

天体測定学 II 2007-6

1 中性水素 21cm 線

電波天文学における輝線の中で、最も重要なものの一つが中性水素 (HI) の放射する 21cm である。水素原子は宇宙において最も基本的な原子であり、星の材料や核融合反応の燃料ともなる最重要原子である。中性水素は陽子と電子からなっており、両者のスピンの向きが平行か反平行かによって微細なエネルギー準位差が発生する (超微細構造)。この 2 準位間のエネルギー差は $\Delta E = 9.4 \times 10^{-25} \text{ J}$ ($T = \Delta E/k = 0.068 \text{ K}$) であり、このエネルギー準位間の遷位に伴って放射される電磁波は周波数 $\nu = 1420.405 \text{ MHz}$ の電波である。この電波の波長は $\lambda = 21.106 \text{ cm}$ であるので、このような中性水素の基底状態の超微細構造に伴う放射を中性水素 21cm 線 (HI21cm 線) と呼ぶ。

この遷移でのアインシュタイン係数は

$$A_{21} = 2.85 \times 10^{-15} \text{ sec}^{-1}$$

であることが知られており、遷移確率は極めて小さい。実際、1 個の水素原子で遷移がおこるのに掛かる時間は約 1 千 100 万年である。しかし宇宙には大量の水素が存在するので、その積分効果により、この電波を観測することができる。さらに輝線のドップラーシフトからガスの視線速度も計測できるので電波天文において非常に重要な観測対象である。

中性水素の超微細構造は、原子と分子のスピン (それぞれスピン 1/2) が平行な状態 $F = 1/2 + 1/2 = 1$ が上位、反平行な状態 $F = 1/2 - 1/2 = 0$ が下位にあたる。 $F = 1$ の状態は 3 重縮退状態であるので $g_2 = 3$ 、 $F = 0$ は縮退がなく $g_1 = 1$ である。熱平衡状態では

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

である。銀河系の星間空間における中性水素ガスの温度は $T \approx 200 \text{ K}$ であり、一方 $\Delta E/k = 0.068 \text{ K}$ より $h\nu \ll kT$ である (レーリー・ジーンズ近似)。このとき

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} = 3 \quad (1)$$

が成り立つから、平行・反平行状態の中性水素を合わせた全柱密度 N_{HI} は

$$N_{\text{HI}} = N_2 + N_1 = 4N_1, \quad (2)$$

となる。この式からから、 N_{HI} は

$$N_{\text{HI}} = \frac{32\pi\nu^2 g_1 k}{c^3 h g_2 A_{21}} \int \Delta T_b dv = \chi_{\text{HI}} \int \Delta T_b dv \quad (3)$$

とかける。ここで χ_{HI} は観測される積分強度 $\int \Delta T_b dv$ を柱密度に換算する際の変換係数であり、

$$\chi_{\text{HI}} \equiv \frac{32\pi\nu^2 g_1 k}{c^3 h g_2 A_{21}} \quad (4)$$

である。ここに、上で紹介した定数の具体的な値を代入すると、

$$\chi_{\text{HI}} = 1.82 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}/(\text{K km s}^{-1})$$

である。

2 系外銀河の HI 観測

最初に HI が観測されたのはもちろん銀河系であり、1950 年台のことである。HI による銀河観測を考える一方、1970 年台後半から 80 年台になると WSRT(Westerbork Synthesis Radio Telescope) や VLA(Very Large Array) などの高い分解能を持った電波干渉計が登場し、系外銀河の中性水素ガス(HI)の観測が行われるようになった。ここでは、まず系外の円盤銀河の HI 観測について考え、その観測から中性水素ガスの質量や銀河の回転曲線、さらにはダークマターの分布などといった、銀河の動力学的性質を探る。

観測で得られる情報は、天球面上での各位置 (x, y) で、輝度温度 ΔT_b が視線速度 v の関数として得られる。すなわち、

$$\Delta T_b = \Delta T_b(x, y, v)$$

が観測量である。

2.1 中性水素の総質量

銀河における中性水素の総質量は T_b を全速度、全領域で積分して得ることができる。典型的には、回転曲線から示唆される銀河の質量に対して数%から 10%程度であり、質量としては星やダークマターなど他の成分の方が重要である。すなわち銀河系のような平均的な銀河では、宇宙年齢の間に中性水素の大部分は星を作る材料として消費されたことを意味している。

2.2 中性水素の分布

円盤銀河における中性水素の分布の最大の特徴は、光学円盤よりも広がって分布していることである。このため、中性水素の視線速度を用いて、銀河中心から銀河円盤の外側までの広範囲にわたって銀河回転を計測できる。また、銀河の相互作用を調べる際にも、円盤より広がって分布している中性水素の観測は極めて効果的である。

2.3 中性水素の運動

円盤銀河内の中性水素ガスの運動は、第1次近似では銀河中心周りの円運動として表される。ただし、銀河円盤の回転はレコードやCDのような剛体回転ではなく、場所ごとに回転速度がことなる差動回転である。円運動の遠心力が銀河の重力とつりあっていると考えることにより中性水素の運動から銀河内の質量分布を得ることができる。これは銀河内のダークマターを探る重要な手段を与える。

3 回転曲線とダークマター

3.1 中性水素観測でみる銀河の回転

銀河中心距離 R の関数として回転速度 $V(R)$ を表したものを回転曲線という。HI 観測で得られる円盤銀河の速度場と銀河の回転曲線 $V(R)$ は、以下のような関係式で結ばれている。

$$V_{\text{obs}}(R, \phi) = V_{\text{sys}} + V(R) \cos \phi \sin i. \quad (5)$$

ここで、 i は銀河円盤の傾斜角であり、視線と銀河円盤の法線がなす角として定義される。すなわち、銀河円盤を真上から見ると $i = 0^\circ$ (フェイスオン)、真横から見ると $i = 90^\circ$ (エッジオン) である。 R および ϕ は観測点の銀河円盤上での位置 (極座標表示) であり、 ϕ は銀河の見かけの長軸方向を 0° とする。また、 V_{sys} は宇宙膨張に乗った銀河の後退速度である。HI ガスの速度場から銀河回転を得る際には、式 (5) の関係式を用いて、速度場を最も良く表すように回転曲線 $V(R)$ を求める。その際、円運動成分に乗らないような非対称運動など高次の成分についても残差として得ることができる。

3.2 質量分布

最も簡単な場合として球対称な質量分布を考えると、ある半径以内の質量 (Enclosed Mass) $M_r(r)$ は、密度分布 $\rho(r)$ を用いて次のように書ける。

$$M_r = \int 4\pi r^2 \rho(r) dr. \quad (6)$$

このような質量分布中を円運動する質点 (質量 m , $m \ll M_r$ とする) を考えると、遠心力と重力のつりあいより

$$\frac{mv_c^2}{r} = \frac{GM_r m}{r^2}, \quad (7)$$

という関係式が成り立つ。この式を回転速度 v_r について解くと以下の関係式を得る。

$$v_c = \sqrt{\frac{GM_r}{r}}. \quad (8)$$

この関係式は、円運動の速度から M_r を与え、さらに式 (6) を経て、質量分布を与える。最も単純な場合として質量分布が中心におかれた質量 M の質点とすると、 $v_c = \sqrt{GM/r}$ となり、ケプラー回転の速度となる。

上式を用いると、銀河系の回転速度から銀河系の質量分布を求めることができる。すなわち、式 (8) を質量 M_r について解いた形に変形すると、

$$M_r = \frac{rv_c^2}{G}, \quad (9)$$

となる。平坦な回転曲線 ($v_c = \text{const.}$) からは $M_r \propto r$ および、 $\rho \propto r^{-2}$ が示唆される。

銀河系や一般の銀河を考えると単位系として r を kpc、 v_c を km s^{-1} 、 M_r を太陽質量 $M_\odot (=1.99 \times 10^{30} \text{ kg})$ で表すことが多く、その単位系では

$$\left(\frac{M_r}{M_\odot}\right) = 2.32 \times 10^5 \left(\frac{r}{\text{kpc}}\right) \left(\frac{v_c}{\text{km s}^{-1}}\right)^2, \quad (10)$$

となる。例えば、典型的な銀河の値として $r = 20 \text{ kpc}$ 、 $v_c = 200 \text{ km s}^{-1}$ を代入すると、 $M_r = 1.9 \times 10^{11} M_\odot$ という値になる。

3.3 円盤銀河の質量分布モデル

銀河円盤の光度分布は指数関数分布

$$I(R) = \exp(-R/h), \quad (11)$$

で良く近似される。ここで h はスケール長であり、通常の銀河では数 kpc のオーダーである。この分布は中心集中度が極めて高く、指数関数円盤の回転曲線を描くと、 $2.2h$ で最大値となり、その外側ではケプラー的に落ち込む形になる。従って、観測された回転曲線を再現するために、銀河円盤に加えてハロー成分を考える必要がある。ハローの質量分布としては銀河の外側で $\rho \propto r^{-2}$ のようにふるまうものとして

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/a)^2}, \quad (12)$$

というような密度分布や、 N 体力学計算から求められた、

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/a)(1 + r/a)^2} \quad (13)$$

という密度分布モデルは最近よく議論に使われる。 ρ_0 と a は典型的な密度と半径である。発見者達の名前を取って NFW モデル (Navarro-Frenk-White model) と呼ばれることが多い。

4 銀河系の HI 観測

4.1 局所静止基準と銀河定数

局所静止基準 (LSR: Local Standard of Rest) は、「太陽の位置にあり銀河系中心の周りを円運動する仮想的な点」として定義され、銀河系の回転を考える際の基準となる重要な概念である。図 1 に示すように、LSR と銀河系中心の距離は R_0 、LSR が持つ銀河系回転の速度は Θ_0 と表される。この 2 つの定数は銀河定数 (Galactic Constant) と呼ばれ、太陽位置における銀河系回転を記述する最も基本的な量である。銀河定数の値については多数の研究があり、1985 年の国際天文学連合 (IAU: International Astronomical Union) の決議では、それまでの研究の平均値として以下の値が推奨されている。

$$R_0 = 8.5 \text{ kpc}, \quad \Theta_0 = 220 \text{ km s}^{-1}. \quad (14)$$

その後の研究では、 R_0 に関しては上記よりやや小さめの 7 kpc から 8 kpc 程度の値を出すものもあり、また、 Θ_0 については最小値 180 km s^{-1} から最大値 270 km s^{-1} まで広範囲にわたっており、式 (14) もこの程度の不定性を含んでいることを認識する必要がある。

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

$$(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (10.0, 15.4, 7.8) \text{ km s}^{-1}, \quad (15)$$

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。

4.2 視線速度と接線速度

天体が銀河系回転によ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 を求める。 V_r 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、

$$V_r = \Theta \sin(180^\circ - \phi) - \Theta_0 \sin l. \quad (16)$$

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 (16) に代入して整理すると、

$$V_r = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \sin l, \quad (17)$$

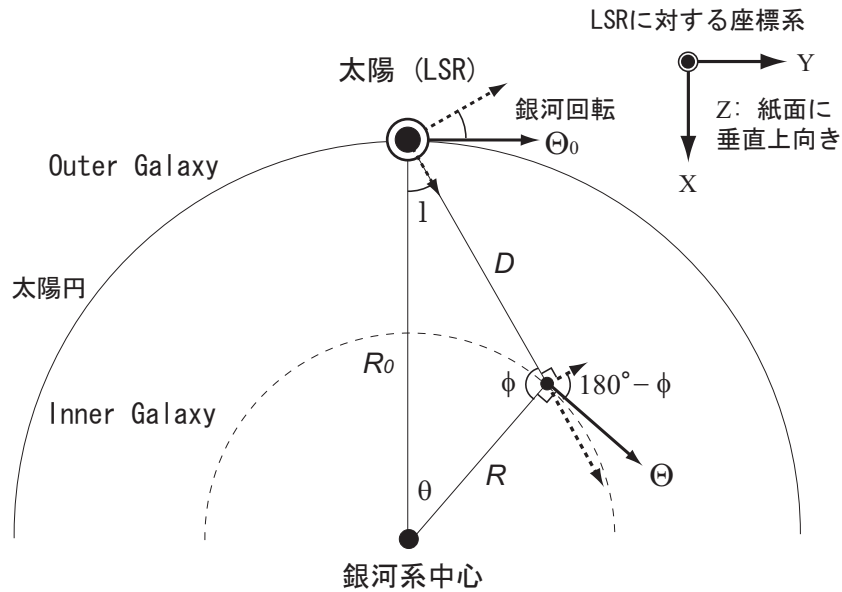


図 1: 銀河系円盤を円盤上空（北銀極方向）から見たときの模式図。太陽 (LSR)、銀河系中心、太陽円などの位置関係と、天体の銀河回転運動を LSR から観測する際の視線および接線速度成分を図示してある。右の座標系は LSR に対する運動を記述する際の座標を表す。

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、

$$R^2 = D^2 + R_0^2 - 2DR_0 \cos l, \quad (18)$$

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。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l}. \quad (19)$$

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 (19) 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。