

ヘール・ボップ彗星におけるメタノール分子の観測

池田 美穂

〈国立天文台・天文学データ解析計算センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: miho.iked@nao.ac.jp

6年前の1997年2月、我々は野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡を用いて、地球に接近していたヘール・ボップ彗星から、メタノール分子が発する電波を捉えました。45m電波望遠鏡は、高感度でかつ広い周波数範囲の電波を受信することができる、世界でも有数の電波望遠鏡です。その特徴を生かし、メタノールの分子輝線を9本捉えることが出来たのです。この観測から彗星の化学組成、起源についてどんな情報が得られるのかを紹介します。

1. はじめに

1.1 彗星の電波観測

彗星は、原始太陽系星雲の外縁部で微惑星の衝突などによって形成され、熱変成をあまり受けずに、現在までの長い期間を過ごしてきたと考えられています。熱変成をあまり受けていないため、彗星の核の部分は、太陽系形成時の様々な分子がそのまま凍りついている雪だるまのようなものと理解されています。彗星が太陽に近づくとその雪だるまが熱せられ、凍りついていた分子が昇華し、彗星の周りにガスとして漂うこととなります。つまり、太陽に比較的近い地球に住む我々は、彗星が後生大事に隠し持っていた生まれた時の情報を放出するとき、それを間近に見ることが出来るのです。この彗星核に凍りついている分子が何であるかを調べるために、様々な手段が取られてきました。分子の質量分析や、分子が発する電波、赤外線、可視光、紫外線などの分光観測があります。本稿で紹介する内容は電波の観測です。彗星の観測も電波天文学も歴史は古いのですが、電波による彗星の観測というのは意外と少なく、観測する度（新しい彗星が来る度）に新しい分子が見つかるという状況で、これから大きく発展していく分野と言えるでしょう。

1.2 ヘール・ボップ彗星と45m電波望遠鏡

ヘール・ボップ彗星（図1）は、太陽から7天文単位（約10億5千万km）も離れた地点にあるときに発見されました。発見された当時の明るさは11等、この値自身は彗星として平凡なものでしたが、通常この程度の明るさで見える彗星は太陽から2.3天文単位の距離で発見されることが多いため、きわめて異例のことでした。このため、ヘール・ボップ彗星はかなり大型の彗星であり、様々な分子が検出できるだろうと予想されました。実際、太陽からかなり遠くにあるときから、続々と分子が見つかり始めたのです。太陽接近時にはさらに多くの分子が検出されると期待され、当然世界中の観測所がこぞってこの彗星に望遠鏡を向けたのです。このとき、世界でも有数の感度を誇る野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡も、このヘール・ボップ彗星に向けられました。しかしこの時期はまさに観測シーズンであり、望遠鏡は、何ヶ月も前から観測プロポーザルを準備し、それが採択された研究者の観測のために使われていました。そのわずかな隙間をぬって、45m電波望遠鏡は彗星を追いかけたのです。また、この電波望遠鏡には20-100GHz帯の複数の受信機が備えてあり（50GHz-70GHzは受信機がない）、かなり広い周波数範囲の観測が可能という特徴がありました。特



図1：我々が観測を行った期間中（2月13日）に、木曾観測所で撮影されたハール・ボップ彗星。
（撮影：福島英雄氏他，国立天文台・広報普及室提供）

に30,40GHz帯の受信機を搭載している望遠鏡は少ないため、他の望遠鏡では観測できない周波数範囲まで観測することが出来たのです。

2. メタノールの検出

彗星の核から昇華してきた分子は、ガス状となって核の周りを取り囲みます。この彗星核を取り囲んだ分子ガスのことを、ラテン語で髪の毛という意味の「コマ」と呼びます。我々は、ハール・ボップ彗星が太陽に最接近した1997年4月1日のおよそ2ヶ月ほど前から数日間に渡って、コマに存在する分子が放つ電波スペクトルを観測しました。このときの

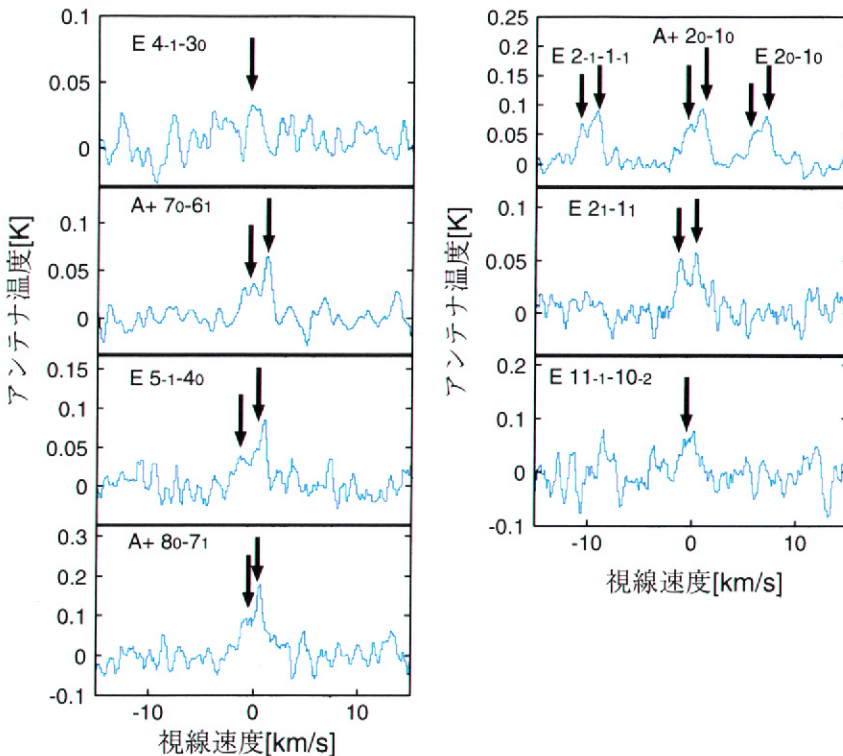


図2：ハール・ボップ彗星でのメタノール分子のスペクトル線。縦軸はスペクトルの強度を表すアンテナ温度、横軸は彗星から放出されているメタノール分子ガスの速度を示す。それぞれのパネルの左上にスペクトルの種類（遷移）を示した。矢印が2本あるスペクトルは、速度成分が2つあることを示している。

日心距離（彗星と太陽間の距離）は平均で1.24天文単位でした。得られた電波の観測データと、様々な分子の実験室のデータをつき合わせ、観測データの中にメタノール分子（ CH_3OH ）の電波スペクトルがあるを見つけました。調べるうちにさらに見つかり、結局9本のスペクトルを見つけることができたのです。図2にこの9本のスペクトルを示します。

9本のスペクトルをよく見ると、先がわずかに2本に分かれているものがあります。これは、我々の方を向いている面から放出されている分子ガスからのスペクトルと、反対側に放出され

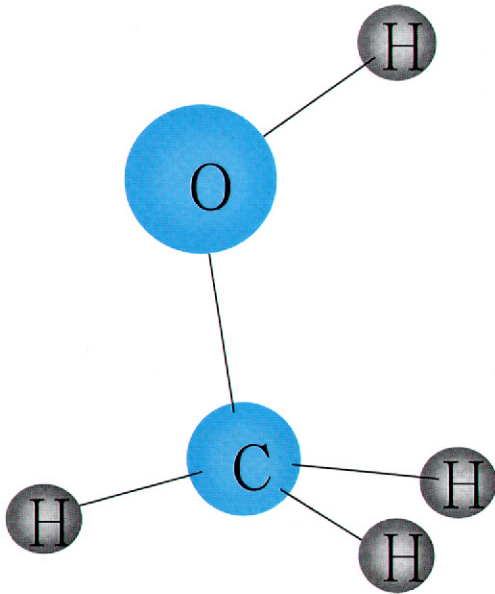


図3：メタノール分子の構造

ている分子ガスからのスペクトルの両方を見ているためです。この分かれた2本のスペクトルのピークが速度にしてどのぐらい離れているかが分かると、放出されている分子ガスの速度がわかります。観測した期間内で、メタノール分子ガスの平均放出速度は約0.9km/sでした。時速にすると、3200km/h以上というとてもない速度です。また、この分かれた2本のスペクトルは強度に差があります。これは、放出されている分子ガスの量が方向によって異なることを示しています。彗星核は綺麗な球形ではなくごつごつしていますから、分子は一様に昇華するのではなく、核の割れ目などが太陽の方向を向くと、いきなりそこから噴き出してくる場合があります。従って、場所によって分子が昇華しやすかったり、しにくかったりするわけです。実際に可視光や他の電波の観測で、非対称なコマの形が捉えられています。我々が観測した時期にも、メタノール分子ガスの放出が非対称であったと思われます。

さて観測結果についてざっとお話しましたが、

我々が今回観測したメタノールについても簡単にお話します。メタノールは地球上に存在する我々になじみの深い分子ですが、星間でも、特に大型の星が次々に生まれている領域に大量に存在します。彗星にもこの分子が存在することが以前から予測されており、電波観測ではオースチン彗星で初めて検出されました¹⁾。その後、レビー、スィフト・タートル、百武、リー彗星などでも見つかり¹⁾、²⁾、³⁾、⁴⁾、ハール・ボップ彗星でも、既に97, 145, 157, 242, 252, 304, 307GHzという周波数範囲のメタノールの電波スペクトルが見つかっていました⁵⁾。では我々がつけたメタノールのスペクトルは単なる二番煎じなのかというと、そうではなく、9本のうち2本は30, 40GHzというさらに低い周波数の、まだ検出されたことのないスペクトルであったため、我々が初めて検出したということになります。また一つの望遠鏡で9本という比較的多い本数のスペクトルを捉えることが出来たことも、我々の観測の特徴の一つです。比較的多い本数を観測できた理由には、45 m電波望遠鏡に搭載されている受信機の数だけでなく、メタノール分子の特徴も関係しています。電波の観測では、水素分子の次に豊富な一酸化炭素分子(CO)や、シアン化水素分子(HCN)などの比較的軽い分子がよく観測されます。これがメタノール分子のような大きな分子(図3)になると、観測されるスペクトルは弱くなりますが、種類(遷移)は増えます。弱いため観測は大変ですが、一つの望遠鏡で観測できるスペクトル数が増えるため、得られる情報が多くなったり、より正確な情報を得やすくなるのです。ではこの9本のスペクトルから、どんな情報が得られるのでしょうか？

3. 複数のスペクトルから得られる情報

9本のスペクトルは、それぞれ異なるエネルギーのレベルから放出されており、そのエネルギーの値やスペクトルの周波数、分子の存在量、励起温

度によってスペクトル強度が変わってきます。エネルギー値と周波数は実験室のデータがありますので、観測によって2本以上のスペクトルの強度がわかれば、ある仮定のもとに分子の存在量と励起温度を見積もることが出来ます。さらに観測されたスペクトルの本数が多ければ、より信頼度は上がるわけです。核から昇華した分子はいつまでも存在するわけではなく、ほとんどの分子が太陽からの紫外線によって分解（光解離）されます。分子によって光解離で壊れるまでの時間（寿命）が異なるので、彗星での化学組成を議論する際には、存在量ではなく1秒間にその分子が放出される量（生成率）が使われます。彗星コマの密度分布を仮定し、理論的に求められている分子の寿命を使うと、分子の存在量と分子ガスの放出速度から、その分子の生成率を見積もることが出来ます。我々は局所的熱平衡（LTE）を仮定し、コマの密度分布がヘイザーモデル⁶⁾に従うとしてこれらの物理量を求めました。その結果、メタノールの励起温度が81K、生成率が毎秒 1.2×10^{29} 個となりました。毎秒約6.4トンという莫大な量のメタノールを噴き出しているということになるのです。また我々が観測したときシアン化水素のスペクトルも1本見つかったため、そのデータを使うと、メタノールの励起温度を仮定した場合、毎秒 7.6×10^{27} 個、メタノールの約16分の1の量が放出されていると見積もられました。これらの励起温度や生成率から、どんなことが言えるのでしょうか？他の分子や他の彗星に比べてどうなのでしょう？

4. 彗星でのメタノール

ハール・ボップ彗星でのメタノールの生成率はいかほどかを知るために、彗星コマの中で最も豊富な水の生成率と比べてみましょう。ただし比較する際には、我々の観測と同じ時期（日心距離）の観測結果が必要になります。核に凍りついた分子は太陽に近づくほどより昇華しやすくなるため、生成率は上がっていきます。従って化学組成を議

論する際には、同じ時期の観測結果を比べる必要があるのです。生成率を知りたい分子のある時期の観測結果がなくても、長期に渡る観測によってその分子の生成率と日心距離の関係が分かっていると、ある日心距離における分子の生成率を求めることができます。海外の観測所では、ハール・ボップ彗星の長期観測によって、様々な分子の生成率が太陽に近づくにつれ増加し、遠ざかるにつれ再び減少していく様子を見事に捉えた例があります⁵⁾。我々の観測と同じ時期の水の生成率を求めた観測がなかったのですが、水に関しての同様なモニター観測の結果⁷⁾から、我々がメタノールを観測した時期の水の生成率を見積もることができました。その値と比べると、メタノールの放出量（生成率）は水の約2%とわかりました。メタノールの放出量が莫大だと言っても、水に比べるとわずか2%なのです。さらに他の分子と比べるため、表1にハール・ボップ彗星におけるメタノールを含む6分子の生成率とメタノール分子/他の分子の比を載せました。メタノール分子、シアン化水素分子以外の分子の生成率は、水と同様に他の観測の結果から導き出しました。まずシアン化水素と比べると、メタノールは16倍程度の量があるとわかります。この値を過去の彗星と比べてみると、レビー彗星で28倍、オースチン彗星で80倍、スウィフト・タットル彗星で40-70倍、百武彗星で20倍とかなりばらつきがあります。他の分子との比も、彗星によって多少ばらつきがありました。彗星によってある程度組成が異なるということです。次に、これら分子の彗星での生成率の比を星間と比べてみると、非常に興味深い結果が得られました。いくつかの分子雲(双極分子流を伴う分子雲、大質量星形成領域、暗黒星雲)におけるメタノール分子/他の分子の比も表1に示します。暗黒星雲であるTMC(おうし座分子雲)-1の値を見ると、ハール・ボップ彗星と反対で、メタノールはほとんどの分子より少ないという観測結果になっています。唯一メタノールより多いメチルシアノイド (CH_3CN) で

表 1 : ヘール・ボップ彗星及び星間分子雲での様々な分子の存在量比。

(X はメタノール以外の分子)

分子	ヘール・ボップ彗星		L1157 B1/B2	SgrB2(M)	TMC-1
	生成率 (molecule/s)	[CH ₃ OH]/[X]	[CH ₃ OH]/[X]	[CH ₃ OH]/[X]	[CH ₃ OH]/[X]
CH ₃ OH	1.2×10^{29}	—	—	—	—
HCN	7.6×10^{27}	16	3/41	1-6	0.11
HNC	1.1×10^{27}	109	36/480	3-19	0.07
H ₂ CO	3.8×10^{28}	3	3/60	2-13	0.05
CS	5.6×10^2	21	6/120	1-4	0.4
CH ₃ CN	9.9×10^{26}	21	—	70-470	4

も、せいぜい数倍程度なのです。一方同じ星間の分子雲でも、双極分子流 L1157 (リンズ 1157) B1/B2 (B1 は双極分子流の中、B2 は双極分子流の先端部分) や大質量星が生まれている領域 Sgr (射手座分子雲) B2 (M) では、TMC-1 とは全く違う値を示しており、ヘール・ボップ彗星と同様にメタノールが他の分子より多い傾向にあることがわかります。メタノールが表 1 に載せた他の分子より多いという傾向は、過去の彗星にも見られています。このようにメタノールの他の分子に対する割合を見てみると、分子雲の中でも彗星に近いものと、そうでないものがありますが、これにはメタノール分子の星間での生成過程が関係していると考えられます。

メタノールは、星間のような気相中で生成される場合と、塵のような固体上で生成される場合があると考えられています。水素分子を除く他の多くの分子が気相中で生成されるのに対し、大きく異なる点です。塵の上で生成された場合、そこに凍り付いているため、塵が温まらないと蒸発して気相中に出てくる事が出来ません。気相に出てきて初めて電波によって観測されるため、電波で観測されるメタノールの存在量は、気相中で直接生成されたものと、塵上で生成されたものが蒸発

してきたものの両方を合わせた量になっている可能性があります。しかし双極分子流を伴う分子雲や大質量星形成領域では、しばしばメタノールの存在量が気相中の反応で予想されるより数桁高い値になるため、大部分は塵上で生成されていると考えられています。ではこれらの領域で、メタノールはどのように塵から蒸発してくるのでしょうか？ L1157B1/B2 では、双極分子流の衝撃波によって塵が急激に熱せられ、メタノールが塵から蒸発しているのではないかと考えられています。SgrB2(M) は大質量の星が次々と生まれているため、その星からの紫外線で塵が熱せられ、同様にメタノールが蒸発してきていると考えられています。一方、TMC-1 では星が少なく、10K 程度という極低温の世界であるため、例えばメタノールが塵上で生成されても蒸発してくることが出来ないのです。

この L1157 B1/B2 や SgrB2(M) でのメタノールの生成・蒸発過程は、まさに太陽系形成当時生成されたメタノールが、彗星核に凍りついたまま長い年月を過ごし、太陽に近づいて初めて蒸発してきたという過程に相当していると言えるでしょう。つまり冒頭で説明したような、彗星は太陽系形成当時の化学組成を保持しているという説と矛盾しない観測結果を、我々は得たことになるのです。

5. 彗星の電波観測のこれから

我々の観測や過去の観測から、彗星でのメタノールの存在比は、塵を温める熱源があるような分子雲と同様に高いということがわかっていますが、その存在比も彗星によって異なります。その違いに影響しているのが何なのか、彗星が生まれた環境、回帰毎に受ける熱変成など様々な要因が関係していると思われませんが、まだ詳しいことはわかっていません。これは、まだ電波による彗星の観測例がそれほど多くないためです。これからどんどんサンプル数が増えれば、彗星の物理状況がより明らかになり、それが化学組成にどう影響を与えているのか、おのずと明らかになっていくでしょう。また高感度の望遠鏡が増えてきていることから、さらに多くの分子が検出され、より詳細な化学組成が明らかになったり、分子の特徴を生かした観測が可能になったり、一度に複数の場所を観測できるマルチビーム受信機も登場するようになってきているので、彗星から放出される分子の分布図をより早く、より多く集められるようになるでしょう。既にそういった観測が徐々に行われつつあり、今までとは違った新しい知見も得られるようになってきました。彗星の電波観測もより多様化してきているのです。彗星はいつでも我々が観測できるところにあるわけではなく、我々が宇宙空間に出て行って観測しない限りは、近づいてくるのを待たなければなりません。しかし待っている間にどんどん技術は進み、より高度化、多様化した観測が出来るようになるのではないのでしょうか。彗星たちは我々の地球に近づくたび、人間たちが毎回さらに向上させた技術でもって自分たちを激写していることに、実は驚いているのかもしれない。

本稿の内容は、岡山大学の川口建太郎氏、スミソニアン天文台の高桑繁久氏、野辺山宇宙電波観測所の砂田和良氏、坂本彰広氏、ハワイ観測所の布施哲治氏との共同研究によるものです⁸⁾。これら共同研究者の方々、及び観測を支えて下さった国立天文台 ALMA 準備室の浮田信治氏他、野辺山宇宙電波観測所のスタッフの方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Colom P., et al. 1990, on ESA, Formation of stars and Planets and the Evolution of the Solar System p. 143
- 2) Bockelée-Morvan D., Padman R., Davies J. K., Crovisier J. 1994, Planet. Space Sci. 42, 655
- 3) Womack M., Stern S. A., Festou M. C. 1997, Planet. Space Sci. 45, 711
- 4) Biver N., Bockelée-Morvan D., Crovisier J., et al. 2000, AJ 120, 1554
- 5) Biver N., Bockelée-Morvan D., Colom P., et al. 1999, Earth, Moon and Planets 78, 5
- 6) Schloerb F. P., Kinzel W. M., Swade D. A., Irvine W. M. 1986, ApJ 310, L55
- 7) Dello Russo N., Mumma M. J., DiSanti M. A., et al. 2000, Icarus 143, 324
- 8) Ikeda M., Kawaguchi K., Takakuwa S., Sakamoto A., Sunada K., Fuse T. 2002, A&A 390, 363

Methanol Observations in Comet Hale-Bopp (1995 O1)

Miho IKEDA

National Astronomical Observatory 2-21-1 Osawa,
Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We detected radio wave spectra of methanol in Comet Hale-Bopp (1995 O1) in February 1997, using 45-m radio telescope at Nobeyama Radio Observatory. Since 45m radio telescope is a sensitive telescope and can detect the radio wave of the wide frequency range, we were able to detect 9 molecular lines. We introduce that what kind of information about chemical composition and the origin of comet will be obtained from this observation.