

# H I・CO輝線で見える天の川銀河の3次元構造

中西裕之

〈鹿児島大学学術研究院理工学域理学系 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-35〉

e-mail: hnakanis@sci.kagoshima-u.ac.jp



我々はH I・CO輝線の幕天観測データと回転曲線を用いて、運動学的距離に基づいて天の川銀河の3次元的なH I, H<sub>2</sub>および全ガス (H I+H<sub>2</sub>) 分布図を作成した。H Iガス, H<sub>2</sub>ガスは、それぞれ太陽系軌道外側, 内側で豊富なため、これらを合わせた全ガス分布図を作成することによって、天の川銀河の中心から外縁部まで銀河全体の構造を、明瞭に捉えることができた。本研究の結果、銀河系中心からじょうぎ座-はくちょう座腕, ペルセウス座腕, いて座-りゅうこつ座腕, たて座-みなみじゅうじ座腕, オリオン座腕の5本の渦状腕構造が対数螺旋でよく近似できることを明らかにした。

## 1. はじめに

天の川は、太陽系に住む私たちが位置する銀河を、内側から見た姿である。私たちにとって、最も近い銀河であるがゆえ、他の系外銀河では分解能が足らずにわからないことでも、天の川銀河であれば、高い分解能で調べることができる。一方、天の川銀河を外側から見ることはできないため、その全体的な構造を捉えることは難しい。

天の川銀河の構造を明らかにするのに有効な手段として、星間物質の放射する電波のスペクトルデータを用いる方法がある。星間物質は天の川銀河の主要な構成要素の一つであり、その70%以上が水素で構成され、そのうち中性成分は水素原子 (H I) ガスと水素分子 (H<sub>2</sub>) ガスに大別できる。H Iガスは、超微細構造遷移に伴う波長21 cm, 周波数1,420 MHzの輝線放射として観測される。一方、H<sub>2</sub>分子は等核二原子分子なので電気双極子モーメントが0となり、回転遷移に伴う電波域での放射をしない。その代わりに、異核二原子分子の一酸化炭素 (CO) 分子の回転遷移に伴う周波数115 GHzの輝線放射は十分な強度で

観測でき、その強度がH<sub>2</sub>ガス量に比例することがわかっているため、CO輝線分子の観測からH<sub>2</sub>ガスの分布を調べることができる。

H IおよびCO輝線は、(1) 電波域で観測できるため、星間吸収の影響をほとんど受けないこと、(2) H IおよびH<sub>2</sub>ガスは天の川銀河の中心から星円盤の外側まで分布すること、(3) 輝線として観測できるため、視線速度から運動学的距離に基づいて距離を見積もることができること、等の理由で、その全天サーベイデータは天の川銀河の構造を明らかにするのに適している。

そのため、オランダのKootwijk 7.5-m望遠鏡を用いた全天H Iサーベイ観測 [1] が行われて以来、多くのH I・CO全天サーベイが行われてきた。これらの初期データを使って、いて座腕やオリオン座腕, ペルセウス座腕など、天の川銀河の渦状腕構造が初めて描き出され、天の川銀河は渦巻銀河であることが視覚的に示された [2]。その後、銀経*l*-速度図上で渦状腕を同定する方法によって、はくちょう座腕などが同定された [3, 4]

1980年代には、アメリカおよびチリ1.2-m電波望遠鏡を用いたCO輝線の全天サーベイが行わ

れ、巨大分子雲の分布を調べることによって、いて座腕、りゅうこつ座腕が同定された [5, 6]. さらに、14-m 電波望遠鏡を用いた第1象限 ( $0^\circ \leq l < 90^\circ$ ) の銀河面サーベイが行われ、いて座腕、ペルセウス座腕が同定され [7], 第1象限の分子ガス分布図も描き出されるようになった [8].

これらの渦状腕構造は、 $\text{H I} \cdot \text{CO}$  輝線データ以外にも、電離水素 ( $\text{H II}$ ) ガスの観測データ [9] や、熱電子分布 [10], ダスト放射 [11] などを使った研究によっても同定されている. これまでに出版された天の川銀河の渦状腕構造に関する論文のレビューによると [12], これらの渦状腕は対数螺旋でよく表されることがわかっている. 対数螺旋は同心円の接線とのなす角が一定となる性質があり、台風や巻貝など自然界に多く見られる螺旋である. 接線となす角は「ピッチ角」と呼ばれ、この値が小さいほど、きつく巻き込んだ渦状腕であると言える. 天の川銀河の場合は、 $13^\circ.1 \pm 0^\circ.6$  と見積もられている.

筆者は大学院生時代を過ごした2005年までに公開された最新の  $\text{H I}$ ,  $\text{CO}$  サーベイデータを用いて、天の川銀河における星間ガスの3次元分布に関する研究に取り組んだ. これまでに、 $\text{H I}$  ガスの3次元分布 [13],  $\text{H}_2$  ガスの3次元分布 [14] について調査結果を報告した. 本記事で紹介するのは、以下で述べるように、 $\text{H I}$  および  $\text{H}_2$  ガス分布に関する調査結果を合わせて、天の川銀河の中心から外縁部まで、 $\text{H I}$  および  $\text{H}_2$  ガスを合わせた全中性水素 ( $\text{H I} + \text{H}_2$ ) ガスの分布についての研究結果である [15].

本記事では、我々人類の住む銀河を「天の川銀河」または「銀河系」と呼ぶこととし、必要に応じて使い分けることにする. また論文に合わせて銀河系定数を  $R_0 = 8.0 \text{ kpc}$ ,  $V_0 = 217 \text{ km s}^{-1}$  (それぞれ銀河系中心と太陽系の距離、および銀河系中心に対する太陽系の回転速度) とする. 原点を銀河系中心、銀河面 (銀緯  $b = 0$ ) を  $xy$  平面とする直交3次元座標を考え、図1に示すように太陽

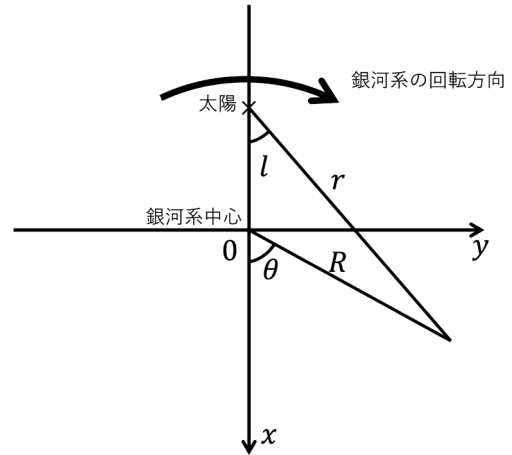


図1 本記事で定義する座標系.

系を  $(x, y, z) = (-8 \text{ kpc}, 0, 0)$  に位置すると定義する. また、銀河系中心を原点とする円筒座標系  $(R, \theta, z)$  を  $\theta = 90^\circ$  が  $l = 90^\circ$  と平行となるように定義する.

## 2. データ

$\text{H I}$  データは Leiden-Argentine-Bonn (LAB)  $\text{H I}$  サーベイデータを採用した [16]. これは、オランダの Dwingeloo 25-m 鏡による北天  $\text{H I}$  サーベイ [17] と、アルゼンチンの Villa Elisa 30-m 鏡による南天  $\text{H I}$  サーベイ [18] をまとめたものである. 前者と後者のビーム幅 (角度分解能) は、それぞれ  $0^\circ.6$ ,  $0^\circ.5$  であり、グリッドは間隔  $0^\circ.5$  である. 視線速度は  $-450 \text{ km s}^{-1}$  から  $+400 \text{ km s}^{-1}$  をカバーし、速度分解能は  $1.03 \text{ km s}^{-1}$  である. 輝度温度の雑音は  $0.07\text{--}0.09 \text{ K}$  であり、本研究では銀緯  $|b| \leq 10^\circ$  のみを使うこととした.

$\text{CO}$  データはアメリカとチリに建設された 1.2-m 鏡による複数サーベイ [19–22] をまとめた文献 [23] のデータを採用した. ビーム幅は  $8'.6 \pm 0'.2$  であり、グリッド間隔は  $0^\circ.125\text{--}0^\circ.25$  である. 視線速度幅は  $332 \text{ km s}^{-1}$  であり、速度分解能は  $1.3 \text{ km s}^{-1}$  である. 輝度温度の雑音は  $0.12\text{--}0.43 \text{ K}$  であり、本研究では銀緯  $|b| \leq 1^\circ.5$  のみを使うこととした.

また運動学的距離の見積りに必要な回転曲線は、文献 [24] と文献 [25] から採用することとした。太陽系軌道の外側 ( $R > R_0$ ) については、銀河系中心から 30 kpc 以遠まで回転速度が求められている必要があり、文献 [25] の回転曲線は観測データに基づいてポテンシャルモデルと合わせて十分遠方まで求められていたことから採用した。また、太陽系軌道の内側 ( $R < R_0$ ) については、後述の終端速度を超えない回転曲線である必要があり、CO サーベイデータの終端速度を用いて回転曲線を決定している文献 [24] を採用した。

### 3. 方法

#### 3.1 運動学的距離

天の川銀河が、回転曲線  $V(R)$  にしたがって純円運動していると考え、銀経  $l$ ・銀緯  $b$  の方向にあり銀河系中心から距離  $R$  にある  $H I$ ・CO ガスの視線速度  $V_{LSR}$  は、以下の式で与えられる。

$$V_{LSR} = \left( \frac{R_0}{R} V(R) - V_0 \right) \sin l \cos b \quad (1)$$

一方、太陽系からの距離を  $r$  とすると、余弦定理より  $R$  と  $R_0$ ,  $r$  の間には

$$R^2 = r^2 + R_0^2 - 2rR_0 \cos l \quad (2)$$

なる関係がある。これら 2 式を使えば  $R$  を消すことができ、図 2 に示すように視線速度  $V_{LSR}$  を太陽

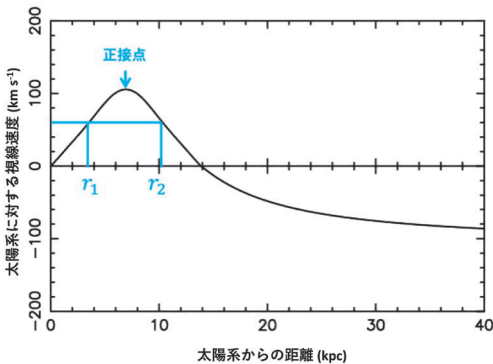


図2 銀経  $l=30^\circ$  の方向における太陽系からの距離  $r$  と視線速度  $V_{LSR}$  の関係 [13].

系からの距離  $r$  の関数として書くことができる。このようにして求める距離を「運動学的距離」(kinematic distance) と呼ぶ。これを任意の  $l$  について計算することによって、図 3 に示すような天の川銀河全体の速度場を作成することができる。これにより、視線速度と位置の関係が対応するため、視線速度より太陽系からの距離がわかる。

運動学的距離は、太陽系軌道の外側 ( $R > R_0$ ) では  $r = R_0 \cos l + \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l}$  だけが  $r > 0$  を満たすので、一意に決めることができる。しかしながら、太陽系軌道の内側 ( $R < R_0$ ) では  $r = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l}$  のどちらも  $r > 0$  を満たすので、解が一意に決まらない。これを「近遠不定性」(near-far ambiguity) と呼ぶ。以下で、まず前者の太陽系軌道の外側のガス分布について述べ、その後に「近遠不定性」の解決方法について述べる。

#### 3.2 太陽系軌道の外側の $H I$ ・ $H_2$ ガス分布

$H I$  および  $CO$  輝線のスペクトルは視線速度  $V_{LSR}$  の関数  $T_b(V_{LSR})$  と表される。前述の運動学的距離により、視線速度  $V_{LSR}$  は、太陽系からの距離  $r$  に変換できるので、スペクトルは視線方向

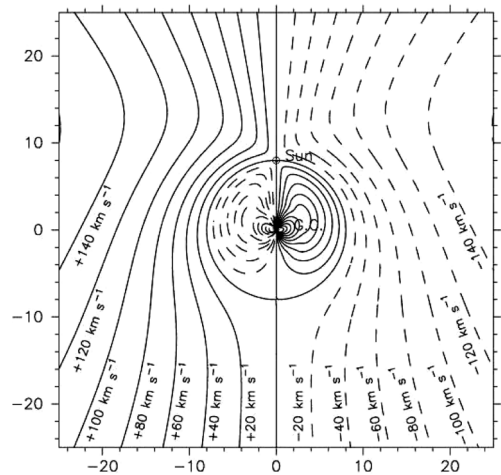


図3 銀河系の速度場 [13]. 縦軸と横軸は銀河中心からの位置で単位は kpc.

のガス分布を表している．太陽系からの距離  $r$  における  $H_1 \cdot H_2$  ガスの体積数密度  $n[\text{cm}^{-3}]$  は、

$$n(r) = X T_b(V_{\text{LSR}}) \frac{\Delta V_{\text{LSR}}}{\Delta r} \quad (3)$$

により与えられる．ここで、 $X$  は変換係数であり、 $H_1$  ガスの場合は  $X = 1.82 \times 10^{18} (\text{H cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{km}^{-1} \text{s})$ 、 $H_2$  ガスの場合は、天の川銀河での典型値として  $X = 1.8 \times 10^{20} (\text{H}_2 \text{ cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{km}^{-1} \text{s})$  [23] を採用した．また、 $\Delta V_{\text{LSR}}/\Delta r$  は、視線速度  $V_{\text{LSR}}$  を太陽系からの距離  $r$  で数値的に微分したものであり、 $\Delta r$  は速度分解能に対応する運動学的距離の間隔で与えられる．

### 3.3 太陽系軌道の内側の $H_1 \cdot H_2$ ガス分布

前述の通り、太陽系軌道の内側 ( $R < R_0$ ) では、近遠不定性のため、同一の視線速度  $V_{\text{LSR}}$  を与える点が、視線方向に2点 ( $r_1, r_2$ ) 存在する．図2に示すように、例えば  $V_{\text{LSR}} = 60 \text{ km s}^{-1}$  の場合、 $r_1 = 3.3 \text{ kpc}$ 、 $r_2 = 10.3 \text{ kpc}$  となる．この問題を解決するため、銀河面に垂直な  $z$  方向の分布のモデルを考える．太陽からの距離  $r_i$  における分布は、ピーク値を  $n_{0i}$ 、ピーク値を与える高さを  $z_{0i}$ 、ピーク値の1/2を与える高さを  $z_{1/2}$  とすると、

$$n_i(z) = n_{0i} \text{sech}^2 \left\{ \ln(1 + \sqrt{2}) \frac{z - z_{0,i}}{z_{1/2}} \right\} \quad (4)$$

で与えられる [26]．したがって、観測されるガスの柱密度を銀緯  $b$  の関数  $N(b)$  とすると

$$\begin{aligned} N(b) \cos b \\ = n_1(r_1 \tan b) \Delta r_1 + n_2(r_2 \tan b) \Delta r_2 \end{aligned} \quad (5)$$

で表される．ガス円盤の厚み  $z_{1/2}$  は基本的に銀河系中心からの距離で決まるので、残りの4変数  $n_{01}, n_{02}, z_{01}, z_{02}$  を観測値  $N(b)$  に合うように決めれば、太陽系からの距離  $r_1, r_2$  における分布を求めることができる．

### 3.4 正接点におけるガス分布

太陽系軌道の内側 ( $R < R_0$ ) には近遠不定性があると述べたが、視線上に1点だけ運動学的距離が一意に決まる点がある．これは  $r = R_0 \cos l$  を満たす点であり、これを式(2)に代入すると  $R = R_0$

$\sin l$  となることがわかる．さらに、これを式  $r = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l}$  に代入すると、平方根が0になることから解が一意に決まることがわかる．この点を「正接点」(tangential point)と呼ぶ．また、図2に示すように、この点で視線速度の絶対値は最大値をとり、この速度を「終端速度」(terminal velocity)と呼ぶ．

本研究では、太陽系軌道の内側の  $H_1 \cdot H_2$  ガス分布を求める前に、ガス円盤の厚み  $z_{1/2}$  を銀河系中心距離  $R$  の関数として表すため、正接点における  $z$  方向のガス分布を求めた．終端速度を  $V_t$  とすると、星間ガスは速度分散  $\sigma$  をもつため、スペクトルは  $V_{\text{LSR}} < V_t$  の範囲にも広がる．そこで、 $V_t - \sigma \leq V_{\text{LSR}} \leq V_t$  に対応する運動学的距離におけるガス分布を考えることとし、ガス密度は視線速度範囲  $|V_t| - \sigma \leq |V_{\text{LSR}}| \leq \infty$  の範囲のスペクトルを積分して求めた．本研究では  $\sigma = 5 \text{ km s}^{-1}$  で一定とした [24]．

### 3.5 $H_1 \cdot H_2$ 分布の座標変換

上記によって ( $l, b, r$ ) の球座標系での分布が得られたので、最終的に ( $x, y, z$ ) の直交座標系に変換した．太陽系軌道の外側については、1次関数で補間することによって変換した．太陽系軌道の内側については、半値幅  $0.48 \text{ kpc}$  の重み関数で、 $z_0$  と  $n_0$  を平均化して、分布を求めた．また、 $|V_{\text{LSR}}| \leq 3\sigma$  の速度範囲は太陽系軌道半径上のガス分布に対応するが、太陽近傍の成分の寄与との区別がつかないため、解析には含めず、周りから内挿して補間することとした．

## 4. $H_1, H_2$ , 全ガスの3次元分布

### 4.1 $H_1, H_2$ , 全ガス分布の正面図

上記に示した解析の結果、図4に示すような  $H_1, H_2$ , 全ガス分布図が得られた．銀河中心から扇型に欠けている部分は、運動学的距離によって決定できる点が少ないため、表示しないことにしている．他の渦巻銀河と同様に、天の川銀河の中心付近は分子ガスの割合が高く、外側に向かって中性水素原子ガスの割合が高くなる傾向が見られ



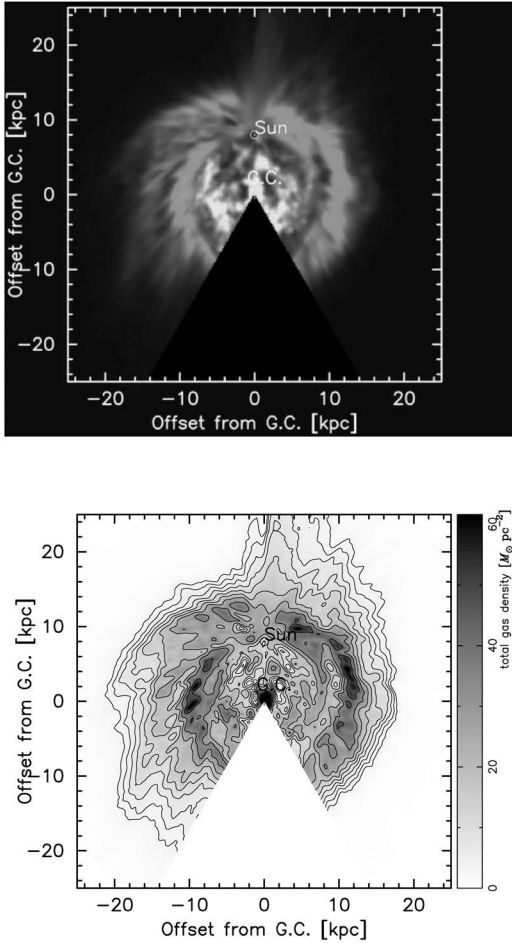


図4 H IおよびH<sub>2</sub>ガス分布の正面図(上)と、全ガス(H I+H<sub>2</sub>)密度分布図(下) [15]. 上図中心部の白色がH<sub>2</sub>ガスの分布, 外側の灰色がH Iガスの分布を示す.

る. 分子ガスの割合は太陽系軌道半径付近で急激に減少することがわかる.

このことから, 天の川銀河全体の構造を調査するには, H Iガスだけ, あるいはH<sub>2</sub>ガスだけのマップではなく, H IガスとH<sub>2</sub>ガスを合わせた全ガス密度マップで調査するのが良い. 図4の下図に示すように, 本研究によって初めて, 天の川銀河内側から外側まで, 渦状腕構造を連続的になぞることができるようになった.

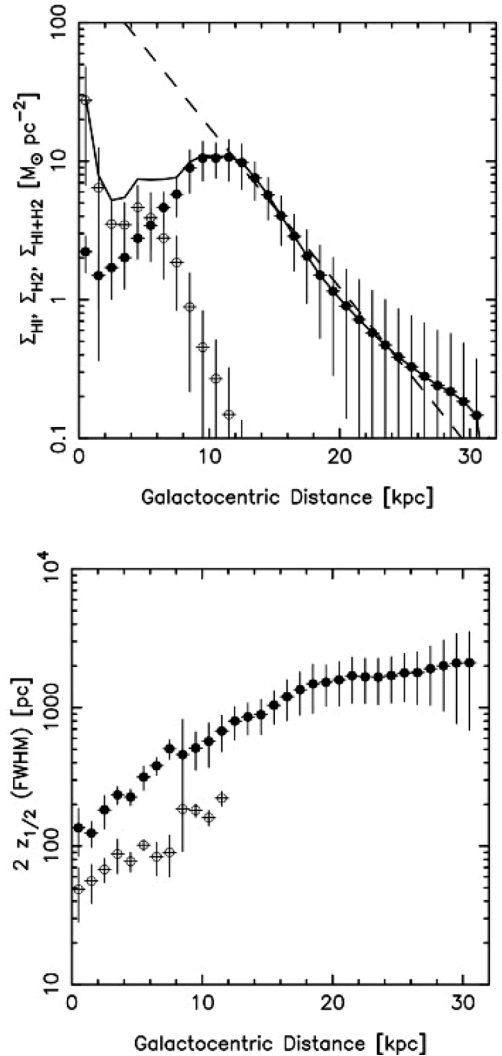


図5 上図: H I (黒丸), H<sub>2</sub> (白丸), 全ガス (実線) の面密度の動径分布 [15]. 波線はスケール長 3.75 kpc の指数関数 [27]. 下図: H I (黒丸), H<sub>2</sub> (白丸) ガス円盤の  $z$  方向の分布の半値全幅の動径分布 [15].

#### 4.2 動径分布

図5にH I, H<sub>2</sub>, 全ガス密度の動径分布を示す. H Iガスは銀河系中心部と10 kpcのところをピークをもち, その外側では指数関数的に減少することがわかる. 半径17 kpcで, 面密度は1 M<sub>⊙</sub> pc<sup>-2</sup>まで減少し, この半径がH Iガス円盤のサイズと見なされる.

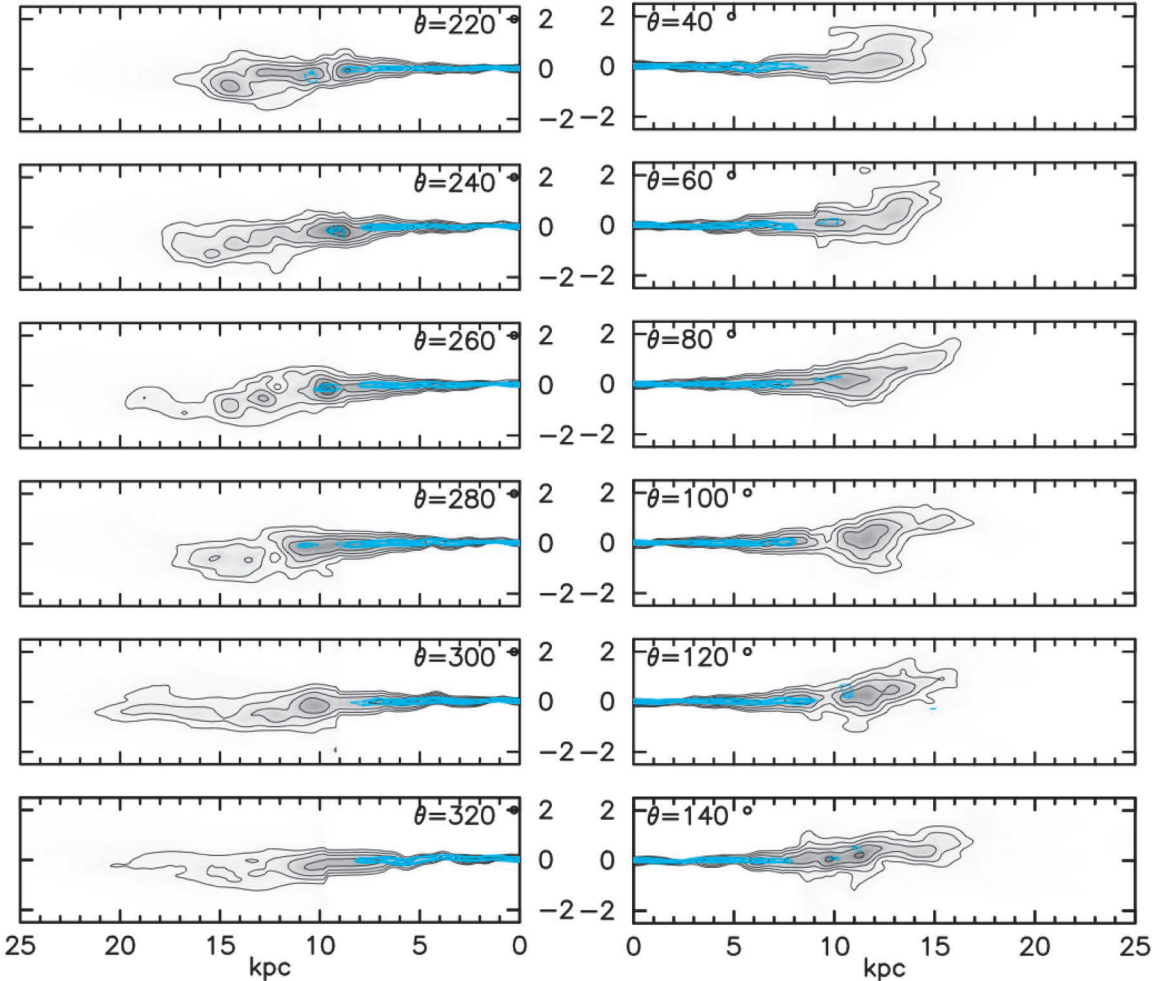


図6 3次元H I (グレー), H<sub>2</sub> (青) ガス分布の断面図 [15]. 横軸は銀河中心からの距離R, 縦軸は銀河面からの距離z. コントアはH I, H<sub>2</sub>ガスともに0.025, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40 cm<sup>-3</sup>ごとに描かれている.

銀河系中心距離30 kpcまでの、H Iガスの総質量は $7.2 \times 10^9 M_{\odot}$ に達する。H<sub>2</sub>ガスは、ほとんどが銀河系中心距離12 kpc内に収まっており、総質量は $8.5 \times 10^8 M_{\odot}$ と見積もられる。ゆえに、銀河系中心距離30 kpcまでの中性水素原子・分子ガスの総質量は $8.0 \times 10^9 M_{\odot}$ と見積もられる。そのうち、9割はH Iガスであることがわかる。

また図5下にガス円盤の厚み(半値全幅 $2 z_{1/2}$ )の動径分布を示す。H Iガス円盤の厚みは、銀河系中心で約100 pc, 銀河系中心距離30 kpcで2 kpcにまで単調に増加する。一方、H<sub>2</sub>ガス円盤

は銀河系中心で約50 pc, 銀河系中心距離12 kpcで約200 pcにまで増加することがわかる。

### 4.3 断面図

図6にガス円盤の断面図を示す。H<sub>2</sub>ガス円盤の厚みはH Iガスよりも薄いですが、H<sub>2</sub>ガスのピークはH Iガスのピークと大体一致することがわかる。多くの銀河に見られるように、天の川銀河のH Iガス円盤は最外縁部で大きく歪んでおり(warped disk), 特に $\theta=80^{\circ}$ – $260^{\circ}$ 付近で顕著であることがわかる。また、よく見ると、その内側でも円盤は僅かにz方向に揺らいでいることがわかる。

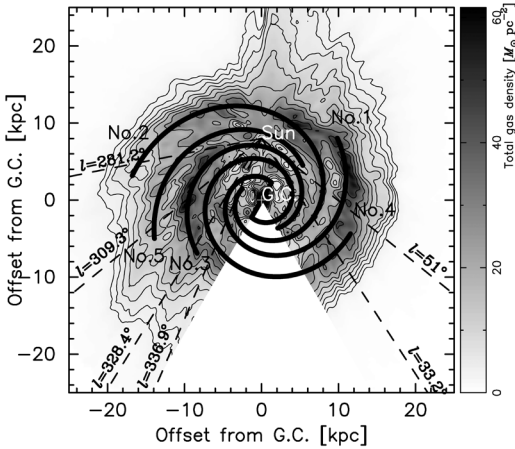


図7 渦状腕構造の模式図[15]. 破線は、各渦状腕の接線方向を示す。

表1 渦状腕のパラメータ。

番号	ピッチ角(°)	$R_b$ (kpc)	始点角 $\theta_b$ (°)	終点角(°)
No. 1	15	2.6	-210	130
No. 2	15	2.9	-120	260
No. 3	11	4.2	30	310
No. 4	11	2.6	-30	430
No. 5	15	7.0	130	290

#### 4.4 渦状腕構造

図4の全ガス分布図に、渦状腕構造を重ねたものを、図7に示す。No. 1は「じょうぎ座-はくちょう座腕」(Norma-Cygnus arm), No. 2は「ペルセウス座腕」(Perseus arm), No. 3は「いて座-りゅうこつ座腕」(Sagittarius-Carina arm), No. 4は、「たて座-みなみじゅうじ座腕」(Scutum-Crux arm), No. 5は「オリオン座腕」(Orion arm)に対応する。これらは $11^\circ-15^\circ$ のピッチ角 $p$ の対数螺旋

$$R(\theta) = R_b e^{(\theta - \theta_b) \tan p} \quad (6)$$

で近似できることがわかる。これらのパラメータを、表1にまとめた。

No. 1の渦状腕は、銀経 $l=328.5$ のじょうぎ座の方向で接するため、もともとじょうぎ座腕と呼ばれていた。第1象限銀経 $l=90$ のはくちょう座の方向に伸びる渦状腕は、もともとH Iデータの

解析によって銀河系外縁部の渦状腕として発見され、外縁部腕 (Outer arm) とも呼ばれている。銀河系中心方向は運動学的距離に基づく解析ができないため、これまで第1象限で見つかった渦状腕と第4象限で見つかった渦状腕の対応関係は判定が困難であった。渦状腕のピッチ角が $11^\circ-15^\circ$ であることを考えると、同一の渦状腕であると結論した。本論文ではH Iガス分布とH<sub>2</sub>ガス分布を合わせた全ガス分布図を示すことによって、これらの腕が同一の「じょうぎ座-はくちょう座腕」(Norma-Cygnus arm)として明瞭になぞることができることを示した。

No. 2は、銀経 $l=145^\circ$ のペルセウス座の方向に見られるため、ペルセウス座腕 (Perseus arm) と呼ばれる。文献[28]では、ペルセウス座腕は銀河系中心の棒状構造と接続すると述べられる一方で、文献[29]では棒状構造ではなく、 $l=336.9$ 付近から繋がっていると述べられており、研究者によって見解が異なっていた。我々の作成した分布図は後者の描像を支持する結果となった。

No. 3は、第1象限でいて座の方向から銀経 $l=51^\circ$ のや座・わし座の方向で接し、第4象限の $l=281^\circ$ のりゅうこつ座の方向で接するため、いて座-りゅうこつ座腕と呼ばれる。第4象限のりゅうこつ座の方向には、明瞭な渦状腕が見られるが、第1象限のいて座腕の方向の渦状腕は目立たない。Spitzer/GLIMPSEサーベイに基づいた調査によると[28]、いて座腕の方向には星が集中する様子が見られないと述べられており、本研究の結果はこれと一致する。

No. 4は、銀経 $l=33^\circ$ のたて座の方向で接し、銀経 $l=309^\circ$ のみなみじゅうじ座で接するので、「たて座-みなみじゅうじ座腕」(Scutum-Crux arm)と呼ばれる。みなみじゅうじ座腕はケンタウルス座腕と置き換えて呼ばれることもある[28]。

No. 5は、銀経 $l=195^\circ$ のオリオン座の方向に見られることから、オリオン座腕と呼ばれる。我々の太陽系も位置することからLocal armと呼ばれ

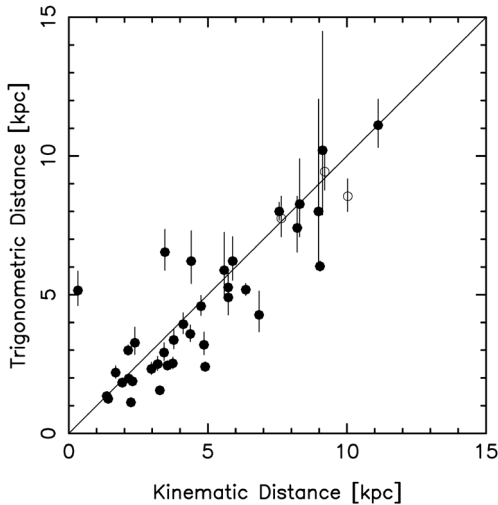


図8 運動学的距離とVLBI観測による距離 [31] の比較 [15].

ることもある。これまで、オリオン座腕の描像は論文によって異なっており、いて座-りゅうこつ座腕とペルセウス座腕を結ぶ橋渡しのような構造であるとする見方 [28] と、いて座-りゅうこつ座腕とペルセウス座腕の間にあり、同じピッチ角の渦状腕であるとする見方 [30] がある。我々の作成した分布図は後者の描像を支持する結果となった。

## 5. 誤差評価

最後に、本研究で得られた  $H_1 \cdot H_2$  分布の誤差について簡単に述べたい。本研究は、運動学的距離に基づいているため、非円運動成分による影響を考慮する必要がある。図8は、運動学的距離とVLBI観測によるメーザー天体の距離測定結果 [31] を比較したものであり、ばらつきは見られるものの、おおよそ比例していることがわかる。両者の差の、二乗平均平方根は2.3 kpcであり、これは数値シミュレーションに基づく見積もり [32] ともよく一致する。太陽系近傍では、誤差の影響は大きいですが、天の川銀河スケールの大局的構造には大きく影響しないと言える。そのほかに銀河系定数  $R_0$  による影響も考えられるが、こ

れは主に天の川銀河のサイズに影響するが構造の特徴には影響しない。また、太陽系軌道内は、運動学的距離が近遠不定性をもつためにガス分布のモデルを仮定してフィットしているが、実際の分布がモデルで再現できていない場合もあり、これにより典型的に約2-3割の違いが生じている可能性はある。本研究では、 $H_1$  21 cm線は光学的に薄いことを仮定したが、これは $H_1$ ガス質量の見積もりに影響すると考えられる。近年の研究 [33] を考えると、真の $H_1$ 質量は本研究の見積もりよりも3割ほど大きい可能性はあるが、天の川銀河の構造自体には影響しないと考えられる。

## 謝辞

このたびは、本論文を2019年度の欧文研究報告論文賞に選んでいただきまして、まずは推薦くださった皆様、そしてお認めいただいた審査員の皆様に御礼申し上げます。また、今年度は本記事のように天文月報に解説記事を寄稿するという貴重な機会をいただき、誠にありがとうございます。本記事のもととなった論文は、筆者が大学院生時代から取り組んできた研究の一貫の成果であり、このような重要なテーマを提示し、御指導いただいた東京大学天文学教育研究センターの祖父江義明先生に心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Muller, C. A., & Westerhout, G., 1957, BAN, 13, 151
- [2] Oort, J. H., et al., 1958, MNRAS, 118, 379
- [3] Kerr, F. J., 1969, ARA&A, 7, 39
- [4] Weaver, W. B., 1970, AJ, 75, 938
- [5] Dame, T. M., et al., 1987, ApJ, 322, 706
- [6] Bronfman, L., et al., 1988, ApJ, 324, 248
- [7] Sanders, D. B., et al., 1986, ApJS, 60, 1
- [8] Clemens, D. P., et al., 1988, ApJ, 327, 139
- [9] Georgelin, Y. M., & Georgelin, Y. P., 1976, A&A, 49, 57
- [10] Taylor, J. H., & Cordes, J. M., 1993, ApJ, 411, 674
- [11] Drimmel, R., & Spergel, D. N., 2001, ApJ, 556, 181
- [12] Vallée, J. P., 2005, AJ, 130, 569
- [13] Nakanishi, H., & Sofue, Y., 2003, PASJ, 55, 191
- [14] Nakanishi, H., & Sofue, Y., 2006, PASJ, 58, 847
- [15] Nakanishi, H., & Sofue, Y., 2016, PASJ, 68, 5



- [16] Kalberla, P. M. W., et al., 2005, A&A, 440, 775
- [17] Hartmann, D., & Burton, W. B., 1997, Atlas of Galactic Neutral Hydrogen, (Cambridge University Press, Cambridge)
- [18] Bajaja, E., et al., 2005, A&A, 440, 767
- [19] Bronfman, L., et al., 1989, ApJS, 71, 481
- [20] Grabelsky, D. A., et al., 1987, ApJ, 315, 122
- [21] May, J., et al., 1993, A&AS, 99, 105
- [22] Bitran, M., et al., 1997, A&AS, 125, 99
- [23] Dame, T. M., et al., 2001, ApJ, 547, 792
- [24] Clemens, D. P., 1985, ApJ, 295, 422
- [25] Dehnen, W., & Binney, J., 1998, MNRAS, 294, 429
- [26] Spitzer, L. J., 1942, ApJ, 95, 329
- [27] Kalberla, P. M. W., & Kerp, J., 2009, ARA&A, 47, 27
- [28] Churchwell, E., et al., 2009, PASP, 121, 213
- [29] Vallée, J. P., 2014, ApJS, 215, 1
- [30] Bobilev, V. V., & Bajkova, A. T., 2014, Astron. Lett., 40, 783
- [31] Reid, M. J., et al., 2014, ApJ, 783, 130
- [32] Baba, J., et al., 2009, ApJ, 706, 471
- [33] Fukui, Y., et al., 2018, ApJ, 860, 33

### Three-Dimensional Structure of the Milky Way Galaxy Mapped with H I and CO Line Data

**Hiroyuki NAKANISHI**

*Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima, Kagoshima 890-0065, Japan*

Abstract: We derived three-dimensional maps of H I, H<sub>2</sub>, and total gas distributions in the Milky Way Galaxy, using the H I and CO survey data and rotation curve. As the H I and H<sub>2</sub> components are dominant in the outside and inside of the solar orbit, respectively, the total gas including H I and H<sub>2</sub> components are advantageous in studying the whole Milky Way Galaxy. Therefore, our study shows that the Norma-Cygnus, the Perseus, the Sagittarius-Carina, the Scutum-Crux, and the Orion arms can be clearly traced with logarithmic spiral arms.