

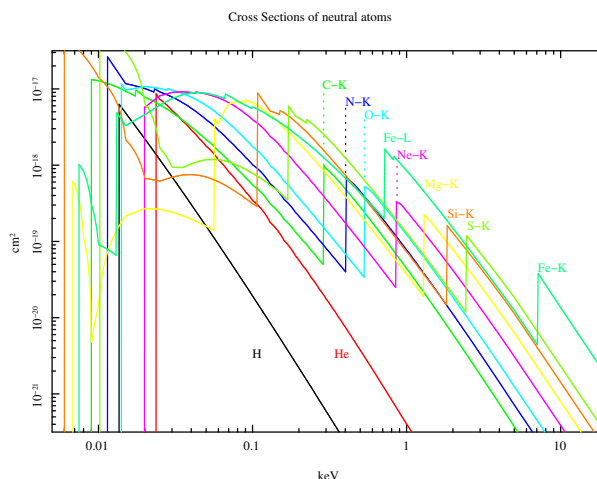
第5章 輻射と物質の相互作用

今まで X 線の連続スペクトル成分が発生するメカニズムを勉強してきた (黒体輻射、制動輻射、シンクトロン放射、逆コンプトン散乱)。黒体輻射はそれを放出する物質には依らないし、制動輻射、シンクトロン放射、逆コンプトン散乱は自由電子からの放射なので、原子の構造は問題にならなかった。

実際の X 線天体からは、連続スペクトル成分に加え、プラズマ中の元素分布を反映して、X 線放射領域やその周辺からの輝線、吸収線、吸収端や反射成分が観測される。また、X 線天体と我々の間の星間物質による影響もスペクトルに現われる。これらのスペクトル成分は、X 線放射源とその周辺、および星間物質の物理環境を探るための、非常に重要な情報を持っている。X 線連続成分と共に、吸収端や輝線、吸収線のパラメーターを測定し、X 線放射の起源と X 線天体の物理状態を探るのが X 線スペクトル解析の目的である。

5.1 光電吸収 (photoelectric absorption)

5.1.1 光電吸収の断面積



主要な元素の光電吸収による吸収断面積。各元素は中性 (電離していない)。NASA/GSFC が提供している `heasoft` パッケージに含まれている、`$HEADAS/./ftools/spectral/xspec/manager/mansig.dat` から断面積の値を取ってきてプロットした。

3.5 節で述べたように、X 線領域で熱制動吸収 (free-free absorption) はほとんど効かない。X 線吸収に効くのは、主に C、N、O、Ne、Si、S、Fe の K、L、M 殻電子による光電吸収

(photoelectric absorption) である。X 線領域では H、He の断面積は非常に小さいので、その影響はほとんど無視できる。また、ここで示した以外の元素は宇宙には少ないので、それによる吸収も通常は考えなくて良い。上図にこれらの元素の光電吸収の断面積を示す。断面積は各殻に対応する束縛エネルギー (エッジエネルギー) で急に上がり、**その高エネルギー側では E^{-3} に比例して減少していく。**

通常 X 線分光観測が可能なのは、 ~ 0.2 keV から ~ 10 keV のエネルギー範囲で、C-K 吸収端 (エッジ) から Fe-K エッジまでがカバーされる。中性の鉄を例にとると、 L_{II} エッジ (0.708 keV) 以下のエネルギーを持つ X 線は M 殻電子によって吸収される。それ以上、K エッジ (7.11 keV) 以下の X 線は L 殻電子によって吸収される。K エッジ以上のエネルギーの X 線は K 殻電子によって吸収される。

5.1.2 Hydrogen-like イオンの光電吸収断面積

24 頁で述べたように、hydrogenic-ion のときは水素の場合と同じく単純な議論から、エッジのエネルギーが、

$$E_{edge} = \frac{m_e e^4 Z^2}{2\hbar^2} \quad (5.1)$$

となることを導ける。水素原子 $Z = 1$ に対してエッジのエネルギーは 13.6 eV なので、hydrogen-like Fe XXVI のエッジエネルギーは、 $13.6 \text{ eV} \times 26^2 \approx 9.2 \text{ keV}$ である。同様に光電吸収 (bound-free transition) に対する断面積も、hydrogenic-ion の場合は比較的簡単に計算できる。導出は Rybicki and Lightman 等の教科書に譲るが、

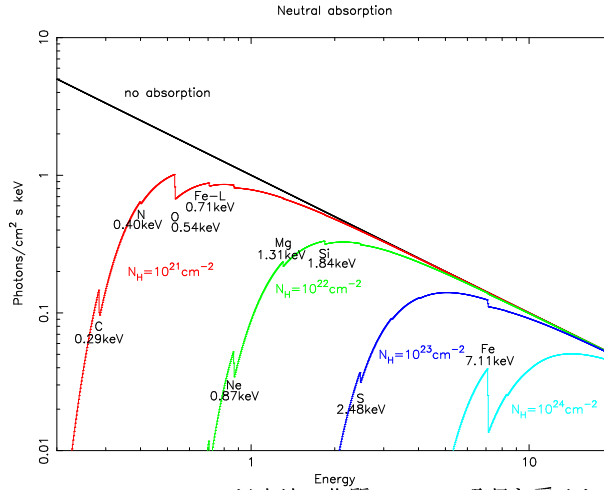
$$\sigma_{bf}(E) = \left(\frac{64\pi g}{3\sqrt{3}Z^2} \right) \alpha a_0^2 \left(\frac{E_{edge}}{E} \right)^3 \quad (5.2)$$

となる。ここで α は微細構造定数 $e^2/\hbar c = 1/137$, a_0 はボーア半径、 $\hbar^2/m_e e^2 \approx 0.5 \text{ \AA}$ である。 g は bound-free ガウトファクターでオーダー ~ 1 の量。 $g = 1$ とし数値を入れると、水素に対しては $7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 、Fe XXVI に対しては、その $1/(26 \times 26)$ で、 10^{-20} cm^2 となる。(水素について前出の図中の断面積の値との一致を確認せよ。)

5.1.3 中性の物質による光電吸収

通常、星間物質の厚みは対応する水素柱密度で表わすが、各重元素による光電吸収断面積を宇宙組成 (cosmic abundance) で重みをつけて足し合わせたものが、星間物質の吸収断面積になる。「宇宙組成」は文献によって異なるので、星間吸収モデルを使ってデータ解析を行ったときは、採用した星間吸収モデルあるいは宇宙組成の出典を明記すべきである¹。

¹標準的に使われている“xspec”パッケージでは複数の宇宙組成モデルから選択できるようになっている。



Power-law のスペクトル (photon-index=1) が中性の物質によって吸収を受けたときのエネルギー・スペクトル。水素柱密度 (hydrogen column-density) が $N_H = 10^{21}, 10^{22}, 10^{23}, 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ のそれぞれについてプロットした。星間吸収モデルは、“wabs” を使った (Morrison and McCammon 1983, ApJ, 270, 119)。宇宙組成で重みをつけた断面積の値は 30 頁の図を参照せよ。

上図に、power-law で表わされる光子数スペクトルが星間吸収を受ける様子を示した。典型的に星間空間における水素原子の密度は $\sim 1 \text{ H/cm}^3$ だから、距離 1 kpc における水素柱密度は $N_H \approx 3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ となり、その吸収の顕著な効果が $\lesssim 1 \text{ keV}$ で観測される。 N_H が大きくなるにつれ吸収が強くなるが、 $\sim 10 \text{ keV}$ の X 線は $N_H \sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ の厚みも透過することがわかる。実際、 $\sim 10 \text{ keV}$ 以下では吸収されてほとんど見えないが、それ以上のエネルギーでは明るく観測される天体として、厚いシエルに覆われた中性子星や、NGC 4945 に代表される厚いトーラスに隠された Seyfert2 銀河がある²。

水素柱密度と吸収の光学的厚みの関係を鉄の K エッジを例にとって見てみよう。前ページの吸収断面積の図で、中性の鉄の K エッジ (7.11 keV) のすぐ下のエネルギーにおける断面積は $0.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 、すぐ上のエネルギーでは $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 、つまり K エッジによる断面積の増加は $3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ である。鉄の abundance (ここでは水素に対する個数比) は文献によって $(3 \sim 5) \times 10^{-5}$ であるが、Morrison and McCammon 1983 では 3.3×10^{-5} を使っている。よって、 $N_H = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ に対する鉄の K エッジの光学的厚みは、

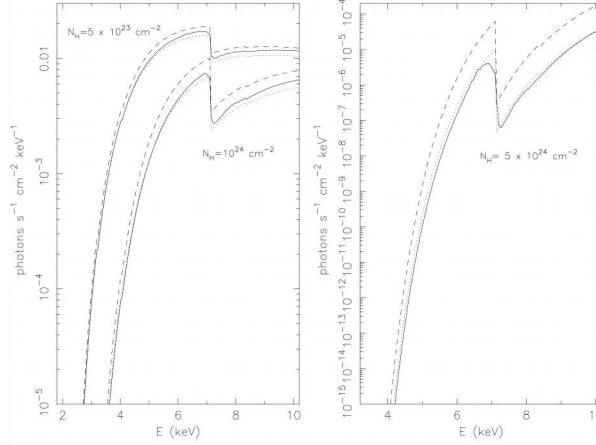
$$10^{24} [\text{cm}^{-2}] \times (3.3 \times 10^{-5}) \times (3.5 \times 10^{-20} [\text{cm}^2]) \approx 1.2 \quad (5.3)$$

となる。実際、上図で、 $N_H = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ のとき、鉄の K エッジの下と上で光子数が $e^{-1.2} \approx 0.3$ 倍に減少していることがわかる。

² $\gtrsim 10 \text{ keV}$ で撮像観測ができる INTEGRAL 衛星が 2002 年に打ちあげられて後、このような中性子星や Seyfert 銀河が数多く見つかった。http://isdc.unige.ch/~rodrigue/html/igrsources.html を参照。

5.1.4 コンプトン散乱の影響

上記の簡略化した議論では無視していたが、 N_H が大きいとき ($\gtrsim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) に厳密な解析を行うには、実は吸収物質中の電子によるコンプトン散乱の効果を無視することはできない。

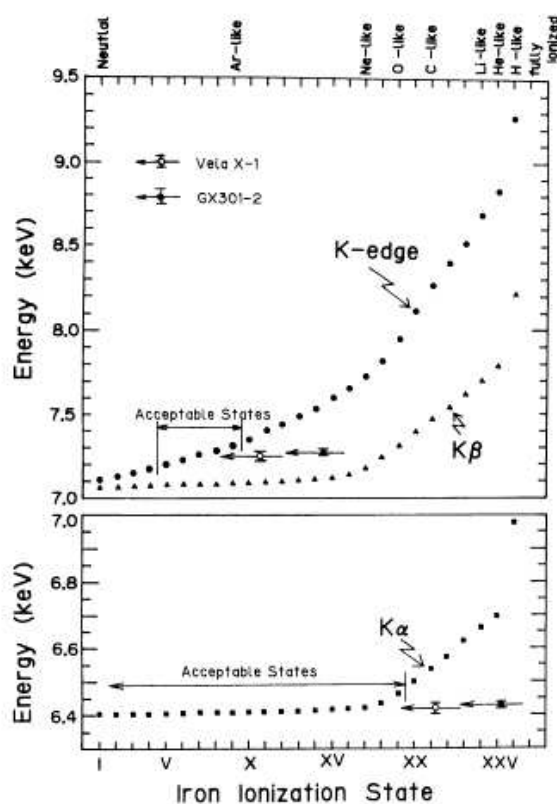


$E^{-1.7}$ で表わされる光子スペクトルが、一様な球の中心にあったときに観測されるスペクトルのモンテカルロシミュレーション (実線)。3つの N_H の値に対して示してある。破線はコンプトン散乱を考慮していない場合、点線は”effective optical depth” を使った場合。Yaqoob 1997, ApJ, 479, 184 より。

トムソン散乱の断面積は $6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ なので (数値を覚えておこう)、水素柱密度がその逆数、 $N_H \approx 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ を越えると、物質はコンプトン散乱に対して光学的に厚くなり、X線の吸収に対して二つの効果を及ぼす:(1) 散乱によって視線方向からX線が逸れるので、全体的に観測されるフラックスが下がる。(2) X線がコンプトン効果により電子にエネルギーを与えるので、元のスペクトル中のエッジや輝線の構造が鈍る。(1)の効果は、吸収の光学的厚み (τ_a) の代わりに散乱の光学的厚み (τ_s) も考慮した”effective optical depth”、 $\sqrt{\tau_a(\tau_a + \tau_s)}$ を使えば見つめることができるが (式 3.12)、正確にコンプトン散乱のスペクトルへの影響を調べるには、モンテカルロシミュレーションが必要である。また、それはX線光源とコンプトン散乱を引き起こす吸収体 (あるいは反射体) の幾何学にも依存する。上図にそのようなシミュレーションの例を示す。コンプトン散乱を考慮していない場合に比べて、 N_H が増加するにつれて、全体にフラックスが減少し、エッジの構造が鈍ることがわかる。

5.1.5 電離の効果

原子が電離するにつれて、相対的に原子核のクーロン力が強く効くようになり、内殻電子は強く原子核に束縛されるので、内殻電子の電離に必要なエネルギー (エッジのエネルギー) が上がっていく。



鉄の各電離状態における K_{α} 線、 K_{β} 線、 K エッジのエネルギー。Nagase 1989, PASJ, 41, 1 より。

例として、上図に鉄の場合を示す。 K エッジのエネルギーは、中性の場合 (Fe I) の 7.11 keV から、He-like の場合の 8.8 keV (Fe XXV), H-like の場合 (Fe XXVI) の 9.3 keV まで上がっていく。これらのエッジエネルギーはスペクトルの形から直接測定可能なので、それによって吸収物質の電離状態を知ることができる。

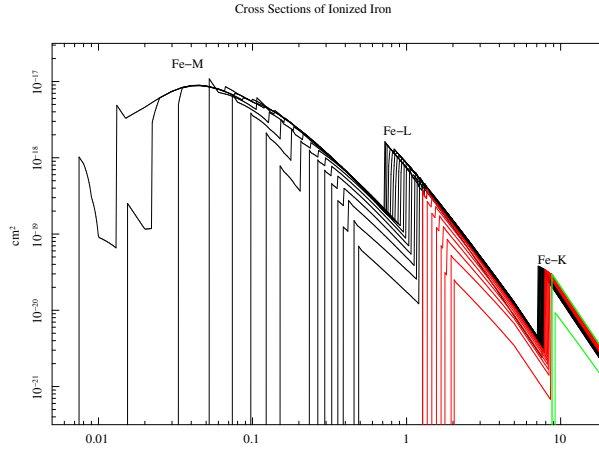
同様に、 K 殻の空孔に L 殻から電子が落ちるときに発生する K_{α} 線、 M 殻から落ちるときの K_{β} 線のエネルギーも電離と共に上昇していくので、電離度を測る良い指標になる。ただし、 K エッジのエネルギーが電離の開始すると共に直ちに上昇していくのに対して、 K_{α} 線のエネルギーは Fe I から Fe XVIII まで、~6.4 keV でほぼ一定である。He-like (Fe XXV) だと 6.7 keV (3 本に縮退している)、H-like (Fe XXVI) だと 7.0 keV になる。

5.1.6 電離した物質 (warm absorber) による光電吸収

元素の電離が進むにつれ、エッジのエネルギーが上がっていき、それ以下の光に対する吸収断面積が下がり、物質は透明になっていく。特に、ある殻の電子がすべて電離によってなくなってしまうと、その殻による光電吸収は存在しなくなる。下の図で、鉄が Fe XVII (Ne-like; L 殻が詰まった状態) まで電離すると M 殻の電子は存在しないので、Fe XVII の L エッジ、~1.3 keV 以下の光子は吸収されない。同様に、Fe XXV (He-like; K 殻が詰まっ

た状態)ではL殻電子が存在しないので、そのKエッジ、 ~ 8.8 keV以下の光子は吸収されない。

実際に光電離したプラズマによる吸収では、すべての元素の様々な電離状態の重ね合わせになるので、たくさんの吸収端が重なった複雑な吸収スペクトルが観測される。また電離が進んで上の殻(L殻に対するM殻、K殻に対するL殻)が空になると、電子がX線を吸収して上の殻に上げられることによる(L $\rightarrow$ MまたはK $\rightarrow$ L)、吸収線も観測されるようになる(5.2節参照)。



電離した鉄の光電吸収に対する断面積。Fe I (中性) から Fe XVI (Na-like) までは黒、Fe XVII (Ne-like) から Fe XXIV (Li-like) までは赤、Fe XXV (He-like) と Fe XXVI (H-like) は緑で示した。安定な Fe XVII (Ne-like) と Fe XXV (He-like) については太い線で示した。先の中性元素の断面積の図と同じく \$HEADAS/./ftools/spectral/xspec/manager/mansig.dat から断面積の値を取ってきてプロットした。Fe XXVI について、断面積の値が 5.1.2 節で求めた値 (10^{-20} cm^2) と一致することを確認せよ。

5.2 光電離 (photoionization)

物質が光に照射されたとき、各原子が光電吸収を起すので、物質は光電離 (photoionization) される。光電離の強さは、入射スペクトルのフラックスに比例し、(ガスの密度が高いほどイオンと電子が再結合しやすいため) ガス密度に反比例する。光度 L の X 線天体を一様に取り囲むガス (密度 n) を考える³。その天体からの距離を r として、

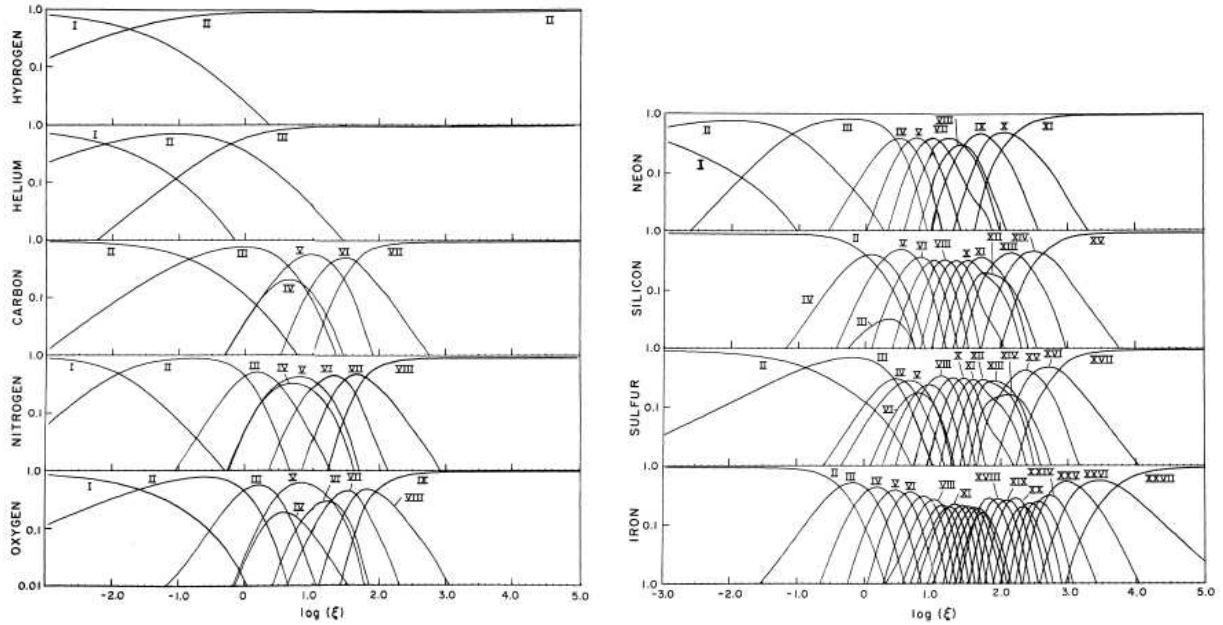
$$\xi \equiv \frac{L}{n r^2} \quad (5.4)$$

を電離パラメーター (ionization parameter) と呼ぶ。 ξ の大きさが、光電離の強さを表す良い指標になる。通常、CGS 単位を用いて、 ξ を $[\text{erg} \cdot \text{cm} / \text{s}]$ という単位で表す。

³ n は、電子、陽子、イオンすべてを含んだ粒子密度。完全電離した宇宙組成のプラズマの場合、 n は陽子密度の約 2.3 倍になる。

光電離している物質の電離状態は、電離の割合 ($\propto$ エッジより上の X 線フラックス $\times$ 断面積) と再結合の割合 (密度と温度の関数) のバランスを数値的に解くことによって得られる。それには膨大な原子データベースと複雑な計算が必要になるわけだが、最近では XSTAR, CLOUDY などのコードが公開されており、それを使って観測データとモデルを直接比較することが可能になってきた。特に XSTAR は NASA/GSFC の汎用パッケージ HEADAS に含まれているため、X 線データ解析によく使われている⁴。

光電離の状態は厳密には物理的配置や入射スペクトルに依存するが、一次近似として ξ の関数と思ってよい。下図に、光度 $L = 10^{37}$ erg/s で 10 keV の熱制動輻射スペクトルを持つ天体を密度 $n = 1 \text{ cm}^{-3}$ のガスがとりかこんでいるときの、動径 (r) 方向の各元素の電離状態分布を電離パラメーター $\xi = L/nr^2$ の関数として示す。少々異った配置、エネルギースペクトルでも、同じ ξ ならほぼ同じ電離状態にあると考えてよい。特に、鉄イオンに関して $\xi \gtrsim 1000$ になると Fe XXV (He-like) まで電離が進み、 $\xi \gtrsim 10000$ になると電子がすべて剥ぎとられた鉄の原子核 (Fe XXVII) が現われることを覚えておくと良い。



光電離に関する古典的なリファレンス、Kallman and McCray 1982, ApJS 50, 263 より。(この論文の延長上に XSTAR がある。)

光電離の原理を理解するために、簡単な例として、強い照射を受けたプラズマ中の H-like の鉄 (Fe XXVI; 25 階電離) と裸の鉄 (Fe XXVII; 26 階電離) の比を ξ の関数として半定量的に見積もってみよう。一般的に、 z 階電離したイオン (密度 n_z) が“エネルギー”スペクトル $f(E)$ [erg/s/cm²/keV] の輻射を受けて $z+1$ 階に光電離する割合と、 $z+1$ 階電離のイオン (密度 n_{z+1}) が電子 (密度 n_e) と再結合して z 階電離に戻る割合のバランスは、

$$n_z \int_{E_z}^{\infty} \sigma_z(E) \frac{f(E)}{E} dE = n_{z+1} n_e \alpha_{z+1}(T) \quad (5.5)$$

⁴<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/xstar/xstar.html>

と書ける。ここで E_z は z 階電離イオンのエッジエネルギー、 $\sigma_z(E)$ は吸収断面積。 $\alpha_{z+1}(T)$ は再結合の割合 (recombination rate; 温度 T の関数) で、 $[\text{cm}^3 \text{s}^{-1}]$ という単位を持つ。上式の両辺が、 $[\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$ という単位を持つことに注意 (単位時間、単位体積あたりの電離または再結合するイオンの数)。H-like の鉄の K エッジのエネルギーは $E_{25}=9.1 \text{ keV}$ 、光電吸収の断面積は、(5.2) 式より

$$\sigma_{25}(E) = 10^{-20} \left(\frac{9.1 \text{ keV}}{E} \right)^3 [\text{cm}^2] \quad (5.6)$$

である。再結合係数は、いろいろな文献に計算値または測定値が載っている。ここでは Shull and Steenberg 1982, ApJS 48, 95 を使い、裸の鉄の再結合率は、

$$\alpha_{26}(T) = 2.76 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{10^4 [\text{K}]} \right)^{-0.73} [\text{cm}^3 \text{s}^{-1}]. \quad (5.7)$$

光電離の割合はエネルギースペクトルによるが、ここでは $f(E) = A(E/1\text{keV})^{-1} [\text{erg/s/cm}^2/\text{keV}]$ としよう。すると (5.5) 式の左辺の積分は、

$$\begin{aligned} & \int_{E=9.1 \text{ keV}}^{\infty} 10^{-20} \left(\frac{9.1 \text{ keV}}{E} \right)^3 A \left(\frac{1\text{keV}}{E} \right) \frac{dE}{E} \\ &= 10^{-20} \frac{A}{9.1 \text{ keV}} \int_{E=9.1 \text{ keV}}^{\infty} \left(\frac{9.1 \text{ keV}}{E} \right)^5 d \left(\frac{E}{9.1 \text{ keV}} \right) \\ &= 10^{-20} \frac{A}{9.1 \text{ keV}} \int_{x=1}^{\infty} x^{-5} dx \\ &= \frac{10^{-20}}{4} \frac{A}{9.1} [\text{erg/s/keV}]. \\ &= \frac{10^{-20}}{4} \frac{A}{9.1 \times 1.6 \times 10^{-9}} [1/\text{s}]. \\ &= 1.7 \times 10^{-13} A [1/\text{s}]. \end{aligned} \quad (5.8)$$

一方、 E_{min} から E_{max} まで積分したときの光度を L とすると、

$$L = 4\pi r^2 \int_{E_{min}}^{E_{max}} f(E) dE = 4\pi r^2 A \ln \left(\frac{E_{max}}{E_{min}} \right).$$

たとえば典型的な X 線の範囲、 $E_{min} = 0.05 \text{ keV}$ 、 $E_{max} = 50 \text{ keV}$ を考えると、 $E_{max}/E_{min} = 10^3$ だから、

$$L \approx 7 \cdot 4\pi r^2 A [\text{erg/s}]. \quad (5.9)$$

以上を使って、(5.5) 式を $z = 25$ の場合について書き直すと、

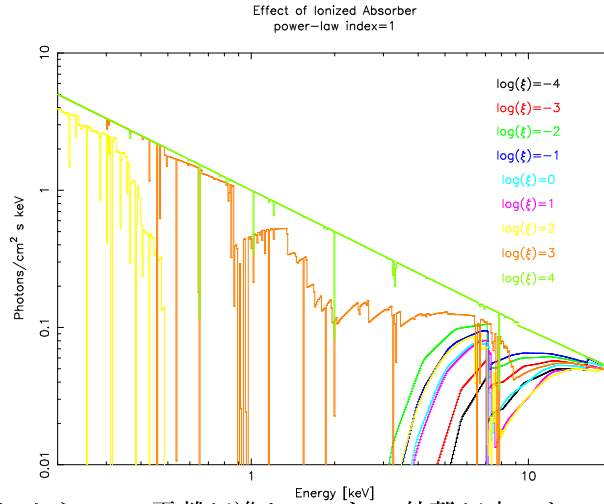
$$n_{25} \cdot 1.7 \times 10^{-13} \frac{L}{7 \cdot 4\pi r^2} = n_{26} n_e \cdot 2.76 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{10^4 [\text{K}]} \right)^{-0.73}.$$

ここで、ガスの粒子密度 $n \approx 2n_e$ を使う。また、厳密には温度も self-consistent に解く必要があるが、 $\xi = L/nr^2 = 10^3 \approx 10^4$ のとき、 $T \approx 10^6$ K (~ 100 eV) まで加熱されることがわかっているので、その温度で規格化する。以上より、

$$\frac{n_{25}}{n_{26}} \approx \frac{2500}{\xi} \left(\frac{T}{100 \text{ eV}} \right)^{-0.73} \quad (5.10)$$

となり、 ξ が $10^3 \approx 10^4$ のときに H-like の鉄 (Fe XXVI) と裸の鉄の数 (Fe XXVII) がほぼ等しくなることが導ける。

XSTAR を使って、光電離した物質による吸収を計算することができる。以下の例 (warmabs*power モデル) では、photon-index=1 の power-law スペクトルが[§]、 $N_H = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ の水素柱密度、 $\xi = 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10, 10^2, 10^3, 10^4$ のそれぞれの値を持つ光電離プラズマによって吸収を受けたときのスペクトルを示す。



以下の特徴に注目しよう。(1) 電離が進むにつれて外殻が空になるので、低エネルギー側で物質は透明になっていく。特に、 $\xi \gtrsim 10^3$ になると、He-like の鉄 (L 殻が空) が多くなり、それは K-edge (8.8 keV) 以下の光を吸収しないので、低エネルギー側のスペクトルは顕著に上がってくる。(2) L 殻が空になったとき、K 殻に電子が一つ (H-like)、あるいは二つ (He-like) 残った基底状態から、イオンが励起されて電子が L 殻に遷移する際に「共鳴吸収線 (resonance absorption line)」が生じる。(3) $\xi \gtrsim 10^4$ になると、鉄の電子もほぼ完全に剥ぎとられ、プラズマは完全電離に近くなる。吸収エッジは観測されず、スペクトルは元の入射スペクトルに近くなる。

共鳴吸収によって励起されたイオンが基底状態に戻るとき、同じエネルギーの共鳴輝線を放射する。共鳴輝線はまた吸収されて、イオンを励起する。この過程が繰り返されるので、もし光電離している物質が球対象だったら、共鳴吸収線と共鳴輝線は打ち消しあって、全体からは輝線も吸収線もほとんど生じなくなる (共鳴放射の閉じこめ)。実際には、傾きの大きいブラックホール連星や中性子連星から、Fe XXV や Fe XXVI の共鳴吸収線が観測されている。これは、これらの天体中で光電離したプラズマが球対象ではなく、ディスク状、

あるいはシリンダー状に分布していることを示している (“Accretion Disk Corona” と考えられている)。

5.3 輝線と吸収線

5.3.1 等価幅 (equivalent width)

輝線の強度を表わす際、輝線中に含まれる光子数 N (photons/s/cm²) を使う場合と、連続成分に対する「等価幅」を使う場合がある。輝線の下連続成分の強度を C (photons/s/cm²/keV) とすると、等価幅は

$$E.W. \equiv \frac{N[\text{photons/s/cm}^2]}{C[\text{photons/s/cm}^2/\text{keV}]} = 1000 \frac{N}{C} [\text{eV}].$$

X線天文学では等価幅の単位として eV を使うことが多い。同様に、吸収線の強さも、吸収によって失われた光子数を連続成分で割った等価幅で表すことが多い。

5.3.2 再結合線

光電離または熱電離したプラズマ中で、自由電子が再びイオンと結合するとき、イオンの高いエネルギー準位にとらえられる確率が高い。このようにイオンと電子が再結合して、さらに下の準位に落ちるときに出る電磁波を再結合線と呼んでいる。

再結合線が起きるには、衝突による電子状態の遷移がひんばんでないこと、すなわち、密度が低いことが必要。光学的に薄い光電離プラズマまたは熱プラズマから再結合線が観測される。

光電離プラズマと熱プラズマでは、電離のメカニズムが違うので (後者では主に原子、電子の衝突で電離が起きる)、そこから放射される輝線スペクトルも異なる。輝線スペクトルを分析することにより、光電離プラズマか熱プラズマの区別をつけることができる。

5.3.3 蛍光輝線

一方、外殻が埋まっている原子の内殻に空孔ができたとき、そこに外殻から電子が落ちてくる際に放出されるのが蛍光輝線 (fluorescence line) である。

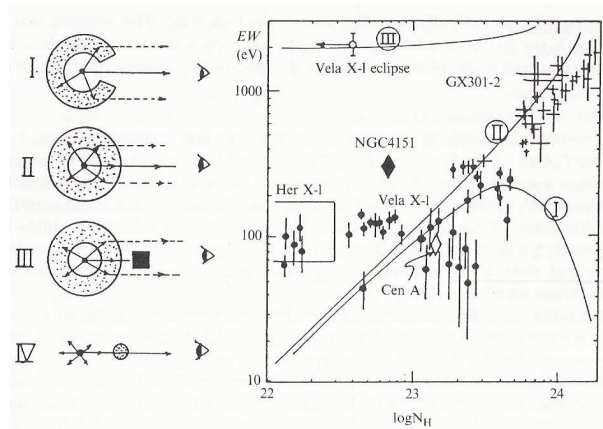
たとえば、中性の鉄 (Fe I) が K エッジエネルギー (7.11 keV) 以上の X 線を光電吸収したとき、K 殻に穴があく。そのとき L 殻から電子が落ちてくると 6.4 keV の蛍光 X 線を放出する。

K 殻に穴が空いて励起状態にある原子が、いつも蛍光輝線を放出するわけではなく、オーグメント電子を放出して基底状態に戻る場合もある (11 ページの図参照)。蛍光輝線を放出する確率を蛍光収量 (fluorescent yield) と呼ぶ。中性の鉄の場合、その値は 0.34 である。電離し

ていない、高密度の物質からも蛍光輝線が発生することに注意。すなわち、一般的に再結合線と蛍光輝線の発生領域は異なる。

5.3.4 蛍光輝線放射における幾何学的効果

天体からどんな蛍光輝線が観測されるかを調べるには、厳密にはモンテカルロシミュレーションが必要である。また、それは X 線源と吸収体の幾何学配置に依存する。特に、連続成分は X 線源の視線上の物質によって吸収を受けるが、蛍光輝線は X 線源の「周辺」から放出される。よって、蛍光輝線の連続成分に対する等価幅は、特に幾何学的配置の影響を受ける。



X 線天体を囲む冷たい物質の柱密度と、そこから期待される蛍光鉄輝線の等価幅の関係。3つの幾何学的配置に対してモンテカルロシミュレーションを行った結果と観測データを比較している。Makishima 1986, “Physics of Accretion onto Compact Objects” より。

上の例 II では、吸収体が一様に X 線源を囲んでいる。その厚みが増すにつれて、連続成分は吸収を受けて減光し蛍光 X 線は強くなるので、等価幅は一様に増える。I の場合は、連続成分は減光しないので、II に比べて (輝線の強度は同じでも) 等価幅は小さくなる。III の場合は、連続成分が伴星に隠されてほとんど見えないので、輝線の強度は同じでも等価幅は非常に大きくなる。IV の場合は、蛍光輝線を生成する領域が小さいので、ほとんど観測されない。