

論文内容の要旨

論文題目 High-velocity Gas in the Central Molecular Zone of our Galaxy

銀河系中心領域における高速度分子ガス

氏名 永井 誠

銀河系の中心から数百パーセクに渡る領域は、星の強い集中と大量の星間物質によって特徴づけられる特異な領域である。銀河系中心分子層 (Central Molecular Zone; CMZ) と呼ばれるこの領域には、星間ガスが主に分子雲として存在し、それは銀河系円盤部に比べて高温・高密度・高速度分散等の性質を有する。分子ガスの空間・速度分布は、多くのシェルないしアーチ構造を持ち、また高温環境下でしか生成されない分子種が広範かつ豊富に存在する。こうした CMZ 内にある分子雲が呈する物理状態・化学組成の原因は未解明であった。

CMZ に特有な分子雲の構造のひとつに、高速度コンパクト雲 (High-velocity Compact Clouds; HVCCs) と呼ばれる、極めて広い速度幅を ($\sim 100 \text{ km s}^{-1}$) 持つ空間的にコンパクトな ($d \leq 5 \text{ pc}$) 分子雲群がある。HVCCs は野辺山宇宙電波観測所 (NRO) 45 m 電波望遠鏡を用いた一酸化炭素分子 (CO) の $J=1-0$ 回転遷移輝線 (115 GHz) の広域サーベイ観測によって多数発見され、数例についてのみ座標値が報告されていた。このうち 1 天体については、複数の分子種および回転遷移の観測が行われ、それが CMZ の中でも特に高温・高密度の物理状態を有する事が示された。また、別の 1 天体は明瞭な膨張シェル構造を内包し、その運動エネルギーが 10^{52} erg にも達することが示された。これらの結果は、HVCCs が何らかの局所的な爆発的天体現象に起因し、その衝撃波によって加熱・圧縮・加熱されたことを示唆している。

我々は、HVCCs が CMZ 分子雲の特異性を解明する手がかりとなる重要な天体であると考えた。HVCCs の性質を明らかにし、その起源に迫るためには、それらの完全なリストを作成する必要がある。NRO 45m 望遠鏡による CO $J=1-0$ サーベイのデータには、明らかに多数の HVCCs が見られるが、それらの正確な同定は行われていなかった。我々はまず分子輝線の空間・速度軸を持つ 3 次元データキューブに含まれている HVCCs を系統的に同定するスキームを開発した。これは、計算機アルゴリズムによる HVCC 候補天体の同定と、それらの見た目による選別の 2 つの過程から成る。CO $J=1-0$ データキューブにこの方法を適用し、84 天体を

同定した。これらの HVCCs の大きさ-速度幅関係は、銀河系円盤部の分子雲のみならず、CMZ で通常の分子雲のものからも大きく外れており、HVCCs がこれまで知られている分子雲の範疇に属さない、全く新しい種類の天体であることを明確に示している (図 1)。

また我々は、HVCCs の起源を探る為には CO $J=3-2$ 輝線 (346 GHz) の広域サーベイ観測が不可欠であると考えた。この輝線は $J=1-0$ 輝線より高励起の準位に相当し、衝撃波通過直後の分子ガスをよくトレースする。また、 $J=1-0$ 輝線強度との比較から、分子ガス物理状態の推定ができる。我々は Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) を使い、CO $J=3-2$ 輝線の広域サーベイ観測を行った。2 シーズンの観測によって、CMZ の主要な部分について、 $J=1-0$ 輝線サーベイと同じ $34''$ (1.4 pc) のグリッド間隔で、極めて良質なデータを取得した。これと、NRO 45 m 望遠鏡による CO, ^{13}CO $J=1-0$ 輝線のデータを併せて、輻射輸送方程式を近似した (Large Velocity Gradient 近似; LVG 近似) モデルによって分子ガスの密度 (n)・力学温度 (T_k)・単位速度あたりの柱密度を各データ点で求め、これらの物理量の空間・速度分布を描き出した。この際、複数の分子輝線強度から最小二乗法により物理状態を評価する頑強なアルゴリズムを開発した。その結果から、CMZ の分子ガスが典型的に $n \geq 10^{3.5} \text{ cm}^{-2}$ 、 $T_k \sim 30 \text{ K}$ の物理状態を有することが確認された。また、CO $J=3-2$ /CO $J=1-0$ 輝線強度比 ($R_{3-2/1-0}$) が分子ガスの励起状態を反映しており、 $R_{3-2/1-0} > 1.5$ のガスの大部分が高温状態 ($T_k > 60 \text{ K}$) であることを示した。

この CO $J=3-2$ データキューブに対して前述の同定スキームを適用し、68 天体を得た。これによって、同定された HVCCs は総計 122 天体となった。CO $J=3-2$, $J=1-0$ 両輝線で重複するものは 30 天体あった。これらの HVCCs の物理量 (大きさ、速度幅、質量、運動エネルギー) の分布と相関を調べた。物理量の分布・相関は CO $J=3-2$ で同定したものと CO $J=1-0$ で同定したものとで、概ね一致している。HVCCs の広い速度幅は主に膨張運動に由来すると考えられ、膨張の時間スケールは典型的に $\sim 10^5$ 年である。運動エネルギーは $10^{49} - 10^{52} \text{ erg}$ と膨大かつ広範に渡っている (図 2)。

HVCCs 内では、CMZ 全体に比べて $R_{3-2/1-0}$ 輝線強度比が高いものが多い傾向にある。CO $J=3-2$ サーベイの領域に含まれている HVCCs それぞれについて CO $J=3-2$ 強度で重みをつけた $R_{3-2/1-0}$ 輝線強度比の平均 ($\langle R_{3-2/1-0} \rangle$) を求めたところ、6 天体 ($\sim 5\%$) で 1.5 以上と非常に高く、ほぼ半数の天体で 1 以上と高かった。残りの大部分は CMZ での平均的な値 0.5-1 であったが、5 天体では 0.3-0.5 と低い値だった。 $\langle R_{3-2/1-0} \rangle$ の値は HVCCs の CMZ 内での位置に依存し、中心核の比較的近傍には $\langle R_{3-2/1-0} \rangle = 1-1.5$ のものが集中し、外縁部に $\langle R_{3-2/1-0} \rangle = 0.5-1$ のものが散らばっている (図 4)。各々の HVCC について CO $J=1-0$ vs. $J=3-2$ 輝線強度相関プロットを作成し、それに LVG モデル曲線をフィットする事によって物理状態を推定し、それぞれの HVCCs の密度-温度範囲を得た (図 5)。

以上の結果から、CMZ に特有な天体 HVCCs が、局所的な衝撃波によって加速されたガス雲である事が確認された。多くの HVCCs が高い $R_{3-2/1-0}$ 輝線強度比を示すのは、その HVCC が加熱・圧縮を受けて間もない事を示している。一方で、ほとんどの HVCCs には HII 領域が付随しておらず、Wolf-Rayet 星風による加速は考えにくい。つまり HVCCs のエネルギー源は超新星爆発と考えることが妥当である。この事は、CMZ 内には未同定の超新星残骸が多数埋

もれており、それらの度重なる衝撃波通過によって同領域の分子ガスの特異な物理状態・化学組成が実現されている事を示唆している。

同定された HVCCs の半数以上は、運動エネルギーが一個の超新星爆発で供給可能な量 ($\sim 10^{50}$ erg) を上回っている。これらの”energetic”な HVCCs には、多数の超新星爆発を起こすコンパクトな大質量星団が付随していると考えられる。例えば、年齢 10 Myr、総質量 $10^5 M_{\odot}$ の大質量星団であれば、 10^5 年の間に約 10^{52} erg の運動エネルギーを供給できる。この仮説によれば、HVCCs の形状・物理状態・広範な運動エネルギー分布も自然に説明する事ができる。最近の理論的研究により、銀河中心核近傍の爆発的星形成によって多数の大質量星団が形成され、その中で形成された中間質量ブラックホールがその母胎とともに中心核へ沈降・合体することによって、中心核巨大ブラックホールが形成もしくは成長する、というシナリオが提唱されている。一般に、大量の視線方向の星と、星間塵による吸収で隠された銀河系中心領域で、このような星団を直接検出することは難しく、これまでに僅か 3 例が確認されているに過ぎない。つまり我々の結果は、そのような大質量星団の存在を確認する新しい手段を呈示したという意味において、極めて重要なものである。

我々の銀河系では CMZ にのみ多数見られる HVCCs は、系外のスターバースト (爆発的星形成) 銀河におけるスーパーバブルおよびスーパーウィンドの縮小版として理解することができる。例えば、energetic HVCCs の一つ CO 1.27+0.01 が、銀河円盤上に吹き上がるスーパーウィンド様の形態を有する $L=1.3^{\circ}$ 分子雲複合体の中心部に位置するという事実も、両者が本質的に同じ過程によって生成された事を裏付けている。近い将来、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) を始めとする次世代の大型電波干渉計により、近傍系外銀河の中心領域において HVCCs に類似する構造が続々と検出されるだろう。本研究は、それによって劇的に進展するスターバースト研究の重要な礎となる事が期待される。

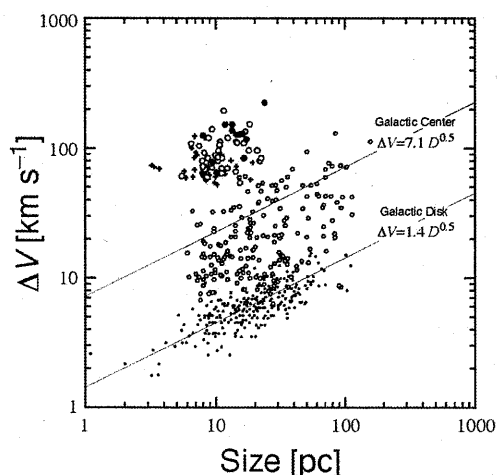


図 1 : 分子雲の大きさ-速度幅関係。赤のデータ点は高速度コンパクト雲、黒丸は銀河系円盤部、白丸は CMZ の分子雲である。それぞれの大きさ-速度幅関係を示している。

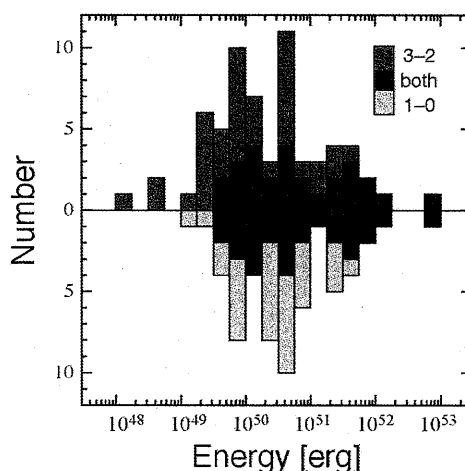


図 2 : 高速度コンパクト雲の運動エネルギーの分布。上部は CO $J=3-2$ で同定したものの、下部は CO $J=1-0$ で同定したものの輝線で同定したものは黒で示している。

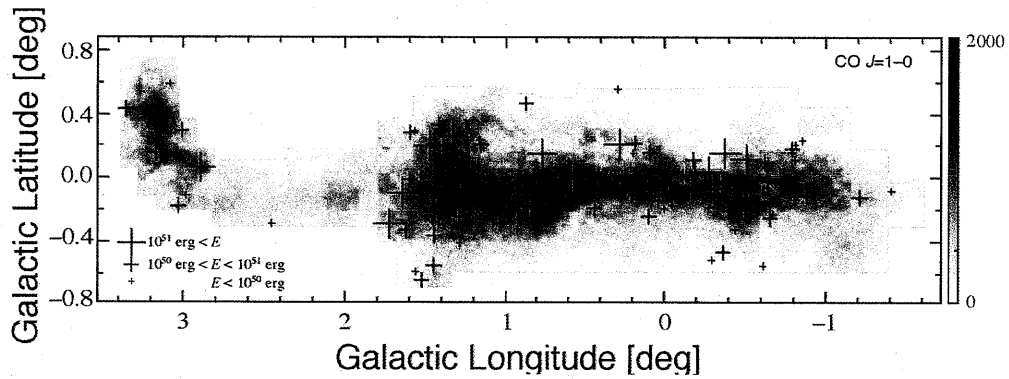


図 3 : 高速度コンパクト雲の空間分布。運動エネルギーの範囲を記号の大ききで示している。グレースケールは CO $J=1-0$ 輝線の積分強度図。

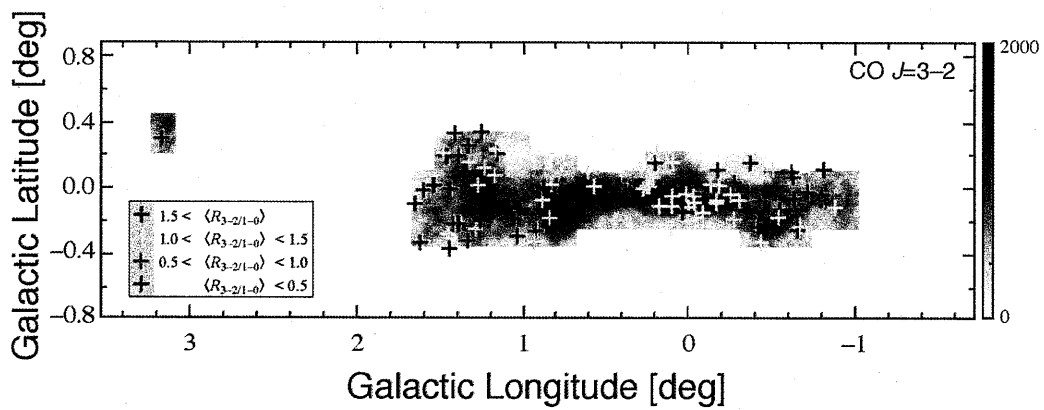


図 4 : 高速度コンパクト雲の空間分布。CO $J=3-2$ のサーベイ領域に含まれるものを CO $J=3-2$ / CO $J=1-0$ 輝線強度比の平均 $\langle R_{3-2/1-0} \rangle$ で色分けして表示している。グレースケールは CO $J=3-2$ 輝線の積分強度図。

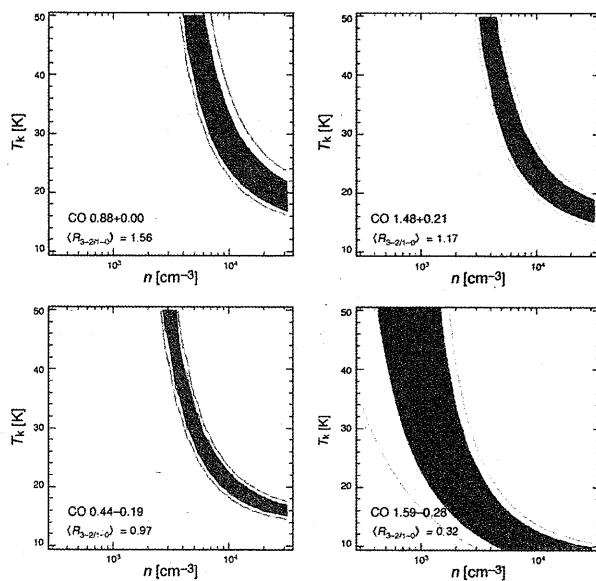


図 5 : 高速度コンパクト雲内の物理状態。CO $J=3-2$ / CO $J=1-0$ 輝線強度比の平均 $\langle R_{3-2/1-0} \rangle$ の値の範囲ごとに例を挙げている。2 輝線の LVG モデルから推定される密度・温度の範囲を、グレーで示している。