

天体測定学 II 2008-2

1 熱的放射と非熱的放射

ある放射源内のすべて粒子について、エネルギー準位 E の分布が以下のようにボルツマン分布で与えられるとき、この放射源は温度 T の熱平衡状態にあるという。

$$N(E) \propto \exp(-E/kT). \quad (1)$$

ここで k はボルツマン定数である。このような放射源（例えばガス雲など）があるとき、その粒子の熱運動に起因して発生する放射を「熱的放射」という。電波天文学で良く観測される熱的放射の例には、以下のようなものがある。

- 黒体放射：光学的厚み τ （後述）が無限大の理想的な放射源。例として、宇宙背景放射、恒星の光球等
- （熱的）輝線放射：原子、分子内の内部状態の遷移に伴う周波数の決まった放射のうち、原子または分子の熱運動により励起されているもの。例として、中性水素ガス 21cm 線、低温度分子雲からの分子線、HII 領域からのパルマー線
- 制動放射：高温 (T 10000 K 以上) の電離領域で、プラズマ内の電子散乱による放射。例として、HII 領域

一方、放射源が熱平衡状態にない場合、あるいは放射の起源が熱運動に伴う過程でない場合の放射は、非熱的放射と呼ばれる。非熱的放射の例には以下のようなものがある。

- シンクロトロン放射：高エネルギー荷電粒子が磁場中を通過するときに発生する放射。例として、超新星残骸、AGN ジェット
- メーザー放射（非熱的な輝線放射）。原子や分子内の内部状態のエネルギー準移分布において「準移反転」（温度が負の状態）が起こり、誘導放射により増幅された強力な放射。例として、星形成領域での H_2O メーザー

ちなみに、メーザー (MASER) は Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation の略であり、レーザー (LASER) は Light Amplification of ... である。

2 輝度とフラックス

2.1 定義

電波観測における2つの重要な観測量として輝度 (brightness, specific intensity) I_ν とフラックス (flux, flux density) F_ν がある。輝度は単位周波数、単位時間あたりに単位面積、単位立体角を通過するエネルギー量であり、このエネルギー dE は

$$dE = I_\nu dS d\Omega d\nu dt \quad (2)$$

と表すことができる。一方、フラックスは単位周波数、単位時間あたりに単位面積を通過するエネルギー量を表す。すなわち、

$$dE' = F_\nu dS d\nu dt = \int I_\nu \cos \theta d\Omega dS d\nu dt, \quad (3)$$

つまり、輝度とフラックスとの間には

$$F_\nu = \int I_\nu \cos \theta d\Omega \quad (4)$$

の関係がある。ここで θ は考えている面の法線と光線がなす角であり、 $d\Omega$ は立体角要素である。なお、MKSA 単位系では、輝度の単位は $\text{W} / \text{Hz m}^2 \text{ str}$ 、フラックスは $\text{W} / \text{Hz m}^2$ となる。

天体観測においては多くの場合、天体が天球面上で占める立体角は小さく、 $\theta \sim 0$ であるとしてよいから、このとき

$$F_\nu = \int I_\nu d\Omega. \quad (5)$$

すなわち、天球面上での輝度分布を積分したものがフラックスになる。天球面上での2次元位置を例えば x, y で表すと、

$$F_\nu = \int I_\nu(x, y) dx dy \quad (6)$$

と書ける。すなわち、 $I_\nu(x, y)$ は天球面上でのある位置での輝度に、 F_ν はその天体全体からの輝度を積分した量に相当する。光学天文では、輝度は表面輝度と相当し、 $\text{mag} / \text{arcsec}^2$ などの単位で表され、また、フラックスは等級 (mag) に相当する。

2.2 性質

輝度の最も重要な性質は、真空中を伝播に伴い変化しない保存量であるということである。一方、フラックスは距離に依存し、 $F_\nu \propto r^{-2}$ で減少する量である。

例1) 太陽を地球や金星から観測した場合、無限に小さい立体角を通過するエネルギーは地球や金星で変わらない。何故なら、この立体角が見込む太陽の表面積は r^2 に比例し、一方、太陽の単位面積から受け取るフラックスは r^{-2} に比例するので、打ち消しあい、結果として距離によらず輝度は一定になる。なお、黒体輻射の場合、輝度は温度に対応しており、輝度が距離によらず一定であることは太陽の温度が地球から見ても金星からみても同じであることを意味している。

例2) 同じ銀河を2倍の距離に置いたとき、

$$I'_\nu = I_\nu, \quad F'_\nu = F_\nu/4, \quad (7)$$

となる。

なぜなら、輝度は単位立体角内の星の数 N と星の見かけの平均光度 l を用いて $I_\nu = lN$ とかける。一方、2倍の距離の銀河では、単位立体角内の星の数は $N' = 2^2N$ 、星の見かけの平均光度は $l' = l/2^2$ となり、輝度は $I'_\nu = l'N' = lN$ となる。しかし、この銀河の天球面上における立体角は $1/2^2$ 倍になるので、フラックス $F'_\nu = F_\nu/4$ となる。

2.3 良く使う単位

よく使う単位として、

- フラックス： Jy (ジャンスキー、 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ Hz}$)
- 輝度： Jy / beam (望遠鏡のビームあたりのフラックス)、あるいは、K (ケルビン、何度の黒体の輝度に相当するか)

がある。ジャンスキーはもちろん宇宙電波の発見者 Karl Jansky にちなんで命名である。

3 輻射輸送方程式

輝度 I_ν が物質中を伝播する際にどのように変化するかを表す基礎方程式が輻射輸送方程式である。

輝度 I_ν 、経路に沿った長さを s とすると、吸収・放射を行う物質がない場合 (e.g. 真空中) すでに見たように輝度は保存量であるから

$$\frac{dI_\nu}{ds} = 0. \quad (8)$$

一方、伝播経路上に物質 (例えばガス雲) が存在すると輝度 I_ν は物質による吸収、放射の影響を受けて変化する。今、

吸収係数を κ_ν (単位例 $1 / \text{m}$)

放射係数を j_ν (単位例 $\text{W} / \text{m}^3 \text{ Hz str}$)
 としたとき I_ν の変化は

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa I_\nu + j_\nu, \quad (9)$$

とかける。これが輻射輸送の基本方程式である。右辺第1項は吸収係数 κ_ν および輝度 I_ν に比例する吸収量であり、第2項は放射量を表し、 I_ν にはよらない。

さらに、伝播経路に沿った光学的厚み τ_ν を以下で定義する。

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu ds. \quad (10)$$

$d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$ を用いて、

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + \frac{j_\nu}{\kappa_\nu}. \quad (11)$$

さらに

$$S_\nu \equiv \frac{j_\nu}{\kappa_\nu}. \quad (12)$$

を導入して

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu. \quad (13)$$

と書くことができる。 S_ν を源泉関数という。

S_ν が場所によらず一定とすると、

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{d}{d\tau_\nu}(I_\nu - S_\nu) = -I_\nu + S_\nu, \quad (14)$$

より、微分方程式を積分できて、

$$(I_\nu - S_\nu) = C e^{-\tau_\nu}. \quad (15)$$

初期条件 $I_\nu(\tau_\nu = 0) = I_\nu(0)$ より

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (16)$$

これが輻送方程式の解である。

この式のいくつかの重要な特徴として以下があげられる。

- $\tau_\nu = 0$ (物質なし): $I_\nu = I_\nu(0)$: 初期情報が保存
- $\tau_\nu \ll 1$ (optically thin): $I_\nu = I_\nu(0) + \tau_\nu S_\nu$
- $\tau_\nu \gg 1$ (optically thick): $I_\nu = S_\nu$

optically thin の場合、 $\tau_\nu S_\nu$ の項から物質 (ガス雲) の情報を得ることができる。一方、optically thick の場合、初期情報 $I_\nu(0)$ は完全に失われ、ガス雲の表面のみの情報が得られる。