

炭素鎖分子 H_2CCC が ぼやけた星間線の正体か？



荒木 光典

〈東京理科大学，理学部第一部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3〉

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

ぼやけた星間線 (Diffuse Interstellar Bands; DIBs) とは、希薄な分子雲の中に観測されている未同定の可視光吸収線のことである。近年—このDIBsのうち2本が炭素鎖分子 H_2CCC ではないか—という論文が出された。これが本当なら100年間解けなかったDIBsの正体が解かれたことになる。それを検証するために、野辺山宇宙電波観測所の45 mミリ波望遠鏡を用いて、恒星HD183143と地球の間にある希薄な分子雲を観測した。その結果、残念ながら H_2CCC は検出されなかった。そこで、柱密度の上限値を見積もってみると、今回指摘された2本のDIBsにおいて、 H_2CCC の吸収の影響は大きく見積もっても1/25であることがわかった。100年の謎が解かれる日はもう少し先になった。

1. はじめに

以前博士研究員としてお世話になったスイス・バーゼル大学のJ. P. Maierさんには毎年クリスマスカードを送っている。2010年のクリスマスにもいつものとおりクリスマスカードを送り、年が明けてのお返事がメールで来た。この研究はそのメールに添付されていた一報のプレプリントから始まった。

夜空に輝く星々のなか、その恒星本来の色よりも赤みを帯びている恒星がある。このような恒星は、恒星と地球の間に希薄な分子雲があるために、青い光が散乱され赤く見えている。この恒星のスペクトルを測定すると、その希薄な分子雲に含まれる物質のために、恒星の光の吸収線が観測される(図1)。同時に観測される恒星大気の子原子吸収線の線幅は狭いが、分子雲に含まれる物質の吸収線の線幅は1-10 Å程度と広い。すなわちぼやけている。そのため、これらは「ぼやけた星間線」(英語でDiffuse Interstellar Bands; 以下

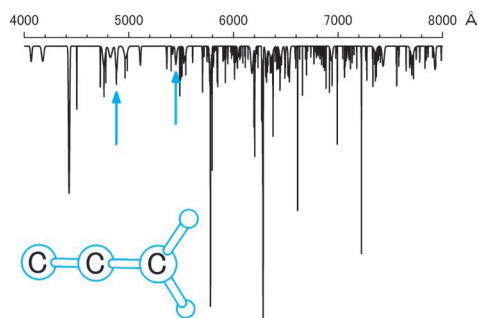


図1 Diffuse Interstellar Bands; ぼやけた星間線 (矢印は H_2CCC とされるDIBs)。

DIBs) と呼ばれる。DIBsをもたらす希薄な分子雲はdiffuse cloudと呼ばれるが、このdiffuseは空間的な広がりであり、DIBsのdiffuseとは異なる。DIBsの発見は1911年から1919年の間であるといわれているが、報告された年は1922年である¹⁾。そろそろ100年になろうとしている。これまでに600本程度が検出されているが、いまだにその起源は明らかにされていない。もちろん—その起源が何であるか?—の問題は古くから研究

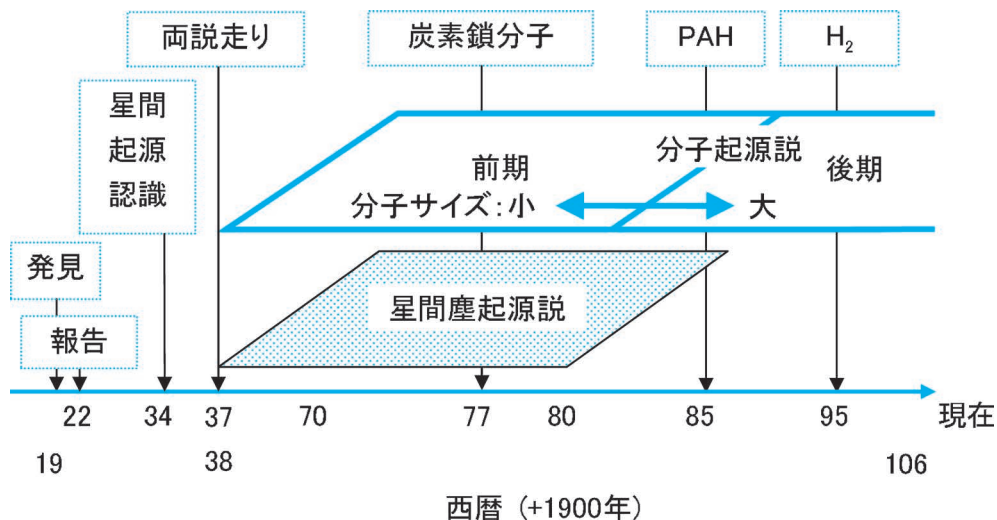


図2 DIBsの起源についての論争の歴史.

されている。

まず、同定の方法である。DIBsは可視光領域の吸収線であるため、電子遷移^{*1}である。その同定のためには、diffuse cloudの中に存在しそうな分子を予測する必要がある。次に、その分子を実験室で生成する必要がある。そして、電子遷移のスペクトルを測定し、その波長を0.1-1 Å程度の精度で正確に測定する必要がある。その分子の電子遷移は固有の線幅をもっている。そのうえ、分子は振動するため、電子遷移に振動構造が反映され、複数本の(振動)電子遷移を生ずることが一般的である。それらの相対強度は電子遷移における分子構造の変化から決まるため、diffuse cloudの環境に依存せず、その分子固有のものである。すなわち、これらの三つの条件、波長・線幅・相対強度がその分子の“指紋”となる。現段階でDIBsは600本程度あるため、1本の電子遷移の波長だけなら、何らかの分子と偶然一致することは珍しくない。しかし、同定するためには三つの条件がそろわなければならない。

^{*1} 光の吸収や放出などを伴って分子内の電子配置が変わること。ここでは光の吸収である。

このような方法と基準によって、同定の試みが連綿となされている。

1.1 起源をめぐる論争

次に、肝心のDIBsの起源である。論争の歴史は複雑であるが、大きく分けると星間塵起源説と分子起源説の二つである(図2)。星間塵起源説は、主に70年代初めに活発に提唱されたが、DIBsとの正確な一致が得られないなか、星間塵の特徴とDIBsの強度の間に相関がないことがわかり、少しずつ劣勢となった。現在では分子起源説のほうが優勢である(星間塵が固相であることに対し、ここで分子とは気相分子のことである)。分子起源説では、当初は小さな分子の可能性が検討されていた。しかし、それらは電子遷移の波長・線幅・相対強度すなわち“指紋”が合わないために、候補から外れることになった。そして、1977年には直線炭素鎖分子がカナダの研究者によって候補として提唱され²⁾、つづいて1985年には米仏のチームによって環芳香族炭化水素(PAH)が提唱され³⁾⁻⁵⁾、大きな分子がその候補と考えられるようになった。今では、分子起源説は、PAH起源説と直線炭素鎖分子起源説の二つの大きな流れとなっている。

DIBsとは異なる波長領域であるが、PAHは赤外領域で星周雲に、直線炭素鎖分子は電波領域で星周雲と暗黒星雲にすでに発見されている。さらに、スイスとカナダのチームによって、短い直線炭素鎖分子であるC₃はdiffuse cloud中で検出されている（未説明といわれるDIBsであるがC₃と2原子分子は例外である）⁶⁾。これらの観測事実が両説を後押ししている。

現在、直線炭素鎖分子は、バーゼル大学のグループで検討がなされている。炭素4-6個の直線炭素鎖の測定に始まり、20個を超える炭素鎖分子の実験室測定に成功している⁷⁾。一方、PAHは、各地の研究グループで行われている。しかし、DIBsの同定には至っていない。

1.2 炭素鎖分子H₂CCC

これほど難攻するDIBs問題であるが、送られてきたプレプリントには、炭素鎖分子H₂CCCがその候補であると書かれていた⁸⁾。この研究では、実験室でH₂CCCの吸収線が、5,450 Åと4,881 Åの場所に見いだされた。これらの吸収線が2本のDIBs（図1）と一致した。H₂CCCの励起状態は寿命が短いため、吸収線にシャープな構造はなく、線幅の広がった構造をとっている。実験室の2本の吸収線は波長だけでなくその線幅もDIBsと一致した。このことから、Maierらはこの2本のDIBsの起源はH₂CCCであると主張した。そして、その存在量は、恒星HD183143と地球の間にあるdiffuse cloudにおいて、柱密度で5×10¹⁴ cm⁻²であると主張した。また、分子の温度は10-60 Kであると推定した。

これに対してシカゴ大学の岡らは、H₂CCCの存在量はC₂やC₃という基本的な分子よりも2桁以上多いことになり、不自然であることを指摘した⁹⁾。

しかし、分子雲では、特定の分子が他の分子に比べてたくさん存在することもある。例えばL1527と呼ばれる星形成領域では、C₄Hの存在量が他の分子に比べてかなり多い。すなわち、多い

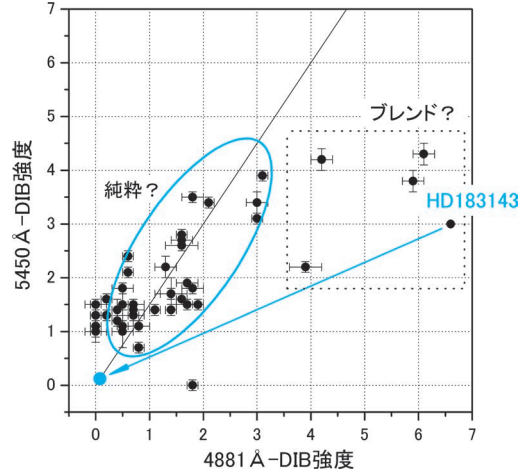


図3 各天体での5,450 Åと4,881 ÅのDIBsの強度(%). Krelowskiらの示した値を黒丸で表記した。HD183143の値はわれわれの観測の結果を反映すると青丸の位置にくる。

からといって必ずしも否定はできない¹⁰⁾。

一方、ポーランドのKrelowskiらは、多くの天体で測った2本のDIBsの相対強度を調査した¹¹⁾。前述のように、これら2本の相対強度は、diffuse cloudの環境に依存せず分子に固有であるため、常に一定でなければならない。しかし、彼らは相対強度にかなりのばらつきがあることを報告した（図3）。

しかしながら、この相対強度のばらつきは、DIBsがH₂CCCだけからなっているのではなく他の分子の吸収線と重なっているためと考えることもできる。そこで筆者らは、4,881 ÅのDIBsが5,450 Åのそれに比べて強い天体では、4881 ÅのDIBsが他の分子の吸収線と重なっている（ブレンドしている）のではないかと疑った（図3の点線内）。そして、DIBsの弱い天体だけに注目すると、その存在量は3:2程度で一定の値（図3黒の直線）をもつ傾向がありそうである。図3で青の楕円で囲まれた天体では2本のDIBsは純粋にH₂CCCかもしれない。ばらつきの大きさだけでは、2本のDIBsのH₂CCCへの帰属を正確に否定することはできない。

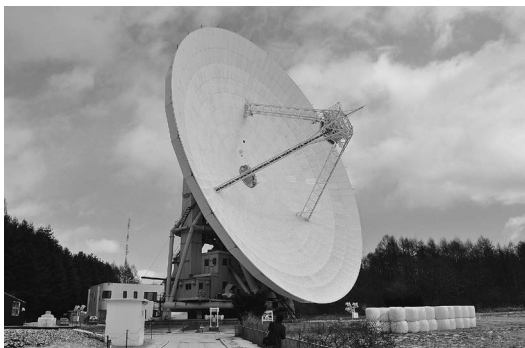


図4 国立天文台の野辺山45 mミリ波望遠鏡.

しかし、この分子にはもっと決定的な検証方法がある。それは、電波で観測することである。この分子は双極子モーメントをもち、さらにあまり大きな分子ではない。そのため、 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度であれば電波領域ではそのライン（回転遷移）はかなり明るく、受信する電波強度（アンテナ温度）として最大2 K程度で観測されるはずである。他の分子とのブレンドによる存在量の過大評価を差し引いても、その電波強度はかなり期待できる。実際にこの分子は、diffuse cloudではなく暗黒星雲ですで見つかっている¹²⁾。電波望遠鏡を向ければ、同定の検証ができる。今回もし、この分子がdiffuse cloudで発見できれば、DIBsのうち少なくともこの2本はこの分子に帰属される。Maierらの報告はDIBsの帰属として初の快挙となる。

そこで筆者らは、この分子を電波で観測することを計画した。もしこの分子の温度が60 Kと高かったら、この分子のラインは200–300 GHz帯で強くなる。しかし、温度が10 Kと低かった場合は、100 GHz帯で強くなる。200–300 GHz帯では、海外にいくつかの望遠鏡がある。一方、100 GHz帯では、日本の国立天文台の野辺山45 mミリ波望遠鏡（図4）が強力である。そこで、筆者らは温度が低い場合を想定し、野辺山での観測を計画した。

これを思い立ったのは、プレプリントが送られ

てきた直後（2011年1月）であるが、おりしも野辺山の観測プロポーサルは締め切られたばかりであった。夏の間と同じ観測が行われて先行されるのではないかと冷や冷やししながら、次の観測シーズンを待つことになった。

2. 電波観測

次の観測シーズン、幸運にもプロポーサルは採択された。そして、観測は2012年1月14日と15日にスケジュールされた。

観測を予定した天体は、恒星HD183143、HD186745、CygOB2 No. 7の手前にあるdiffuse cloudである。HD183143とHD186745はMaierらが観測した天体で、CygOB2 No. 7はKrelowskiらが観測した天体である。これら恒星はそれぞれ天の川の中の矢座、こぎつね座、白鳥座にある7–11等星である。いずれも $5,450 \text{ \AA}$ と $4,881 \text{ \AA}$ のDIBsが強く観測されている。

観測ラインには102.99238 GHzの周波数に現れる H_2CCC の $J_{Ka, Kc} = 5_{1,5} - 4_{1,4}$ 回転遷移を用いた。diffuse cloudは密度が低いことから暗黒星雲と違い分子の温度が3 K近くまで冷えてしまうことがある。すると電波の放射が弱くなってしまう。そのため厳密には、diffuse cloudの中の分子はクエーサーなどの連続波電波源を背景にして吸収で測定されるべきである。しかし、今回DIBsの観測されたdiffuse cloudはそのような都合のよい状況ではない。そこでMaierらの温度推定に従い、diffuse cloud中の H_2CCC の温度は10–60 Kあり、電波の放射で観測できることを想定した。実際に、二酸化炭素では、電波の放射が観測されている。

次の問題は、OFF点である。通常、電波天体がある場所（ON点）とない場所（OFF点）を交互に測定して両者の差を取り、電波スペクトルのベースラインを決める。この観測方法を用いるためには、電波天体がない場所がはっきりわかっている必要がある。ところが、今回観測しようとし

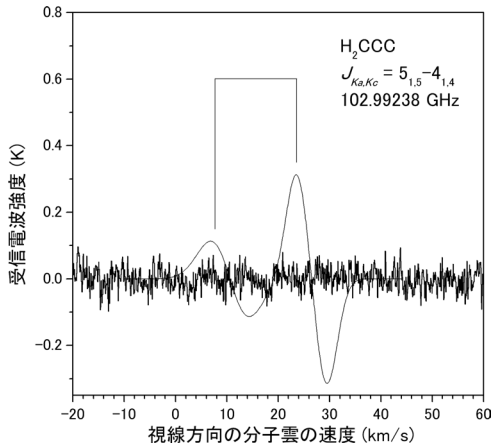


図5 当初予想されたH₂CCCのスペクトルと未検出の観測結果，前者の強度比と速度はCHと同じであると想定している．ただし，強度は任意である．

ている天体は，その広がり情報が無い．すなわち電波天体がない場所が何処なのか分からない．しかも，銀河面に沿った場所に存在するため，不用意にOFF点を選ぶことは危険である．もし，OFF点の場所にON点と同レベルの電波強度があれば，ラインは相殺されて何も出てこないことになる．そこで，周波数スイッチングという方法を用いた．これは，ON点しか観測しないが，通常の観測と意図的に周波数をシフトさせた観測を行い，その差をとる．これにより，ON点のみの観測でもベースラインが決められる．この結果，1本のラインが凸と凹の二つのラインを生ずる（図5の曲線のようになる）．

もし，Maierらの報告する柱密度が正しければ，実際このラインはどれくらいの強度になるだろうか？ここで，過大評価しないよう，分子の温度はこの周波数帯では弱くなってしまいう60 Kを仮定した．さらに，観測する星の手前に広がる雲は一つとは限らない．例えばHD183143は少なくとも二つ以上の雲が存在することがわかっている¹³⁾．この場合，DIBsとしては1本にしか見えない分子のラインも，電波領域では複数本に分裂してしまい弱くなる．HD183143ではCHの前

例¹³⁾に倣って最もH₂CCCを含む雲が6割のH₂CCCを含んでいるものと仮定した（分裂の仕方としては，図5の曲線のようになる）．すると，H₂CCCは400 mKの強さで見えることになる．これは，2本のDIBsはブレンドしていないと仮定した場合である．もし，他の分子の吸収とブレンドしていた場合には，電波での強度はもっと弱くなる．実際に，Krelowskiらの観測で相対強度が一定にならなかったことは，他の分子の吸収とブレンドしている可能性が示唆される．そこで，筆者らはノイズレベルにして30 mK程度まで積算を行うことを目指した．

3. 電波観測の結果

1月14日は天候やトラブルでうまくいかなかったが，15日は無事に観測を行うことができた．観測が1日に限定されてしまったために，もはや3天体すべてを観測することができなくなってしまった．そこで，Maierらの論文の中で2本ともDIBsを観測できていて，最もはっきりデータの示されているHD183143に絞って観測を行った．1時間24分間の積算観測により32 mKのノイズレベルまで積算することができた．積算の目標はほぼ達成できた．ノイズレベルの3倍の大きさのピークが現れれば，認識できると仮定すると，このノイズレベルでは95 mK以上の強さをもつラインなら検出できることになる．ここまで，ノイズレベルを下げるとH₂CCCが存在量にして $2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ あれば検出できるはずである．それにもかかわらず検出されなかった（図5）．すると，5,450 ÅのDIBにおけるH₂CCCの寄与は25分の1以下しかなく，他の分子が25分の24以上寄与していることになる．この結果から，少なくともHD183143方向ではH₂CCCによるDIBsの同定はできない．

これを先ほどの図3の中へ書き込むと，HD183143のデータは青丸の位置になる．ここで，HD183143以外では2本のDIBsはH₂CCCによるものと仮定

すると、HD183143は特別H₂CCCが少ない天体になってしまう。よって、この仮定には無理があり、観測していないとはいえ、HD183143以外でもH₂CCCの存在を期待することは難しい。

筆者らは、もしかすると本当にかつ少しぐらいはH₂CCCがあるのではないかと期待した。しかし、観測の結果、検出されなかった。またしても、DIBsは謎に包まれてしまったのである。

3.1 その後

時を同じくして、米・仏のチームによるもう一つの報告がなされた。この研究では、米国ニューメキシコ州にある電波望遠鏡を使って、H₂CCCの観測が行われた。Maierらの観測したdiffuse cloudとは別のdiffuse cloudで、クエーサーを光源にしてH₂CCCの回転遷移の吸収線が観測された。その結果、微量のH₂CCCが検出されたが、Maierらの示した存在量より3桁も少なかった。このことから、DIBsはH₂CCCに同定できないことが示されてしまった¹⁴⁾。

この論文も我々の論文¹⁵⁾も同じAstrophysical Journal Lettersの同じ巻に収録されている。アクセプトの日付を見ると我々の論文の2日後である。他の研究チームに先を越されないかと冷や冷やしながら行った研究であったが、見えないライバルとはほぼ同着であった。

3.2 結び

H₂CCCは、久々に議論を呼んだDIBsの候補である。しかし、残念ながらDIBsの同定はまだ先のことになりそうである。今後さらに実験室で新たな分子がDIBs候補として精密測定される必要がある。

謝辞

本研究¹⁵⁾は多くの方々との共同研究です。上智大学の久世信彦さん、国立天文台の高野秀路さんは、筆者を観測の面で支えてくれています。電波観測やその解析などを共に行ってきた東京理科大学のメンバーは、築山光一さん、山辺

裕倫さんです。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Heger M. L., 1922, Lick Observatory Bulletin 337, 141
- 2) Douglas A. E., 1977, Nat 269, 130
- 3) van der Zwet G. P., Allamandola L. J., 1985, A&A 146, 76
- 4) Léger A., d'Hendecourt L., 1985, A&A 146, 81
- 5) Crawford M. K., Tielens A. G. G. M., 1985, ApJ 293, L45
- 6) Maier J. P., Lakin N. M., Walker G. A. H., Bohlender D. A., 2001, ApJ 553, 267
- 7) Pino T., Ding H., Güthe F., Maier J. P., 2001, J. Chem. Phys. 114, 2208
- 8) Maier J. P., Walker G. A. H., Bohlender D. A., Mazzotti F. J., Raghunandan R., Fulara J., Garkusha I., Nagy A., 2011, ApJ 726, 41
- 9) Oka T., McCall B. J., 2011, Science 331, 293
- 10) Araki M., Takano S., Yamabe H., Koshikawa N., Tsukiyama K., Nakane A., Okabayashi T., Kunimatsu A., Kuze N., 2012, ApJ 744, 163
- 11) Krelowski J., Galazutdinov G., Kołos R., 2011, ApJ 735, 124
- 12) Fossé D., Cernicharo J., Gerin M., Cox P., 2001, ApJ 552, 168
- 13) McCall B. J., Hinkle K. H., Geballe T. R., Moriarty-Schieven G. H., Evans II N. J., Kawaguchi K., Takano S., Smith V. V., Oka T., 2002, ApJ 567, 391
- 14) Liszt H., Sonnentrucker P., Cordiner M., Gerin M., 2012, ApJ 753, L28
- 15) Araki M., Takano S., Yamabe H., Tsukiyama K., Kuze N., 2012, ApJ 753, L11

Is H₂CCC an Origin of Diffuse Interstellar Bands?

Mitsunori ARAKI

Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

Abstract: To clarify the authenticity of a recently proposed identification of H₂CCC as a diffuse interstellar band (DIB) carrier, we searched for the rotational transition of H₂CCC toward HD183143 using the 45 m telescope at the Nobeyama Radio Observatory. Detection of H₂CCC was unsuccessful, producing an upper limit corresponding to a column density of $2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. The upper limit indicates that the contribution of H₂CCC to the DIB at 5,450 Å is less than 1/25.