

星間分子スペクトル線の探査

鈴木博子*・大石雅寿*

1. はじめに

野辺山にきた多くの外国人が驚き、感心するのは、45 m 鏡の集光力や高分解能もさることながら、分光システムの優秀さである。広帯域音響光学型分光計を用いると、一度に、2 GHz もの周波数域を 250 kHz の周波数分解能でカバーして、16,000 チャンネルの情報を得ることができる。「電波スペクトルを可視光のスペクトル観測のようにとりたい」という夢が実現したものと言える。この分光計の能力をフルに生かした NRO プロジェクト、「星間分子スペクトル線探査」は 1982 年 5 月より始動、着々と成果を挙げている。図 1 はその結果のほんの一部である。活発な星形成領域であるオリオン KL 天体、銀河中心の巨大分子雲 Sgr B2、質量放出のさかんな炭素星 IRC+10216、暗黒星雲の中でも高密度な TMC 1、それぞれの天体の特徴がよく現れている。

このようなスペクトル線観測によって、天体の化学的特徴が明らかになるだけでなく、速度構造や励起の解析から、分子が存在する領域の動的構造をもつかむことができる。

本稿では、これまでに 40 GHz 帯のサーベイを終えた 2 つの天体——オリオン KL と TMC 1——をとり上げる。前者では、複雑な動的、化学的構造が多くの分子線の解析によって明らかになった。後者は、静的で単一に見える分子雲であるが、星間の化学進化の特徴をよく表わしていると考えられている天体である。

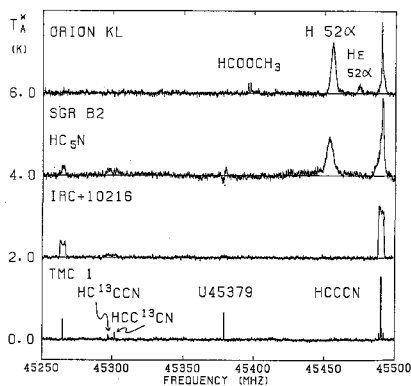


図 1 色々な天体のスペクトル

2. オリオン KL

オリオン KL は、オリオン大星雲の中にある OB 型星の形成の場である。この天体は、地球からの距離が約 500 pc と近いために、星の形成の様子を調べるのにたいへん都合のよい対象で、これまで多くの研究が行なわれている（詳しくは、本号の長谷川哲夫氏の記事を参照のこと）。

我々のオリオン KL に向けての分子スペクトル線探査は、1982 年 5 月に開始された。これまでの観測周波数帯は、34.25~50.00, 83.50~84.50, 86.00~91.50 GHz 及び、96 GHz, 109 GHz 付近のそれぞれ 400 MHz ずつである。これ以外の周波数帯の観測も進みつつあるが、本稿ではふれない。積分時間は、おおむね 3000 秒であり、得られた平均雑音レベルは、約 70 mK であった。従って、スペクトル線のアンテナ温度が約 0.2 K よりも高ければ、本物の信号であると判定できた。

このようにして検出したスペクトル線が、どの物質からでどの遷移であるかを決定することを同定というが、これが大変な作業なのである。同定するためには、星間分子として存在すると考えられる分子のいろいろな遷移についての情報を集めたデータベースが必要である。そのために、名大の斎藤氏、化技研の松村氏、富山大の高木氏らの協力を得て、多くの分子のマイクロ波分光のデータベースを入手することができた。このデータベースと観測データをつき合わせることで、総計 215 本のスペクトル線を検出することができた。その内訳は、180 本が 19 種類の星間分子からの分子線、28 本

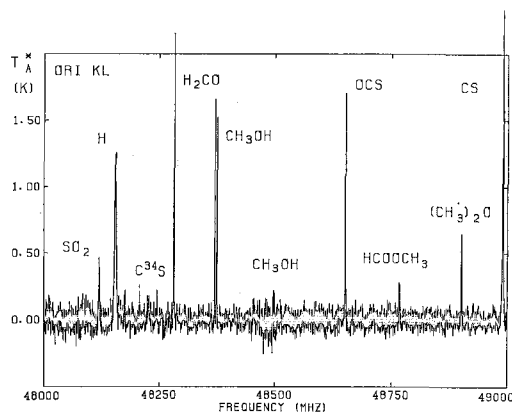
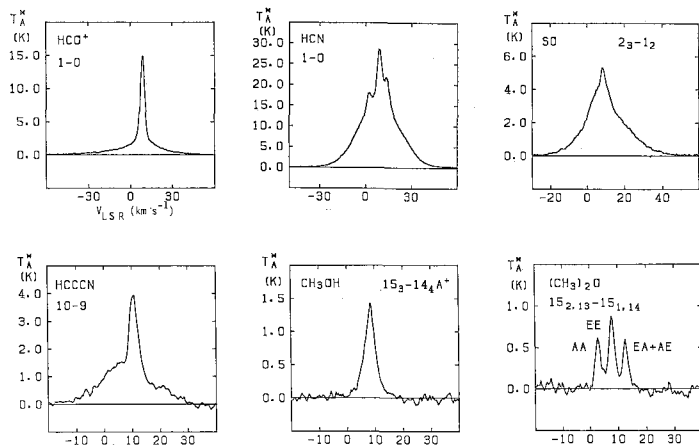


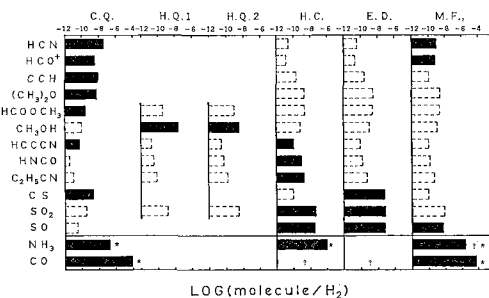
図 2 オリオン KL の 48~49 GHz のスペクトル

* 東京天文台 Hiroko Suzuki, Masatoshi Oishi: Molecular Spectral Line Survey



◀ 図 3 いくつかの分子のスペクトル例

▼ 図 4 各速度成分の分子の組成



が水素やヘリウムの再結合線，そして残り 17 本は，正体不明の未同定線 (U-line) である。

図 2 は，48~49 GHz のスペクトル線アトラスである。非常に簡単な分子 (CS や OCS) から，複雑な有機分子 (HCOOCH₃ や (CH₃)₂O) まで，いろいろな分子が存在することがわかる。有機化学を専攻している人から見たら，高々 8 原子や 9 原子分子で複雑な分子と言うのはおかしいかもしれないが，星間分子としては，かなり複雑なほうである。

さて，図 3 に，いくつかの分子のスペクトル線の例を示した。横軸は視線速度である。スペクトル線の形や線幅が，分子によって，ずいぶん異なることがおわかりいただけるであろう。スペクトル線の形を決定する要素は，大きく分けて 2 つである：(1) 分子のエネルギーレベルの超微細構造，分子の内部回転や，遷移のエネルギーレベル。(2) 分子が存在している領域の物理的，化学的環境 (速度構造，分子の組成，励起温度など)。前者は，実験室における測定や量子力学による計算から，予めわ

かっていることである。従って，検出したスペクトル線を解析すると，分子雲内のいろいろな物理的，化学的環境を知ることができるのである。

まず，各スペクトル線内に含まれている速度成分を分離するために，マルチガウシアンフィッティングを行った。これにより得られた速度成分の視線速度 (V_{LSR}) 及び線幅 (ΔV) を表 1 に示す。このようにして速度成分に分離した後，その速度成分から出ている各分子のスペクトル線のアンテナ温度から，LTE の仮定をして，分

表 1 オリオン KL の各速度成分の観測から決まるパラメータ

Component	V_{LSR} (km s ⁻¹)	ΔV (km s ⁻¹)	T_{rot} (K)	Molecules (number of lines)
Hot and Quiet 1 (H.Q. 1)	~9	~4	~100	CH ₃ OH (22) (CO, HCN, HCO ⁺ , CS, etc.)
Hot and Quiet 2 (H.Q. 2)	~4	~4	~160	CH ₃ OH (8)
Cold and Quiet (C.Q.)	~9	~(2-4)	~(20-40)	HCO ₂ CH ₃ (33), HCCCN (4)
Hot Core (H.C.)	~6	~(10-20)	~160	SO ₂ (10), HNCO (5), C ₂ H ₅ CN (18), (SO, NH ₃)
Expanding Daughnut (E.D.)	~(15-20) { ~(-7 -0)}	~15	~(120-140)	SO ₂ (7), SO, (CS, HCN, H ₂ CO)
Molecular Flow	~9	≤100	?	(CO, HCO ⁺ , SO)

子の回転準位の分布温度 (T_{rot}) を求めた. T_{rot} は, 同じ速度成分内では, 分子によって大きなばらつきはなく, ほぼ, その領域の温度を表していると考えられる. そこで, この T_{rot} と V_{LSR} , ΔV による 3 次元的な分類を行った (表 1).

H.Q. 1, H.Q. 2 及び C.Q. は, 今までは, まとめてスパイク成分あるいは回転ディスクと呼ばれていたものに対応しているが, 我々の解析により, 3 成分から成ることがわかったものである. H.C. は, アンモニアの観測から考えられていた温度よりも, やや低い温度を示している. E.D. は, 今までは, SO でしかその存在が知られていなかったが, SO₂ でも見えることがわかった.

T_{rot} を求めると, 次は, 各分子の柱密度を導出することができる. 各分子のそれぞれの速度成分における柱密度と, 水素分子の柱密度の比 (組成比) の対数を図 4 に示す. この図は, ディスク成分には, 簡単な分子やメタノールが豊富に存在するが, H.C. や E.D. では, むしろ複雑な有機分子や S を含んだ分子が多い, ということを示している.

このことは, 分子生成の面から, 次のように考えると説明できる: H.C. や E.D. はオリオン KL の活動中心である IRc 2 からの, 大きな質量放出の影響を強く受けた, O-rich の環境下における化学反応によって分子が生成されている. 一方, ディスク上では, IRc 2 の質量放出の影響はほとんどなく, イオン-分子反応によって, 多くの分子が生成されている.

このような, 物理・化学両面からの解析は, オリオン KL という天体を理解するためだけでなく, 星間分子の生成理論に対して観測的制約を与える, という意味も含めて, 非常に重要である.

3. TMC 1

牡牛座の方向, 我々から 100~150 pc の距離には多くの暗黒星雲が存在している. その中でも TMC 1 (Taurus Molecular Cloud 1) は分子線に富んでいる. 一連の直鎖炭素分子, HC₃N, HC₇N, HC₉N が発見されて注目を集めた. 暗黒星雲は一般に熱源 (星) を内包していないため, 10 K 程度の極低温で, 密度もせいぜい 10⁶ 個/cc にすぎない. 従って活性化エネルギーを要する反応や, 3 体反応, 固体 (宇宙塵) 表面からの蒸発がほとんど起こらず, イオン-分子反応を中心とした典型的な「星間化学」が進行している場と考えられている. HC₉N に至る分子進化の過程を明らかにするにはできる限り化学組成を把握する必要があるが, 我々以前にスペクトル線探査が試みられた事はなかった.

それは暗黒星雲の様に静的な雲では, 速度幅がせまく (0.3~0.7 km s⁻¹), 周波数分解能を上げなければ検出し

にくく, 従って観測する周波数帯域を広くとれなかった (チャンネル数はせいぜい 500 個程度の事が多い) からである. 我々の広帯域音響光学型分光計を用いた探査では速度分解能は 1.5~2.1 km s⁻¹ (35~50 GHz に対して) となり, 輝線はほとんど 1 チャンネルに入ってしまった 1/2~1/4 程度の強度に落ちるが, 長時間積分する事で, $T_R \geq 0.6$ K の輝線はほぼ探査する事ができた. こうして検出できた輝線については事情の許す限り, 高分解能音響光学型分光計 (周波数分解能 ~37 kHz) でプロフィールを観測した.

35~50 GHz の探査をほぼ終えて, 検出, 確認した輝線は 32 本 (ブレンドした線は 1 本と数える. 以下同じ), そのうち 28 本が既知の星間分子 (HCCCN, C₄H, HC₃N, HCS⁺, HNC, CS, CH₃OH; 同位元素も含む) からのものと同定された. 既知分子とは言え, ほとんどが初めて観測された線スペクトルであった. また CH₃OH は暗黒星雲で初めての検出である. 残りのうち 1 本は UMAS のアーバイン教授と協力して新星間分子 CCCO (一酸化三炭素) の $J=5-4$ 遷移をねらってとらえたものである.

スペクトル・データ・ベースと照合しても未同定の線が 3 本残っていたが, 最近 45756 MHz の未同定線が C₃H₂ (シクロプロペニリジン) の $J_{K-1, K+1}=2_{1,1}-2_{0,2}$ 遷移である事がサデウスらの実験で明らかになった. これは星間雲で初めてのリング (三角形) 状分子である. この未同定線については我々も室内実験を計画し, 分子科学研究所の協力研究として手がけるところであっただけに, 一足先を越された形となった. TMC 1 の条件下で, 40 GHz 帯で強い輝線を出すのは単純な分子であろうという我々の予想は適中した. 残り 2 本の未同定線 (図 1 の U 45379 はその 1 本である) にも, また何本かの未確認の輝線についても, データ収集, 実験, 理論の

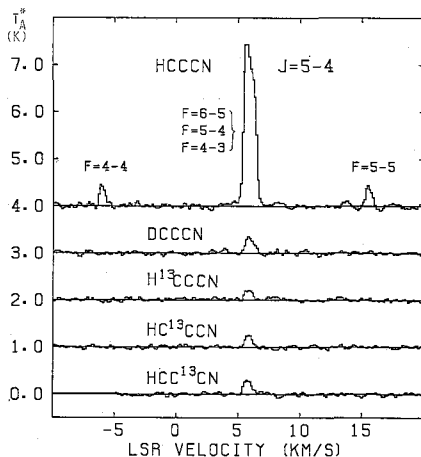


図 5 シアノアセチレン $J=5-4$ 遷移のいろいろ

各面から同定の努力を続けているところである。

9種類、約30本の線スペクトルは少ないと思われるかもしれないが、線スペクトルのない部分を明らかにした事も重要な事である。その範囲にも無数の分子スペクトル線は対応しており、それらの上限値を設定できたわけである。その中には CCO, CCN, 等の星間化学のキ一分子が含まれている。

一種の分子が何本もの輝線を出している事を利用して、オリオン KL と同じ様に励起機構を解析する事ができる。図5はその一例で、シアノアセチレン (HCCCN) の $J=5-4$ 遷移のいろいろなプロファイルである。

$V_{LSR} \sim 6 \text{ km s}^{-1}$ 付近に出ているのが主な超微細構造線 ($F=6-5, 5-4, 4-3$ のブレンドしたもの) である。すぐに気がつくのは同位元素を含むものが、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比や、D/H 比から期待される強度より非常に強い事である。例えば ^{13}C は太陽系内では ^{12}C の約 1/80 である。これは強い輝線 (HCCCN の $J=5-4$ 主成分) の光学的厚みが大きくて、飽和励起状態に近くなっている事が主な原因である (DCCCN については化学的凝集もある)。HCCCN の $F=4-4$ 成分や $F=5-5$ 成分が理論よりも強いのも同様に説明できる。HCCCN の $J=5-4$ は光学的厚みが 10 以上であろうと推定できる。

光学的に非常に厚いのは HCCCN に限らない。CS, C^{34}S , C^{33}S のデータからも、また HC_3N の色々な回転遷移の解析からも、今までに考えられていたよりはるかに大きな厚みが導出される。

可視光では特に際だった事もない暗黒星雲の TMC 1 で、多くの分子が検出され、一時は特殊な雲ではないかと見る向きもあったが、どうやらその光学的厚みで特徴づけられそうである。光学的厚みの要因としては高密度、幾何学的厚さ、均一な速度場、分子の存在量などが考えられる。当初めずらしかった HC_3N , HC_7N が他の高密度暗黒星雲でも受かっている現在、TMC 1 が化学的に非常に特殊であるという根拠はなく、我々に与えられた絶好の観測点であると言う事ができよう。

初のリング分子 C_6H_2 の登場は一応の理解がなされていた星間化学の流れに一石を投じるものである。残りの未同定線も単純な構造の新分子である可能性が高く、同定されれば化学進化のミッシング・リングを埋める期待がかかっている。

☆ ☆ ☆

☆ ☆



D. Reidel Publishing Company

新刊

RADIO STARS

Proceedings of a Workshop on Stellar Continuum Radio Astronomy held in Boulder, Colorado, U.S.A., August 8-10, 1984

edited by

ROBERT M. HJELLMING
National Radio Astronomy
Observatory, Socorro,
New Mexico, U.S.A.

DAVID M. GIBSON
New Mexico Institute of Mining
and Technology, Socorro,
New Mexico, U.S.A.

ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE

LIBRARY 116

432 pp. 1985, D. Reidel Publishing Company
Cloth ¥16,500 ISBN 90-277-2063-0

Studies of stellar radio emission became an important field of research in the 1970's and have expanded to a major field of radio astronomy with the advent of new instruments such as the Very Large Array in New Mexico and transcontinental telescope arrays.

This volume contains papers and discussions from a workshop on stellar continuum radio astronomy held in Boulder, Colorado, and is the first book on the rapidly expanding field of radio emission from stars and stellar systems. Subjects covered include the observational and theoretical aspects of stellar winds from both hot and cool stars, radio flares from active double star systems and red dwarf stars, bipolar flows from objects in star-forming regions, and the radio emission from X-ray binaries.

REPORTS ON ASTRONOMY

Transactions of the International Astronomical Union Volume XIXA

edited by

RICHARD M. WEST *General Secretary of the I.A.U.*

PUBLICATIONS OF THE INTERNATIONAL
ASTRONOMICAL UNION, TRANSACTIONS XIXA

736 pp. 1985, D. Reidel Publishing Company
Cloth ¥21,000 ISBN 90-277-2039-8

Containing reports by IAU Presidents of Commissions, covering the period July 1981 to June 1984, this volume constitutes an exhaustive and unique record of astronomical research during this interval.

MAGNETISM, PLANETARY ROTATION, AND CONVECTION IN THE SOLAR SYSTEM: RETROSPECT AND PROSPECT

In Honour of Professor S. K. Runcorn

edited by

W. O'REILLY *The University of Newcastle-upon-Tyne, UK*

280 pp. 1985, D. Reidel Publishing Company

Cloth ¥14,000 ISBN 90-277-2050-9
Reprinted from *Geophysical Surveys Volume 7, 2*
and 3

In April 1983, a conference was held in the School of Physics at the University of Newcastle-upon-Tyne to celebrate the 60th birthday of Professor Stanley Keith Runcorn and his several decades of scientific achievement. This special issue of *Geophysical Surveys* is derived mainly from the papers given at the meeting. The story starts in the late 1940s when the question of the origin of the magnetic field of the Earth and such other heavenly bodies as had at that time been discovered as having a magnetic field, was exercising the minds of several scientists, notably P.M.S. Blackett at Manchester, W.M. Elsasser at the University of Pennsylvania and E.C. Bullard at Cambridge. Two alternative mechanisms were proposed. In one the magnetic field was in some way connected with the distributed angular momentum of a rotating body; in the other, electric currents in conducting parts within the body were proposed as the source of magnetic field.

D. Reidel Pub.
日本総代理店



株式会社 ニュートリノ

港区赤坂8-4-7カームビル107 TEL (03)405-6137(代)