

特集：星間分子の世界①

星間分子の世界を探る

海部 宣 男

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

星間分子の世界は、1970年頃から急速に広がった、新しく広大な宇宙である。ミリ波観測装置の発達で、星と惑星系の形成から銀河の進化まで、宇宙物質の多彩な活動の研究を可能にした。さらに星間分子そのものが、生命をも生み出した宇宙の物質進化を解き明かす。本稿は、今月号と来月号の研究紹介 (EUREKA) で星間分子気鋭の若手である平原、高野、三上が紹介する星間化学特集のイントロダクションである。

1. はじめに

宇宙空間で分子が発見されたのは1937年、CH基の可視光スペクトルの発見にさかのぼる。1963年には、「謎の電波」として騒がれた強力なOH基の電波スペクトルの発見があった。これは、星形成領域におけるメーザ増幅現象であった。

しかし何とんでも星間分子の広大な世界への扉は、TownesらのNH₃の発見(1968年)に始まるミリ波での分子発見ラッシュによって開かれたのである。ミリ波望遠鏡が続々ともたらした多様な星間分子の発見は、それまで知られていなかった新しい化学反応の世界が宇宙に存在することを明らかにした。これは、宇宙と生命との距離が大きく縮まったことを実感させるものだった。同時に、星間分子雲(=暗黒星雲)が星間物質の9割を占める主要成分であること、そして星を生み出す直接の母体であることが明らかになった。

我々の銀河系の中で星間物質から星が絶えず産み出されていることは、よく知られている。星間物質が星を作り、星が爆発してまた星間物質を作る。その基本的な物質循環の枠組みはすでに理解

されていたが、当時星間雲といえば水素原子の希薄な雲(HI雲)で、これは自己重力で収縮して星を形成することができない。水素分子を主成分とし多様な分子とダストを含む低温で濃密な分子雲の発見こそ、宇宙物質の大循環の最後のリンクをつなぐものだった。プラズマ-水素原子雲-分子雲-星形成-星からの質量放出という銀河系における物質循環の輪が、完結されたのである(図1)。

それ以来、星間分子の研究は大きく二つの方向に伸びてきた。一つは、星間分子の多様なスペク

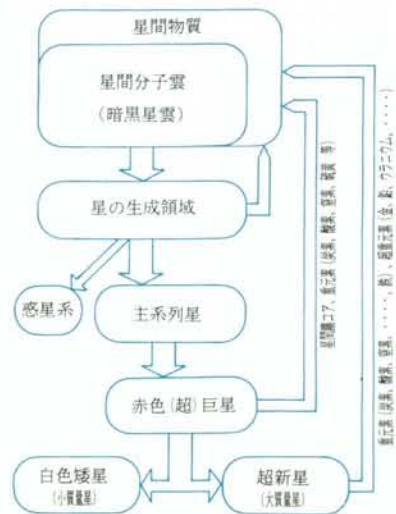


図1 宇宙物質の大循環の模式図

Norio Kaifu: Exploring the World of Interstellar Molecules

トルをプローブ(探針)として用い、暗黒星雲(星間分子雲)の分布や運動、星の形成、銀河の大局的構造と進化、星のバーストの形成などさまざまな宇宙現象を観測することである。この方面での日本での研究は、野辺山の45 m 鏡・ミリ波干渉計を中心とするミリ波観測と、理論・赤外線観測とが結びついて大いに発展していることは、本誌でもたびたび紹介されているとおりである。

もう一つの重要な方向は、星間化学である。新しい星間分子を見出し、分子雲の組成と進化、化学反応を明らかにして、星間分子の世界そのものを理解しようとするものだ。これは、宇宙という特殊な場所(本当は、宇宙の中では地球の方が「特殊」なのだが)における化学反応という点から、化学の研究者の大きな関心を呼んだ。また、思いもよらずたくさんの有機分子が発見されたことから、宇宙での生命の発生の新しいカギを得られるかもしれないという期待も持たれたのである。

日本の星間化学は、赤羽さん、森本さんらが三鷹にいち早く建設した6 m ミリ波望遠鏡(1970年頃に活動開始)の時代から、伝統あるマイクロ波分子分光の研究者達との交流の中で独自の進展を遂げてきた。とりわけ野辺山の45 m 鏡が活動をはじめてからは学際協力が格段に広がり、多くの新しい星間分子の発見と、その上に立って分子雲の進化へと迫る最近の新しい発展を産み出して、この分野の第一線に立っている。一方では、伝統的な天文学の興味と手法からやや外れ、化学の方法論との両方が必要な学際的分野であることもあってか、天文学の側からはその重要性に見合うだけの関心が必ずしも寄せられてこなかったように思う。

星間化学は、天文学にとって全く新しい領域を開き、またこれからも新しい発展が待っている、真にエキサイティングな分野なのである。

今回幸い、星間化学の進展について天文月報が特集を組むことになり、この機会にこれまでの星間分子研究を振り返りつつ、改めてその意義と位

置づけ、目指すべき方向についてまとめてみたい。

2. 宇宙現象と化学

今からちょうど10年前の1982年の春、野辺山宇宙電波観測所の45 m ミリ波望遠鏡が活動を始めたとき、私達はまず45 m 鏡をオリオン星雲の中心部、Ori KLに向けた。この大質量星形成領域では、星間分子が当時最も豊富に観測されており、それが星形成とどのように関係しているのか、最大の注目を集めていたのである。

45 m 鏡の超大型音響光学型電波分光計(AOS)がはき出したスペクトルは、驚くほど多くの、さまざまなプロフィールをした分子の線を示し、その中には既知の線に同定できない「未同定線(U-line)」が十数本も見いだされた。私達だけでは同定が困難なため、すぐに京都大学におられた鈴木博子さんと分子科学研究所の斉藤修二さんをお願いして、野辺山に来ていただいた。大学院生だった大石雅寿君も一緒に解析の結果、2本を残して同定に成功したが、それらはすべて既知の星間分子(CH_3OH , CH_3COOH など)の、高い励起状態にある未報告の線であった(図2)。45 m 鏡の鋭いビームが、Ori KLの中心部のコンパクトな高温・高密度の領域からの高励起分子の放射をとらえたのだということがわかったのである。この高励起線の観測は大石君の博士論文へと発展した。また高励起状態の重要性の認識から、富山大学の高木光司郎さん達のグループによる CH_3OH など内部自由度を持つ分子の高励起状態の組織的な解析実験が進められた。

このいきさつは、私に強い印象を残した。Ori KLのような活動性の高い領域では、構造の複雑さと物理状態の複雑さとがあいまって、星間分子の基本的な理解を得ることは難しい。星形成がまだ起こっていないためにシンプルな構造を持ち、また星間物質の基本形態である暗黒星雲こそ、分子探査を真先きに進めるべき対象なのではないか。

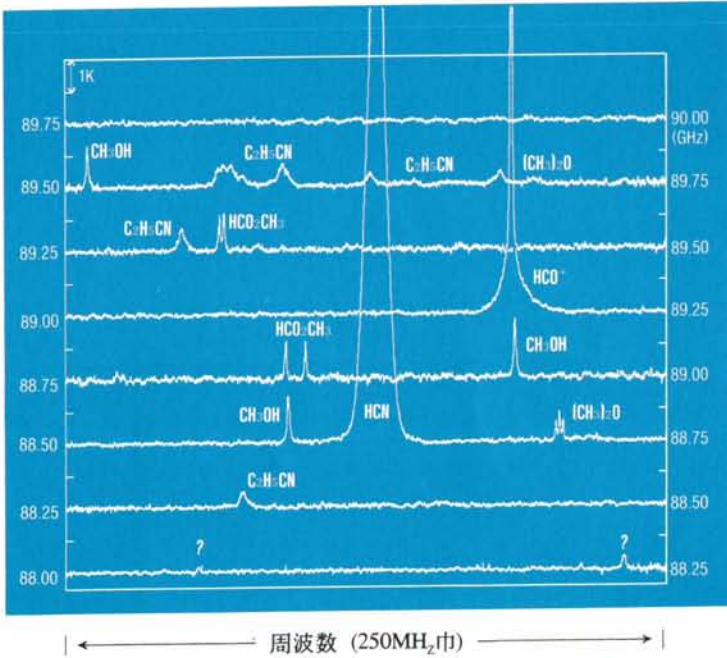


図2 45m 鏡と AOS による Ori KL の 2GHz 中スペクトル (88~90 GHz). 分子により線のプロファイルが異なることに注意. (物理状態の違いを示している)

京都大学の天体核研究室におられた鈴木博子さんは、早くから暗黒星雲の化学の重要性に着目していた数少ない研究者の一人だった。進化を基本とした物理的方法論と大型計算機による宇宙での分子反応のシミュレーションとを結び付け、暗黒星雲の進化を星間分子から解き明かそうという先進的なイメージをひっ下げて、野辺山の私達のグループに加わった。鈴木さんの強力な提案もあって、私達は当面の大規模分子探査的を暗黒星雲の典型としてのおうし座暗黒星雲 TMC 1 に絞った。まず暗黒星雲の組成を明らかにし、宇宙化学の基本を理解しようというねらいであり、この中から多くの新しい分子の発見と暗黒星雲の進化への手掛かりが生まれてくることになった。

一方 Ori KL は、星間分子反応の新しい興味の対象として、いまふたたび浮上している。それは Ori KL における SiO, SO, CH₃OH, NH₃などの分子の著しい局在が、星間ダストに起因するものではないかという課題である。

Ori KL は太陽の 50 倍の質量を持つ巨大な恒星の生まれだての姿だが、ミリ波望遠鏡による分子スペクトル観測から、毎秒 100 キロメートルに

も及ぶ高速で流れ出る分子ガス(双極分子流)、星を取り巻いて回転する巨大なガス円盤、その内側には外へ向けて膨張するリング状の衝撃波など、星形成に伴うガスの多様で激しい運動の姿が見られる。またホット・スポットと呼ばれる高励起分子のスペクトルの集中点が存在する。SiO や SO は衝撃波部分に、NH₃ はホット・スポット部分に集中している。これらは固体微粒子=ダストが衝撃波や中心星からの放射によって蒸発した結果、その分解成分として、又は大量に放出される水蒸気やその分解で生じる遊離酸素との反応の結果として作り出されているのではないか。これらの場所はかなりの高温・高密度なので、暗黒星雲中の主要な反応であるイオン-分子反応に対して、中性反応も効果的になりうる。

こうした例は、現在 Ori KL 以外にもたくさん見つかっている。巨大な複合星生成領域である W 51 における大量の CH₃OH の存在や、低質量星形成領域 B 1 での極めてコンパクトな SiO コアの検出などは、これらが星の形成に伴う一般的現象であることを示している。また似た現象が L 1157 などの双極分子流でも発見されたことは

注目すべきで、これまでなかなかつかむことができなかった星間分子と星間ダストとの関連が、いよいよ観測的にはっきりした形で現われてきたことは間違いない。このことについては、三上論文で詳しく述べられる。今後観測が大いに進み、星間物質の最後の形態としてのダストがクローズアップされてくるだろう。後に述べる彗星の分子などとの関連でも大変興味深い。

星形成領域の現象が星間物質の最終フェーズ＝恒星の誕生期の現象であるのに対し、恒星の老令期である赤色巨星では、反対に星が分子とダストを作って星間空間へ還元する。ここでも、分子ガスによるメーザ増幅や大型有機分子の形成など面白い現象がみられる。ダストの形成は、それが暗黒星雲のダストのコアとなっていくと考えられるだけに、重要である。赤色巨星における分子形成については、高野論文が最新の成果をまとめている。野辺山では、川口さんを中心に赤色超巨星 IRC+10216 の分子探査が進められている。

3. 暗黒星雲の組成と進化

すでに述べたように、暗黒星雲は宇宙物質の大循環の基本要素であるばかりでなく、太陽と地球を産み出した素材であるという点でも、その組成や進化を知ることには格別の意義がある。宇宙化学の本格的枠組みは暗黒星雲の中にあるという観点から、私達がおうし座暗黒星雲 TMC 1 の分子スペクトル総合探査に乗り出したのは、1984 年であった。狙いは、45 m 望遠鏡の高感度と音響光学型電波分光計のデータ取得能力を利用して、TMC 1 からの電波を広い波長域にわたってすべてスペクトルに分解し、分子スペクトル線を漏れなく拾い出そうとするものである。地上の化学とは異なるイオン-分子反応が主として進む暗黒星雲にはどんな分子があるかわからないから、既知の分子の波長だけを狙って探しても、組成はつかめない。広く網を打ち、かかった中から既知の分子のスペクトルを選び分ける。残ったスペクトル線は未知

の分子からのものだから、その分子を突き止めていくことによって暗黒星雲の化学組成を明らかにしていける。またそれらを産み出す化学反応を全体として理解していくことができるだろう。

このような観測を進めることができるのは、世界でも野辺山の 45 m 望遠鏡しかない。暗黒星雲は低温 (10 K 程度) で静かなため、スペクトル線幅は極めて狭く、また線の強度も弱い。これを広い波長域にわたってサーベイするためには、高感度の望遠鏡と、それにも増して大きな (チャンネル数の多い) 電波分光計が必須である。45 m 望遠鏡用に私達が開発した音響光学型電波分光計の 16000 チャンネル×2 台 (高分散用と広帯域用) という超ビッグサイズによって初めて、本格的な暗黒星雲の分子スペクトル探査が可能になったと言える。それでも観測は容易ではなく、受信機の開発と平行してすこしずつ未知の波長を埋めていく探査の仕事は、まだ完全には終わっていない。図 3 と図 4 に、これまでに一応の探査を終えた波長域の全体図と、その一部のデータを示した。

当初の狙いは、観測を始めて 2～3 年の頃から実を結び始めた。既知の分子に同定ができないスペクトル線 (未同定線) がたくさん探査データの中から見つかって、それぞれに量子化学計算の村上さんやマイクロ波分子分光学の斉藤さん、山本さんなどが正体探しの苦労を重ねた結果、 C_6H 、 CCS 、 $CCCS$ 、 $CCCCH_2$ などいずれも地上では全く知られていなかった直線炭素鎖分子であることが突き止められた。同様にして CH_2CN や最近では $HCCNC$ 、 $HNCCC$ などが発見されている。とりわけ CCS 、 $CCCS$ の発見は、暗黒星雲中の炭素鎖分子の生成反応についての重要な示唆 (鈴木さんが提案した、暗黒星雲の形成初期段階において光化学反応の介在により炭素の鎖が一つずつ延びて行くという、「鈴木スキーム」と呼ばれるプロセスを支持する) を与え、その後の暗黒星雲進化の具体的追及に進む大きなきっかけとなったのである。

CCS 、 $CCCS$ 発見の後まもなく、この計画の中心

であり、日本の星間化学の推進役であった鈴木博子さんが自動車事故で亡くなった(1987年11月)。つい昨日のことのような気がするが、すでに5年近くになる。また思い出すのは、井口哲夫君のことである。三鷹の6mミリ波望遠鏡での観測や、ダスト表面で星間分子が形成されるというウ

ニークな理論を発展させていた元気な井口君は、1976年にガンのため、わずか半年の闘病で亡くなった。30歳であった。井口、鈴木という二人がいれば、日本の星間分子研究はどんなにかすばらしい発展をとげられたかと、無念でならない。

暗黒星雲の分子組成を探り、それから雲の化学的な進化を読み取って物理的進化即ち暗黒星雲の収縮のプロセスと結び付けようという、鈴木さんが当初から抱いていた大きな構想の具体化に、いま私達は急速に近づいている。暗黒星雲における化学反応は極めて遅く、雲が自重でゆっくりと縮んで星を作り始める1千万年くらいの時間では、まだ完全な化学平衡には達しない。暗黒星雲の重力収縮のプロセスは未だに観測からははっきりとは捕えられていないが、化学組成の方から観測的にそれぞれの雲の進化段階を捕えられれば、それを手がかりに暗黒星雲の収縮段階についても知ることができるだろう。そうなれば、銀河系の中で進行している星間物質から星形成に至る様々な現象を、時間の軸の中で立体的に読み取ることができるようになるのである。

この考えの具体化を進めるため、私達は1987年頃から、鈴木さんを中心として2つの新しい観測計画にとりくみはじめていた。1) 様々な暗黒星雲のなかでの分子の存在比の統計的観測、2) 暗黒星雲の典型であるTMC1の内部における様々な分子の分布の違いを明らかにする観測である。山本君と平原君はこの観測をそれぞれ発展的に推し進めて、実際に雲の化学的進化と物理的進化とが結びつくことを初めて明らかにすることに成功した。すなわち、CCSなど暗黒星雲における化学反応の初期を特徴づける分子は星形成がまだ起こっていない領域で多い

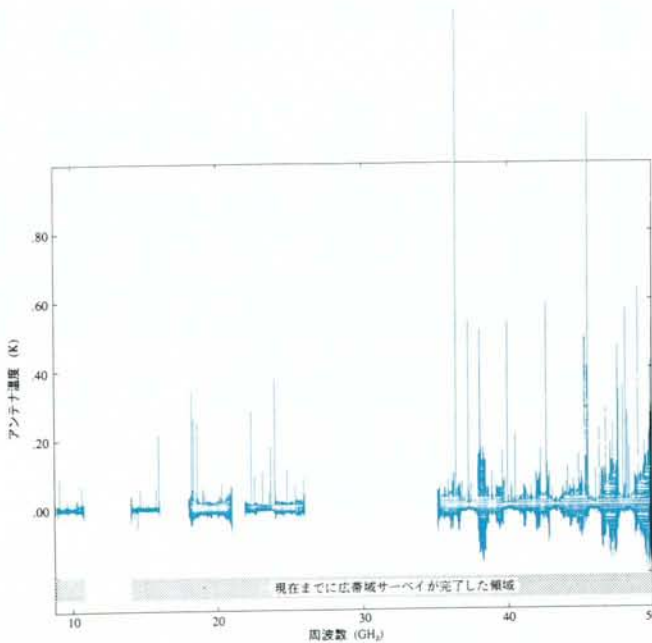


図3 野辺山の45m鏡によるおうし座暗黒星雲の分子スペクトル探査の現状。データは1990年までの8.8~50GHzのものを圧縮表示。下に1992年4月のサーベイ状況を示す。

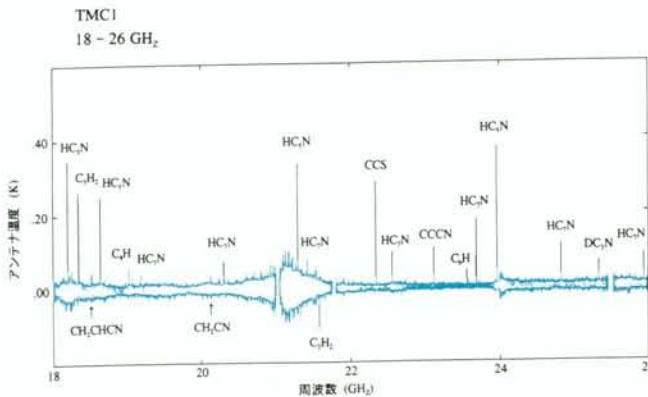


図4 図3の一部(18~26GHz)を拡大したもの。直線炭素鎖分子が圧倒的に多い。

のに比べ、 NH_3 などゆっくりとした反応でしかできない分子は、収縮が進んで星形成が始まっている領域で多い。

詳しいことは本号の平原論文と昨年11月号の山本論文にそれぞれまとめられているが、前項で述べた分子とダストとの関連と合わせ、星間物質の進化の具体的描像にいよいよ観測の手が届き始めていることは間違いない。

4. 星間物質から生命へ

暗黒星雲の電波によるスペクトル探査は、広帯域分光計（周波数分解能 250 KHz）による 8.8-50 GHz の全周波数領域での探査を今年で終え、まとめを行なう予定である。並行して進めている高分散分光計（同 40 KHz）による探査を 1994 年で完了すべく、分光計の拡充を終えた。これによって暗黒星雲の化学は総合的見地から一応押さえることができるだろう。一方、星形成領域や特殊な分子形成を示す銀河系中心における分子の総合的探査も、大石君が中心になって続けられる。

一方で、星間分子探査の新しい発展がサブミリ波・赤外線期待されている。サブミリ波領域には金属の水素化物やイオンの軽くて基本的な分子が多く残されている。赤外線では、電波で見ることのできないアセチレンや炭素の鎖の骨格だけといった対称分子（電気双極子を持たないために、回転スペクトルを出さない）を、振動スペクトルで観測することができる。また赤外線では、高感度の分光観測によりダストに含まれる分子の氷のバンドスペクトルを検出できる。これは、分子からダストへという進化をさらに具体的に追いかけることを可能にするだろう。すでに H_2O , CO などの氷の存在が報告されており、日本でもそうした観測のための赤外線分光器などが作られつつある。今建設中の 8 m すばる望遠鏡の赤外線観測能力は、そのような赤外線での星間分子やダストの観測に、絶大な威力を発揮するだろう。また、日本に星間化学研究用の小型サブミリ波望遠鏡を作

ろうという気運が、関係者の間で急速に高まっている。

さらに興味深いのは、やはり地球・惑星、そして生命への関連である。ハレー彗星など彗星の核には大量の H_2O のほか、 CO , NH_3 , HCN など星間分子として豊富なものが含まれていることがわかっている。最近の太陽系形成論では、地球を産み出した原始太陽系星雲は完全にガス化するほど高温ではなかったのではないかとされており、地球の材料には星間ダスト（その中には、星間分子を氷として含んでいる）がかなり生き残って取り込まれた可能性がある。さらに地球形成後に大量の彗星が地表に降り注ぎ、海を形成したとすれば、やはり暗黒星雲起源の有機分子が大量に地表に到達したであろうと考えられる。

このように、星間物質は高温のため縁切りになったのではないかと一時考えられていた地球形成論・生命の起源論で、再び星間分子との関連が注目され始めている。炭素質隕石に含まれる炭素に富むマトリックスと星間ダストとの比較なども、今後進むと思われる非常に興味あるテーマだ。

1960 年代末の星間分子発見の頃、宇宙の分子が地球の生命につながるかも知れないと考えて興奮したことを思い出す。少なくとも星間分子の発見は、宇宙においても有機分子が圧倒的に豊富であることを明らかにして、生命の基本としての有機反応の優位性を再認識させてくれた。今や星間分子についても、また星間ダスト、隕石、彗星についても観測が格段に進み、さらに太陽系の起源論に加えて星形成に伴う惑星系の形成にまで観測の手が届こうとしている。宇宙物質の循環の中での星間物質の進化に、惑星系と生命に至る物質進化がいよいよつながってきそうである。