電波天文学特論 II 2008-8

11　星形成領域

11.4　原始星円盤

原始星円盤は原始星本体やジェット・アウトフローと並んで星形成研究の重要なツールである。特に重要な特徴として

- 円盤の回転から原始星の質量の計測可能
- 大質量星形成のシナリオを検証可能（降着説 or not）
- 惑星の生まれる現場

などがあげられる。

回転と質量の関係は単純に遠心力とつりあいの式から求められ、

$$v_{\rm rot} = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \tag{1}$$

と書くことができる。この式は、ジェット・アウトフローの速度がほぼ脱出速度に対応するという式

$$v_{\rm out} = \sqrt{\frac{2GM}{r_{\rm acc}}}, \tag{2}$$

とほとんど同じ形をしているが、決定的に違うのは回転の場合、r は常に一定であり観測から決定可能であるが、アウトフローの場合 $r_{\rm acc}$ は加速領域の半径であり、アウトフローが観測された場所の半径とは関係ない。したがって、ジェット・アウトフローの速度計測は直接原始星の質量決定には利用できないが、円盤の回転計測は原始星の質量決定に結びつき、星形成研究において重要な役割を果たしうる。

12　銀河系回転計測

VLBI の高分解能観測を天体の位置計測に応用すると、AGB 星や星形成領域といった天体各論ではなく、これらをプローブとして銀河系の構造研究を行うこともできる。例えば、位相補償 VLBI 観測を行うと、位置測定精度としては相対位置で $\sim 10\mu$as レベルの計測が可能である。これは 10 kpc 先の天体の年周視差 $pi = 100\mu$as を S/N 比 10 で検出できることを示しており、銀河系スケールの距離を仮定なしに直接計測することも可能である。また、銀河系回転はオーダーで 200 km/s の運動であり、8 kpc 先でも ~5 mas/yr 程度の固有運動として見えるから、位相補償 VLBI を持ちいれば容易に検出が可能である。このように、VLBI は銀河系の奥行きや運動を精密に計測する

ツールとしても近年盛んに用いられてきており、国立天文台の VERA もメーザーをプローブとした銀河系計測のための専用望遠鏡である。

12.1 LSR と銀河定数

銀河回転を議論する上で重要な概念が LSR(Local Standard of Rest) である。LSR は太陽の位置にあり、銀河系中心の周りを銀河回転にのって円運動する仮想的な系として定義されている。LSR から銀河系中心までの距離は R_0、LSR における銀河系回転速度は Θ_0 と表され、この 2 つは銀河定数と呼ばれ、銀河系の大きさおよび回転のスケールを表す基本的な量である。IAU の 1985 年の推奨値によれば

$$R_0 = 8.5\,\mathrm{kpc}, \quad \Theta_0 = 220\,\mathrm{km\,s^{-1}}$$

が採用されているが、近年の研究では R_0 の値はもう少し小さめの 8 kpc 前後のものが多い。また、両者の比で与えられる銀河系の回転角速度もよく用いられるパラメーターである。

$$\Omega_0 = \frac{\Theta_0}{R_0}. \tag{3}$$

最近の Sgr A*の観測から $\Omega_0 \sim 30$ km/s/kpc 程度となることが知られている。この角速度を固有運動に直すと $\mu \sim 6$ mas/yr 程度の値である。ちなみに実速度と固有運動の変換式として

$$\mu = \left(\frac{1}{4.74}\right)\left(\frac{v}{\mathrm{km/s}}\right)\left(\frac{D}{\mathrm{kpc}}\right)^{-1}\ \mathrm{mas/yr}, \tag{4}$$

は覚えておくと便利である。あるいはもっと荒い概算方法として 5 km/s の速度が 1 AU/yr に対応しているというのを覚えておいてもよいであろう。

太陽を含むすべての星は、銀河系回転に加えて星ごとに固有のランダムな運動成分をもっている。太陽系の LSR に対する運動速度は 1985 年の国際天文学連合推奨値として

$$(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (10.0,\, 15.4,\, 7.8) \quad \mathrm{km\ s^{-1}}, \tag{5}$$

となっている。3 つの軸の向きは図 1 に示してあり、X 方向（速度 U 成分）は銀河系中心方向に、Y 方向（速度 V 成分）は銀河系回転の方向に、Z 方向（速度 W 成分）は北銀局の方向にとる。

12.2 視線速度と接線速度

天体が銀河系回転にのって完全な円運動をしている状況を考え、LSR から天体を観測したときの視線方向の速度 V_r および接線方向の速度 V_t を求めよ

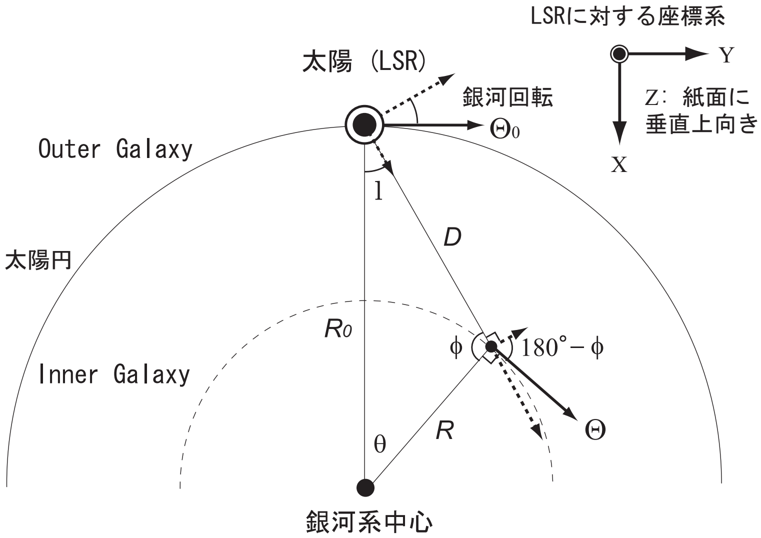

図 1: 銀河系回転の概略図。銀河系回転にのって円運動する天体を LSR から観測する際の速度成分を表す。

う。このとき V_r および V_t は、観測天体と LSR の速度成分の差として与えられるから、図 (1) より、

$$V_r = \Theta \sin(180^\circ - \phi) - \Theta_0 \sin l. \tag{6}$$

$$V_t = \Theta \cos(180^\circ - \phi) - \Theta_0 \cos l. \tag{7}$$

となる。ここで、Θ は観測天体位置での銀河回転の速度である。三角関数の性質より $\sin(180^\circ - \phi) = \sin\phi$、$\cos(180^\circ - \phi) = -\cos\phi$ であり、また、正弦定理より $\sin\phi / R_0 = \sin l / R$ が成り立つ。さらに、図 (1) の幾何学的関係から $R_0 \cos l = D - R\cos\phi$、の関係が得られるので、これらの関係式を式 (6) および式 (7) に代入して整理すると、

$$V_r = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0}\right) R_0 \sin l, \tag{8}$$

$$V_t = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0}\right) R_0 \cos l - \frac{\Theta}{R} D, \tag{9}$$

という関係が得られる。これが、銀河系内の天体を LSR から観測したときの速度を記述する基本式である。なお、余弦定理より、

$$R^2 = D^2 + R_0^2 - 2DR_0 \cos l, \tag{10}$$

の関係があり、D は R_0、R、l を用いて以下のように表すことができる。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l}. \tag{11}$$

右辺第 2 項が 0 となるのは $R = \pm R_0 \sin l$ が成り立つときである。この点は、銀河系中心を中心とする円と LSR から観測した視線とが接する点 (tangent point) になっていて、このような点の集合は、R_0 を直径とする円になる。式 (11) で第 2 項の符号が正になるのは、このような円の外側の領域である。