

Комптонизация и формирование спектров рентгеновского излучения астрофизических объектов

Сергей Юрьевич Сазонов

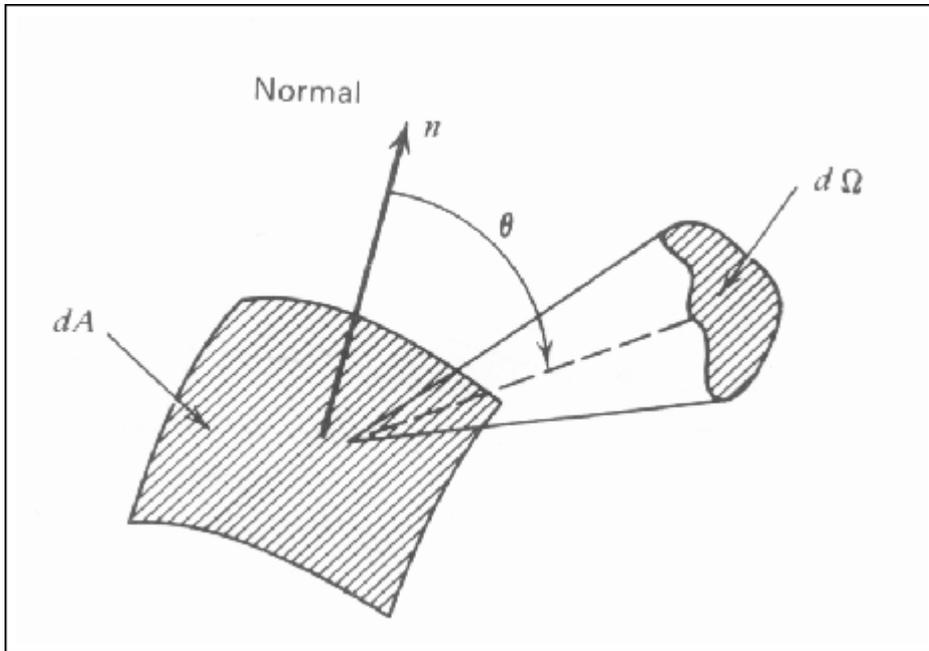
Отдел астрофизики высоких энергий ИКИ РАН

Основные темы

- ❑ **Механизмы излучения и поглощения ЭМ волн в астрофизике высоких энергий. Рассеяние излучения на электронах: свойства в различных пределах.**
- ❑ **Уравнение Компанейца. Эффект Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик.**
- ❑ **Формирование степенных спектров жесткого рентгеновского излучения при аккреции вещества на релятивистские компактные объекты. Решение Сюняева-Титарчука.**
- ❑ **Взаимодействие рентгеновского излучения с холодным веществом. Отражение от аккреционных дисков. Выход рентгеновского излучения из оболочек сверхновых звезд. Взаимодействие излучения массивной черной дыры с газом в ядре Галактики.**

Излучение и поглощение ЭМ волн

Основные понятия



**Интенсивность излучения
(поверхностная яркость)**

$$I_v = \frac{dE}{\cos \Theta dA dt d\Omega dv}$$

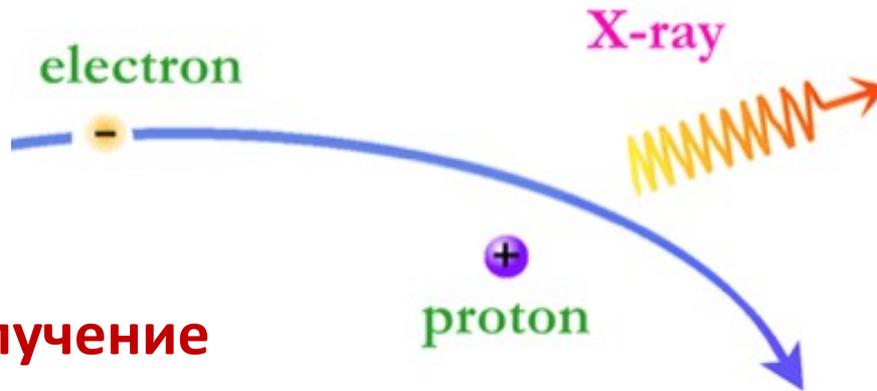
Поток излучения

$$F_v = \int I_v \cos \theta d\Omega$$

Светимость точечного источника $L = 4\pi F D_L^2$

D_L - Фотометрическое расстояние

Излучение горячей оптически тонкой плазмы



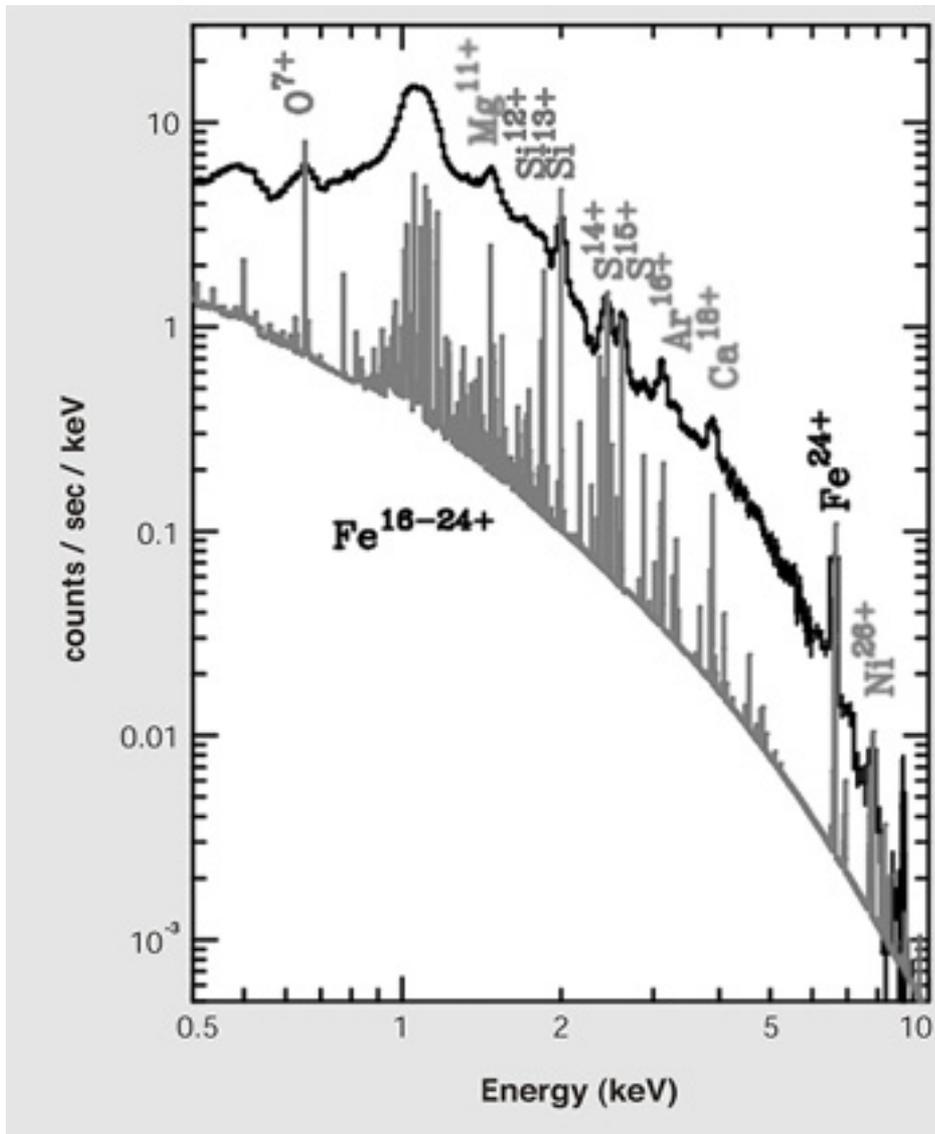
Тормозное излучение

$$\frac{dW}{dVdt d\nu} = 6.8 \cdot 10^{-38} T^{-1/2} e^{-E/kT} N_e N_Z Z^2 g(T, E) \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

$$E \ll kT : \quad g(T, E) \approx \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{4kT}{\Gamma E} \right) \quad \ln \Gamma = 0.577$$

$$E \sim kT : \quad g(T, E) \approx \left(\frac{E}{kT} \right)^{-0.4}$$

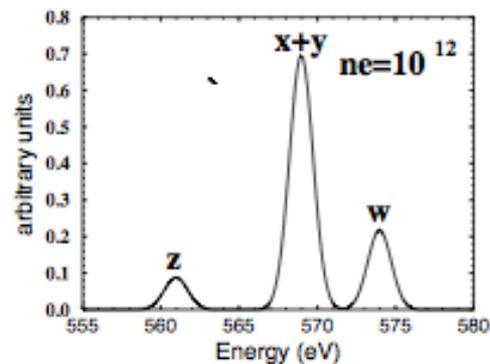
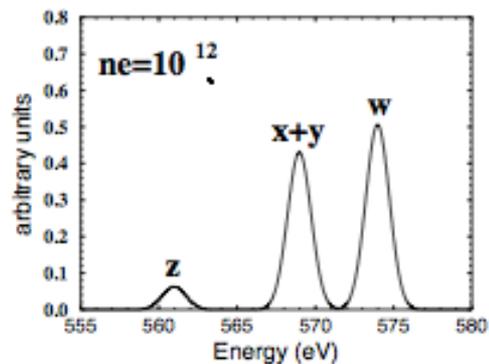
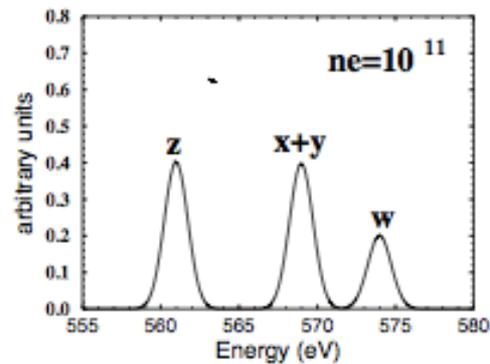
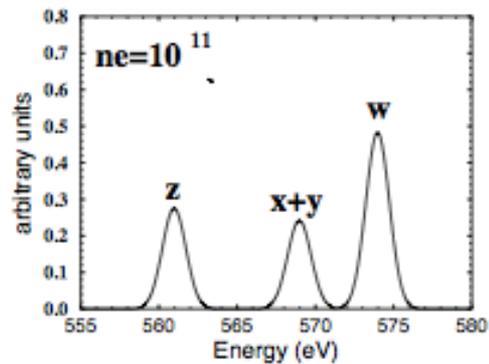
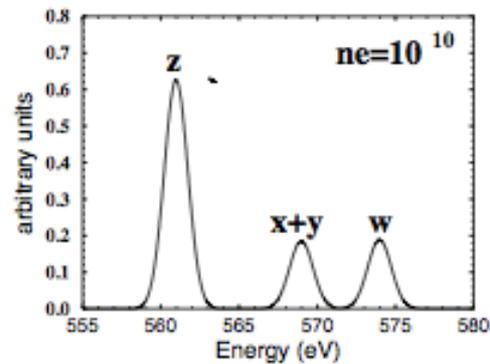
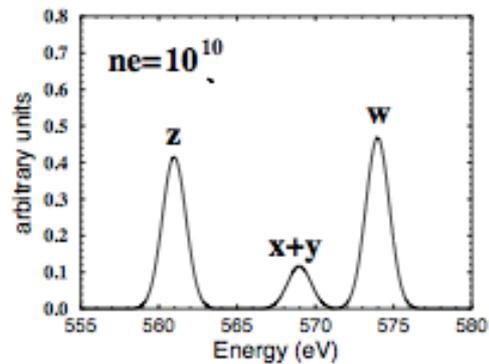
Спектр рентгеновского излучения



Межгалактический горячий ($T \sim 3 \cdot 10^7$ K) газ в скоплении галактик в созвездии Девы

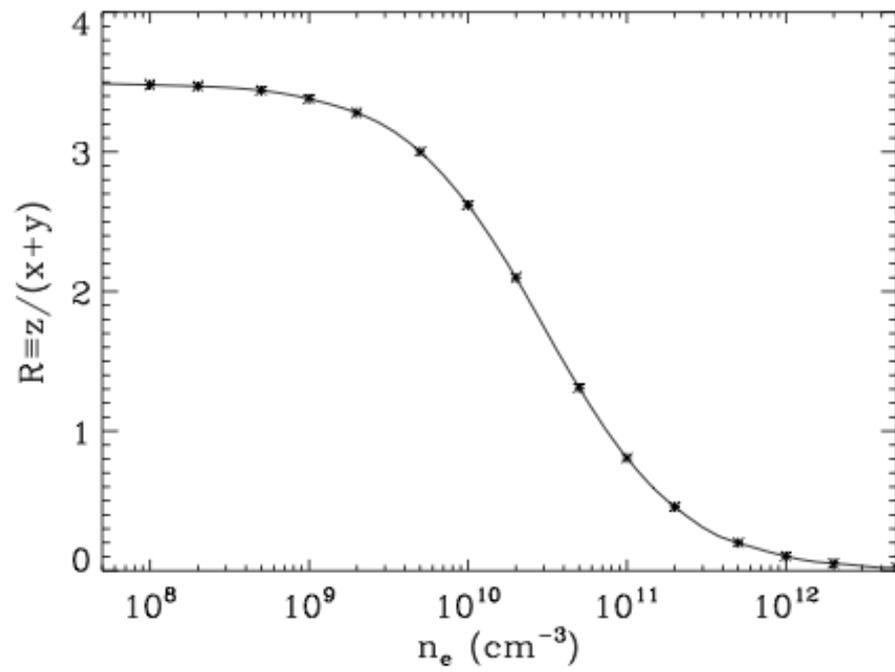
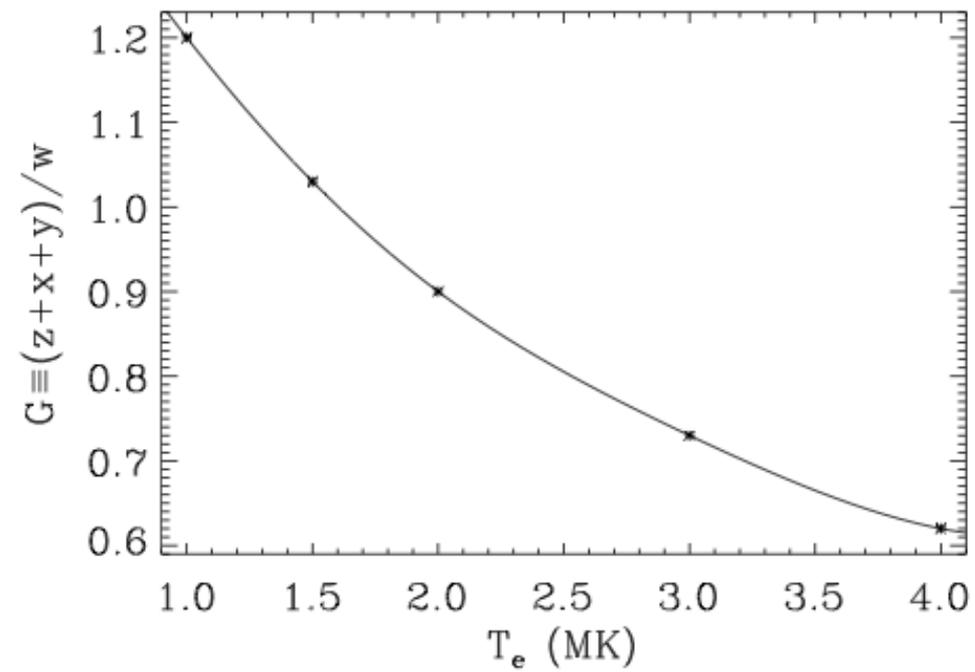
Широко используемые коды: **MEKAL**, **APEC**, **Cloudy**, **XSTAR**, ...

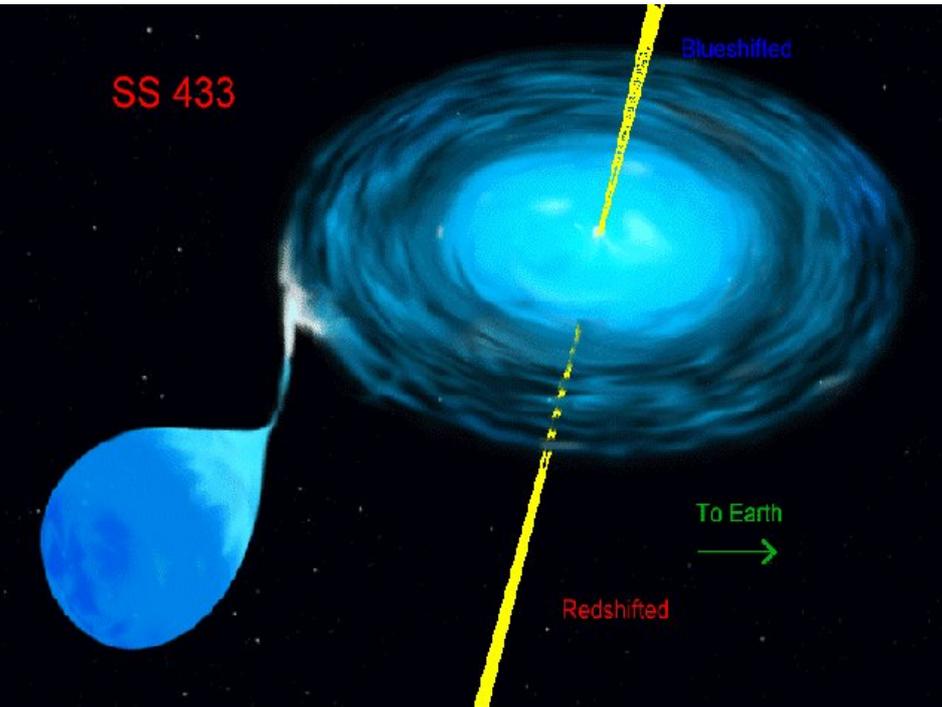
Диагностика плазмы



Столкновения

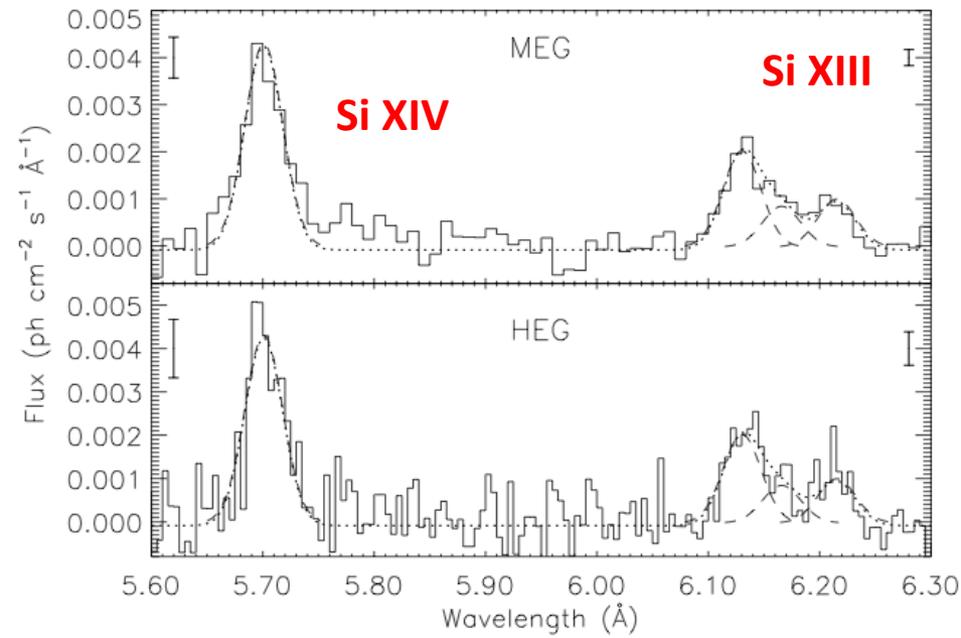
Фотоионизация





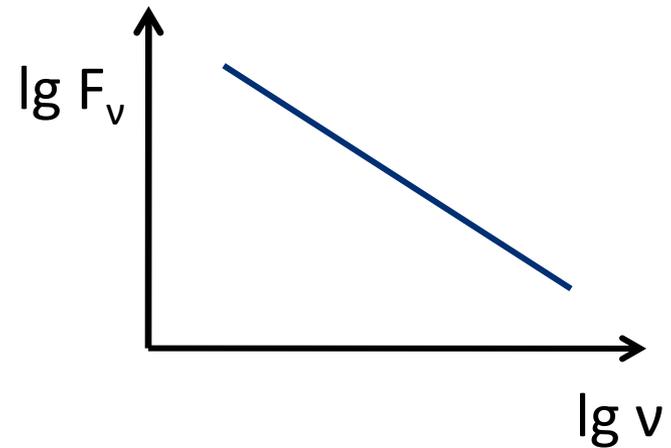
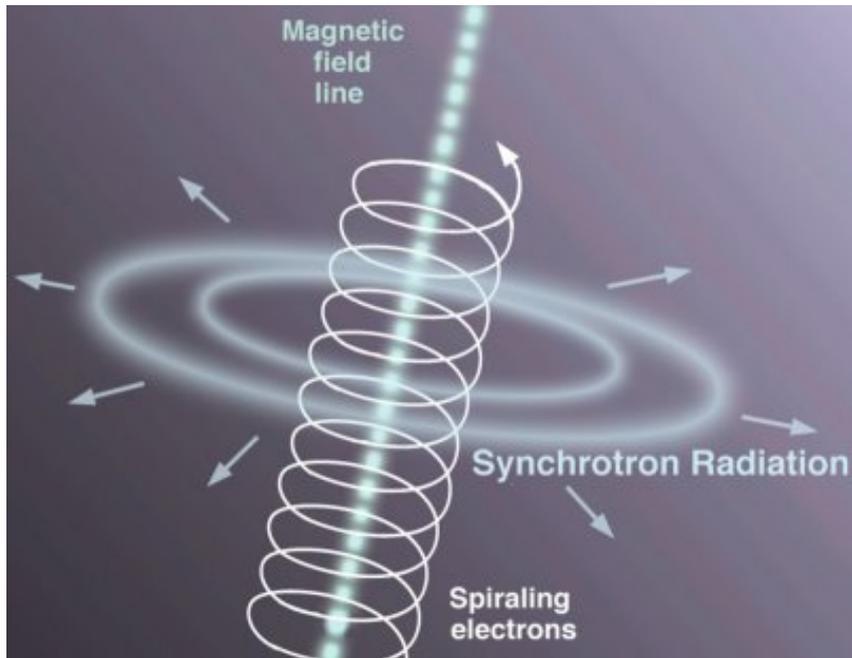
$v=0.26 c$

Chandra



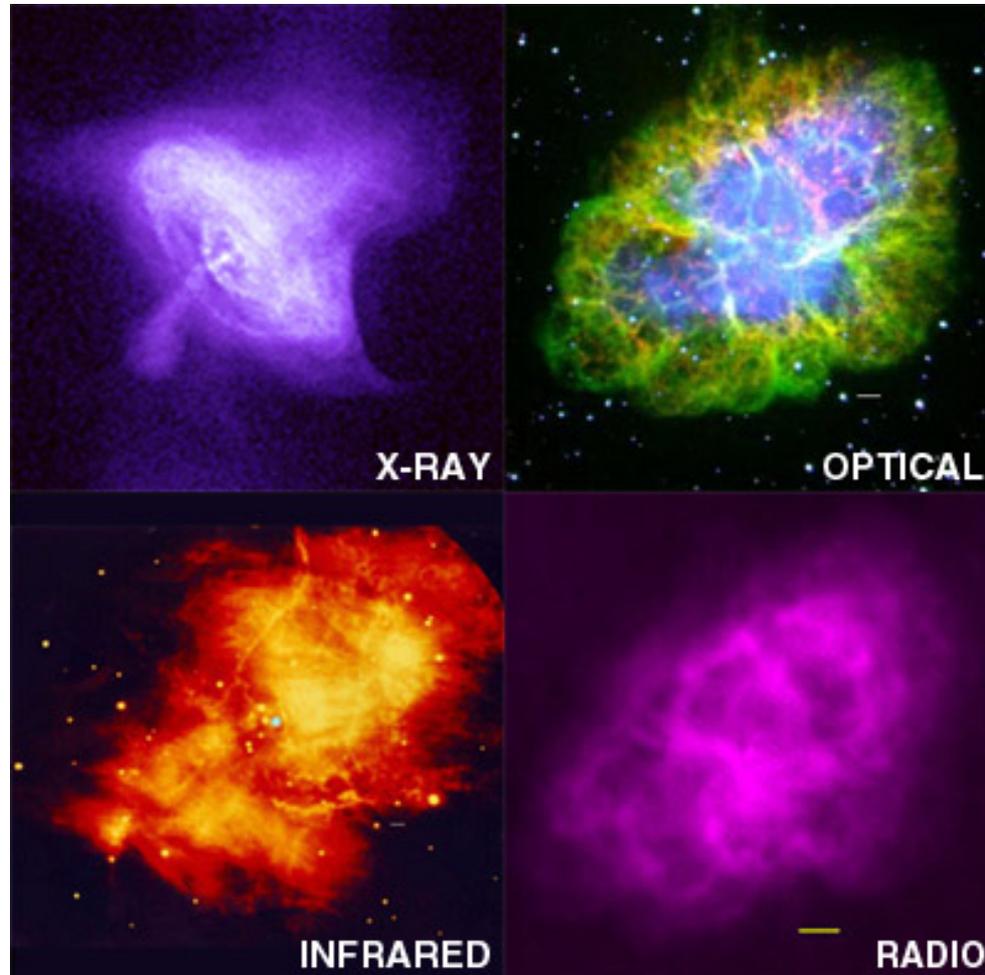
Marshall et al. 2002

Синхротронное излучение



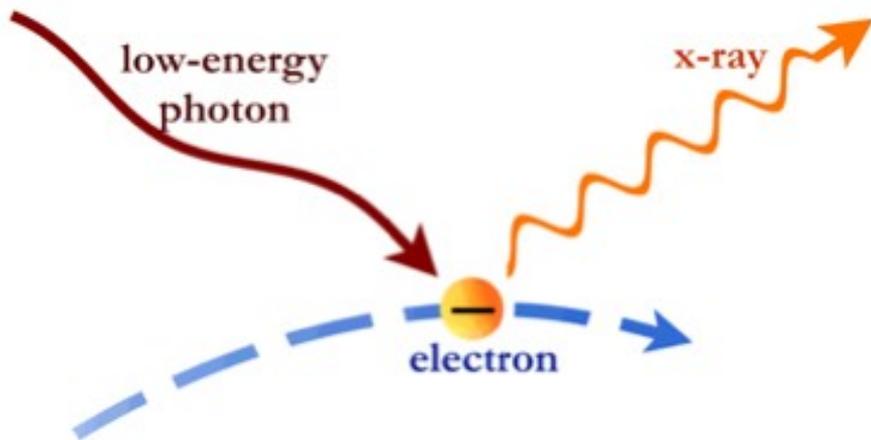
$$F_\nu \sim \nu^{-(p-1)/2}$$

Возникает при движении релятивистских электронов в магнитном поле

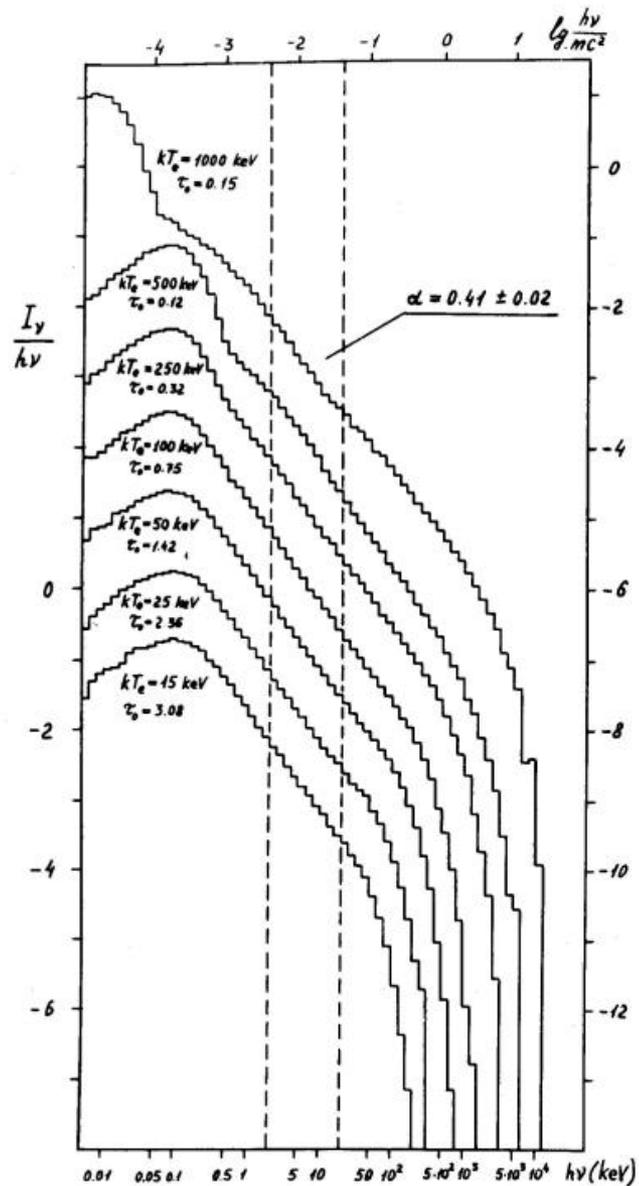


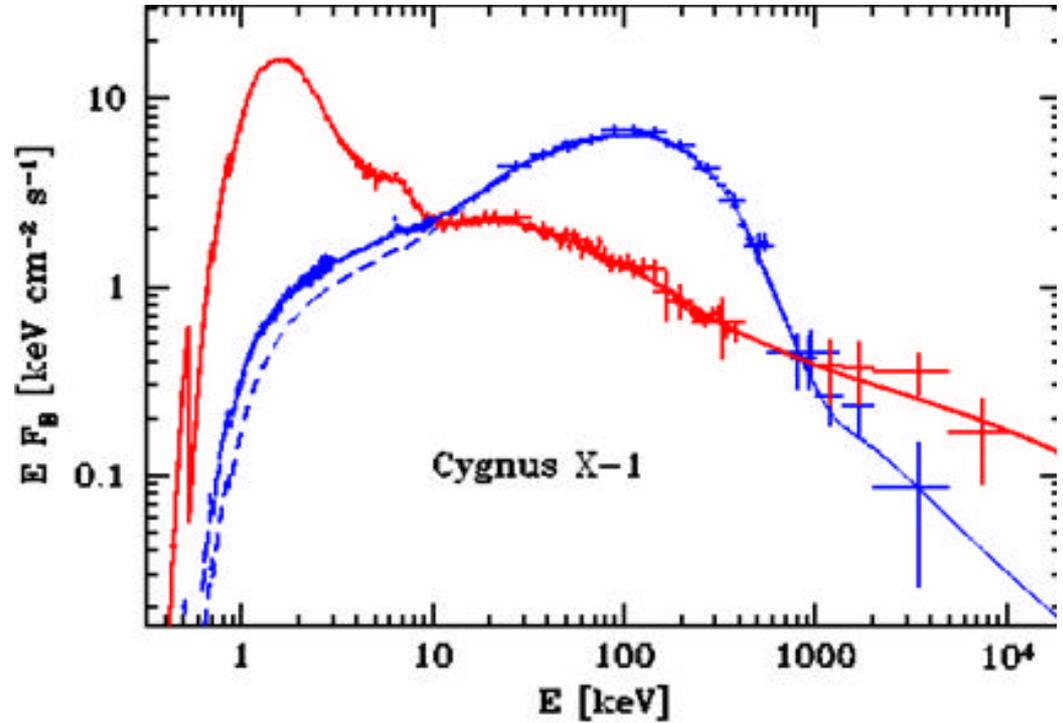
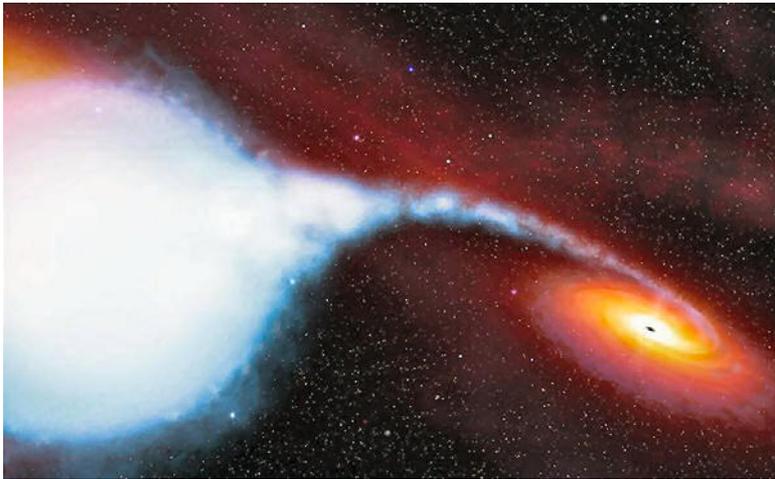
Крабовидная туманность
остаток вспышки сверхновой 1054 года + пульсар

Обратное комптоновское рассеяние



$$h\nu_0 \ll kT_e$$

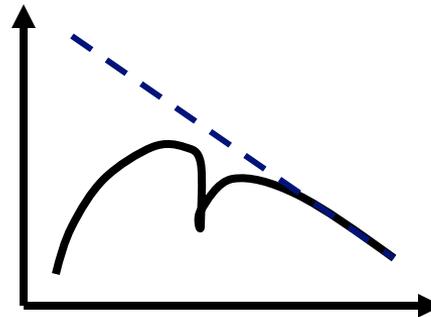
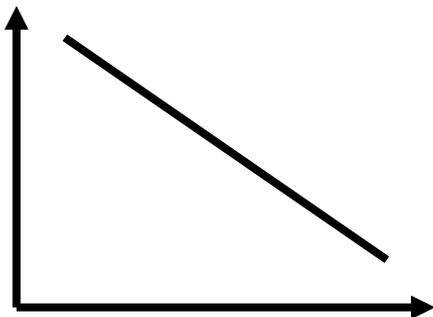
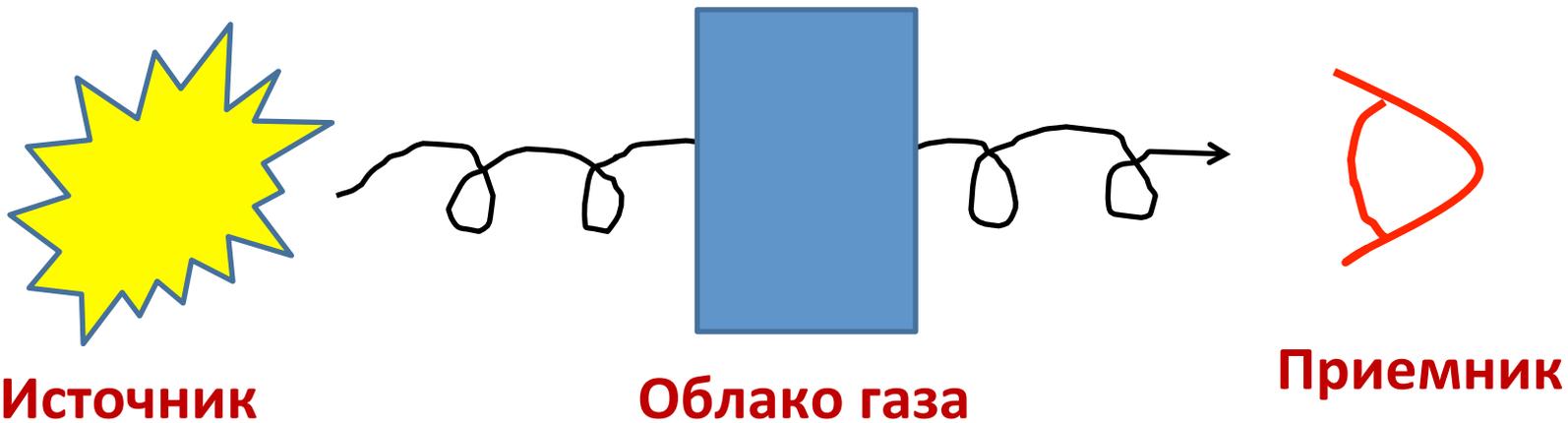


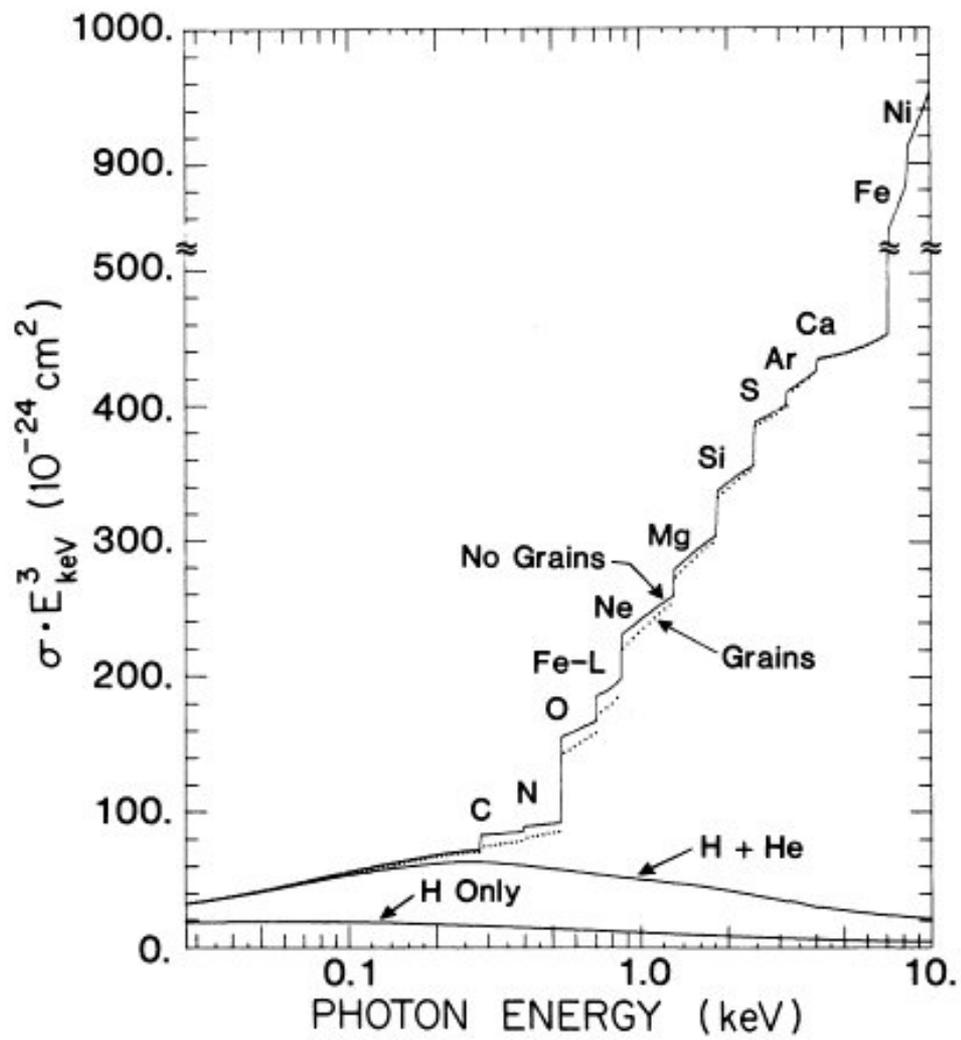


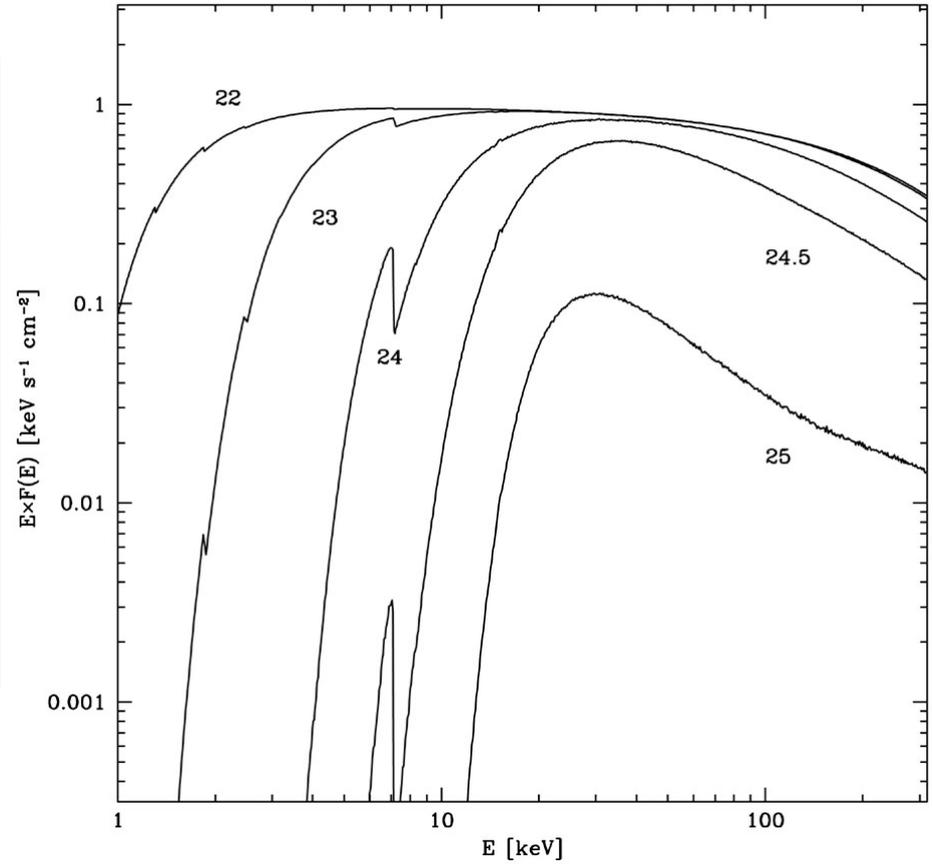
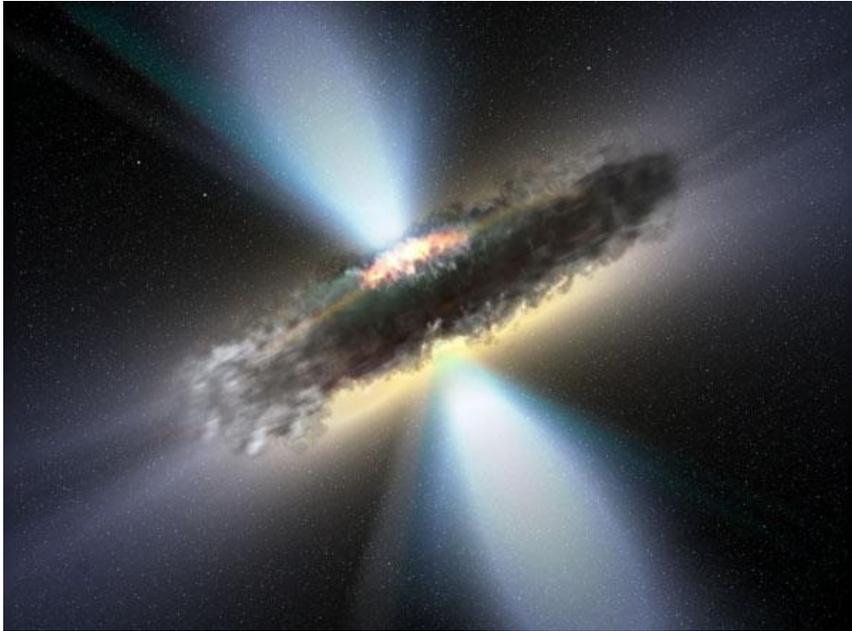
Лебедь X-1

Черная дыра в двойной звездной системе

Фотопоглощение







Сверхмассивные черные дыры в активных ядрах галактик

Рассеяние излучения на электронах

До рассеяния:

Фотон $h\nu, \frac{h\nu}{c} \vec{\Omega}$

Электрон $\gamma m_e c^2, \vec{p} = \gamma m_e \vec{u}$

После рассеяния:

$$h\nu', \frac{h\nu'}{c} \vec{\Omega}'$$

$$\gamma' m_e c^2, \vec{p}' = \gamma' m_e \vec{u}'$$

$$k_4 = \left(\frac{h\nu}{c}, \frac{h\nu}{c} \vec{\Omega} \right)$$

$$p_4 = (\gamma m_e c, \vec{p})$$

$$k_4' = \left(\frac{h\nu'}{c}, \frac{h\nu'}{c} \vec{\Omega}' \right)$$

$$p_4' = (\gamma' m_e c, \vec{p}')$$

Сохранение энергии/импульса

$$p_4 + k_4 = p_4' + k_4' \quad p_4^2 = p_4'^2 = m_e^2 c^2 \quad k_4^2 = k_4'^2 = 0$$

$$\mu = \frac{\vec{\Omega} \vec{u}}{u} \quad \mu' = \frac{\vec{\Omega}' \vec{u}}{u} \quad \Theta = \arccos \frac{\vec{\Omega} \vec{\Omega}'}{\Omega \Omega'}$$

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1 - \mu u / c}{1 - \mu' u / c + (h\nu / \gamma m_e c^2)(1 - \cos \Theta)}$$

Томсоновское рассеяние

$$h\nu \ll m_e c^2, u = 0$$

$$\nu' = \nu$$

Комптоновское рассеяние

$$u = 0$$

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1}{1 + (h\nu / m_e c^2)(1 - \cos\Theta)}$$

Эффект отдачи

Обратное комптоновское рассеяние

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

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1 - \mu u / c}{1 - \mu' u / c}$$

Эффект Доплера

В системе электрона: $\nu_0 = \gamma\nu(1 - \mu\frac{u}{c})$

$h\nu_0 \ll m_e c^2$  $\nu_0' = \nu_0$



$$\nu' = \frac{\nu_0'}{\gamma(1 - \mu'u/c)} = \nu \frac{1 - \mu u/c}{1 - \mu'u/c}$$

Сечение рассеяния (Клейн-Нишина)

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega'} d\Omega' = \frac{3\sigma_T}{4x} \left[\left(1 - \frac{4}{x} - \frac{8}{x^2}\right) \ln(1+x) + \frac{1}{2} + \frac{8}{x} - \frac{1}{2(1+x)^2} \right]$$

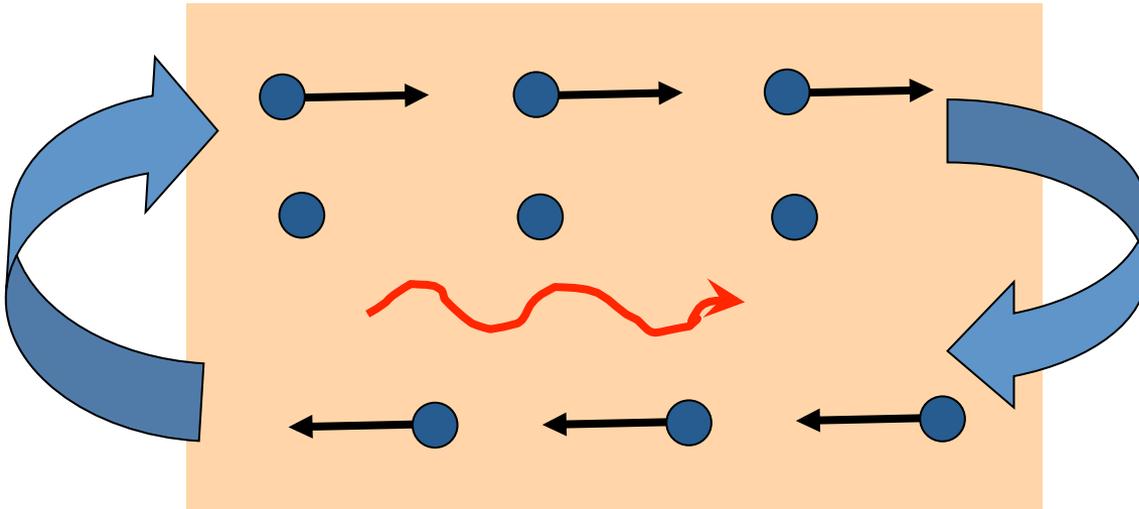
$$x = \frac{2h\nu}{m_e c^2} \gamma \left(1 - \mu \frac{u}{c}\right) \quad \sigma_T = \frac{8\pi r_e^2}{3} = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$$

$$x \ll 1: \quad \sigma = \sigma_T \left(1 - x + \frac{13}{10} x^2 - \frac{133}{80} x^3 + \dots\right)$$

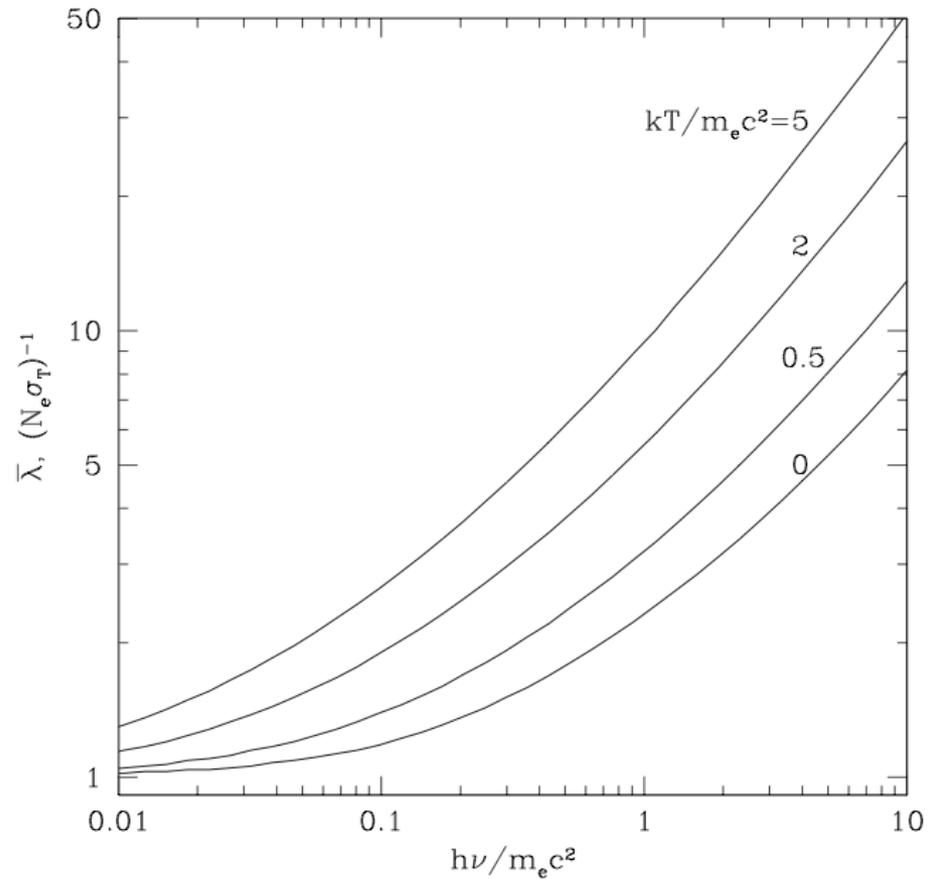
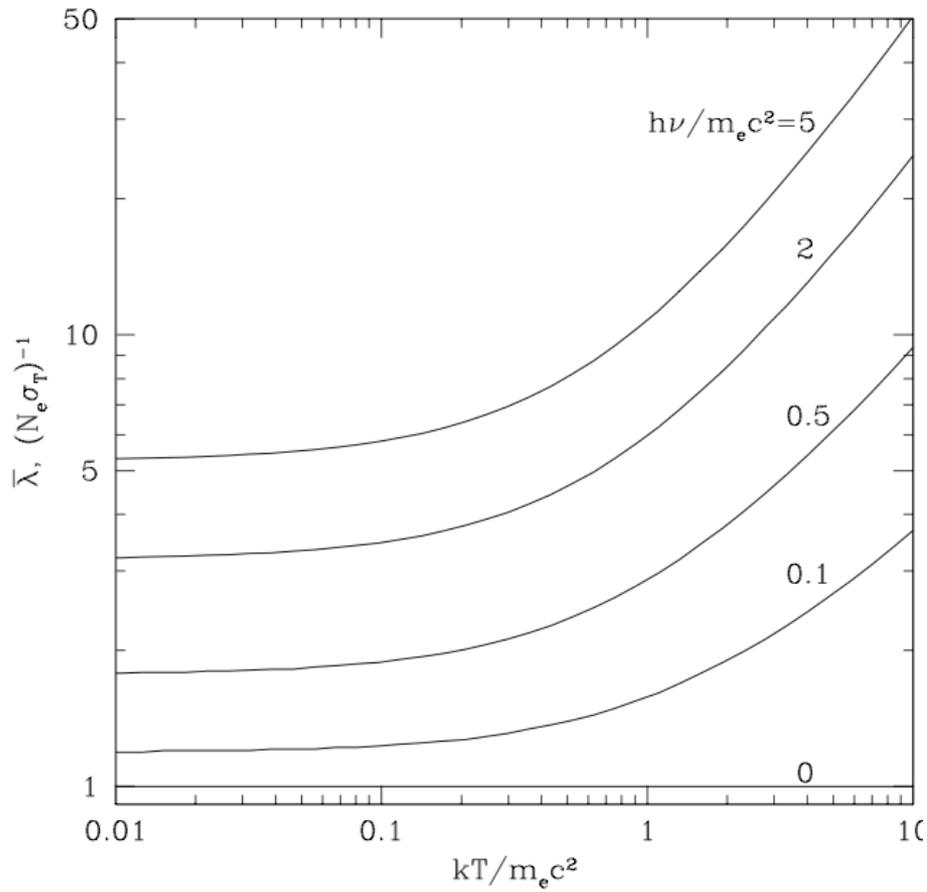
$$x \gg 1: \quad \sigma = \frac{3\sigma_T}{4x} \left(\ln x + \frac{1}{2} - \frac{4 \ln x}{x} + \dots\right)$$

Вероятность рассеяния на ансамбле электронов

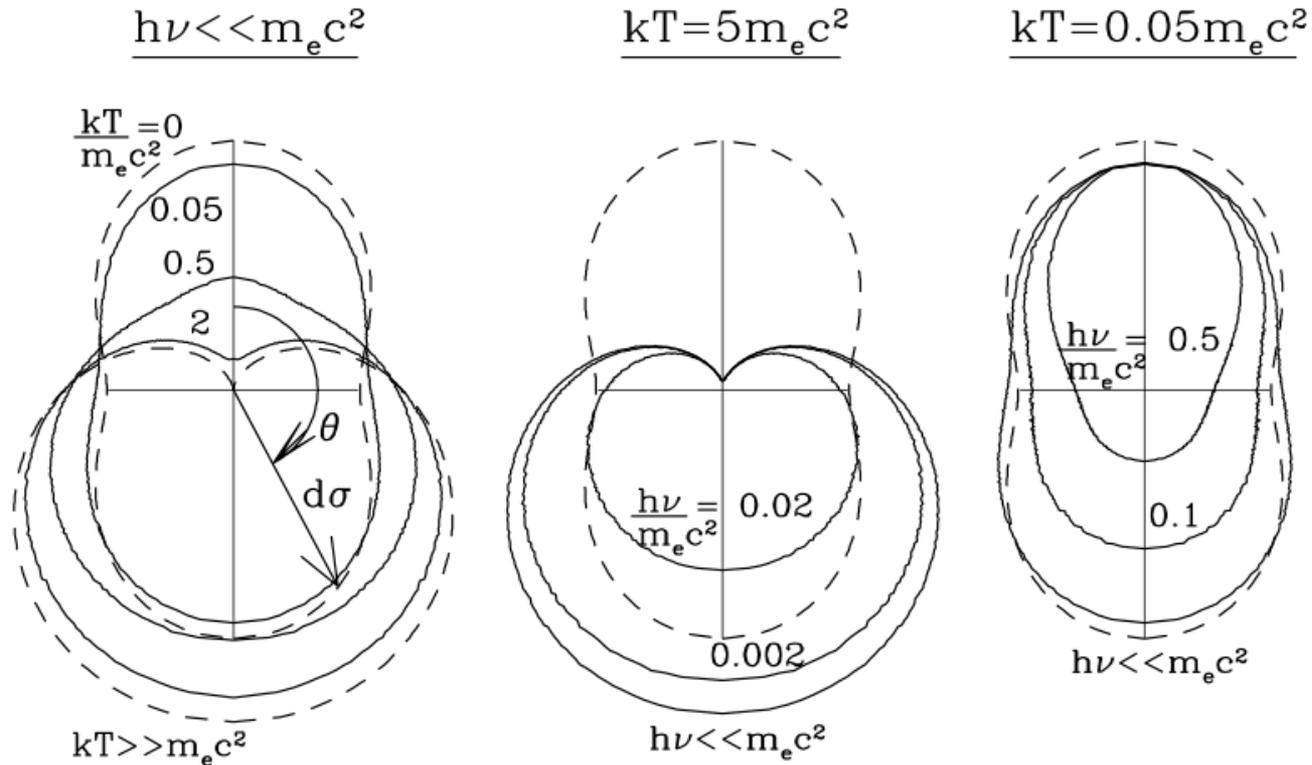
$$dP = (1 - \mu \frac{u}{c}) \sigma(x) N_e(\vec{u}) dl$$



Длина свободного пробега



Угловое распределение



Томсоновское рассеяние:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} = \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2 \Theta)$$

Давление света

$$\vec{F} = \int \left(\frac{h\nu}{c} \vec{\Omega} - \frac{h\nu}{c} \vec{\Omega}' \right) \frac{I_\nu(\vec{\Omega}, \nu)}{h\nu} \left(1 - \mu \frac{u}{c} \right) \frac{d\sigma}{d\Omega'} f(\vec{u}) d\vec{u} d\vec{\Omega} d\vec{\Omega}' d\nu$$

**Торможение электрона в изотропном поле
низкочастотного излучения:**

$$\vec{F} = -\frac{4}{3} \sigma_T \varepsilon \gamma^2 \frac{u}{c} \quad \varepsilon = 4\pi c \int I_\nu d\nu$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{F}{m_e c} \gamma^{-1} (\gamma^2 - 1)^{1/2} = -\frac{4}{3} \frac{\sigma_T \varepsilon}{m_e c} (\gamma^2 - 1)$$

Нагрев/охлаждение (обратный Комптон)

$$h\nu \ll kT_e$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -N_e m_e c^2 \frac{d\gamma}{dt} = -\frac{4}{3} \sigma_T \varepsilon N_e c (\gamma^2 - 1)$$

$$\left\langle \frac{d\nu}{\nu} \right\rangle = \frac{4}{3} (\gamma^2 - 1)$$

Нерелятивистский Максвелл: $\left\langle \frac{d\nu}{\nu} \right\rangle = 4 \frac{kT_e}{m_e c^2}$

Релятивистский Максвелл: $\left\langle \frac{d\nu}{\nu} \right\rangle = 16 \left(\frac{kT_e}{m_e c^2} \right)^2$

Нагрев/охлаждение (Комптон)

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

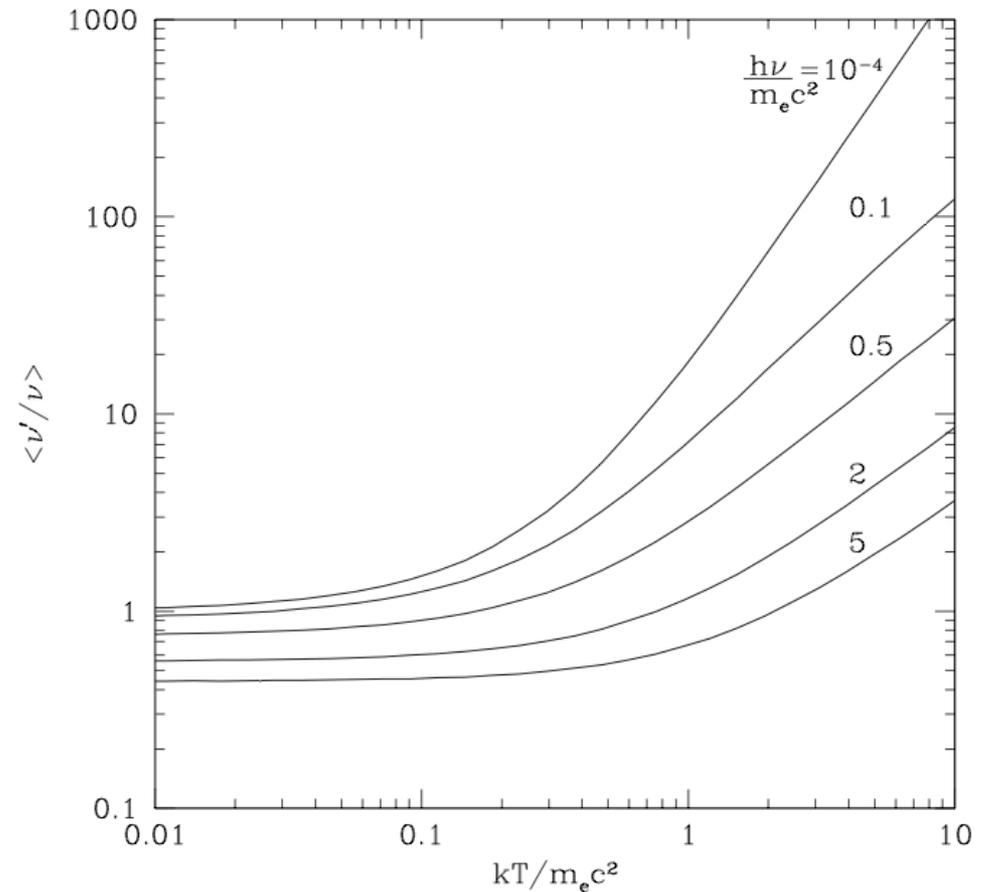
$$\left\langle \frac{d\nu}{\nu} \right\rangle = \frac{1}{\sigma_T} \int \left(\frac{\nu'}{\nu} - 1 \right) \frac{d\sigma}{d\Omega'} d\vec{\Omega}' = -\frac{h\nu}{m_e c^2}$$

Нагрев/охлаждение (Комптон+обратный Комптон)

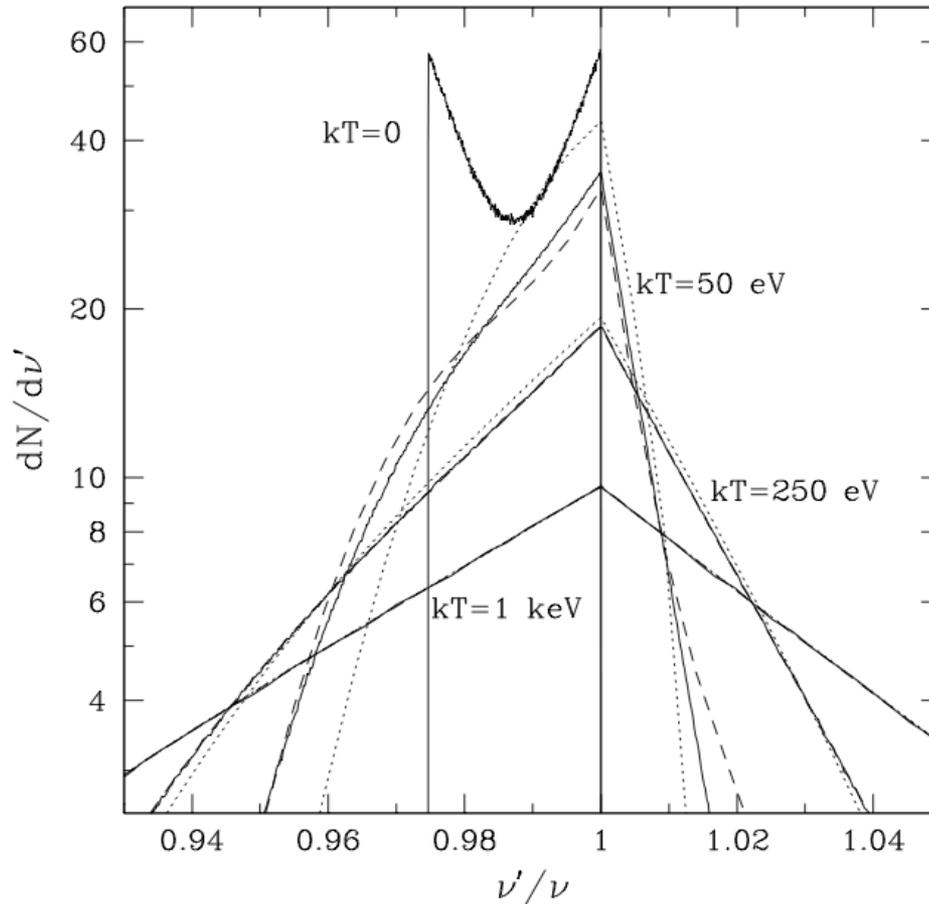
$$kT_e, h\nu \ll m_e c^2$$

$$\left\langle \frac{d\nu}{\nu} \right\rangle = \frac{4kT_e - h\nu}{m_e c^2}$$

$$\frac{\langle (\Delta\nu)^2 \rangle}{\nu^2} = 2 \frac{kT_e}{m_e c^2}$$

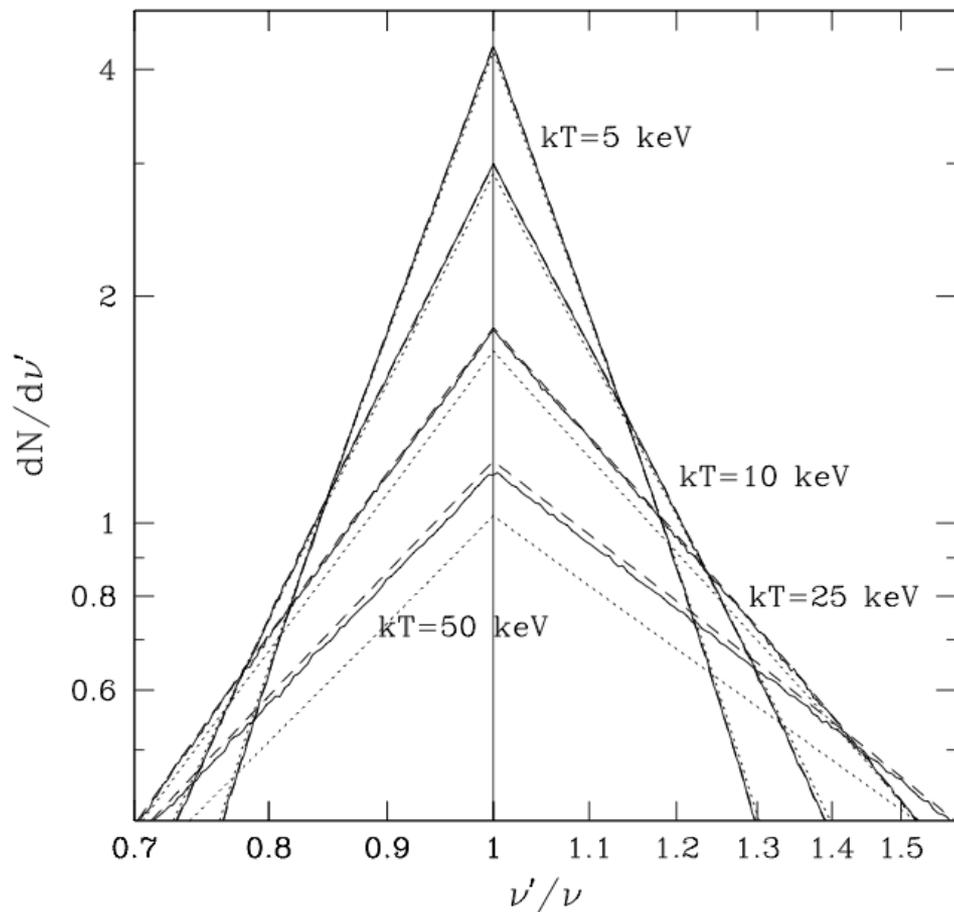


Профиль линии после однократного рассеяния



$$h\nu = 6.7 \text{ keV}$$

Профиль линии после однократного рассеяния



$$h\nu = 6.7 \text{ keV}$$

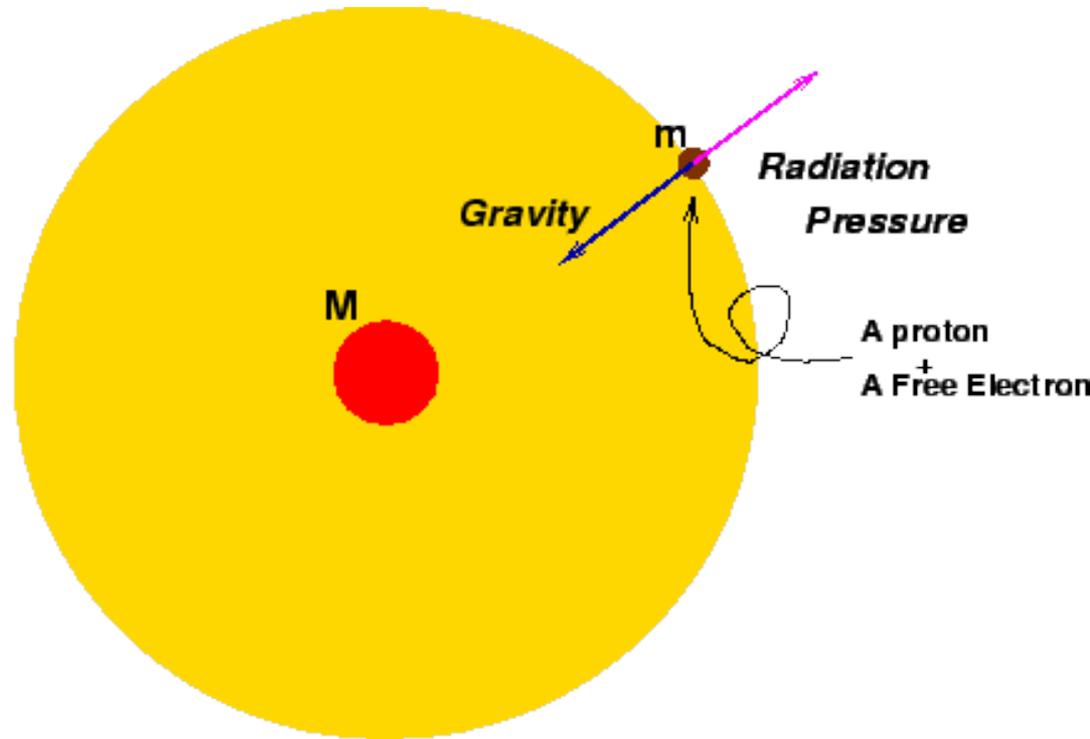
Критическая (эддингтоновская) светимость

Сила притяжения

$$F_{\text{grav}} = \frac{GMm_p}{R^2}$$

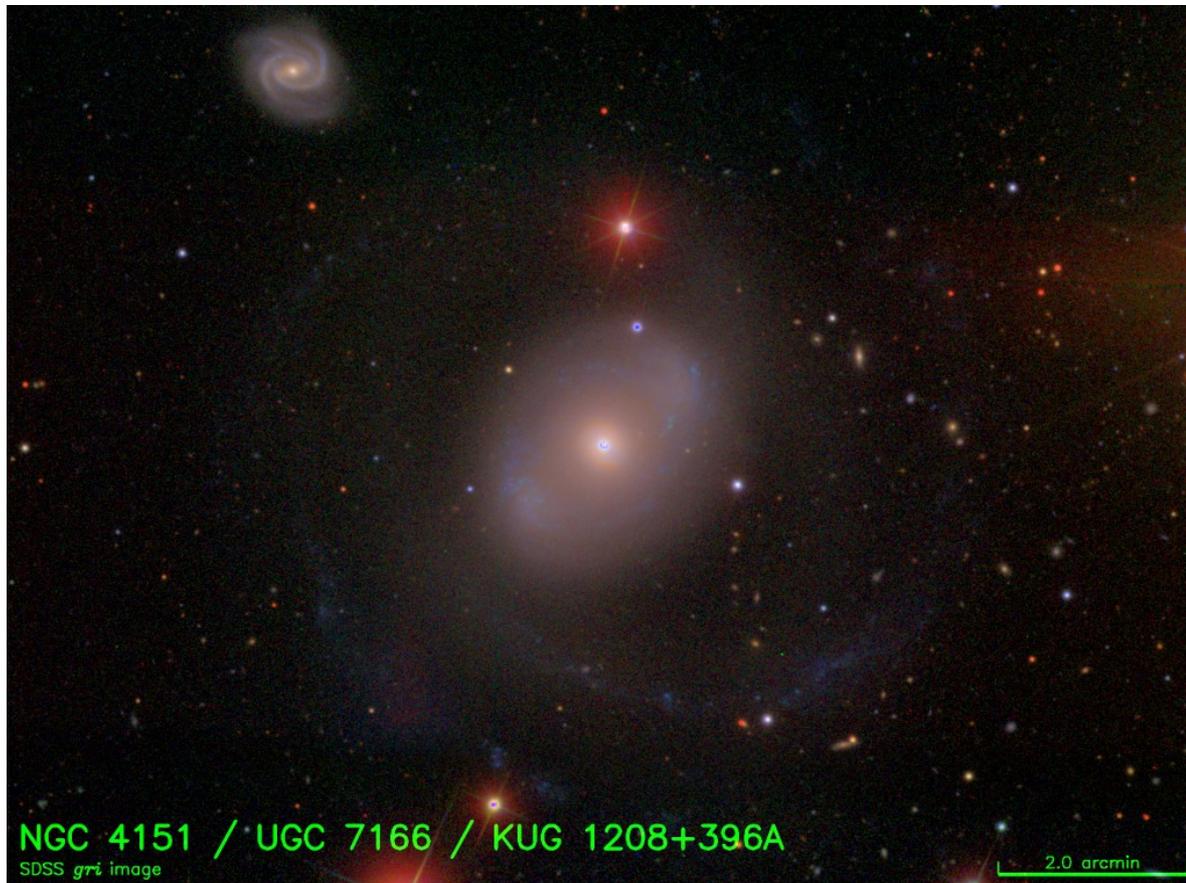
давление излучения

$$F_{\text{rad}} = \frac{F_x}{c} \sigma_T = \frac{L_x \sigma_T}{4\pi R^2 c}$$



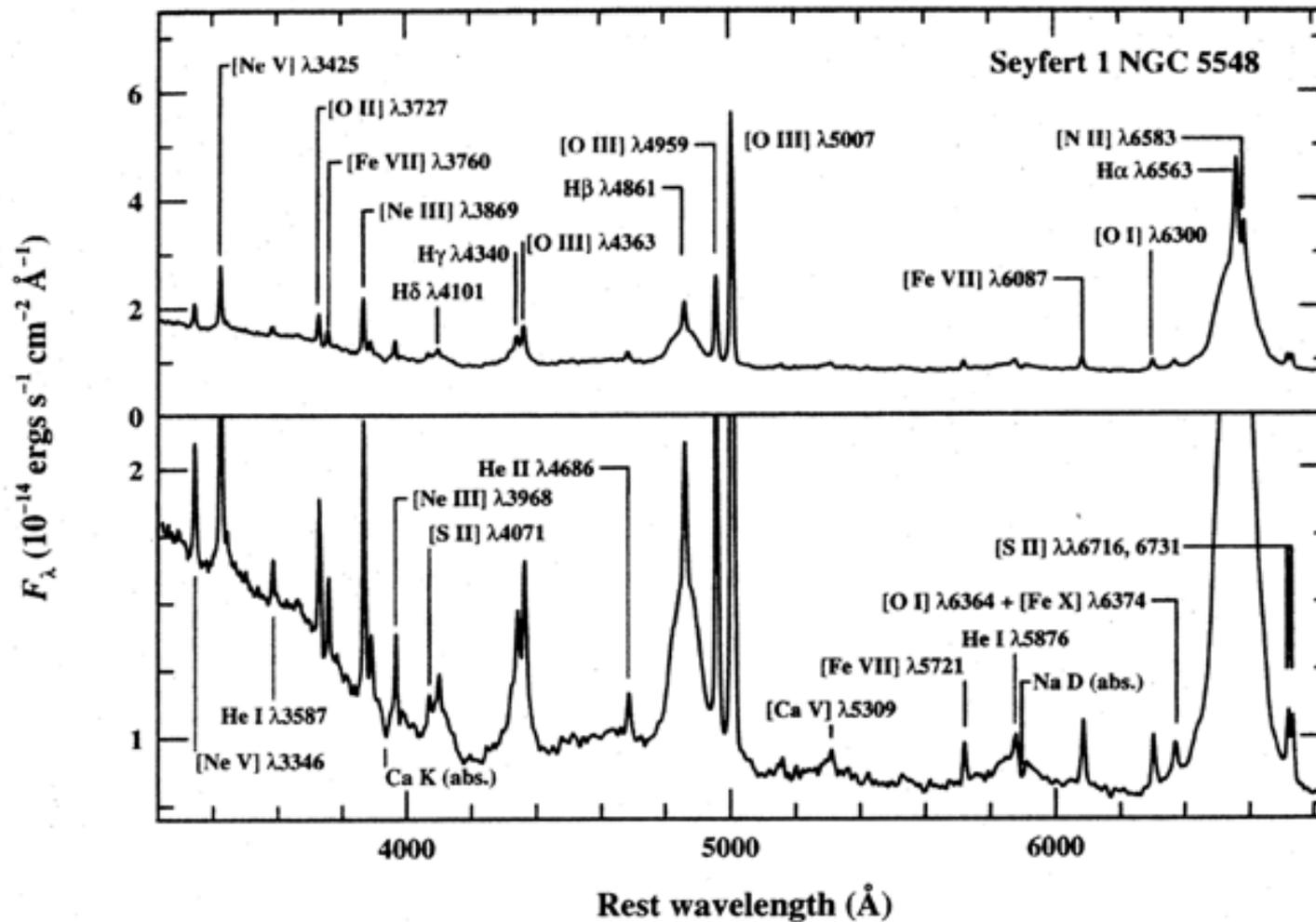
$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} = 1.4 \cdot 10^{38} \frac{M}{M_{\text{Sun}}} \text{ эрг / с}$$

Сейфертовские галактики



NGC 4151
 $D \approx 20$ Мпк

Обычно спиральные галактики с ярким ядром, в оптическом спектре которого присутствуют яркие, сильно уширенные эмиссионные линии – излучаются быстро движущимися облаками ионизованного газа

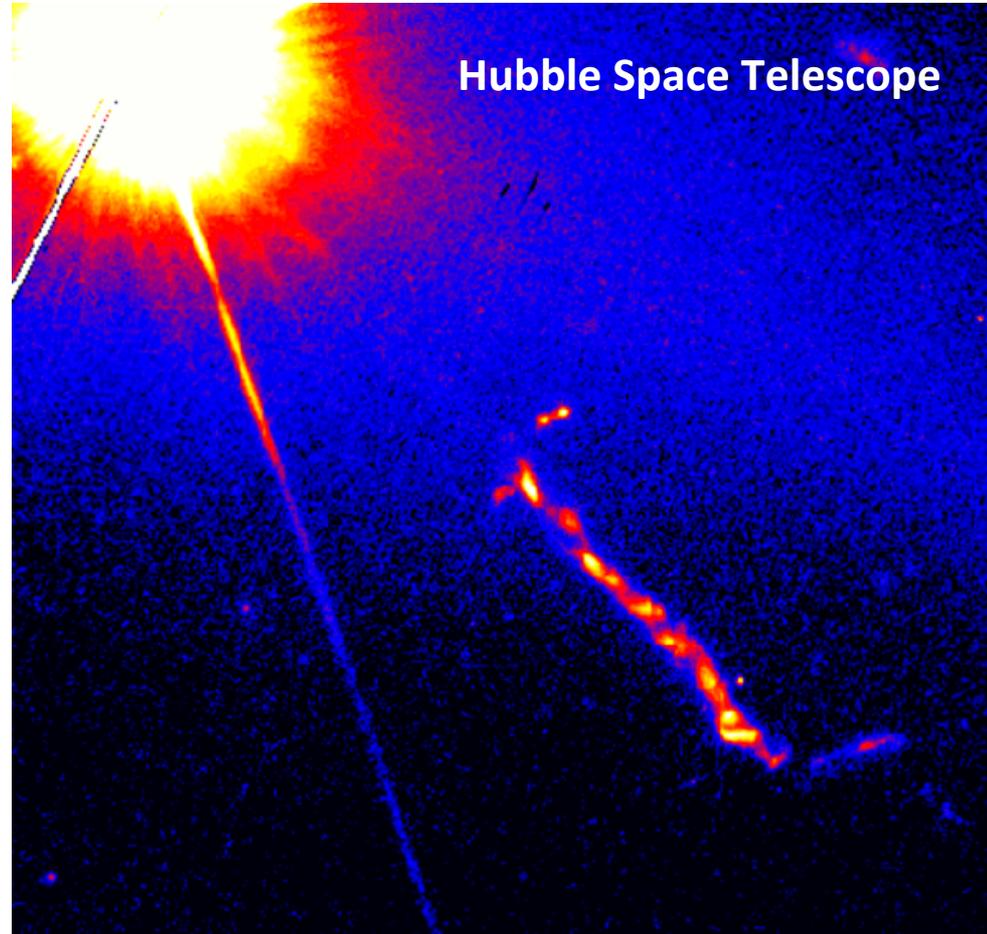


1) узкие запрещенные и разрешенные линии (сейферты 1 и 2)
 ширина = **сотни км/с** , плотность $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$, размер области $\sim 1 \text{ кпс}$

2) широкие разрешенные линии (сейферты 1)
 ширина = **2000-10 000 км/с** , плотность $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, размер области $\ll 1 \text{ пс}$

Квazarы (QSO = quasi-stellar object)

- Аналогичны сейфертовским галактикам, но мощнее на порядки
- Ядро квазара светит ярче всей (эллиптической) галактики
- Иногда имеют протяженные (Мпк) джеты



3C 273 ($z=0.16$)

**Дисковая аккреция вещества на СМЧД →
высвобождение огромного количества энергии**

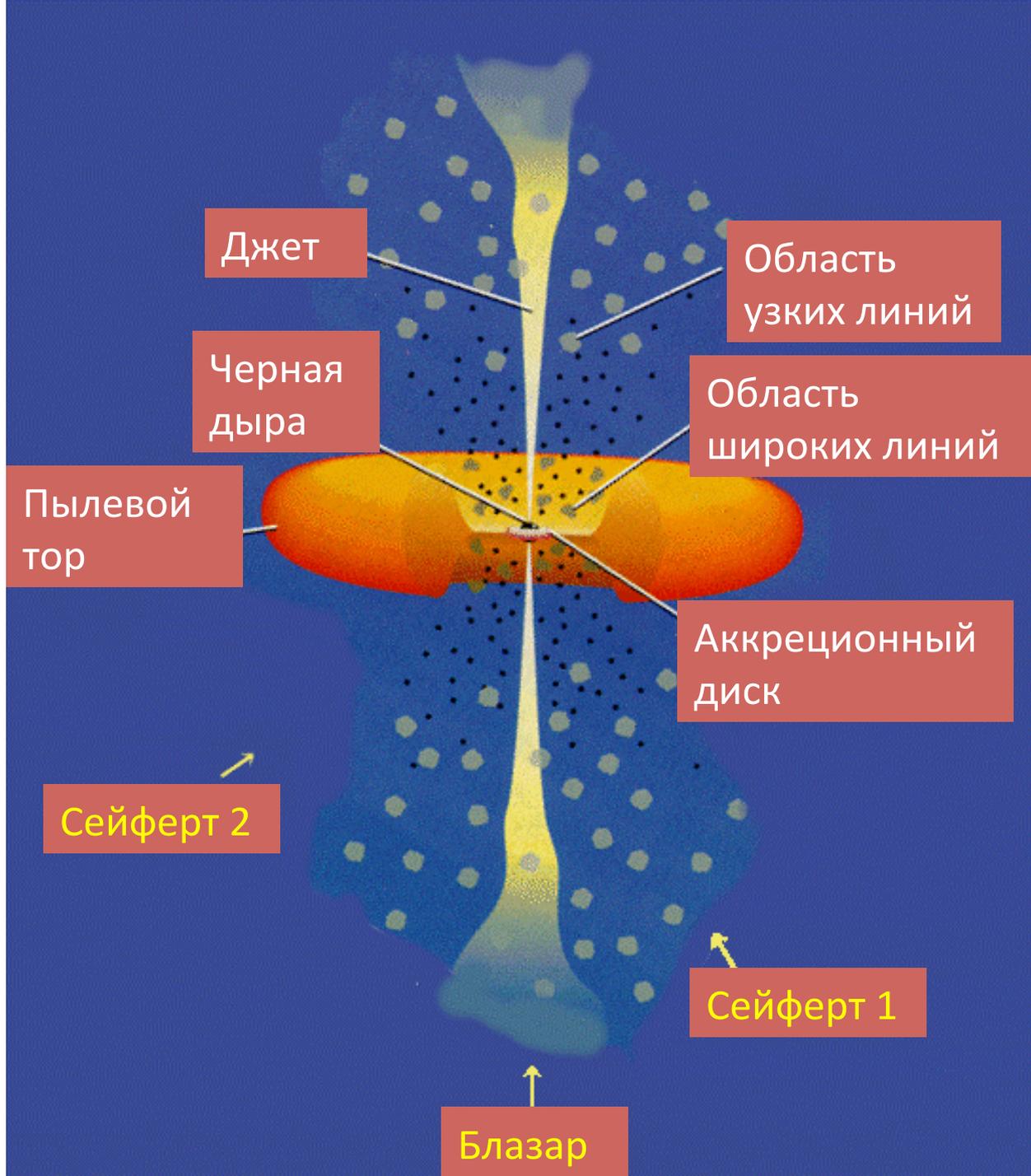


□ Болометрические светимости квазаров достигают $>10^{47}$ эрг/с, при том что эддингтоновский предел составляет:

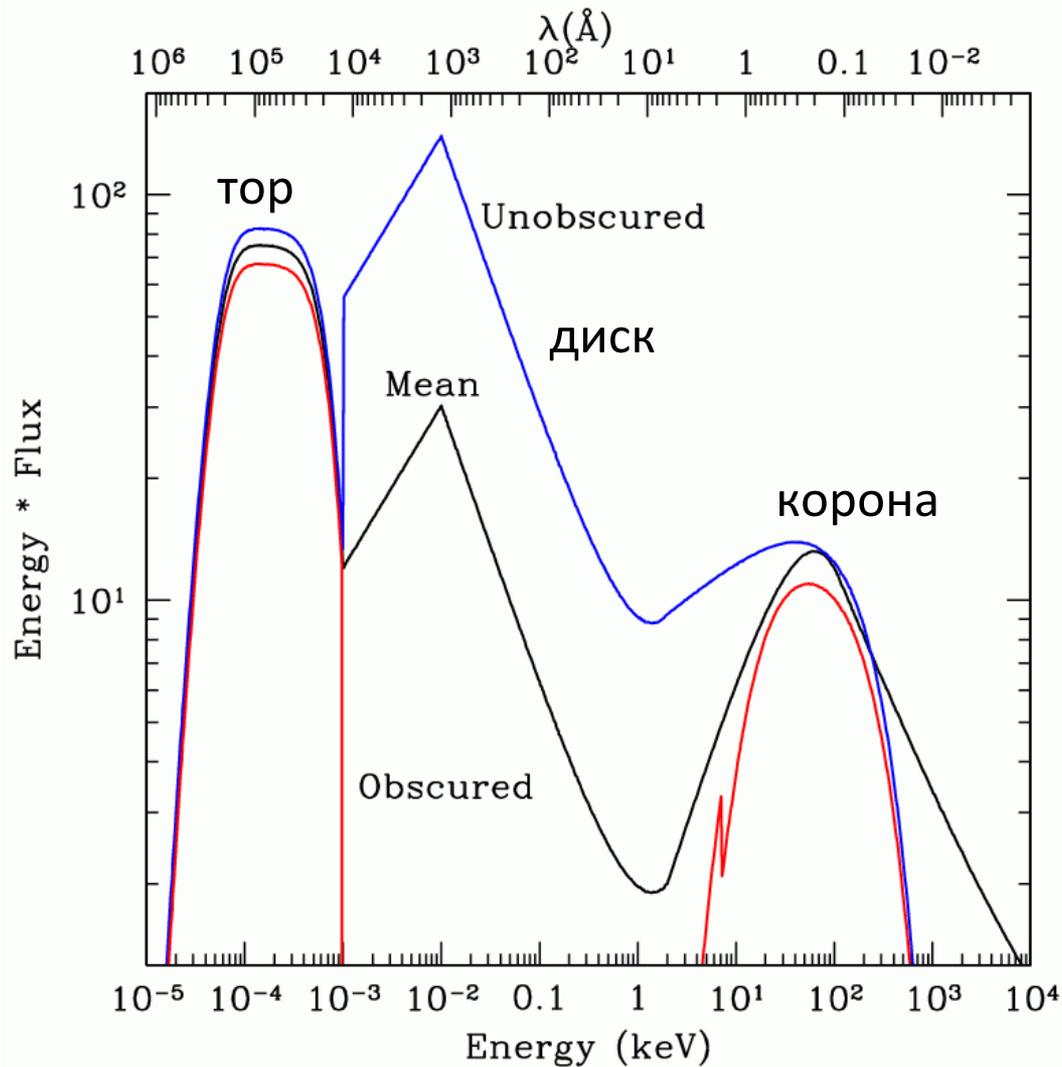
$$L_E = 4\pi GM_{\text{BH}} m_p c / \sigma_T = 1.3 \cdot 10^{47} (M_{\text{BH}} / 10^9 M_{\text{sun}}) \text{ эрг/с}$$

□ Механическая мощность джетов достигает 10^{46} эрг/с

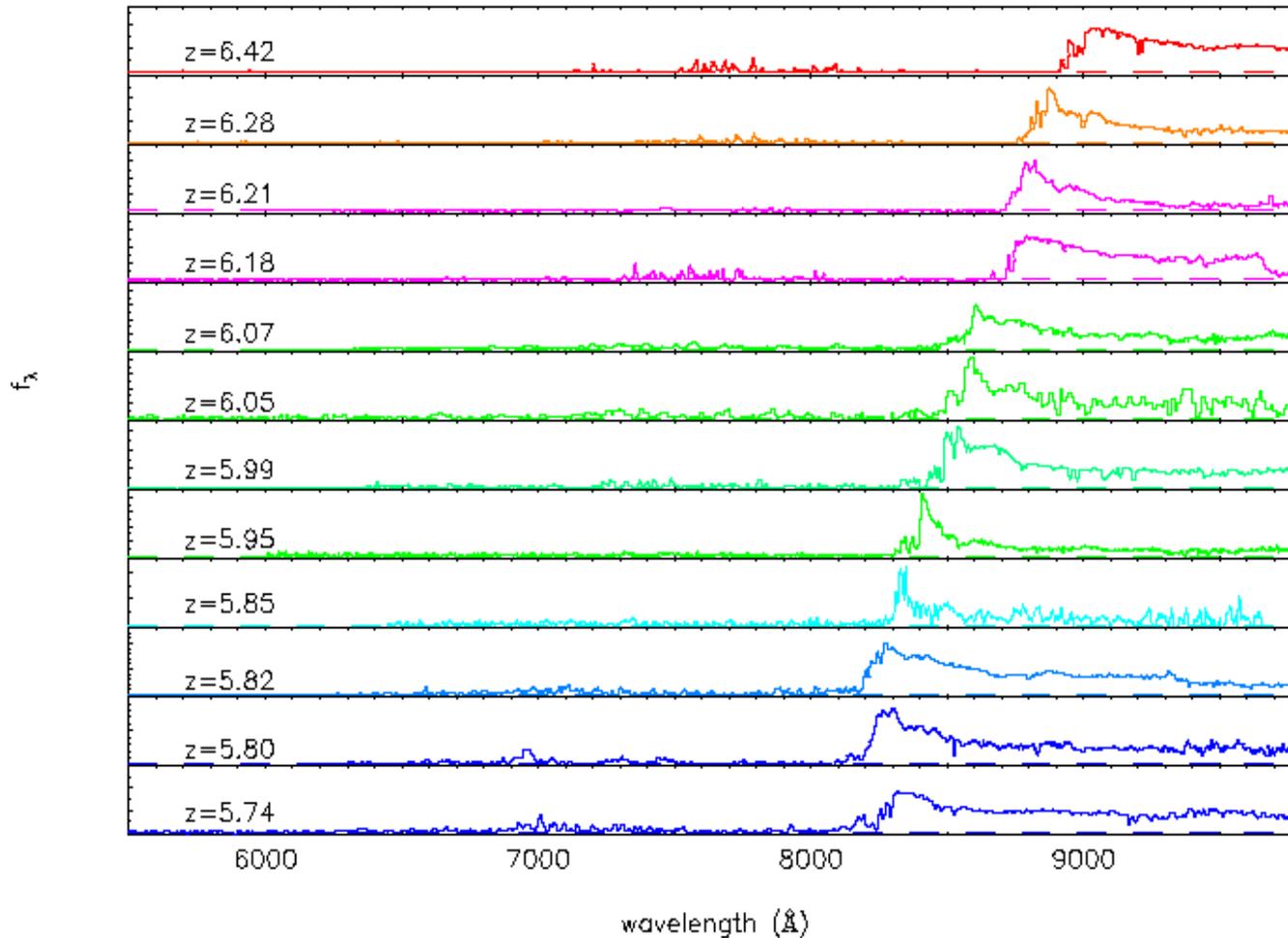
**Схема объединения
различных типов
АЯГ на основе
ориентации по
отношению
к наблюдателю**



Широкополосный спектр



Огромные черные дыры сформировались уже через миллиард лет после Большого взрыва!

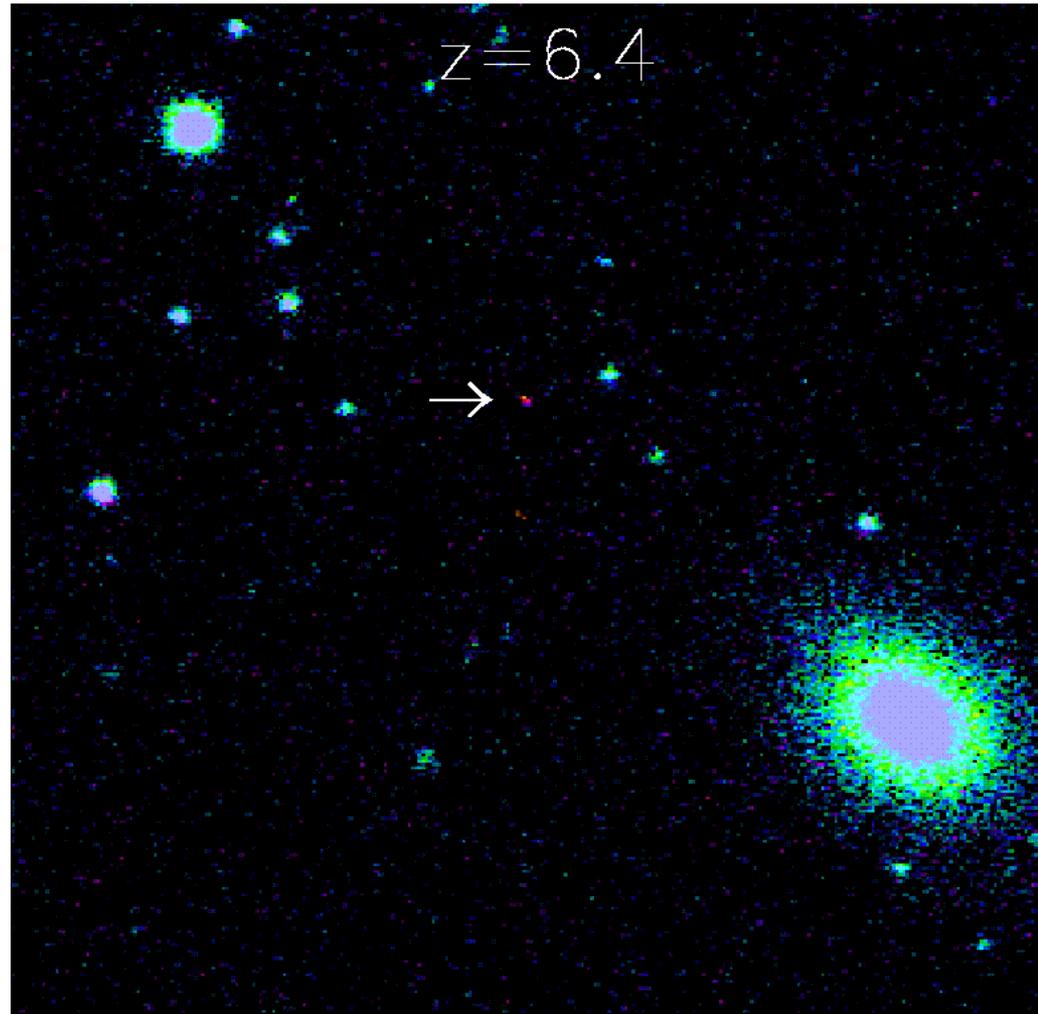


$$\text{Ly}_\alpha : 1216 (1+z) \text{ \AA}$$

Sloan Digital Sky Survey



2.5-meter telescope at Apache Point Observatory, New Mexico



Аккреционный рост СМЧД не может быть бесконечно быстрым

$$L = \varepsilon \frac{dM}{dt}, L < L_E$$

$\varepsilon = 0.06 - 0.4$ при дисковой аккреции

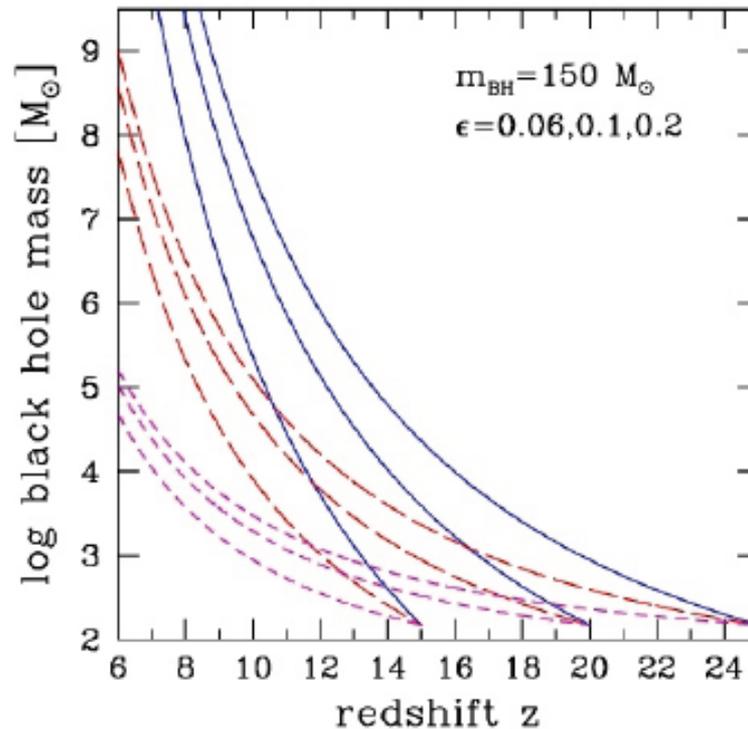
$$M(t) = M(0) \exp(t/\varepsilon t_E)$$

$$t_E = \sigma_T c / (4 \pi G m_p) = 0.45 \text{ млрд лет}$$

=>

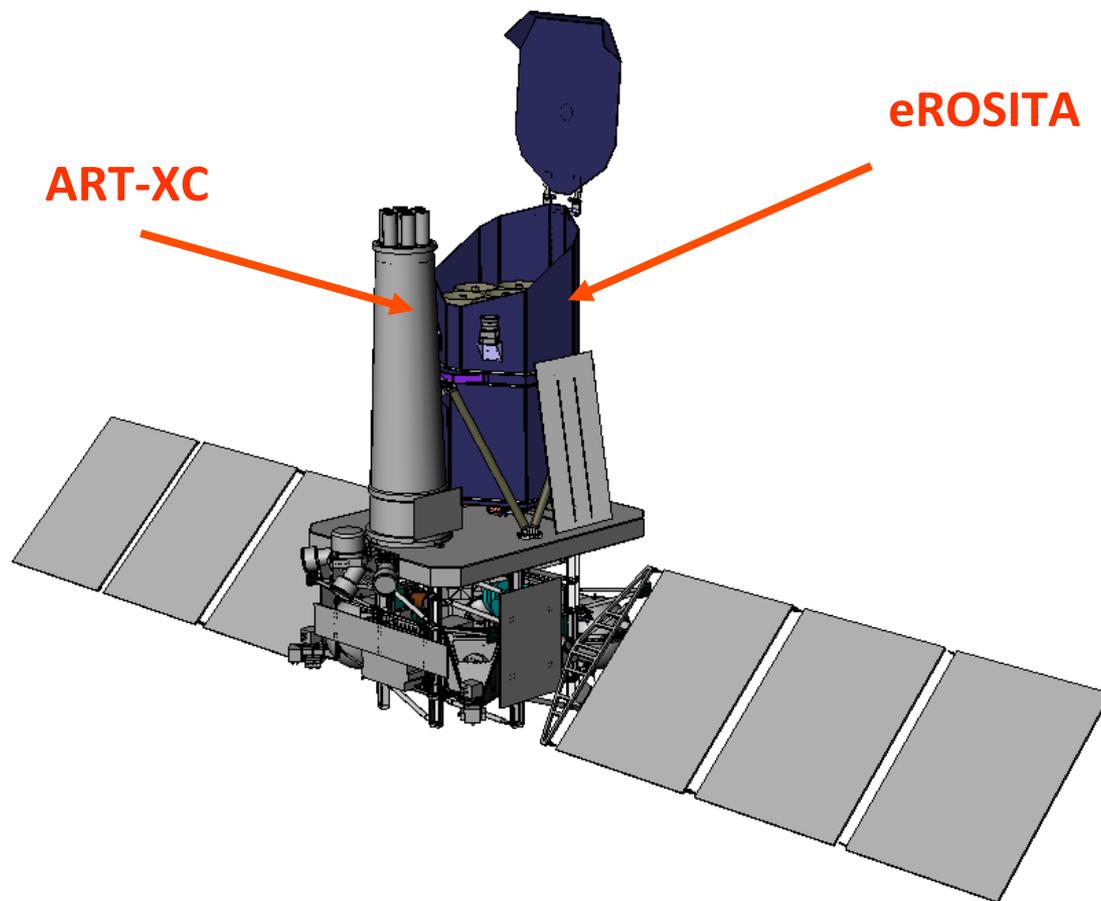
время удвоения массы (салпитеровское время)

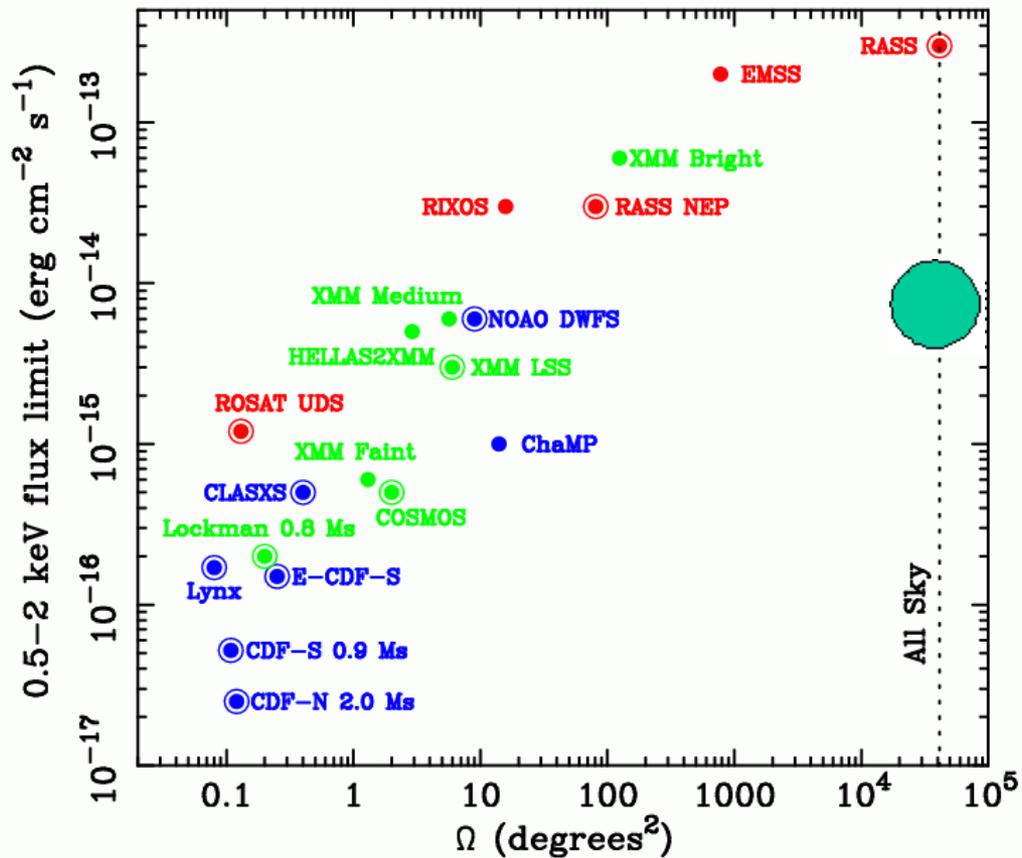
$\sim 40 (\varepsilon/0.1)$ млн лет



Growth of MBHs from early epochs down to $z=6$, the redshift of the most distant SDSS quasars. The three sets of curves assume continuous Eddington-limited accretion with radiative efficiency 0.06 (solid lines), 0.1 (long-dashed lines), and 0.2 (short-dashed lines). Gas accretion starts at $z=15, 20, 25$ onto a seed black hole of mass $150 M_{\odot}$.

Рентгеновская обсерватория Спектр-Рентген-Гамма (запуск в 2014 г.)





В ходе 4-летнего обзора всего неба будет открыто около 6 миллионов активных ядер галактик (сейчас известно несколько тысяч). В том числе сотни квазаров на $z > 6$

Полная картина роста черных дыр во Вселенной!