

# 低温 HI 雲

福井康雄\*・佐藤文男\*\*・長谷川哲夫\*\*\*

## はじめに

星間空間の中性水素 (HI) ガスの出す波長 21 cm の電波は、1951年に発見されている。当初、温度が 100 K くらいでかなり一様だと思われていた HI ガスも、その後の観測から、温度、密度ともに相当のバラエティのあることがわかってきた。図 1 は、電離ガスや分子雲を含めた星間ガスの物理状態を温度—密度図上に示したものである。HI ガスで最も高温なのは、「暖かいガス」(warm gas) と呼ばれる温度が 1,000-10,000 K で密度が  $0.1-1.0 \text{ cm}^{-3}$  のガスであり、その中に「低密度雲」(diffuse clouds) と呼ばれる温度が 100-1,000 K, 密度が  $1-10 \text{ cm}^{-3}$  のガス雲が散在している。この両者は、主に、速度にして数 10 km/s の幅広い輝線として観測される。それに対して、これから問題にするのは、温度が数 10 K 以下と低く、分子も含めた全粒子数密度が  $10 \text{ cm}^{-3}$  以上と推定される星間雲である。これらの雲は、HI 輝線を背景にして線幅数 km/s の鋭い切れこみとして検出される。このような雲を、ここでは「低温 HI 雲」と呼ぶことにしよう。

低温 HI 雲が注目されるようになったのは比較的新しく、1970年代に入ってからである。CO 等の星間分子線による天文観測が本格化する以前の代表的な研究として、ナップ (G. R. Knapp) の暗黒星雲サーベイがある (1974年)。彼女は、88個の暗黒星雲に、米国立電波天文台 (NRAO) の 140 フィート鏡を向け、そのうちの 45個について HI プロファイル中に鋭い切れこみを見出

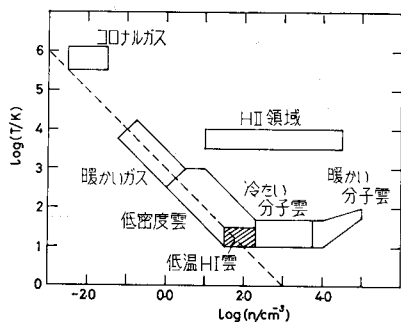


図 1 密度-温度図上での星間物質の諸相。点線は、圧力平衡のなり立つ線を示す。

\* 名大理 Yasuo Fukui, \*\* 千葉県教育センター Fumio Sato, \*\*\* 東京天文台 Tetsuo Hasegawa: Cold HI Clouds in the Galaxy.

した。星間減光から推定された水素の総量と比べると、切れこみの深さから求められた HI ガスの量は 1/20-1/100 にすぎなかった。そこで、彼女は、暗黒星雲中の水素の大部分は水素分子の形で存在しているのだろうと考えた。

星間分子線による観測結果から、星間分子雲に関する認識が確立したのは 1970 年代半ば頃である。HI の自己吸収についても、星間分子雲に関する情報をもとに見直してみようという試みが、時期を同じくしていくつかのグループによって検討されはじめた。分子雲と HI 自己吸収との関連についての最初の論文は、バートン (W. B. Burton) 達によって発表された (1978年3月)。彼らは、アレシボ天文台の 300 m 固定球面鏡を用いて銀河面にそった高分解能 (3') の HI 地図をつくり、NRAO の 36 フィート鏡で得た CO の地図と比較した。その結果、HI の凹みと CO 輝線とがよく対応していること、つまり、低温 HI ガスがもっぱら分子雲中にあることが指摘された。しかし、彼らは、詳しい定量的な解析を行なうには至らなかった。

同じころ、筆者の一人 (佐藤) は、M17 (オメガ星雲) の近くの大分子雲の方向の HI プロファイル中に鋭い切れこみを発見した (図 2)。HI のデータソースは、1973 年のウェスターハウートのサーベイ (Maryland-Green Bank Galactic 21 cm Line Survey, 3rd ed.) である。自己吸収の空間的な分布を調べてみると、CO 輝線の分布とほぼ同じ広がりを持っていて、視線速度 (局部静止基準に対して 20 km/s) も CO と HI とで一致がよいこともわかった。HI のスピン温度として、CO の輝度から推定したガス温度を用いることによって、HI の光学

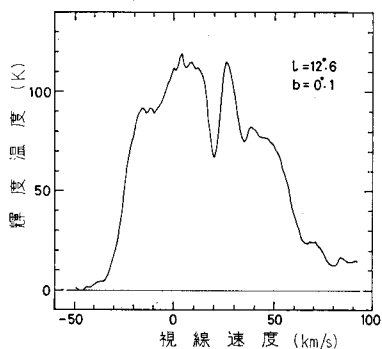


図 2 M17 領域の HI プロファイル。視線速度 20 km/s の深さ 50 K の鋭い切れ込みが、分子雲中の低温 HI による自己吸収である。

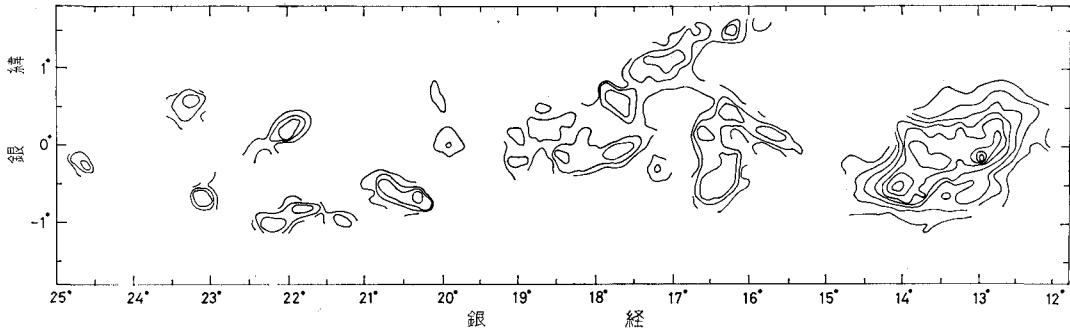


図3 M16/M17領域の低温HI雲の分布図。光学的深さのコントラ・レベルを示している。銀経12°-15°の雲がM17に附随している。

的深さなどを詳しく調べることができた (F. Sato, Y. Fukui: Astron. J., 83, 1967, 1978年12月)。

いくつかのケース・スタディ

図3は、このようにして調べたM16/M17領域の低温HI雲の分布である。HII領域を伴う巨大分子雲に対応する長さ300光年におよぶHI雲のほか、直径約60光年ほどの小さな雲の粒が多数見られる。これらの低温HI雲は、CO分子雲よりもやや低密度であり、その分布はCO輝線よりも広がっている。一方、やはりHII領域を伴った巨大分子雲のひとつであるW3/W4領域を解析してみると、HIの自己吸収として新たに検出された低温雲の総質量は、CO輝線の強度から推定される質量に匹敵することがわかった (表紙写真, T. Hasegawa, F. Sato, Y. Fukui, Astron. Astrophy., in press, 1981年)。このことは、CO輝線とHI輝線とで星間ガスの質量のほとんどが検出されているとする常識に対して、一つの疑問を投げかけることになった。

これらのケース・スタディの中で浮かび上がってきた問題に対して、サンプルの数を増やしてより一般性のある回答を得ようという動機で、私たちは低温HI雲のサーベイを開始した。答えるべき主な問題は、

- ①低温HI雲の典型的な描像はどのようなものか。特にいわゆるCO分子雲とどう関連するのか。分子雲の生長過程の中でどう位置づけられるのか。
- ②星間物質の総質量のうち、低温HI雲が担っている割合はどのくらいか。

そして、

- ③水素原子の水素分子への転換はどのように起きているのか。

という3点である。

今回は、手始めに図4に示した2つの領域について調べた結果を紹介しよう。視線速度を限定したので、サジタリウス・アームとペルセウス・アームの一部が含まれ

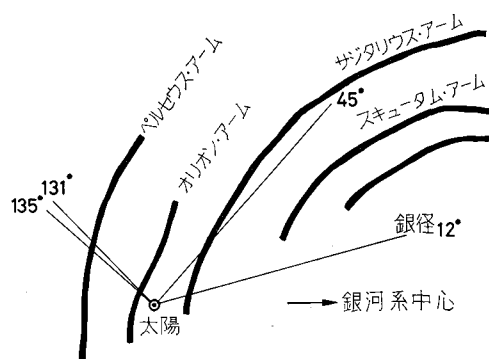


図4 サーベイしたのは、銀経12°-45°及び131°-135°の2つの扇形領域。アームのスケッチは、古典的なHIサーベイによる。

ており、距離が6千光年から9千光年の雲を調べたことになる。これらの領域で、合計40個の低温HI雲が同定され、約4000個のプロファイルが解析された。

典型的な低温HI雲

測定したパラメータは、雲の直径( $d$ )、吸収の切れ込みの光学的深さ( $\tau$ )と速度幅( $\Delta v$ )である。まず、 $\Delta v$ ,  $\tau$  およびこれらから計算される低温HIガスの柱密度  $N(\text{HI})$  の度数分布は、図5のようになる。平均値は、

$$\begin{aligned} \overline{\Delta v} &= 3.9 \pm 0.8 \text{ km/s} \\ \overline{\tau} &= 0.27 \pm 0.08 \\ \overline{N(\text{HI})} &= (4.0 \pm 1.7) \times 10^{19} \text{ cm}^{-2} \end{aligned}$$

となり、比較的狭い範囲に分布していることがわかる。一方、雲の直径と質量( $M$ )の分布を図6に示した。低温HI雲の主成分は水素分子であり、観測にかかる水素原子は微量成分にすぎない。H<sub>2</sub>とHIとの比も雲の物理状態などによって変化するので、HIガスの量から雲の総質量を推定するのは難しい。そこで、ここでは、ピリアル定理を用いて $\Delta v$ と $d$ とから決まる力学的質量を採用することにした。これまでのケーススタディの結

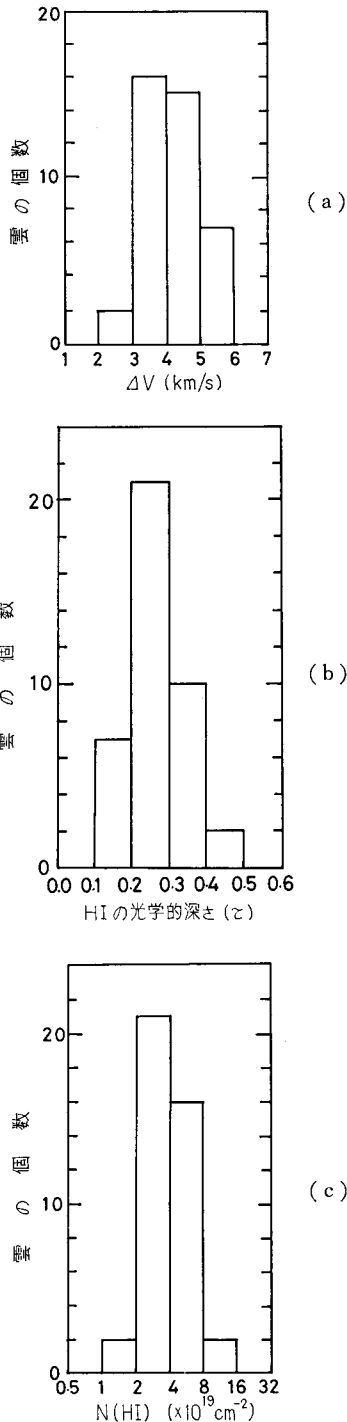


図 5 低温 HI 雲の線巾 ( $\Delta v$  km/s), 光学的深さ ( $\tau$ ), 及び柱密度 ( $N(\text{HI}) \text{cm}^{-2}$ ) の度数分布.

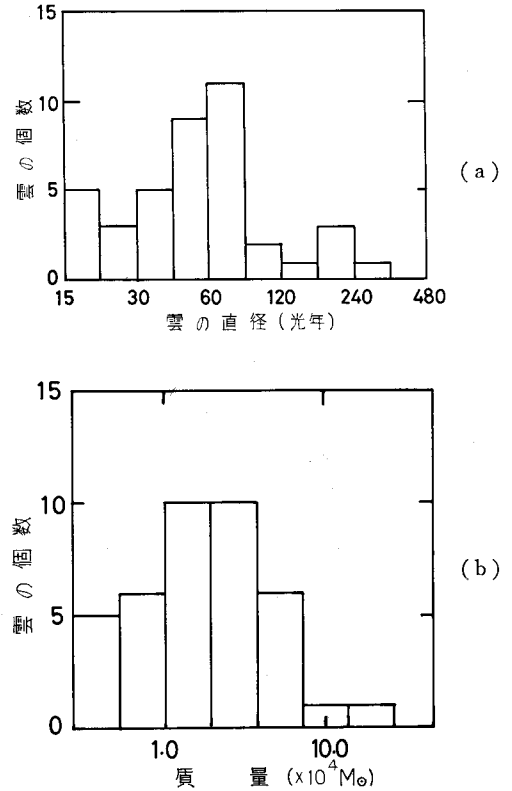


図 6 低温 HI 雲の直径 ( $d$  光年) と質量 ( $M$ ) の度数分布.

果から, この方法でも 2 倍程度の確からしさで質量を求めることができると考えられる. 直径, 質量ともに広い範囲に分布しており, 平均値は,

$$\bar{d} = 60 \text{ 光年}$$

$$\bar{M} = 3 \text{ 万太陽質量}$$

となる. これから,  $\text{H}_2$  と HI は,

$$\overline{n(\text{H}_2)} = 140 \text{ cm}^{-3}$$

$$\overline{n(\text{HI})} = 0.7 \text{ cm}^{-3}$$

と求まり, HI は  $\text{H}_2$  の約 1/200 しかないことがわかる. 以上の結果をまとめると, 典型的な低温 HI 雲は, 直径 60 光年, 質量 3 万太陽質量, 密度  $140 \text{ cm}^{-3}$  の分子雲である, と結論される.

再び, 図 1 を眺めてみよう. 上のようにして決められた低温 HI 雲の占める位置は, 圧力の釣り合いの直線上で, 「低密度雲」と「冷たい分子雲」との中間にあることがわかる. 星間物質の輪廻の主要な道すじの一つを, <暖かいガス>→<低密度雲>→<冷たい分子雲>→<暖かい分子雲>のように考えると, 低温 HI 雲は, 分子雲生成の初期の段階に対応しているのではないかと予想される.

ソロモン達 (P. M. Solomon et al., 1979) は, CO 輝

線の観測から、巨大分子雲の物理量として次のような値を求めている。

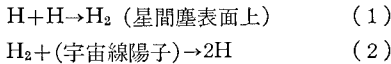
$$\begin{aligned} \bar{d} &= 120 \text{ 光年} \\ \bar{M} &= 50 \text{ 万太陽質量} \\ \overline{n(\text{H}_2)} &= 300 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

大まかに言って、低温 HI 雲は巨大分子雲に比べて、直径・密度が 1/2、質量が 1/10 ということになる。

今回サーベイした領域は、銀河系のディスク中で分子雲の存在するリング帯の 1/80 の体積を占めている。ディスク内の雲の分布が一様とすると、低温 HI 雲の総数は 3000 個となり、総質量  $1 \times 10^8$  太陽質量となる。これは、CO 分子雲の総質量の 1/40 にすぎないが、ディスク内で CO 分子雲と低温 HI 雲の相対的な質量配分が変化している可能性は十分にある。ペルセウス・アームの W3/W4 で、低温 HI 雲の質量が CO 雲の質量と同じくらいあるという事実は、ディスクの外側で低温 HI 雲の重要度が増していることを示唆するものかも知れない。

**HI の存在量と宇宙線強度**

それでは、中性水素ガスの存在量はどのような仕組で決まっているだろうか。重要な反応は、次の 2 つである。



(1) の反応率を  $R$ 、(2) の反応率を  $k$  と書くと、平衡状態において、HI の密度は次の式で与えられる。

$$n(\text{HI}) = k/2R$$

よく使われる  $k$  と  $R$  の値を代入すると、 $n(\text{HI}) \approx 0.3 \text{ cm}^{-3}$  となり、今回もとめられた値  $0.7 \text{ cm}^{-3}$  と比較的よく一致し、このような簡単なスキームが悪くないことを示唆する。そこで、このスキームにもとづいてさらに観測の間の関係を予想することができる。

明らかなのは、雲の直径 ( $d$ ) と光学的深さ ( $\tau$ ) が比例関係にあるだろうという予想である。これを確かめるために、 $d$  と  $\tau$  との相関を調べてみると、図 7 に示したようによい相関があり、相関係数は 0.85 である。最少自乗法によって次の関係が得られる。

$$\tau \propto d^{0.44} \tag{3}$$

$d$  の増加につれて  $\tau$  が増加するのは予想された通りであるが巾指数は 1 よりも有意に小さい。(3) の両辺を  $d$  で割ると、

$$n(\text{HI}) \propto \tau / d \propto d^{-0.56}$$

となり、直径の大きい雲ほど、中心部の HI が減少していることを示している。

この結果は、100 MeV 以下の軟宇宙線が (2) の反応に効いていると考えると説明できる (Y. Fukui, S. Hayakawa, Proceedings of ICRC, in press, 1981 年 7 月)。前出の低温 HI 雲のコラム密度  $4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  は、数 MeV の陽子の飛程に相当するので、雲の外側で低エネルギー成分が減衰して雲の中の電離度が減少する可能性がある。簡単のために、宇宙線粒子が球状の雲の中を直進すると仮定すると、電離度  $k$  は宇宙線の飛程スペクトル  $dj(R)/dR$  に比例する。つまり、

$$dj(R)/dR \propto R^{-\beta}; \quad \beta = 1 - 0.44$$

飛程は、宇宙線陽子のエネルギー  $E$  と  $R \propto E^{1.8}$  のように関係しているから、宇宙線のエネルギースペクトルは

$$dj(E)/dE = dj/dR \cdot dR/dE \propto E^{-0.2}$$

となる。つまり、数 MeV-数 10 MeV では宇宙線陽子のエネルギースペクトルはかなり平坦なものである。という結論に至る。この結果は、直接観測できない軟宇宙線に関する情報が低温 HI 雲の測定から導びかれる点で大変興味深い。

**おわりに**

低温 HI 雲の研究は、私たちがこの仕事を始めた当初には予想もしなかった面白い展開を見せてきた。今後、サンプルの数を増やしてディスク内の分布の様子を探りたいと考えている。また、速度分解能を上げて、雲の角運動量についての統計を行なうことも興味あるテーマである。この研究は、東京大学東京天文台の FACOM 230/58 を用いて行なわれた。

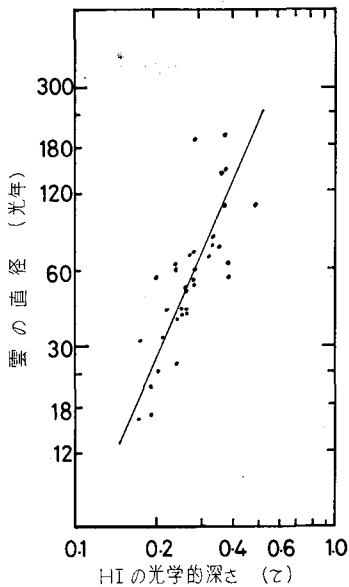


図 7 低温 HI 雲の光学的深さ ( $\tau$ ) と直径 ( $d$ ) の相関図。傾きが 1 よりも急になっていることに注目したい。