

天体測定学 II 2007-9

1 メーザー放射

1.1 励起温度と輻射輝度の関係

局所熱平衡状態 (LTE) が成り立たない場合、ある 2 つの準位分布について

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right), \quad (1)$$

で定義される温度 T_{ex} を励起温度という。励起温度は LTE の場合、すべての準位に対して等しく、系の温度 (熱運動の温度) T に等しい。一方、LTE でない場合、励起温度 T_{ex} は準位ごとに異なる値を取り得る。

LTE の場合の輻射輸送の式との比較から、励起温度 T_{ex} のガス中を伝播したときの輝度温度は、

$$T_b = T_b(0)e^{-\tau_\nu} + T_{\text{ex}}(1 - e^{-\tau_\nu}), \quad (2)$$

と書ける。

以下に、2 つの重要なケースについて述べる。

- 放射平衡 ($T_{\text{ex}} = T_b(0)$) の時、常に $T_b = T_b(0)$ 。この時、輝線は背景放射にまぎれて観測できない。
- 局所熱平衡 (LTE, $T_{\text{ex}} = T_k$) で、かつ光学的厚みが大きい $\tau_\nu \gg 1$ の時、 $T_b = T_k$ 。通常の輝線の場合 $T_k = T_b(0)$ 、このケースが、熱的放射の最大輝度を与える。すなわち、熱的放射を観測する限り、観測される輝度温度は天体の LTE 温度を超えることはない。

1.2 反転分布と負の温度

式 (1) で定義される励起温度 T_{ex} は、 $g_1 n_2 / g_2 n_1 > 1$ のとき、負の値を取る。このような状態 (上の準位により多くの粒子が分布している状態) を「反転分布」と呼ぶ。このような特殊な状態になったときにメーザー放射が起こる。

1.3 吸収係数と光学的厚み

励起温度が T_{ex} の時、輻射輸送方程式における吸収係数 κ_ν は、アインシュタイン係数を用いて以下のように書ける。

$$\kappa_\nu = \frac{c^2 g_2 n_1}{8\pi \nu^2 g_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) \right] A_{21} \phi(\nu') \quad (3)$$

また、光学的厚み τ_ν と吸収係数 κ_ν の関係は、

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu ds, \quad (4)$$

である。もし、励起温度が負の場合、 $\exp(-h\nu/kT_{\text{ex}}) > 1$ より、 κ_ν および τ_ν が負になることが、上の式から容易にわかる。

1.4 メーザー

励起温度が負の場合、 τ_ν が負になり、この時の輻射輸送の式は、

$$T_b = T_b(0)e^{|\tau|} + |T_{\text{ex}}|(e^{|\tau|} - 1), \quad (5)$$

となる。このとき、輝度温度は $e^{|\tau|}$ の項によって伝播とともに指数関数的に増幅され、極めて輝度温度の高い放射が観測される。このような現象をメーザー (MASER: Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation) という。メーザーはレーザーの電波版であるともいえる (LASER: Light Amplification of ...)。歴史的には、1954 年に C. タウンズによって人工的なメーザーが発明され、その後、星間空間の放射から自然界のメーザー現象が多数見つかっている。

1.5 レート方程式

反転分布を形成するために必要な条件を、単純化した 3 準位モデルで考える。各準位間の遷移確率を γ_{21} , γ_{32} , γ_{31} というように表し、また、準位 1 (最低エネルギー) から準位 3 (最高エネルギー) へのくみ上げ効率 (pumping rate) を Γ で表すとす。このとき、各準位にある粒子数 (n_1 , n_2 , n_3) の変化率は、

$$\frac{dn_1}{dt} = \gamma_{21}n_2 - \Gamma n_1, \quad (6)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \gamma_{32}n_3 - \gamma_{21}n_2, \quad (7)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = \Gamma n_1 - (\gamma_{31} + \gamma_{32})n_3, \quad (8)$$

と書ける。これをレート方程式という。

定常状態では $dn_1/dt = dn_2/dt = dn_3/dt = 0$ となるから、準位 3 に関する式から

$$n_3 = \frac{\Gamma}{\gamma_{31} + \gamma_{32}} n_1, \quad (9)$$

また、準位 2 に関する式と上の式より、

$$n_2 = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_{21}} n_3 = \left(\frac{\Gamma}{\gamma_{31} + \gamma_{32}} \times \frac{\gamma_{32}}{\gamma_{21}} \right) n_1, \quad (10)$$

となる。簡単のために各準位の縮退度を $g_1 = g_2 = g_3 = 1$ とすれば、反転分布は $n_2/n_1 > 1$ で達成されるから、その条件として

$$\frac{\Gamma}{\gamma_{31} + \gamma_{32}} \times \frac{\gamma_{32}}{\gamma_{21}} > 1, \quad (11)$$

となり、これを整理して、

$$\Gamma > \gamma_{21} \left(1 + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{32}} \right), \quad (12)$$

となる。この式が満たされるためには、以下の条件が必要である。

- Γ が大きい。すなわち、くみ上げ効率が高い。
- γ_{21} が小さい。すなわち、準位 2 の滞留時間が長い。
- $\gamma_{32} < \gamma_{31}$ 。すなわち、準位 2 への遷移確率の方が準位 1 に比べて大きい。

このような条件が満たされ、式 (12) が成立すると、反転分布となってレーザー現象が観測される。

2 宇宙レーザーの特徴

2.1 レーザー放射をする領域

レーザー現象は反転分布という極めて特異な状況下で起こるので、レーザーが観測される領域は極めて限られたものとなる。これまでにレーザーが観測されているのは、以下の 3 つのケースである。

- 星形成領域：主に、原始星アウトフローが周囲のガスとぶつかって発生するショック領域でレーザーが見える。また、原始星周囲の降着円盤からもレーザーが出る可能性が指摘されているが、今のところ確証はない。
- 晩期型星：AGB 型星から質量放出によって出された星周ガスでレーザーが観測される。
- AGN 周辺領域：AGN 周囲の降着円盤やジェットに付随してレーザーが観測される。

2.2 レーザーを起こす輝線

以下に、これまでにレーザーが観測されている分子の中で、輝度が明るい代表的なものをあげる。

主なメーザー輝線

分子	周波数	典型低なガス温度	ガスの数密度	天体種族
OH	1.6 GHz	~ 100 K	10^5 cm^{-3}	AGB, SFR, AGN
CH ₃ OH	6.7 GHz	~ 200 K	10^5 cm^{-3}	SFR
H ₂ O	22 GHz	~ 500 K	10^9 cm^{-3}	AGB, SFR, AGN
SiO	43 GHz	~ 1500 K	10^9 cm^{-3}	AGB

AGN : Active Galactic Nuclei (活動銀河中心核) AGB : Asymptotic Giant Branch Star (漸近巨星分枝) SFR : Star Forming Region (星形成領域)