

論文内容の要旨

論文題目 Physical Conditions and Structure of
Molecular Gas in the Galactic Center
(銀河系中心における分子ガスの物理状態と構造)

氏名 澤田 剛士

銀河の中心領域は、高温・高密度・強い重力場など、銀河円盤部と異なる環境下にある。このような領域における星形成について調べるには、その直接の母体となる分子ガスの性質を明らかにすることが不可欠である。また、銀河の棒状構造などによるガスの集積が星形成活動の要因となっていることも考えられる。このような観点から、銀河系中心領域における分子ガスの大局的構造・運動および物理状態の分布に関する研究を行なった。本研究は以下の3つの部分から構成される。

●CO $J=2-1$ 広域サーベイ

分子ガスの大局的な分布と性質を調べるため、一酸化炭素COの $J=2-1$ 輝線によるサーベイ観測を行なった。観測には、東京大学とオンサラ天文台・ヨーロッパ南天天文台(ESO)・チリ大学との国際共同研究でチリ共和国のESOランヤ観測所に設置された口径60cm電波望遠鏡を用いた。 ^{12}CO $J=2-1$ 輝線の観測範囲は $-6^\circ \leq l \leq 6^\circ, -2^\circ \leq b \leq 2^\circ$ で(l, b は銀経, 銀緯)、銀河系中心での1800pc \times 600pcに相当する。得られた積分強度図を図1に示す。 ^{13}CO $J=2-1$ 輝線については、銀河面上($b=0^\circ$)の $-1.5^\circ \leq l \leq 2^\circ$ および $2.75^\circ \leq l \leq 3.25^\circ$ のデータを得た。望遠鏡のビームサイズは9'、観測グリッド間隔は0.125°で、コロンビア大学のグループにより得られた ^{12}CO $J=1-0$ 輝線のデータとそれぞれ等しい。

輝線励起のモデル計算によりガスの物理状態と輝線の強度を関連づけられる。しかし、一般に分子雲は微細なクランプ状構造を持つことが知られており、有限の分解能を持つ観測では、ビーム立体角に占める分子ガスの割合(ビームフィリングファクター)で輝線強度が低めに見積もられる。そのため、フィリングファクターの影響を比較的受けにくい輝線強度比 $[R_{2-1/1-0}(^{12}\text{CO}) \equiv ^{12}\text{CO } J=2-1 / ^{12}\text{CO } J=1-0$ および $R_{13/12}(J=2-1) \equiv ^{13}\text{CO } J=2-1 / ^{12}\text{CO } J=2-1]$ を用いてガスの物理状態について議論する。3輝線のデータのビームサイズおよび観測グリッドが等しいことが正確な強度比の取得を可能にしている。

$-6^\circ \leq l \leq 6^\circ, -1^\circ \leq b \leq 1^\circ$ の範囲における $R_{2-1/1-0}(^{12}\text{CO})$ の値は 0.96 ± 0.01 であった。これは銀河円盤における典

型値0.6と比較して非常に高く、ガスの物理状態の顕著な違いを示唆する。一方、0.96という値は近傍渦巻銀河の中心部における平均値 0.89 ± 0.06 に近い。また、観測領域における $R_{13/12}(J=2-1)$ の値は 0.10 ± 0.01 であった。この2つの輝線強度比を1ゾーンLVG (大速度勾配)モデルから計算される値と比較し、水素分子密度 $n(\text{H}_2) = 10^{3.0-3.5} \text{ cm}^{-3}$ を得た(LVG計算で仮定したガスの運動温度 T_k に依存する)。また、こうして導かれる $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線の光学的厚さ τ は1程度より小さく、円盤部の巨大分子雲($\tau \sim 10$)と著しく異なる。これは高温と大きな速度幅に起因すると考えられる。

さらに、この手法を用いて、銀経-速度($l-v$)図上でのガスの物理状態の分布を求めた。得られる種々の物理量のうち、ガスの熱的圧力 $p/k = n(\text{H}_2) T_k$ は仮定した T_k の値にほとんど依存しないことがわかった。こうして得られた圧力の $l-v$ 分布(図2a)から、中心から半径約100pcの範囲に周囲より圧力が高い領域(高圧領域; 以下HPR)が存在することが明らかになった。この領域は、 ^{13}CO 輝線でトレースされる2本の腕状構造、および水素の再結合線でトレースされるH II領域と $l-v$ 図上で似た分布を示す(図2b,c)。

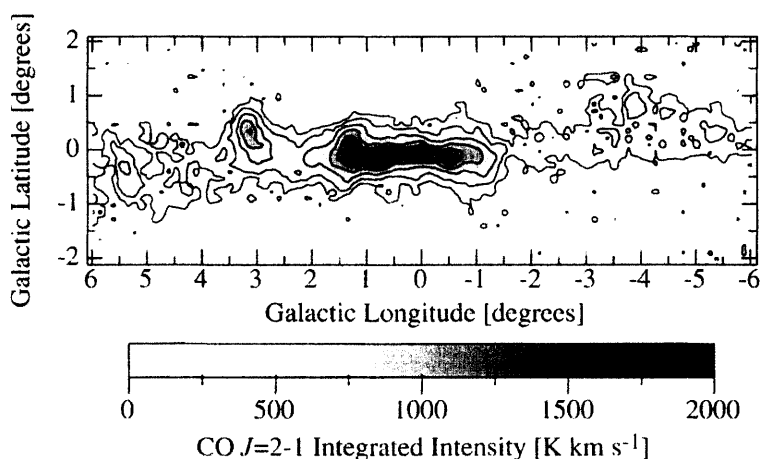


図1:
 $^{12}\text{CO } J=2-1$ 輝線の積分強度図。
 コントアは100, 200, 400, 700,
 1000, 1400 K km s^{-1} 。

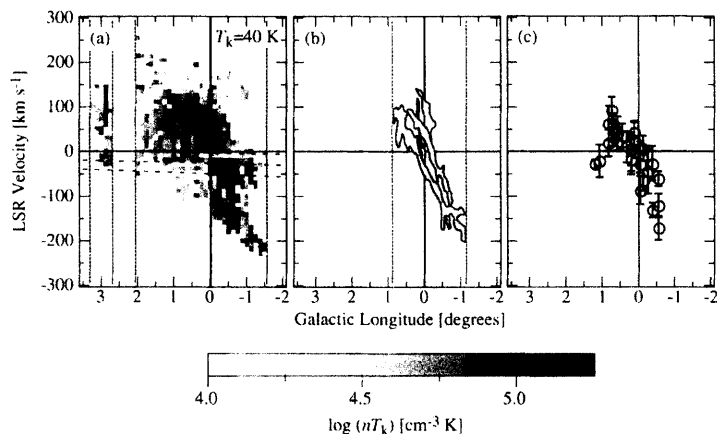


図2:
 (a) LVG解析から導かれた圧力の
 $l-v$ 分布, (b) Sofue (1995)による
 ^{13}CO 輝線の腕状構造, (c) Pauls
 & Mezger (1975) によるH109 α 再
 結合線の分布。

●CO輝線とOH吸収線との比較による分子ガスのフェイスオン分布の導出

水酸基OHの18cm線は星間雲において広く吸収で検出される。吸収の深さは、背景の18cm連続波強度にOHの光学的厚さ τ_{OH} のファクターを掛けたものとなる。したがって、18cm連続波源である領域の手前と背後に同じ τ_{OH} を持つ雲が存在している場合、手前にある雲からはより深い吸収線が検出される。この原理を用いて分子雲の位置を定量的に求める手法を開発し、銀河系中心の分子雲に対して適用した。この手法は、ガスの運動(視線速度)の情報とは全く独立に雲の位置を求めることができるという点で過去の研究と一線を画す。

雲の位置を求めるにあたり、(1) 連続波放射の空間分布 (2) 各々の雲における τ_{OH} (3) OHの励起温度

$T_{ex}(OH)$ を知る必要がある。(1)については、連続波放射が軸対称なガウシアン3つの重ねあわせで表されると仮定した。この仮定は、18cm連続波の銀経分布を非常によく再現する。(2)については τ_{OH} がCO $J=1-0$ 輝線の輝度温度 T_{CO} に比例する(Z を定数として $\tau_{OH}=ZT_{CO}$)とした。これは、(2a) 単位速度幅あたりの水素分子柱密度 $N(H_2)/dv$ が T_{CO} に比例し (2b) τ_{OH} が $N(H_2)/dv$ に比例するという、妥当と思われる2つの仮定による。(3)の $T_{ex}(OH)$ 、および(2)に導入された Z が未知数として残る。これらは(I)導かれる分子ガスの分布が中心に対してわれわれから見ても前後方向に著しく非対称とならない (II) 銀緯方向に広がった構造が異なる銀緯においてほぼ同じ位置に置かれる (III) 吸収の深さをモデルによって再現できないことがないようにするという条件を満たすよう、試行により求められた。

こうして得られた x - y 平面上の位置にCO輝線強度(水素分子の量に相当)を投影し、分子ガスの x - y 分布を得た。得られた分布のうち中心から500pcの範囲を図3aに示す。大部分のガスは500pc \times 200pc程度の領域に集中している。この領域(中心集中; 以下CC)の長軸は視線に対して約70°傾いている。また、視線速度の分布(図3b)は著しい非軸対称回転を示す。すなわち、奥側が正の視線速度を持って(われわれから遠ざかって)おり、手前側は負の速度を持っている。この傾向は棒状ポテンシャル中のガスの運動のシミュレーションや系外の棒渦巻銀河の観測にも見られており、銀河系が棒構造を持つという説を支持する。CCの端からほぼ視線に沿って伸びる構造が見られ、これは棒渦巻銀河に見られるダストレーンに似かよう。しかしこの視線方向の伸びは、データのノイズや局所的な連続波源の存在などによる見かけ上のものである可能性もある。 t - v 図上でCCを取り囲むように見える「膨張分子リング(以下EMR)」の幾何学的構造について考察する。EMRのうち負の視線速度を持つ成分は銀河系中心の手前に位置することが知られていたが、銀経が正の側でOHの吸収がより深いことがわかった。したがって、EMRの少なくとも手前側は軸対称でなく、銀経が正の側が手前にあるように傾いていることが示唆される。この傾向はEMRを棒状ポテンシャル中の軌道として説明する説と矛盾しない。

ここで得られた雲の位置を用いて、他のデータの t - v 分布も x - y 平面上に投影することができる。「CO $J=2-1$ 広域サーベイ」で述べた手法を用いて、 ^{12}CO $J=1-0$, ^{12}CO $J=2-1$, ^{13}CO $J=2-1$ 輝線の間の強度比からガスの圧力の分布を得た(図3c)。中心から100pc程度に見られる圧力の高い領域(HPR)では、集積したガスが星形成を行っている。

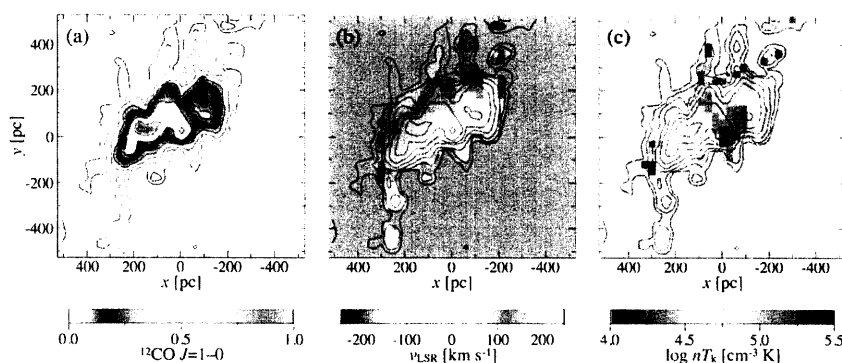


図3:

(a) 最大値を1に規格化したCO輝度, (b) 視線速度, (c) LVG解析から導かれるガスの圧力 それぞれのフェイスオン分布。銀河北極方向から見たもので、太陽系の位置は $(x,y)=(0,-8500pc)$ 。

●数値シミュレーションを用いたガスの運動の解釈

銀河系中心付近における分子・原子線の*l-v*図には数多くの特徴的な構造が見られる。それらには軸対称な銀河回転では説明できないもの(3kpc腕, 135km/s腕, EMR, Bania's Clump 1など)や非常に大きな速度分散を持つ雲(Bania's Clump 2など)が含まれる。解析的あるいは数値的にこれらの運動を解明しようとした研究の多くは大きな(kpcオーダーの)スケールに着目しており、個別の構造に関する研究は不足している。

そこで、観測された分子輝線のデータと比較して銀河系中心付近のガスの運動を探るために、棒状ポテンシャル中におけるガスの運動の数値シミュレーションを行った。計算されたガスの中心から約3kpc以内における分布は大きく(1)楕円形、あるいは2本の渦状腕(2)棒状のガス集中に分けられる。楕円はほぼ定常的に見られるが、その内側に現れる構造(クランプ、流れ、リング等)の多くは一時的なものである。

分子・原子の輝線あるいは吸収線で観測されている「3kpc腕」と呼ばれる構造はシミュレーションにおける(1)の楕円でよく再現される。これは過去の研究と矛盾しない。(2)の棒状構造中に現れるクランプ、流れ、リング等によって、Bania's ClumpsやEMRなど多くの構造を説明することが可能である。

以上の研究から、銀河系中心における分子ガスの新しい描像を提示する(図4)。中心から約3kpc以内にあるガスはクランプ、流れ、リング等の形を取っており、棒状ポテンシャル中を運動しながら徐々に中心へと落ちている。中心から半径100pc程度の領域では集積したガスから星が形成されている。

本研究により、*l-v*図上に見られる種々の構造がフェイスオンでおおよそどの位置にあたるかが明らかになった。このことは各々の構造中の微細構造や物理状態・そこでの星形成に関する研究に対する大きな助けとなる。また、OH吸収線とCO輝線との比較から分子ガスのフェイスオン分布を導く手法は、系外のエッジオン銀河(M82等)におけるガスの分布・運動の解明にもつながる。

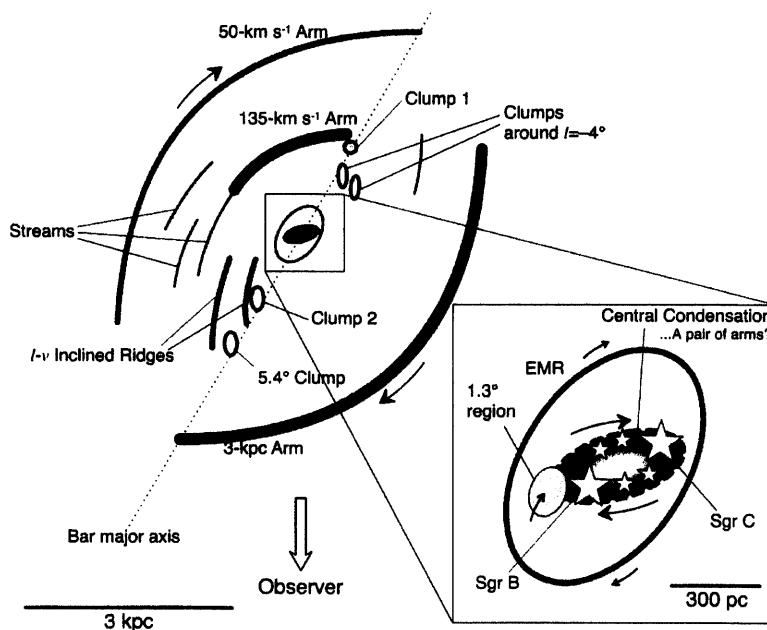


図4:
本研究から導かれる、銀河系中心における分子ガスの模式図。