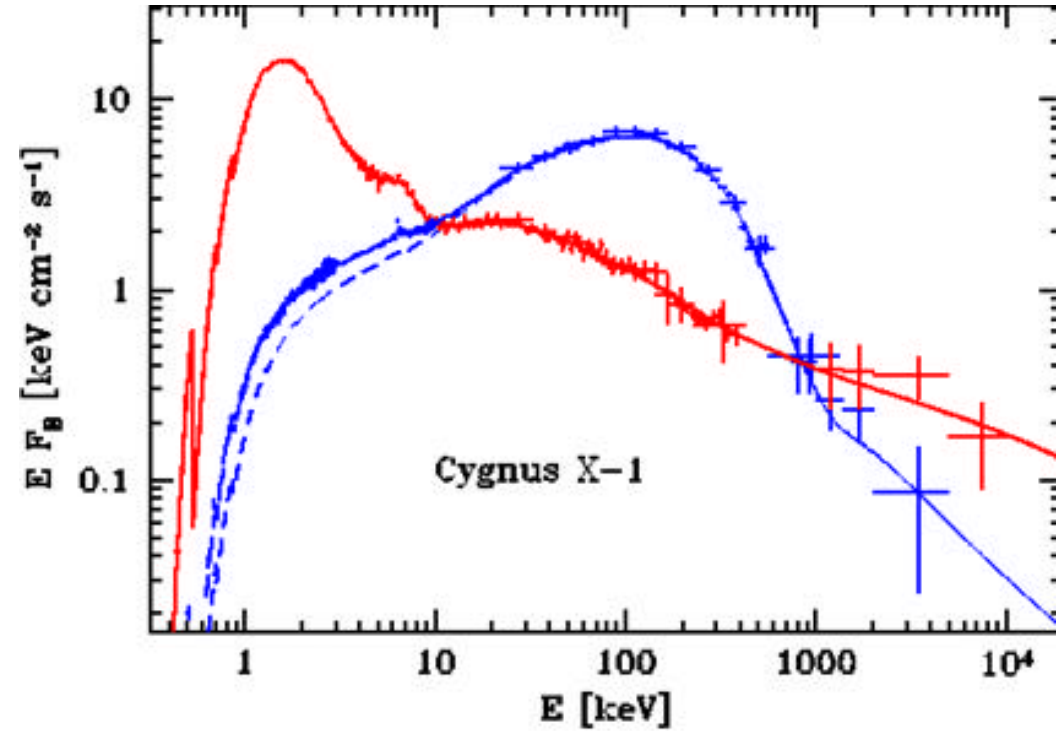
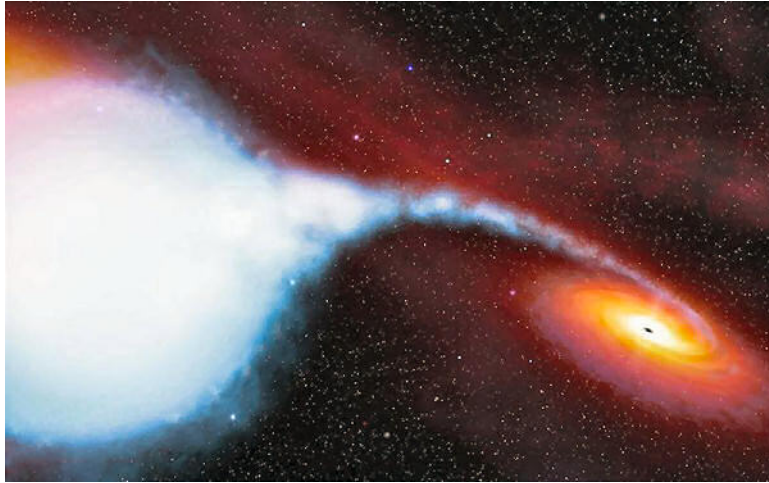


Если $\tau_T < \sim 1$ и/или $kT_e < \sim m_e c^2$

необходимы численные расчеты методом Монте-Карло

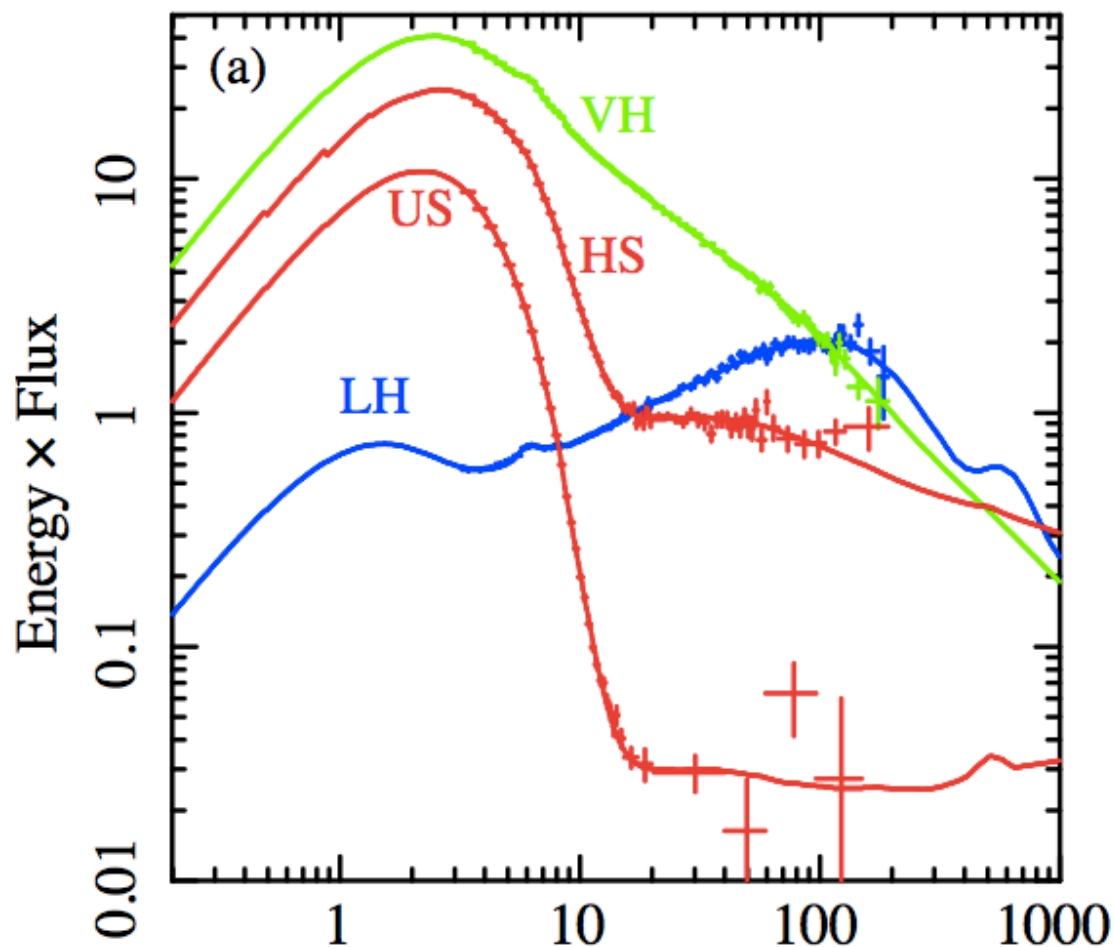
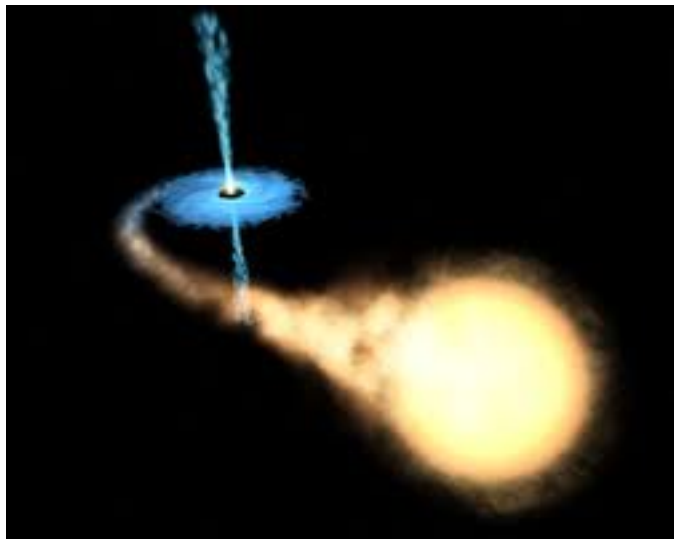






Лебедь X-1

Черная дыра в двойной звездной системе

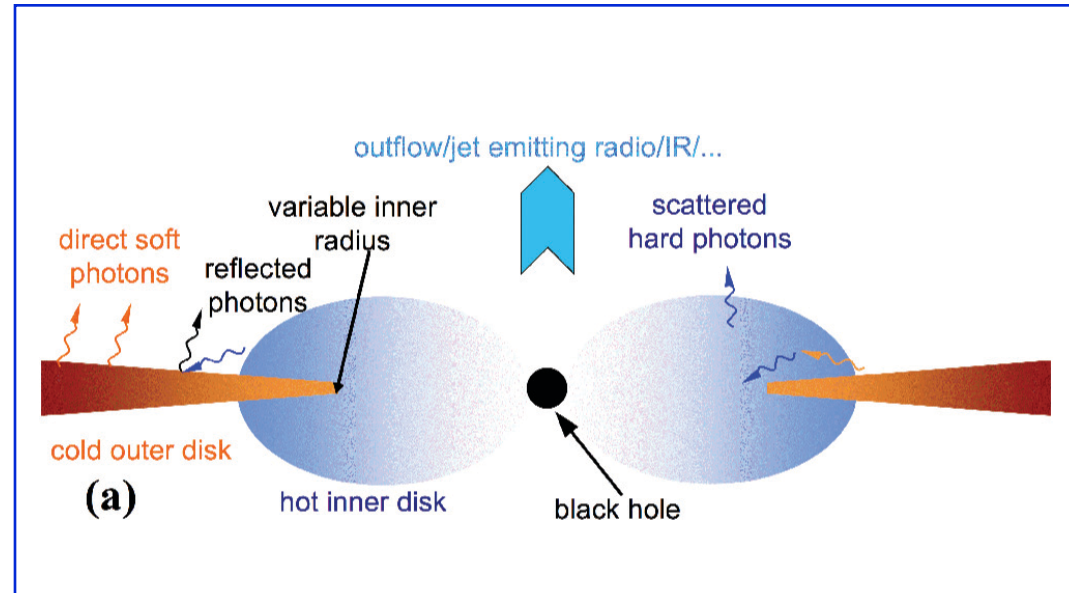


GRO J1655-40

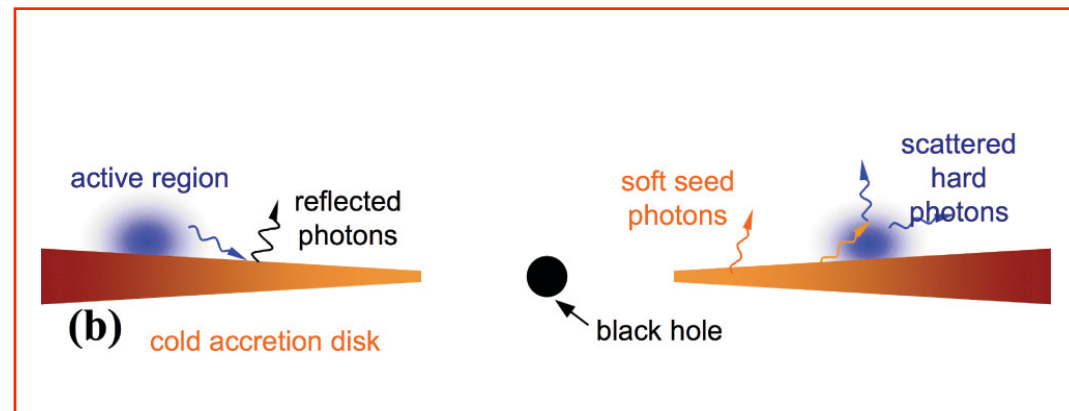
Черная дыра в двойной звездной системе, микроквазар

Возможная геометрия

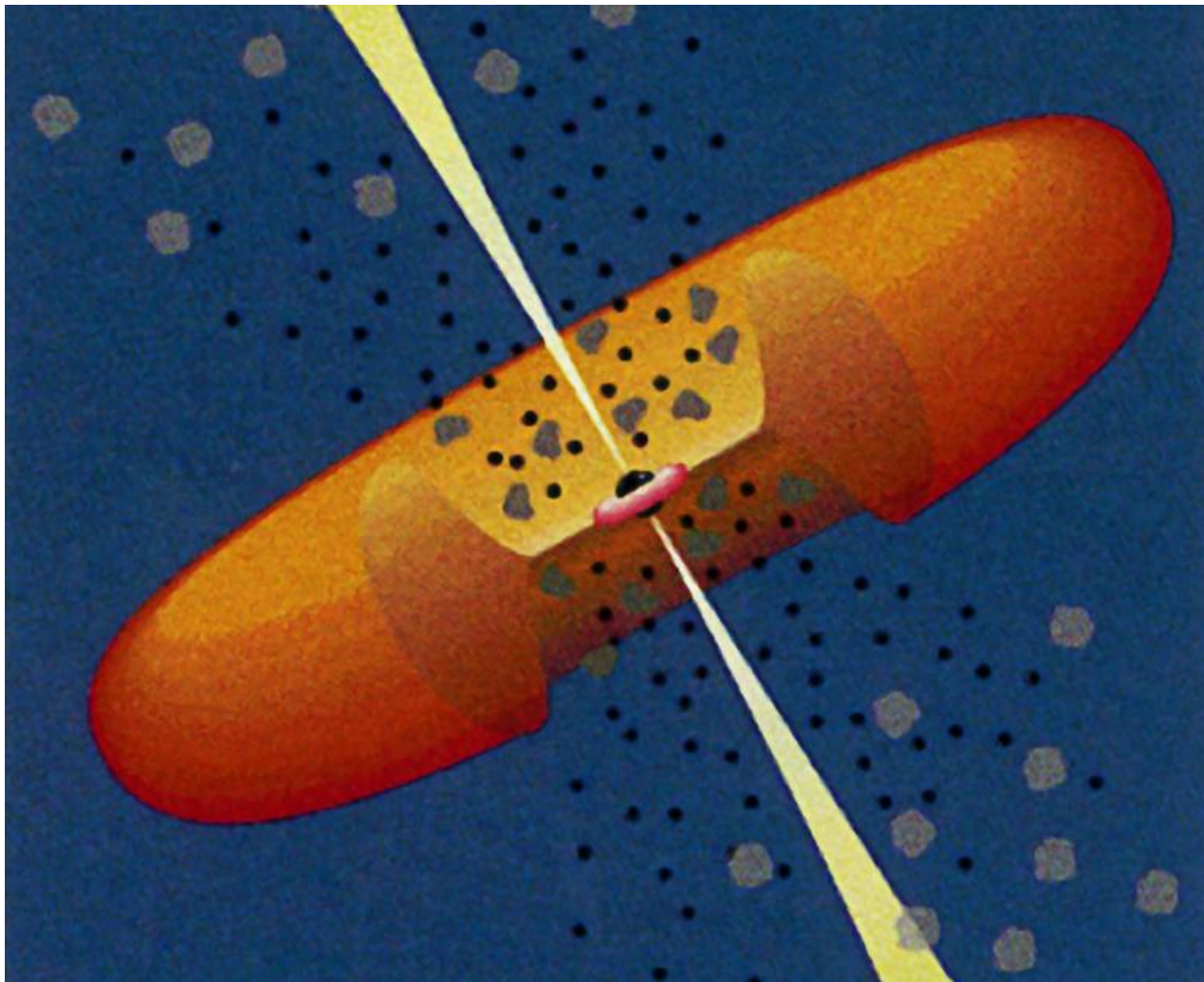
жесткое состояние

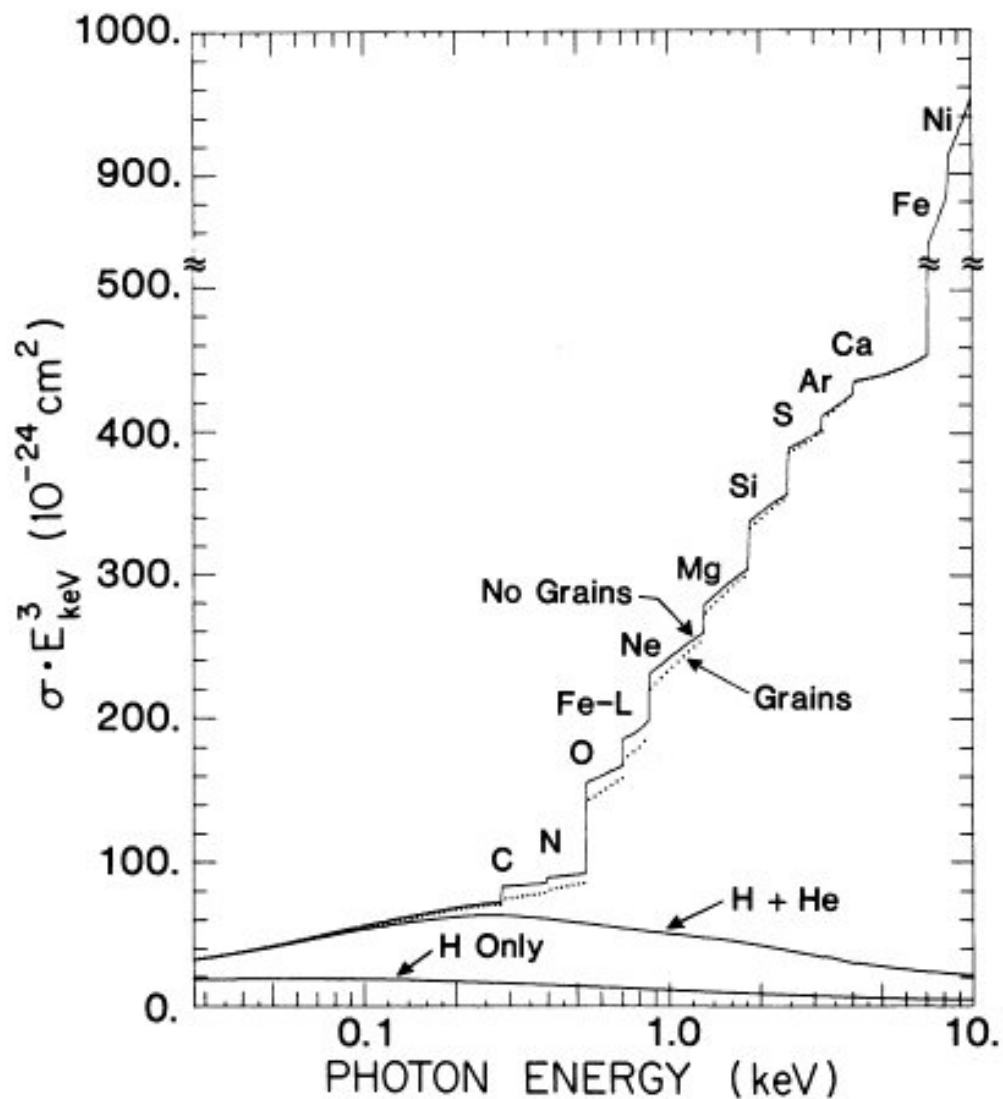


МЯГКОЕ СОСТОЯНИЕ

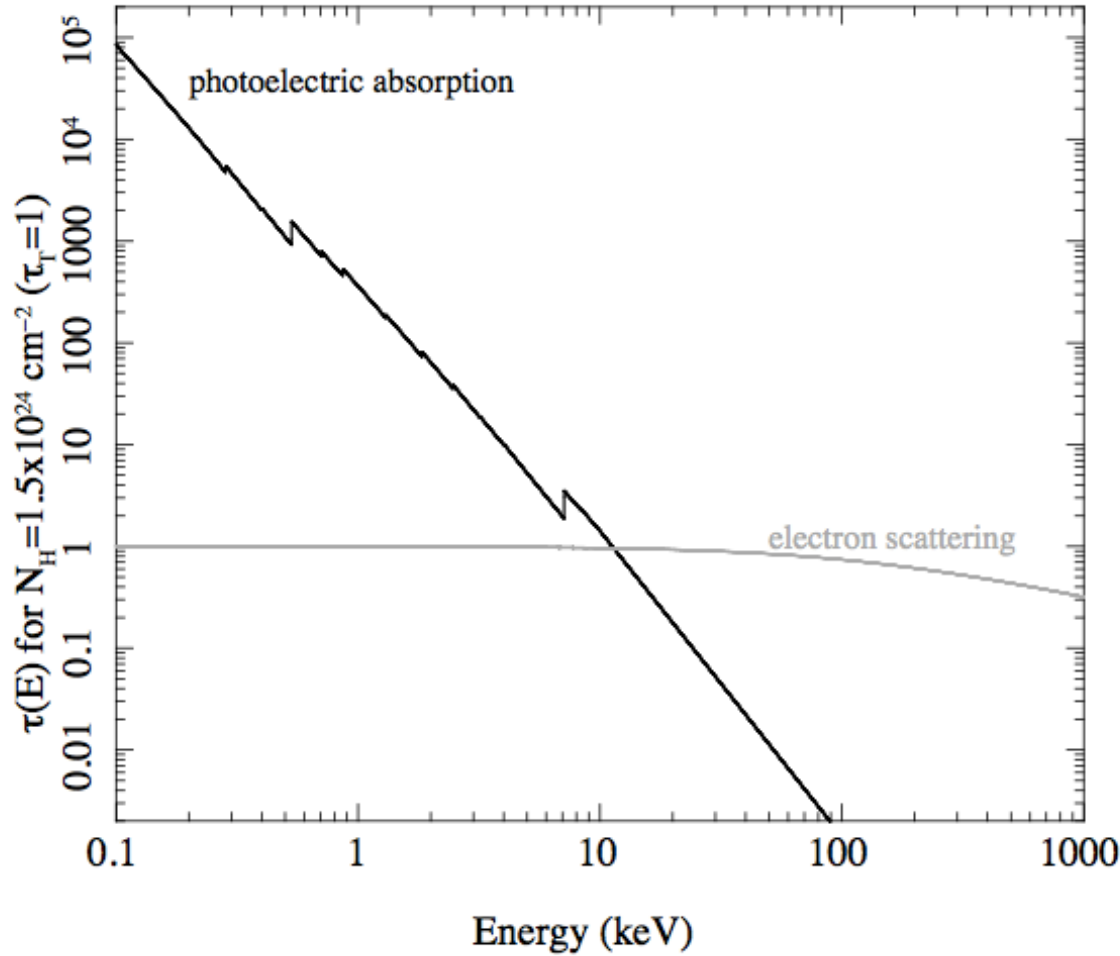


Отражение рентгеновских лучей





Сечение фотопоглощения в нейтральной среде с нормальным (солнечным) химсоставом



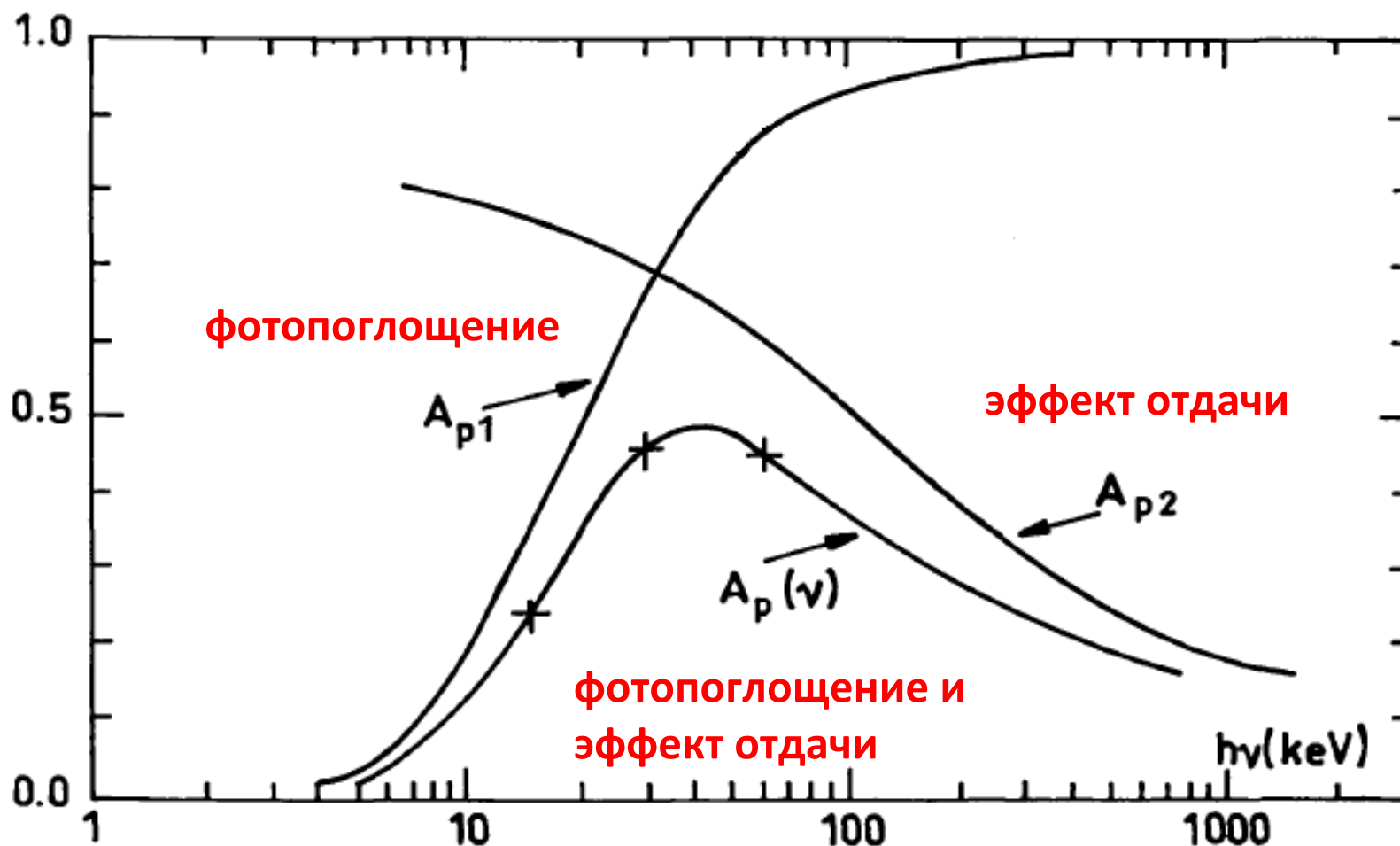
$$\sigma(\nu) = \sigma_{phot} + \sigma_{Comp}$$

$$\approx \sigma_T \left[1 + \left(\frac{10 \text{ keV}}{h\nu} \right)^{2.5} \right]$$

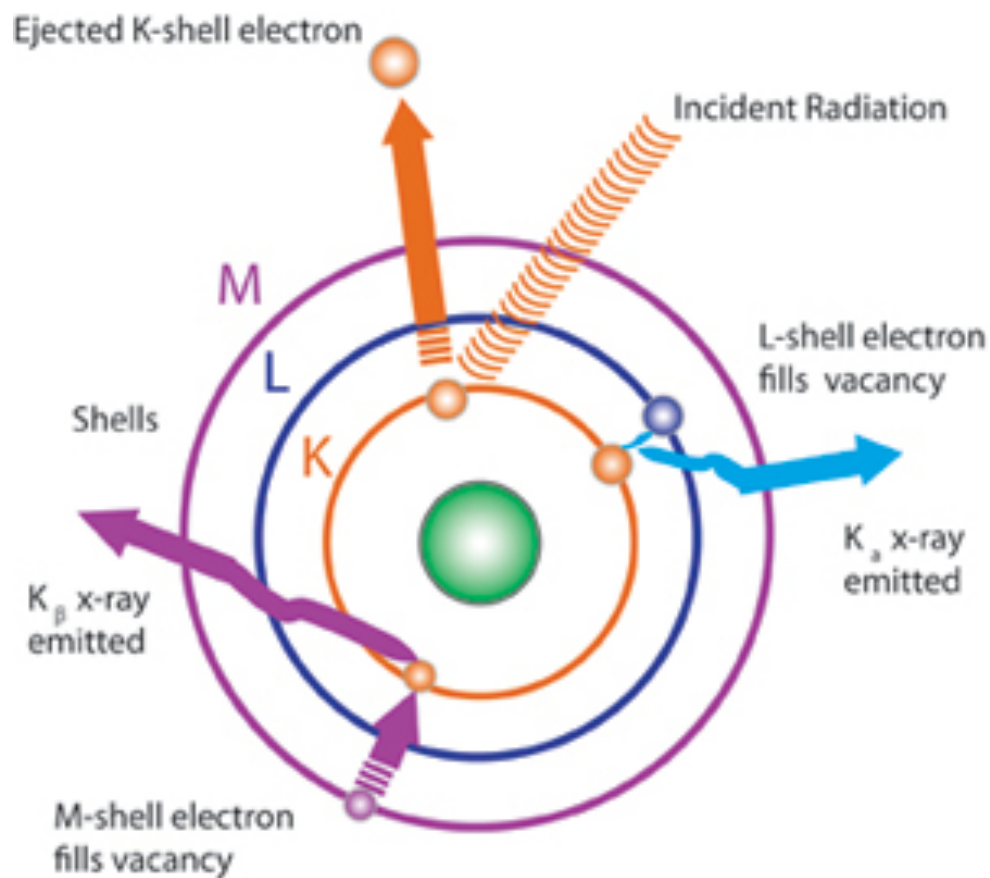
$$\sigma_T = \frac{8\pi r_e^2}{3}$$

$$= 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$$

Альбе́до полубесконечной среды



Флуорисценция. Линия 6.4 кэВ



$h\nu_0 > 7.1 \text{ кэВ}$

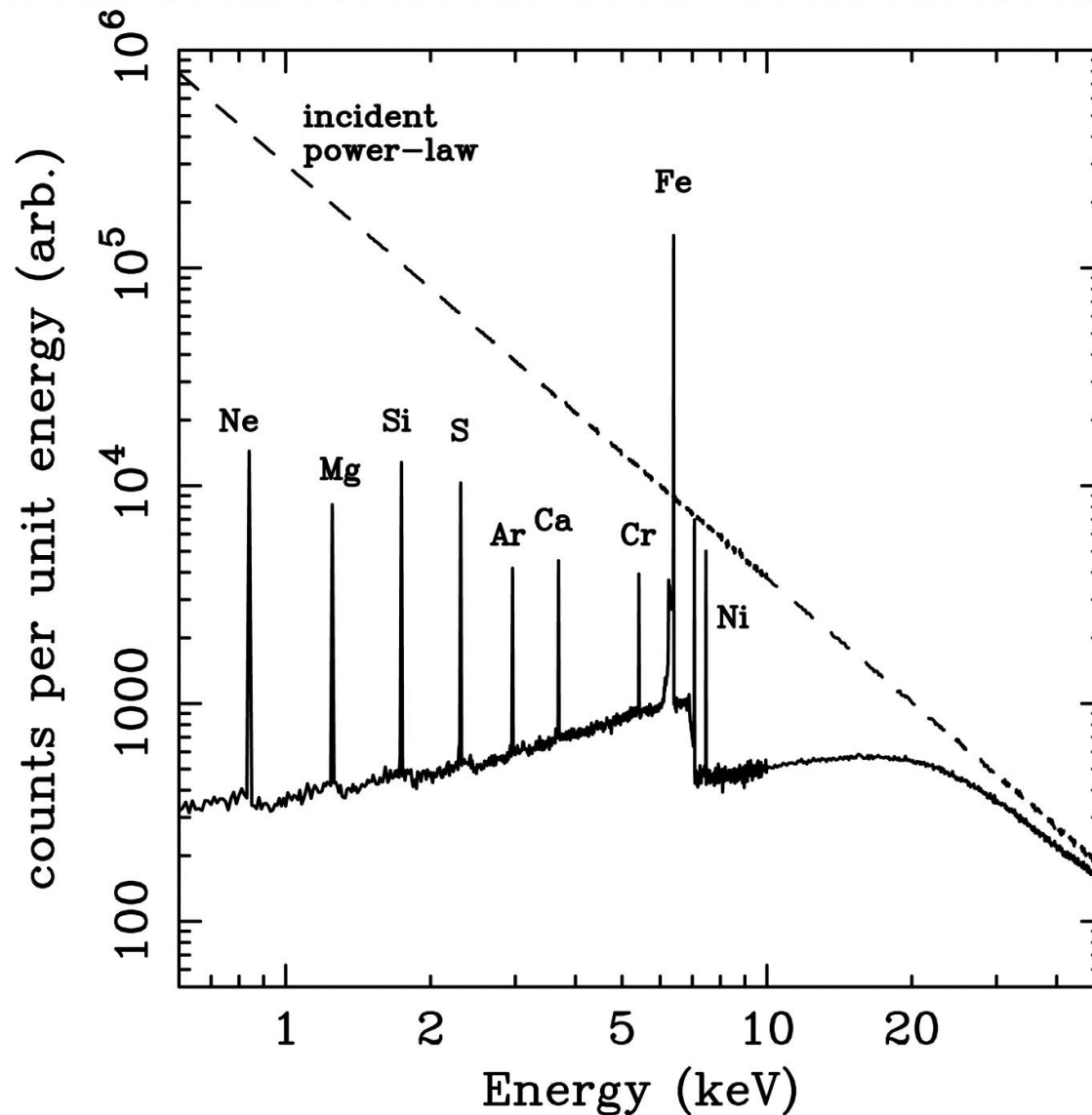
(если атомы железа не
сильно
ионизованы)

Вероятность
испускания фотона -

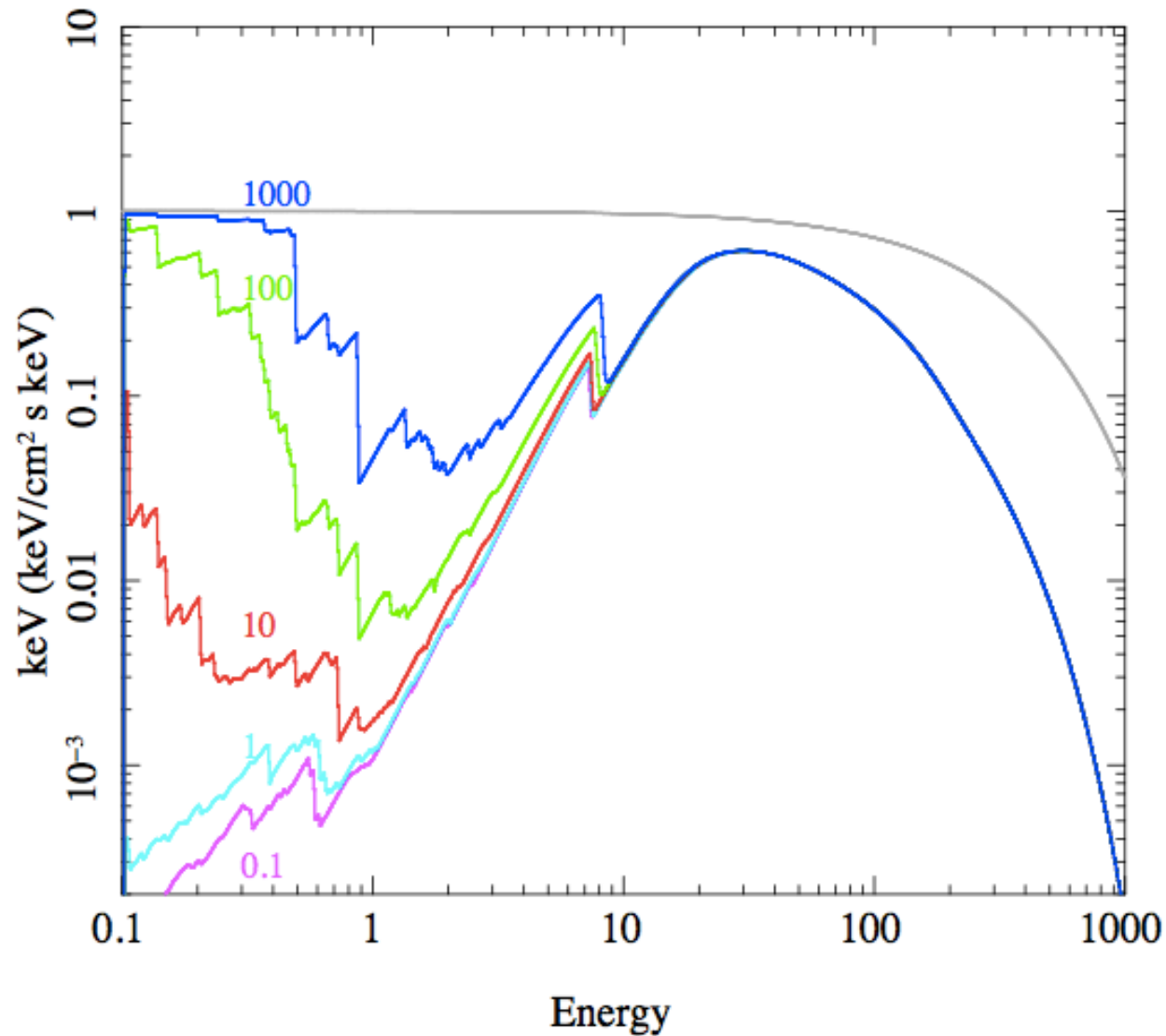
34%

Оже-электрона - **66%**

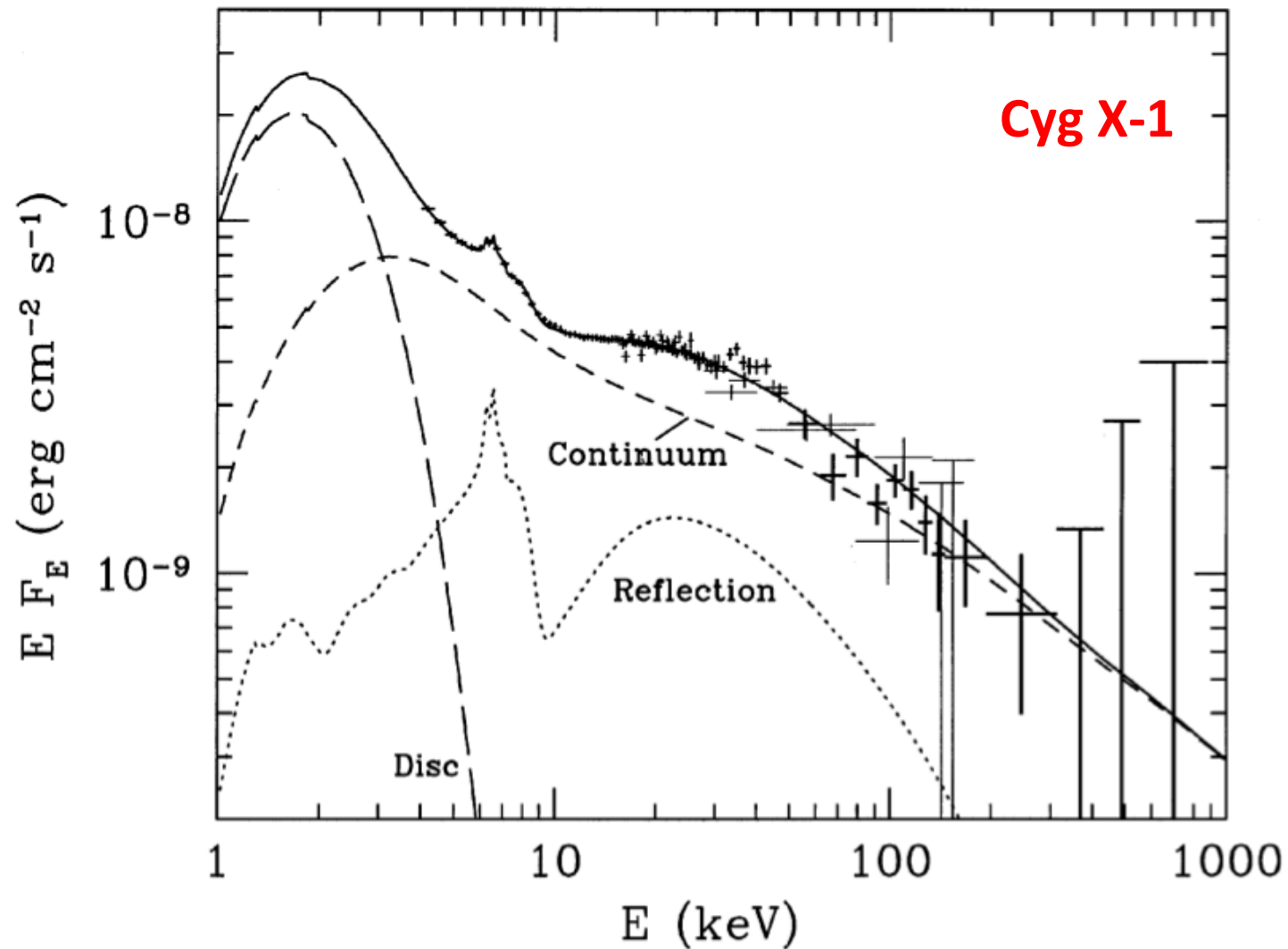
Спектр отраженного излучения



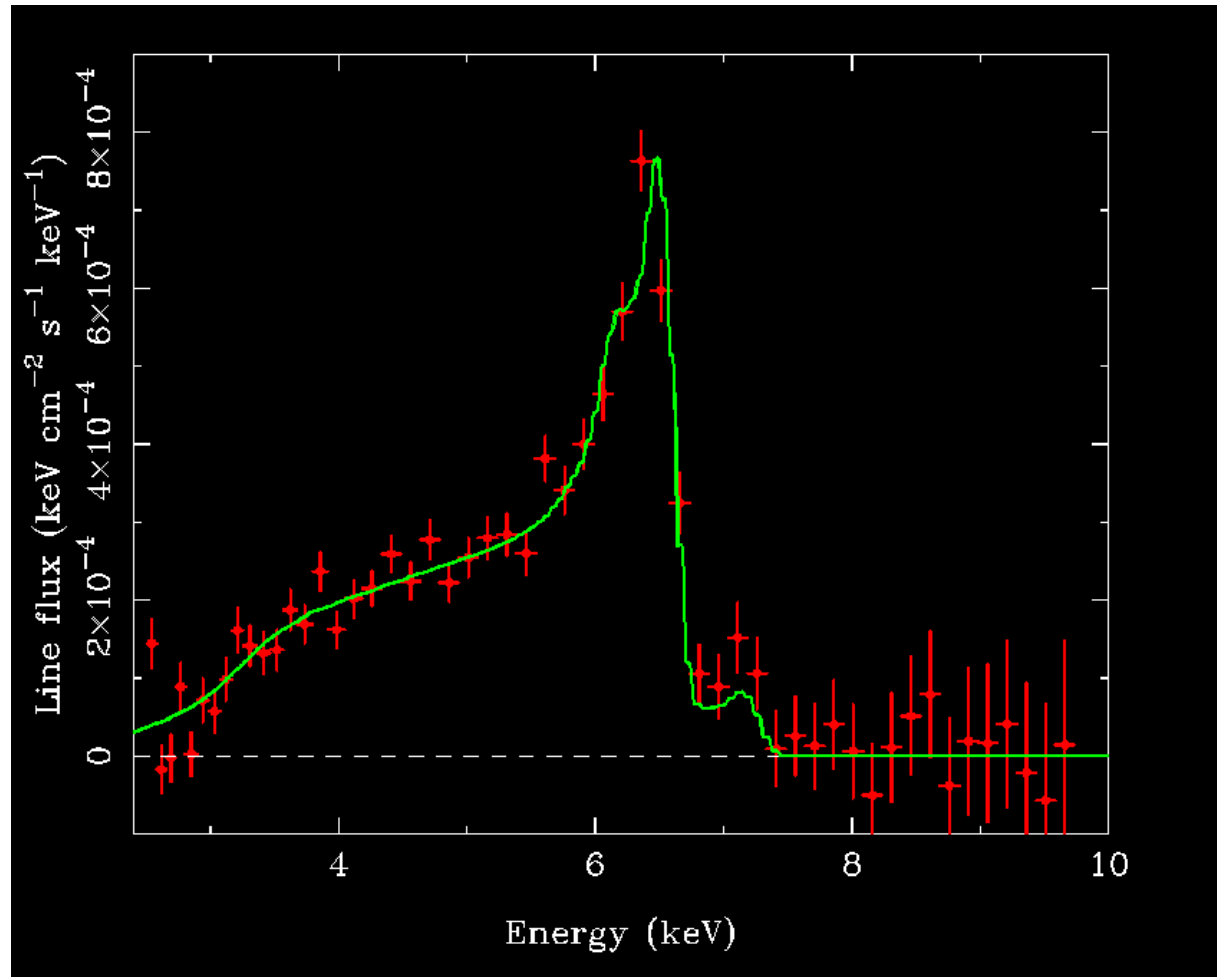
Отражение от ионизованной среды



Прямое + отраженное излучение

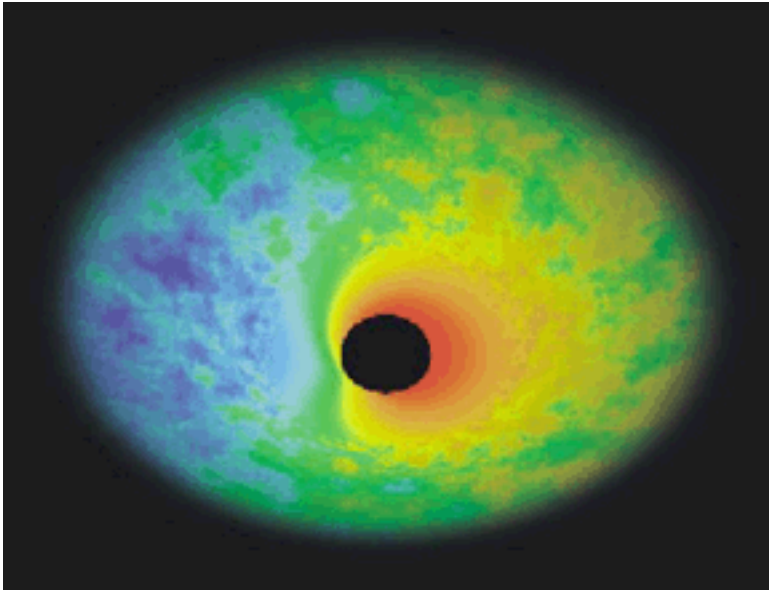


Релятивистское уширение линии 6.4 кэВ



Сейфертовская галактика MCG-6-30-15

Tanaka 1995

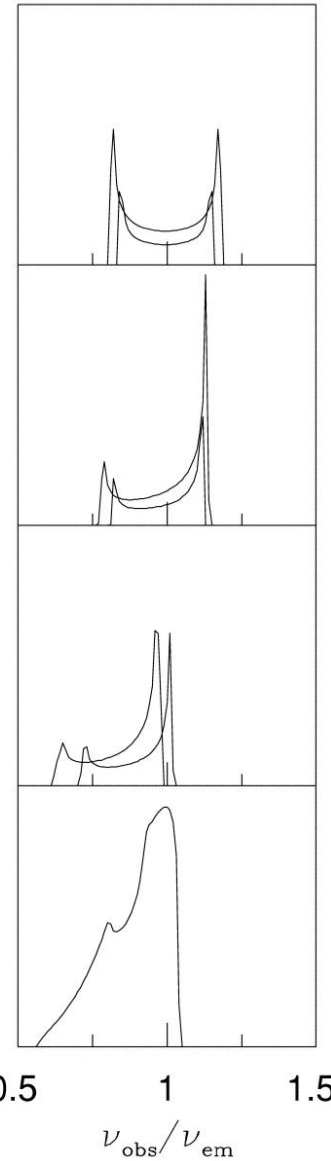


Newtonian

Special relativity

General relativity

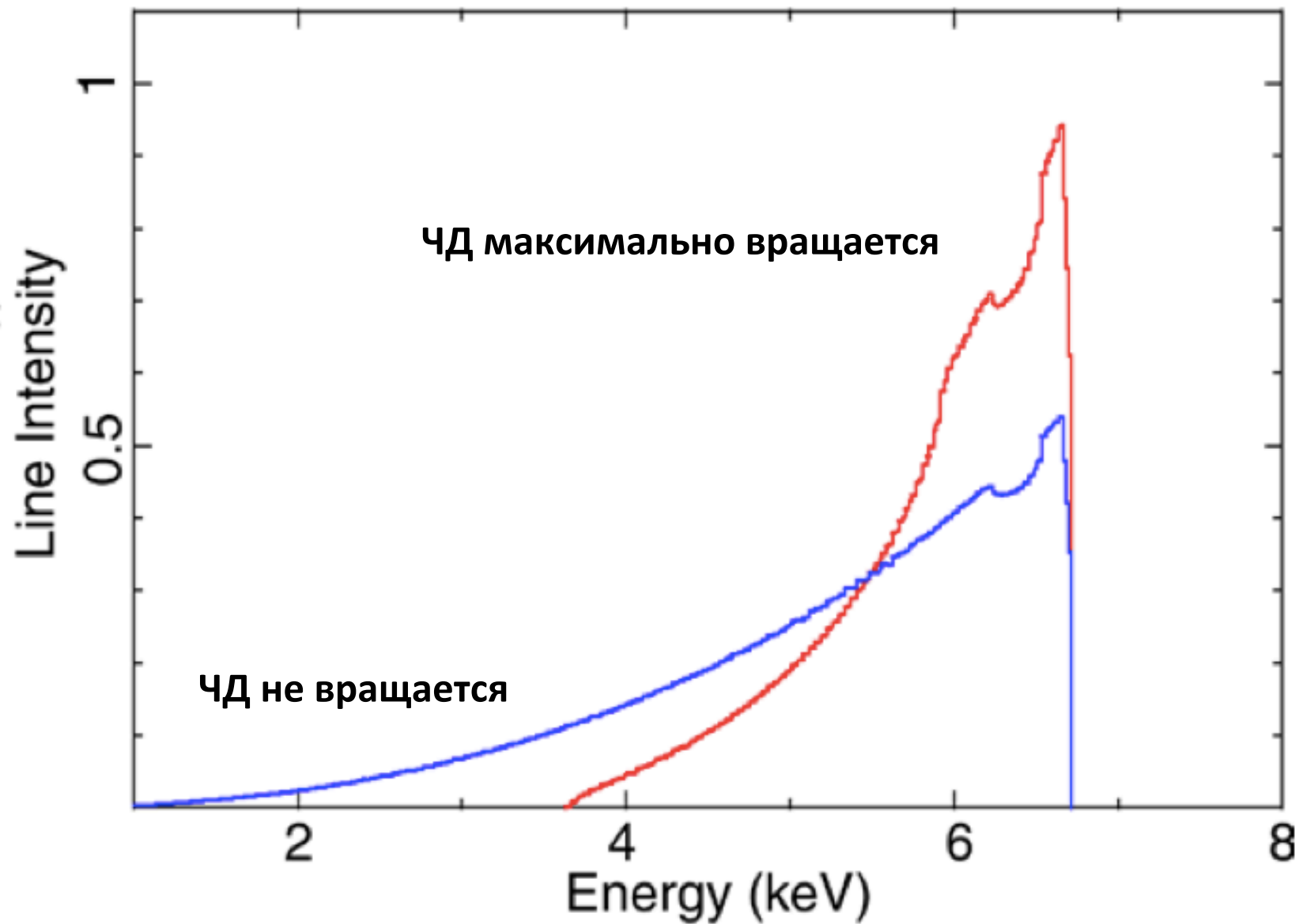
Line profile

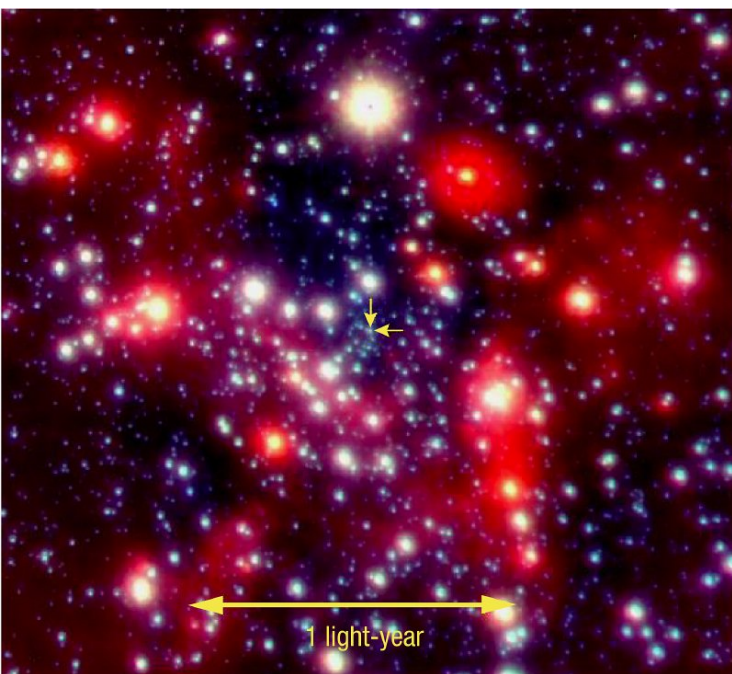


Transverse Doppler shift

Beaming

Gravitational redshift

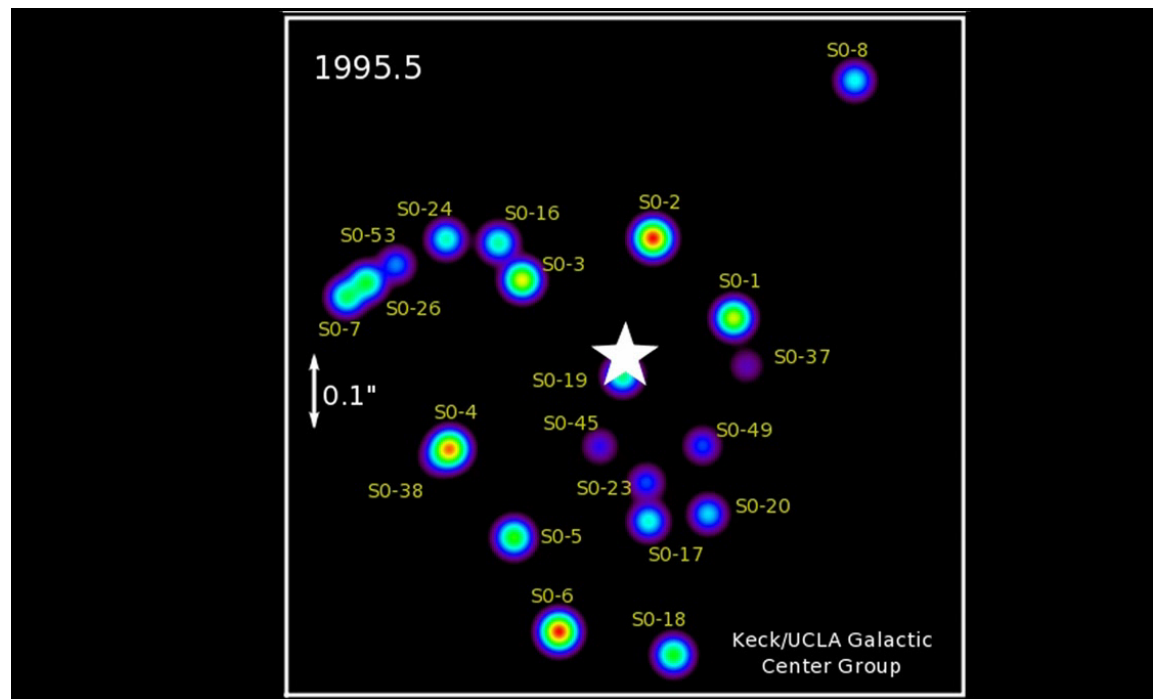




The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory

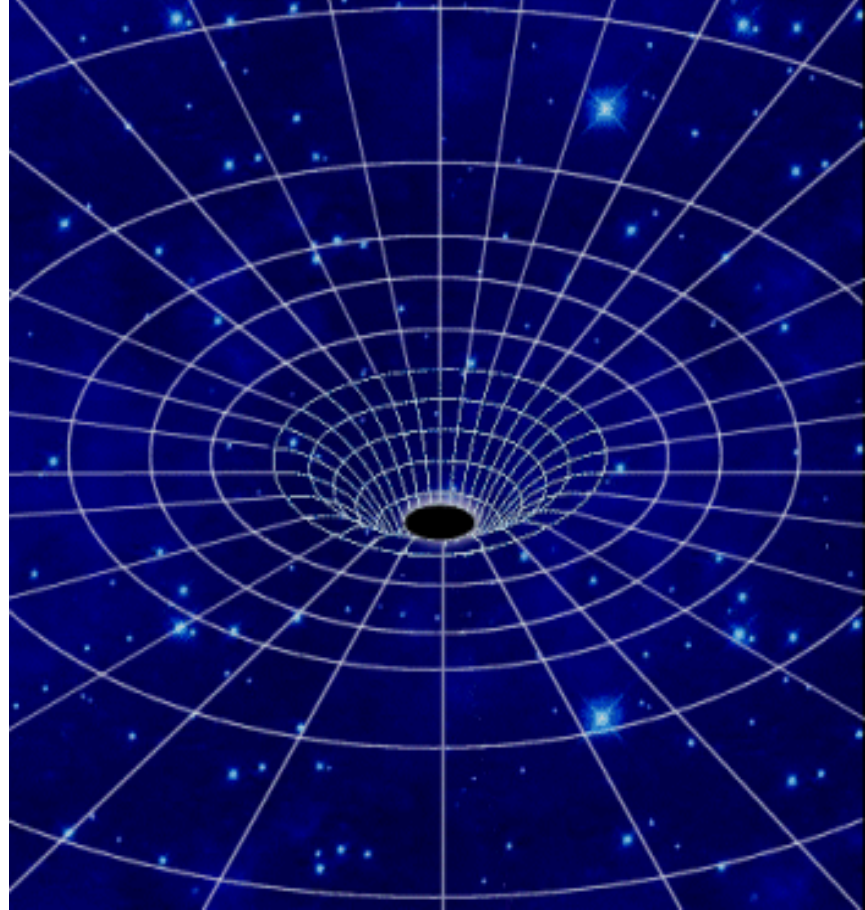
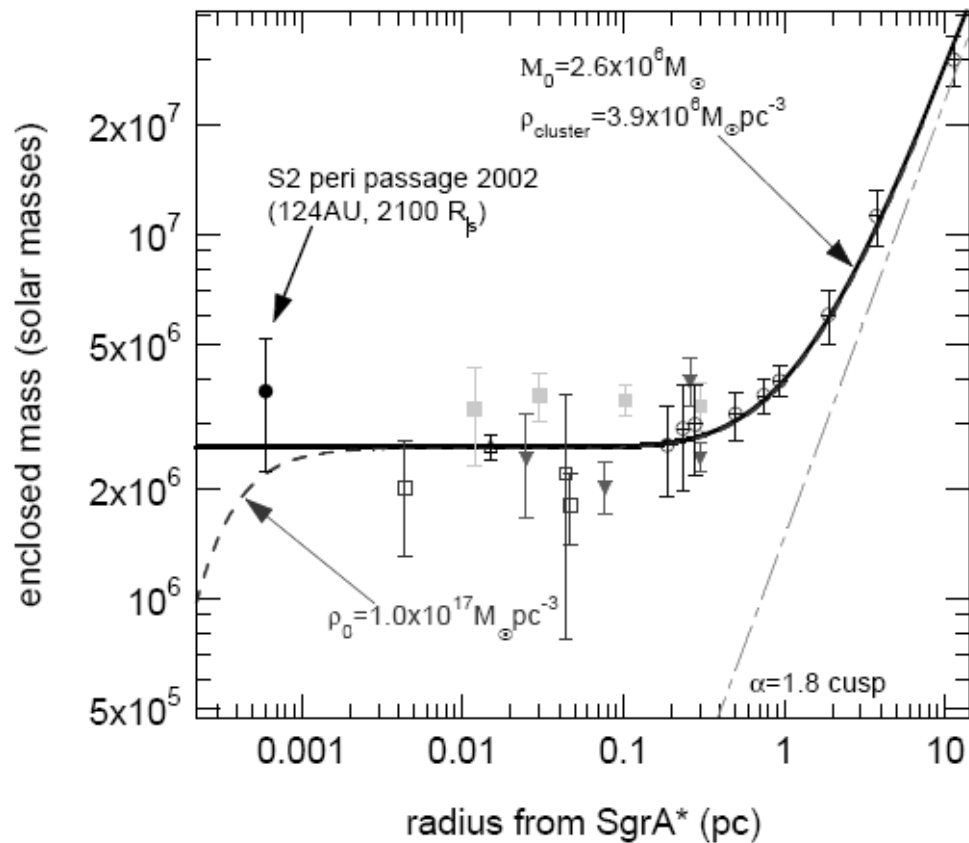


VLT, Чили



Кекк, Гавайи

Черная дыра в центре Галактики

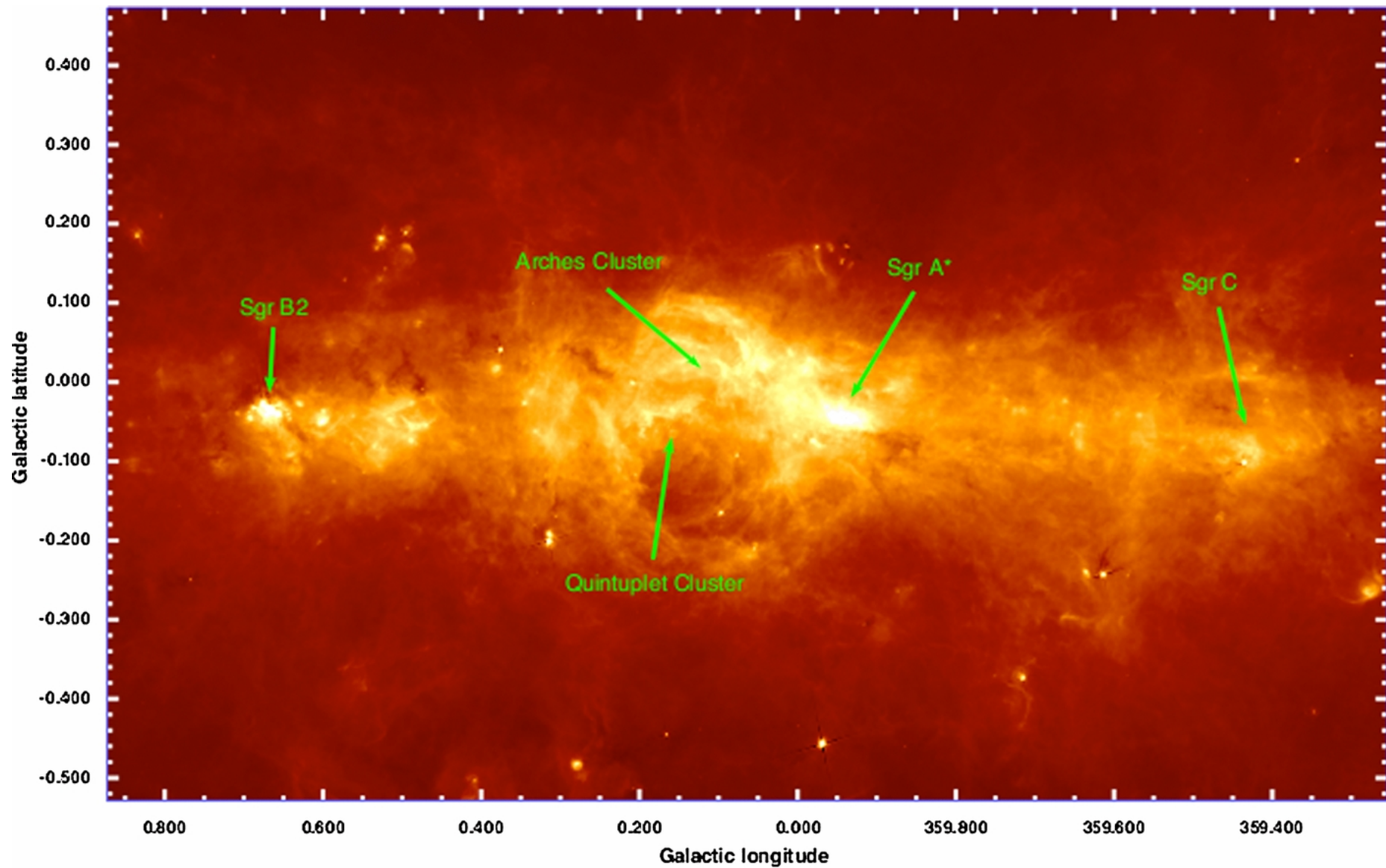


Schoedel et al. 2002

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

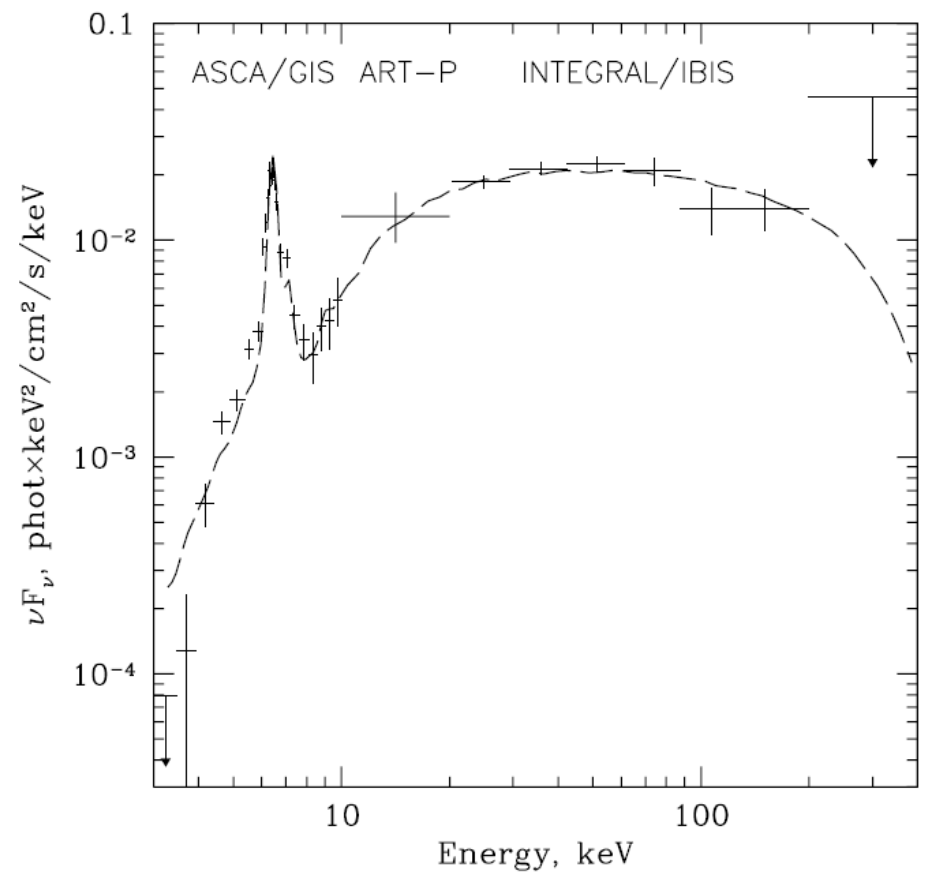
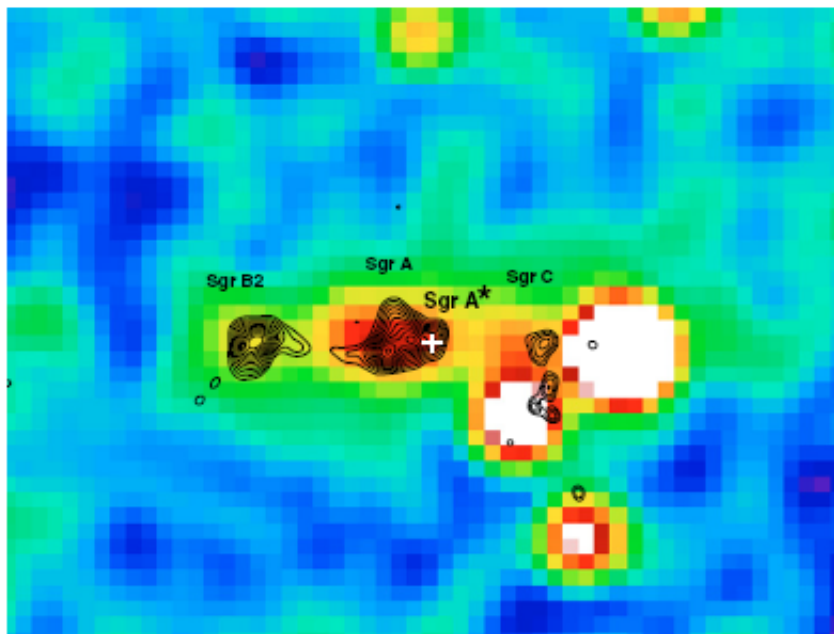
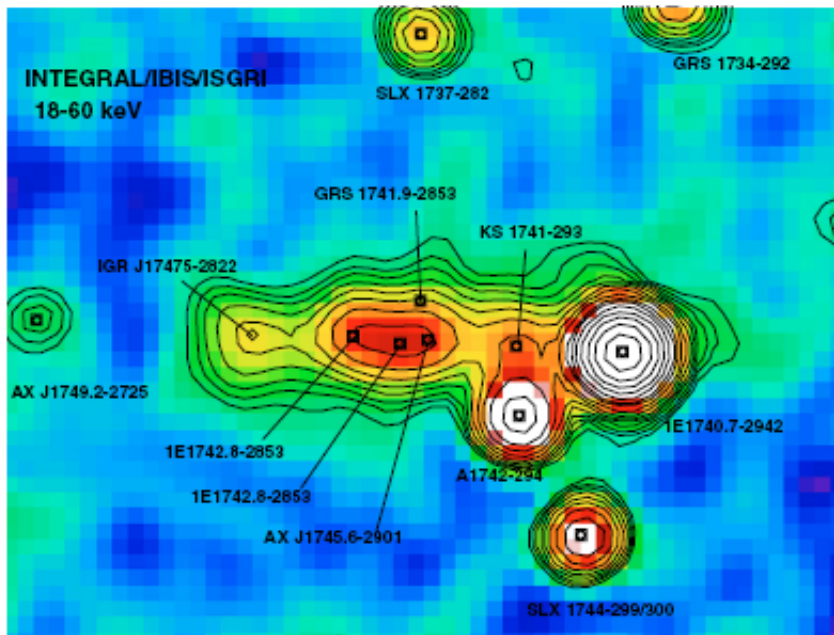
Темная область в центре Галактики размером порядка солнечной системы содержит 3-4 миллиона масс Солнца

Черная дыра!(?)

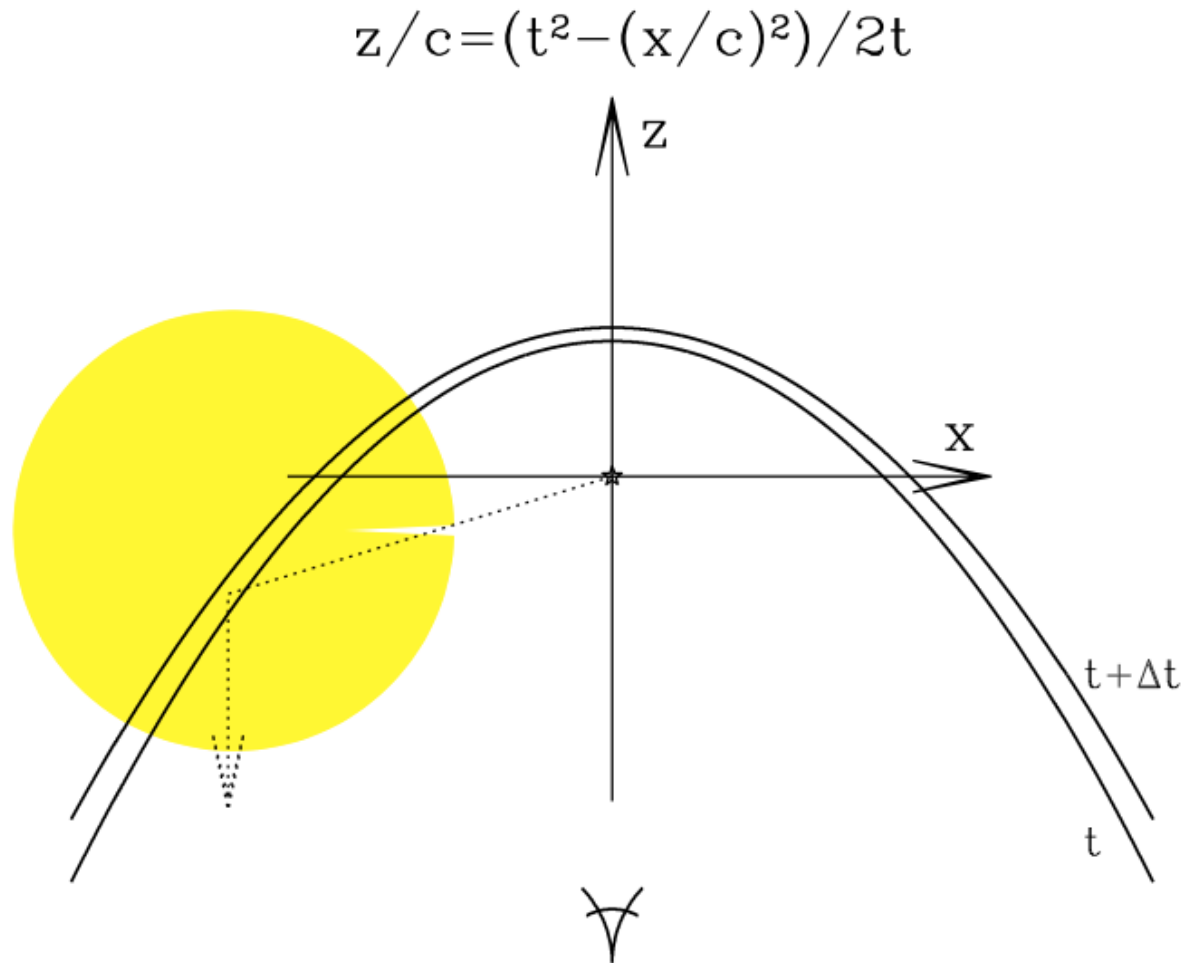


Herschel 70μm

Molinari et al. 2011

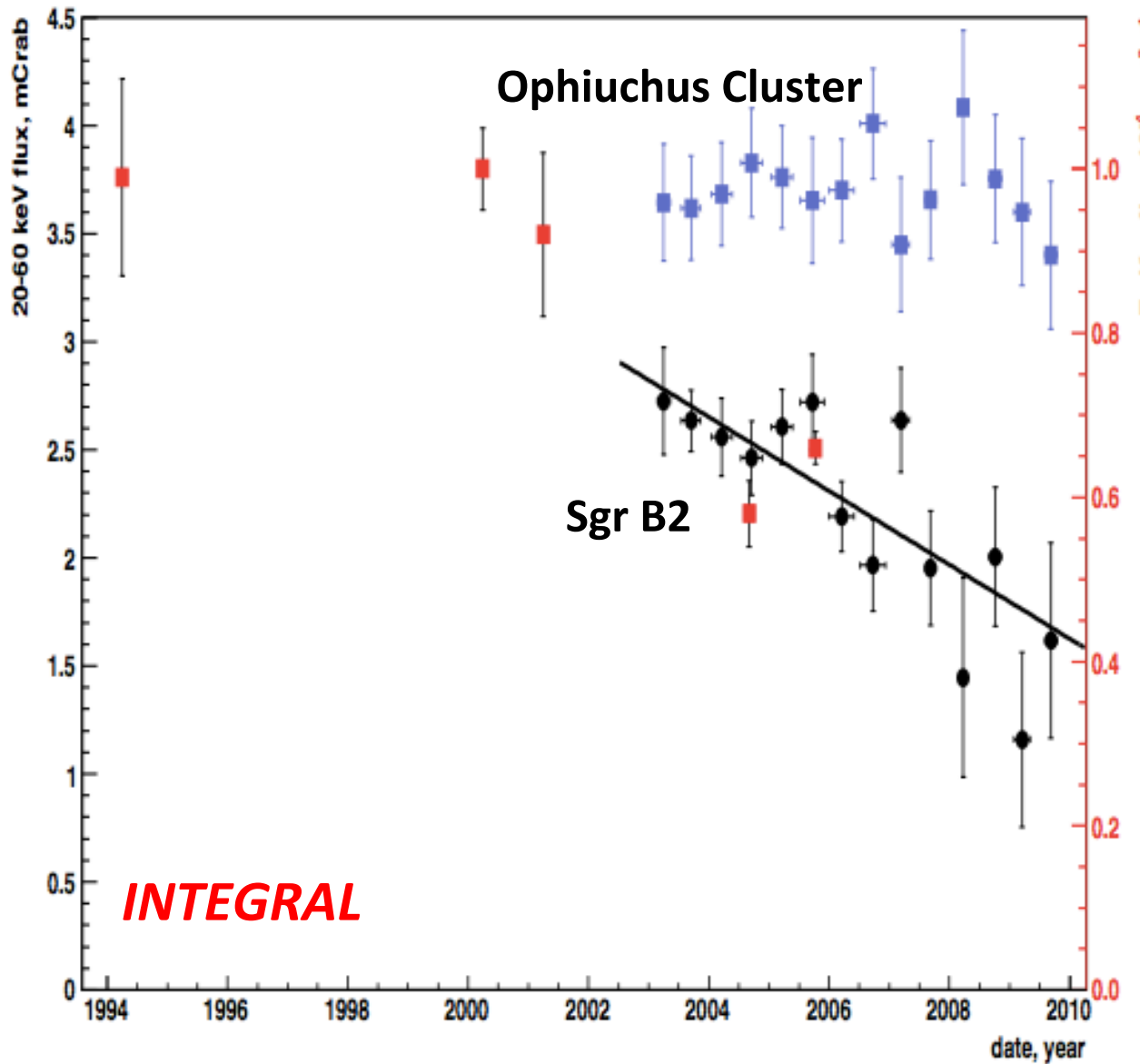


Рентгеновское эхо вспышки черной дыры в недавнем прошлом!

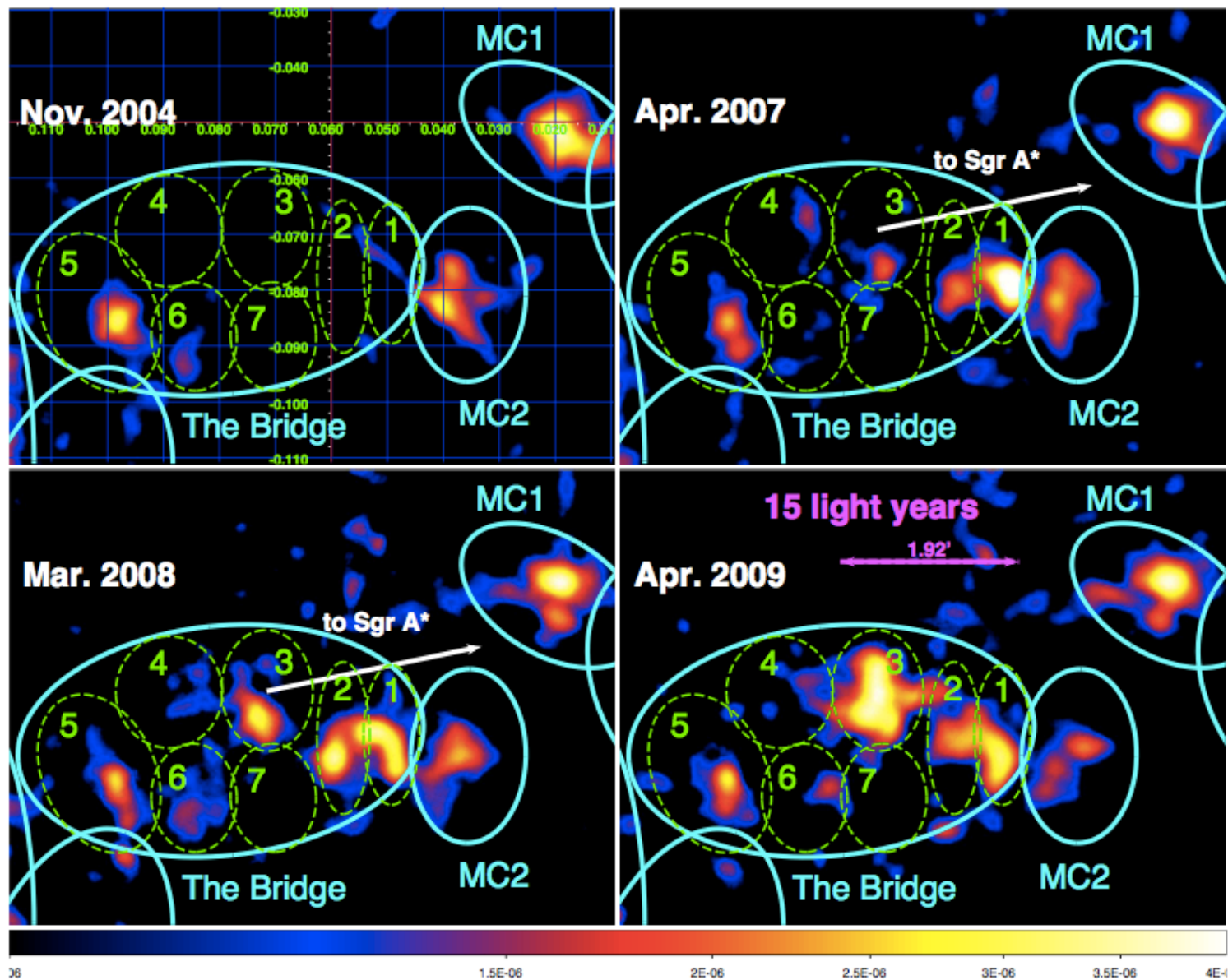


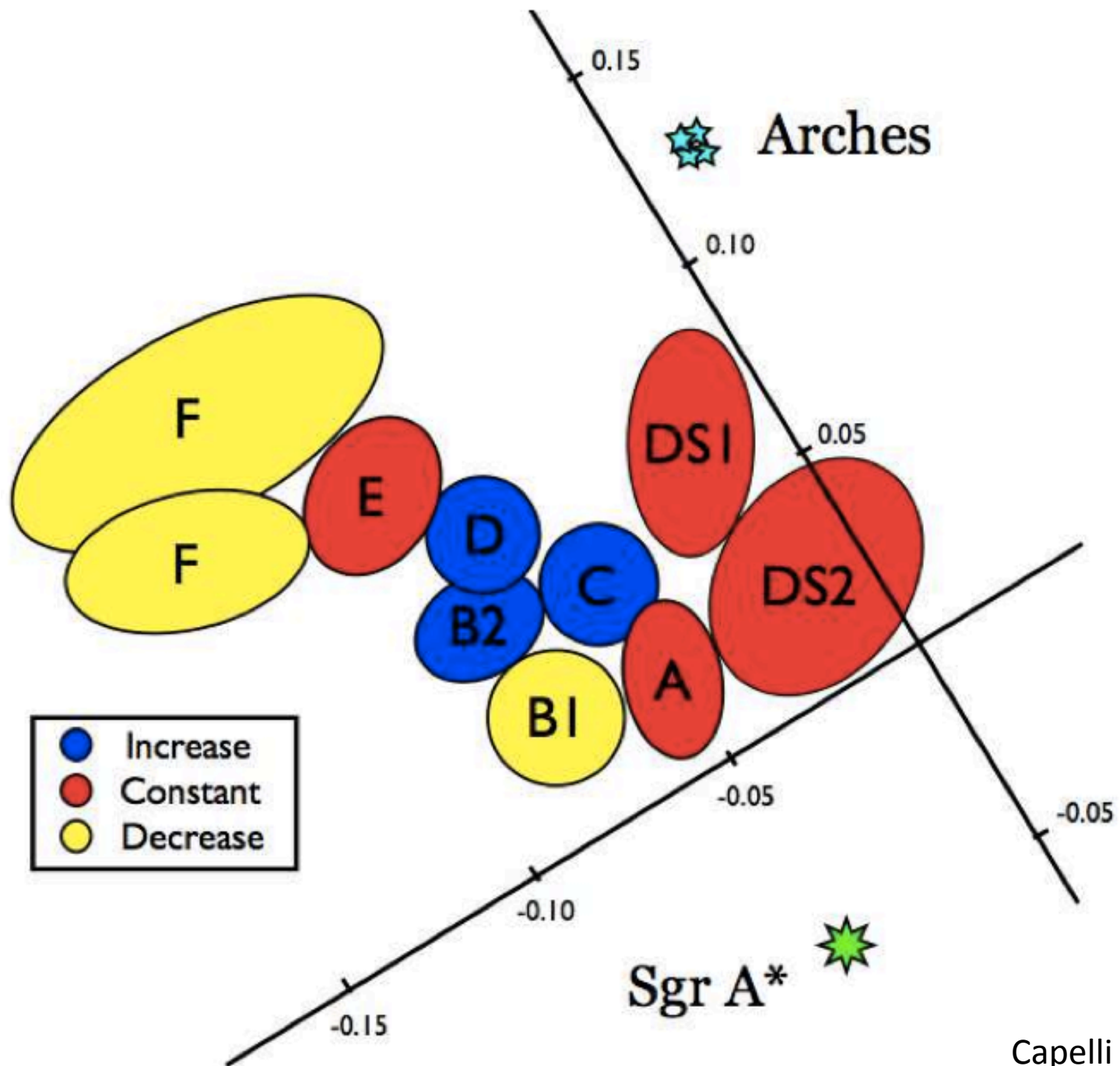
~300 лет назад рентгеновская светимость Sgr A*
составляла **$\sim 5 \cdot 10^{39}$ эрг/с**

Сейчас: **$\sim 10^{33}$ эрг/с**



Излучение в линии 6.4 кэВ





История активности ЧД в центре Галактики

