

宇宙電波分光学の発展

海 部 宣 男*

1. はじめに

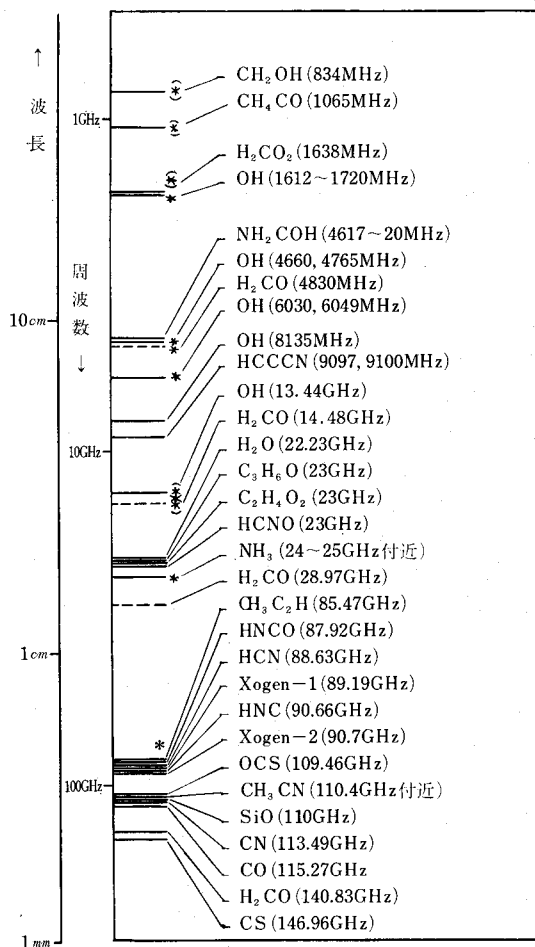
1968年末にはじまった“アリゾナのゴールドラッシュ”は、今、ますます急ピッチで上昇をつづけている(“ゴールドラッシュ”の発端については、天文月報1969年9月号、「星間分子スペクトル線の検出と“宇宙電波分光学”」参照)。最近3~4カ月の間だけでも、5つの新しい分子—SiO, C₃H₆O(エポキシ・プロパン), C₂H₄O₂(グリコール・アルデヒド), HCNO(フルミニック・アシド), CH₃CO(アセトアルデヒド)が新たに発見されている。このように続々と報じられる分子の電波線スペクトルの発見は、そのほとんどが、アメリカ国立電波天測所(NRAO)がアリゾナの砂漠中のキット・ピーク観文台に設置した、直径11mのミリ波望遠鏡によってなされたものである(第8図)。

筆者の知るところでは、現在22種の分子、2本の未定線のline, 6種のアイソトープ分子の電波スペクトルが発見されている。これらのうち、有機分子は11種類にのぼる。

このように複雑で多様な分子が、希薄な星間空間でこれほど多く形成されていようとは、数年前までは誰も予想しなかったことであるが、観測の結果からは、さらに多くの問題が提起されてきている。さまざまな分子ガスによって成る、文字どおりの「分子雲」の存在、OH, H₂Oのみでなく、CH₃OH, H₂CO₂, H₂CO等に観測されるメーザー、アンチ・メーザー機構、分子存在比の極端な非一様性、銀河中心領域の異常運動、星の形成につながるコンパクトH II領域の物理状態の解明、元素存在比の観測、ダストとの関連、そして星間空間における分子の一生—生成→反応→解離—等の問題である。星間分子の電波観測は、まだ始まったばかりで、これらの諸問題のほとんどが、まだ手もつけられていない。金鉱は次々と発見されているが、ほんの一部をのぞいては、まだまだまったくといってよいほど掘りおこされてはいないのである。

第1図に、発見された星間分子の電波スペクトルをまとめてある。これを見て気がつかれた読者も多いと思うが、発見された分子スペクトルは、波長の軸にそって平均にちらばっているのではなく、あちこちにかたまっ

ている。特に、波長2cm以下の短波長域では著しい。この傾向は、自然界の反映ではなく、たまたまよい受信器を持っているグループによって、それで観測できる波長域で分子がさがされている、というにすぎない(1つのマイクロ波の受信器で受信できる周波数範囲は、その中心周波数のせいぜい10%程度である)。従って、この図の空白は、今後どんどんうめられていくだろう。



第1図 発見された星間分子の電波スペクトル。スペクトルを示す実線は輝線スペクトル、破線は吸収スペクトルを示す。*印は熱平衡からずれた状態のもの。アイソトープ分子のスペクトルおよび微細構造は省略した。

* 東京大学理学部天文学教室

Norio Kaifu: Microwave Astrophysical Spectroscopy

2. 星間分子の平衡・非平衡

OH, H₂O の強力なメーザー現象の発見は、星間分子においては、非熱平衡の状態が一般的であるという予想をいだけせるものであった。事実、NH₃, H₂CO についても奇妙な非熱平衡状態が観測され、最近の発見では、CH₃OH と、おそらく H₂CO₂ もメーザー現象を示している。しかし、最近発見される多くの分子では、むしろ異常の証拠がなく、熱的に平衡状態にあると思われるものが多い。CN, HCN, CO, HCCCN, OCS, CS 等である。これら熱平衡にあると思われる分子は、ほとんどが、2原子分子または直線形分子であるという点が著しい特徴である。これは、分子構造が極めて単純で、従ってエネルギー準位の構成も単純であるため、エネルギー準位間の選択規則のちがいによる異常な配列のおきる余地が少ないのであろう。

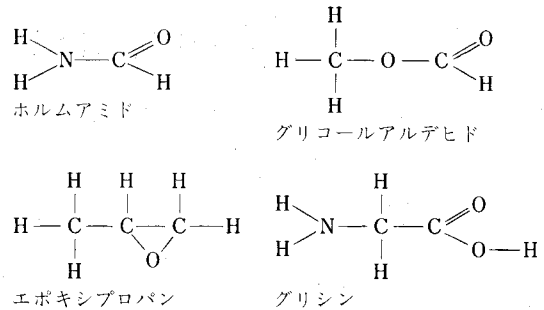
これらの分子は、他の星間粒子(おそらくは H₂ 分子)との衝突で温められていると考えられる。CO の観測から求められたその温度は、50°K 程度の値で、これがおそらく、「分子雲」の温度そのものを示している。これら「異常でない」分子たちは、その状態が周囲の環境のまじりけのない反映であるだけに、「分子雲」の物理状態を知る上で極めて重要である。温度のみでなく、「分子雲」の 10⁵ atoms/cc 以上という非常に高密度も、ここから推論されるものである。これについては、§4 でべる。

一方、H₂O, H₂CO, CH₃OH といった分子は、その構造の非対称性のため、いくんだ回転エネルギー準位をもち、分子の回転状態の分布に方向性がはいるこみやすい。

OH 分子のメーザー現象は、よく知られているように、OH がラジカルで、電場をもつことから生じるエネルギー準位のラムダ二重項間における異常分布の結果である。H₂O は非対称分子で、その激しいメーザー発振は OH と深いかかわりをもっている。これらは共に、コンパクト H II 領域における現象解明のために大きな観測上のカギをにぎっている。

H₂CO は、今までのところ唯一のアンチ・メーザー現象(異常吸収)を示す分子である。「分子雲」における衝突冷却(衝突過程での選択則に起因する)をはじめ諸説があるが、未だそのメカニズムは解明されていない。

CH₃OH, H₂CO₂ のメーザー現象については、詳しいことはまだ何もわかっていない。これらの分子がメーザー現象を示していると考えられる理由は、そのスペクトル(波長 36 cm および 18 cm)が、Sgr A の方向で輝線として観測されたことである。波長 36 cm, 18 cm での Sgr A の輝度温度 T_b はそれぞれ 400°K, 150°K もあ



第2図 星間空間で発見された有機分子3つと、最も簡単なアミノ酸、グリシン(右下)の分子構造式の比較

るから、これを背景としてなおかつ輝線として観測される CH₃OH, H₂CO₂ の励起温度 T_p は、それぞれ 400°K 以上、150°K 以上でなければならない。しかし、これらのスペクトルが観測される分子雲の温度は、せいぜい 50°K ないしそれ以下と考えられるから、これらの分子は、何等かの熱平衡からのずれの結果、異常に高い励起状態にあるのではなからうか。

メチルシアナイド(CH₃CN)では、さらに奇妙な事実がある。この分子は、波長 2.7 mm 付近で、 $J=6-5$, $K=0, 1, 2, 3, 4, 5$ の6本のスペクトルについて調べられた。ところが $K=2$ に対応するスペクトルだけがみつからなかった。これは、分子構造の3回対称性を考慮しても、解決されそうにもない問題である。

もっと複雑な構造をもつ分子では、どのような現象がおこっているかまだ不明である。これら大分子量の有機分子では、分子内回転も生じ、一層複雑な事情がでてこよう。NH₂COH, C₂H₆O, C₂H₄O₂ の構造式を第2図にあげた。グリシンの構造とくらべていただきたい。

3. 熱い分子雲

星間空間において、分子スペクトルが観測される領域は大きく分けて2種類ある。1つは若い巨大な星の紫外放射によって電離した高温のガス雲—H II 領域—の中にあつて、特に強い電波を出す小さな領域である。これを、コンパクト H II 領域と呼ぶ。他の1つは、いわゆる中性水素ガス領域—H I 領域—の中でも、特に低温で、高密度の領域である。そこで、分子スペクトルが豊富に観測されるこの2つの領域を、「熱い分子雲」、「冷たい分子雲」とよぶことにしよう。

「熱い分子雲」の一大特徴は、OH, H₂O の激しいメーザー放射である。Ori A, W 3, W 49, W 51 などが典型的な例として知られている。

OH, H₂O のメーザー機構は、あい変わらず明らかでないが、それらの観測は質、量ともに進んでいて、この領域の諸現象への手がかりを蓄積しつつある。(ここでは

紙面の都合で詳しくは書けないが、OH メーザースペクトルの観測は最近全天にわたって詳しくなされるようになり、H II 領域—典型的OH電波源—他、4つのタイプのOHメーザーが分類されている。このうち、2つのタイプは、今年になって発見されたものである。第3図はアメリカの3カ所の電波天文台を結んで行なわれたH₂OのVLB観測の結果で、W 49におけるH₂O電波源の分布図である。各電波源の直径は1 a.u. 以下であり、これら13個の電波源を含む領域の拡がりは、約10,000 a.u. である。図に示されるように、これらの小電波源は、それぞれ個々の視線速度を持っている。これらはまた、独自に時間変動をしていて、その変動は強度のみでなく、視線速度、スペクトルの幅にも現われる。これらの物理量の変化は、明らかに互いに関連があるが、その解釈は簡単ではない。W 49のこのH₂O電波源の位置は、OH電波源のうちの1つと観測の誤差のはいいで一致しているが、詳しい相関はまだ測られていない。

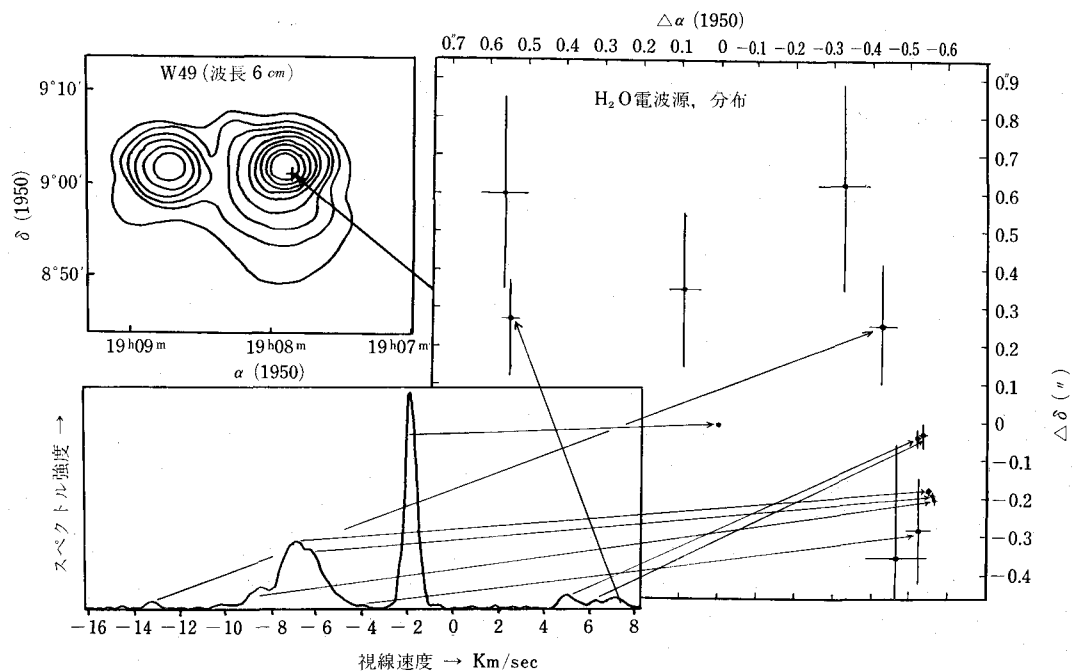
これら直径1 a.u. 以下のH₂O電波源が、実際に孤立した分子雲(ないしはプロト・スター)であるかどうかはその密集のしかたからみても疑わしい。数千 a.u. の大きさの分子雲があり、その中でH₂Oのメーザー現象が効果的におきるいくつかの部分が、たまたま我々から見えている、と解釈することもできる。

“熱い分子雲”では、OH、H₂Oの他、CO、CN、HCN、CS、H₂COなどが見つかっている。COは特に多量に存

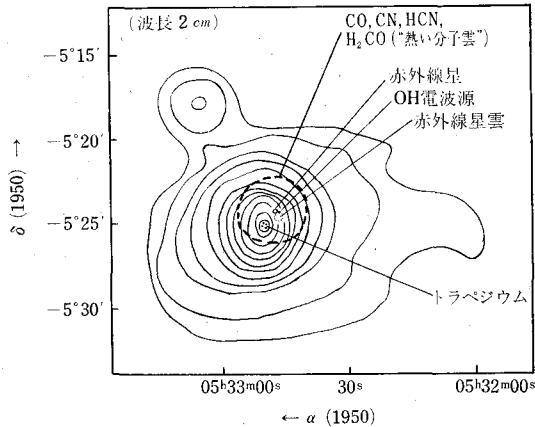
在し、興味あるデータを提供している。Ori A についてみると、これらの分子は、Ori A の連続電波(高温の電離ガスが出す)の中心部(トラペジウム・スターズの位置にあたる)ではなく、そこから10分角ほどずれたOH、H₂O電波源および赤外線源を中心として分布している(第4図)。さらに、H₂COの波長6 cm、および2 mmのスペクトル観測によれば、この分子雲は、Ori A 連続電波源の向こう側にあるらしい。2 mmのスペクトルは輝線で見えるのに、6 cmのスペクトルの吸収線はみえないからである。COの観測から、この分子雲は1 pc程度の拡がりを持ち、温度約50°Kと推定されている。

W 51における同様な分子雲のCOスペクトルによる観測の結果は、分子雲の直径約5 pc、温度20°Kで、CO分子の密度は1個/ccという驚くべき値を得ている。我々が通常用いる元素存在比をあてはめれば、この分子雲の水素分子密度は、 5×10^6 個/cc でなければならない。分子雲全体のCO分子の総質量は、100 M_☉ に達する。

ここでみてきたように、“熱い分子雲”は、実は“熱く”はなく、むしろ極めて“冷たい”。H₂OやOHのメーザー作用のおきている領域でも、温度は数百°K程度ないしそれ以下と考えられている。ここでは、環境が“熱い”のである。“熱い分子雲”につきもののOH、H₂Oのメーザー現象は、そのポンピング源がプロト・スターに起因すると考えられる。プロト・スターは、OH、H₂Oにメーザーをおこさせるだけでなく、分子雲全体にもさ



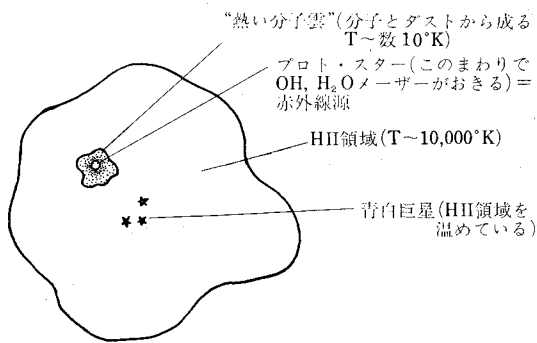
第3図 W 49 における H₂O メーザー電波源の VLB 観測。左下のスペクトルの各視線速度成分の位置を、矢印で示す。右の分布図の中心は、左上の図の印の場所である。



第4図 Orion A

さまざまな作用を及ぼしているにちがいない。“冷たい分子雲”では H_2O スペクトルはほとんど発見されていない。 H_2O がここでは氷になってしまっているとすれば、プロト・スターによって氷（もしくはダスト）が蒸発して水蒸気ができ、レーザー放射をくりかえしながらさらに分解されて OH 分子を形成すると考えられる。OH スペクトルの時間変化が、 H_2O におけるよりもゆっくりしたものであるのは、OH は H_2O よりも広く散らばってしまうからであるとする、大変都合がよいことになる。“熱い分子雲”では、“冷たい分子雲”にくらべて HCN, CS の存在比が極めて高いことも注目される事実である。（第5図に“熱い分子雲”のモデルを示した）

H II 領域によってより囲まれ、一方内部からプロト・スターによって温められている“熱い分子雲”は、やがて一部は解離・イオン化して H II 領域の一部となり、一部は一層収縮して新たなプロト・スターとなり、あるいはその周囲にあって惑星系を形成していくことになる。すでにかなり高度な有機分子を含むこの雲の内部は、収縮につれて一層密度を増し、より早く分子間の反応を進



第5図 “熱い分子雲”のモデル。H II 領域の電離にとりのこされた分子雲が収縮し、内部にプロト・スターを生じる。

めていこう。この化学的過程が、どのように、どの程度まで進んでいくか、興味深い。これら有機分子は、惑星上における生命にまでつながっていくであろうか。

4. 冷たい分子雲

H II 領域の中になく、従って外部から熱せられていない分子雲が、“冷たい分子雲”である。これは、銀河系内の至るところに分布している。その存在は、 H_2CO の 6 cm の吸収線、および OH の 18 cm の吸収線の観測によって知ることができる。

しかし、これら以外の他の分子のスペクトルは、銀河中心領域を除いては、“冷たい分子雲”中ではあまり観測されていない。これには、いくつかの原因が考えられる。第1には、新しく発見された分子スペクトルは、まだ観測が進んでいないため、比較的強度の弱いであろうこれらの領域までは、手がまわらないこと。第2に、銀河中心付近以外の“冷たい分子雲”では、分子密度が低く、観測に十分なほどの衝突励起がない(3°K 輻射場による平衡化にまけてしまう)可能性があることで、銀河電の一樣波の強い波長 18 cm の OH スペクトルと、3°K より低い異常励起状態にある H_2CO の波長 6 cm のスペクトルのみが吸収線として観測されているという点は、この可能性を高めるものである。

一方で、銀河中心領域は、星間分子の宝庫といえるほどで、現在までに発見された星間分子の中で、この領域でみつかっていないものは、CS ただ1つである。

電波の観測者たちが、新しい分子を発見しようと望むときは、まず電波望遠鏡を Sgr A にむけ、スペクトロメータを視線速度 +40 km/sec 付近に調整するだろう。その次に探されるのは、Sgr B2, 視線速度 +60 km/sec 付近である。この二つの場所には、あらゆる分子が存在しているように見える。これらの領域は、銀河中心から 100 pc 程度の至近距離にあり、またそのためと思われる特殊性もいくつかあげることができる。

“冷たい分子雲”では、OH は一般に吸収線として観測され、正常な励起状態を示す。 H_2O は観測されない(Sgr B2 に H_2O 電波源があるが、極めて弱い)。一方、HCCCN, NH_3 は、銀河中心付近では強く観測されているのに、他では全く見つからない。

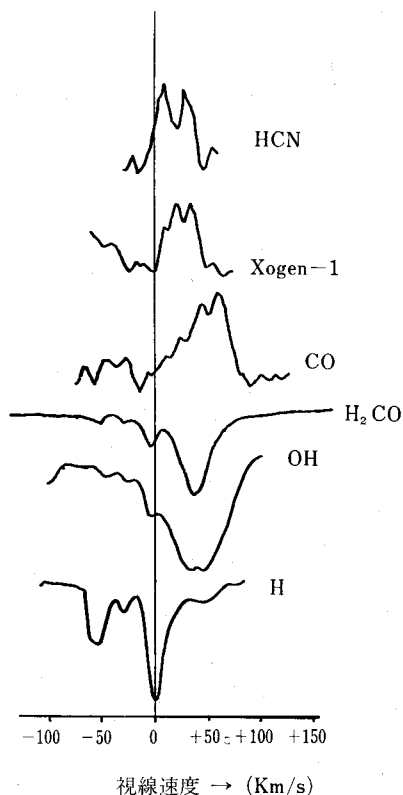
この“冷たい分子雲”の温度は、10~20°K と推定される。密度は、HCN や CO がかなり強い輝線を示す点から考えて、3°K の輻射による“3°K 化”に充分対抗しうるだけの衝突による熱の供給があるとすれば、 10^4 個/cc 以上の水素分子密度がなければならない。また、 H_2CO の異常吸収が衝突冷却のメカニズムによるものと仮定すると、水素分子密度は $\sim 10^6$ 個/cc となる。これらの値は、これまで考えられてきた H I 雲の密度 (~ 10 個/cc)

にくらべて非常に高い数字である。このように低温・高密度のガス雲は、すみやかに収縮して星を形成するであろう。“冷たい分子雲”は、H II 領域の母体ともいべきである。

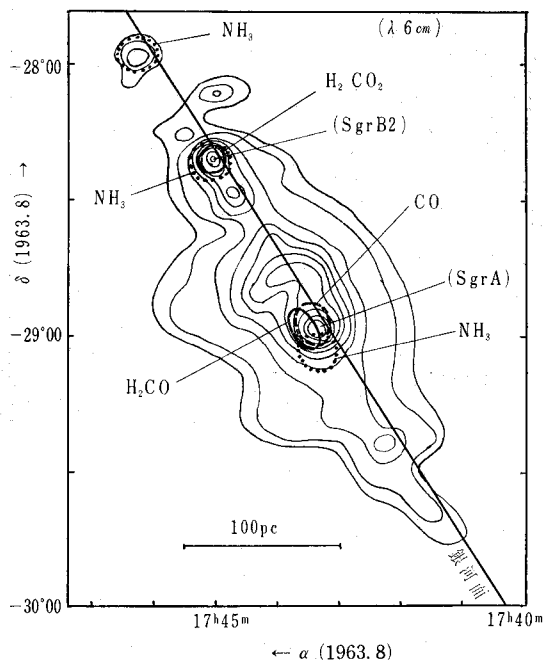
第6図に、H および各種の分子の Sgr A 方向におけるスペクトル・プロフィールを示す。これでも明らかなように、視線速度 +40 km/sec の分子雲には、中性水素原子はほとんど存在しない。この分子雲の中心は、銀河中心核 (Sgr A そのもの) から少しずれたところであり、従って赤外線強度中心 (Sgr A に一致) とも一致しない。さらに奇妙なことに、CO, H₂CO, NH₃ の分布が、それぞれ少しづつずれている (第7図参照)。第6図をみても明らかなように、各分子のスペクトルのピークは、+40 km/s 付近に一致してはいるが、もう少し細かい点ではくいちがっている。これらの事実を、どう解釈すべきだろうか。

5. 銀河中心をさぐる

銀河中心付近は、大変奇妙な場所である。何等かの強いアクティビティを持つことはたしかで、QSO やラジオ銀河の爆発につながって興味深い。しかし最近、



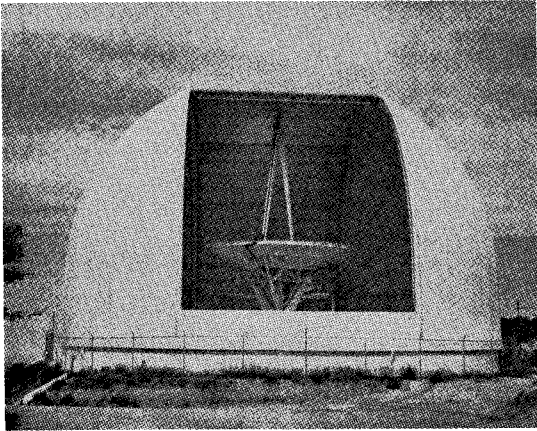
第6図 Sgr A 方向の“冷たい分子雲”における、各種の分子および水素 21 cm スペクトルのプロフィールの比較。



第7図 銀河中心領域と、分子雲の分布

でも銀河中心におっつける傾向もあるように見える。現実には、我々の銀河系の中心についての確かなことは何一つといってよいほどわかっていない。

分子スペクトルの観測事実からみても、銀河中心が極めて特異な状態を示すことは、すでに述べてきた。第6図からわかるように、Sgr A と我々 (地球) との間には、速度 40 km/sec で Sgr A にむかっておちこんでゆく巨大で冷たい分子雲が存在する。最近行なわれた H₂CO の干渉計による観測結果によれば、この分子雲は、銀緯のややマイナス側に位置して、銀河面内に拡がった構造をもっている。それは、銀河面内に、10 km/sec のオーダーの速さの自転運動を伴っているようである。この分子雲のスケールは 10~20 pc、質量は 10⁶ M_⊙ と計算される。このような分子雲は、現在、少なくとも2つの存在がわかっている。その運動の速度は、かなり大きなもので、おそらくはランダムな運動成分が主だろう。光でみることのできない銀河中心領域は、これまでは主として中性水素の波長 21 cm のスペクトル線の観測によって知られてきている。しかし、中心から 1 kpc 以内の領域では、分解能や、何よりも我々と中心の間に存在する多量の中性水素ガスにさまたげられて、確かなことはほとんどわからない。分子スペクトルでは、途中のじやまものはほとんどなく、また特に短波長では、分解能が格段にすぐれ、かつ銀河中心の連続電波源—Sgr A や Sgr B2 にもほとんどさまたげられることなく観測を行うことができる。銀河中心の分子雲の物理状態とダイ



第8図 “ゴールドラッシュ”の主演, キット・ピーク (米) の 11 mφ ミリ波望遠鏡

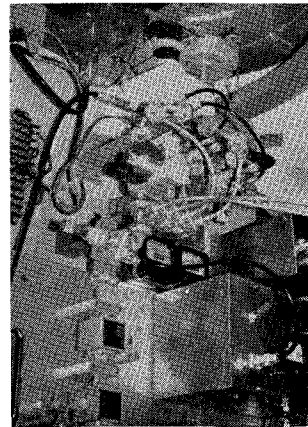
ナミックスについての、宇宙電波分光観測の今後の成果が期待される。

銀河中心領域に関連して重要なのは、ダストである。赤外線による観測で、銀河中心に波長 70μ 付近にピークをもつ、極めて強い赤外線源が存在することがわかった。その発生機構の1つの可能性として、銀河中心核をとりまく多量のダスト (たとえば、氷を主成分とする) による熱輻射があげられている (天文月報 64, 184 参照)。

一般に、星間分子とダストとは、深い関係があると考えられる。星間空間における分子の形成が、衝突によっては極めて困難で、ダスト表面での反応を媒介とする必要があるのではないかとされているからである。事実、HI 領域中のダスト雲と呼ばれる暗黒星雲 (ここでは、多量のダストが、背後の星の光をさえぎっている) 中からは、OH, H_2CO , CO スペクトルがみつかっており、その観測データからは、ダスト雲が極めて低温でかつ密度も高いと結論される。少なくとも、ダストと分子との共存関係が、我々の知り得るかぎりでは成り立っているようである。

星間分子が、ダスト表面で作られると仮定すれば、銀河中心領域の多量の分子は、それを作りだした多量のダストの存在を要求する。これは赤外観測の結果と符合するように思われるが、問題はいくつか残っている。

第1に、この多量のダストはどこからきたのか? 銀河中心付近では、ダストを効率よく作る機構が存在するのだろうか。たとえば、多量の赤色巨星が中心領域に存在するのか、または「銀河中心核」自身がダストを作り出すのか。もしくは、銀河内のダストが中心に集められるのか。第2に、前にふれたように、分子の分布と赤外線源の分布とは必ずしも一致していないようにみえる。この点は、注意深い観測が必要である。第3に、銀



第9図 東京天文台の 6 mφ ミリ波望遠鏡の受信器室にすえつけられたパラ H_2CO 用波長 4.1 mm スペクトロメーター

河中心の赤外線源をダストとするのは、QSO やセイファート銀河の赤外線 (外見上、我々の銀河中心と全くよく似た赤外スペクトルを示す) をもダストによるものとしなにかぎり (これは大変困難) 不自然に思われる。

我々は、「星間ダスト」の実体を全く知らない。まして、その表面での分子形成については、具体的なプロセスを正面からとりあげることもできないわけである。つかみどころのない、しかも銀河系内で大きな役割を果していると考えられるこの「ダスト」について、物性や反応の実験も含め、検討を深める必要にせまられているようだ。

6. 宇宙電波分光

最後に、星間空間における分子の生成、反応の過程についてふれておきたい。§4 で述べたように、分子雲では、各分子のスペクトルの強度分布は必ずしも一致していない。また、「熱い分子雲」にはなくて「冷たい分子雲」には存在するものや、その逆の例もある。これは、実際に分子がそこにあたりなかったりするのだろうか、それとも分子に対する励起状態のちがいの反映にすぎないのだろうか。

分子が場所によってあたり、なかったりする場合は、次の可能性がある。① 材料 (元素) の分子の場所によるちがい、② 生成条件のちがい、③ 反応過程の存在、④ 解離条件のちがい。

こういったこみいった問題には、反応や表面活性の専門家に登場願わねばならない。たとえば、「熱い分子雲」において、CO が CS, CN にくらべて極めて多いという事実に関しては、CO の結合エネルギーが大きいことに原因があり、OH が極めて少ない (元素存在量から推定

される値に比べて)のは、そのラディカルとしての不安定性、反応性によると考えることができる。しかし一方では、Sgr B2 に於て HCCCN が HCN より2ケタ以上も多いことの説明はつかないだろう。形成された分子が、その一生の間にどの程度“反応”の機会をもつかという点も大きな問題で、不安定な分子(OH や CN)が存在する事実からは、星間空間における相互作用の極端な少なさの結果、一度形成された物質は、どのように不安定なものであれ—たとえば“錯合体”ですら—かなり長期にわたって存在し、従ってそのスペクトルを検出することができるのではないかとも思われる。これは、星間分子の観測による分子諸定数の精度の向上とあわせて、分子構造、マイクロ波分光の分野にとっての新たな可能性である。

冒頭にのべたように、現在のところマイクロ波宇宙分光の観測は、ほとんどがアメリカ、なかんずくアリゾナ砂漠のキット・ピークに独占されている(第8図)。これは、ミリ波用のすぐれた望遠鏡と受信器が、他の世界各国において極めてたちおくれているためである。ここまで長々と書いてきた、多岐にわたる課題を処理していく

ためには、“世界で一台のミリ波望遠鏡”では、全くの不足である。ヨーロッパ諸国は、ミリ波に大きな興味を示しながらも、技術的基盤がうすいため、手を出しかねている。しかしその中でも、オーストラリア、フランスなどで、ミリ波装置建設の準備が進められている。

私達東京大学の宇宙電波グループは、約3年前から、東京天文台の6mφミリ波望遠鏡(1970年夏試験観測開始)によるミリ波領域の分子スペクトルの観測を計画し、今年の夏から試験観測に入った。現在はH₂COの未発見のスペクトル(波長4.1mm)を検出することを目指している。受信器の立体回路部を第9図に示した。

波長4mm付近には、SO₂、DCN、OCSの低励起状態での遷移など、未発見の分子やスペクトル線が多数ある。また波長1.3cm、3.3mm用のスペクトル受信器もそれぞれ準備されている。私達は順次これらをマウントして、観測の手を拡げていこうと計画しているが、いかにせん人手と時間(もちろん金も)の不足で、なかなか思うように進まず、キット・ピークとの差をちぢめられないのが現状である。

好評増刷発売中

火星

—観測と研究—

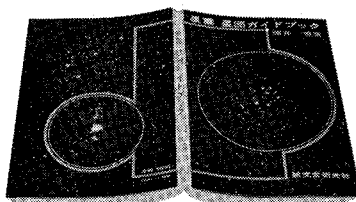
■天文ガイド臨時増刊 / B5判 / 122頁 / 定価480円

マリナー探査機による火星の写真、今季の観測についてのアドバイス、ベテラン各氏の観測経験の紹介、火星の地図、データなど火星に関する総合版です。

★主内容 本文 / 今年の火星大接近 / 最接近のころの火星面小・中望遠鏡で見る火星 / 今世紀の火星接近一覧表 / 口絵 / 火星のカラースケッチ / 花山天文台の標準火星地図 写真 / マリナー6・7号による火星写真

星雲星団ガイドブック

—小型カメラと小望遠鏡による星雲・星団の観測—



好評発売中

■藤井 旭著 / A5変型判 / 316頁 / 定価680円

天文ファンにとって人気のある星雲星団の写真撮影と観測についての入門書です。オリオン星雲など約120種の作例と、見つけ出すための星図を添え、撮影の方法や注意、小望遠鏡でながめる場合のヒントをくわしく解説した。星雲星団の写真集として満足できる本で、同じ著者の「天体写真の写し方」の姉妹編です。

誠文堂新光社

東京・神田錦町1の5 振替東京6294