

星間分子の観測⁺⁾

鈴木 博 子*

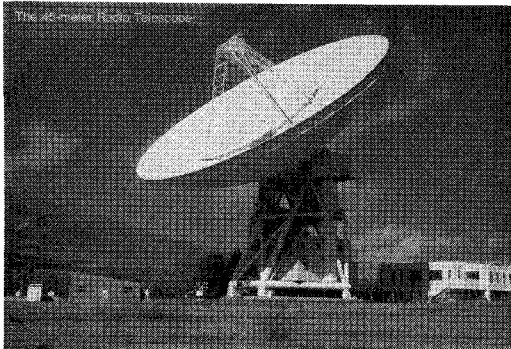


写真: 野辺山 45 m 電波望遠鏡. 1360 m の高さの清々しい高原にぽっかりと位置している. 左手後方は八ツ岳の一部. この写真のように春から秋にかけては実に気持のいい所である. 冬は連日 -10°C 以下に下がる寒さである. ダイヤモンド・ダストのできるような, 水蒸気のない条件が電波の観測には最適なのである.

はじめに

星間にたゞよう物質のうち, 固体成分——塵——については昔から吸収や反射で知られていたが, 気体成分は一部を除いて光の天文学では, なぞであった. 気体の大部分が分子で存在しており, それらを電波でとらえることができることが認識されてまだ 20 年足らずにすぎない. その間, 新しい星間分子をとらえることは電波分光の主な目的の一つとされてきたし, 新しく電波望遠鏡をつくればまず試みられてきたことである.

図 1 は星間の物質の種々の相を示したものである. 低密度 H II 領域 (H^+ が主成分), 低密度雲 (H 原子が主), 暗黒星雲 (H_2 が主) がほぼ密度 \times 温度 = 圧力 = 一定の線上に並んでいる. H II 領域を伴う分子雲はその中に星が形成されており, 雲のつりあいの中で重力が無視できなくなっている状態にあたる. したがって星間の圧力平衡からずれていくところに位置している.

これらの星間の諸状態の中で, 星間分子は主に暗黒星雲, 分子雲 (その区別は厳密ではないが) で観測される. ここでは雲から星へ一歩踏み出す過程が進行している.

星間分子発見の努力は, まず星間の化学組成, 化学進化をとらえるためであることはいうまでもないが, このような雲から星への進化を調べるためでもあるという一面も大きい. 銀河系の物質循環の流れの中で, 星の進化

がかなりわかってきた現在, 雲から星への過程の解明は残された天体物理学上の大きな問題の一つである.

ここではこれ以上この大きな問題には立ち入らない. 本稿では星間分子についての現状, 特に最近われわれが発見に成功した分子について, その経緯を述べるにとどめる. 星間分子が生み出した学問の一つの断面が示せれば幸いである.

筆者は化学のごく一般的な知識すらもたず, いつのまにか星間化学に足を踏み入れていた. その偏った視点は化学を専門とする人にどう映るだろうか.

68 種の星間分子

星間分子について具体的な話に入る前にその環境をまとめておこう. 温度と密度については図 1 に示した. 分子を構成する元素は, H が大部分, He がその約 1/10 (個数比, 以下同じ) である. 残りの元素すべてを合わせても H の 1/1,000 程度にしかならない. H を 10^5 としたとき, O , C , Ne , N , Si , Mg , S , Fe がそれぞれ 68, 30, 28, 9, 3, 3, 1.7 というのが現在いろいろな観測から推定されている値である. 星間化学で重元素といえは C , N , O およびそれより質量数の大きな元素を指す. 重元素の比は銀河系の中でも場所によって異なるが, 太陽系近傍の観測から出した上記の値からずれることは本稿で取扱う範囲では無視できる.

星間物質の化学組成を支配する外的条件で大きなものは紫外線の輻射と宇宙線である. 紫外線は中性の雲 (低密度雲, 暗黒星雲, 分子雲) では, H のイオン化に関する 912 \AA 以下の波長の輻射は雲の表面でさえぎられる. したがって, イオン化エネルギーの大きい O と N はイオン化されない. 宇宙線はどの分子も原子もイオン化

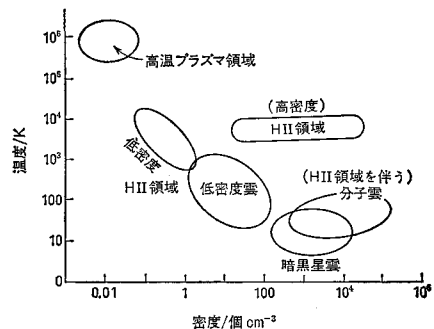


図 1 星間物質の諸相

* 東京天文台 Hiroko Suzuki: Interstellar Molecules

⁺⁾ 「化学と工業」第 40 巻 (1987) 第 11 号より転載

表 1-1 C と H

| | | | | | |
|----|------------------|--|------------------|------------------|------------------|
| OH | C ₂ H | $\left\{ \begin{array}{l} l\text{-C}_2\text{H} \\ c\text{-C}_2\text{H} \\ c\text{-C}_2\text{H}_2 \\ \text{CH}_3\text{C}_2\text{H} \end{array} \right.$ | C ₂ H | C ₃ H | C ₄ H |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

表 1-2 1 個の N と C と H

| | | | | | |
|---|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| CN | C ₂ N | | | | |
| $\left\{ \begin{array}{l} \text{HCN} \\ \text{HNC} \end{array} \right.$ | HC ₂ N | | HC ₃ N | HC ₄ N | HC ₅ N |
| | | | | | |
| NH ₂ | CH ₂ NH | CH ₃ CN | CH ₂ CHCN | CH ₃ CCCN | |
| | CH ₃ NH ₂ | CH ₃ CH ₂ CN | | | |

表 1-3 1 個の O と C と H

| | | |
|------------------|---|---|
| | CO | CCCO |
| OH | HCO | |
| H ₂ O | H ₂ CO | CH ₂ CO |
| | CH ₃ OH | CH ₃ CHO |
| | | $\left\{ \begin{array}{l} \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \\ \text{CH}_3\text{OCH}_3 \end{array} \right.$ |
| | $\left\{ \begin{array}{l} \text{HCO}^+ \\ \text{HOC}^+ \end{array} \right.$ | |

表 1-4 1 個の S と C と H

| | | | |
|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | CS | C ₂ S | C ₃ S |
| H ₂ S | H ₂ CS | | |
| | CH ₃ SH | | |
| | HCS ⁺ | | |

表 1-5 2 個の重元素と H

| | | | | | |
|-------------------------------|----|----|-----|-----|----|
| NO | NS | SO | SiO | SiS | PN |
| HNO | | | | | |
| ----- | | | | | |
| N ₂ H ⁺ | | | | | |

表 1-6 3 個の重元素と H

| | | | | | | |
|--------------------|---------------------|-------|------|-----|-----------------|------------------|
| NH ₂ CN | HNCO | HCOOH | HNCS | OCS | SO ₂ | SiC ₂ |
| | NH ₂ CHO | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| HOCO ⁺ | | | | | | |

表 1-7 その他

| | |
|------------|----------------------|
| 4 個の重元素と H | HCOOCH ₃ |
| 金属を含む分子 | NaCl, AlCl, KCl, AlF |

し得る。塵のために紫外線の入らない大きな雲の中心部では宇宙線だけがイオン化源である。

以上の条件の下でどんな化学組成があり得るだろうか。もし化学平衡が実現されていれば、元素比と温度から、分子ならば多重結合を含まない単純な飽和分子が大部分のはずだし、なにより重元素は固相にほとんど集まってしまおう。しかし実際はそうはなっていない。

答は表 1 に示した。現在までに報告されている 68 種の星間分子である。ここでは飽和、不飽和という考え方(表 1-1 から 1-4 まで上から下の行に向かって H が増

加)と同時に、炭素の数がある化学進化を表わすという考えのもとに、左から右へ炭素数に従って並べてみた。

地上の化学と最も異なる大きな特徴は、やはり長い炭素鎖分子の存在である。同種の炭素鎖間の存在比は化学平衡には程遠く、より長いものが平衡値より何桁も多い。このことが認識されたきっかけとなった HC_nN の発見のいきさつと驚きは岡 武史氏の報告〔本誌, 32, 65 (1979)〕にいっききと書かれている。

これらの星間分子は化学組成をすべて正直に反映しているだろうか。現在のところ答は否である。双極子モーメントを持たないため、電波を出さない分子は別としても電波で観測できる周波数範囲は非常に狭い。特に星間化学の特徴をよく示す、つまり炭素鎖分子の多い暗黒星雲では、その内部での乱流運動が静かで、スペクトルのドップラー幅が狭いことから、周波数分解能を上げて見る必要がある、ますます観測できる周波数域は狭くならざるを得ない。いきおい、観測はある分子のある遷移にねらいを定めて検出することになる。表 1 の分子の大部分はそうして発見されたものである。つまり研究者の予想というフィルターをかけた結果なのである。もちろんその予想行為は、岡氏の報告にもあるように、結果を見ながら軌道修正をかけていくので、全体として化学組成を正しくつかむ方向には向かっているはずであるが。

なお表 1 には典型的な暗黒星雲だけではなく、内部で星が形成されているために暖かい雲や、晩期型星が質量放出してそのまわりにできた雲などで観測されたものも含まれる。Si を含む分子、Na 等の金属元素を含むもの、一部の大きな飽和分子 (CH₃OCH₃, CH₃CH₂OH, CH₃NH₂ 等) は暗黒星雲では検出されていない。ごく最近の NaCl, AlCl 等の金属塩の発見も面白いが、ここでは単純な暗黒星雲に話を限りたい。星間化学が典型的に現われているし、複雑な要素がからまないの分析もしやすい。それになりより、われわれが長年ねらいを定めて調べてきた天体だから。

野辺山 45 m 鏡を用いた分子線サーベイ

1982 年、野辺山宇宙電波観測所ができたとき、まず考えたプロジェクトは、観測できる周波数域をすべて調べつくそうという分子線サーベイであった。オリオン分子雲や射手座分子雲などの昔からよく知られている雲を試験的にあたって後、すぐに暗黒星雲にターゲットを定めた。天体は HC_nN の発見で知られるおうし座分子雲-1 (Taurus Molecular Cloud 1, 以降 TMC-1 と略記) である。

それまでだれも試みなかった暗黒星雲のサーベイに手を出したのは、帯域の広い受信器と分光器が備えられていたからである。特に分光器は一度に 32,000 チャンネル

のデータ（半分を帯域カバー用に、半分を高分解能観測用に組み合わせて使う。海部宣男, 応用物理, **52**, 1027 (1983) 参照) を得るもので, 当時はもちろん, 現在でも他の電波観測所に比べて1桁以上多い情報が含まれている。

1983年から始まった TMC-1 分子線サーベイで, 現在までに 22~24 GHz, 36~50 GHz をほぼカバーすることができている。表1でアンダーラインをひいた4種のうち, C_6H , C_2S , C_3S はそのサーベイから発見できたものである。

C_6H の発見

われわれが TMC-1 分子線サーベイを始めたとき, 表1-1にある C_nH シリーズのうち, 知られていたのは CH (これはまだ鎖とはいえない), C_2H , C_4H だけであった。一方, 筆者は炭素鎖は C^+ 反応を中心にして, 一つずつ延びていくと考えていたので (鈴木博子, 物理学会誌, **35**, 836 (1980)), C_3H , C_5H , C_6H ... はぜひ受信したい分子であった。 C_3H はその後すぐに他の望遠鏡で見つけられた。

C_5H , C_6H ... は分光実験データがなく, 正確な遷移周波数はわからないが, 質量と核間距離から回転定数の予想はつく。なにより, 不対電子のために生じる微細構造によって, 二重線に分かれるのが良い目安となる。

しかし 36~50 GHz のサーベイをほぼ完了しても二重線らしきものは見当らなかった。22~24 GHz に移して, 図2のような2本の線スペクトルを受けたときは, 1986年4月になっていた。2本の線はさらに超微細構造らしい2本に分かれ, Hが一つあることを示している。待望の C_nH の登場である。

ところがそれまでの回転定数の予想値から計算すると, この 23.57 GHz には C_5H も C_6H も C_7H も遷移をもたないのである。しかしこれはすぐに解決した。われわれは C_6H の基底状態を C_5H や C_4H と同じと考えて $^2\Sigma$ としていたのである (ちなみに CH, C_3H , C_5H は $^2\Pi$)。炭素鎖分子の構造計算を多く手がけていた村上明徳氏が, ちょうど C_6H では $^2\Pi$ の方がより安定であるという結果を得ていたところであった。 $^2\Pi$ なら 23.57 GHz にぴったり合う。さらに他の量子数間の遷移を 36~50 GHz のサーベイ・データから探したところ, たまたま質の良いデータのところで, 二重線らしきものがみつかった (図3上)。この程度の SN 比では周波数がわからないときは雑音として見のがすことが多いので, 以前にはみのがしていたのである。

分光実験で周波数が決まっているときは, もうこれだけで十分 C_6H であることは間違いなくいえるのだが, 残念ながら何度かの挑戦にもかかわらず実験は成功しな

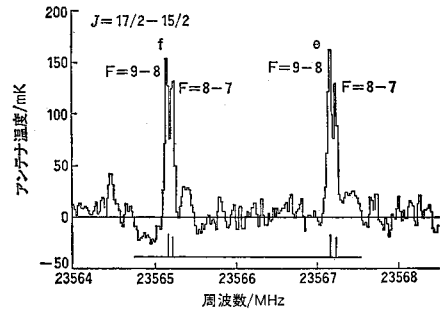


図2 23.57 GHz の4重線。 C_6H であることがわかった。

い。あと一組別の量子数間の遷移を検出したい。

45 m 鏡ペンキぬりかえのための長いシャットダウンの夏をいらいらすごし, 1986年11月やっととれたスペクトルが図3下である。予想周波数にぴったりで, これでは C_6H が TMC-1 に存在することがはっきりした。

われわれと平行して, フランスのチームが C_6H の受信に成功していた。これで表1-1のように CH から C_6H までそろったのである。

新しい炭素鎖シリーズ C_nS

C_6H は 22~24 GHz 帯はともかく, 36~50 GHz 帯ではみのがしてしまうような弱いスペクトルであった。一方, サーベイ・データの中から, 非常に強い, しかしそれまでにわかっている分子には帰属できない未同定線がいくつか浮び上がっていた。図4は強い順に7本を示したものである。これらは Unidentified の U と周波数 (MHz) で Uxxxxx というように呼んでいろいろな同定の試みがなされた。

特に U45379 は, TMC-1 では HCCCN に次ぐ強度をもつので, 主な成分のうちの一つにちがいないと思われた。整数比関係にある周波数を調べたり, 星間ガスを

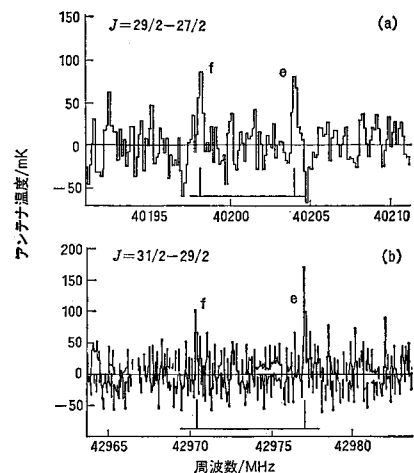


図3 C_6H 確認の決め手となったスペクトル。

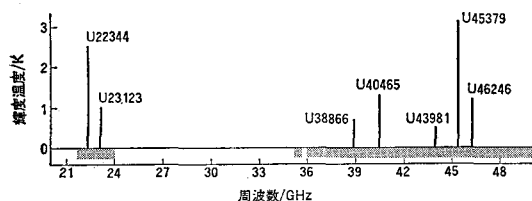


図 4 分子線サーベイで受信された強い未同定線群。■部分はサーベイの行なわれた周波数帯を示す。これらは後に、左から $C_3S J_N=2_1-1_0$, $C_3S J=4-3$, $C_2S 3_3-2_2$, $C_3S 7-6$, $C_2S 3_4-2_3$, $C_2S 4_3-3_2$, $C_3S 8-7$ であることがわかった。

シミュレートした (つもの) 分光実験を行なったりしたが、同定の決め手はない。あまりこれに集中したので、恥をいうようだが U23123 と U40465 の整数比関係 (4:7) をみのがしたほどである (U46246 の認識はかなり後であった。これは U23123 の倍なのだが)。

C_6H と違って答は実験室からきた。CS₂ と He の混合ガスを放電して CS⁺ のスペクトルを測ろうとしたところ、いくつかの CS⁺ とふるまいのちがう常磁性のラジカルからのスペクトルが観測された。解析の結果、C₂S からくるものであることがわかり、また C₂S は 45379 MHz にちょうど回転遷移をもつこともわかった。さらに U22344, U38866, U43981 も C₂S に帰属され、一挙に 4 本の未同定線が片づいてしまった。

TMC-1 では表 1 のように多くの炭素鎖分子が受信できている。C₂S は CS に続くと考えられるので、もう一つの伸ばした C₃S も存在するのではないだろうか。

今度はねらって C₃S の分光実験にとりかかった。すぐに実験室でとらえることができ、TMC-1 のデータとつき合せたところ、なんと残りの 3 本の未同定線が C₃S からのものであることがわかった。C_nS シリーズは確かに存在したのである。

多少趣旨からずれるが、特筆しておきたいことがある。それは C_nS の存在量が C_nH とほとんど同じということである。C_nH は、炭素鎖が成長するときにはまずできると考えられている。C_nS が同量だということは、ほとんど相似形で C_nS も形成されることを示唆しているのではないだろうか。炭素鎖形成の大きなヒントが与えられたのではないかと考えている。

c-C₃H 初めての三員環のラジカル

最後に四つ目の分子、c-C₃H (シクロプロピニルラジカル) に触れておきたい。

星間のリング分子は最初に SiC₂ が星のまわりで、続いて c-C₃H₂ が暗黒星雲を含むいくつかの雲で発見された。特に c-C₃H₂ は量も多く、至るところに見られる点、CO に次ぐ普遍的な分子である。c-C₃H₂ は C₃H₃⁺

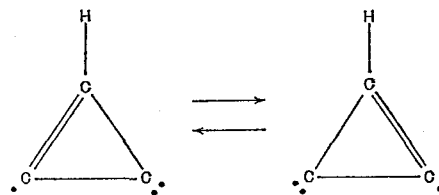


図 5 c-C₃H の構造。分光データから、左右対称なのでこの二つの状態が共鳴していると考えられる。

が電子と解離性再結合をする際の生成物として存在すると考えられてきた。C₃H₃⁺ の解離性再結合なら、もう一つ H を出して C₃H も生成することが可能で、l-C₃H もそうしてできるとされている。c-C₃H も同じようにして生成されてもよいはずだが、実際にそんな分子があることがわかるまでは、だれも気がつかなかったのである。

C₂S と同じように c-C₃H も偶然分光実験にかかった。C₃H の振動励起状態を調べていたときのことである。解析してみると図 5 のような構造をもつ、おそらくマイクロ波分光学上初めての環状のラジカルであった。

天体での検出はむしろ簡単であった。われわれとしては初めて、決まった周波数でじっくりシグナルを待って成功したのである。ただし、試みたいいくつかの天体の中で、受信に成功したのは TMC-1 だけであった。TMC-1 は炭素鎖分子だけでなく、炭素の入った複雑な分子が良く見えるところらしい。

これから

暗黒星雲の全貌をつかむためには少なくとも 1 オクターブの周波数帯域を観測しなければならない。また分子によって低周波で強いものもあれば、高い周波数でよく見えるものもある。一応の目安として 10~50 GHz をカバーするよう受信器の整備を計画している。表 1 の空欄をいくつか埋めて、だいたい化学組成を表現しているといえることが目標である。

おわりに

星間分子の研究は天文と化学の境界領域なので、野辺山のスタッフだけでは全くこのような成果をあげられなかったであろう。分光実験と遷移の計算では名大の斎藤氏、山本氏、分子科学研究所の川口氏、化学技術研究所の松村氏、竹尾氏、富山大の高木氏にいつもお世話になっている。分子構造の計算は北大の村上氏、東大の平野氏、日電の高田氏らに種々たのみこんでいる。化学反応については分子科学研究所の小谷野氏に相談することが多い。

観測は随分便利にできるようにはしてあるものの、体力と技術を要する。野辺山のスタッフ、海部、大石、石川、春日、宮地等と協力して分子線スペクトルサーベイを行ってきた。