

Происхождение элементов во вселенной: расчет ядерных реакций



С. Фабрика (САО РАН)

Образование элементов во вселенной

Первые 3 минуты: водород (90%) и гелий (10%)

Нуклеосинтез в звездах:

первые звезды - CNO

формирование галактик и звезд

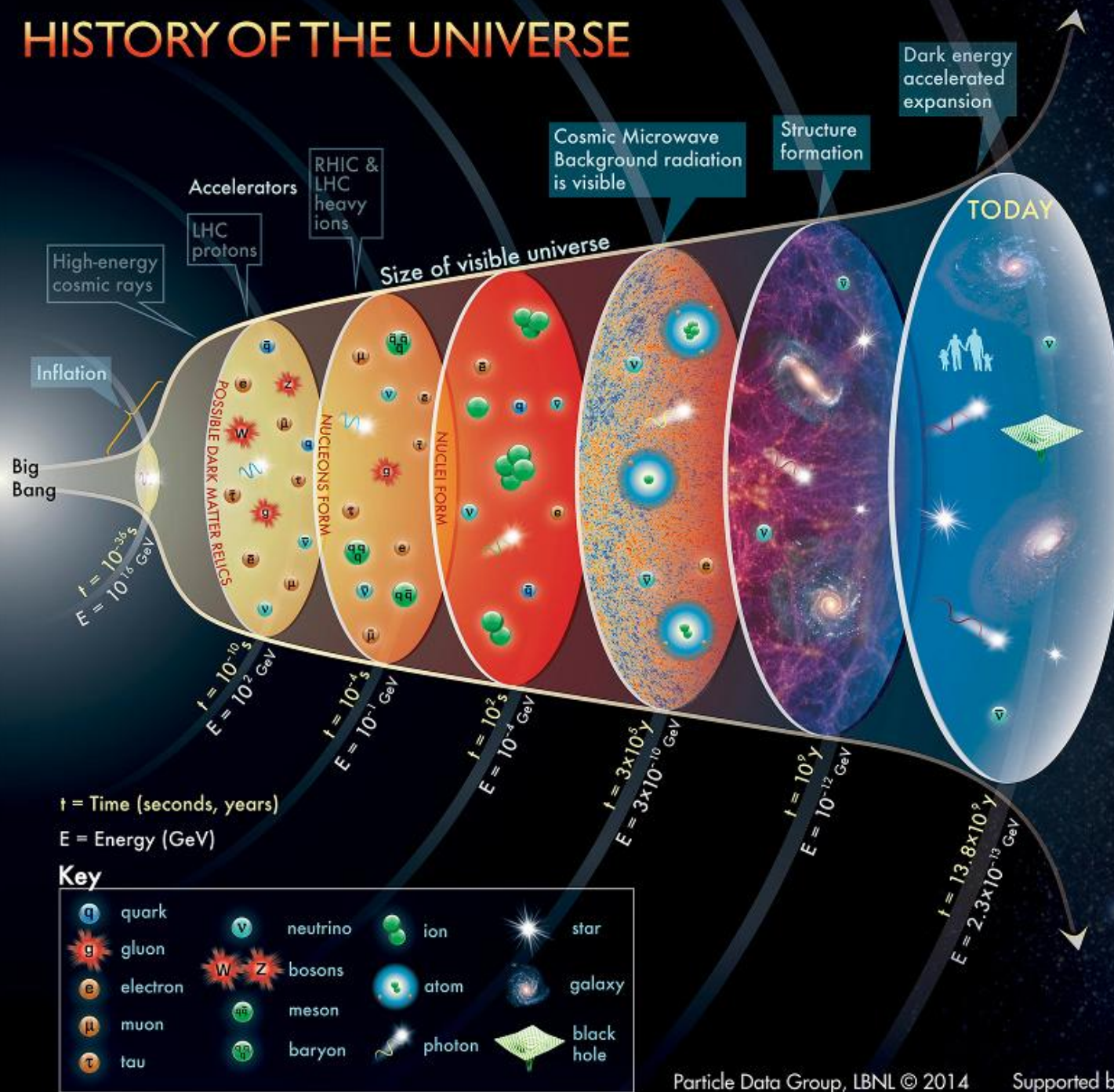
**звезды с массой менее 8 солнечных производят CNO,
далее может произойти взрыв сверхновой звезды, появится Fe**

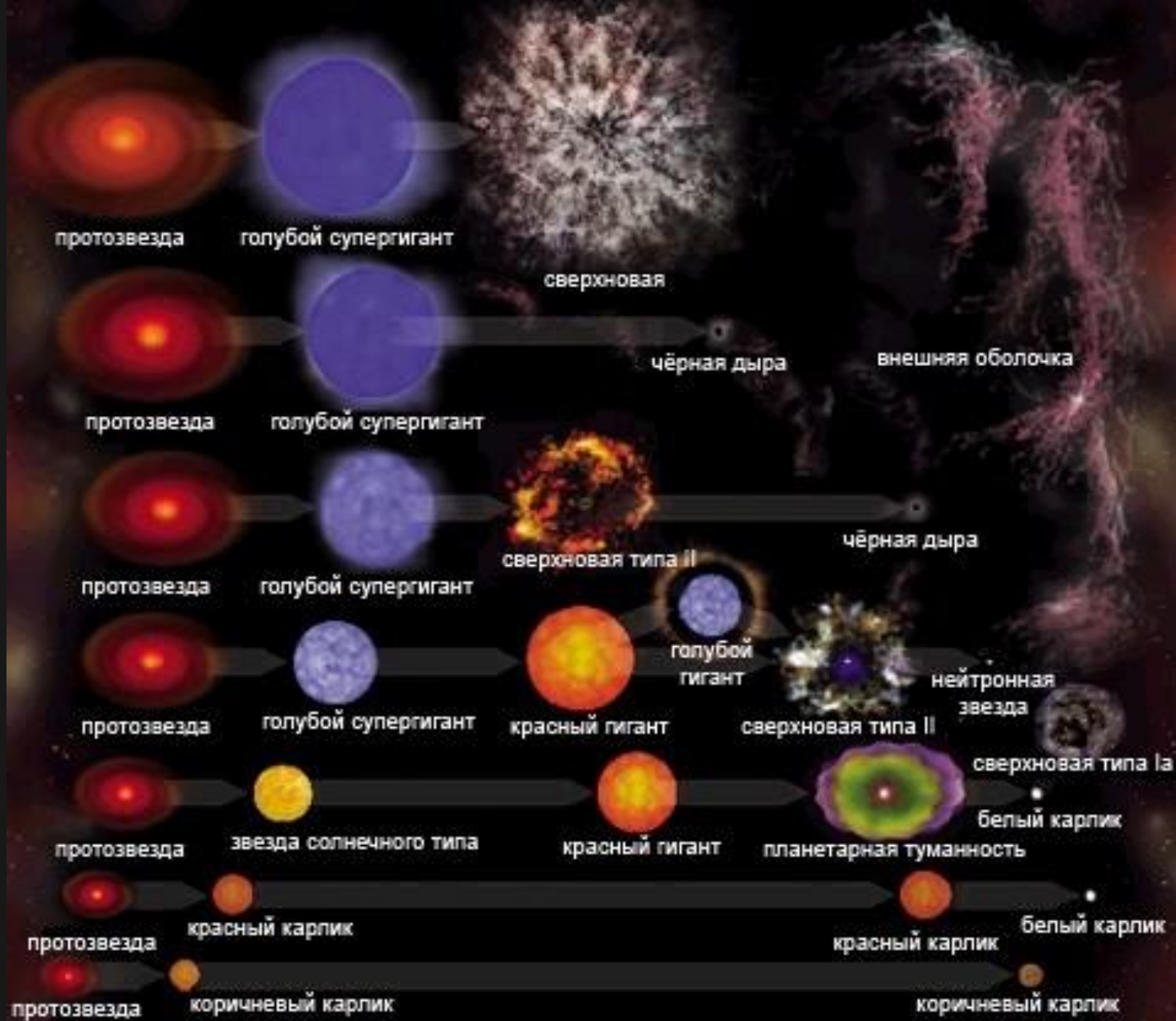
**звезды с массой более 8 солнечных взрываются как
сверхновые, производят CNO и Fe**

Производство элементов на белых карликах (термоядерный котел)

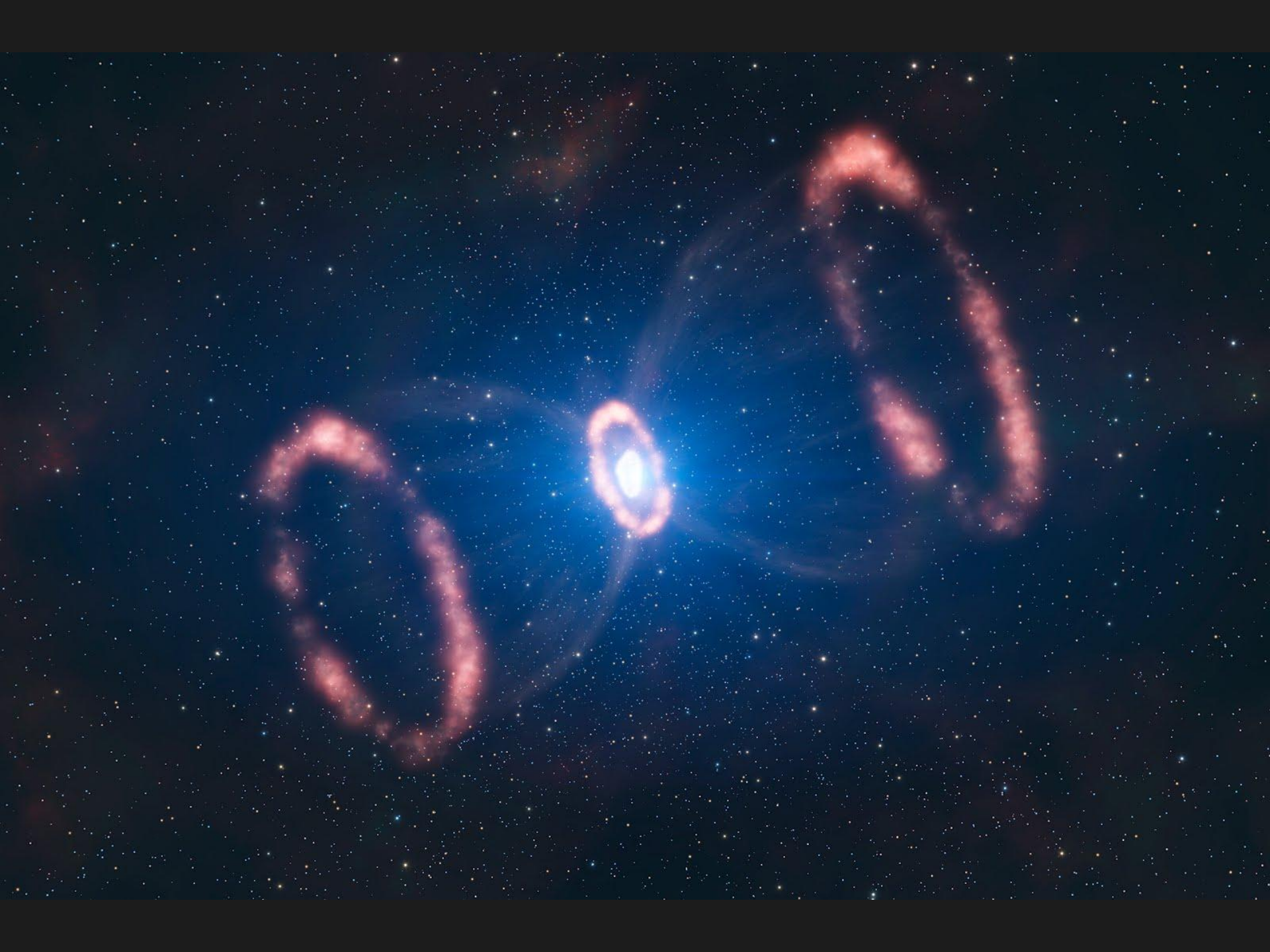
Производство элементов в аккреционных дисках с черными дырами

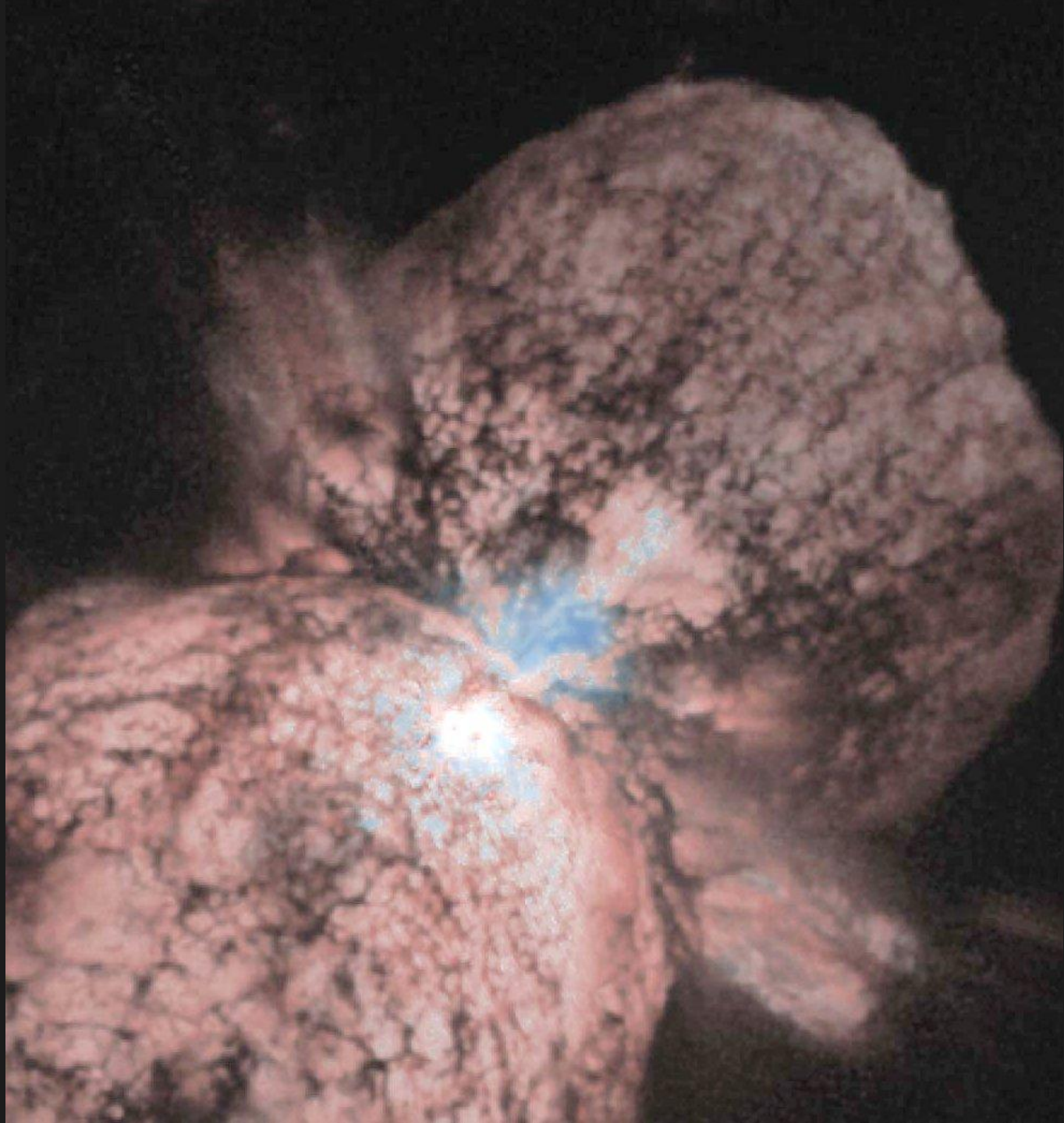
HISTORY OF THE UNIVERSE

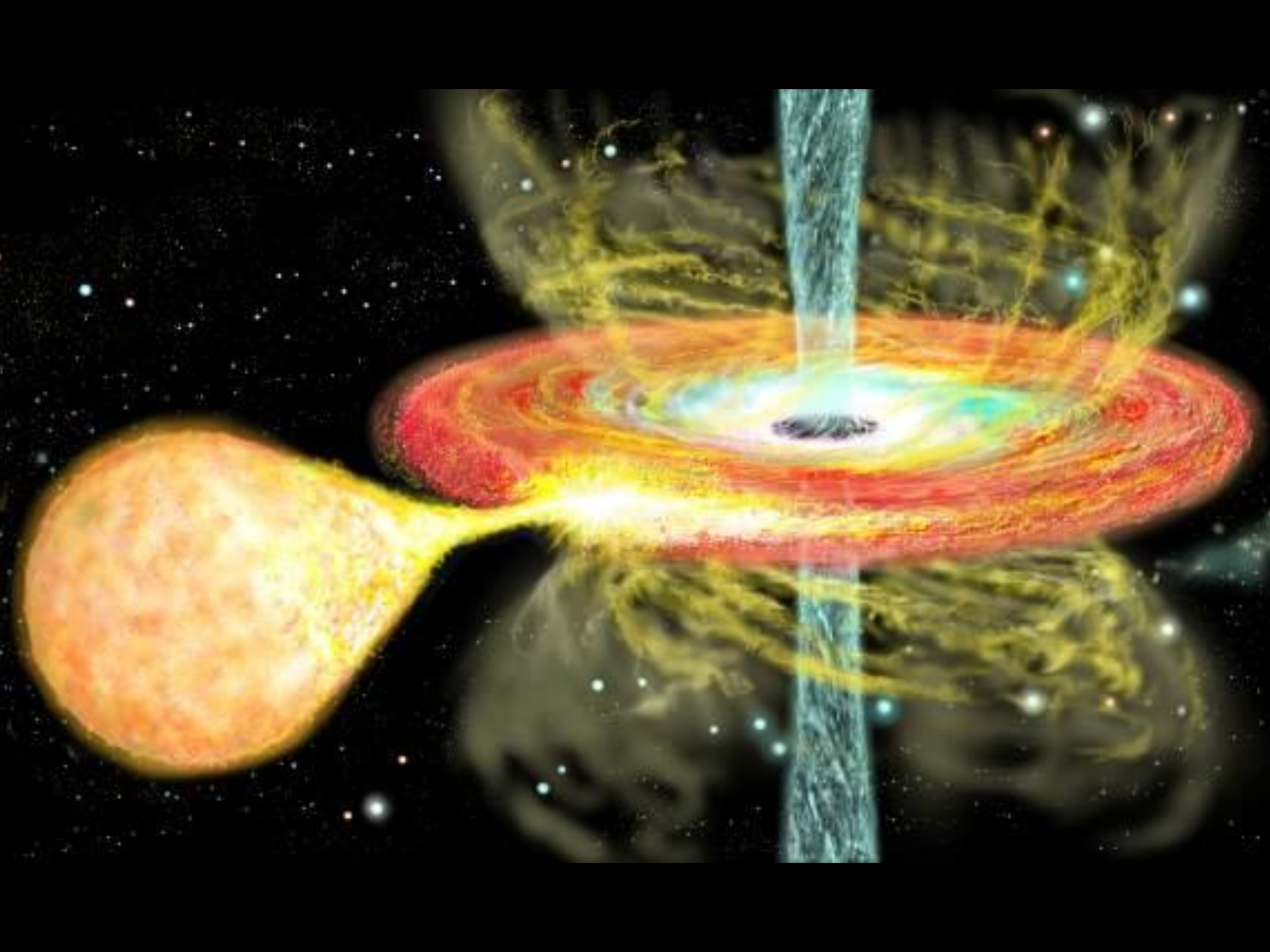




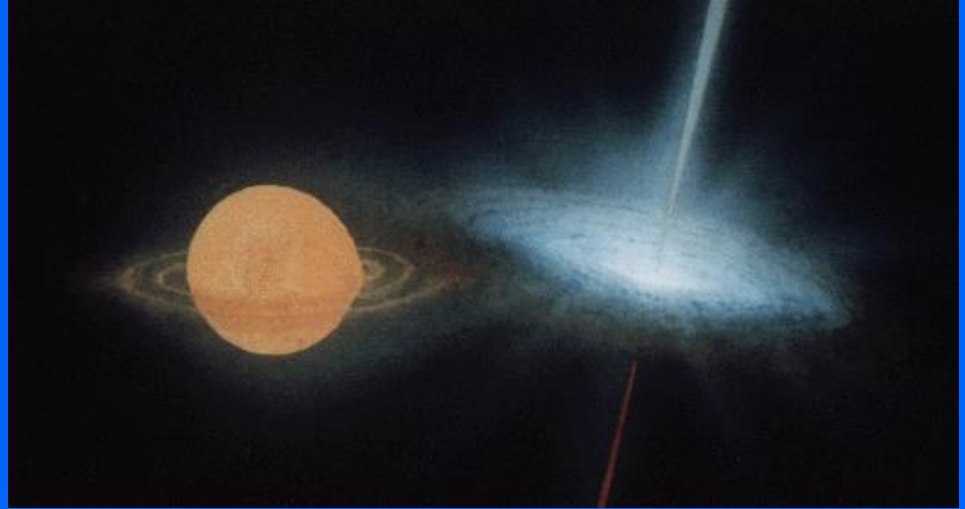






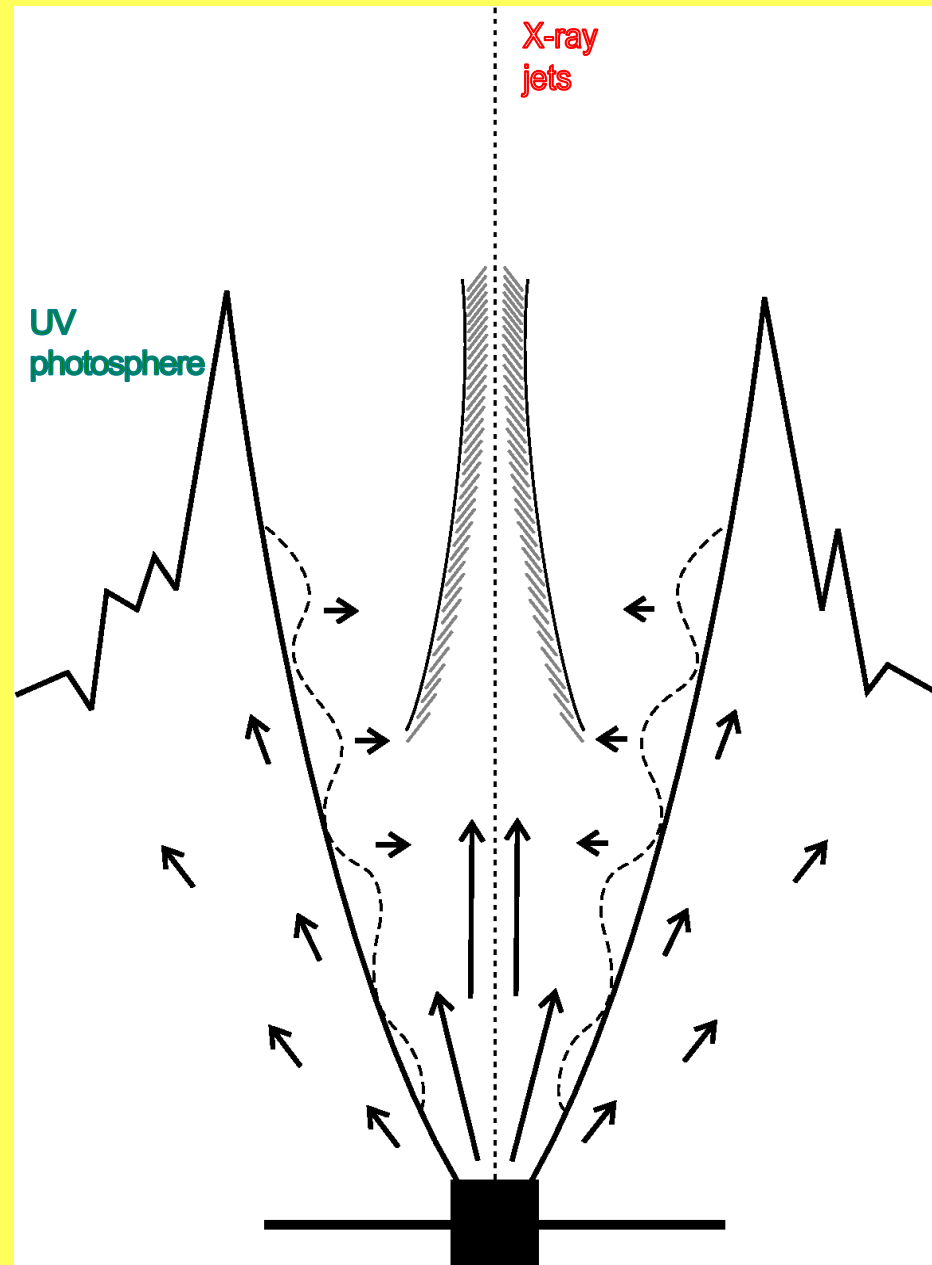


SS433



Двойная система с периодом 13 дней
и черной дырой $\sim 10 M_{\odot}$
сверхкритический аккреционный
диск и его ветер — самые
яркие источники системы.

Сверхкритический диск и канал в SS433



$$\dot{M}_{wind} \sim 10^{-4} M_{\odot} / y$$

$$T_{wind} \sim (5-7) 10^4 K$$

$$V_{wind} \sim 1500 \text{ km/s}$$

$$L_{bol} \sim 10^{40} \text{ erg/s}$$

$$L_X \sim 10^{36} \text{ erg/s}$$

$$\text{Jets: } L_k \sim 10^{39} \text{ erg/s}$$

$$2 \theta_j \sim 1.5^\circ$$

$$\text{Funnel: } 2 \theta_f \sim 50^\circ$$

Полный внутренний бюджет
(в рентгене) $\sim 10^{40} \text{ erg/s}$

Адиабатически охлаждающиеся струи

Мы видим струи начиная с точки r_0 , где их температура T_0

Диагностика по континууму:

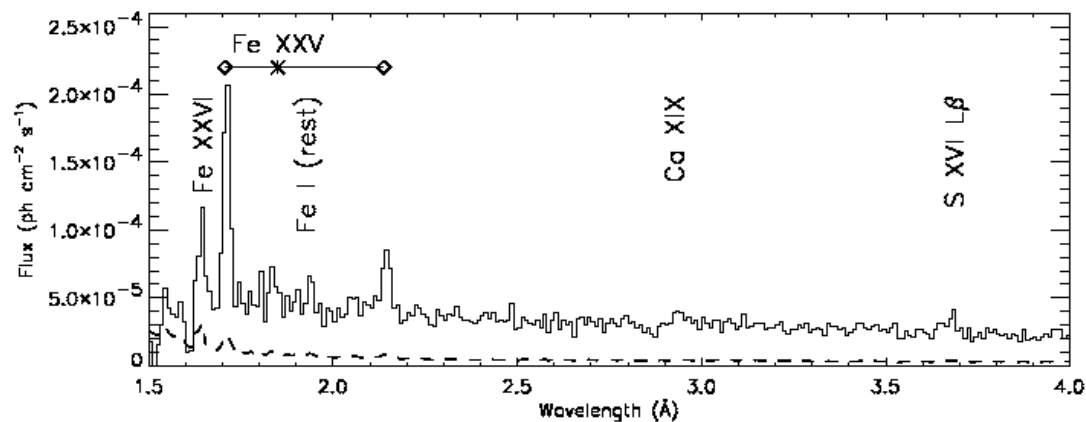
$kT_0 = 20 - 40$ кэВ Brinkmann et al., 1991 (Ginga)
Filippova et al., 2006 (RXTE)

Диагностика по линиям железа FeXXV/FeXXVI:

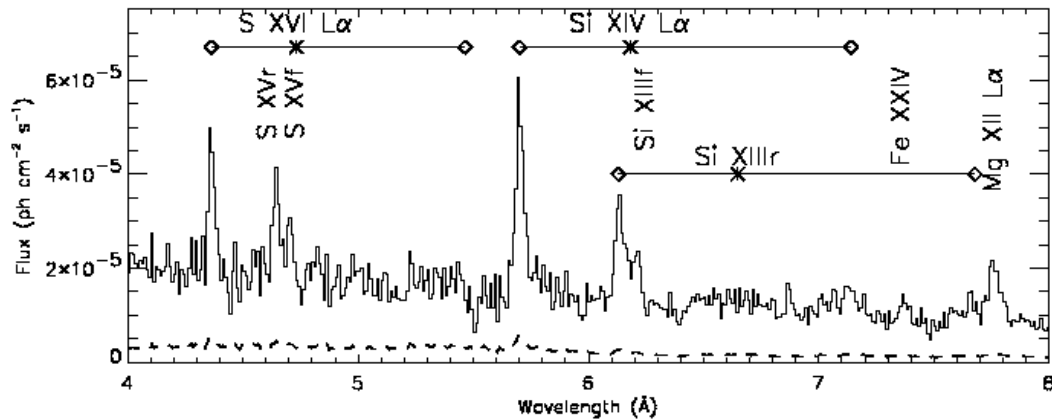
kT₀ = 10 - 20 кэВ	Kotani et al., 1996 (ASCA)	избыток Ni в ~10 раз
	Marshall et al., 2002 (Chandra)	избыток Ni

$kT_0 = 17 \pm 2$ кэВ Brinkmann et al., 2005 (XMM) **Ni больше в ~ 8 раз**

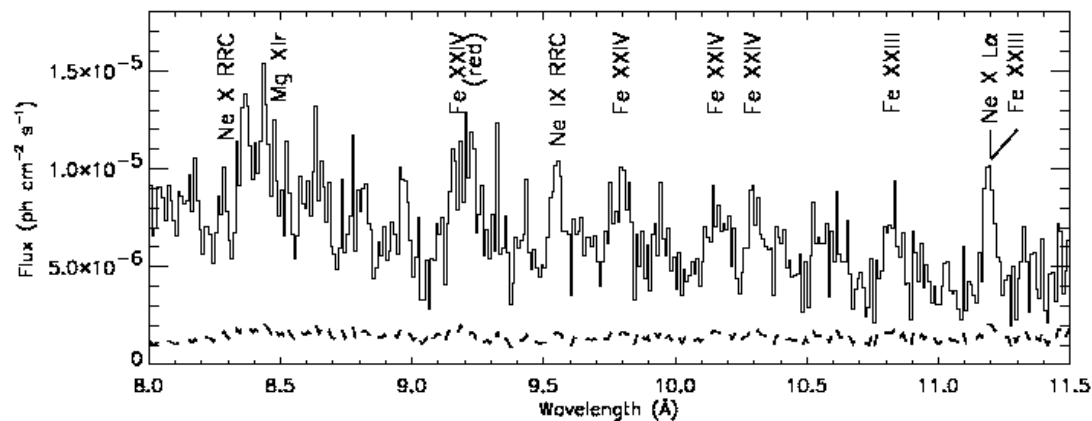
$kT_0 \approx 17$ кэВ Medvedev, Fabrika, 2010 (XMM) **Ни больше в ~ 10 раз**

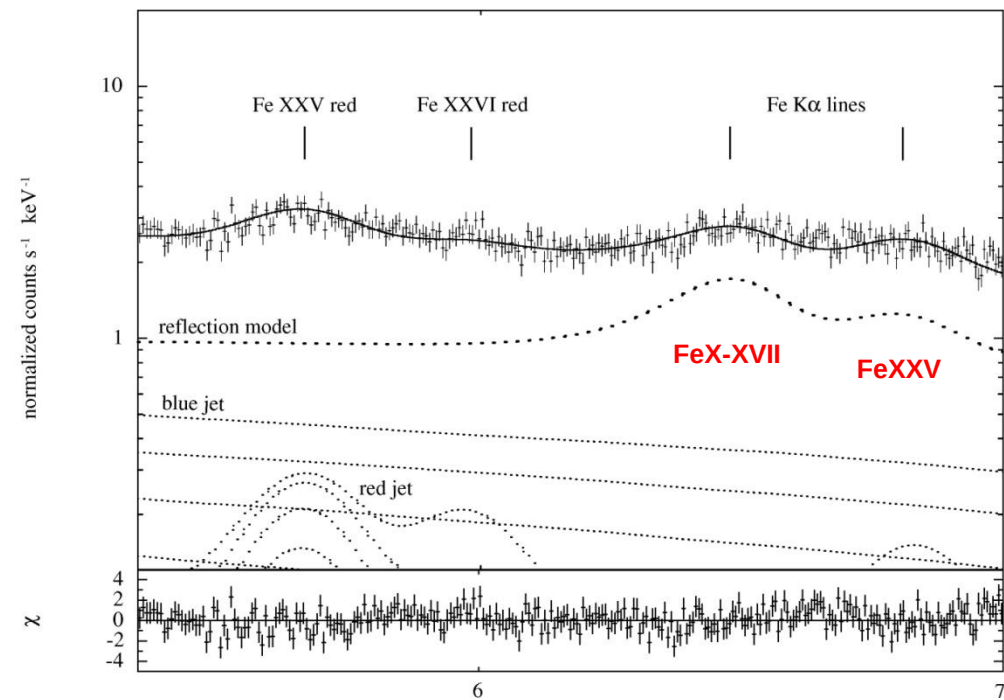


SS433 от CHANDRA
Marshall et al. (2002)



Marshall et al. (2013)
утверждает, что
Ni больше как минимум
в 15 раз больше чем Fe



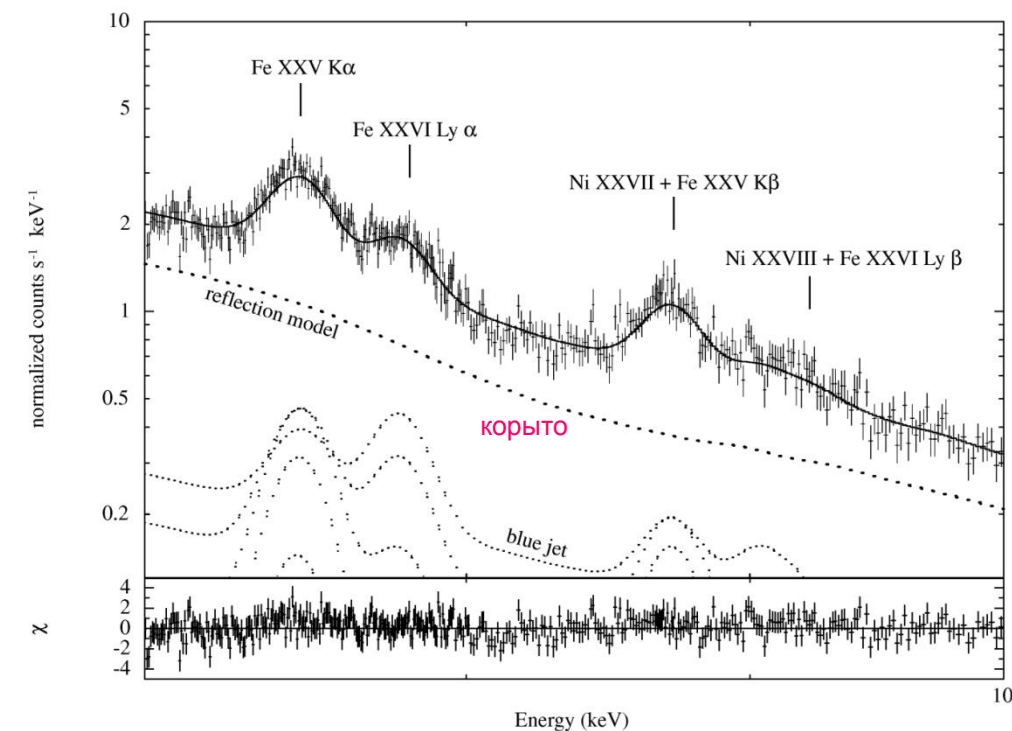


Тепловые струи
+ отражение полностью
объясняют спектр в
диапазоне 2 -12 кэВ

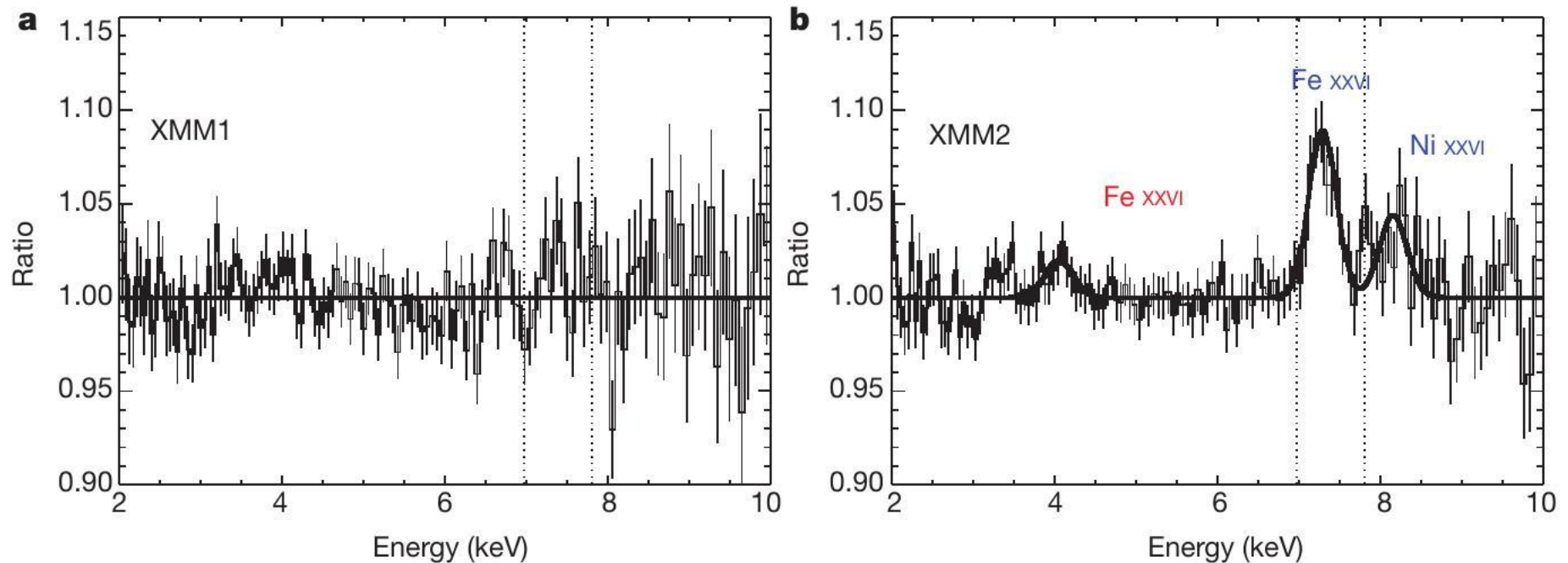
Отражение от частично
ионизованной среды
Модель REFLION
(Ross, Fabian, 2005)

Падающий спектр степенной
Среда им ионизуется,
Ионизационный параметр
 $\xi = 4\pi F/n$

Содержания элементов
примерно солнечные,
но никеля больше в ~10 раз...



Барионные джеты в 4U1630-47 (Diaz Trigo et al., 2013)



W. Cui et al. (2000) RXTE: открытие струй. Линии Fe на ~ 5.7 ~ 7.7 кэВ во время вспышки 1996 г.

M. Diaz Trigo et al. (2013) XMM Newton: второе обнаружение во вспышке 2000 г.
Линии Fe и Ni. Скорость струй $\sim 0.66c$. Радиоджеты (ATCA).

Nulsen et al. (2014) Chandra: за 6 месяцев в той же вспышке 2000 г. линий нет. Радио есть (ATCA)

Открытие гамма-линий в SS433 – Lamb et al., 1983

Неподтверждение этих линий на более обширном материале
- Geldzahler, Geller, 1994++

SN обогатила донор?

Никель не обнаружен в спектре донора Cherepashchuk et al., 2005; Hillwig, Gies, 2008

В наших спектрах с Subaru (Kubota et al., 2010) Ni не обнаружен,
предел детектирования 0.06 mÅ (В. Шиманский: близок к солнечному или ниже)

Ядерные реакции на поверхности H3?

В термоядерном горении в первую очередь участвуют H, He, CNO (Keek et al., 2014)

Термоядерное горение в аккреционных дисках

Возможны много реакций: pp-цепочка, CNO-цикл, r-, rp-, α -процессы (Chakrabarti et al. (1987), Mikhopadhyay, Chakrabarti (2000))++

Заметный вклад в энерговыделение диска

В дисках ($\dot{m} < 0.01$) ADAF типа (Narayan, Yi, 1994) может возникнуть сложная химия

Большое вязкостное время (время реакций), $\rho > 0.01 \text{ g/cm}^{-3}$

В сверхкритических дисках ($\dot{m} > 0.01$) времена сравнимы со временем свободного падения

В струях SS433 содержание He/H примерно солнечное (Панферов, Фабрика, 1997)

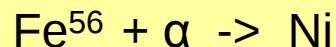
*У металлов нет кардинальных отличий от солнечного (Marshall et al. 2013)
(однако Ni)*

Сверхкритический диск SS433

Область формирования джета ~ область ядерных реакций

$$r_j / v_j \sim 3 \text{ ms} \quad (v_j = 0.26 c)$$

Толща по реакциям мала, возможны p , α + металлы



Такие процессы известны в солнечных вспышках (Tatischeff et al. 2006)

Модель СКАД Шакуры-Сюняева (1973)

простой подход с ветром из внутренних областей, без учета адвекции

в основных чертах подтверждается расчетами
(Okuda et al., 2009; Ohsuga et al., 2011, Jiang et al., 2014)

радиус сферизации диска $r_{sp} = \frac{\kappa \dot{M}}{8\pi c} \sim 3 \cdot 10^9 \text{ cm}$

$$\dot{M}(r) = \dot{M}_0 (r / r_{sp}) \quad \text{темп аккреции}$$

$$\dot{M}_w(r) = \dot{M}_0 - \dot{M}(r) \quad \text{темп ветра}$$

$$V_w \approx \sqrt{2GM / r} \quad \text{скорость ветра}$$

Темп потери массы в струе SS433 $\dot{M}_j \sim 5 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$

Масса джета набирается из ветра: $\dot{M}_j = \dot{M}_w(r_{in}) - \dot{M}_w(r_j)$

$r_j \sim 3 r_{in}$ - область формирования джета

время формирования $\sim 3 - 6 \text{ ms}$ (движение над-Кеплеровское)

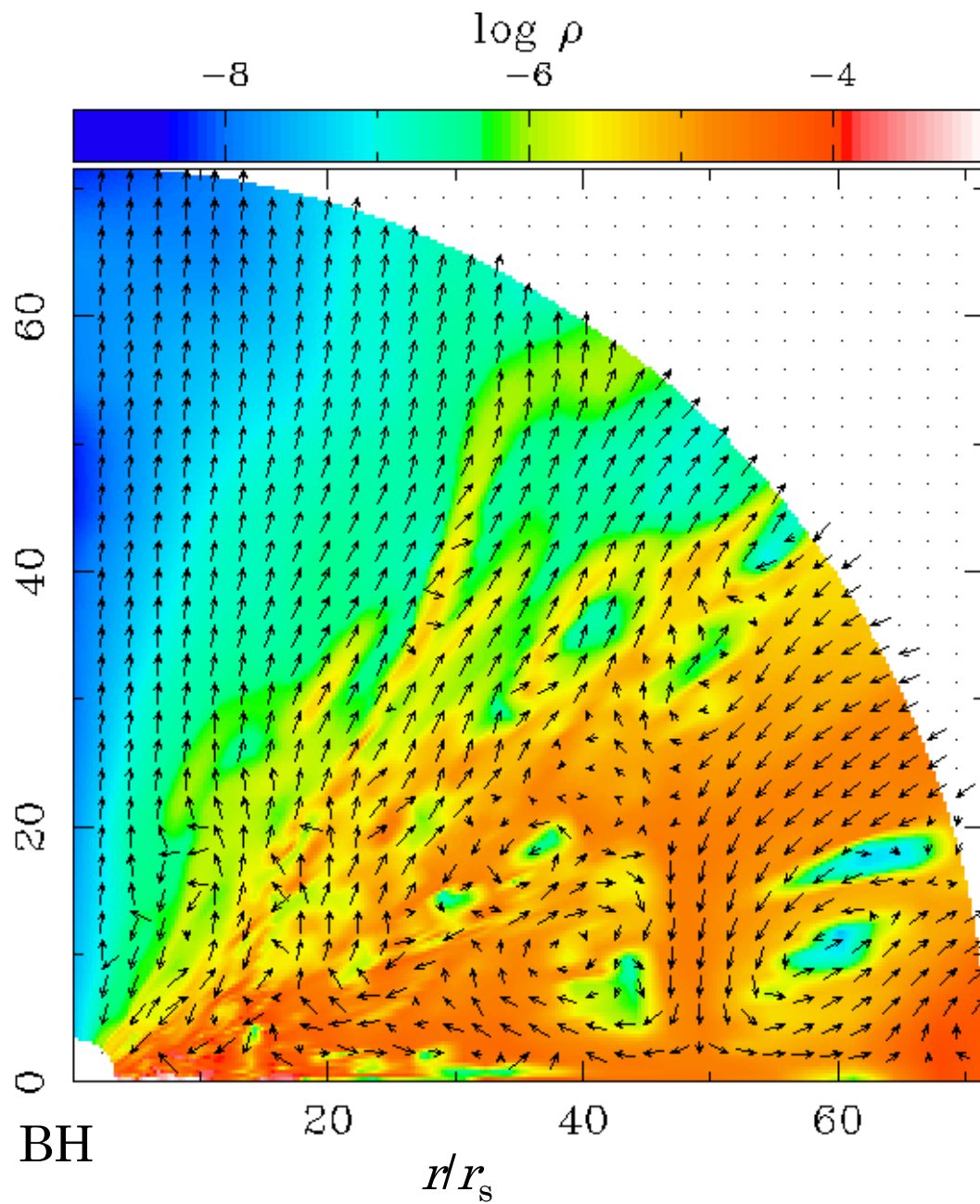
Плотность ветра при $r < r_{sp}$ $n(r) = n(r_{in}) \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^{-1/2}$, $n_{in} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3} m_{10}$

Динамический напор струи $\rho v_j^2 = \dot{M}_j v_j / \Omega_f r^2 \propto r^2$, $\Omega_f \approx 50^\circ$ (Atapin et al. 2015)

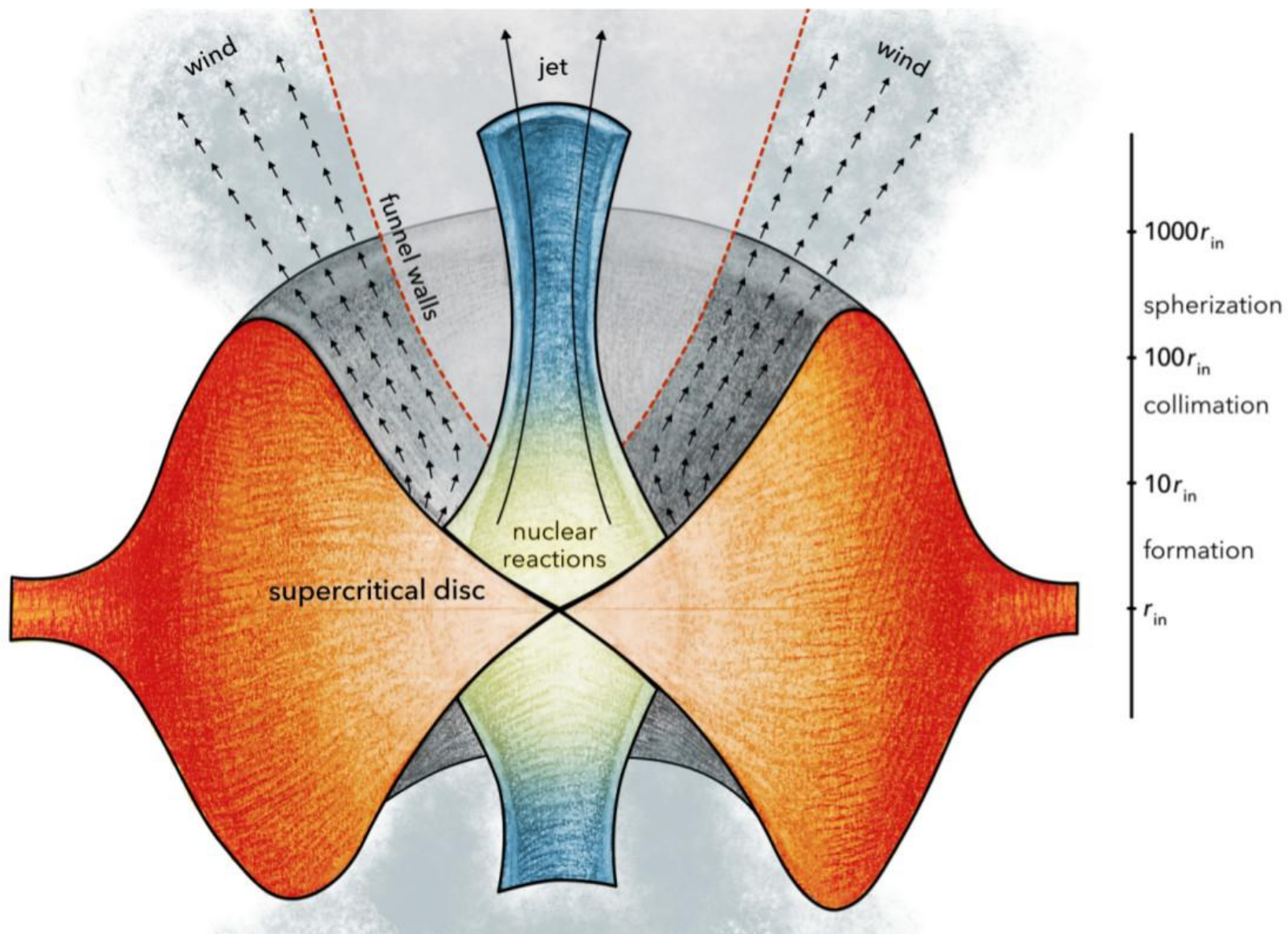
Динамический напор ветра $\rho v_w^2 \propto r^{3/2}$

при $\rho v_j^2 = \rho v_w^2$ ожидается коллимация струи

$r_{coll} \sim 6 \cdot 10^8 \text{ cm } m_{10}$ - область коллимации джета



Ohsuga et al. 2005,
ApJ, 628, 368



области формирования и коллимации струи

База данных сечений TENDL – 2012
основанный на коде TALYS
(Koning, Rochman, 2012)
солнечный состав

300 реакций: Fe, Co, Ni, Cu, Zn + p, α

время реакций 3 и 6 ms

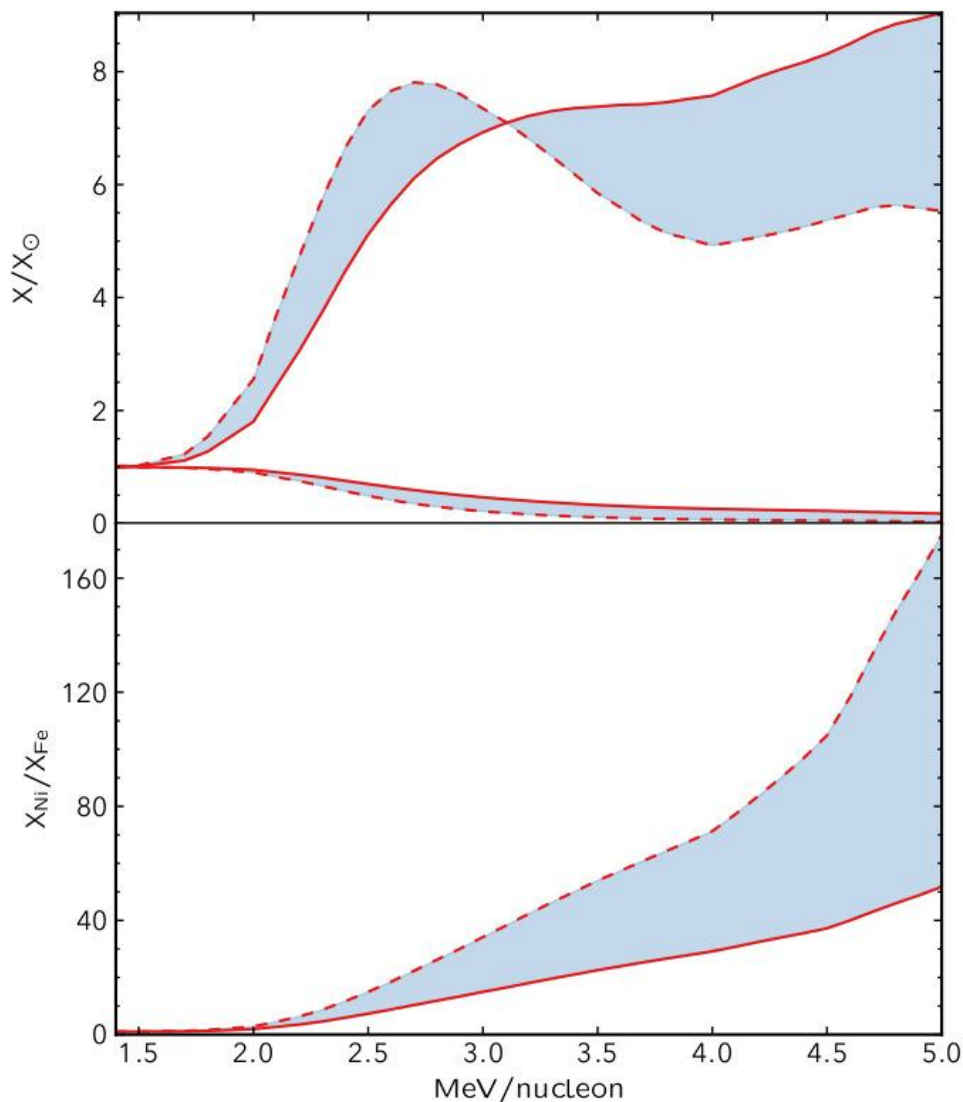
плотность газа $n_{in} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

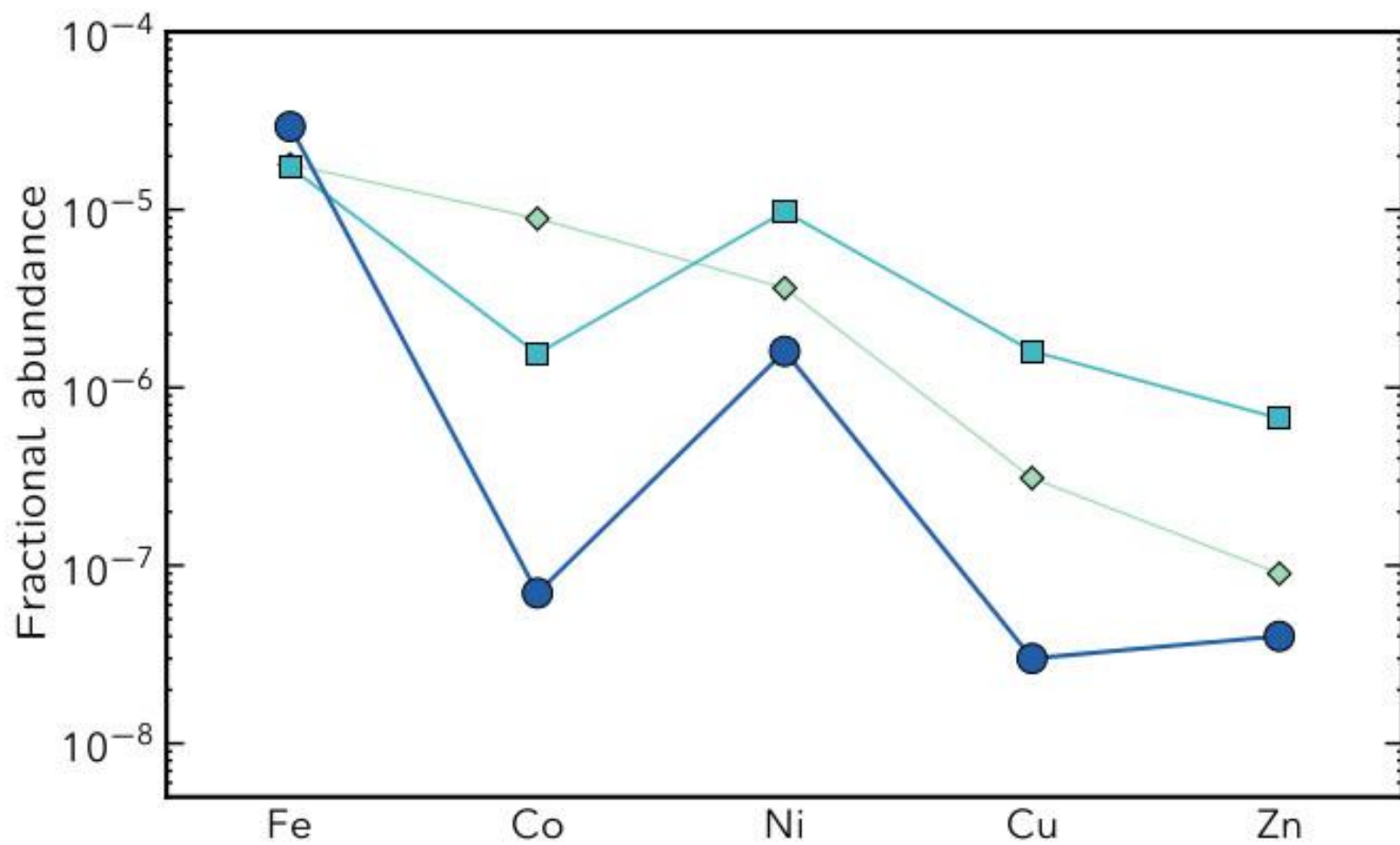
**Требуемое количество Ni по отношению к Fe
(10-15) получается при 2.5-3.0 МэВ/нуклон**

Полная энергия в основной реакции
 $\text{Fe}^{56}(\alpha, n)\text{Ni}^{59}$ в системе центра масс:

$$E = 63.1 (1 - \cos\theta) \text{ МэВ/нуклон}$$

угол схождения потоков при формировании джета
 $\theta \sim 20^\circ$





Результат синтеза через 100 сек (рентгеновская струя)
и на бесконечности. С учетом всех изотопов

Влияние этого механизма на туманность W50 окружающую SS433
или на нашу Галактику: незначительно

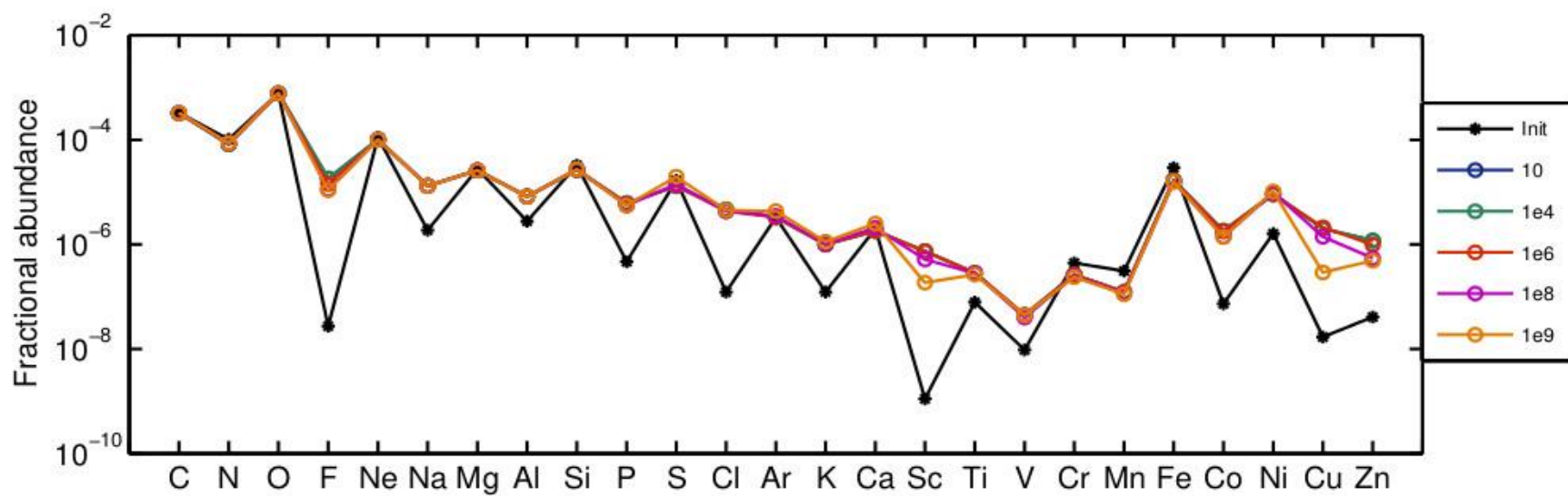
В ранних квазарах весьма заметно ($\times 10^6 - 10^9$)

В первом приближении эффективность реакций
не зависит от массы черной дыры:

время и размер $\propto M$

плотность $\propto M^{-1}$

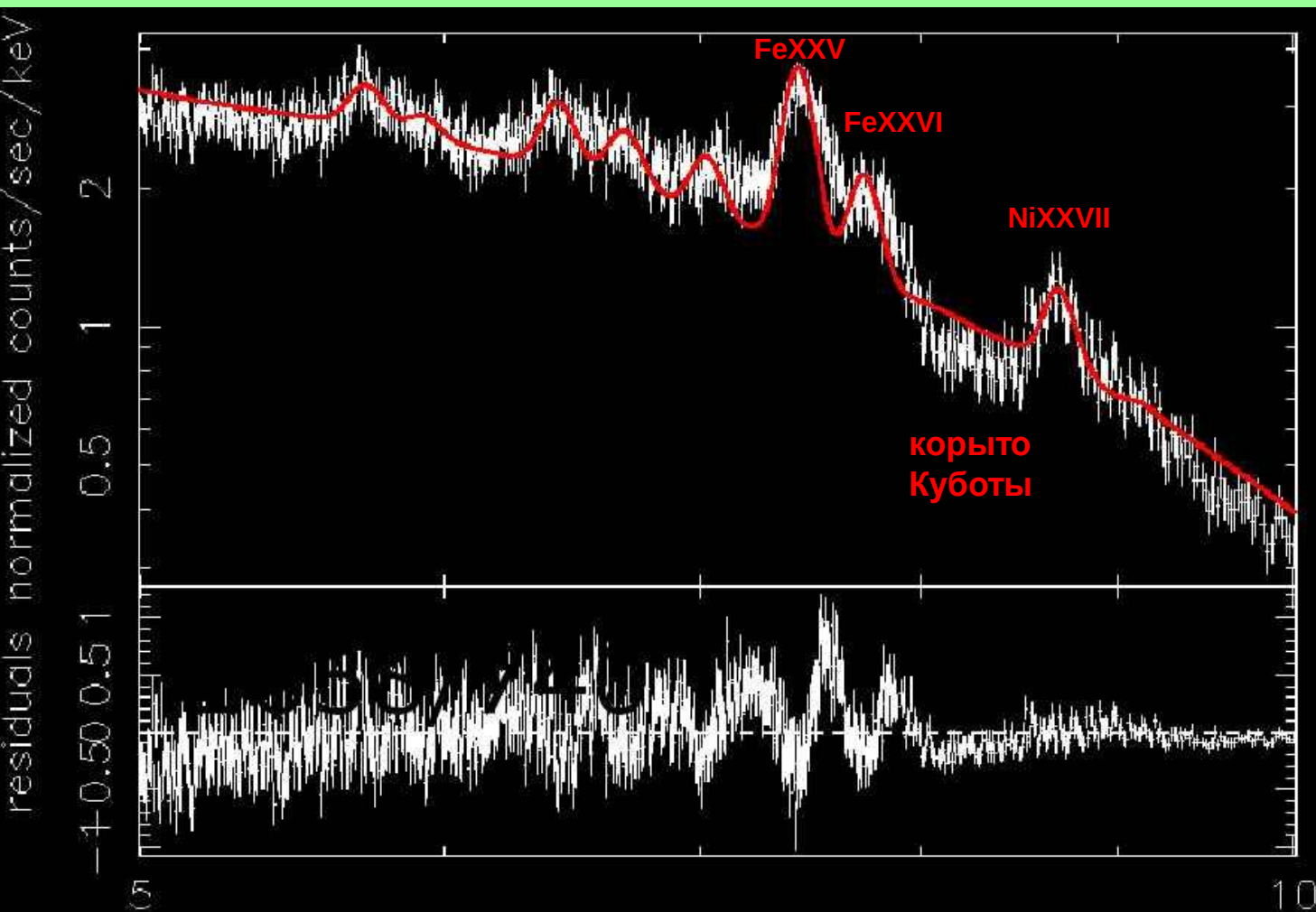
Результат по все элементам (800 реакций)



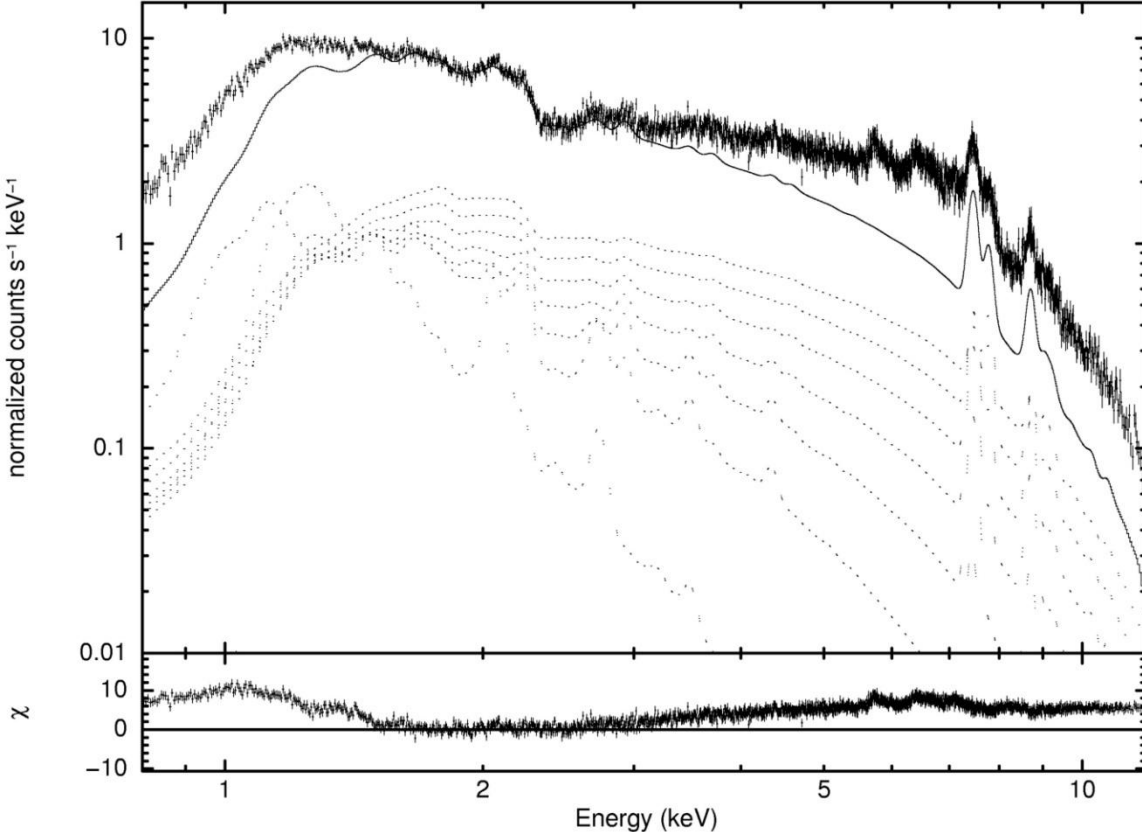
Спасибо!

XMM-Newton, апрель, октябрь 2003 г.

Их изучали Brinkmann et al., 2005; Kubota et al., 2006



Переменная шикора
деталь поглощения
на 7.9 или 7.6 кэВ



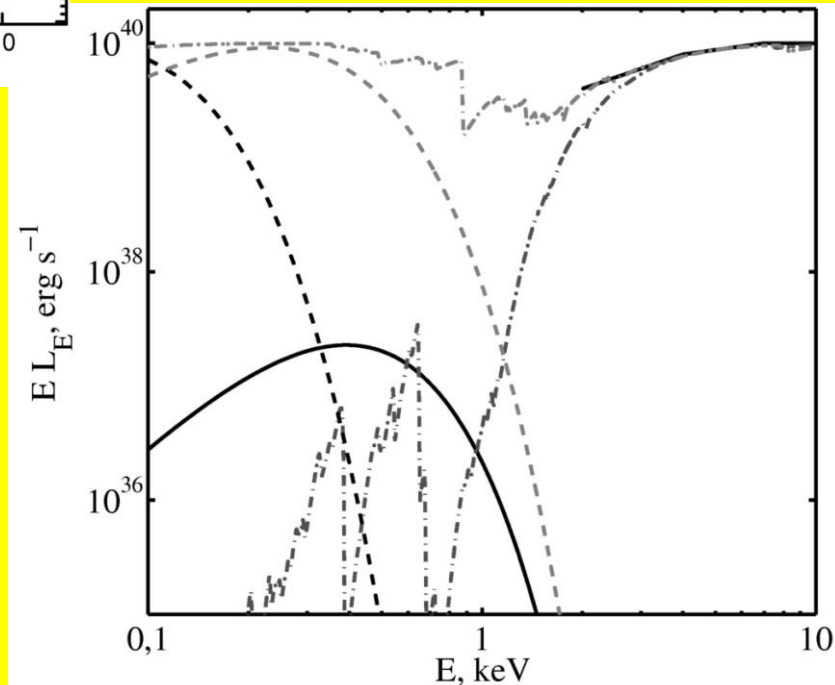
Как видит SS433 XMM-Newton

Medvedev, Fabrika (2009)

Многотемпературные релятивистские струи
+ отражение от ионизованной среды
+ BB или MCF спектр внешних стенок канала

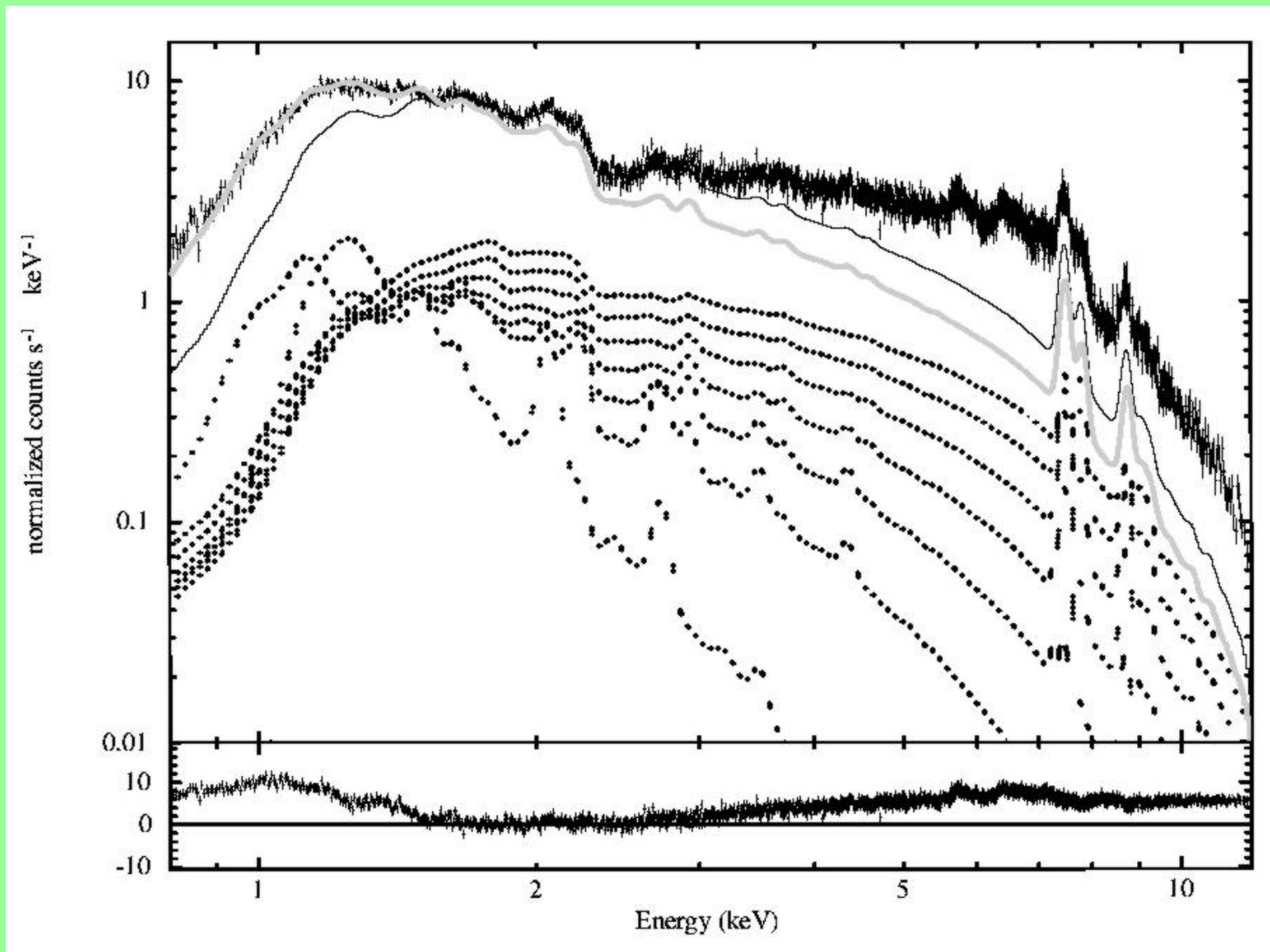
Отражаемый спектр плоский,
 $E F_E \sim E^0$, с сильным поглощением

Спектр мягкого рентгена
такой же как у ULXs



Дополнительные неубиваемые компоненты излучения

Medvedev, Fabrika, 2010



Brinkman et al., 2005 предупредили, что тепловые струи не объясняют спектры ХММ