天体測定学 II 2008-8

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

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp(-\frac{h\nu}{kT_{\rm ex}}), \tag{1}$$

で定義される温度 $T_{\rm ex}$ 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 $T_{\rm ex}$ 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 $T_{\rm ex}$ のガス中を伝播したときの輝度温度は、

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

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 ($T_{\rm ex} = T_b(0)$) 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, $T_{\rm ex} = T_k$) で、かつ光学的厚みが大きい $\tau_\nu >> 1$ 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$T_{\rm ex}$ 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 $T_{\rm ex}$ 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。

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

また、光学的厚み τ_ν と吸収係数 κ_ν の関係は、

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu ds, \tag{4}$$

である。もし、励起温度が負の場合、$\exp(-h\nu/kT_{\mathrm{ex}}) > 1$ 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、

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

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、簡単化した 3 準位モデルで考える。各準位間の遷移確率を $\gamma_{21}, \gamma_{32}, \gamma_{31}$ 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 で表すとする。このとき、各準位にある粒子数（n_1, n_2, n_3）の変化率は、

$$\frac{\mathrm{d}n_1}{\mathrm{d}t} = \gamma_{21}n_2 - \Gamma n_1, \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_2}{\mathrm{d}t} = \gamma_{32}n_3 - \gamma_{21}n_2, \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_3}{\mathrm{d}t} = \Gamma n_1 - (\gamma_{31} + \gamma_{32})n_3, \tag{8}$$

と書ける。これをレート方程式という。

定常状態では $\mathrm{d}n_1\mathrm{d}t = \mathrm{d}n_2\mathrm{d}t = \mathrm{d}n_3\mathrm{d}t = 0$ となるから、準位 3 に関する式から

$$n_3 = \frac{\Gamma}{\gamma_{31} + \gamma_{32}}n_1, \tag{9}$$

また、準位 2 に関する式と上の式より、

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

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

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

となり、これを整理して、

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

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、反転分布となってメーザー現象が観測される。

2　宇宙メーザーの特徴

2.1　メーザー放射をする領域

メ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、メーザーが観測される領域は極めて限られたものとなる。これまでにメ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メーザーが見える。また、原始星周囲の降着円盤からもメ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メ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メーザーが観測される。

2.2　メーザーを起こす輝線

以下に、これまでにメ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_3OH	6.7 GHz	~ 200 K	10^5 cm^{-3}	SFR
H_2O	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 Froming Region （星形成領域

3　AGN のメガメーザー回転円盤

AGN 周囲で観測されるメーザー（このようなメーザーは星形成領域などで観測されるメーザーに比べて光度が大きく、メガメーザーと呼ばれることもある）で、特に興味深いケースとして、ブラックホール周囲の回転円盤に付随する水メーザーが挙げられる。このタイプの水メーザーの観測からは、中心のブラックホールの質量を直接決定できるだけでなく、非常に遠方 (数 Mpc〜数百 Mpc) の銀河の距離を仮定なしに直接求めることができ、天文学的に非常な重要な意味を持つ。

今、ケプラー回転する円盤をエッジオンで観測するとする。このとき、中心質量 M と円盤の回転速度 v_c の関係には

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \tag{13}$$

が成り立つ。ここで r は回転半径である。

今、上記の円盤において r が一定のリングを考えたとき、観測される視線速度 v_r とすると、

$$v_r = v_c \cos\phi, \tag{14}$$

ここで ϕ は円盤上での位置を表す角度で、視線に垂直な場合 $\phi = 0$ とする。一方、このリング上の点の天球面上での位置角 θ_x は

$$\theta_x = \frac{r}{D}\cos\phi \tag{15}$$

となる。ここで D は天体距離であり、リングをエッジオンで見ているとしているので、直線上に見える。上の 2 つの式より、

$$v_r = v_c \frac{D}{r}\theta_x \tag{16}$$

これより、$v_r \propto \theta_x$、すなわち、リング上の点の視線速度は位置 θ_x に比例するので、リングを位置速度図上に図示すると直線になることがわかる。また、位置角 θ_x の最大値は、$\theta_{x,max} = r/D$ で与えられ、このとき視線速度 v_r の最大値は、$v_{r,max} = v_c$ となる。このようなリングについて、$\theta_{x,max}, v_c$ を観測

すると、D を既知とすればリングの半径 r およびブラックホール質量 M を求めることができる。しかし、通常天体の距離を求めるのは難しいから D は推定値を使うことになり、ブラックホール質量 M も不確定性が大きい。

一方、メガメーザー円盤の場合、さらに別の観測量を追加することでブラックホール質量 M と天体距離 D を同時に解くことが可能になる。これには、メーザーの視線速度変化（加速度）が重要な役割を果たす。例えば、観測者とブラックホールを結ぶ視線上にある回転円盤メーザー成分は円運動による加速を受け、視線速度ドリフトを起こす。この場合、メーザーの視線速度変化率は

$$\frac{dv_r}{dt} = r\omega^2, \tag{17}$$

と書ける。ここで ω は回転角速度である。一方、回転角速度と回転速度の関係は

$$v_c = r\omega \tag{18}$$

である。上の 2 つの式は、左辺が 2 つの観測量 (v_c, dv_r/dt)、右辺が 2 つの求める量 (r, ω) に対応しているので、r, ω について解くことが可能である。従って、あるリングについて $\theta_{x,max}$, v_c, dv_r/dt を計測すると、そこから、リングサイズ r、天体距離 D、ブラックホール質量 M を同時に解くことができる。このような回転円盤は NGC4258 で初めて見つかっており、その発見が野辺山 45m で行われるなど、日本の研究者（中井、三好、井上の各氏）が極めて重要な貢献をしている。この方法は、遠方の銀河の距離を仮定なしに求める最も正確な方法を与える。現在この方法を用いて数 100 Mpc 遠方の銀河の距離を求めるプロジェクトが米国にて進行中であり、これによってハッブル定数の決定精度が格段に向上すると期待されている。