

特集：星間分子の世界③

晩期型星での化学

高野 秀路

〈岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 〒444 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38〉

年老いた星（晩期型星）の周辺には、星自身が放出したガスが漂っていて、多くの分子が生成している。このような星のまわりでは、温度、密度が中心からの距離によって大きく変化するので、多くの種類の反応が起こっている。その結果、金属を含む分子、及び炭素が鎖状に伸びた分子など、いろいろな種類の分子が見つかった。従って、晩期型星の周囲は天然の巨大な化学反応の場であると言える。そこで分子組成、及び化学反応の研究はここ数年特に進んできており、星間化学の1つの大きな分野である。

1. はじめに

星間物質はいろいろな天体に姿を変えながら、宇宙で循環している。ガスや塵は集まって暗黒星雲となり、そこでは星が生まれる。星はその質量によって、進化が異なるが、太陽質量程度の星は年を取ると赤色巨星となり、自分自身の表面物質を星間空間に放出する。この現象を質量放出（mass loss の訳語）と呼んでいる。1つの赤色巨星から、1年間に太陽質量の 10^{-7} ~ 10^{-4} 倍の物質が星間空間に戻される。従って、この様な星の回りには、ガスが大量に存在するため、盛んに化学反応が起こり、さらに塵生成が起こっている。晩期型星の周囲のこのようなガス雲は、一般に距離が遠く観測が容易ではない。しかし、近年のミリ波での大口径望遠鏡の出現、及びミリ波干渉計の登場で、その知識は急速に増大している。今回、最近得られた研究成果をおりませながら、この様な場での化学を紹介したい。

2. 晩期型星の周囲のガス雲の化学の概観

晩期型星の化学の研究は、分子の回転によって生じる電波を電波望遠鏡で観測したり、分子及び塵が振動することによって生じる赤外領域の吸収線を、赤外望遠鏡で観測することによって行なわれている。

晩期型星をその化学組成で大まかに分類すると炭素に対して酸素が多いものと、逆に炭素の方が酸素よりも多いもの（炭素星）とが存在する。太陽大気、及び隕石を用いて求めた宇宙元素存在度では、酸素の方が炭素より約2倍多いことが知られている。従って、炭素星では何らかの機構で、多くの炭素が表面まで現れてきていると考えられる。

分子組成の研究は、スペクトル線が強い数天体が対象とされている。一般に炭素星の方が多様な分子が観測されている。具体的な天体名としては IRC+10216, CRL 2688, CRL 618, 及び CIT 6 などである。酸素が多い組成を持つ晩期型星では、分子組成のまとまった報告があるのは一天体のみ（OH 231.8+4.2）である。炭素星で多様な分子が

観測される理由は、過剰な炭素原子が鎖状に連なる性質を持ち、炭素鎖を持つ分子を多く生成しているためである。表1に晩期型星で検出された分子をまとめた。CO, HCN, 及び SiO についてはサーベイ観測が行なわれており、特に CO は多くの晩期型星で検出されている。炭素星では、HCN など炭素原子を含む分子が多く見つっている。逆に酸素が多い晩期型星では、酸素を含む分子である SiO の観測例が多く、また、OH, H₂O, 及び SiO のメーザーが多く検出されているのも特徴で

ある。
 晩期型星の中でも飛躍的にデータが豊富なのは、スペクトル線が特に強く観測される炭素星 IRC+10216 である。この星は獅子座にあり、5 μ 位の赤外線太陽系外で最も明るい天体の1つである。一方、周囲に塵が多く存在するため、可視光では暗い。この星に向けて、オンサラ 20 m 鏡、野辺山 45 m 鏡、及び IRAM 30 m 鏡(スペイン)を用いた分子の回転スペクトル線のサーベイが行なわれ、多くの分子が検出されている。そして、そのデータをもとにして周囲のガス雲の化学反応モデルが考えられている。この天体でスペクトル線が強い1つの大きな理由は、距離が近いことであろう(約 200 pc とされている: 1 pc=3.26 光年)。逆に他の晩期型星ではスペクトル線が強くないこともあって、研究が遅れているか、または全く手つかずの状態である。そこで次に、この IRC+10216 の化学はどのようなものかを紹介したい。

表1 晩期型星の分子組成
 電波領域の回転スペクトルを用いて観測された分子を示す。C-rich は炭素星を、O-rich は酸素過多の星を意味する。文献1)に基づく。

分子	各分子が検出された天体数	
	C-rich	O-rich
CO	150	150
CN	15	
CS	15	3
CP	1	
SiC	2	
SiO(thermal)	4	30
SiS	7	1
SiC ₂	7	
SiC ₄	1	
SO		7
SO ₂		15
H ₂ S	1	15
OCS		1
HCO ⁺	3	2
HCN	80	13
CH ₃ CN	3	
HNC	5	2
NH ₃	2	1
HC ₃ N	6	
HC ₅ N	4	
HC ₇ N	2	
HC ₉ N	1	
HC ₁₁ N	1	
C ₂ H	7	
C ₃ H	2	
C ₃ H ₂ (cyclic)	3	
C ₃ H ₂ (linear)(?)	1	
C ₄ H ₂ (linear)	1	
C ₄ H	4	
C ₅ H	1	
C ₆ H	1	
C ₃ N	5	
C ₂ S	1	
C ₃ S	1	
HSiC ₂ (HSC ₂)(?)	1	
NaCl	1	
AlCl	1	
KCl	1	
AlF	1	
OH(maser)		1500
H ₂ O(maser)	4	200
SiO(maser)		140

3. 炭素星 IRC+10216 の化学

IRC+10216 は炭素が酸素よりも多いガス雲(及び塵)を周囲に持つ赤色巨星である。この天体では電波及び赤外領域での観測により、多くの分子が検出されている。表1の C-rich 欄のほとんどの分子が IRC+10216 で確認されている。そのため、周囲のガス雲の物理、及び化学の研究対象として重要な役割を果たしている。

IRC+10216 は盛んに mass loss しており、周囲にガスを放出している。その速度は約 15 km/s である。従って、分子のスペクトル線を観測したとき、星から我々に向かってくるガス、及び星から我々と反対側に放出されるガスがあるので、その線幅は速度に換算して 2 倍の 30 km/s 近くになる。

IRC+10216 の回りのガス雲では、金属を含む分子(NaCl, AlCl, KCl, 及び AlF)²⁾、ケイ素を含む分子、及び炭素が鎖状に連なった分子(最も

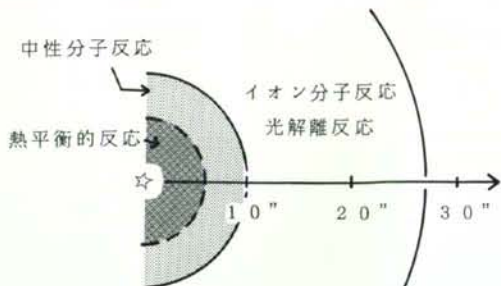


図1 炭素星 IRC+10216 周囲のガス雲における反応の種類の様式図 (断面の一部)
横軸は角度の秒で示してある。10"は 3×10^{16} cm (または0.01pc)に相当する。イオン分子反応の球殻の位置はHC₃Nの分布に基づく。

長いものはHC₁₁N)が存在するのが特徴である。金属、またはケイ素を含む分子は、静かな暗黒星雲では見つかっていない。

周囲のガス雲の中では、中心星からの距離によって温度、密度などが大きく変化している。それに伴い、周囲のガス雲の中での化学反応のタイプは、大局的に図1に示すような層状構造をしていると考えられていた。すなわちガス雲の中心部の高温(約2000 K) 高圧の部分では熱平衡的な反応(平衡定数のみで決まる反応)が主であり、その外側の高温領域では中性分子どうしの反応(一般に活性化エネルギーがあり、高温なほど速くなる)が有利であると考えられる。ガス雲の外側に近い部分では、低温(約100 K) 低圧のために、一般の中性分子どうしの反応は遅くなり、イオンと中性分子の反応(イオン分子反応と呼ぶ: 活性化エネルギーが見かけ上存在しない)が有利になると考えられる。さらに星間空間からの紫外線が入り込みやすくなるので、光反応(イオン化、解離)も起こっていると考えられている。近年、ミリ波干渉計による高い空間分解能(角度にして5~10")の観測、及び化学反応のモデル計算によって、反応の種類にこのような層状構造が存在することが実証されるようになってきた。

例えばSiS分子は、熱平衡モデル計算からガス雲中の星の表面に近いところで主に生成すると見

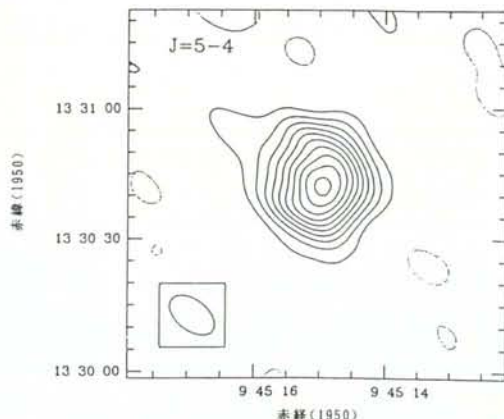


図2 炭素星 IRC+10216 周囲のガス雲における SiS 分子の分布⁴⁾
中心星の速度付近を切り出して描いたものでガス雲の断面に対応している。コントア(等高線)レベルは1K (T_B: 強度を輝度温度で表示する) から間隔1K ごと。中心集中した分布をしている。左下の楕円はビームサイズ(電波望遠鏡の空間分解能に対応)を示す。

積もられている³⁾。この分子を、Bieging と Rieu がアメリカのハットクリークにあるミリ波干渉計で観測したところ⁴⁾、図2に示すように、ガス雲の中心部で最も強度が大きいことがわかった。このことはモデル計算から予想された結果と矛盾しない。また、HC₃N という直線5原子分子は主にイオン分子反応で生成すると考えられ、ガス雲の中での分布がイオン分子反応のモデルで計算されている。その結果によると、HC₃N の存在量は中心部で少なく、中心から 8×10^{16} cm の所で最大値を持つ⁵⁾。この値は角度にして27"である。ミリ波干渉計による観測では、図3に示すような分布が得られており⁶⁾、直径約30"の球殻(シェル)状分布である。従って、観測とモデルは定性的には良く合っている。

このように、ある分子の生成メカニズムを解明したい場合、星の中心からどの位の距離に、その分子が存在するかを詳しく調べるのが本質的であり、かつ非常に有力な方法であることがわかってきた。このような観測は高い空間分解能を要するため、ミリ波干渉計の出現によって可能になっ

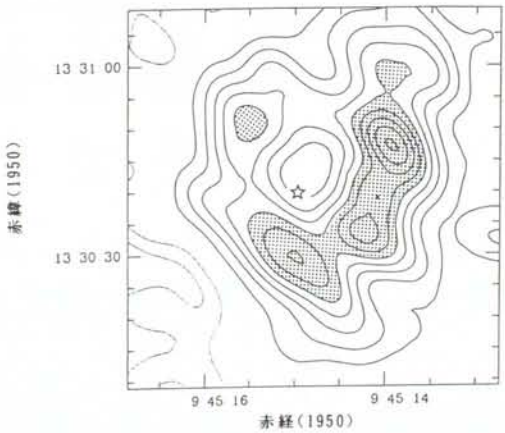


図3 炭素星 IRC+10216 周囲のガス雲における HC₃N 分子の分布⁶⁾
 中心星の速度付近を切り出して描いたものでガス雲の断面に対応している。HC₃N は中心星(☆印で表示: 星の実際の直径はもっと小さい)の回りをリング状に分布している。コントアレベルは1K (T_B) から間隔1K ごとで、5K 以上の部分にハッチしてある。

てきた。HC₃N などの炭素鎖分子はイオン分子反応によって、ガス雲中で中心から 10¹⁶~10¹⁷cm の距離で効率よく生成し、球殻状に分布していると考えられる。単一の望遠鏡で中心一点を観測していた時に比べると、分子の分布を空間的に分解して観測できるようになった意義は大きい。

我々は最近、野辺山ミリ波干渉計で SiC₂ 及び HC₅N の両分子の分布を IRC+10216 で調べ、各々球殻状に存在していることを見出している。従って、これらの分子もイオン分子反応で生成している可能性が高いと結論できる。次にこの観測の意義、及び結果を簡単に紹介する。

3.1 野辺山ミリ波干渉計による SiC₂ の観測

Si を含む分子は、炭素鎖分子と共に、IRC+10216 に多く存在する特徴的な分子であり、高温での化学反応及び、塵形成との関連で重要と考えられる。Si を含む分子の IRC+10216 のガス雲内での分布、及びカラム密度 (存在量に相当) は表 2 にまとめた通りである。

この表から、SiO, SiS, SiH₄, 及び SiC₂ の存在量は代表的な炭素鎖分子 HC₃N の 3×10¹⁵cm⁻²

表2 炭素星 IRC+10216での Si を含む分子の分布、及びカラム密度 (存在量に相当)

分子	分布	カラム密度 (cm ⁻²)
SiO	中心集中	2×10 ¹⁵ ⁷⁾
SiS	中心集中	7×10 ¹⁵ ⁸⁾
SiH ₄	不明 (中心?)	2×10 ¹⁵ (下限値) ⁹⁾
SiC	広がっている	6×10 ¹³ ¹⁰⁾
SiC ₂	不明	2×10 ¹⁵ ⁸⁾
SiC ₄	不明	7×10 ¹² ¹¹⁾
SiN	不明	3×10 ¹⁴ ¹²⁾

に¹³⁾近く、Si を含む分子の生成が盛んであることを示している。

SiO 及び SiS の分布については、ミリ波干渉計での観測から、中心に集中していることがわかっているから (図 2: 半分の強度になる直径 15"), SiO 及び SiS は主に熱平衡的な反応で生成していると考えられる。SiC₂ については、存在量が多いにもかかわらず、これまでに分布はミリ波干渉計で調べられていなかった。さらに SiC は、予想に反してガス雲の広い領域にわたって存在することが (半分の強度になる直径 30") IRAM 30 m 鏡 (スペイン) による観測からわかっている。このため SiC は、熱平衡的な反応で生成するとは考えられず、以下に示すような SiC₂ の光解離反応によって生成するメカニズムが提案されている¹⁰⁾。



Si は気体になりにくい元素であるが、IRC+10216 の周囲のガス雲での Si の化学は、以上のように中心部での熱平衡反応にのみ支配されているわけではなく、様々なタイプの反応が関与している可能性が高い。これらのことを調べるために、SiC 及び SiC₂ などの詳しい分布を調べることが望まれる。そこで、我々は生成メカニズムについて知見を得るために、先ず SiC₂ の分布を観測した。

観測は、野辺山 5 素子ミリ波干渉計において昨シーズン中 (1991 年 1 月~5 月) に 4 日間にわたって行なった (干渉計の観測は観測所の方々がやって下さるので、行なっていただいたと言うべき

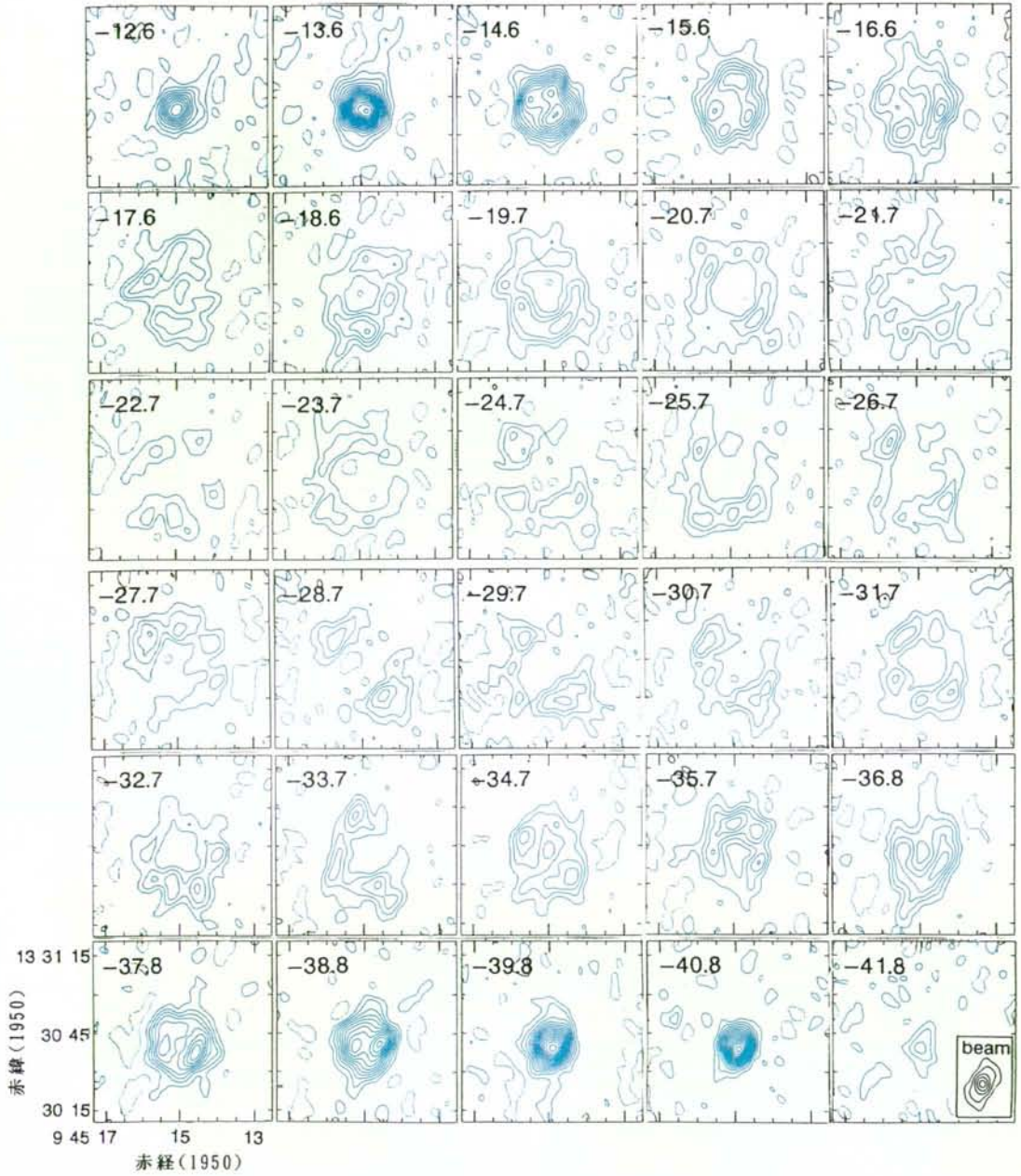
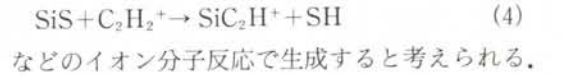
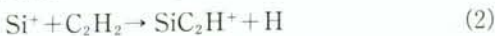


図4 炭素星 IRC+10216での SiC₂分子の分布
 各速度の値を各々の分布図の左上の隅に km/s 単位で示してある。コントアは0.15Jy/Beam ごと (-0.15Jy/Beam は点線, 0Jy/Beam は省略) に表示した。ビームサイズは-41.8km/s の図の右下隅に示した。

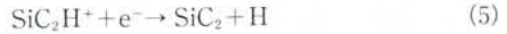
かも知れない). 回転遷移は $4_{04}-3_{03}$ の 93.064 GHz のものを用いた.

その結果, IRC+10216 での SiC_2 の分布が得られた. 速度幅 1 km/s ごとの分布を図 4 に示す. 今回のように細かい速度ごとに分布を描くことを可能にした理由は, SiC_2 のスペクトル線の強度が大きいこと, 及び野辺山ミリ波干渉計の感度が比較的高いことである. 図 4 を左上から見ていくと, 速度にして $-12.6 \sim -14.6$ km/s では中心の星の位置 (赤経(1950) = 9 h 45 m 15 s, 赤緯(1950) = $13^\circ 30' 40''$) に分布が集中している. さらに速度が小さく (マイナスが大きくなる方向) になると, 分布の直径が大きくなると共に, 中心部の強度が減少してリング状の分布となる. IRC+10216 自体の速度は -26 km/s である. この速度付近の図は IRC+10216 と同じ速度で動いているガスの分布を示している. すなわち, 主に視線方向と垂直に運動しているガスの分布を見ていることになり, ガス雲を星を含む平面で輪切りにした断面の様子がわかる. 特に -26 km/s の前後 10 枚程度の図では, 中心部では SiC_2 がほとんど観測されていない. そして, 図 4 の右下の方では再び分布の直径が小さくなり, 中心に集中した分布に移っていく. 以上の SiC_2 の分布を総合的に見ると, SiC_2 は中心星の周囲を球殻状に取り囲んでいると結論できる. 直径は約 $30''$ であり, 所々につぶつぶが見られる. ただし, この球殻状の構造は, スペクトル線の励起がガス雲内の場所によって違うための, 見かけ上の構造である可能性がある. しかし, 簡単な励起計算を行なったところ, この可能性は否定された.

SiC_2 の分布の形, 及び大きさは HC_3N のものとはほぼ同じであり, SiC_2 が主にイオン分子反応で生成していることを支持している. 考えられる生成反応は, 以下のものである. まず SiC_2 の生成に必要な親イオン SiC_2H^+ は



などのイオン分子反応で生成すると考えられる. 生成した親イオン SiC_2H^+ は, 以下のように電子と反応することによって,



SiC_2 を生成すると考えられる. ケイ素は難揮発性の元素である. しかし, ガス雲の中心部の高温の領域で分子に取り込まれるだけでなく, ガス雲の外周部でも分子形成に寄与していることがわかる.

このように, SiC_2 は広い分布をしているため, SiC の生成に SiC_2 が使われる (反応式(1)) という説を分布の点では支持する.

さらに, SiC_2 の分布は必ずしも球対称ではないことが明らかになった. -26 km/s の前後 10 枚の図を足し合わせて, SN 比 (signal-to-noise ratio) を向上させた結果を図 5 に示す. 球殻状のガス雲の北東 (左上) と南西 (右下) 部分で明らかに強度が大きい. この傾向は HC_3N の分布にも見られ

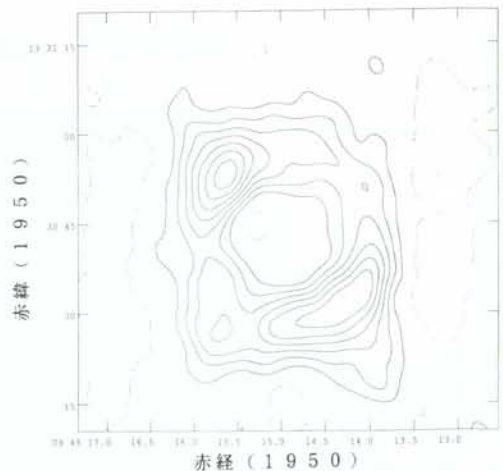


図 5 炭素星 IRC+10216 での SiC_2 分子の分布 -26 km/s の前後 10 枚の図をたしあわせて, SN 比を向上させたもの. コントアは 0.06 Jy/Beam ごと (-0.06 Jy/Beam は点線, 0 Jy/Beam は省略) に表示した. 球殻状のガス雲の北東 (左上) と南西 (右下) 部分で強度が大きい. 表紙にもこの図をカラーグラフィックスで示してある. 黄色いところが電波が強いところである.

る。これまで IRC+10216 の周囲のガス雲は球対称であるとされてきた。ところが、今回のように光学的厚みが小さいスペクトル線で、高分解能の観測を行なったため、球対称からの明らかなずれが見つかったのであろう。

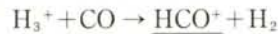
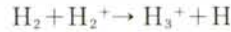
このような非球対称な形を作り出すためには、ガス雲中での何らかの物理条件の球対称からのずれが、必要になる。理由として考えられるのは、mass loss の非等方性である。IRC+10216 のような晩期型星は、いずれ進化して惑星状星雲を経て、白色わい星となる。惑星状星雲では、その 50% に双極流的な構造（互いに反対向きの 2 方向に延びた形）が存在し、その 30% に長円形の構造が存在するという報告がある¹⁴⁾。従って、IRC+10216 に存在する球対称でない構造は、晩期型星進化の兆候である可能性がある。

一方、SiC₂ の観測と同時に、HC₅N のスペクトルも同時に観測することができた。HC₅N の分布も SiC₂ と同様に直径約 30" の非球対称な球殻であった。

4. 晩期型星の進化

先ほど少々述べたように、IRC+10216 のような晩期型星は、いずれ進化して惑星状星雲を経て、白色わい星となる。その過程で分子組成がどのように変化し、またその原因はどのようなことであるかを明らかにすることは、星間化学、及び天体物理の両面で有用である。

これまでの研究で、断片的に情報が得られている。その結果、進化に従って存在量が增大する分子があるようである。HNC¹⁵⁾及び HCO⁺である。特に HCO⁺は、IRC+10216 ではほとんど観測されないが、若い惑星状星雲である NGC 7027 (C-rich) において、多く存在することが報告されている¹⁶⁾。HCO⁺は一酸化炭素に水素原子核である陽子が結合したものであり、以下のような反応で生成すると考えられている。



晩期型星の進化にともなって、中心星の温度が上昇すると、H₂を効率よくイオン化する事ができるようになり、HCO⁺が増大する可能性が指摘されている。

5. 今後の研究の方向

5.1. 特定の天体を詳しく調べ、化学反応モデルの精密化を行なう

IRC+10216 などの、スペクトル線が強い典型的と思われる天体について、その周囲のガス雲での化学反応を徹底的に調べつくすことは重要である。そのため、スペクトル線の強度が弱い分子についても、ガス雲中での分布を知ることが望ましい。現在、この仕事はハットクリーク(アメリカ)、野辺山、及び IRAM (スペイン) の各ミリ波干渉計で取り組んでおり、適度な強度のスペクトル線はここ 2~3 年でかなりの観測が終了することと思われる。ただし、現在のミリ波干渉計では感度に限界があり、次世代の大型(多素子)ミリ波干渉計が必要となってくるであろう。日本(LMA 計画)及びアメリカで、このような計画があり、その早期実現が望まれる。

5.2. 多数の天体の分子組成を調べ、中心星の進化との対応関係を確立する

これまで晩期型星の周囲のガス雲の観測が、特定の天体(主に IRC+10216)にのみ集中していた理由は、他のガス雲からのスペクトル線が弱いためである。特に、酸素が多い晩期型星では、分子のスペクトル線が弱く、検出された分子数も少ない。もしガス雲の分子組成を多くの天体で調べることができれば、それらと各ガス雲の物理的環境とを比較することによって、分子組成を決めている要因を明らかにできるであろう。ガス雲の物理的環境は中心星の進化(赤色巨星→白色わい星)を反映すると考えられるので、分子組成及び分子の分布を調べることによって中心星の進化の様子

をとらえられる可能性がある。

多くの晩期型星において分子組成を統計的に観測することは、現在の単一望遠鏡、及びミリ波干渉計では、感度及び観測速度の点で不可能である。大型（多素子）ミリ波干渉計が実現すれば多くのガス雲の分子組成が明らかにされ、この方面の研究がかなり進むと考えられる。さらに、分子の詳しい分布から、晩期型星進化に関連する重要な情報であるガス雲の非球対称性についても知見が得られ、その原因を探ることができるだろう。

おわりに

宇宙空間での化学は、その極限的な物理条件、長いタイムスケールなど、地上の実験室には無いユニークな面を多く持っている。星間化学の研究によって、新しい現象を見つけて実験室での化学の研究に刺激を与えるとともに、天体物理現象のプローブとしてさらに分子を役立てることができるように行きたい。

参考文献

- 1) Omont, A. 1991 "Chemistry in Space" (Kluwer), page 171.
- 2) Cernicharo, J. and Guélin, M. 1987, A. Ap., **183**, L10.
- 3) Tsuji, T. 1973, A. Ap., **23**, 411.
- 4) Bieging, J. H. and N-Q-Rieu 1989, Ap. J., **343**, L25.
- 5) Nejad, L. A. M. and Millar, T. J. 1987, A. Ap., **183**, 279.
- 6) Bieging, J. H. and N-Q-Rieu 1988, Ap. J., **329**, L107.
- 7) Guélin, M. and Cernicharo, J. 1988 "The Physics and Chemistry of Interstellar Molecular Clouds" (Springer-Verlag), page 337.
- 8) Cernicharo, J. et al. 1987, A. Ap., **181**, L9.
- 9) Goldhaber, D. M. and Betz, A. L. 1984, Ap. J., **279**, L55.
- 10) Cernicharo, J. et al. 1989, Ap. J., **341**, L25.
- 11) Ohishi, M. et al. 1989, Ap. J., **345**, L83.
- 12) Turner, B. 1992, Ap. J., **388**, L35.
- 13) Cernicharo, J. et al. 1987, A. Ap., **181**, L1.
- 14) Zuckerman, B. and Aller, L. H. 1986, Ap. J., **301**, 772.
- 15) Bujarrabal, V. et al. 1988, A. Ap., **204**, 242.
- 16) Deguchi, S. et al. 1990, Ap. J., **351**, 522.

☆

☆

☆

☆

☆