

天の川銀河における中性水素原子・分子ガスの 3次元分布

中西裕之

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山 462-2〉

e-mail: hnakanis@nro.nao.ac.jp

私たちは最新の HI・CO サーベイデータと回転曲線を用いて、天の川銀河全体の3次元的な HI・H₂・全ガスマップを作成しました。その結果、渦巻き腕・Lopsided disk・Warped disk・厚みの変化などといったガスディスクの特徴を明らかにすることができました。また HI・H₂・全ガスの密度を比較することにより、HI ガス密度はある値より増加せず飽和 HI 密度が存在するといった星間ガスの興味深い傾向がわかってきました。本稿では3次元ガスマップ作成までの過程およびその結果わかってきたことを紹介します。

1. 天の川銀河の姿

夏の夜空を流れる天の川は私たちの住む銀河の内側から見た姿です。では私たちの住む天の川銀河はどのような形をしているのでしょうか？ 残念ながら天の川銀河の外側まで行ってその姿をカメラなどで映し出すことは不可能です。私たちの天の川銀河の姿を探ることは、ちょうどロケットを飛ばさずに地球儀を作ることに似ています。そこで筆者らは中性水素 (HI) ガス、一酸化炭素 (CO) ガスの電波サーベイデータを用いて天の川銀河の姿を描き出すことを試みました。

電波サーベイデータは天の川銀河の地図を作るのに最も適したデータです。というのは、第一に電波は吸収の影響を受けずに天の川銀河全体の姿を捕らえることができるからです。第二にガス成分、特に HI ガスは最も広く存在 (多くの場合、星ディスクのサイズよりも大きい) するということも、天の川銀河全体の姿を探るうえで重要です。第三に HI や CO の輝線を観測することによりガスの視線速度がわかり、この情報からガスの距離

が計算できるということも、天の川銀河の地図を作成するのに好都合と言えます。

天の川銀河の地図作りはそれ自体も重要ですが、ガスディスクの性質を明らかにするという科学的な面においてもたいへん重要です。CO ガスは水素分子 H₂ ガスの分布を反映していると考えられますので、HI と CO ガスのサーベイデータを用いることで、HI・H₂ という天の川銀河の主要な中性水素ガスの分布を明らかにすることができます。これにより全中性ガスディスクの構造はどのようなになっているか、HI・H₂ の分布の違いはどうかなどといったことが明らかにできます。

これまでもすでに HI や CO サーベイデータを用いて天の川銀河の構造を調べた研究は多々あります。HI のマップとしては Oort et al.¹⁾ による天の川銀河の HI マップが、まず挙げられます。彼らによって天の川銀河における HI ガスの大局的な分布や腕構造などがわかってきました。また CO サーベイデータを用いた H₂ ガスのマップとしては Clemens らのマップ²⁾ が有名です。彼らによって第 1 象限の H₂ ガスの分布が明らかになり

ました。ただし、天の川銀河“全体”の“3次元”マップを構築した例はありません。そこで筆者らは天の川銀河全体におけるガス密度の3次元キューブ作成を試みることにしました。特にH₂の第4象限(銀経 >270°)における分布については2次元マップでさえもまだ明らかになっていませんので、第4象限におけるH₂ガスのマップは初の試みということになります。

本稿では、天の川銀河におけるガスの3次元地図を作成するまでの過程、および3次元データを得た結果わかってきた興味深いガスディスクの性質について簡単に紹介したいと思います。

2. 天の川銀河ガスディスクの3次元地図の作り方

筆者らが用いたHIサーベイデータはHartmannとBurton³⁾によるLeiden/Dwingeloo HIサーベイ、Kerrら⁴⁾による南天のHIサーベイ、BurtonとLiszt⁵⁾による銀河中心領域サーベイという三つのサーベイデータを用いました。これらのサーベイデータの空間グリッド間隔は約0.25度-0.5度、速度分解能は1.03-5.5 km/sです。またCOサーベイのデータとしてはDameら⁶⁾が行った1.2 m鏡によるサーベイデータを用いました。空間グリッド間隔は0.125度または0.25度、速度分解能は1.3 km/sです。

ガスの視線速度の情報から距離を見積もる際に、銀河の回転曲線が必要となります。筆者らは太陽軌道の内側($R < R_0$, R は銀河中心距離, 0 は太陽での値を示す)の領域における回転曲線としてClemens⁷⁾のデータ、外側($R > R_0$)の領域についてはDehnen & Binney⁸⁾の回転曲線を用いました。筆者らの研究では外側の回転曲線として最新のデータを用いたので、距離の決定がより正確になりました。

まず、これらのサーベイデータで得られたスペクトルからガスの量を見積もります。スペクトルが輝度温度で $T_b(v)K$ として得られていたとする

と(v は速度), $v-v+\Delta v$ の速度範囲にあるガスの量は $N[\text{cm}^{-2}] = C \int_v^{v+\Delta v} T_b(v)dv$ と計算できます(C は比例定数)。比例定数 C の値としてはHIの場合、 $1.82 \times 10^{18} [\text{cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{km}^{-1} \text{s}]$, を用いました。COの輝度温度をH₂密度に変換する場合 $C = 1.8 \times 10^{20} [\text{cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{km}^{-1} \text{s}]$, を用いることにしました。このようにして、ある速度範囲のガスを見積もることができます。

次にガスの距離を決定します。銀河円盤は一般に円運動をしており、天の川銀河のガスの運動も基本的には円運動でよく近似できます。そこで天の川銀河が純円運動をしていて、その回転速度が半径 R の関数 $V(R)$ で表されると考えましょう。こうすると銀経 l , 銀緯 b の方向にあって、銀河中心距離 R にあるガスの視線速度は $V_r = (R_0 V(R) / (R - V_0)) \sin l \cos b$ となります。つまり V_r がわかると R が見積もられ、天の川銀河におけるガスの位置と量が求まるわけです。このようにして天の川銀河におけるガスの3次元的分布が明らかになります。

ただし、一つ厄介な問題があります。それは太陽軌道の内側の領域($R < R_0$)では、一つ速度成分に対して距離の解が二つ存在してしまいます。この問題を近遠問題(near-far problem)と呼んだりしますが、これを解く必要があります。そのために、まず筆者らは銀河面に垂直な方向のガス分布モデルを考え、近い点と遠い点では銀河ガスディスクの厚みの見かけの広がり異なることを利用することにしました。ガスの垂直方向分布は、ガスが等温の場合、銀河面からの距離 z とし、 $n_{\text{gp}}, z_{\text{gp}}, h$ を定数とすればSpitzer⁹⁾によって、 $n_{\text{gp}} \text{sech}^2((z - z_{\text{gp}})/h)$ なる関数で表されることが知られています。実際に距離の不定性のない点(tangential point, $R = R_0 \sin l$ を満す点)で調べてみますと、ガスの分布はこの関数でよく近似できることがわかります。そこで近い点、遠い点それぞれでの $n_{\text{gp}}, z_{\text{gp}}$ を未知のパラメーターとして実際の観測に合うようにフィッティングすれば、

近い点・遠い点でのガス量をそれぞれ見積もることが出来ます。このようにして近遠問題を解決し、天の川銀河全体の3次元ガスマップを作成しました。

3. 3次元マップから探る天の川銀河の姿

こうして得られた天の川銀河の3次元ガスマップを図1-5に示します。図1は銀河系を真上から見たときのHIガスの分布になります。まずこの図からHIガスは銀河半径約20kpc程度まで広がっているのがわかります。星ディスクの広がりには13-14kpc程度であると言われているので、HIガスディスクは星ディスクよりも大きく広がっているということがわかります。またHIガスの薄い成分を注意深く見てみると、HIガスの広がりには軸対称ではなく、第4象限の方向に伸びた形(lopsided)であることもわかります。後に詳しく述べますが、これらの図からいくつかの腕構造が確認できます。

また図2はH₂ガスの分布を真上から見た絵になります。第4象限については今回が初めてのマップ化です。第一象限の分布はClemensら²⁾のマップと良く一致しています。彼らは第1象限に5kpcリングというリング状の構造があることを発見しましたが、第4象限までその構造が存在しているかどうかはまだ明らかではありませんでした。今回のマップ化により、第4象限には半径約5kpcのリング構造は存在しないことがわかりました。

次にHIガスとH₂ガスの分布を重ねてみましょう。図3ではHIガスをグレースケール、H₂ガスを青色コントアで表示しています。HIガスは星ディスクの外側という広範囲にまで広がっているのに対し、H₂ガスは銀河中心部に集中して存在していることがわかります。図4にガスディスクを銀河面と垂直方向に切断した分布図を示します。図3同様、グレースケールがHIガス、青色

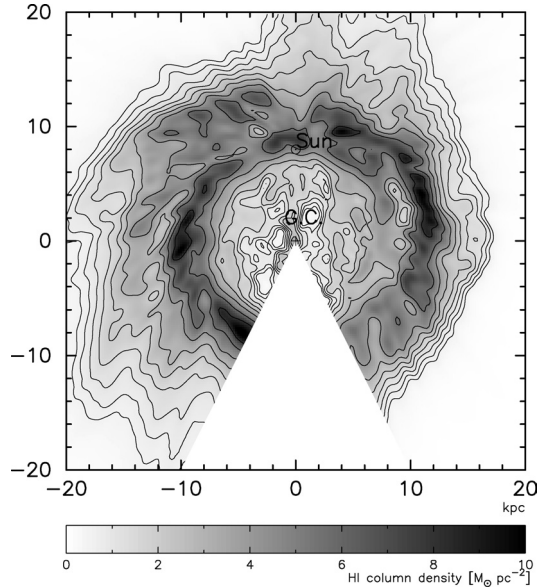


図1 真上から見たHIガス分布. コントアは0.5, 0.7, 1.0, 1.4, 2.0, 2.8, 4.0, 6.4, 8.0, 9.6 M_⊙ pc⁻²を表している。

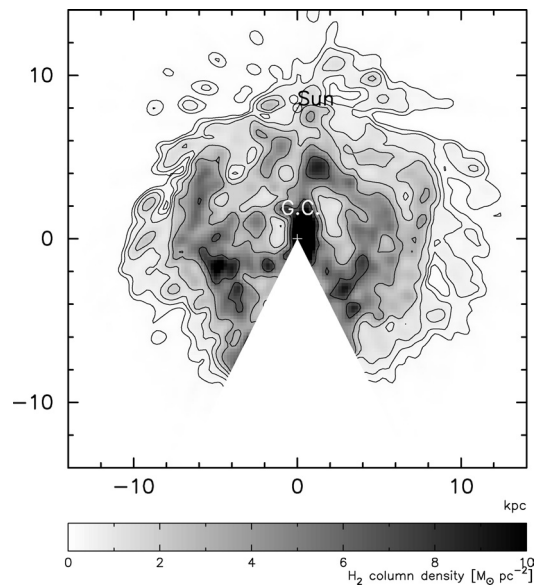


図2 真上から見たH₂ガス分布. コントアは0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 M_⊙ pc⁻²を表している。

コントアがH₂ガスの分布を表しています。H₂ガスはHIガスに囲まれて存在しており、あたかも

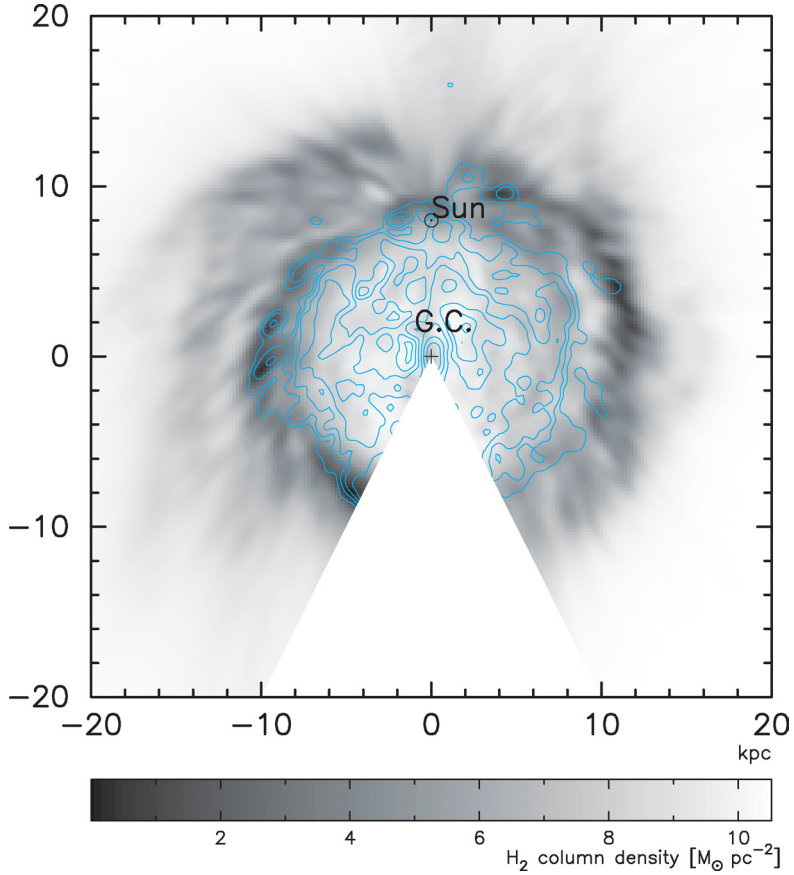


図3 HI, H₂ ガス分布を重ね、真上から見た時の分布. グレースケールがHIガス, 青色コントアがH₂ガスの分布を表している. コントアは0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 $M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ を表している.

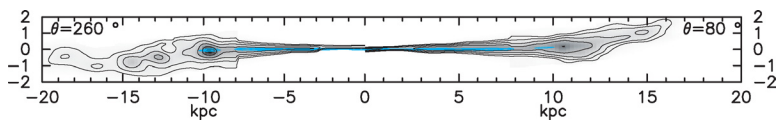


図4 HI, H₂ ガス分布を重ねた, 銀河面に垂直な方向に切断した断面図. グレースケールと黒色コントアがHIガス, 青色がH₂ガスの分布を表している. 黒色コントアは0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32 H cm^{-3} を表し, 青色コントアは0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 cm^{-3} を表している.

アンパンのような形をしています (H₂ ガスがアン, HI ガスがパン). また HI ガスは外側の領域 (半径約 12 kpc 以上) で上下方向に歪んでいます (Warped disk). HI ガスディスクは銀河中心ほど薄く, 外側ほど厚くなる傾向もすぐに気づきます. さらに同一半径での HI ディスクの厚みについて調べてみると, ディスク面でのガス密度が高

いときほど HI ディスクの厚みが薄く, 逆にガス密度が低いときにはディスクの厚みが厚くなるという傾向があることに気づきました. 大雑把に言うとう, ガスディスクは渦巻き腕で薄く, 腕と腕の間で厚いということになります.

今回 HI ガスと H₂ ガスの分布が明らかになりましたので, 初めて全ガス量も明らかにするこ

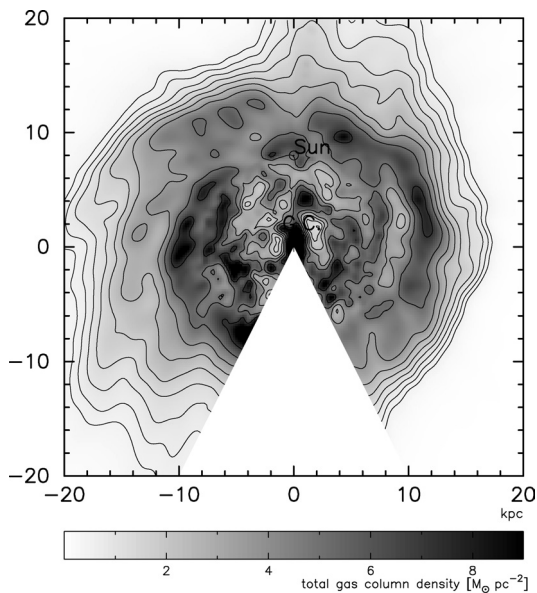


図5 真上から見た全ガス分布。 コントアは 0.5, 0.7, 1.0, 1.4, 2.8, 4.0, 6.4, 8.0, 9.6 $M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ を表している。

とができます。 図5に全ガスマップを示します。 これまでHIガスでは主に外側の領域、H₂ガスでは内側の領域での腕構造を見るのに都合が良かったわけですが、この全ガスマップの登場で

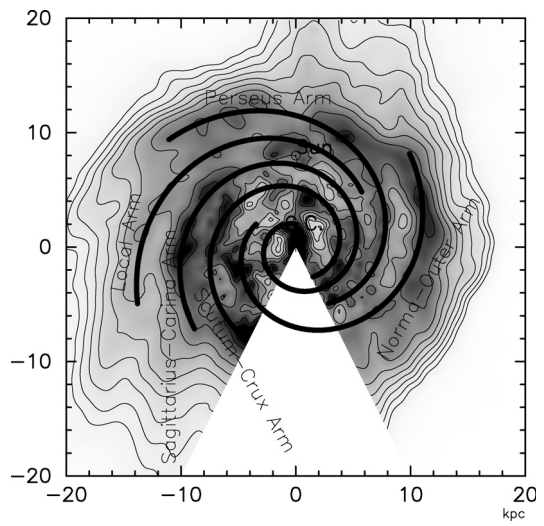


図6 図5の上に描いた渦巻き腕。

内側から外側まで全体の構造を見るのに都合が良くなりました。 先行する研究 (e.g., Geogelin & Geogelin¹⁰) から天の川銀河の腕構造のピッチアングルは12度前後であることが知られていますので、そのようなピッチアングルの腕構造を考えたところ、全ガスマップでは5本の渦巻き腕でトレースできました。 これらの腕構造はすでに知ら

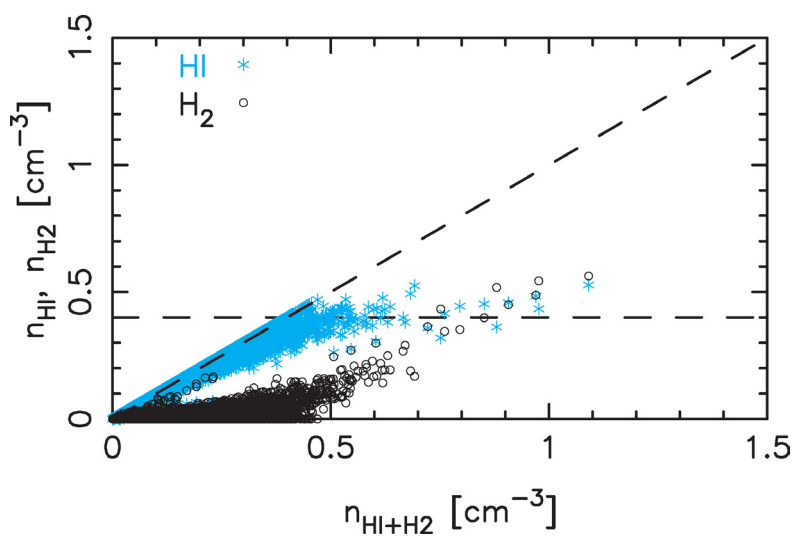


図7 全ガスの体積密度に対するHIまたはH₂ガスの体積密度。 破線は全ガスがHIあるいはH₂ガス相にあることを示している。

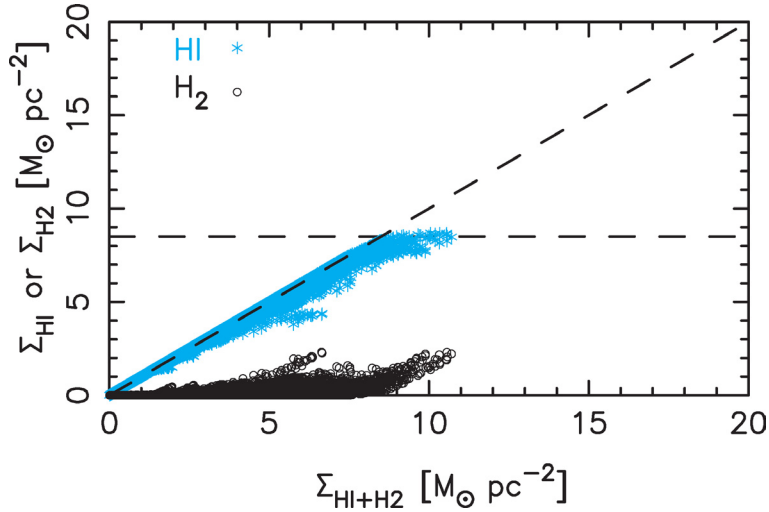


図8 全ガスの柱密度に対する HI または H₂ ガスの柱密度。

れているものであり、図6に示すような Perseus arm, local (Orion) arm, Sagittarius-Carina arm, Scutum-Crux arm, Norma-Outer arm といった腕構造です。これまで Norma arm と Outer arm は同一の腕構造と見なすことはなかったのですが、ピッチアングルが 12° 前後であるということ を考えると、これらの腕は同一の渦巻き腕ではないかと考えられます。

さらに HI ガス, H₂ ガス, および全ガスという3者について比較も行ってみたいと思います。天の川銀河の外縁部 ($R > R_0$) の領域で HI, H₂ および全ガスの体積密度を調べ、図7のように横軸に全ガスの密度、縦軸に HI, H₂ の密度をとり、HI (星印) と H₂ (丸印) の密度をプロットしました。破線は HI または H₂ ガスの密度が全ガス密度と等しいことを表しています。まず全ガス密度が 0.4 cm^{-3} よりも小さい場合には HI ガスのプロットが破線上にありますので、すべてのガスは HI 相にあるということがわかります。このとき H₂ ガスはほぼ0です。しかし、全ガス密度が 0.4 cm^{-3} を超えると HI ガスの密度はそれ以上増えずに 0.4 cm^{-3} で一定になります。その代わりに今度は H₂ が線形に増えていくという傾向があります。つまり HI ガスはある密度以上には増え

ないという飽和密度が存在するということが明らかになりました。また天の川銀河を真上から (face-on) 見た場合を考え、図8のように柱密度について同様のプロットを作成してみると、やはり飽和 HI 密度という同じ傾向があるということもわかりました。これは銀河面に垂直な方向のガス分布モデル (sech 関数) と体積密度で見られる HI 飽和密度を考えることで説明できます。現在、私たちが野辺山 45 m 望遠鏡+BEARS で進めてきたおとめ座銀河団銀河 CO 観測と VLA で観測した HI データの比較でも、多くの銀河で同様の傾向が見られています。このことから飽和 HI 密度は一般に銀河に共通な性質であると言えるようです。飽和 HI 密度はちょうど飽和水蒸気圧と似たような振舞をしていますが、なぜ星間ガスでこのような傾向が見られるのかという機構についてはまだ明確にはわかっていません。

本研究で得られた3次元データキューブは現在、国立天文台4次元デジタル宇宙(4D2U)プロジェクトでも使っていただき、広く一般の方々にも天の川銀河系の姿を理解していただくためにも役立たせたいと考えております。図9(表紙掲載図)は最新のデータキューブで作った HI, H₂ ガスディスクの姿です。われわれの住む天の川銀河

