用語集[1]

version 1.0 January 26, 2010

X 線

X 線は電磁波の一種です。そもそも電磁波は電磁気学の集大成ともいうべきマックスウェルの方程式から導き出され、これが媒質のない真空中を光速度で伝搬するなど電磁波の基本的な性質はその波動方程式の解として求められます。その電磁波を波長の長いほうから書けば、電波、赤外線、可視光、紫外線、X 線、ガンマ線となります。X 線の典型的な波長は 0.1-1 ナノメーター (1 nm = 10^{-9} m) です。エネルギー単位で表せば 1-10 キロ電子ボルト (keV) となります (波長 λ (nm) とエネルギー E keV の間には $\lambda \times E = 1.24$ の関係があります)。また、電磁波には波長 (m) と振動数 ν Hz の間には

$$\lambda \times \nu \quad = \quad c \tag{1}$$

(c は真空中の光速度) の関係があります。

一般的にはもう少しエネルギー範囲を拡大して 0.1-100 keV を X 線領域と定義します。ここで X 線を波長で呼んだり、エネルギーで呼んだりするのは、現代の量子力学では電磁波は波動性と粒子性の両方の性質を兼ね備えると考えられているからです。そして、エネルギーの高い電磁波である X 線やガンマ線は粒子的な性質を強く表します。そこで私たちは X 線を観測する際は、主にその X 線光子 (photon) の数を計測する検出器を用います。

X 線の放射の基礎過程

X 線放射の基礎過程は 熱的な放射と非熱的な放射に大別できます。

熱的な放射というのは、電子やイオンのような荷電粒子が高温のために大きな平均速度の周りで個々の荷電粒子が様々異なった (ランダムな) 速度を持って運動 (これを熱運動と呼びます) をすることが原因で X 線を放射する現象です。たとえば、熱運動している荷電粒子が他の粒子と衝突したりして加速度を受けて放射する熱制動放射があります。

束縛電子のエネルギー準位は元素の種類により、あるいはイオン化状態により決まった飛び飛びの値を取りますが、熱運動している原子と電子が衝突した場合、そのエネルギー準位間で遷移をしたり、あるいは、電子が電離状態から束縛状態になったりして X 線を放射します。元素の種類やイオン化状態に従ってさまざまな輝線や吸収線等の構造が見られます。これらはその天体に含まれる元素組成やその物理状態を知る貴重な手がかりとなります。

荷電粒子が磁場の中で、回転 (ジャイロ) 運動または螺旋運動を伴った熱運動している場合は、そのジャイロ運動で生じる加速度のために放射をします。これは熱的なシンクロトロン放射と呼ばれます。シンクロトロン放射は電波領域の電磁波も放射しますが、エネルギーが非常に大きく相対論的な速度で運動をしている電子が強い磁場の中でシンクロトロン放射を発するとそれは X 線・ガンマ線領域での放射となります。

黒体放射

黒体放射は、熱的な放射の代表です。黒体放射とは、はじめの放射はなんであろうと、熱運動している原子や電子等と何度も衝突して吸収や放射を繰り返して、平衡状態になった場合に実現する放射の形態です。放射光子の波長分布 (あるい

[1] この資料は、darts.jaxa.jp/classroom/から公開されています。

はエネルギー分布) は熱運動している原子や電子の温度だけで決まります。太陽のような恒星は、内部で作られた放射が原子等と何度も衝突を繰り返し、表面から出てくる時には、ほぼ黒体放射となっています。太陽の場合表面温度は 6,000 度であり、その黒体放射のピークはちょうど可視光領域となります。放射のピークが X 線領域に来るためにはその黒体放射の温度は 1,000 万度 ~ 1 億度という超高温にならなければなりません。宇宙・天体でガスを加熱して X 線を放射するほどの高温のガスを作る効率の良い過程は、そのガスを中性子星やブラックホールのような強い重力を持った天体のごく近傍に近づき、その高密度星の強い重力場で加速し、その加速された運動エネルギーを熱エネルギーに変換することです。

黒体放射のエネルギースペクトルは、放射体の温度 T によって一意的に決まります。単位面積、単位振動数、単位立体角あたりから放射されるエネルギーは、

$$B_\nu(T)d\nu \quad = \quad \frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{d\nu}{\exp(E/kT)-1} \tag{2}$$

となります。これをプランクの法則と呼びます。放射の全エネルギー (単位立体角あたり) は、この式を積分して、

$$B(T) \quad = \quad (\sigma/\pi)T^4 \tag{3}$$

$$\sigma \quad = \quad \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3c^2} \tag{4}$$

となります。これをステファン・ボルツマンの法則と呼びます。半径 R の球からの全放射エネルギーは、$4\pi R^2\sigma T^4$ となります。

非熱的放射

非熱的放射とは、ランダムな運動ではなく、何らかの方法で加速されて大きな運動エネルギーを持った荷電粒子がかかわる現象や、外からやってきた光子等が原因の放射です。

たとえば熱運動していないけれど高速の荷電粒子が衝突等によって加速度を受けると制動放射を起こし X 線を放射します。また、磁場中で回転 (ジャイロ) 運動をするとシンクロトロン放射を起こします。また、どこかで作られた X 線が原子と衝突することで原子に束縛された電子を弾き飛ばして、その結果、蛍光 X 線が放射される場合があります。もともと低エネルギーの光子が非常にエネルギーの高い相対論的な電子と衝突して、その電子のエネルギーをもらって高エネルギーの X 線・ガンマ線に生まれ変わる現象である逆コンプトン効果も非熱的放射のひとつです。

物質による X 線の吸収

X 線は、可視光などに比べてとても波長の短い電磁波です。したがって、物質を構成している原子と直接相互作用します。実際には、X 線によって原子の中の束縛電子が自由電子と放出されます。これを光電吸収と呼びます。

この光電吸収によって、天体からの X 線は地球の大気を透過できません。一方で、可視光などは、星間ガスによって吸収されますが、エネルギーの高い X 線は、星間ガスを透過することができます。

光電吸収は、以下の式で記述できます。

$$F \quad = \quad F_0 \exp[-\sigma(E) \times N_{\rm H}] \tag{5}$$

ここで、$\sigma(E)$ は、吸収の断面積で X 線のエネルギー (E) と物質を構成している原子の種類に依存します。一方、$N_{\rm H}$ は、水素の柱密度で、天体と観測装置の間に、単位面積あたり何個の水素原子があるかを示します。

太陽組成に近い物質の場合、0.3 keV より低いエネルギーでは、H と He が、より高いエネルギーでは、C,N,O...Fe といった原子番号の大きく、密度の大きな元素が吸収に効いてきます。X 線の帯域では、特に K 殻電子による吸収が重要です。

0.1–10 keV では、星間物質の σ の値は、$(0.5-4)\times10^{-18}(\frac{E}{1\mathrm{keV}})^{-3}$ m^{-2} となります。また、おおよそ $E^{-8/3}$ に比例します。この式からもエネルギーの低い X 線ほど、吸収されやすい (σ が大きい) ことがわかります。

吸収の断面積 (σ) は、各元素の吸収端エネルギーでジャンプします。例えば、酸素の K 吸収端は、0.56 keV にあります。天体からのスペクトルは、星間ガス中や検出器の中の酸素原子と相互作用し、検出された X 線エネルギースペクトルに、この吸収端の構造が見られます。

明るさの単位

天体と検出器の間で吸収が無い場合、距離 D にある天体の光度 (L; Luminosity) と検出される輝度 (F; Flux) は、次のような関係になります。

$$L \quad = \quad 4\pi D^2 \times F \tag{6}$$

本教材で扱う X 線天文学では、以下のことに注意してこれらの輝度や光度を扱ってください。

輝度を考える際、(1) 実際に検出された X 線イベント ($C(I)$; I は、検出器のエネルギービン) の数を扱う場合と (2) 検出器の効率や有効面積を補正して検出器に到着したと値 ($F(E)$) を推定する場合があります。

これらの間には、次のような関係があります。

$$C(I) \quad = \quad \int_0^\infty F(E)R(I,E)dE \tag{7}$$

ここで、$R(I,E)$ は、エネルギー E の X 線が、エネルギービン I で検出される確率 (応答関数、レスポンス) を表します。$C(I)$ の単位は、例えば [カウント m^{-2} s^{-1} channel^{-1}] となります。一方、$F(E)$ の単位は、例えば [photons m^{-2} s^{-1} keV^{-1}]、もしくは、photons の代りに、そのエネルギー (keV, J) が使われます。

また、輝度や光度を扱う場合は、特定のエネルギー帯での値なのか、全エネルギー帯での値なのかを注意してください。

特に、計算に用いる物理量の単位に注意してください。

X 線バースト

X 線バーストは、磁石の性質を示さない (あるいは強くない) 中性子星と考えられている X 線星 (強い X 線を放射している天体) が、適当な条件を備えた場合に起こす爆発現象です。中性子星の表面に他の星からの物質 (主に水素とヘリウム) が降り積もり溜まってくると、どんどん圧縮され温度が上がります。やがて爆発的に核融合反応を起こし、熱くなって出てきたエネルギーを X 線として放射します。この現象が X 線バーストです。