

巨大分子雲の大局的構造と物理状態

阪本成一

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: seiichi@sgr.nro.nao.ac.jp

銀河系内で星間ガス、特に分子ガスが密度を上昇させ、星形成に至るまでの過程を明らかにするために、一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線による近傍分子雲の広域観測を進めている。一酸化炭素 ($J=1-0$) 輝線強度との定量的な比較から初めて明らかになった分子雲の大局的構造と物理状態について紹介する。

縁の下の力持ち

我々のすむ銀河系は、暗黒物質を除けば質量比にして9割以上を占める星と1割に満たない星間物質によって構成されている。星の質量の一部が星間空間に還元され、それがまた星を形成するという銀河系内の物質循環が、現在ほぼ平衡状態にあるとすると、星間物質の全質量が星の全質量に比べて圧倒的に小さいことは、星間物質が恒星の寿命に比べて十分に短い時間のうちに進化して、再び星になることを示唆している。そして銀河を彩る華々しい星形成活動の陰には、縁の下の力持ち＝星間物質の存在があるのである。

図1に示したように、我々の銀河系に含まれる

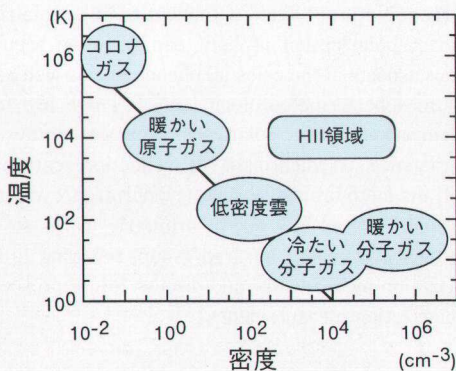


図1 星間ガスの温度と密度。斜めの線は圧力平衡の線を表す。

星間物質の多くは圧力平衡にあり、高温(約100万度)の希薄な電離ガスが大部分の空間を占め、大部分の質量は比較的暖かい(絶対温度数100度)原子ガスと冷たく(絶対温度10-30度)高密度の分子ガスの形で存在すると考えられている。星間ガスの密度が上昇すると、一部の領域ではガスの塊の質量がジーンズ (Jeans) 質量を上回り、自己重力によって準静的に収縮を始めるであろう。これらの高密度分子ガスは星形成の直接の母胎であり、これらがどのように生成し、さらに星へと転化するのかわかることは、宇宙の物質循環について理解するうえで大きな意味を持っている。

「真空計」を探せ!

星間空間にある原子ガスは主に水素原子により、また、分子ガスは主に水素分子により、それぞれ構成されている。水素原子ガスが超微細構造線である21 cm線により直接観測されるのに対して、水素分子は対称2原子分子であるために電気双極子モーメントを持たず、通常の星間分子雲内では輝線としては観測されない。このため水素分子に次いで星間空間に豊富に存在する一酸化炭素分子が水素分子に代わって分子ガスのトレーサーとしてよく用いられる。輝線の強度はごく大雑把には分子ガスの量を反映するので、一酸化炭素輝線の強度分布を分子ガスの量の分布として代表

させることができるのである。

ところが星間ガスの進化について考えるときに重要となるのは、ガスの量よりもむしろ質、特に密度の変化である。したがって我々はまず、分子ガスの密度を探るためのよいプローブ、すなわち「真空計」を探さなければならない。

中学校で学んだように、我々はろうそくやガスバーナーの炎の色を元に、これらの温度を知ることができる。同様に、多色測光で得た星の色から星の温度を知ることできる。分子ガスについても分子ガスの「色」、すなわち複数の分子輝線の強度比から、分子ガスの温度や密度などの物理状態を探ることが可能なはずである。星や地球上の物質の場合と違って分子ガスの「色」に分子の温度だけでなく密度まで関係するのは、星間ガスが非常に希薄であるために、分子同士の衝突による励起の頻度を反映するからである。

一酸化炭素分子は通常の星間分子雲の中では、回転の量子状態 J の異なるいくつかの輝線を強く放射する。分子ガスのトレーサーとしてよく用いられるのは、そのなかでも最もエネルギーの低い $J=1-0$ 輝線であるが、それ以外にも、 $J=2-1$ 、 $J=3-2$ といったエネルギーのより高い輝線も観測されている。これらの高励起輝線の強度（輝度温度）は通常の高密度分子雲中では $J=1-0$ 輝線よりも低くしか観測されない。エネルギー差の大きいこれらの遷移は短いタイムスケールで輝線を放出するため、これらの遷移を十分に励起するには頻繁な衝突、すなわち高い分子密度が必要だからである。一酸化炭素分子の水素分子による衝突励起と輝線の放射輸送のモデル計算の結果によれば、観測される $J=2-1/J=1-0$ 強度比が、温度よりも密度のよいトレーサーであることが分かる¹⁾。

木を見ずに森を見る

分子ガスの密度を調べるのに有用な一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線は、波長 1.3 mm (周波数 230 GHz)

に遷移を持つ。この波長帯で観測することのできる望遠鏡は世界的にみても数少なく、それらのほとんどが大口径であるため、一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線による観測は主に分子雲コアなどの狭い領域の詳細な観測に限られており、分子雲全体をカバーするような広域観測はほとんど進んでいなかった。そのため分子雲が大局的にどのような構造を持つのかについては未だに不明な点が数多く残されている。そこで我々東京大学理学部のグループは、一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線による広域観測を行って分子雲の大局的な構造と物理状態を探るために、国立天文台野辺山宇宙電波観測所と協同で小口径のサーベイ専用望遠鏡を野辺山に設置し、太陽系近傍にある分子雲の大規模なマッピング観測を進めてきた¹⁾。昨シーズンまでに、オリオン座 A、オリオン座 B、いっかくじゅう座 R2、いっかくじゅう座 OB2 (バラ星雲) などの有名な巨大分子雲と、おうし座暗黒雲の観測を完了している。

図 2 (表紙写真) 左に示したのは、太陽に最も近い大質量生成領域として名高いオリオン巨大分子雲における、一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線強度の空間分布である²⁾。参考のためにオリオン座の星々の位置を○で示した。この領域には2つの細長い巨大分子雲があり、一酸化炭素輝線強度は HII 領域である M 42 と NGC 2024 に対応する場所で極大になっていることが分かる。この強度分布は既にコロンビア大学のグループが得ていた一酸化炭素 ($J=1-0$) 輝線強度の空間分布³⁾とよく類似しており、分子ガスの量の分布を描き出しているものと解釈される。

これに対し、分子ガスの性質に着目するために $J=2-1/J=1-0$ 強度比の空間分布をプロットしたものが図 2 (表紙写真) 右である。 $J=2-1/J=1-0$ 強度比の高い (高密度の) ガスを暖色系で表示してある。巨大分子雲内の分子ガスの物理状態は一様ではなく、高密度ガスがフィラメント状に連なっていることが分かる。さらに、観測された

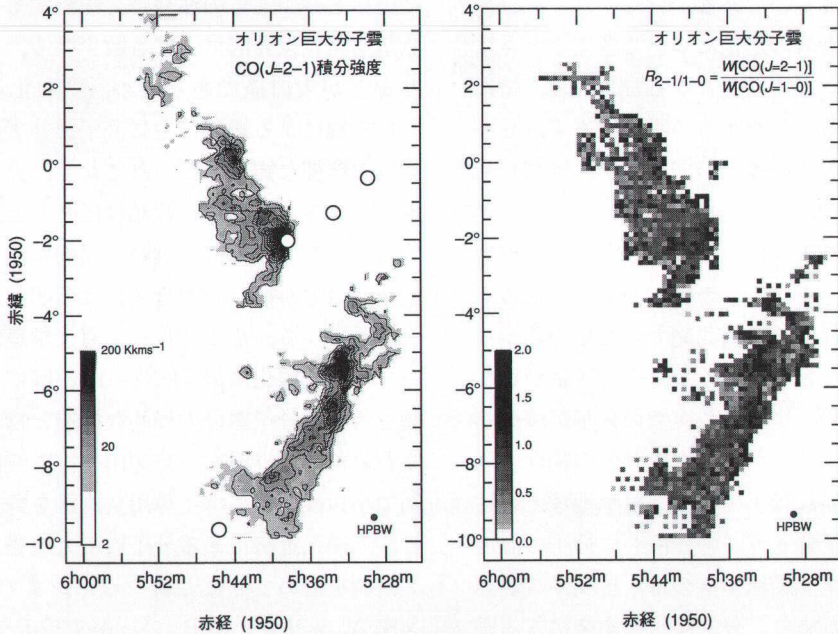


図2 オリオン分子雲におけるCO (J=2-1) 輝線の積分強度分布 (左) と、CO (J=2-1)/CO (J=1-0) 輝線強度比の分布 (右). ○はオリオン座の星々を示す (表紙写真も参照のこと).

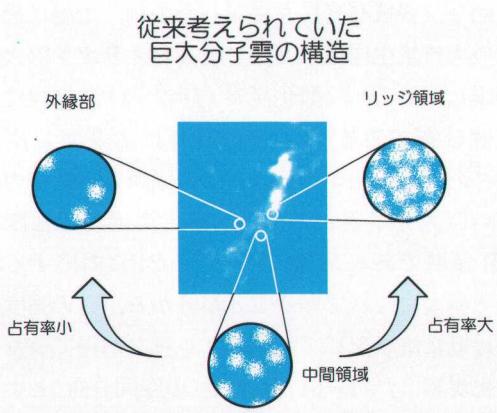


図3 従来考えられていた巨大分子雲の構造のモデル。

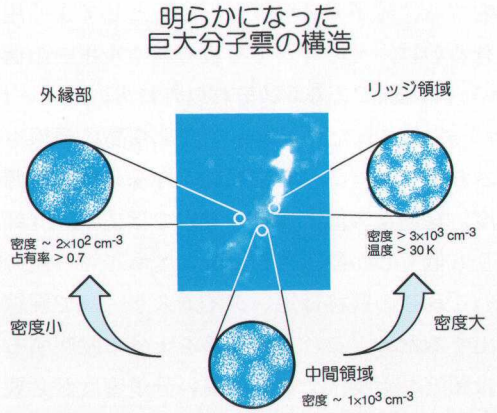


図4 明らかになった巨大分子雲の構造。

輝線の輝度温度と $J=2-1/J=1-0$ 強度比から期待される輝度温度との比較から、輝線を放出している領域が望遠鏡の視野をほぼ満たしていることが分かる。従来、分子雲の構造についてはマサチューセッツ大学のスネル (Snell) らが分子雲の狭い領域に対して多くの輝線を用いて行った観測⁴⁾

から得られた描像、すなわち分子雲はたくさんのほぼ等質のクランプ (小さな塊) からなり、その占有率 (見通したときの隙間の大きさ) のみが分子雲内の場所によって異なるという考え方が趨勢であった (図3)。ところが今回の広域観測の結果はこのような描像を否定する。クランプの性質は

場所ごとに異なり、内側にあるクランプほど高密度なのである (図4)。

氏より育ち?

様々な分子雲の広域観測を行って、その性質を調べてみると、分子雲は非常に多様であることが分かる。それぞれの分子雲のもつ性質はいったい何によって決定されているのだろうか?

例えば恒星は、その初期質量によってたどるべき進化の道筋がほぼ決定する。これに対して分子雲は希薄であるために、進化にあたって外的擾乱の影響を強く受ける。この外的擾乱は、早期型星からの星風による圧縮や紫外光による加熱と電離、超新星残骸の衝撃波による圧縮などの分子雲スケールのものから、渦状腕に付随した銀河衝撃波による圧縮や自己重力不安定による収縮などの銀河スケールのものまで多岐にわたるので、これらのうちのどれが分子雲の性質を決定するのに支配的かを知るためには空間的なダイナミックレンジの高い観測が要求される。そこで我々は2つの相補的なアプローチをとることにした。近傍分子雲の広域観測と銀河面サーベイである。

早期型星が分子ガスに及ぼす影響については、オリオン分子雲やバラ星雲に付随した巨大分子雲

の観測から推測することができる。これによると、HII領域による圧縮と加熱が有効に及ぶ範囲は、HII領域の近傍の数pcにすぎず、フィラメント状に分布する大部分の高密度分子ガスは、早期型星の存在の有無に関わらず既にそこに存在していることが分かる。このことは、形成された星が母胎の分子雲に対して及ぼす影響は、分子の電離による破壊という意味では重要であり得ても、将来的に星形成につながる高密度ガスの形成には支配的には関与しないことを意味している。これと並行して行った銀河面サーベイによれば、高密度分子ガスは渦状腕部分に集中しており、以上を考えあわせると、分子ガスの密度上昇には銀河スケールのメカニズムが支配的であると考えるのが妥当である。

遠方の分子雲の性質を推定する

先に述べたように、分子ガスの性質の決定には様々なスケールの環境の効果が寄与していると考えられる。銀河スケールでの圧縮のメカニズムの有効性について吟味するためには、銀河内に含まれる星間分子ガスの性質と銀河スケールの構造、特に渦状腕や棒状構造との関連について調べなければならない。ところが近傍銀河を電波望遠鏡で

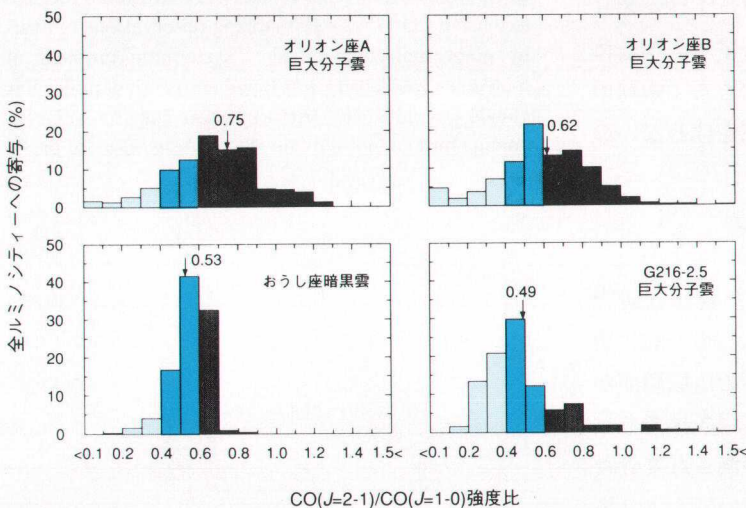


図5 さまざまな分子雲について、全CO輝度に対してCO (J=2-1)/CO (J=1-0)輝線強度比(≈密度)の異なるガス成分がどれだけの寄与を持つかをプロットしたもの。矢印は分子雲全体でのCO (J=2-1)/CO (J=1-0)輝線強度比の値を示す。

観測する場合、多くの場合その空間分解能は分子雲を分解するには不十分であり、我々は個々の分子雲の質量や形態を知ることなく、その性質を推測しなければならない。近傍の分子雲を広域にわたって観測して全体像を把握することは、遠方の分子雲の性質を正しく推定するためのテンプレートとしても重要な意味を持っている。

分子雲全体としての $J=2-1/J=1-0$ ルミノシティ比は、北側のオリオン座 B 分子雲で 0.62、南側のオリオン座 A 分子雲では 0.75 と見積もられる。これらの値は、暖かい高密度ガスについて期待される 1 という値を大きく下回っている。これは、オリオン分子雲に見られるように、分子雲の外側にある低密度ガスが分子雲全体のルミノシティの多くを担っているからである。また、HII 領域に付随した $J=2-1/J=1-0$ 強度比が 1 を越えるガスは、全体のルミノシティにはほとんど寄与していないことが分かる (図 5)。

我々の銀河系や系外銀河のディスクで典型的に観測される値は約 0.6 であり^{5,6)}オリオン分子雲において観測された値にほぼ等しい。我々の銀河系のディスクの動径方向について観測された分子ガスの密度勾配は、高密度のリッジ領域と低密度の外縁部との混合比の変化としてとらえることができるのだろう。一方、系外銀河の中心領域についてしばしば報告される大きな値 (> 1)⁷⁾をオリオン分子雲のような典型的な巨大分子雲の集合体として説明することはできない。おそらく銀河中心領域にある分子雲は低密度外縁部を伴わないのだろう。

星間物質の進化の理解へ向けて

星間ガスの性質の違いに着目した観測的研究は、まだ始まったばかりである。そして一酸化炭素 ($J=2-1$) 輝線による近傍分子雲の広域観測から分かった分子雲の物理状態は非常に多様であった。しかし我々は今や、従来から観測されてきた中性水素輝線や数々の分子輝線を用いて、より広

域に、あるいはより高分解能で観測することができるだけでなく、国内外で精力的に進められている電離炭素や中性炭素など新しい星間ガスのトレーサーによる観測の結果を得ることができる。これらの観測結果を総合することで、未開拓であった星間物質の進化という研究分野についての理解が着実に深まっていくことだろう。

参考文献

- 1) 長谷川哲夫, 林 正彦, 半田利弘, 阪本成一, 岡 朋治, 1992, 天文月報, 85, 459
- 2) Sakamoto S., Hayashi M., Hasegawa T., Handa T., Oka T., 1994, ApJ 425, 641
- 3) Maddalena R. J., Morris M., Moscowitz J., Thaddeus P., 1986, ApJ 303, 375
- 4) Snell R. L., Mundy L. G., Goldsmith P. F., Evans N. J. II, Erickson N. R., 1984, ApJ 276, 625
- 5) Handa T., Hasegawa T., Hayashi M., Sakamoto S., Oka T., Dame T. M., 1993, in Back to the Galaxy, ed. Holt S. S., Verter F. (AIP, New York), p. 315
- 6) Casoli F., 1991, in IAU Symp. 146, Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions, ed. Combes F., Casoli F. (Kluwer, Dordrecht), p. 51
- 7) Braine J., Combes F., 1992, A & A 264, 433

Large-scale Structure and Physical Conditions of Giant Molecular Clouds

Seiichi SAKAMOTO

Institute of Astronomy, University of Tokyo

Abstract: Large-scale structure and physical conditions of giant molecular clouds were extracted through extensive CO ($J=2-1$) mapping observations of nearby giant molecular clouds. Systematic gradient of molecular gas density was found across giant molecular clouds. Small-scale perturbations due to adjacent young stars cannot explain the observed density gradient.