

銀河系中心領域の星間分子雲

—その微細構造と物理状態—

岡 朋 治

〈東京大学理学部天文学教室 〒113 東京都文京区弥生2-11-16〉

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

我々の銀河系の中心数百パーセクの領域は、星の強い集中と大量の高温・高圧な星間物質の存在のみならず、様々な活動性の痕跡を示す銀河系の中で最も特異な領域である。そして、その領域に集中した大量の分子雲は、銀河円盤上のそれに比べて著しく異なった性質を有する。近年急速に開発が進んだミリ波の焦点面アレイ（マルチビーム）受信機を使用した高分解能・広域分子輝線サーベイにより、にわかに銀河系中心領域の分子雲の真の姿が解明されつつある。

1. 銀河系中心領域

電波天文学の誕生は、1932年のJanskyによる銀河系中心方向からの強い電波の発見¹⁾に端を発する。彼の観測した長波長域では、銀河系中心は全天で最も明るい太陽よりも明るい天体であった。それに引き続き、銀河系中心は可視域（星間ダストの吸収により観測できない）を除くあらゆる波長で、しかも数百パーセクの広い領域にわたって明るく輝いていることが明らかになってきた。さらにCO輝線による広域サーベイ観測から、この領域には大量（数千万～数億太陽質量）の星間分子雲が集中していることも明らかにされた。それらは銀河系円盤上の分子雲に比べて極めて広い速度幅（30～50 km s⁻¹）を有し、その運動も回転運動とは程遠い極めて乱れた運動をしている。言い換えるならばこの中心数百パーセクの領域は、重力・磁場・宇宙線・星間物質の全てが銀河系円盤上のそれに比べて著しく高いエネルギー密度を持つ、銀河系の中で最も特異な領域である。

この領域では、近い過去（数百万～数千万年前）の爆発的な星形成活動の痕跡ではないかと思われるものが数多く発見されている。銀河面から垂直方向に伸びる百パーセクスケールの「電波ローブ」構造²⁾、数百パーセクにわたって広がった高温（ T_k

≒10⁸K）プラズマの存在³⁾、複数の数十パーセクスケールの分子ガスシェル構造の存在⁴⁾、等である。それに加え、力学的中心の位置には、約百万太陽質量の巨大ブラックホールの存在が示唆されている⁵⁾。つまり、我々の銀河系の中心は、最も近くにある銀河中心核という観測的有利性のみならず、スターバースト直後の（post-starburst）銀河核、そして活動銀河核の縮小版という観点からも極めて興味ある天体なのである。

2. 銀河系中心の星間分子雲

星間分子雲は星形成活動の場であり、将来の星形成活動を支配する重要な成分である。しかもその形態は超新星爆発等の外乱を敏感に反映することから、星形成の履歴を追う上で最も有効な情報源であるといえよう。本稿では、主にこの星間分子雲という相からの情報を基に議論を進める。先にも述べた通り、中心数百パーセクに集中した星間分子雲は銀河系円盤上のそれとは著しく性質が異なっている。高密度領域をトレースするCS輝線⁶⁾、NH₃輝線⁷⁾、⁸⁾による観測からは、高密度（ $n(\text{H}_2)=10^{4.5}\text{cm}^{-3}$ ）分子ガスが広く分布していることが、そしてNH₃輝線の強度比からは、それらが銀河円盤上の分子雲に比べて極めて高温（ $T_k=30-80\text{K}$ ）にあることが示唆されている⁹⁾。一般に

分子雲は、様々な分子の回転遷移輝線および [CII], [OI] 等の微細構造線によって効果的に冷却されるため、宇宙線による加熱との平衡では温度は 10 K 程度にしかならない¹⁰⁾。すなわち、星間空間において銀河系中心で観測されるような高温状態を安定に実現するには、何らかの効果的な加熱メカニズムが必要なのである。

さらに特筆すべき性質として、銀河系中心領域の分子雲では大量の高密度分子ガスを含むにも関わらず、現在の星形成率が驚くほど低い事^{11),12)}が挙げられる。同領域に存在する分子ガス質量で規格化した星形成率（星形成能率）の値は $5 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ 、これは太陽系近傍の高々 3 倍程度、そして銀河系内域 ($R=4-6 \text{ kpc}$) の約半分の値でしかない。通常この解釈には、銀河系中心では現在何らかの理由で星形成活動が抑制されているという可能性を考え、その抑制メカニズムを検討することが行われてきた。しかし上に示された値には、あまり深刻には認識されていない不定性が含まれている。それは、標準的に採用されている銀河系中心領域の分子ガス質量（一億太陽質量）¹²⁾が著しく過大評価であるという可能性である。

これまで、この銀河系中心の分子雲複合体に対して種々の輝線による観測が様々な分解能で行われてきた。しかし観測装置が大型化し、分解能が向上するにつれて、観測領域が特定の範囲に限られていった事は否めない。それは、これまでの電波望遠鏡（単一鏡の場合）が一点しか観測できないものであり、有限な時間で観測可能な領域が限られていたことによる。そしてこの難点は、近年開発が急速に進んでいるミリ波の焦点面アレイ（マルチビーム）受信機の登場によって克服されつつある。

3. 分子雲の微細構造

画像の良し悪しは、その空間的ダイナミックレンジの広さに強く依存する。ここでいう空間的ダイナミックレンジとは、観測範囲の広さとその実

質分解能との比のことを指す。筆者らは現在、既存するミリ波単一鏡で最高の分解能を誇る野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡に搭載された、 2×2 マルチビーム受信機を使用して、銀河系中心分子ガス複合体の全域を実質分解能 $34''$ (1.4 パーセクに相当) でマッピング観測するプロジェクトを二年計画で進行中である。一年次が終了した現時点で既に約 25,000 点の $^{12}\text{CO} (J=1-0)$ 輝線スペクトル、約 10,000 点の $^{13}\text{CO} (J=1-0)$ 輝線スペクトルを取得した。この観測の実質分解能はこれまでこの領域に対して行われた最高のもの (HPBW $\cong 1.7''$)¹³⁾ に比べて 3 倍以上向上し、しかも $^{12}\text{CO} (J=1-0)$ 輝線データは銀河系中心分子雲複合体のほぼ全域をカバーしている。この比類無き空間的ダイナミックレンジを誇るデータセットが、銀河系中心領域の如何なる新しい「景色」を見せてくれるか、以下にその例を簡単に紹介していこう。

図 1 に、我々の持つデータセットのほんの一部ある速度チャンネルでの ^{12}CO 強度マップの一部分を示した。これらのマップで卓越する構造は、驚くべき数の分子ガスシェル/アーク状構造およびフィラメント構造である（これが主観に大きく左右されるものであることは百も承知だが、ここでは我々のそれが正しいとして話を進める）。これらのシェル/アークの半径は典型的に数パーセクのものである。このような形態をつくるメカニズムとして通常考えられるものは超新星爆発であり、それが多数存在するということは銀河系中心は現在スターバースト直後の“暴風”フェイズ¹⁴⁾にあることを如実に物語っている。そしてそれから、この領域が数千万年前に爆発的星形成の時期を経験したことが推測されるのである¹⁵⁾。

もう一つの重要な発見は、高速度側 ($|V_{\text{LSR}}| \geq 150 \text{ km s}^{-1}$) で顕著に現れる直径 50 パーセクの膨張分子リングであろう¹⁶⁾。図 2 に高速度成分だけの¹³CO マップに Einstein 衛星による軟 X 線マップを重ねたものを示した。ここで極めて興味深いこ

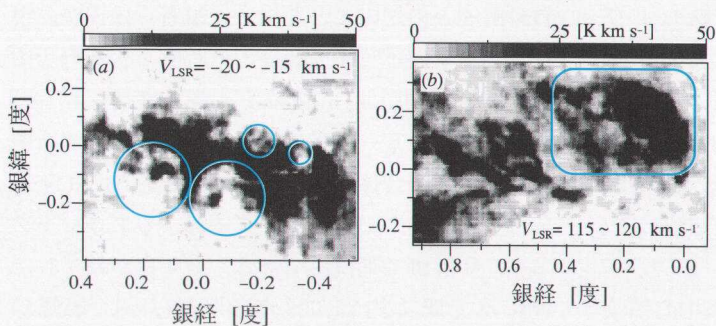


図1 銀河系中心領域の分子雲の微細構造。「左図の丸はシェルを示す。右図の囲った部分には多数のシェルが見える。」
 a) 視線速度 = $-20 \sim -15 \text{ km s}^{-1}$, b) 視線速度 = $115 \sim 120 \text{ km s}^{-1}$.

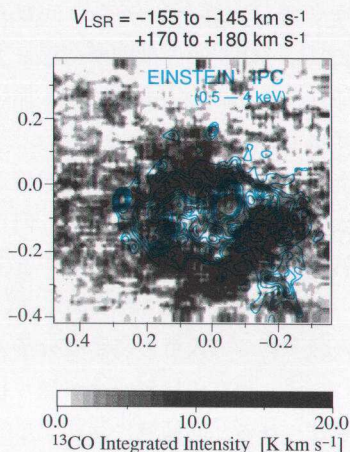


図2 50pc 膨張分子リング

とに、軟 X 線放射でトレースされる高温プラズマと ^{13}CO 輝線でトレースされる分子ガスとの間には顕著な空間的逆相関が見られる。このことは、膨張する高温プラズマが周囲の分子ガスを加速して 50 pc 膨張分子リングを形成したという解釈を自然に導く。この高温プラズマの起源はおそらく超新星爆発および大質量星からの星風であり、それとの空間的な逆相関が見出されたことによって 50 pc 膨張リングは過去の爆発的星形成活動のより確固たる証拠となるわけである。膨張速度と見かけの大きさから見積もった 50 pc 膨張分子リングの年齢は 1.5×10^5 年、運動エネルギーは超新星爆発約 1000 個分に相当し、それから推測される爆発的星形成の時期はやはり数千万年前になる。ちなみにここで導かれた超新星爆発 1000 個という値は、そのタイムスケールに些かの食い違いはあるものの“ぎんが”衛星による硬 X 線観測からの評価³⁾と全く一致する。

4. 分子雲の物理状態

我々の高分解能データセットが導くものは、分子雲の単なる形態学に留まらない。 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の二輝線の観測結果と回転準位の励起計算の結果を比較することにより、対象の物理状態を推測することが出来るのである。図3は、特定の速度チャンネルの $^{12}\text{CO}(J=1-0) - ^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 強度相関プロットに簡単なモデル計算の結果を重ねたものである。御覧の通り、観測された $^{12}\text{CO}(J=1-0) - ^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 強度相関はモデル計算の柱密度の系列（密度・温度一定の曲線）に見事に沿う。そして、それから推測される銀河系中心のCO輝線放射領域の物理状態は、 $n(\text{H}_2) \cong 10^2 \text{ [cm}^{-3}]$ 、 $T_k = 30 - 80 \text{ [K]}$ となる。この温度は NH_3 輝線比の結果と全く矛盾しないが、密度はこれまでCS輝線等の観測から言われていた値に比べて著しく低い。このことは何を意味するか？ それは、銀河中心の分子雲は、低密度から高密度にわたって極めて広がった密度スペクトルを有するということである。

無論、この手法にはフィリング・ファクター $f = 1$ の仮定の有効性というやっかいな問題を含んでいる。紙面の都合もあるのでここでは詳しくは述べないが、 ^{12}CO 、 ^{13}CO 両輝線において広がった分子ガス成分からの放射が支配的である場合には上の手法が有効である事、またその仮定が崩れた場合にも相対値に関する議論は依然として正しい答を与える事が示される。ここでは前者が成立しているとして話を進める。この手法を用いる事によって、ある特定の物理状態を有する分子雲を空間的に分離することが可能である。ここに一つの興

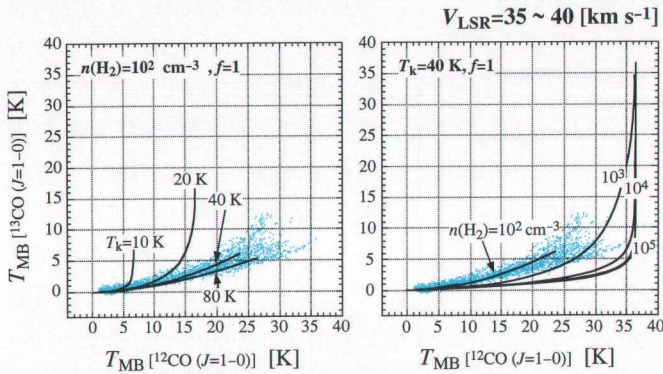


図3 ^{12}CO – ^{13}CO 強度相関プロット+モデル曲線

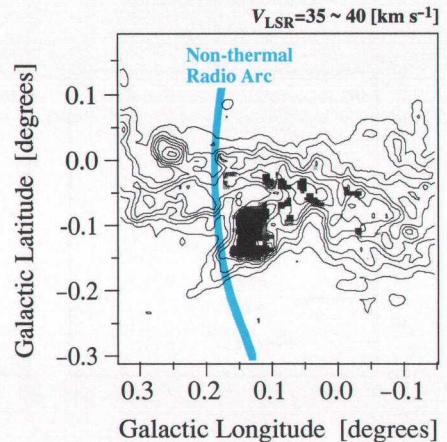


図4 高温 ($T_k \geq 80\text{K}$) 分子ガス領域

味深い結果を紹介しよう。図4は、図3の強度相関プロットで $T_k \geq 80\text{K}$ の部分だけを選び出し、その部分をグレイスケールで示したものである。ある特定の分子雲で温度が高くなっていることが明瞭に見て取れよう。実はこの分子雲は、銀河系中心の特異電波構造 non-thermal Radio Arc のフィラメントと相互作用している事が示唆されていた分子雲である¹⁷⁾。

Non-thermal Radio Arc の形成メカニズムは未だに明らかでないが、電波放射メカニズムは垂直方向の磁場に巻き付いた高エネルギー電子によるシンクロトロン放射であることは間違いない。つまり、磁場との相互作用によって分子雲が加熱されている現場が観測によって明確に押さえられたのである。この発見は、銀河中心で起きている異常な現象の一つという範疇を超えて、星間物理学一般の立場からも非常に興味深い発見である。

5. 分子雲の力学的平衡状態

銀河中心で個々の分子雲が極めて広い速度幅を有することは前にも述べた。ここでは、その物理的意味について定量的に論じてみよう。分子雲の平衡状態を診断する方法として、一般に良く行われるのは、CO 輝線強度から標準的な変換係数¹⁸⁾を使用して求めた質量 (M_{CO}) と、分子雲に対して

ビリアル平衡を仮定して導かれる質量 (M_{VT}) を比較する方法である。この方法では、どちらかの質量が真の値に近いことを仮定して、他方の真の値からのズレを議論することが行われる。図5はこの手法でよく使われる $M_{\text{CO}} - M_{\text{VT}}$ プロットである。使用した銀河中心のデータは東大-NRO 60 cm および CfA 1.2 m 望遠鏡による低分解能 ($\theta \approx 15\text{pc}$) データで、45 m の高分解能データセットについては、本稿を執筆中の現在、分子雲の同定作業が進行中である。図5の示す通り、銀河系中心の分子雲 (直径 30 パーセク以上のもの) では M_{VT} が M_{CO} に比べて一桁半ほど大きい。一つだけ銀河円盤上の分子雲と同じ傾向に乗るものがあるが、実はこの分子雲、銀河中心方向に見える銀河円盤上の分子雲であることがわかっている。この異常性の解釈は上にも述べたとおり二つの方向があるが、この場合 M_{VT} の値が真の値に近いとは考えられない。何故なら γ 線観測を始めとする銀河系中心の種々の分子ガス質量の評価は、全て CO 輝線から評価される値よりも低いのである¹²⁾。

それでは、銀河中心と銀河円盤上とは何が異なっているのか？ 基本に立ち返り、ビリアル関係式から考え直してみよう。銀河系中心では、強い磁場や X 線で観測される高温プラズマ等の存在により、それらから分子雲の受ける外圧の影響

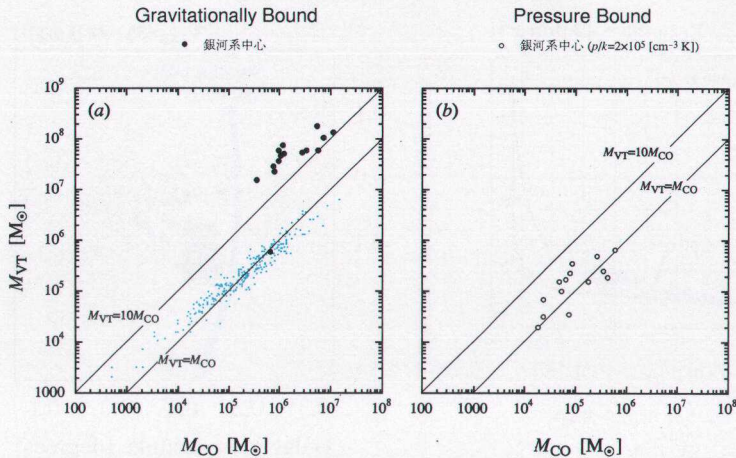


図5 CO質量-ピリアル質量関係。a) 重力平衡を仮定した場合、b) 圧力平衡を仮定した場合

から示唆される高温プラズマの圧力 $p=3-6 \times 10^6 \text{ [cm}^{-3}\text{K]}^3$ よりも約一桁低い。しかし、エミッション・メジャー $EM \equiv n_e^2 L$ から評価された高温プラズマの電子密度は多分に高密度側にバイアスされており、それから導かれる高温プラズマの圧力と分子雲の受ける有効的な外圧との間の一桁程度の食い違いはさほど深刻ではない。従って結論として、銀河系中心の巨大分子雲は少なくとも重力平衡ではあり得ず、むしろ圧力平衡の状態にあるということが示されたので

が無視できない。外圧の項を残したピリアル関係式は以下のように書ける。

$$3M_{VT}\sigma_v^2 - \frac{GM_{VT}^2}{R_e} = 4\pi R_e^3 p$$

ここで p は外圧、 σ_v は分子雲の速度幅、 R_e は分子雲の実効半径である。これは質量 M_{VT} についての二次方程式で、条件 $p < p_0 \equiv 9\sigma_v^4 / (16pR_e^2 G)$ が満たされるならば二つの実数解を持つ。それらの物理的意味は明確に区別でき、一方は重力平衡 (gravitationally bound)、他方は圧力平衡 (pressure bound) の解である。通常、ピリアル質量として採用されるのは前者の重力平衡解であるが、ここで圧力平衡解を採用して議論を進めてみよう。外圧が p_0 に比べてかなり小さい場合、圧力平衡解は通常のピリアル質量の表式に $\alpha \equiv p / (4p_0)$ を乗じた形で近似される。この α は、銀河円盤上の分子雲で見出された分子雲のサイズ速度幅関係¹⁰⁾が厳密に成り立つ場合に定数であるような量である。さらに CO 輝線強度と質量の関係も同様の修正を経て、通常の M_{CO} の表式に $\alpha^{0.5}$ を乗じた形になる。このように M_{VT} と M_{CO} とで α 依存性が違う為、外圧の値を適当に選んで $M_{VT} \cong M_{CO}$ の関係を復活させることができる。そのベスト・フィットの値は $p=2 \times 10^5 \text{ [cm}^{-3}\text{K]}$ 、これは X 線観測

ある。

この結果は同時に、これまで標準的に採用されてきた銀河系中心の分子ガス質量が、著しく過大評価であったということをも導く。上の議論に従って計算された銀河系中心領域の分子ガス総質量は二千万太陽質量、これまで採用されてきた値の約 1/5 に過ぎない。この値を正しい分子ガス総質量として採用することにより先に述べた星形成能率の異常性が解決され、銀河系中心領域の星形成能率の正しい値として銀河系内域 ($R=4-6 \text{ kpc}$) の約 2.5 倍という高い値が導かれることになる。

6. まとめと今後の展開

以上、銀河系中心領域の分子雲に関する最新の観測結果と、それから導かれる幾つかの結論を簡単に述べた。ここで紹介した幾つかの新しい構造の発見は、「景色」を見るのが如何に本質的であったかということを示した例である。その景色が意味するところは明らかに、「銀河系中心領域は現在“暴風”フェイズにある」という事であり、それはさかのぼれば銀河系中心領域は数千万年前に爆発的星形成活動の時期を経験したことを示唆するものである。

そのような領域で、分子雲はどのような物理状

態を有するか？ それは異常に高温、そして広い密度スペクトルを持つ、異常な物理状態である。ここで密度スペクトルという概念を持ち出したが、残念ながら現時点では、それを精度良く定量的に議論できる段階ではなく、将来の研究を待つところが大きい。強度相関プロットをモデル計算でフィットする手法に関しても、その適用限界等にまだまだ議論の余地が残るところがある。しかし一方で、その手法の内包する誤差の範囲内でも興味ある結論が導かれるのも事実である。今後、銀河系内の他の領域、特に近傍分子雲で同様の観測が行われ、この手法の有効性およびその適用限界が明らかにされてくるであろう。

分子雲の力学的平衡状態に関して言えば、銀河円盤上の分子雲についても圧力平衡の可能性を考慮に入れ、議論を基本から再構築する必要があるだろう。もし、分子雲という存在形態が須らく圧力平衡であるならば、その種々の性質—内部構造、星形成活動等—を決定する要因として外圧が主要な役割を果たすことは間違いない。そしてその次は、どのスケールから重力平衡解が現れてくるのかという疑問に行き当たる。この疑問に対しては、現在進行中の45 m データセットの分子雲同定の結果によって何らかの解が得られるものと期待している。

☆

☆

☆

☆

参 考 文 献

- 1) Jansky, K. 1932, Proc IRE, 20, 1920
- 2) Sofue, Y., Handa, T. 1984, Nature, 310, 568
- 3) Yamauchi, S., et al. 1990, ApJ, 365, 532
- 4) Tsuboi, M., et al. 1989, in IAU Symp. 136, ed. M. Morris (Dordrecht : Kluwer), p. 135
- 5) Genzel, R., Townes, C. H. 1987, ARA & A, 25, 377
- 6) Tsuboi, M., et al. 1995, PASJ submitted
- 7) Güsten, R., Walmsley, C. M., Pauls, T. 1981, A & A, 103, 197
- 8) Morris, M., et al. 1983, AJ, 88, 1228
- 9) Güsten, R., Downes, D. 1983, A & A, 117, 324
- 10) Goldsmith, P. F., Langer, W. D. 1978, ApJ, 222, 881
- 11) Mezger, P. G., Pauls, T. 1979, in IAU Symp. 84, ed. W. B. Burton (Dordrecht : Kluwer), p. 357
- 12) Güsten, R. 1989, in IAU Symp. 136, ed. M. Morris (Dordrecht : Kluwer), p. 89
- 13) Bally, J., et al. 1987, ApJS, 65, 13
- 14) Genzel, R., Poglitsch, A. 1995, ASP Conf. Ser. 73, eds. M. R. Haas, J. A. Davidson & E. F. Erickson, p. 447
- 15) Heckman, T. M., Lehnert, M. D., Armus, L. 1993, in The Environment and Evolution of Galaxies, eds. J. M. Shull and H. A. Thronson, Jr. (Kluwer Academic), p. 455
- 16) Hasegawa, T., et al. 1995, Nature submitted
- 17) Brown, R. L., Liszt, H. S. 1984, ARA & A, 22, 223
- 18) Young, J. S., Scoville, N. Z. 1991, ARA & A, 29, 581
- 19) Solomon, P. M., et al. 1987, ApJ, 319, 730

Galactic Center Molecular Clouds
—Micro-scale Structure and Physical Conditions—

T. OKA

Department of Astronomy, University of Tokyo

Abstract: We have made high resolution mapping observations of ^{12}CO ($J=1-0$) and ^{13}CO ($J=1-0$) from central a few hundred parsec of the Galaxy using NRO 45 m telescope (HPBW $\cong 16''$). The high resolution CO maps reveal many molecular arc and/or shell structures which could be resulted from interactions with supernovae. These results suggests that the Galactic center has experienced a burst of star formation at 5×10^7 years ago, and now is in "wind-dominated" phase. Based on our huge data sets, physical conditions and dynamical structure of the Galactic center molecular clouds are discussed.