

彗星氷から太陽系の過去を見る

河北秀世

〈京都産業大学理学部物理学科 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: kawakthd@cc.nao.ac.jp

彗星に含まれる氷や塵は、46億年前の太陽系形成初期の「化石」と言われる。しかし、彗星の何を見れば太陽系形成初期の様子が分かるのであろうか。筆者は、彗星氷に含まれる分子のうち、 H_2O や NH_3 といった水素原子を複数個含む分子の原子核スピン異性体に着目した。筆者らが確立した手法により、 NH_3 の原子核スピン異性体比を地上から可視光高分散分光観測によって比較的精度よく決定できる。その結果、従来よりも容易に、より多くの彗星について彗星氷の起源を調べることができるようになり、そのパラエティーが意外にも小さく、約 30 K という温度がキーになっていることが明らかになった。

1. 太陽系の「化石」：彗星

太陽系形成初期における物理化学進化の過程を明らかにするために、いわゆる、始原天体の観測・研究は非常に重要である。太陽系の比較的内側については隕石や小惑星が、太陽系の外側については彗星やカイパーベルト天体（あるいは TNO: Trans-Neptunian Object）が太陽系の過去をうかがい知るための手がかりとなる。一般の人たちに話をするときには、こうした始原天体を「太陽系の化石」と言うと、何となく雰囲気がかかってもらえるようである。

さて、本稿では彗星に注目してお話をする。彗星は、太陽系形成初期の段階である原始惑星系円盤（いわゆる、原始太陽系円盤）の中で作られた、微惑星の名残であると考えられている。太陽系外縁部で氷が存在した領域で誕生した微惑星のうち、惑星にならなかった残存物というわけである。この残存物は、現在は太陽から遠く離れた場所に存在している。オールト雲（太陽から 1 万～10 万天文単位）やカイパー・ベルト（太陽から 30～数百天文単位？）と呼ばれる領域がそうであっ

て、ここから太陽系の内側へと落ちてきたものが彗星として派手な姿を見せる。

さて、この彗星の何を観測すれば過去が分かるというのだろうか？ 彗星氷の組成はどうだろうか。氷組成は、微惑星誕生までの段階で起きたさまざまな化学反応の結果を反映しているのだから、確かに重要な手がかりになるだろう。1990年代までは、主に氷組成比を手がかりとした、彗星氷の起源に関する研究が行われていたり。しかし、彗星が何度か太陽の近くを通り、揮発性の高い成分が選択的に表層から失われた可能性もあり、当時、別の観点からの研究が必要とされていたのである。

2. 原子核スピン異性体比

彗星氷の起源を探るうえで強力な手がかりとなるものとして、重水素/水素比がある。水素原子を含む分子は、その形成環境の温度によって（特に低温度環境では）、重水素/水素比が大きく変化する。分子雲や星形成領域などの研究においても非常に重要視されているのであるが、重水素/水素比は非常に小さいため、彗星氷において最も豊富

な H_2O についてさえ、その重水素体である HDO の検出は容易ではない。これまでに、わずかに三つの彗星で HDO が検出されたことがあるだけである。

一方、水素原子を複数含む分子は、原子核スピン異性体と呼ばれるグループに分類することができる。例えば、 H_2O は水素原子核を二つ含んでいる。水素原子核（陽子）は原子核スピン ($1/2$) をもっており、二つの水素原子核は等価であるから、これらの入れ替えに対して分子全体の波動関数は反対称になっていなくてはならない。このことから、二つの原子核スピンの相対的な配向によって、分子の回転準位は「オルソ」と「パラ」と呼ばれる状態に分類され、放射遷移や衝突遷移において互いに遷移することが許されない。つまり、一度、オルソかパラに決まってしまうと、そう簡単には別の原子核スピン異性体に変化できないのである。そのため、現在、観測される H_2O 分子のオルソ/パラ比から、分子形成の起こった時代の情報を抽出できる可能性があるのだ。

こうした可能性をいち早く見抜き、実際にハレー彗星において H_2O のオルソ/パラ比を求めたのが、Mike Mumma (NASA, ゴダード・スペースフライトセンター) であった²⁾。彼は 1987 年に地球に近づいたハレー彗星をターゲットとし、地球大気に含まれる水蒸気の影響を避けて、飛行機に搭載された望遠鏡によって H_2O ガスの輝線を観測した。この観測結果からオルソ状態とパラ状態にある H_2O の比率を求め、熱平衡状態で原子核スピンの配向が決定したと仮定して H_2O のオルソ/パラ比を温度で表してみると（この温度を核スピン温度と呼ぶ）、29 K となった。そのため、この温度が彗星氷の形成環境を反映するのではないか？ と考えられるようになったのである。

もちろん、読者の皆さんも、この解釈には大いに疑問があるだろう。本当に、このような低温の熱平衡状態でオルソ/パラ比は決まったのであろうか？ 確かに H_2O は塵表面反応で豊富に生成さ

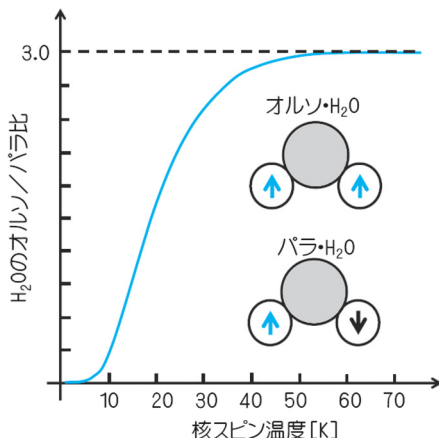


図1 オルソとパラ（水の場合）。水の場合、原子核スピン統計重率比は3であり、高温限界がこれに対応する。ほぼ 50 K 以上では、オルソ/パラ比は3になっている。

れうするため、分子生成熱は塵へと吸収され、低温の熱平衡状態で原子核スピンの配向が決定した可能性がある。もしそうならば、同様に塵表面で生成される NH_3 や CH_4 などの分子の核スピン温度も同じ値を示すはずである。また、本当に分子形成時の環境を反映しているのだろうか。彗星核が形成されて以降に、彗星核の温度と平衡になって変化したのかもしれないではないか。こうした疑問に答えるためには、周期の短い彗星や長い彗星（一般に短周期彗星のほうが核内部の温度が高いと考えられる）の観測、またさまざまな観測条件（特に太陽からの距離）における観測結果の比較が重要である。しかし、2000年の段階で、彗星分子における核スピン温度は H_2O でしか決定されておらず、信用できる測定結果は、わずかに3例だったのである。

3. アンモニアのオルソ/パラ比

彗星における H_2O 以外の分子における核スピン温度決定は、なかなかうまくいかなかった。他の分子としては、アンモニア分子 (NH_3) が次のターゲットとして注目された。水素原子核を三つもつアンモニアは、やはりオルソとパラに分類で

き、核スピン温度の決定が可能である。また、アンモニア分子は 23 GHz 帯に反転遷移のラインがあり、分子雲などの観測でよく利用されている。しかし、意外と知られていないことであるが、彗星におけるアンモニア分子の電波観測はほとんど成功していない（はっきりと検出されたのは 2 例のみ）。これは、アンモニアの空間分布が比較的にコンパクトであるため、大きなアンテナを用いないとビーム径に対してアンモニアの存在領域が小さすぎて感度を損するためである。20 世紀最大の彗星と言われたヘール・ボップ彗星を Effersberg にある 100 m アンテナで観測したときでさえ、アンモニアの輝線は検出できたものの、オルソ/パラ比は精度よく求められなかったのである³⁾。ヘール・ボップ彗星でダメだったものを他のもっと暗い彗星でできるかというところかなり悲観的にならざるをえない。来る大型干渉計 ALMA 時代に 23 GHz の受信機があれば、可能性はあるだろう。また、電波以外にも近赤外領域で振動遷移を捕らえるという試みもなされているが、地球大気の影響が大きく、精度よい観測ができるとは言えない状況である。

こうした状況を打開する方法は、意外な方向から現れた。NH₂ という別の分子を使う方法である。これは筆者らが提案した方法であり、この新手法によって観測可能な彗星の数が増え、彗星水のオルソ/パラ比から見た彗星の起源に関する研究が進んだのである。

筆者はもともと、彗星コマ中の NH₂ 分子についての研究を行っていた。これは、1995 年に筆者が彗星の研究を始めた頃、観測で得られた可視低分散スペクトルをもって相談に訪れた国立天文台・広報普及室の渡部潤一助手（当時）が、「この彗星、NH₂ が強いねえ。NH₂ を研究してみるといいんじゃない？」とこともなげにおっしゃったからである（ちなみに当人は覚えていない、らしい）。ともあれ、ほぼ可視光領域のスペクトルを再現できる程度のモデルを構築した頃、これを何か

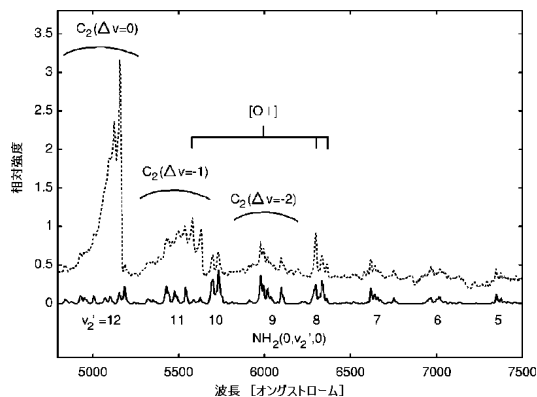


図 2 可視光領域における彗星低分散スペクトル（破線）と NH₂ 輝線モデル（実線）の比較。通常、可視光では C₂ などの輝線が卓越している。

に適用できないか？ と思うようになった。H₂O と同様、NH₂ もオルソとパラに分類できる。H₂O のオルソ/パラ比は過去の情報を担っているようであるが、NH₂ はどうであろうか。NH₂ は NH₃ が光解離されてできているので、NH₂ のオルソ/パラ比から得られる核スピン温度を求めても、これは過去の情報にはならない。しかし、何らかの方法で、NH₂ のオルソ/パラ比から、もとのアンモニアのオルソ/パラ比が分かるのではないだろうか？ と考えた。

実際、光解離反応に際して、アンモニアと NH₂ の原子核スピンは一定の法則に従って決まっている。そうした原子核スピンの選択則を利用すれば、NH₂ のオルソ/パラ比から NH₃ の核スピン温度が得られるのである。これは、彗星分子のオルソ/パラ比を、その光解離生成物から決めるという初めての試みであった。こうして、NH₂ の研究が、NH₃ の研究へとつながったのである。

4. 核スピン温度と分子形成環境

筆者が NH₂ からアンモニアの核スピン温度を得るというアイデアを着想した頃、C/1999 S4 (LINEAR) という彗星が発見されて、2000 年 7 月ごろに明るくなると分かった。すばる望遠鏡の

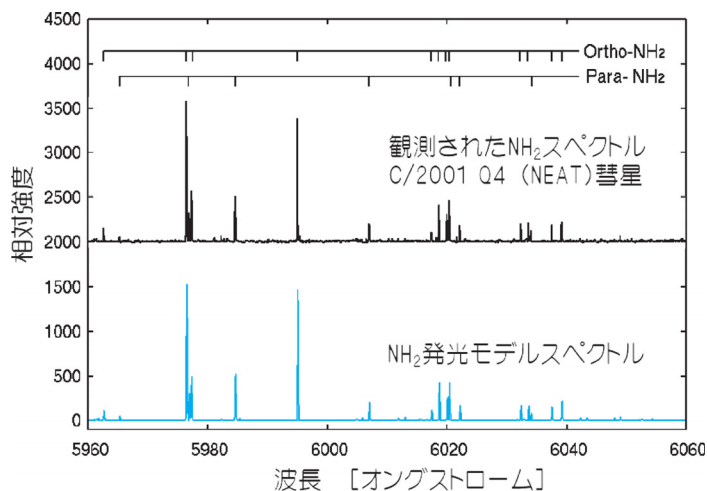


図3 NH_2 の観測とモデルの比較. C/2001Q4 (NEAT) 彗星の場合. この彗星の場合は, NH_2 のオルソ/パラ比が 3.2 ± 0.7 と求まった. これより NH_3 の核スピン温度は 31 K となる.

HDS (高分散分光装置) の試験観測の一環として, この彗星を観測していただくことができたのは本当に幸いであった. さっそく NH_2 のスペクトルを抽出し, モデル計算との比較から NH_2 のオルソ/パラ比を決定したところ, アンモニアの核スピン温度が 28 K と得られたのである. これは, それまでに彗星の H_2O で得られていた温度と同程度であり, 適当な原始太陽系星雲の温度分布モデルを仮定すれば, 土星から天王星軌道の付近に相当する領域で彗星氷が形成されたことを意味していた⁴⁾.

これを最初のサンプルとして, これ以降, いくつかの彗星について観測を新たに行い, また, 過去の観測データを掘り起こして再解析するなどして, サンプル数を増やしている. その結果, 次のような結果が得られている.

- (1) アンモニアの核スピン温度は, およそ 25–35 K の範囲にあり, H_2O の結果と整合的である.
- (2) 核スピン温度と, 周期などの力学的特徴や, 観測された時点での太陽からの距離などとの間には, ほとんど相関はない.
- (3) オルソ/パラ比は, 彗星コマ中で核からの

距離によって変化していない.

(1) の結果は, 少々, 意外であった. このことについては次節で議論したい.

(2) と (3) の結果は, 核スピン温度が彗星核形成以前の情報を示していることを改めて確認することになった. 例えばオルソ・パラ変換が固相で速やかに行われる場合, その温度は彗星核表面の温度となっていると予想される. 当然, 核表面の温度は太陽からの距離の関数であるが, 観測結果には, そのような傾向は見られていない. また, 過去のヘール・ボップ彗星のデータを利用することで, ヘール・ボップ彗星においては H_2O と NH_3 の両方について核スピン温度が得られた. その結果, 両者は誤差の範囲で一致しており, 原子核スピンの配向が熱平衡状態で達成されたとする仮説を支持する結果となったことも, 核スピン温度の解釈という点で非常に重要であった. これに関しては, 最近, 別のグループによって H_2O のホットバンド輝線から核スピン温度を求める手法が確立され⁵⁾, いくつかの彗星において H_2O と NH_3 の核スピン温度が比較可能になってきた. また, 昨年には筆者らのグループにより, C/2001 Q4 (NEAT) 彗星において H_2O , NH_3 , CH_4 の三

表 1 これまでに観測された彗星分子の核スピン温度

彗星	H ₂ O	NH ₃	CH ₄	力学的起源	備考
1P/Halley	29±2			オールト雲	ハレー彗星
C/Wilson	≥50 ^{注1)}			オールト雲	
C/1996 B2			≥50 ^{注2)}	オールト雲	百武彗星
C/1995 O1	28±2	26 ⁺¹⁰ ₋₄		オールト雲	ヘール・ボップ彗星
C/1999 H1	30 ⁺¹⁵ ₋₆			オールト雲	H ₂ O はホットバンド輝線より ^{注3)}
C/1999 S4	≥30	27 ⁺³ ₋₂		オールト雲	H ₂ O はホットバンド輝線より ^{注3)}
C/2001 A2	23 ⁺⁴ ₋₃	25 ⁺¹ ₋₂		オールト雲	H ₂ O はホットバンド輝線より ^{注3)}
C/2000 WM1		30 ⁺⁵ ₋₃		オールト雲	
153P/Ikeya-Zhang		32 ⁺⁷ ₋₄		オールト雲	
C/2001 Q4 (NEAT)	31 ⁺¹¹ ₋₅	31 ⁺⁵ ₋₄	33 ⁺² ₋₁	オールト雲	H ₂ O はホットバンド輝線より ^{注3)}
103P/Hartley 2	36±3			カイパーベルト	周期 6 年
2P/Encke		≥33		カイパーベルト	エンケ彗星, 周期 3 年

注 1) ウィルソン彗星における H₂O の核スピン温度決定は、H₂O 基本振動の一部しか見ていないために精度に問題があるとの指摘がある。また、オールト雲から初めてやってきた彗星であったため、彗星核表層の物質は宇宙線などの被爆によってオルソ/パラ比がリセットされていた可能性も指摘されている。

注 2) この値は Preliminary な結果として出されたものなので、注意を要する。その後、査読付き論文誌には発表されていない。主著者に聞いたみところ、今後も出版はされないだろうとのことであった。

注 3) H₂O の核スピン温度は、以前は大気圏外からの基本振動バンドの観測によっていたが、近年、ホットバンド輝線からオルソ/パラ比を求める手法が確立された。しかし、モデルの不定性から、核スピン温度決定精度は基本振動バンドによる場合に比べると一般的に悪い。

つの分子種について核スピン温度を同時に決定することに成功し、一つの彗星においてこれら異分子がすべて同じ核スピン温度を示すという結果を得ている。核スピン温度が物理温度の良い指標になることは疑いなさそうである。

表 1 に、これまでに得られている彗星分子の核スピン温度をすべて列挙した（筆者らのグループ以外のデータも含む）。NH₃ に関する結果はすべて筆者らのグループによるものである。また、C/2001 Q4 彗星については、先に述べたようにすべて筆者らの観測による。いくつかの観測では残念ながら観測精度が足りず、核スピン温度の下限値しか得られていない場合もあるが、ほぼすべてが ~30 K 前後の値を示している。

特にヘール・ボップ彗星においては多くの観測が行われており、さまざまな観点から彗星氷の形

成環境について研究が行われている。例えば、前述した重水素体の観測である。ヘール・ボップ彗星では HDO と DCN が検出されており、水よびシアン化水素という二つの分子種で異なる重水素/水素比が得られた^{6), 7)}。このような重水素濃集は、極めて低温な環境において見られる現象であって、観測結果を再現する温度環境として、30 K 前後の値が得られている⁷⁾⁻⁹⁾。また、同彗星において Ar が検出されたという報告もあり、このことから彗星核が 35–40 K よりも高温にはなっていないことが示唆されている¹⁰⁾。さらに、Ne の上限値が観測から得られており、温度の下限値として 20–25 K という値が得られている¹¹⁾。一方、実験室においても、H₂O 氷中への異分子閉じ込めに関して観測されている彗星氷の組成は ~27 K で形成された氷と一致するという報告が

あり¹²⁾、近年、彗星氷の形成環境として ~ 30 K という温度がさまざまな研究から明らかになりつつある。

5. オールト雲とカイパーベルト

表1を改めて見てみよう。過去に得られたサンプルのほとんどはオールト雲起源である。オールト雲起源の彗星は、力学的なシミュレーションから、もともとは原始太陽系星雲中の大惑星領域（木星から海王星軌道付近）で形成された微惑星の残存物とされている。木星軌道から海王星軌道付近までの温度は、モデルによっても異なるがおよそファクターにして2倍程度の勾配がある（例えば D'Alessio らのモデル¹³⁾では $60\text{--}25$ K 程度まで変化する）。筆者らがオールト雲彗星に対して得ている核スピン温度はおよそ 30 ± 5 K の範囲であって、予想される温度範囲よりもずっと狭い。前述のモデルでは天王星～海王星軌道付近に相当している。これは、比較的限られた領域で形成された微惑星がオールト雲の形成に大きく寄与した可能性を示唆している。実際、木星による重力散乱は微惑星を太陽系外へと放逐してしまうため、寄与しているのは天王星～海王星付近の微惑星のほうが多いというシミュレーション結果もあり、逆に微惑星の数密度を考えると木星近くのほうが寄与は大きいというシミュレーション結果もあって、はっきりしない^{14), 15)}。現段階では、まだ観測サンプル数が十分ではなく、原始太陽系星雲中の温度モデルにも不定性があるが、太陽が若い星団中で誕生したとした場合のシミュレーション結果と整合的なようである。将来、さらに観測サンプルが増えれば、こうした力学的シミュレーションとの比較は非常に興味深い。

次に、木星族短周期彗星（木星に対する Tisserand パラメーター: $T_J > 2$ かつ周期: $P < 20$ 年と定義されるグループ）について見てみよう。このグループは軌道傾斜角が小さいことが特徴であり、カイパーベルト天体が力学的進化した結果である

とされている。カイパーベルトといえば、海王星軌道以遠（30 天文単位以遠）に分布する小天体であり、その場で作られた微惑星の名残と考えられている。カイパーベルト領域は大惑星領域よりも太陽から遠方にあるので、温度はより低温度であったと考えられる。適当なモデルを仮定すれば $20\text{--}25$ K 程度と期待される。しかし、サンプルは少ないもののカイパーベルト起源とされる彗星の核スピン温度はオールト雲彗星に比べて特に低い値を示しているわけではない。ほとんど同程度なのである。これは、木星族短周期彗星の起源を考えると非常に重要な事実と考えられる。

カイパーベルト天体は、その力学的特徴によってさらにいくつかのグループに細分される。本当にその場で作られた微惑星の名残と考えられるのは軌道離心率も軌道傾斜角も小さな「古典的カイパーベルト」と呼ばれるグループである。また、冥王星をはじめとして海王星との平均運動共鳴にとらえられているグループもある。しかしこうしたグループは、現在、観測されている木星族短周期彗星を供給するには数的に不足していることが最近のハッブル宇宙望遠鏡によるサーベイ観測結果から指摘されている¹⁶⁾。そして、「散乱カイパーベルト」と呼ばれるグループであれば、観測されている木星族短周期彗星を供給しうるのではないかと考えられ始めている。このグループは比較的大きな軌道離心率をもったカイパーベルト天体のグループであり、大きな離心率ゆえに海王星の影響を受ける機会が多い。そして、このグループに属するカイパーベルト天体は、海王星が太陽系形成初期に外側へ移動した結果、大惑星領域から重力的に散乱されたものではないかとも考えられている¹⁷⁾。つまり、オールト雲起源の彗星とほぼ同じ領域で形成された可能性が高いのである。筆者らの観測から得られている核スピン温度は、こうしたシナリオと整合的であると考えている。今後、さらに木星族短周期彗星についてのデータが蓄積されれば、カイパーベルトから彗星への進化

についても議論が進むと期待できる。

17) Gradman B., 2005, *Science* 307, 71

謝 辞

本研究にあたり、渡部潤一助教授（国立天文台）にはたいへんお世話になっている。最初に NH₂ の研究を勧められなければ、本稿のような成果は得られなかったであろう。また、観測でいつもお世話人になっている古荘玲子氏（早稲田大・教育）、布施哲治氏（国立天文台・ハワイ観測所）にはたいへん感謝している。

参 考 文 献

- 1) Yamamoto T., 1985, *A&A* 142, 31
- 2) Mumma M., 1987, *A&A* 187, 419
- 3) Crovisier J., 1999, *Faraday Discuss.* 109, 437
- 4) Kawakita H., et al., 2001, *Science* 294, 1089
- 5) Dello Russo et al., 2005, *ApJ* 621, 537
- 6) Meyer R., et al., 1998, *Science* 279, 842
- 7) Meyer R., et al., 1998, *Science* 279, 1707
- 8) Bergin E., et al., 1999, *ApJ* 510, L145
- 9) Aikawa Y., Herbst E., 1999, *ApJ* 526, 314
- 10) Stern A., et al., 2000, *ApJ* 544, L169
- 11) Krasnopolsky V. A., et al., 1997, *Science* 277, 1488
- 12) Notesco G., Bar-Nun A., 2005, *Icarus* 175, 546
- 13) D'Alessio P., et al., 1998, *ApJ* 500, 411
- 14) Hahn J. M., Malhotra R., 1999, *AJ* 117, 3041
- 15) Weissman P., 1999, *Solar System Rev.* 90, 301
- 16) Bernstein G. M., et al., 2004, *AJ* 128, 1364

Comets as Fossils of Our Solar System

Hideyo KAWAKITA

*Department of Physics, Kyoto Sangyo University,
Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8555,
Japan*

Abstract: Comets are considered to be most pristine icy objects in the solar system. They hold the information of the physical conditions in the solar nebula. Composition of cometary ices, deuterium-to-hydrogen ratios and nuclear spin isomers ratios of cometary molecules have been investigated from the viewpoint of the origin of our solar system. The nuclear spin isomers are focused on here. A nuclear spin temperature derived from the nuclear spin isomers ratio by assuming thermal equilibrium, could be used to infer the physical temperature where the nuclear spins last equilibrated in the solar nebula. Recent studies on the nuclear spin temperatures of cometary molecules are reviewed and the formation of the Oort cloud and the link between the Kuiper belt to the Jupiter family comets are discussed.