天体測定学 II 2007-7

1　銀河系の HI 観測

1.1　銀河系の $l-v$ 図と回転曲線

銀河系の HI を観測すると、各方向 (l,b) につき電波強度 ΔT_b が視線速度 v の関数として得られる。これを図示するには様々な方法があるが、良く使われる方法として、横軸に l、縦軸に v をとって電波強度を図示した $l-v$ 図がある（Position-Velocity diagram, PV 図）とも呼ばれる。

銀河面 $(b=0°)$ の $l-v$ 図は銀河系回転を議論する上で重要である。$l-v$ 図から銀河系の回転曲線を取り出すには次のような方法がある。

- 太陽系よりも内側の領域：終端速度を利用する
- 太陽系よりも外側の領域：H I ガスをリング状に輪切りにし、見かけのその厚みを利用する。

1.1.1　$l-v$ 図の終端速度

ある視線方向 l での視線速度の局大値（終端速度）は、$\partial V_r/\partial D=0$ が成り立つ場所で得られるから、

$$\frac{\partial V_r}{\partial D}=\frac{\partial}{\partial R}\left(\frac{\Theta}{R}\right)\frac{\partial R}{\partial D}R_0\sin l=0. \tag{1}$$

ここで $\partial R/\partial D$ は D, R, R_0 に関する余弦定理から

$$\frac{\partial R}{\partial D}=\frac{D-R_0\cos l}{R}. \tag{2}$$

従って回転速度 Θ によらず、$D-R_0\cos l=0$ を満たす点が終端速度を与える。この点は銀河系中心を中心とした円と太陽系から観測した視線が接する場所 (Tangent point) であり、このような点の集合は銀河系中心と太陽系を結ぶ直線を直径とする円となる。終端速度をあたえる点では以下のような関係が成り立ち、終端速度 V_{term} から直接に銀河回転の速度 $\Theta(R)$ を決定できる。

$$R=R_0\sin l,\quad V_{\mathrm{term}}=\Theta(R)-\Theta_0\sin l. \tag{3}$$

なお、太陽円の内側 $(-90\le l\le +90°)$ では視線速度の極大値 V_{term} が存在するが、太陽円の外側では視線速度は視線方向の距離 D に対して単調に変化し、極大値は存在しない。

1.1.2 H I リングの見かけの厚み

太陽円の外側での回転曲線の決定法としては、HI ガス円盤の幾何学的厚みを用いる方法が考案され、重要な役割を果たしている。この方法では、銀河系の HI ガス円盤を同心円上に輪切りにして考え、それぞれのリングではガスの厚さ（銀河面に垂直方向）が一定だとする。観測される視線速度の式より、

$$V_r = W(R)\sin l, \quad W(R) \equiv \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0}\right) R_0, \tag{4}$$

であり、W が一定となる視線速度を各 l 方向で取ってくることで、銀河円盤の HI ガスをリング状に切り出すことになる。

このときガス円盤の見かけの厚さ b_a は、

$$b_a = \arctan\left(\frac{z_0}{D}\right) = \arctan\left(\frac{z_0}{R_0\cos l + \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin l}}\right), \tag{5}$$

となる。ここで、z_0 は実際のガス円盤の厚みである。リングの半径 R/R_0 が異なると、式 (5) の l に対する振る舞いも非線形に大きく変わる。この効果を使って実際に切り出したリングの見かけの厚みをフィットすると、最終的にリングの半径 R/R_0 と厚さ z_0/R_0 を同時に決定することができる（R_0 で規格化した値が求まることに注意）。この R/R_0 の値を式 (4) の $W(R)$ に代入すると、リング状での回転速度 $\Theta(R)$ を決定することができる。

これらの方法を組み合わせて求めた銀河系の回転曲線は、太陽系近傍では 10 km s^{-1} 程度、また最も外側の領域でもで 30 km s^{-1} 程度の誤差で決定されている。その形状は概ね平坦な回転速度則を示しており、これは銀河系と同規模の系外円盤銀河で観測された回転曲線のふるまいと一致している。しかし、回転曲線の正確なふるまいは銀河定数 R_0 および Θ_0 に依存し、銀河系の回転曲線を絶対的な値として確立するためには、銀河定数 R_0 および Θ_0 の精密な決定も併せて必要である。

2　電波計測法：天体強度の計測方法

2.1　フラックスと天体のアンテナ温度

電気回路において温度 T を持つ任意の抵抗 R が発する雑音の電力は $P = kT\Delta\nu$ と表されるので（ナイキスト雑音）、アンテナも同様な電気回路と見なして「アンテナ温度」をアンテナで受信する電力 $P_{\rm ant}$ を用いて次のように定義する。

$$P_{\rm ant} \equiv kT_a\Delta\nu. \tag{6}$$

一方、フラックス F_ν の天体を観測した時のアンテナの受信電力 $P_{\rm ant}$ は

$$P_{\rm ant} = \frac{1}{2}A_eF_\nu\Delta\nu, \tag{7}$$

である。ここで 1/2 は一偏波のみを受信していることを考慮している（電磁波は横波なので 2 つの偏波成分がある）。また、A_e はアンテナの実効的な開口面積を表す。開口能率を η として、

$$A_e = \eta A \tag{8}$$

とも表すことができる。ここで A はアンテナの開口面積であり、直径 D の円形のパラボラアンテナでは $A = \pi(D/2)^2$ である。

これより、アンテナ温度 T_a は

$$kT_a = \frac{1}{2}A_eF_\nu, \tag{9}$$

となる。この式が天体のフラックスと観測されるアンテナ温度を関係付ける基本的な式である。なお、電波天文学において、フラックスをジャンスキー (Jansky、Jy) という電波天文学の開拓者にちなんだ単位で表すことが多い。1 Jy = 10^{-26} W m^{-2} Hz^{-1} である。

2.2　広がった天体の場合

天体が一様な輝度 I を持って広がっている場合を考える。天体の大きさがビームサイズよりも小さい場合は、

$$F_\nu \approx I\Omega_{\rm src}, \tag{10}$$

と書ける。ここで、$\Omega_{\rm src}$ は天体の大きさ（立体角）である。また、天体の大きさがビームサイズよりも大きい場合は、

$$F_\nu \approx I\Omega_{\rm beam}, \tag{11}$$

と書ける。ここで、$\Omega_{\rm beam}$ はビーム有効立体角である。

2.3 アンテナの温度と輝度温度の関係

天体の大きさがビームサイズより大きい場合、上式から、

$$kT_a = \frac{1}{2}\, A_e\, I\, \Omega_{\rm beam}, \tag{12}$$

と書ける。

レイリー・ジーンズ近似を用いて定義される輝度温度 T_b を用いると

$$I = \frac{2k}{\lambda^2} T_b, \tag{13}$$

より、

$$kT_a = A_e \frac{k}{\lambda^2} T_b \Omega_{beam}. \tag{14}$$

上式で、一般のアンテナで成り立つ以下の関係式

$$\frac{A_e \Omega_{beam}}{\lambda^2} = 1 \tag{15}$$

を用いると、最終的に

$$T_a = T_b, \tag{16}$$

を得る。すなわち、ビームサイズよりも十分大きな一様天体を観測した場合のアンテナ温度は、天体の輝度温度に等しい。なお、式 (15) の厳密な導出はアンテナ工学の専門書に譲るが、簡略化して考えると、アンテナの面積 $A_e \approx D^2$、ビーム立体角 $\Omega_{beam} \approx (\lambda/D)^2$ とすれば、確かに $A_e \Omega_{beam}/\lambda^2 \approx 1$ となる。

2.4 システム温度

実際の観測では、天体以外にも大気や宇宙背景放射などにより実際に計測されるアンテナ温度は増加する。そこで、実際に観測されるアンテナ温度 T_A は、以下のように表すことができる。

$$T_A = T_a e^{-\tau} + T_{\rm sky}(1 - e^{-\tau}). \tag{17}$$

ここで、T_a は天体のアンテナ温度、$T_{\rm sky}$ は大気放射の温度（黒体放射なので実際の大気温度と等しいである。また、τ は大気の光学的厚みを表しており、右辺の第１項目と２項目は輻射輸送の式に従い天体放射の減衰と吸収体からの再放射を表している。ここで、τ は平行平板大気を仮定すれば天頂方向の光学的厚み τ_0 を用いて次のように書ける。

$$\tau = \tau_0 \sec Z. \tag{18}$$

ここで、Z は天頂距離である。

実際のアンテナ温度は上式 (17) で与えられるが、このアンテナ温度によって発生する電力 P を直接検出するのは容易ではない。例えば、常温 (T=300

K) の一様黒体を観測したとして、帯域幅 $\Delta\nu$ を 1 GHz 取ったとしても、アンテナの出力電力は、$P = kT\,\Delta\nu \approx 4 \times 10^{-12}$ W であり、我々が日常使う電力に比べてはるかに小さい。通常電気回路で扱いやすい電力は mW 程度であり、アンテナからの電力を定量的に計測するためには、アンテナからの出力を大幅に増幅する必要がある。

この増幅を行う装置が受信機であり、電波天文学ではアンテナ本体と並んで非常に重要な装置である。理想的な受信機は元の信号を増幅するだけで一切雑音を付加させないが、実際の受信機では受信機雑音 $T_{\rm RX}$ が新たに付加され、これが観測感度を低下させる。受信機雑音を考慮した際に得られる雑音温度 $T_{\rm obs}$ は、

$$T_{\rm obs} = T_a e^{-\tau} + T_{\rm sky}(1 - e^{-\tau}) + T_{\rm RX}. \tag{19}$$

特に、天体のない blank sky を観測した場合のこの雑音温度をシステム雑音温度といい、$T_{\rm sys}$ と表す。すなわち、

$$T_{\rm sys} = T_{\rm sky}(1 - e^{-\tau}) + T_{\rm RX}, \tag{20}$$

$$T_{\rm obs} = T_a e^{-\tau} + T_{\rm sys}, \tag{21}$$

と書ける。システム雑音温度は観測装置自身（大気も含めて）が発生させている雑音を表し、小さいほど装置としての性能が良い。

2.5 ON-OFF スイッチング

通常、天体からの電波は弱く、天体のアンテナ温度 T_a はシステム温度に比べて小さい（$T_a << T_{\rm sys}$）ので、１回の電力計測から直接に天体の電波強度を求めるのは難しく、天体に向いた状態 (On-source) と天球面上すこし離れた場所に向いた状態 (Off-source) との差分から天体強度を測定する。このような観測手法をオン・オフスイッチングという。すなわち、オン、オフ時の受信機出力電力をそれぞれ

$$P_{\rm ON} = G_{\rm RX} k (T_a e^{-\tau} + T_{\rm sys}) \Delta\nu \tag{22}$$

$$P_{\rm OFF} = G_{\rm RX} k T_{\rm sys} \Delta\nu \tag{23}$$

とする。ここで G は受信機の増幅率（ゲイン）である。両者の差を $P_{\rm OFF}$ で規格化すると、

$$\frac{P_{\rm ON} - P_{\rm OFF}}{P_{\rm OFF}} = \frac{T_a e^{-\tau}}{T_{\rm sys}}, \tag{24}$$

と求まる。このような計測に加えて、別途システム雑音温度 $T_{\rm sys}$ と大気吸収係数 τ を求めれば、天体のアンテナ温度 T_a を決定することができる。システム雑音温度 $T_{\rm sys}$ を別に計測するには、温度が既知の雑音を注入し、温度変化を計測することで行われるのが一般的である。また、大気吸収係数 τ は天頂角 Z を変えながらシステム温度の変化を調べる"$\sec Z$" 法が良く使われる。

2.6 R-Sky 法を用いた温度較正

cm 波や mm 波帯で良く利用される温度較正法に R-Sky 法がある。R-Sky 法は、blank sky のパワーの観測と温度が既知の黒体のパワーの観測のみからシステム温度を計測でき、τ の計測が不要な簡便な温度較正方法である。

R-Sky 法で求められるシステム雑音温度 T_{sys}^* は以下の式で定義される。

$$T_{\mathrm{sys}}^* = T_{\mathrm{sys}} e^{\tau} \tag{25}$$

blank sky と黒体（温度は室温）を観測したときの受信パワー P_{sky} および P_{R} は、受信機ゲインを G として次のように書ける。

$$P_{\mathrm{sky}} = Gk \left[T_{\mathrm{RX}} + T_{\mathrm{sky}}(1 - e^{-\tau}) \right] \Delta\nu \tag{26}$$

$$P_{\mathrm{R}} = Gk \left(T_{\mathrm{RX}} + T_{\mathrm{room}} \right) \Delta\nu. \tag{27}$$

ここで T_{RX} は受信機雑音温度であり、T_{sky} および T_{room} はそれぞれ外気温と室温である。２つパワーの比 y をとると、

$$y = \frac{P_{\mathrm{R}}}{P_{\mathrm{sky}}} = \frac{T_{\mathrm{RX}} + T_{\mathrm{room}}}{T_{\mathrm{RX}} + T_{\mathrm{sky}}(1 - e^{-\tau})}, \tag{28}$$

となる。ここで、外気温度と黒体の温度（室温）が等しいと仮定し、上式に T_{room} に T_{sky} を代入して整理すると、

$$y = 1 + \frac{T_{\mathrm{sky}} e^{-\tau}}{T_{\mathrm{RX}} + T_{\mathrm{sky}}(1 - e^{-\tau})}, \tag{29}$$

を得る。これに T_{sys}^* の定義式を代入して整理すると、最終的に

$$T_{\mathrm{sys}}^* = \frac{T_{\mathrm{sky}}}{y - 1}, \tag{30}$$

となり、R-Sky 測定時の受信パワー比 y と外気音 T_{sky} の測定から T_{sys}^* を決定することができる。なお、受信パワー比はデシベル単位であわらすことが多く、その値を Y dB とすれば、T_{sys}^* は

$$T_{\mathrm{sys}}^* = \frac{T_{\mathrm{sky}}}{10^{Y/10} - 1}, \tag{31}$$

とも表せる。

このように求められた T_{sys}^* を用いれば、式 (24) より、

$$T_a = \left(\frac{P_{\mathrm{ON}} - P_{\mathrm{OFF}}}{P_{\mathrm{OFF}}} \right) T_{\mathrm{sys}}^*, \tag{32}$$

と得ることができる。すなわち τ を計測しないで T_a を得ることがわかる。このように T_{sys}^* を用いて得られた T_a を T_a^* と書くこともある。