

Jak se pozorují černé díry? - část 3.
Astrofyzikální modely
pro rentgenová spektra



Jiří Svoboda

Astronomický ústav Akademie věd ČR

Vybrané kapitoly z astrofyziky, Astronomický ústav UK, prosinec 2013

Osnova přednáškového cyklu

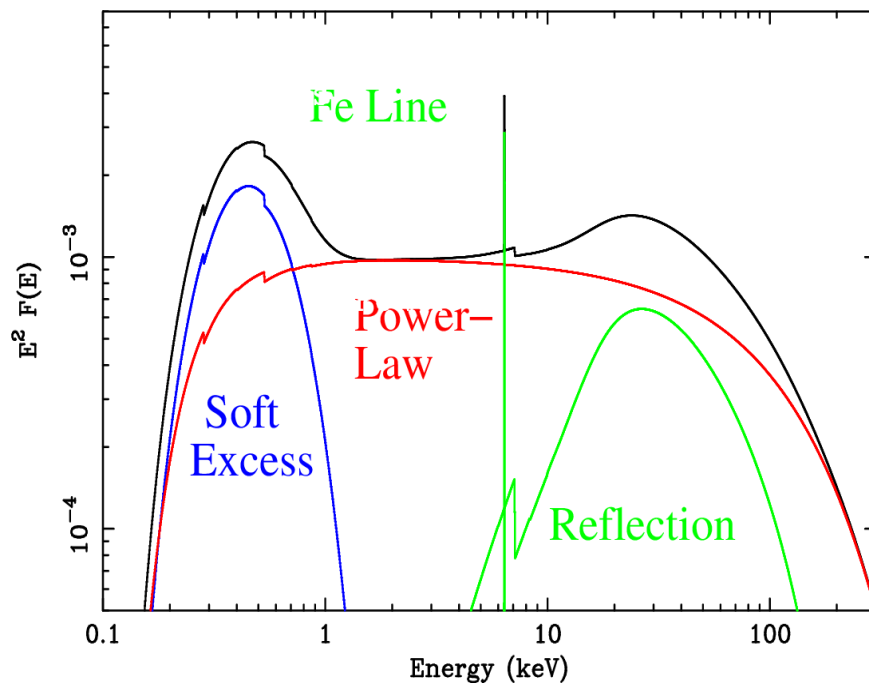
- Úvodní přednáška
 - popularizační přednáška z Týdne vědy a techniky
 - jak a kde pozorujeme černé díry ve vesmíru?
 - metody detekce černých děr – současné i budoucí
- Rentgenová astronomie
 - proces redukce dat a spektrální analýza
 - astrofyzikální modely pro rentgenová spektra
- Otevřené problémy současné astrofyziky akrečních disků okolo černých děr
- Závěr, diskuze, sepisování návrhu na pozorování,...

Co si pamatujeme z minulých přednášek?

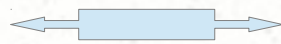
- rentgenové záření vzniká v horkém plazmatu a/nebo v prostředí s elektrony s velmi velkou kinetickou energií
- detekce rentgenového záření spočívá v pochytní jednotlivých rentgenových fotonů a změření jejich energií
 - detektory mohou být scintilátory, ionizační detektory využívající fotoefekt (např. CCD) nebo kalorimetry
- rentgenové spektrum akreujících černých děr je možné charakterizovat 3 základními emisními komponentami:
 - termální záření
 - netermální záření mocninného tvaru
 - odražené (re-procesované) rentgenové záření

Charakteristické rentgenové spektrum

aktivní galaktické jádro

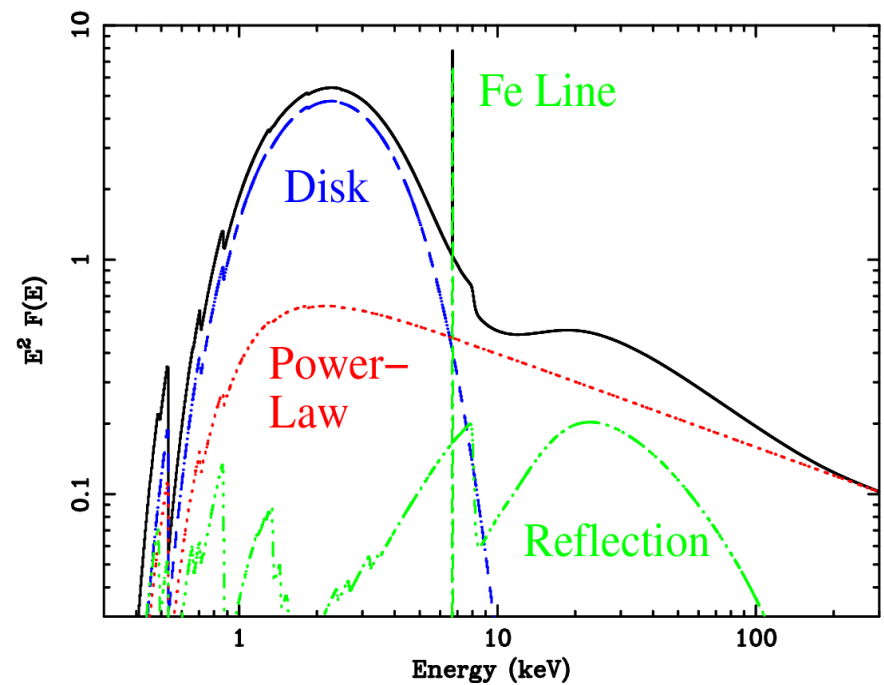


soft X-rays



hard X-rays

rentgenová dvojhvězda



Program dnešní přednášky

- astrofyzikální modely rentgenových spekter akreujících černých děr
 - termální záření
 - profil teploty akrečního disku a jeho termální spektrum
 - mocninné záření
 - inverzní Comptonův rozptyl
 - odražené záření
 - Comptonův "hrb"
 - fluorescenční čára železa
- měření spinu černé díry z rentgenových spekter
 - relativistická modifikace termálního záření
 - relativistický profil spektrální čáry z akrečního disku

Termální záření

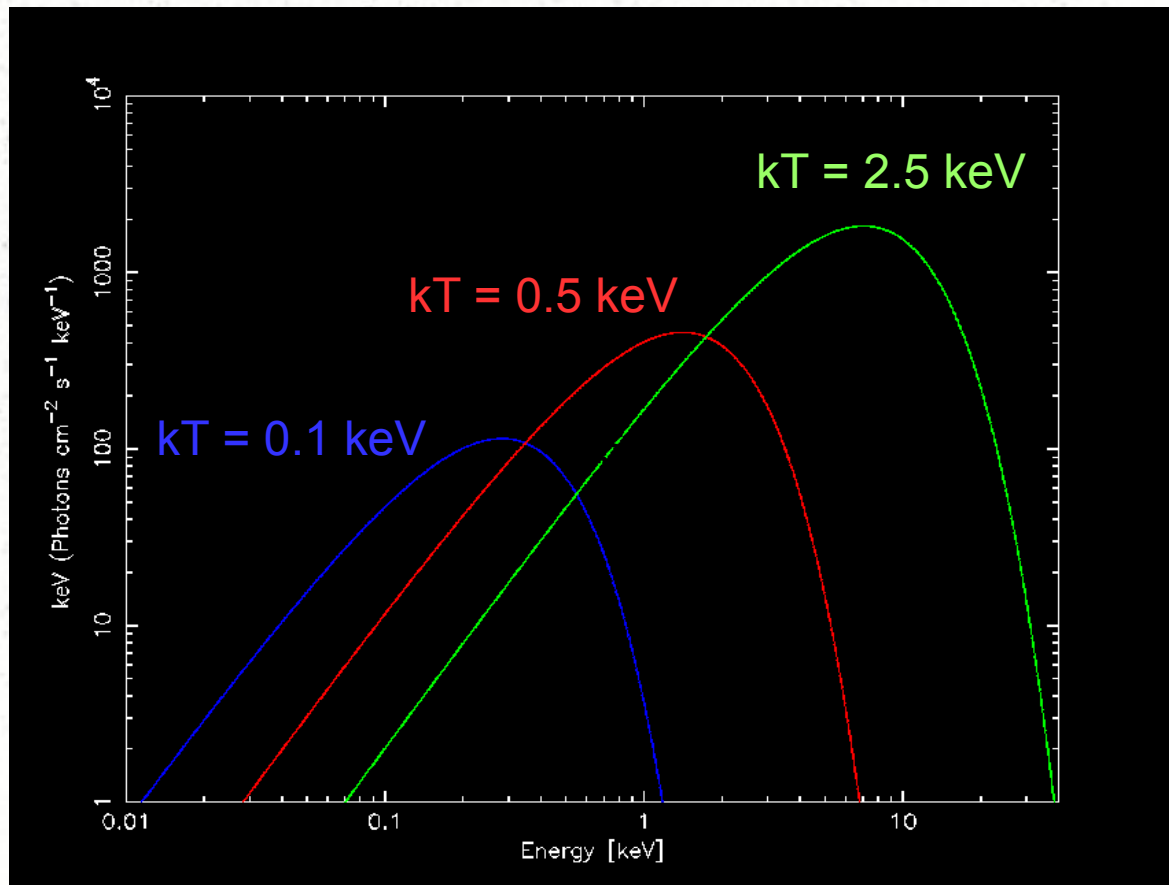
- záření absolutně černého tělesa (Planckova křivka)
 - spektrální pík se s teplotou posouvá k vyšším energiím

Planckův zákon:

$$B_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Stefan-Boltzmannův zákon:

$$L = \sigma T^4$$



Uvolnění tepelné energie v akrečních discích

- teplo se uvolňuje při **viskózním tření** akreujících vrstev
- příklad geometricky tenkého (opticky tlustého) akrečního disku

– uvolněná energie (disipace):

$$D(R) = \frac{3GM\dot{M}}{4\pi R^3} \left[1 - \left(\frac{R_{inner}}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{Shakura \& Sunyaev, 1973}$$

akreční tok

- pokud se veškerá disipace přemění v termální energii, získáme vztah pro teplotu:

$$2\sigma T^4 = D(R)$$

disk má dvě strany

Teplota akrečního disku

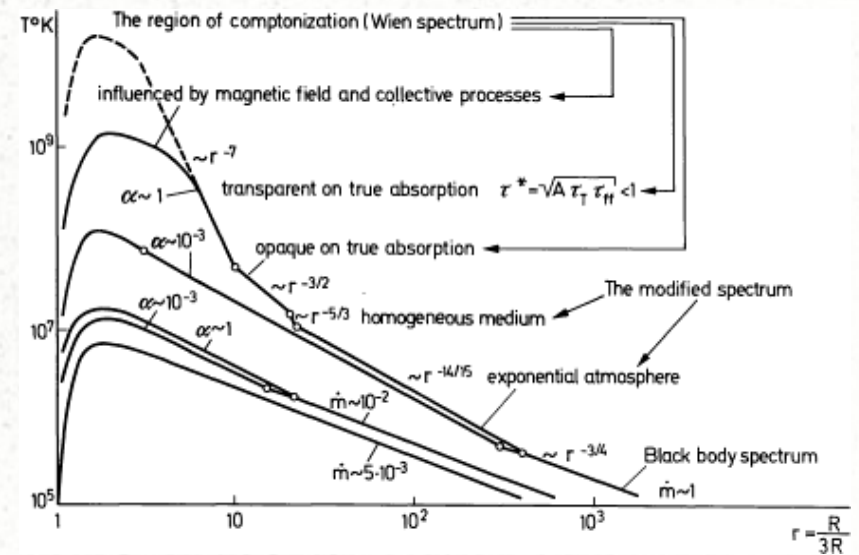
- teplota klesá s rostoucí vzdáleností od centra:

$$T(R) = \left(\frac{3GM\dot{M}}{8\pi\sigma R^3} \left[1 - \left(\frac{R_{inner}}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{\frac{1}{4}}$$

- pro zafixovanou luminositu (v jednotkách Eddingtonovy luminosity) a naškálovaný poloměr $r = R/M$ platí:

$$T(r) \propto M^{-\frac{1}{4}}$$

=> teploty akrečních disků rtg dvojhvězd ($\sim 10^7$ K) \gg teploty disků aktivních galaxií ($\sim 10^4$ - 10^5 K)



Shakura & Sunyaev, 1973

Termální spektrum akrečního disku

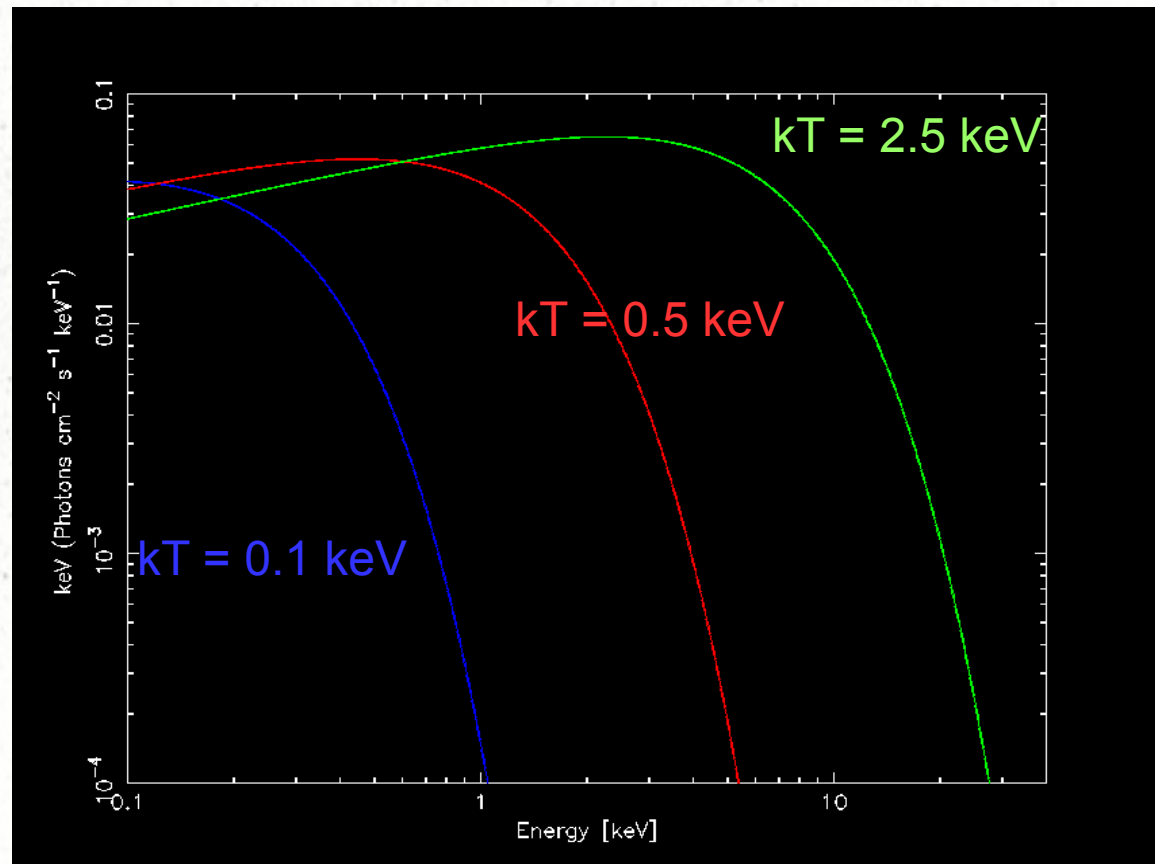
- disk je složen z jednotlivých prstenců o různé teplotě
 - tzv. multi-colour disc blackbody (Mitsuda, 1984)

Otázka č.1

Jak se od sebe liší "diskbb" a "bbody" spektra?

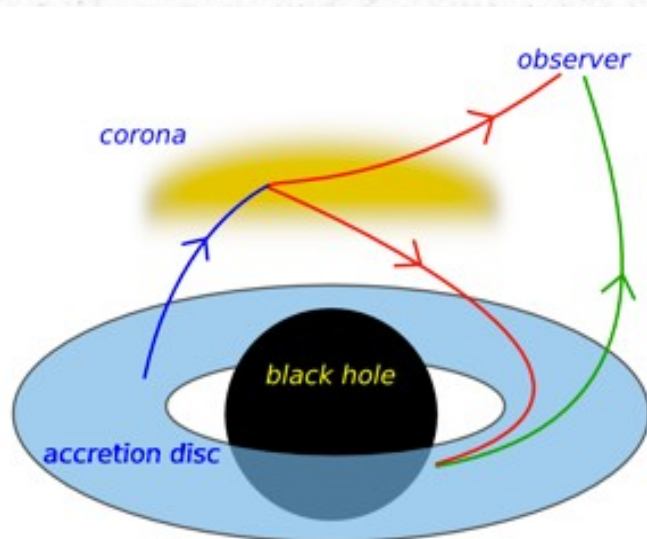
Otázka č.2

V které části přispívá vnitřní oblast akrečního disku?



Netermální rentgenové záření

- akreční disk je obklopený horkou atmosférou tvořenou relativisticky se pohybujícími elektrony, na kterých se rozptyluje rentgenové záření
 - dochází k inverznímu Comptonovu rozptylu
 - část rozptýleného záření se odrazí zpět na povrchu disku

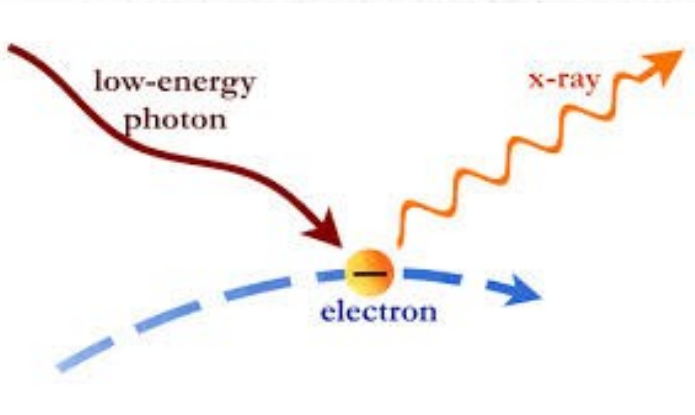


vlastnosti a původ koróny

- původ ani struktura nejsou zcela pochopeny
- velmi vysoké teploty (tvrdý rentgen)
- z několika měření (radiální emisivita rtg odraženého záření a mikročočkové pozorování) vyplývá její poměrně značná kompaktnost (**lamp-post geometry**)

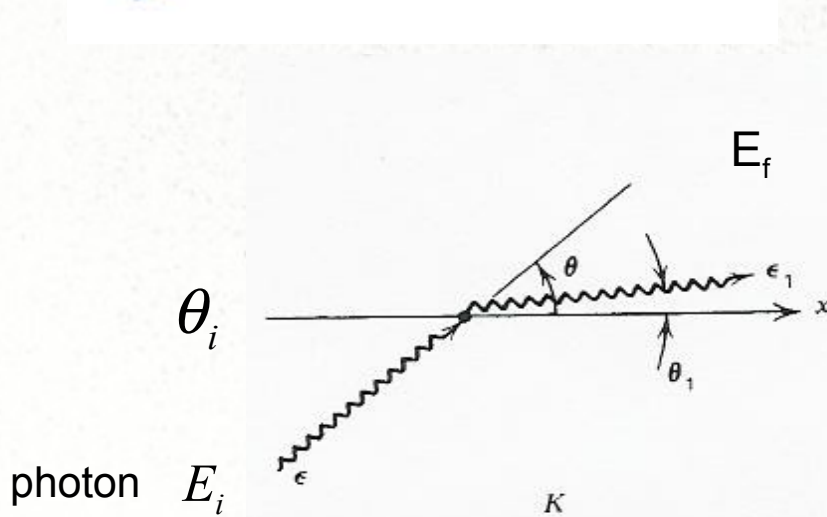
Inverzní Comptonův rozptyl

- vzniká na relativistických elektronech

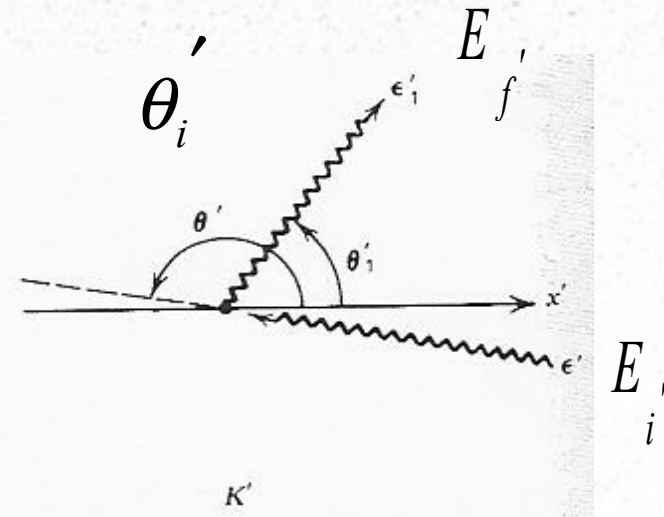


v soustavě vztažené k elektronu se jedná o běžný Comptonův rozptyl:

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$



Lab Frame



Electron Rest Frame

Inverzní Comptonův rozptyl

- E_i počáteční energie fotonu v laboratorní soustavě
- E_f konečná energie fotonu v laboratorní soustavě
- E' energie v soustavě elektronu
- (speciálně-)relativistický Dopplerův efekt:

$$E_f = E'_f \gamma (1 + \beta \cos \theta_{f'})$$

$$E'_i = E_i \gamma (1 - \beta \cos \theta_i)$$

- za předpokladu dokonale elastické srážky ve vztažené soustavě elektronu bude platit: $E'_f = E'_i$

Inverzní Comptonův rozptyl

- speciálně pro $\theta_i = \pi/2$ a $\theta'_f = \pi/2$:

$$E_f = E'_f \gamma, \quad E'_i = E_i \gamma$$

- poměr energií:

- původní energie fotonu v laboratorní soustavě :
- původní energie fotonu v soustavě elektronu :
- finální energie fotonu v laboratorní soustavě

$$= E_i : E'_i : E_f$$

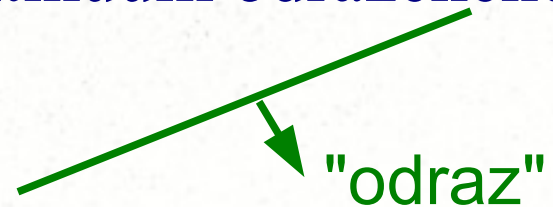
$$= 1 : \gamma : \gamma^2$$

Pohlčení a odraz rtg záření

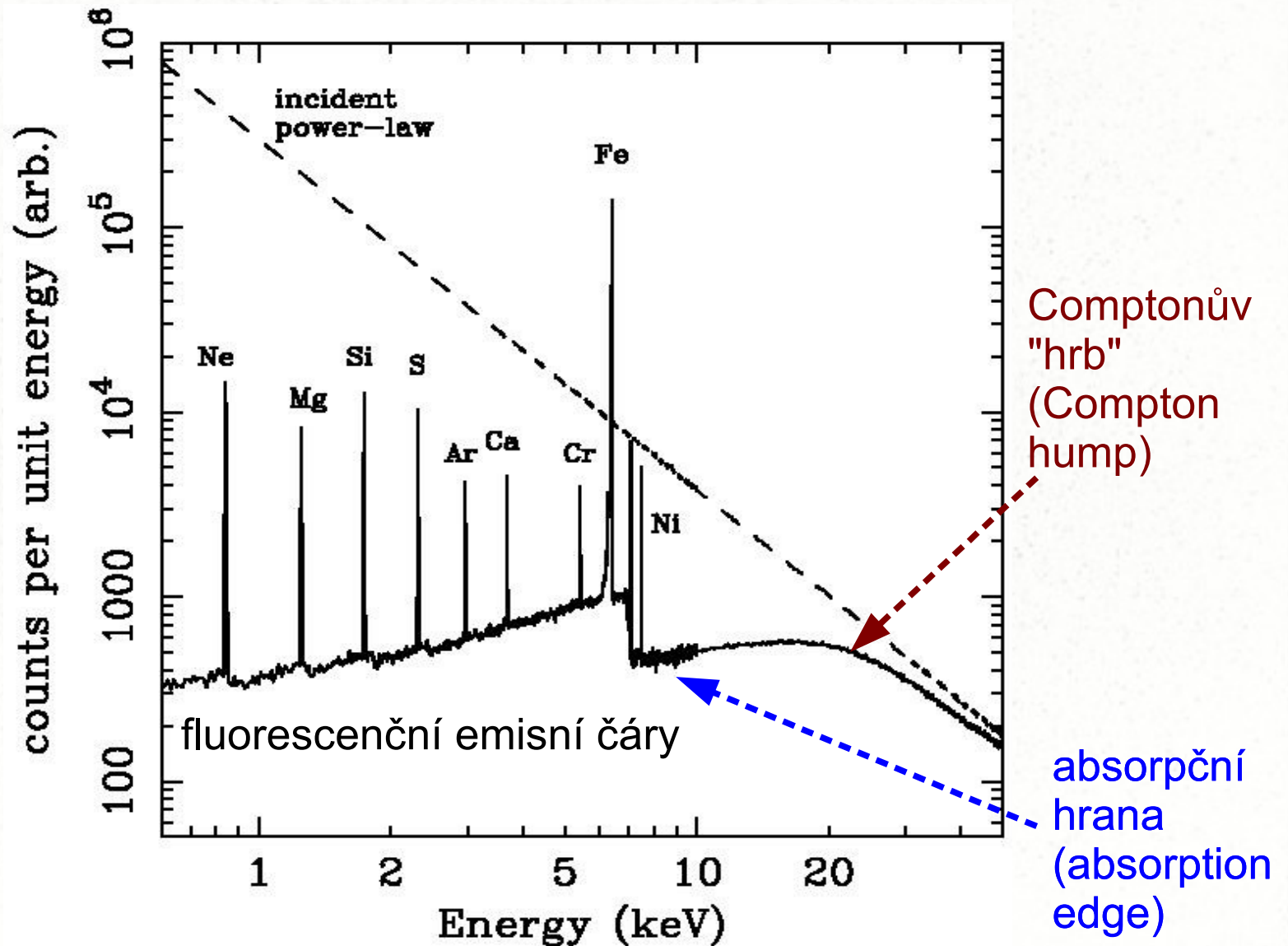
- část přímého (termálního i netermálního) rentgenového záření ze zdroje se pohltí (absorbuje)
 - ještě přímo u zdroje na různě hustých oblacích plynu
 - warm absorber (ionizovaný plyn)
 - broad line region – hustá chladná oblaka v aktivních galaktických jádrech
 - hvězdný vítr, vítr z akrečního disku
 - galaxie, druhá složka dvojhvězdy
 - v mezihvězdném prostoru
- část záření se elasticky rozptýlí – kontinuum odraženého záření
- část pohlceného záření se opět vyzáří

Pohlčení a odraz rtg záření

- část přímého (termálního i netermálního) rentgenového záření ze zdroje se pohltí (absorbuje)
 - ještě přímo u zdroje na různě hustých oblacích plynu
 - warm absorber (ionizovaný plyn)
 - broad line region – hustá chladná oblaka v aktivních galaktických jádrech
 - hvězdný vítr, vítr z akrečního disku
 - galaxie, druhá složka dvojhvězdy
 - v mezihvězdném prostoru
- část záření se elasticky rozptýlí – kontinuum odraženého záření
- část pohlceného záření se opět vyzáří

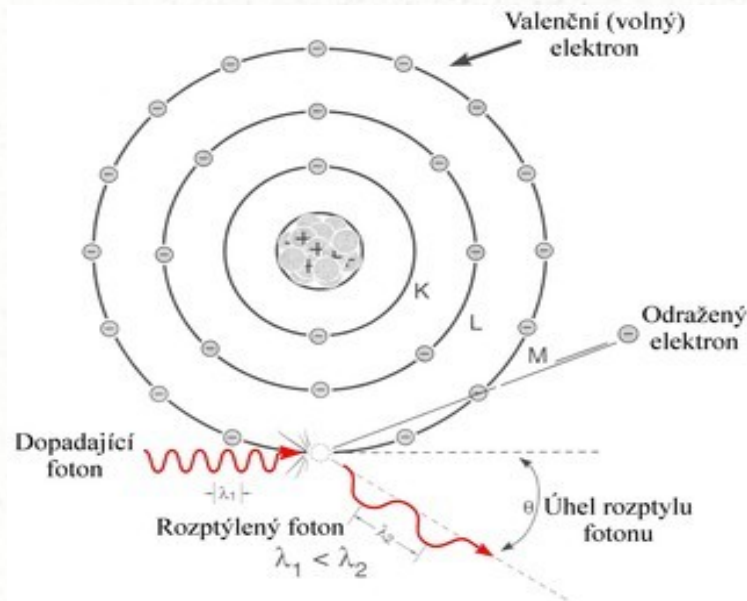


Odražené (re-procesované) záření



Ionizace, excitace

- **ionizace** = z ozářeného atomu je vyražen elektron

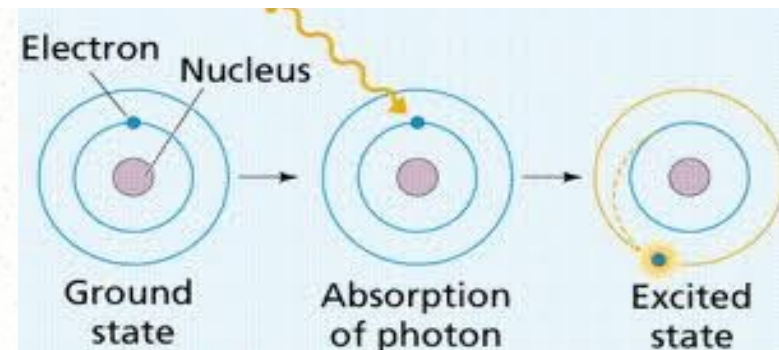


INCREASING IONIZATION ENERGY

1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.003		
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182													5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.006424	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.30409													13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955911	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80		
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29		
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.50015	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93032	70 Yb Ytterbium 173.0547	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49		
73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon 222						
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (269)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (277)								

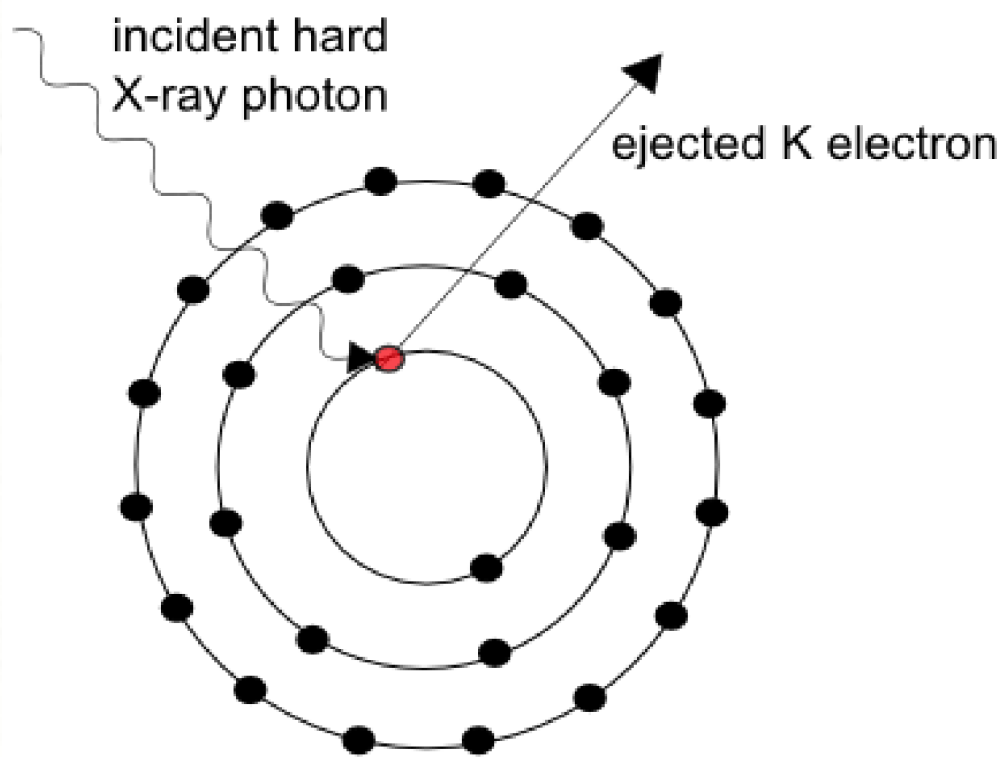
INCREASING IONIZATION ENERGY

- **excitace** = atom je ozářením nabuzen do vyššího stavu (elektron přejde na energeticky vyšší hladinu)

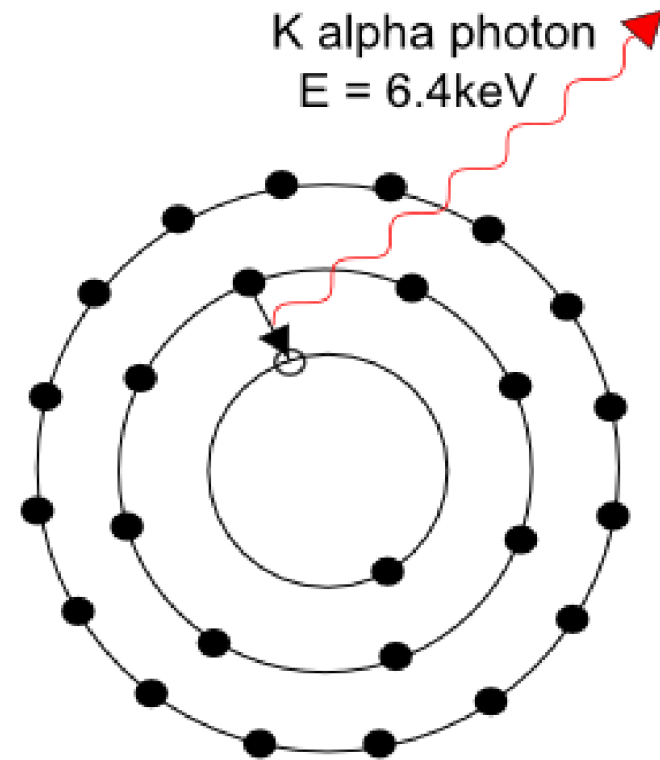


Fluorescence, K α čára železa

- silné ionizující záření vyrazí elektron z vnitřní slupky
- uvolněné místo zaplní jiný elektron z vyšší slupky a vyzáří se foton o energii, která je rovna rozdílu hladin



iron atom before photo-ionization



iron atom after photo-ionization

Výtěžek fluorescence

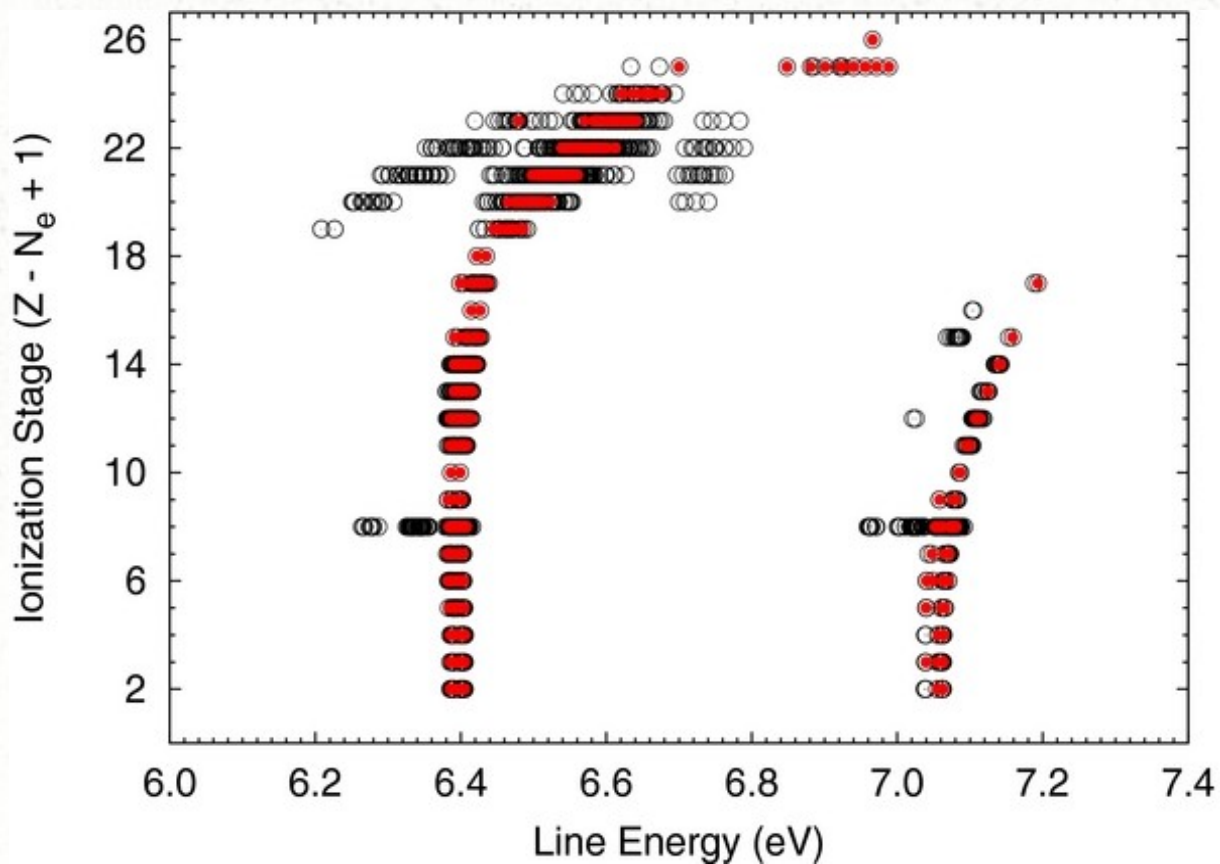
- **Augerův jev**
 - namísto vyzáření $K\alpha$ fotonu dojde k uvolnění jiného vnějšího elektronu
 - uplatňuje se zejména u lehčích prvků
- **výtěžek fluorescence** ~ pravděpodobnost, že dojde k fluorescenci a nikoliv k Augerovu jevu ~ Z^4
- **kosmické zastoupení prvků**
 - prvky těžší než železo se vyskytují jen zřídka
 - fluorescenční čára železa je nejvýznamnější fluorescenční čarou v rentgenových spektrech

Tvar odraženého záření

- závisí na:
 - tvaru primárního záření
 - stupni ionizace
 - chemickém zastoupení prvků (metalicitě)
 - vstupním a výstupním úhlu
- reflekční modely
 - "reflionx", Ross & Fabian (1993)
 - "xillver", García et al. (2013)
 - vychází z kódu XSTAR (Kallman, 1980-)
 - mnoho dalších... (Noar, Titan, Cloudy)

Vliv ionizace na energii čáry

- pro vyšší ionizační stupeň se energie čáry posouvá k vyšším energiím:



García et al. 2013

Reflekční spektra

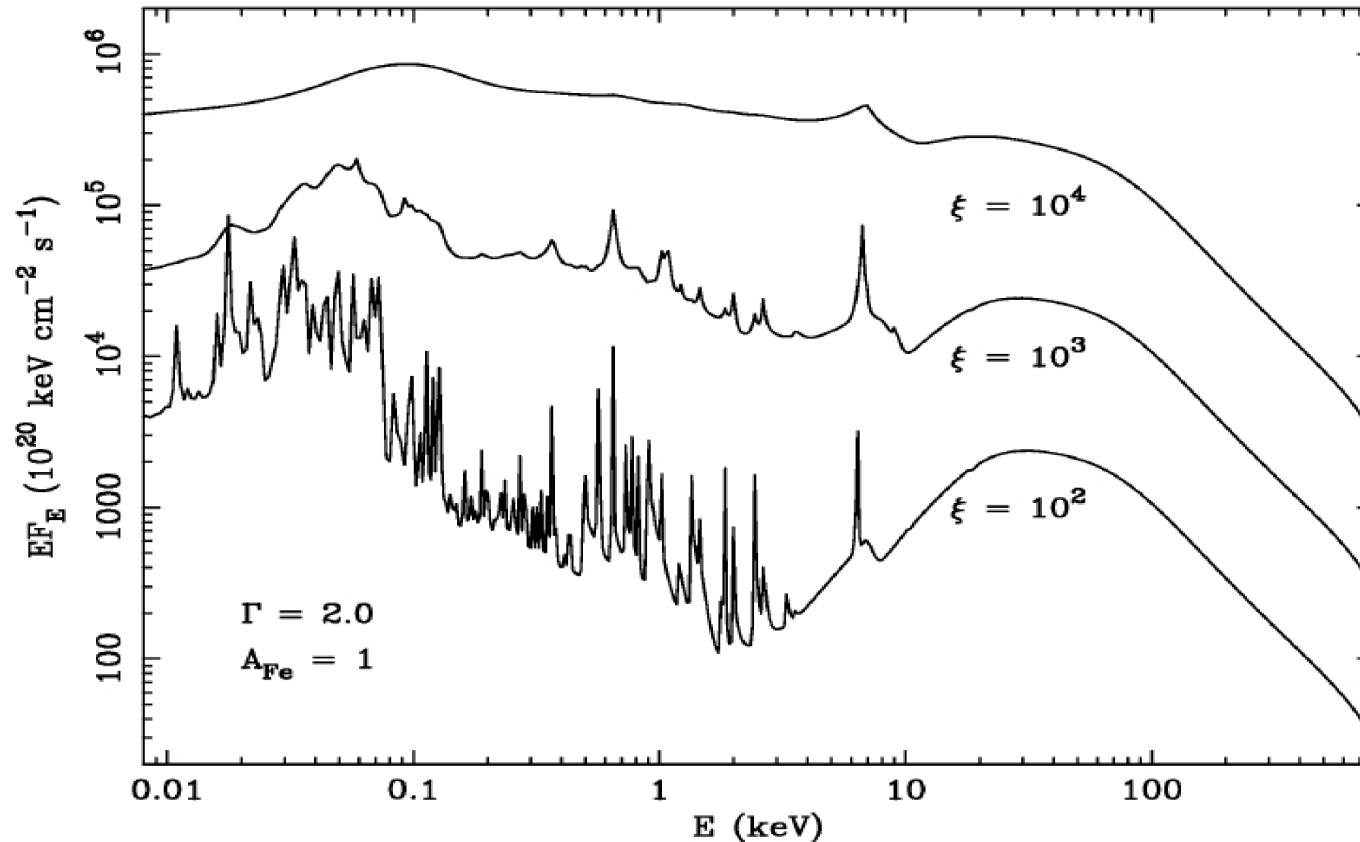
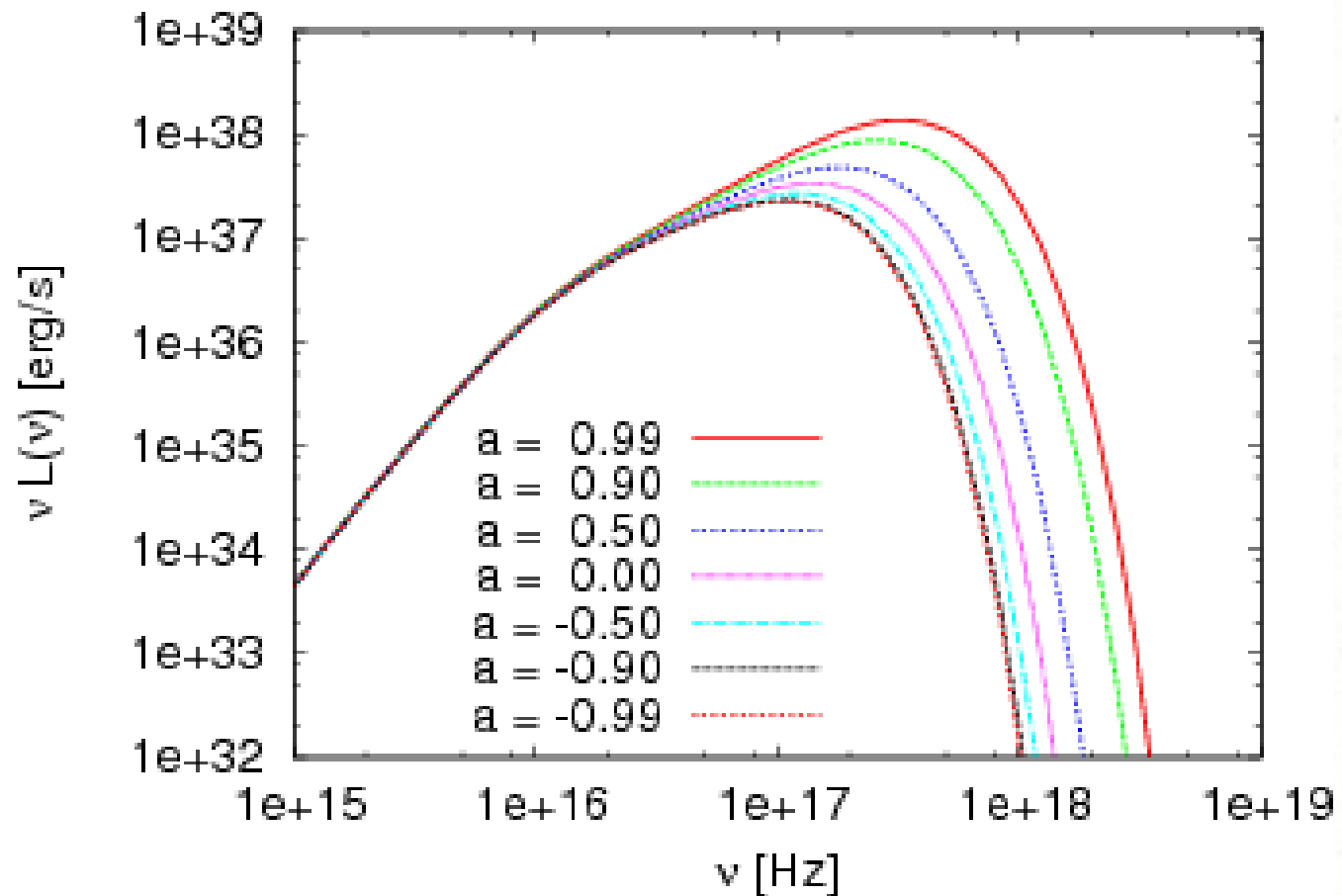


Figure 3. Reflected spectra for three values of the ionization parameter, with $\xi = 10^2$ (bottom curve), 10^3 and 10^4 erg cm s⁻¹ (top curve). The incident spectrum has $\Gamma = 2.0$, and iron has solar abundance.

Ross & Fabian, 1993

Měření spinu černých děr

- termální spektrum - relativistická modifikace (role spinu černé díry na vnitřní okraj akrečního disku)



Měření spinu černých děr

- termální spektrum - relativistická modifikace (role spinu černé díry na vnitřní okraj akrečního disku)
- reflekční spektrum
 - relativistické rozmytí spektrální komponenty z vnitřní oblasti akrečního disku
 - například široká čára železa
- kvazi-periodické oscilace
 - existuje více modelů
 - nepozorují se u aktivních galaxií
- **spin** černé díry celkově ovlivňuje okolní metriku, ale největší pozorovatelný vliv má na **polohu poslední stabilní dráhy**