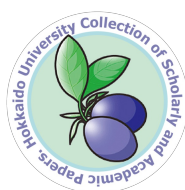




Title	星周雲からdiffuse cloud への分子供給を捉える実験室分光と宇宙電波観測
Author(s)	荒木, 光典
Citation	低温科学, 78, 35-46
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.35
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77764
Type	departmental bulletin paper
File Information	07_p035-046.LT78.pdf



星周雲から diffuse cloud への分子供給を捉える 実験室分光と宇宙電波観測

荒木 光典^{1)*}

2019 年 10 月 31 日受付, 2019 年 11 月 15 日受理

晩期型星の星周雲から diffuse cloud への分子の供給過程を明らかにするため, diffuse cloud の分子による可視光吸収線 Diffuse Interstellar Bands (DIBs) に着目し, 化学組成の解明を試みた. そのためには, 星間分子の実験室生成とそのスペクトルの DIBs との比較が必要である. そこで, 星間分子生成装置と Cavity Ring Down 分光装置を開発し, DIBs 候補分子であるベンゼン誘導体ラジカル (チオフェノキシラジカル, フェノキシラジカル) の実験室分光測定を行った. その結果, 電子遷移の波長が得られ, これら 2 つのラジカルは DIBs の候補から除外されることになったが, 同時に今後の天文観測による検出が可能になった. また, 直線炭素鎖分子 C_7H と HC_3N の宇宙電波観測も行い, C_7H を分子雲で初めて検出することができた.

Laboratory spectroscopy and radio astronomical observations to reveal transportation of molecules from circumstellar envelopes to diffuse clouds

Mitsunori Araki¹

To reveal the transportation of molecules from circumstellar envelopes to diffuse clouds, the chemical composition of diffuse clouds needs to be investigated. Diffuse interstellar bands (DIBs) are optical absorption bands of molecules in diffuse clouds, and their origins have not yet been identified except for in one special case. To identify the origin of DIBs, we have developed an interstellar molecule production apparatus and a cavity ring-down (CRD) spectrometer. The benzene derivative radicals C_6H_5S and C_6H_5O produced in this apparatus were observed using the CRD spectrometer. The obtained transition wavelengths of these radicals can be used to identify DIBs that have not yet been observed. Further, we investigated the carbon-chain molecules C_7H and HC_3N in space using radio telescopes, and C_7H was first detected in molecular clouds.

キーワード: 星間分子, Cavity Ring Down 分光法, 炭素鎖分子, C_7H , Diffuse Interstellar Bands
interstellar molecule, cavity ring down spectroscopy, carbon chain, C_7H , Diffuse Interstellar Bands

1. はじめに

星間空間における分子の化学進化が地球外有機物を生み出し, それらが彗星衝突により原始地球に運ばれ, 生

命誕生の元となったと考えられている (図 1). 宇宙の物質循環において, まず, 晩期型星から出た元素がその周りで星周雲 (本稿で星周雲とは晩期型星の星周雲を示す) を作り, そこで分子が生成される. それらはやがて宇宙空間に拡散し, 星間紫外線で破壊され原子に戻り, 原子ガス領域を作る. それらが集まって diffuse cloud を形成し, その一部が集まって暗黒星雲と呼ばれる濃い分子雲を形成する. そして, その中で星形成が始まる. 彗星衝突により原始地球に運ばれた有機物やその原料となった分子は暗黒星雲で生成されたとする説明が一般的である. しかし, 厳密にはある程度の星周雲の分子が破壊されずに diffuse cloud への供給されている (例えば Ziurys,

*連絡先

荒木 光典

東京理科大学 総合研究院

〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

e-mail: araki@rs.kagu.tus.ac.jp

1) 東京理科大学 総合研究院

Research Institute for Science and Technology

Tokyo University of Science, Noda, Japan

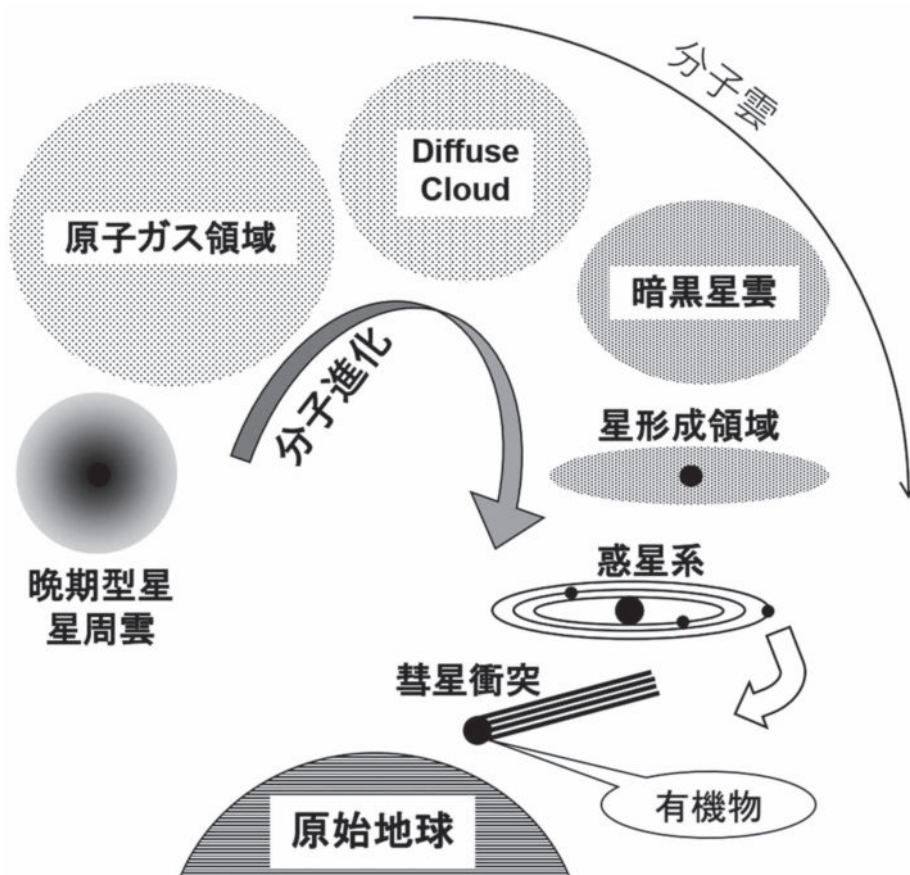


図1：分子雲進化

2006). ところが, 2010 年に星周雲でフラーレン C_{60} が発見され (Cami et al., 2010), 続く 2015 年にフラーレンイオン C_{60}^+ (Campbell et al., 2015, Campbell and Maier, 2017) が diffuse cloud で発見されたために, 星周雲から diffuse cloud への分子供給がこれまで以上に注目されるようになった. 星周雲には多環芳香族化合物も含めて多くの大型有機物の存在が推定されているため, これらの diffuse cloud への供給はそれ以降の分子雲進化に大きな影響を与える. それ次第では, 生命の起源たる有機物の起源は暗黒星雲ではなく, 星周雲まで遡ることになる. すなわち, 生命のゆりかごの時間的・空間的スケールがもっと大きいかもしれない. 例えば, 暗黒星雲から星形成までは数百万年スケールだといわれているが, 星周雲からの時間経過は 10 億年単位で考えなければならない.

この diffuse cloud ではこれまで小さな分子しか発見されてこなかったが, ここでの化学組成の情報が星周雲から diffuse cloud への分子供給の解明の鍵となる. ところが diffuse cloud では双極子モーメントを持っている分子は放射冷却により, 極めて低温になってしまう. こうなると電波を放出せず発光としては検出できず, 吸収で観測するしか方法はない.

幸い diffuse cloud は希薄であるがゆえに可視光を透過する. もし背後に光源となる恒星が存在すると可視光領域の吸収スペクトルが観測される. 現在それらは Diffuse Interstellar Bands (DIBs) と呼ばれて 600 本程度観測されている (図 2). これらバンドは 1919 年の 9 月に最初に観測され, すでに 100 年を迎えた (Heger 1922). ところが, 本プロジェクトを始めた当時まだ全く解明されていなかった (2015 年以降 5 本のみ同定, Campbell et al., 2015, Campbell and Maier, 2017). このバンド群の同定が diffuse cloud の化学組成の解明のためには必須である.

既に宇宙では観測されているため, 同定の鍵となる研究は実験室での星間分子の生成とその電子遷移の測定である. 分子の電子遷移の波長は各分子で固有であるため, その波長が複数のバンドにおいて 5 桁の精度で一致すれば, DIBs の同定となる. 本プロジェクトでは, 星間分子生成装置と Cavity Ring Down (CRD) 分光装置を開発し, その同定を試みた (第 2 章, 第 3 章).

ここで, diffuse cloud の分子のある程度は晩期型星の星周雲の分子の生き残りであるはずである. では, 実際に, ある分子雲進化段階の分子が次の分子雲進化段階で

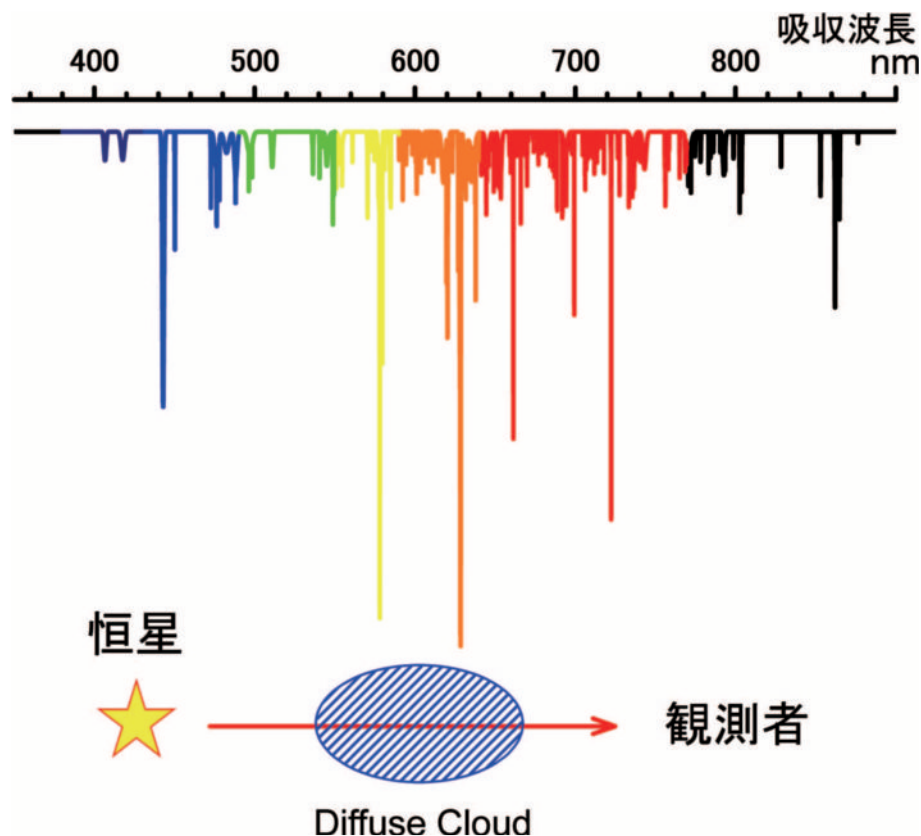


図 2 : Diffuse Interstellar Bands

も生き残っている例があるのだろうか？この疑問に答えるために、本プロジェクトでは、暗黒星雲の分子が星形成領域でも生き残っているかを考えた。そこで、電波観測から星形成領域の化学組成を探った（第4章）。

2. 実験室分光装置の開発

DIBs は吸収スペクトルであるため、実験室でも吸収で測定することが望ましい。レーザー誘起蛍光法などの発光分光法は、大型の分子に用いると、発光せず全く検出できなかったり、検出できても振動構造の低波数側に限られたりする傾向にあり、得られるスペクトルはDIBs との比較には適さない。そこで、本プロジェクトではCRD 分光法（O'Keefe and Deacon, 1988）を採用して、その分光装置を開発した（図3, Araki et al., 2014）。

2.1 Cavity Ring Down 分光装置

CRD 分光法は波長可変のレーザー光を2枚のミラーからなるキャビティに入射し、ミラー間で多重往復させる。レーザー光はミラーから少しずつ漏れ出し、その強度は指数関数的減衰を示し、その減衰時間 τ （リングダウン時間）がミラー間の物質の吸収係数に比例する。

τ は最大で 100 マイクロ秒（通常 20 マイクロ秒）に達し、レーザー光のミラー内の多重往復から高感度の吸収スペクトルを得ることができる。

本プロジェクトの装置では、2枚のミラーの間の距離を 70 cm とした。ミラーの角度を調整するためのフォルダーは市販のステンレス蛇腹管とマイクロメータを用いて作成した。レーザーは Lambda Physics 社の FL3002 を用いた。キャビティから出た光は、光電子増倍管で検出した。レーザー光は 10 Hz であるが、用いたオシロスコープ（Tektronix TDS2012C）の USB インターフェースでの転送速度は最大 4 Hz であったため、いったんオシロスコープ内で4回積算をした後に、パソコンに取り込んだ。パソコン内では、National Instrument 社の LabView によりリングダウンの取得を行った。同分光法の多くの装置では得られたリングダウンを直接 τ に変換している（例えば、Motylewski and Linnartz, 1999）。本装置では、プログラム内で直接 τ に変換するのではなく、いったん対数を取り一次関数に変換し、それを見ながらミラー調整をできるようにした。これは、理想的には指数関数カーブであるべきリングダウンは、実際にはミラーの角度に依存して歪んでいるためである。最後にその一次関数から τ を求めた。このプ

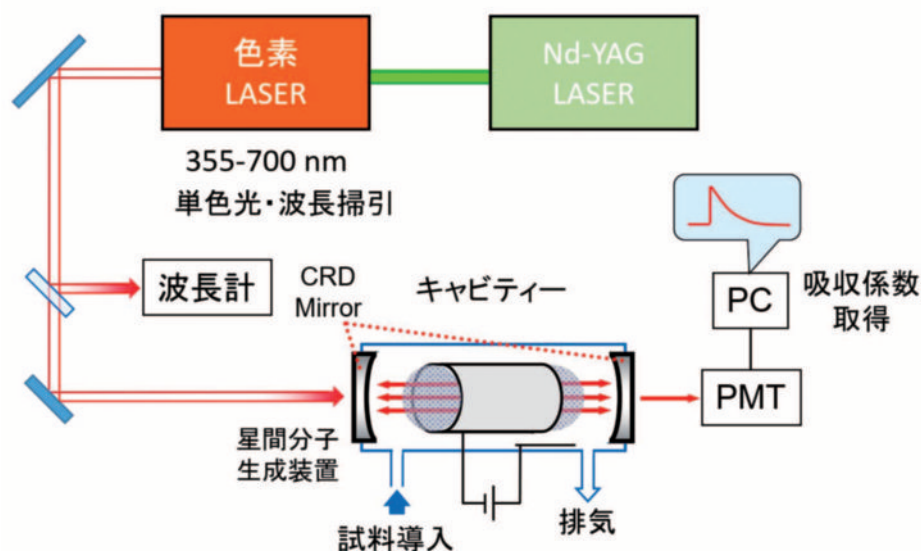
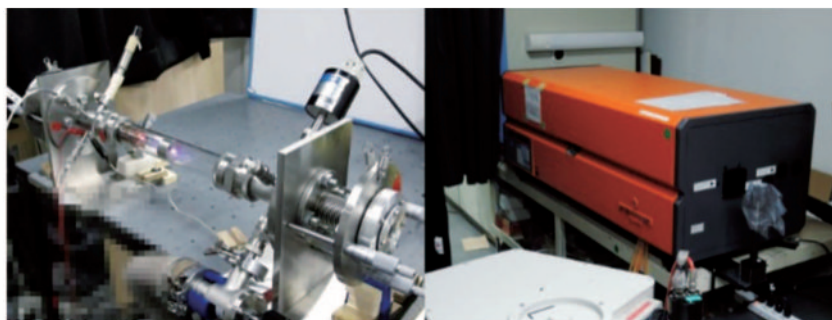


図3：Cavity Ring Down 分光装置

上左：星間分子生成装置（写真中央），上右：色素レーザー Lambda Physics FL3002，下：装置図

ロセスをすべてパソコン上で表示できるようにした（図4）。これにより、リングダウを理想的な指数関数カーブに近づけるミラーの角度調整が可能になった。

2.2 星間分子生成装置

DIBsの原因となる分子を実験室で生成するために放電を用いた星間分子生成装置を作成した（図5）。星間分子の生成には実験室で疑似宇宙を作る必要がある。とはいえ、正確に似せることは不可能であるし、正確に似せた宇宙での分子の生成を延々と待つことも不可能である。そこで、疑似宇宙といっても、真空、プラズマ、紫外線、電子衝突などの環境はできる範囲でのみ再現し、かつ目的の分子に必要な前駆体は過剰に供給することになる。そこで用いる方法が真空（正確には減圧環境）中の放電である。ここで、分光測定するためには常に一定量の分子を生成し続ける安定な放電が必要である。スパーク放電のような時間的に一定でない放電は用いることができない。そこで、グロー放電を用いた。電極には、

イオンやラジカルを強力に生成することのできるホロカソード（中空陰極）を用いた。これは、電極内で電子が多重往復するために、電子と分子の活発な衝突が可能である。

セルは、パイレックスのガラス管の両端にミラーを設置し、その中心にホロカソードを設置し、それを前後から囲むように陽極を2つ設置した（図4は片方だけの場合）。2段式の油回転ポンプを用いて真空引きを行った。

高圧電源は、AC 100 V をスライダックに入力して任意の電圧に調整できるようにし、それをトランスに入力し2倍に昇圧した。このトランスは昇圧だけでなく、同時に漏電防止の役割も果たす。トランスからの出力を5段式のコッククロフト・ウォルトン回路を用いて昇圧した。今回は最大 2000 V の放電を可能にした。この直流電圧を高速高圧スイッチにより高圧パルスとして上記の電極に導いた。

ここで、レーザー光が照射されるより前に高圧パルスが印加され放電が開始しされていなければ、分子の測定

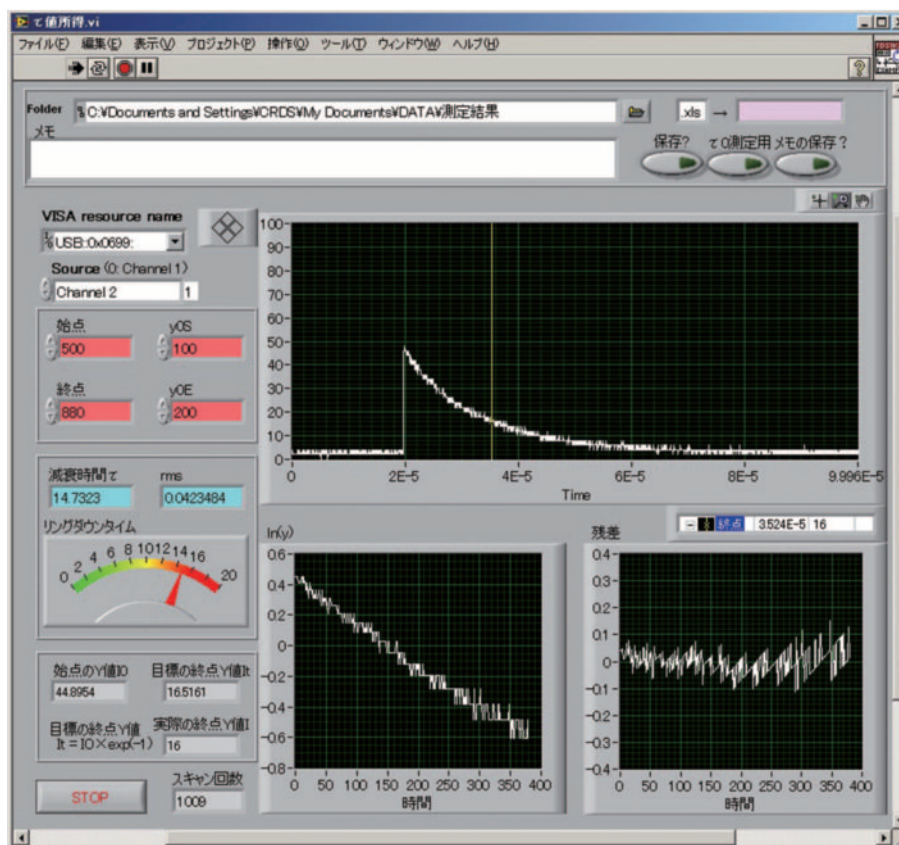


図4：LabViewによるリングダウン処理システム

上：リングダウン波形，下中央：その対数を取ったもの（理想的には直線になる．階段状の構造は量子化ノイズ），下右：さらに傾きを除去したもの（理想的には水平の直線になる）

はできない．一つ前のレーザーパルスのトリガーを使って，目的のレーザーパルスのための放電を開始しなければならない．そこで，TTLパルス（信号用の5Vの直流パルス）を3段階に組み合わせた遅延回路も開発した．

この星間分子生成装置の原理はこれまでに分光学で一般に使われてきたものと同じである．しかし，最終的に生成装置を組み上げると，セルや電極のサイズと材質・電源内の各種抵抗・排気方法・および制作者でも把握できない複雑な要素によって，装置は強い個性を持つ．その個性を見極め（あるいは調整し）ながら，分光測定を行うことになる．

3. 分光測定

3.1 チオフェノキシラジカル

多環芳香族化合物はDIBsの有力候補として注目されている．さらに，これまで硫黄を含む星間分子が数多く発見されていることから，この元素を含む芳香族化合物のDIBsとしての可能性を検討する必要がある．特に Shibuya et al. (1988) によって報告されているチオフェ

ノキシラジカル (C_6H_5S) の0-0バンド（振動を含まない純粋な電子遷移）は，これまで報告された517.6 nmのDIB (Hobbs et al., 2008, 2009) にかなり近い波長にある．本プロジェクトでは，チオフェノキシラジカルを放電により生成し，それらの電子遷移のスペクトルを測定し，DIBsの比較検討を行った (Araki et al., 2014)．

チオフェノキシラジカルは，長さ2 cmのステンレス製のホロカソードを用い，チオフェノール (C_6H_5SH) 0.25 Torrのみで1000 Vの放電により生成された．チオフェノキシラジカルの電子遷移の波長 (Shibuya et al., 1988) はこれまでに報告されているため，0-0バンドの回転プロファイルと遷移波長を高分解能で精密測定した (図6)．

観測された回転温度は300 K程度であった．DIBsと比較するためには，低温での回転プロファイルと波長を正確に知る必要がある．そのためには励起状態と基底状態の回転定数が必要である．基底状態の回転定数は量子化学計算 (B3LYP/cc-pVTZ) から求められた．励起状態の回転定数は，測定から得られた回転プロファイルと基底状態の回転定数から求められた．これら回転定数を

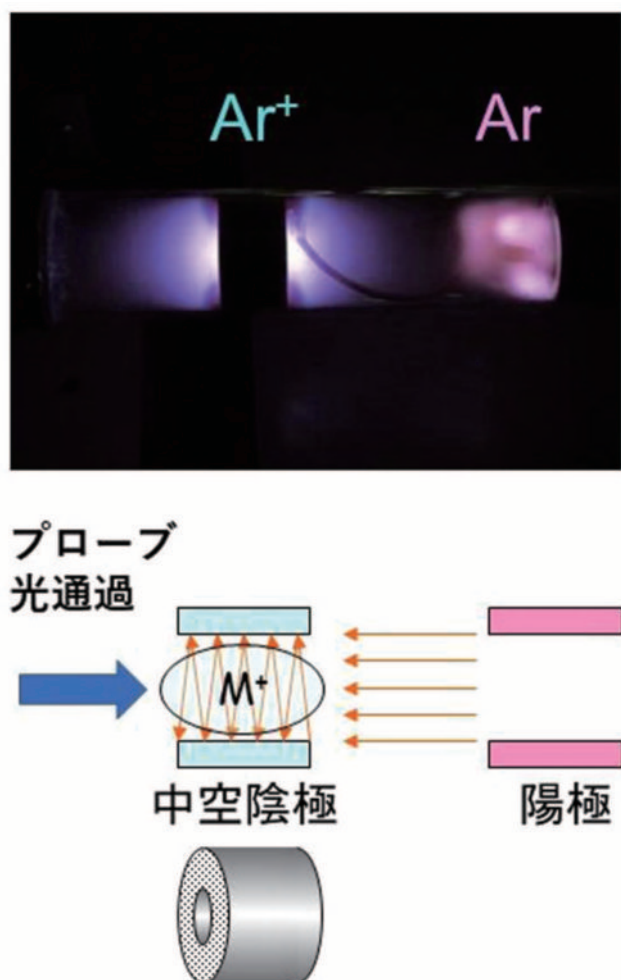


図5：星間分子生成装置

橙色の矢印は電流を示す。ホロカソード（中空陰極）内の電子の多重往復によりイオンが生成される。上の写真はアルゴンを放電させたものである。アルゴンでは、イオンは青く光り、中性は赤く光る。ホロカソード内でイオンが発生していることがわかる。

用いて、星間空間におけるチオフェノキシラジカルの回転プロファイルを予想した（図7下）。そして、恒星 HD204827 方向の分子雲で観測されている DIBs (Hobbs et al., 2008, 2009) との比較検討を行った。Shibuya et al. (1988) の測定精度では 0-0 バンドは、5176 Å の DIB に一致する可能性もあったが、今回の結果から一致しないことが明らかになった。そこで、柱密度の上限値を求めるため、量子化学計算 (TD-B3LYP/cc-pVTZ) による振動子強度 $f=0.003$ と Hobbs et al. (2008, 2009) の天文観測のノイズレベルを用いた。このとき検出に必要な DIB の S/N を 5 と仮定し、チオフェノキシラジカルの回転プロファイルの幅を 2 Å と仮定した。その結果、この分子の柱密度の上限値として $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を得た。チオフェノキシラジカルのこの電子遷移は振動子強度が弱いために、これまでに上限値が求まった C₆H ($1.43 \times$

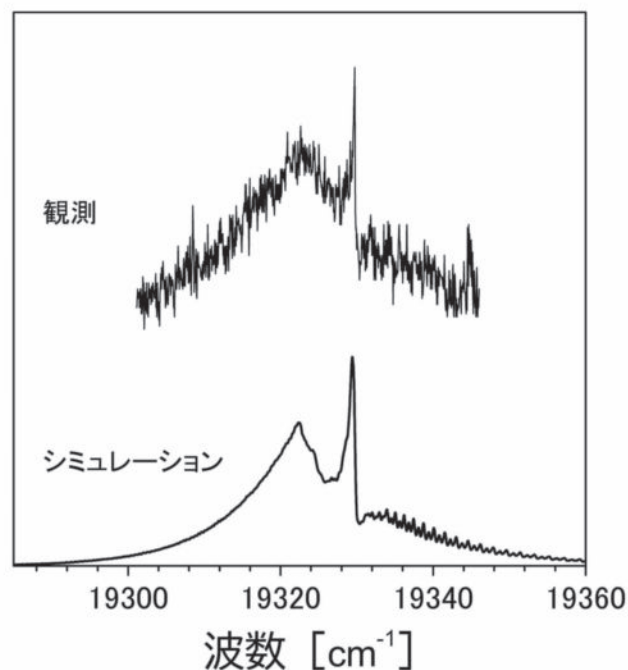


図6：チオフェノキシラジカルの電子遷移吸収スペクトル
上：実験室で観測されたスペクトル。下：そのシミュレーション結果 (Araki et al. 2014)。

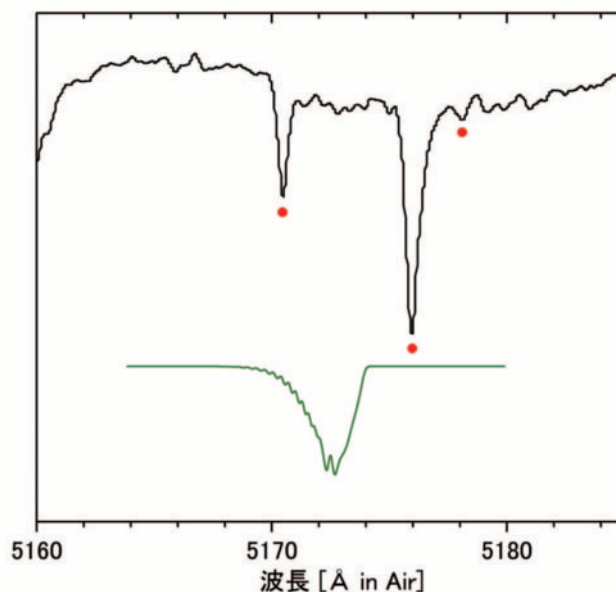


図7：チオフェノキシラジカルの DIBs との比較
上：恒星 HD204827 方向の DIBs (赤丸, Hobbs et al., 2008),
下：星間で予想されるチオフェノキシラジカルの回転プロファイル (Araki et al., 2014)

10^{12} cm^{-2} , Motylewski et al., 2000) などと比べると今回の探査は浅いが、有力候補分子の不一致は今後の方向性へのマイルストーンとなった。

3.2 フェノキシラジカル

チオフェノキシラジカルの電子遷移の吸収スペクトルで、DIBsの帰属ができないことを受けて、次の考察に進んだ。硫黄を含む星間分子はこれまで発見されている星間分子全体の1割だが、酸素を含む星間分子は3割を占める。そこで、フェノキシラジカル ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}$) に着目した。これまでに、低温の希ガスマトリックス中における電子遷移が報告されている (Radziszewski et al., 2001)。また、帰属されていない気相の低分解能スペクトルも報告されている (Ward, 1968)。しかし、これらの波長精度はDIBsの同定には不十分であるため、本プロジェクトでは同電子遷移の気相中における高分解能スペクトルを測定した (Araki et al., 2015)。

フェノキシラジカルの生成を、アニソール ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OCH}_3$) 0.1Torr とヘリウム 1Torr の混合ガスの 800 V のホロカソード放電により行った。波長掃引は 550～645 nm ($15500\sim 18100\text{ cm}^{-1}$) の領域で行なった。この領域において、5本の幅広かつ非対称のピーク群を確認した (4本目まで図8)。広範囲をピークごとに掃引しているため相対強度は厳密ではないが、このスペクトル構造は過去のマトリックス中における吸収スペクトル (Radziszewski et al., 2001) のそれをよく再現している。さらに、このピーク群はフェノール $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ を前駆体を用いた場合でも同様に見られ、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}$ 構造が解離では生成しない4-メチルアニソール ($\text{CH}_3\text{-C}_6\text{H}_4\text{-O-CH}_3$) では見られなかった。そのため、我々はこのピーク群をフェノキシラジカルの電子遷移に帰属した。

ピークの幅と非対称性からこれらを振動構造と考え、3成分の Lorentzian プロファイルでフィッティングを行なった。すると、各ピークの最も強い成分は、約 500 cm^{-1} の間隔を持つプログレッションをなしていた。量子化学計算 (TD-B3LYP/cc-pVTZ) から、励起状態の 6a 振動モード (面内変角) の振動数は 501 cm^{-1} と求められた。また、フランク-コンドン計算から、この電子遷移において、6a 振動モードの振動プログレッションが出現することが示唆された。そこで、観測されたこのプログレッションを 6a 振動モードに帰属した。マトリックス中においては 0-0 バンドが 15930 cm^{-1} 近傍に報告されていることから、今回観測されたピークは低波数側からそれぞれ $\nu(6a) = 0-0, 1-0, 2-0, 3-0$ バンドである (図8)。

さらに、各ピークの中にある3つの振動成分はシーケンス ($\Delta v=0$) であると考えられる。その間隔は約 60 cm^{-1} である。しかし、励起状態と基底状態の間に 60 cm^{-1} 前後の振動数差を持つ振動モードは複数ある。そ

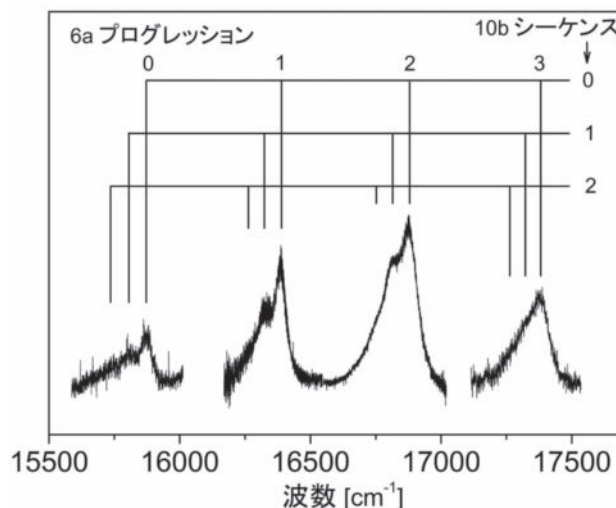


図8：フェノキシラジカルの電子遷移吸収スペクトル
振動構造は 6a プログレッションと 10b シーケンス (同じ振動量子数間の遷移) に帰属される (Araki et al. 2015)。

ここで、これまで測定してきた室温 (300 K) のスペクトルに加えて、ドライアイス冷却 (200 K) とリボンヒーター加熱 (400 K) のスペクトルも測定した。ボルツマン分布を仮定すると、そのときに見られた強度変化から、対応する振動の波数は $158 \pm 35\text{ cm}^{-1}$ であることが示唆された。そこで、この振動モードを 183 cm^{-1} の振動数を持つ 10b 振動モード (面外変角) に帰属した。

このようにして、プログレッションは 6a 振動モード、シーケンスは 10b 振動モードに帰属された。星間空間では、分子はその双極子モーメントによる輻射のために、最低 3 K まで冷却される。それを考慮し、実験室で測定されたスペクトルの中から $v=0$ の状態からの励起による成分だけを抽出した。例えば、 $\nu(6a) = 2-0$ に相当する振電バンドとしては幅 23 Å で $5922.67 \pm 0.12\text{ Å}$ の成分が抽出できる。このようなバンドはこれまでの DIBs の報告の中に現れてはいなかった (Hobbs et al., 2008, 2009)。

よって、本プロジェクトにより、最も基本的なベンゼン誘導体ラジカルであるチオフェノキシラジカルとフェノキシラジカルを、既存の DIBs の候補から除外することになった。しかし、今回の分光測定で、これら分子の DIBs としての吸収波長が決定できた。そのため、今後新たに観測される DIBs の同定が可能になり、さらに望遠鏡で集中的にその波長域を観測してこれら分子を検出することも可能になった。

3.3 ベンゾニトリルからの直線炭素鎖分子の生成

これまで、宇宙空間での星間分子の生成モデルは、原

子から大きな分子への成長生成モデルである bottom up が主流を占めていた。しかし、その一方で、大きな分子からの解離生成モデルである「top down」も注目されてきている（例えば、Oka and Witt, 2016）。diffuse cloud において、その大きな分子とは星周雲から供給される多環芳香族化合物を含む分子群であるとされている。一方、これまで、気相の高分解能分光測定において、直線炭素鎖分子はアセチレンなどからの bottom up によって作られてきた。直線炭素鎖分子が top down によって作られた例は本プロジェクトの様な分子生成系においてこれまでに報告されていなかった。しかし今回、それを CRD 分光法により偶然にも見つけることができた。

HC_5N^+ の生成には、ベンズニトリル ($\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}\equiv\text{N}$) 0.001 Torr とヘリウム 0.7 Torr のホロカソード放電を用いた。得られたスペクトルを図 9 に示す。報告されている回転定数 (Sinclair et al. 1999) を用いた回転構造のシミュレーションにより、この分子は装置内では 300 K の温度を持つことが分かった。分子数や吸収断面積がわからなくても、CRD 分光法では吸収係数を τ から直接求めることができる (O'Keefe and Deacon, 1988)。ここで HC_5N^+ の吸収係数は最大で $1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ に達した。メチル基が付加された m-トルニトリル ($\text{CH}_3\text{-C}_6\text{H}_4\text{-C}\equiv\text{N}$) を前駆体を用いた場合にも、同様のスペクトルが得られた。よって、プラズマ中で top down によって芳香族化合物から生成される直線炭素鎖分子を初めて検出した (荒木光典, 2018)。

4. 宇宙電波観測

4.1 HC_3N の観測

ここまでの議論では diffuse cloud の分子の中に星周雲の分子が生き残っていることを想定してきた。ここからは「ある分子雲進化段階の分子が次なる進化段階でも生き残っている例」を見つけることを目指した。そこで、宇宙電波観測により、暗黒星雲の分子が星形成領域でも生き残っているかを探った。

直線炭素鎖分子は、黒鉛とダイヤモンドに次ぐ炭素の第三の形態であるといわれ、その歴史はフラーレンより古い。これらは、暗黒星雲でこれまで多く発見されてきたが、より進化が進み原始星が誕生した星形成領域でも発見されてきている。その代表例が、低質量星の星形成領域 L1527 である (Sakai et al., 2008)。

直線炭素鎖分子の代表種であるシアノポリイン ($\text{H-(C}\equiv\text{C)}_n\text{-C}\equiv\text{N}$) の生成機構として、 C_2H_2 あるいは C_2H_2^+ から HC_3N が生成する二炭素成長機構が、暗黒星

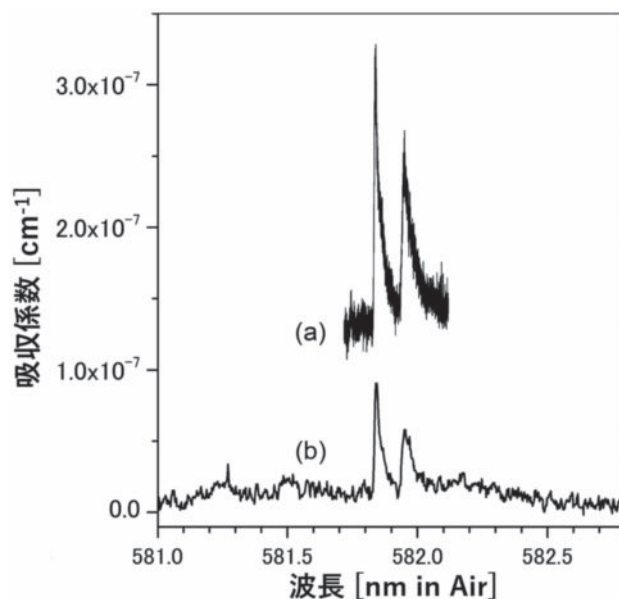


図 9：直線炭素鎖分子 HC_5N^+ の電子遷移吸収スペクトル。前駆体はそれぞれ、(a) ベンズニトリルと (b) m-トルニトリル ($\text{CH}_3\text{-C}_6\text{H}_4\text{-C}\equiv\text{N}$) である。



図 10：アメリカ国立電波天文台のグリーンバンク 100 m 電波望遠鏡

雲では受け入れられている。



特に、暗黒星雲 TMC-1 では最も短いシアノポリインである HC_3N について ^{13}C 同位体種の測定からこの機構が明らかになっている (Takano et al., 1998)。しかし、星形成領域での機構は明らかではなく、それを探るためには、同様の精度の高い観測が必要である。

そこで、アメリカ国立電波天文台の 100 m グリーンバ

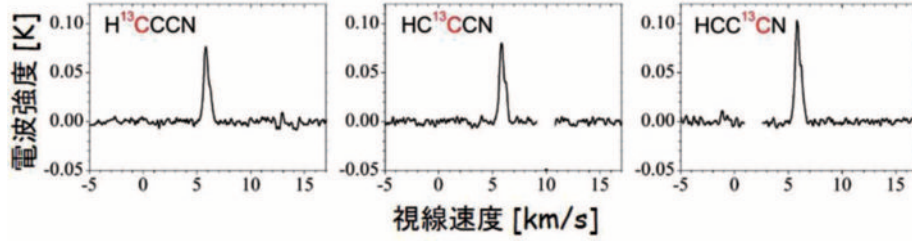


図 11：星形成領域 L1527 における HC_3N の各 ^{13}C 同位体の回転遷移 $J=5-4$ 回転遷移 (42–44 GHz 帯) のラインである。各ラインの周波数は少しずつ異なるが、同じ天体からのスペクトルが同じ位置に表れるように、視線速度を横軸にとっている (Araki et al. 2016)。

ンクの望遠鏡 (図 10) を使い、42–44 GHz 帯の $J=5-4$ 回転遷移の観測を行なった (図 11)。2015 年 2 シーズンにわたり、延べ 43 時間の観測を行ない、各 ^{13}C 同位体種において、 $S/N=33\sim 44$ が達成できた (Araki et al., 2016)。また、分子雲内の励起温度 (分子の回転温度) を決定するために、より高い回転遷移 $J=10-9$ と $9-8$ の測定を野辺山 45 m 電波望遠鏡で行った。

HCC^{13}CN について、回転遷移 $J=5-4$, $9-8$, $10-9$ の電波強度 (T_{MB}) を合わせて解析し、励起温度を 12.1 K と求めた。柱密度 (存在量) の導出には、この励起温度をすべての同位体種に適用した。その結果、同位体存在量比を

$$[\text{H}^{13}\text{CCCN}] : [\text{HC}^{13}\text{CCN}] : [\text{HCC}^{13}\text{CN}] : [\text{HCCCN}] =$$

$$1.00 : 1.01 \pm 0.02 : 1.35 \pm 0.03 : 86.4 \pm 1.6$$

と決定できた。もし、存在量比が、 HC_3N と $^{13}\text{C}^+$ による同位体交換反応で決められていたとすると、 $[\text{H}^{13}\text{CCCN}] < [\text{HC}^{13}\text{CCN}] < [\text{HCC}^{13}\text{CN}]$ となるはずであるが、それは今回の結果とは異なる。よって、これら存在量比は、同位体交換反応によるものではない。 H^{13}CCCN と HC^{13}CCN の存在量が等しいことから、星形成領域 L1527 でも、 HC_3N は二炭素成長機構 (反応 (1)~(3)) によって生成していることが明らかになった。

さらに、 HCC^{13}CN の存在量比は、水素分子の衝突温度の高いこの領域 (20 K) でも、衝突温度の低い暗黒星雲 TMC-1 (10 K, Takano et al., 1998) と同じであった。これは L1527 の HC_3N が暗黒星雲時代にできたものであることを意味する。すなわち、 HC_3N は、ある分子雲進化段階の分子が次の進化段階でも生き残っている例である (Araki et al., 2017)。

4.2 C_7H の観測

直線炭素鎖分子は、これまで晩期星周辺雲と暗黒星雲で多く発見されてきた。近年、暗黒星雲だけでなく星形

成領域でも検出されている。その代表例が L1527 である。しかし、長い直線炭素鎖分子 (原子数 6 個以上) については、検出が遅れている。そこで今回、L1527 での長い直線炭素鎖分子の存在量調査を上記の HC_3N の観測と同時にし行なった。その結果、 C_7H , $\text{l-C}_6\text{H}_2$ (CCCCCCH_2), C_6H 等の分子が検出された。

C_7H : この分子はこれまで、晩期星周辺雲でしか観測されてこなかった。今回初めて、星形成領域で検出することができた。異なる周波数に現れる 4 本のピークを平均化することで、検出を明確化できた (図 12)。柱密度は $6(1) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (括弧内は誤差) と求められた。

$\text{l-C}_6\text{H}_2$: 回転遷移 $J=16-15$ の検出を行った (図 13)。励起温度を 12 K と仮定し 3 本の遷移から柱密度を求めると、各スピン異性体 ortho 種と para 種でそれぞれ $1.31(4) \times 10^{11}$ と $5.5(3) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ となり、ortho-para 比は 2.4 ± 0.2 となった。

C_6H : 電子励起状態 $^2\Pi_{1/2}$ 成分の検出を行うことができた (図 13)。 $^2\Pi_{1/2}$ 成分は電子基底状態である $^2\Pi_{3/2}$ よりも、 15.04 cm^{-1} 高いエネルギー準位に位置している。 $^2\Pi_{1/2}$ 成分はこれまで、晩期星周辺雲でしか観測されてこなかったが、今回初めて星形成領域で検出することができた。柱密度はそれぞれ $1.08(2) \times 10^{12}$ と $1.58(4) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と求められた。

UMIST Database (McElroy et al., 2013) によれば、より小さい分子からの C_7H の成長生成経路には次の 2 つがある (Walsh et al., 2009; Smith et al., 2004)。



ここで、 C_7H の前駆体 $\text{l-C}_6\text{H}_2$ と C_6H^- は両方とも、

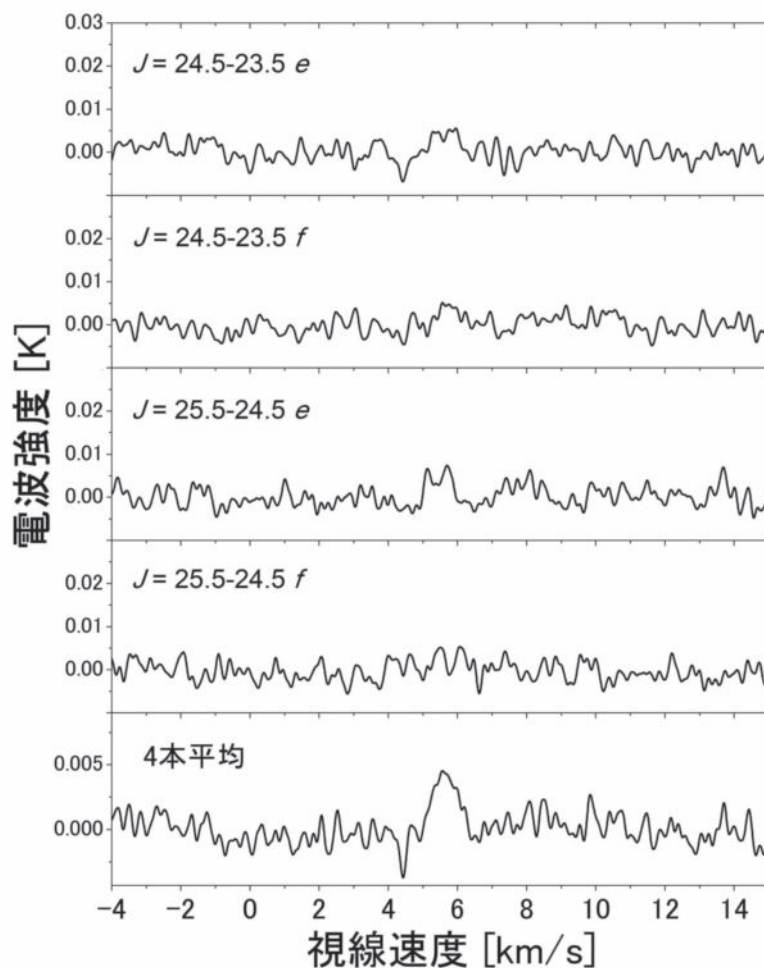


図 12：星形成領域 L1527 における直線炭素鎖分子 C_7H 回転遷移スペクトル上の 4 本のスペクトルの平均をとると、最下段のスペクトルが現れ、中央のピークはより明確になる (Araki et al. 2017)。

L1527 での存在量が多いことが報告されている (Sakai et al., 2007)。これらを考慮して、 C_5H (Sakai et al. 2008)、 C_6H 、 C_7H の存在量について、モデル計算 (Hassel et al., 2008) と比較を行った。すると 20 K のモデルより、10 K のモデルの方がよく一致した。よって、 C_7H はこの星形成領域が暗黒星雲であった時代にできた分子であることが分かった。すなわち、 HC_3N と同様に C_7H も、ある分子雲進化段階の分子が次の進化段階でも生き残っている例であった。

5. まとめ

Diffuse Interstellar Bands を解明するための実験室分光装置をホロカソード方式の星間分子生成装置と Cavity Ring Down 分光器の組み合わせにより構築することができた。そして、DIBs の有力候補であったチオフェノキシラジカルとフェノキシラジカルの実験室生成と測定に成功した。実験室分光データと DIBs を比較し

たところ、これら 2 つの分子はいずれもこれまで観測されていた DIBs とは異なることが明らかになった。しかし同時に、これらの分子の作る新たな DIBs を望遠鏡で探査することが今後できるようになった。一方、反応実験からはベンゼン誘導体から直線炭素鎖分子が生成することが分かった。これは、Diffuse Cloud でも、ベンゼン環から直線炭素鎖分子が生成している可能性を示唆する。DIBs の同定は環状化合物だけでなく、直線炭素鎖分子も候補に入れて研究すべきことが再認識できた。

一方で、宇宙電波観測から星形成領域 L1527 での直線炭素鎖分子の研究を行ってきた。本プロジェクトでは星周雲から diffuse cloud へ移行する過程での分子の生き残りを推定しているが、少なくとも星形成領域 L1527 では——直線炭素鎖分子 HC_3N と C_7H は暗黒星雲時代に生成したものが星形成後も生き残っている——ことが明らかになった。

今後とも、DIBs の解明から diffuse cloud の化学組成を明らかにし、星周雲から diffuse clouds への分子供給

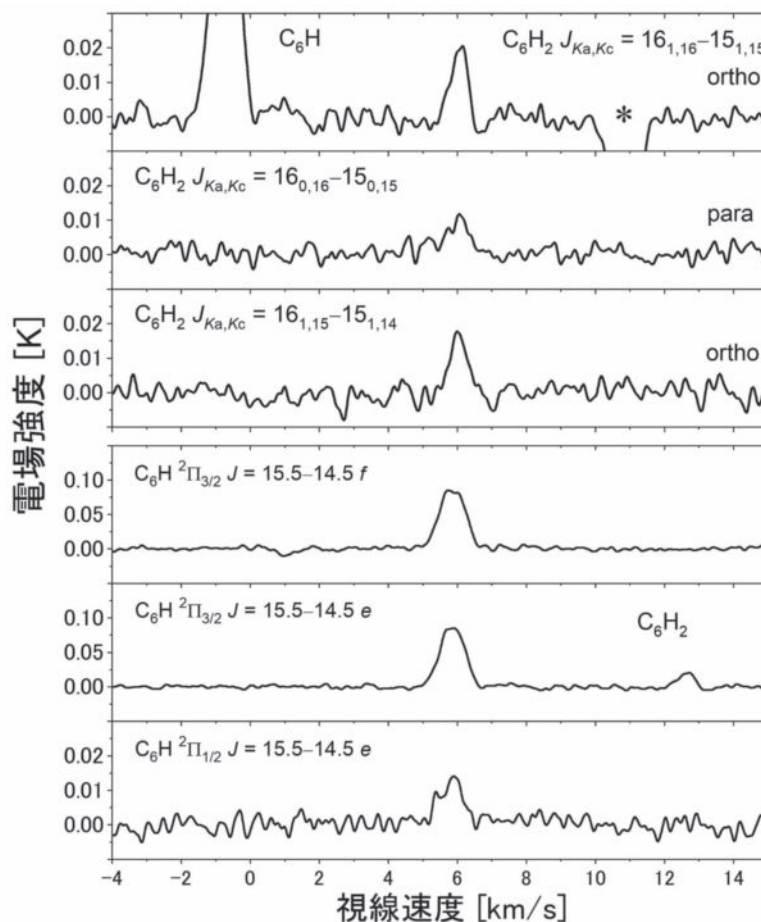


図 13: 星形成領域 L1527 における l -C₆H₂ と C₆H の回転遷移スペクトル
 *周波数スイッチングによる妨害成分. 図内の表記は, 化学式, 電子状態 (C₆H のみ), 回転遷移の順 (Araki et al., 2017).

を解明していく計画である.

6. 謝辞

本プロジェクトは, 実験室分光においては, 築山光一さん (東京理科大学), 小山貴裕さん (東京理科大学, 現上智大学) との共同研究です. また, 庭山桂さん, 松下友樹さん, 宮崎彩音さんの修士課程および卒業研究のテーマでもありました. 天文観測においては, 築山さん・小山さんに加えて, 学外協力により, 高野秀路さん (日本大学), 坂井南美さん (理研), 山本智さん (東京大学), 久世信彦さん (上智大学) のお世話になりました. 心よりお礼申し上げます.

参考文献

- Araki, M., K. Niwayama and K. Tsukiyama (2014) Laboratory Optical Spectroscopy of Thiophenoxy Radical and Its Profile Simulation as a Diffuse Interstellar Band Based on Rotational Distribution by Radiation and Collisions. *Astron. J.*, **148**, 87.
- Araki, M., Y. Matsushita and K. Tsukiyama (2015) Laboratory Optical Spectroscopy of the Phenoxy Radical as a Candidate for Diffuse Interstellar Bands. *Astron. J.*, **150**, 113.
- Araki, M., S. Takano, N. Sakai et al. (2016) Precise Observations of the ¹²C/¹³C Ratios of HC₃N in the Low-Mass Star-Forming Region L1527. *Astrophys. J.*, **833**, 291.
- Araki, M., S. Takano, N. Sakai, et al. (2017) Long Carbon Chains in the Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source L1527: First Detection of C₇H in Molecular Clouds. *Astrophys. J.*, **847**, 51.
- 荒木光典 (2018) 宇宙図を書き換えるフラレーンイオン C₆₀⁺ の発見. 天文月報 5 月号, **111**, 308-314.
- Cami, J., J. Bernard-Salas, E. Peeters and S. E. Malek (2010) Detection of C₆₀ and C₇₀ in a Young Planetary Nebula. *Science*, **329**, 1180-1182.
- Campbell, E. K. and J. P. Maier (2017) Perspective: C₆₀⁺ and Laboratory Spectroscopy Related to Diffuse Interstellar Bands. *J. Chem. Phys.*, **146**, 160901.
- Hassel, G. E., E. Herbst and R. T. Garrod (2008) Modeling the

- Lukewarm Corino Phase: Is L1527 Unique? *Astrophys. J.*, **681**, 1385–1395.
- Heger, M. L. (1922) Further Study of the Sodium Lines in Class B Stars. *Lick Obs. Bull.*, **337**, 141–145.
- Hobbs, L. M., D. G. York, T. P. Snow et al. (2008) A Catalog of Diffuse Interstellar Bands in the Spectrum of HD 204827. *Astrophys. J.*, **680**, 1256–1270.
- Hobbs, L. M., D. G. York, J. A. Thorburn et al. (2009) Studies of the Diffuse Interstellar Bands. III. HD 183143. *Astrophys. J.*, **705**, 32–45.
- Ziurys, L. M. (2006) Interstellar Chemistry Special Feature: The chemistry in circumstellar envelopes of evolved stars: Following the origin of the elements to the origin of life. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **103**, 12274–12279.
- McElroy, D., C. Walsh, A. J. Markwick et al. (2013) The UMIST Database for Astrochemistry 2012. *Astron. Astrophys.*, **550**, A36.
- Motylewski, T., H. Linnartz, O. Vaizert et al. (2000) Gas-Phase Electronic Spectra of Carbon-Chain Radicals Compared with Diffuse Interstellar Band Observations. *Astrophys. J.*, **531**, 312–320.
- Oka, T. and A. N. Witt (2016) Top Down Chemistry Versus Bottom up Chemistry. *International Symposium on Molecular Spectroscopy*, RH15.
- O’Keefe, A. and D. A. G. Deacon (1988) Cavity Ring-Down Optical Spectrometer for Absorption Measurements using Pulsed Laser Sources. *Rev. Sci. Instrum.*, **59**, 2544–2551.
- Radziszewski, J. G., M. Gil, A. Gorski et al. (2001) Electronic States of the Phenoxyl Radical. *J. Chem. Phys.*, **115**, 9733–9738.
- Sakai, N., T. Sakai, Y. Osamura and S. Yamamoto (2007) Detection of C_6H^- toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368 + 2557 in L1527. *Astrophys. J.*, **667**, L65–L68.
- Sakai, N., T. Sakai, T. Hirota and S. Yamamoto (2008) Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368 + 2557 in L1527. *Astrophys. J.*, **672**, 371–381.
- Shibuya, K., M. Nemoto, A. Yanagibori, M. Fukushima and K. Obi (1988) Spectroscopy and kinetics of thiophenoxy radicals in the gas phase. *Chem. Phys.*, **121**, 237–244.
- Sinclair, W. E., D. Pfluger and J. P. Maier (1999) Rotationally Resolved $A^2 \Pi \leftarrow X^2 \Pi$ Electronic Spectra of Cyanodiacetylene and Dicyanoacetylene Cations. *J. Chem. Phys.*, **111**, 9600–9608.
- Smith, I. W. M., E. Herbst and Q. Chang (2004) Rapid Neutral-Neutral Reactions at Low Temperatures: a New Network and First Results for TMC-1. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **350**, 323–330.
- Takano, S., A. Masuda, Y. Hirahara et al. (1998) Observations of ^{13}C Isotopomers of HC_3N and HC_5N in TMC-1: Evidence for Isotopic Fractionation. *Astron. Astrophys.*, **329**, 1156–1169.
- Motylewski, T. and H. Linnartz (1999) Cavity Ring Down Spectroscopy on Radicals in a Supersonic Slit Nozzle Discharge. *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 1305–1312.
- Walsh, C., N. Harada, E. Herbst and T. J. Millar (2009) The Effects of Molecular Anions on the Chemistry of Dark Clouds. *Astrophys. J.*, **700**, 752–761.
- Ward, B. (1968) Absorption Spectra of Aromatic Free Radicals: A Vibrational Analysis of the 3050 Å Absorption Spectrum of Benzyl and a New Transition of Phenoxyl. *Spectrochim. Acta, Part A*, **24**, 813–818.