

彗星分子のオルソ／パラ比で探る太陽系形成史

河北秀世¹，渡部潤一²，布施哲治²，古荘玲子²

1. 分子のオルソ／パラ比とスピン温度

彗星が太陽系形成期の情報を今に伝える「微惑星残存物」であるという認識がされて以来、多くの彗星研究者が彗星のもつ様々な特性を太陽系の歴史と絡めて議論してきた。そうした議論に取り上げられるのは、彗星核に含まれる水(H₂O)をはじめとする様々な分子の化学組成ということが多かった。1986年のハレー彗星以前に確認された分子は、彗星核から放出された分子(親分子)が太陽光によって光解離した生成物(娘分子)がほとんどであったが、この10年間で確認された親分子の種類は一気に増加している(現在24種類、表1参照)。これは、1996年の百武彗星、1997年のヘール・ボップ彗星という非常に明るい彗星の出現と、電波、赤外領域における観測機器の精度向上によるところが大きい。彗星に含まれる分子の組成は、太陽系の元となった分子雲から原始太陽系円盤にいたる過程での化学進化と密接な関係がある。彗星は原始太陽系の比較的外縁部(巨大惑星領域よりも外側)において集積したと考えられているので、彗星分子の組成を知ることは、太陽系外縁部に氷として存在した分子の化学進化の歴史を探ることにつながる。我々が観測する彗星の分子が持つ物理量のうち、組成比と同様に非常に過去の情報を持つと考えられるものがある。それが、核スピン対称種の存在比である。ここで、核スピン対称種について、H₂Oを例にとって説明しよう。H₂Oに含まれる水素原子核は、電子と同じようにスピンとして±1/2の値をもっている。これを(電子についてよくする

ように)上向き・下向きの矢印で表すことにすると、H₂Oの場合、二つの水素原子の核スピンが揃っている場合と、反対向きの場合とがある。H₂O分子の回転のエネルギー準位には、二つの水素原子が持つ核スピンの方向が揃っているものも反対になっているものもあるが、これらの二つのグループは互いに放射遷移で遷移することがない。こうして分類されたものを一般に核スピン対称種と言う。H₂O分子の場合には前者を「オルソH₂O」、後者を「パラH₂O」と称している。オルソH₂Oは水素原子核の持つ核スピンが揃っているようなエネルギー準位の間でのみ遷移し、パラH₂Oは核スピンが反対になっているエネルギー準位の間でだけ遷移するというわけである。オルソとパラの比率は、互いの水素原子をやり取りするような化学反応によって変化しうるが、通常、星間空間ではガスの密度が低く低温度であることから、そのような気相反応は進みにくい。彗星中のH₂Oのように氷として取り込まれてしまった場合にもオルソ／パラの変換は進み難いと考えられ、H₂Oのオルソ／パラの比率が非常に長い期間、保存されることになる[1]。このオルソ／パラ比が局所熱力学的平衡状態において決まったと仮定すると、そのオルソ／パラ比を実現する回転エネルギー分布として適当な温度のボルツマン分布が考えられる。この場合の温度を、平衡温度あるいはスピン温度と呼んでいる。

1 県立ぐんま天文台

2 国立天文台

表1：彗星の分子組成（典型的な値）、光解離生成物は除外している。H₂Oの量を100とした相対値で示している。

分子	組成比
H ₂ O	100
CO	1～20
CO ₂	3～20
H ₂ CO	0.1～4
CH ₃ OH	1～7
HCOOH	～0.05
HCOOCH ₃	～0.05
HNCO	0.1
NH ₂ CHO	～0.01
CH ₄	～0.6
C ₂ H ₂	0.1～0.3
C ₂ H ₆	～0.3
NH ₃	0.5～1.0
HCN	0.05～0.2
HNC	0.01～0.04
CH ₃ CN	0.01～0.1
HC ₃ N	～0.03
H ₂ S	0.2～1.5
H ₂ CS	～0.02
OCS	0.2～0.5
SO ₂	～0.1
SO	～0.5
CS	0.2
S ₂	0.005

2. 彗星に含まれる分子のオルソ／パラ比と分子形成環境

Mummaらは、オルソ／パラ比が太陽系形成期の情報を担っていると考え、ハレー彗星において、彗星H₂O分子のオルソ／パラ比をはじめで決定した[1]。その後、Crovisierらによってヘール・ボップ彗星とハートレイ第2彗星において彗星H₂O分子のオルソ／パラ比が決定されている[2]。彗星H₂Oの観測は地球大気中の水蒸気に邪魔されるため、飛行機や人工衛星からの観測が必要であり、残念ながら彗星のサンプル数を増やすことは非常に大変である（1986年のハレー彗星から現在までの16年間に3つ

のサンプルしか得られていない）。Mummaらは、H₂O分子のオルソ／パラ比が分子形成時あるいはH₂Oがダストの表面に凝縮した時点で決まった可能性を指摘している。以下、くわしく説明しよう。

通常、気相化学反応による分子生成では生成熱が分子の並進運動、振動、回転運動などに分配され、回転エネルギー分布が非常に高い温度のボルツマン分布となる。ここで「高い温度」と言ったのは、オルソとパラそれぞれにおいて最も低いエネルギー準位について、その差に相当する温度よりも「高い」という意味である。例えばH₂Oの場合、最低エネルギー状態はパラに属し、最も低いオルソのエネルギー準位との差は約34Kに相当する。従って、温度が34Kよりも極端に低くなるとパラの状態に属するH₂Oの数が増え、次第にオルソ／パラ比はゼロに近づく。逆に温度が34Kよりも温度が高くなると、オルソとパラは統計重率にしたがって配分され、オルソ／パラ比は統計重率比である3に近づくことになる。生成熱はこの34Kという値よりはるかに大きな値を取るため、気相反応ではオルソ／パラ比がほぼ統計重率比になる。分子生成後、放射遷移などによって回転エネルギー分布は変化するが、オルソとパラの相互には遷移が起きないため、オルソ／パラ比は統計重率比のままである。これまでに3つの彗星で得られたH₂O分子のオルソ／パラ比はすべて、統計重率比である3よりも有意に小さく、スピン温度は約28～34Kであった。これは、気相化学反応による水分子生成だけでは説明できない値であり、低温度のダストが分子形成に関与した証拠であると考えられている[1, 2]。

例えば星間空間における水素分子の生成については、ダスト表面上での水素分子形成が非常に重要な役割を果たしている。この場合、水素原子同士が結合して分子を作る際の生成熱をダスト⁽²⁾へ逃がすことができる。H₂O分子がダスト表面上の化学反応で生成される場合にも、同様にダストを熱浴として生成熱を捨てることができ、分子の振動・回転の運動

に分配されるエネルギーは小さくなるであろう。そうした結果、スピン温度が低い値を示すと考えられる。ただし、どの程度のエネルギーが回転エネルギーとして分配されるかは、分子の構造や、ダスト表面と分子の相互作用の強さなどによると考えられる。オルソ／パラ比がダストの温度を反映することは確かであるが、分子生成時のダスト-分子間の相互作用について十分に理解されない限り、特別な仮定なしにオルソ／パラ比からダストの温度を得ることは難しい。しかし、ダスト表面と分子の相互作用が十分に大きく、生成熱をダストに十分に逃して局所熱力学的平衡状態になりうる場合には、オルソ／パラ比の解釈は比較的容易となり、「スピン温度＝ダストの温度」と解釈できる。

(注1) 以下、「ダスト」としてシリケート系や炭素系の難揮発性ダストだけでなく、難揮発性物質からなるコアがH₂Oなどの氷マントルに覆われたものを含めて考えている。特に、H₂O氷マントルとH₂OあるいはNH₃などの極性分子は親和性が高いと考えられるので、効果的に生成熱を逃がすことができる可能性がある。

観測されたH₂Oのオルソ／パラ比が統計重率比と異なることについては、気相化学反応によって生成された分子が低温のダスト表面に吸着し、そのダストの温度に相当するオルソ／パラ比に再平衡したという考え方もある。このような再平衡現象はダストが磁気的な性質を帯びている場合などに起こることがある。しかし、彗星に含まれているダストにそのような触媒的作用があるかどうかは良く分かっていない。もしもそのような性質を彗星ダストが持っているとする、彗星核形成後、現在までの約46億年間に彗星核内部の温度に従って更に再平衡が進むと考えられる。その場合、太陽から受ける総輻射量が多い短周期彗星の方が内部温度はより高くなり、結果としてスピン温度は短周期彗星の方が高いという結果が予想される。しかし実際には、周期6年の彗星でも、周期が数千年以上という彗星でも彗星H₂Oのスピン温度が約30K前後と観測されているので、Irvineらは彗星ダスト上でオルソ／パラ比の再平衡が起こる

可能性は低いと考えた[3]。筆者らも、Irvineたちと同様にH₂Oは分子形成時にオルソ／パラ比が決まったと考えている。

3. 彗星アンモニアのオルソ／パラ比

前節で述べた様に、彗星において観測されるH₂O分子のオルソ／パラ比は、低温ダストが分子生成過程に関与した可能性を示唆している。しかし、スピン温度をダストの温度と解釈してよいかどうかは、その分子とダスト表面との相互作用の強さに依存している。では、どうすればそれを調べることができるであろうか。例えば、H₂O以外の分子種においてオルソ／パラ比を調べてみたとして。H₂Oと異なる分子では、分子構造が違うため回転エネルギー準位の構造も違し、ダストとの相互作用の強さも違うと考えられる。ダストと分子との相互作用が弱く、分子形成時にダストと熱力学的平衡状態にならないとすると、別の分子種では異なるスピン温度になるであろう。逆に、同じスピン温度が得られたとすると、これらの分子種においてはダストとの相互作用が共に十分強く、分子形成時にダストと熱力学的平衡状態になってオルソ／パラ比が決まったと考えられる。従って、まずはH₂O以外の分子のオルソ／パラ比を観測し、スピン温度が簡単な温度指標として使えるかどうかを検証することが重要となる。筆者たちは、こうした背景を元に、H₂O分子以外のターゲットとしてNH₃（アンモニア）を選び、そのオルソ／パラ比を求めることを計画した。オルソ、パラといった核スピン対称種は、水素原子が対称な位置についている分子でないと得られない。表1を見て分かるように、そうした分子種としては、NH₃の他にもH₂CO、H₂S、CH₃OH、CH₄などがある。しかし、この中から筆者たちの目的とする温度範囲に合う分子を選択する必要があった。たとえばH₂COなどはオルソとパラの最低エネルギー準位の差が15K程度であり、H₂COがH₂O同様に30Kで熱力学的平衡になるとすると、H₂COのオルソ／パラ比はほとんど統計重

率比に等しくなる。観測の誤差を考慮した場合、期待されるオルソ／パラ比が統計重率比から十分に異なる値を持っていないと、精度の高い温度の推定ができない(統計重率比を含むと、推定される温度の上限が無限大になってしまう)ので、推定したい温度範囲に応じて分子を選ぶ必要が生じるのである。筆者らは彗星のH₂Oで得られている30Kという温度に着目しているため、この付近の温度に対してオルソ／パラ比が大きく変化する、NH₃、CH₄などが適当であると考えた。CH₄については近赤外域での観測が近年になって可能になってきているが、地球大気中のCH₄によって邪魔されるため、精度良いスピン温度推定が困難である。一方、NH₃は1996年の百武彗星、1997年のヘール・ボップ彗星において確実な検出がなされており、オルソ／パラ比の決定ができると考えた。特にヘール・ボップ彗星についてはEffelsbergにある口径100mの電波望遠鏡による観測で、オルソのラインが1本とパラのラインが4本検出されており、オルソ／パラ比を決定できるデータが公表されていた[4]。アンモニアの場合、「オルソ」は3つの水素原子核の核スピンの揃っている状態に対応し、「パラ」はそれ以外のもので

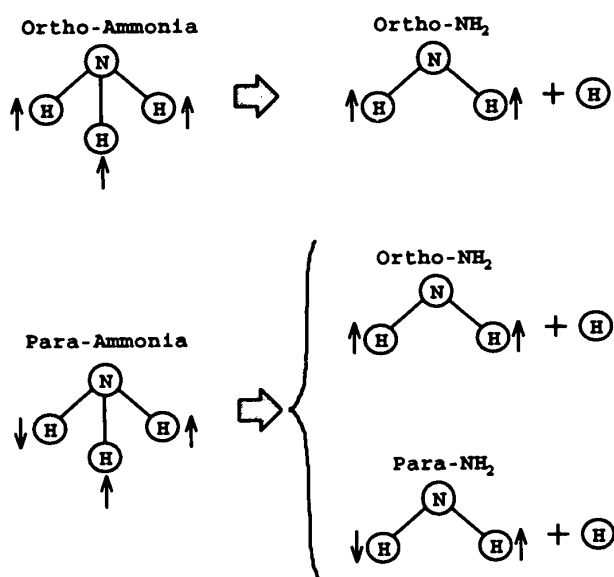


図1：オルソ-アンモニアとパラ-アンモニアの光解離。NH₂もH₂Oと同様に水素原子を二つ持つのでオルソとパラに分類できる。オルソ-アンモニアからは必ずオルソ-NH₂が、パラ-アンモニアからは、オルソ-NH₂とパラ-NH₂の両方が生成される。

ある。オルソとパラの統計重率比は1であり、温度が低くなるに従ってオルソ／パラ比は単調増加する(最低エネルギー準位はオルソに属しており、オルソとパラの最低エネルギー準位の差は23Kである)。公表されている観測結果から、筆者らはボルツマン図を使ってアンモニアのオルソ／パラ比を求めた。その結果、ヘール・ボップ彗星のアンモニアについて $1.04^{+1.03}_{-0.49}$ というオルソ／パラ比が得られた。この場合、得られたオルソ／パラ比の上限値(2.07)はスピン温度にして15Kという下限値に対応する。また、下限値(0.55)は統計重率比(1.0)よりも小さいために、スピン温度の上限値は決まらないという結果になった(オルソ／パラ比の理論曲線は温度が無限大に大きくなると漸近的に1に近づく)。残念ながら、観測精度が充分ではなかったのである。使った観測値は100mという巨大な電波望遠鏡を用いたものであるし、ヘール・ボップ彗星も世紀の大彗星とまで言われたほど明るい彗星であったことを考えると、今後、劇的にこれ以上良いS/Nの成果が得られる見込みは少ない。そこで我々は、アンモニアが彗星コマ中で光解離されて出来るNH₂ラジカルから、アンモニアの情報を引き出せないだろうか考えた。これまで彗星におけるアンモニア量の推定には、このNH₂ラジカルが多く用いられてきた。幸いNH₂は水素原子を二つ対称位置に持つ分子であり、オルソとパラに分類される。NH₂のオルソ／パラ比は、もともなったアンモニアのオルソ／パラ比と関係があるかもしれない。筆者らは、当時、分子研にいらしかった齋藤修二さん(現在は福井大)に協力していただいて、光解離反応の前後において、オルソ-アンモニア、パラ-アンモニアそれぞれが、どのような比率でオルソ-NH₂とパラ-NH₂になるかということをつらやかりにした。それによると、アンモニアとNH₂のオルソ／パラ比には簡単な関係があり、NH₂からアンモニアのオルソ／パラ比を求めることが可能であるという結論に至った(図1)。NH₂は可視光領域で比較的強い輝線を発するため、地上から観測できる。H₂Oのように飛行機や人工衛星から観測することに比べれば、はるか

に容易である。今後のサンプルを増やすことも期待できるし、また、過去の彗星についても他人のデータを元にして調べることができる。メリットは十分にありと考えられる。

4. D/1999 S4 (LINEAR) 彗星

ここ数年来、地球に接近する小惑星をサーベイして発見するプロジェクトがいくつか進行中である。その一つがLINEARと呼ばれるプロジェクトで、リンカーン研究所が行っている。このサーベイによって非常に多くの小惑星が発見される一方、彗星が副産物として見つかる。そうして発見された彗星はすべて「LINEAR彗星」となってしまうので、このところ非常にたくさんの「LINEAR彗星」があって彗星研究者も混乱してしまう。2000年の始め頃には、D/1999 S4は数多のLINEAR彗星の一つにすぎなかった。しかし、2000年7月中旬ごろ、この彗星を一躍有名にする事件が起きる。彗星が近日点に達する少し前、彗星は突如として崩壊、消滅してしまったのである。その様子は、ハッブル宇宙望遠鏡や、チリにある8m望遠鏡VLTなどによって詳細に観測され、彗星核が多くの破片(100mサイズ)に分裂している姿が捉えられた(図2)。

さて、このD/1999 S4 (LINEAR) 彗星こそが、われわれにとって初めてNH₂の観測からアンモニアのオルソ/パラ比を求めた彗星となった。NH₂のオルソとパラの輝線を分離するためには、高分散分光観測を行う必要があった。しかも、オルソ/パラ比を精度良く決めるためには、大口径の望遠鏡による高いS/Nのスペクトルが必要だったのである。結局、そのスペクトルは、国立天文台の「すばる」望遠鏡と高分散分光器HDSによって得られた。2002年7月はじめのこと、彗星崩壊の約2週間前であった。われわれは早速、得られたスペクトルとモデル計算との比較から、NH₂のオルソ/パラ比を求めた(図3)。そして、それを元にしてアンモニアのスピ

ン温度が約28Kであることを明らかにした[5]。残念ながらD/1999 S4 (LINEAR) 彗星においてH₂Oのオルソ/パラ比は得られていないが、アンモニアのスピンの温度と他の彗星で得られたH₂Oのスピンの温度とは、誤算の範囲で一致している。アンモニアとH₂Oという異なる分子においてほぼ同じスピンの温度が得られたことは、これら二つの分子種が分子生成の起こったダストの温度をスピンの温度として反映している可能性が高いことを示している(前節参照)。一方で、近赤外域や電波域の観測からCO, CH₄, C₂H₆といった揮発性の高い分子が多くの彗星に比べて欠乏していることがわかっており、Mummaらはこうした分子が昇華するような比較的暖かい領域、木星軌道付近で彗星核が集積した結果であると考えている[6]。これは、我々の結果から得られた28Kという温度に比べて、高い温度(~50K)を意味している(注2)。この差については、他の観測サンプルもまじえて、次節で議論したい。

(注2) 推定される温度の食い違いは、D/1999 S4 (LINEAR) 彗星が崩壊したということと何か関係している可能性もある。何度も太陽に接近した彗星は揮発性の高い物質ほど先に蒸発して欠乏し、特に彗星核の表層部分でそのような欠乏が著しくなる。崩壊直前であったこの彗星は、すでにサイズも小さくなり、揮発性物質が相当内部まで欠乏した状態にあったのかもしれない。



Break-up of Comet Linear (C/1999 S4)
(VLT ANTU + FORS-1)

ESO PR 15/00 (6 August 2000)

© European Southern Observatory

図2 : D/1999 S4 (LINEAR) 彗星の崩壊。ESOの8m望遠鏡VLTによる観測。

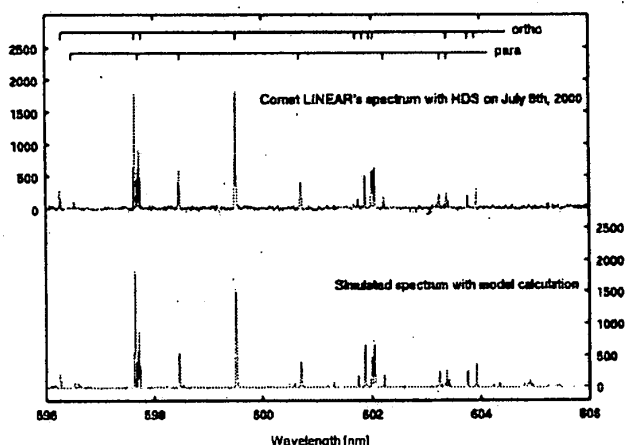


図3: D/1999 S4 (LINEAR) 彗星におけるNH₂の観測とモデル計算による再現。得られたアンモニアのスピニング温度は28Kであった。

5. これまでに得られた結果と今後の展望

現在までに、われわれは4つの彗星について、アンモニアのスピニング温度を求めることができた。ある程度統計的な議論をするためにも、今後、さらに多くのサンプルが必要であると考えているが、現時点までの結果に基づいて分かってきたことを紹介しよう。われわれが求めたアンモニアの結果と過去のH₂Oにおける観測結果とを合わせて表2にまとめた。彗星の数とし

ては全体で6つと少ないものの、アンモニアのスピニング温度がほぼ30K前後であること、そしてそれがH₂Oのスピニング温度と良く一致していることが分かる。特にヘール・ボップ彗星については、われわれは過去の観測データを元にアンモニアのスピニング温度を決定できた(先に示した、アンモニアの直接観測から得られた結果と比べてみてほしい)。ヘール・ボップ彗星はH₂Oとアンモニアのスピニング温度が両方求められている唯一のサンプルである。異なる彗星においてH₂Oとアンモニアのスピニング温度を比較した場合には、彗星毎に形成環境が異なっている可能性を否定できないが、同じ彗星に含まれていたこれらの分子は同じ環境で形成されたと仮定してよいだろう。そうした異分子間でスピニング温度が一致することは、3節でも述べたようにアンモニアおよびH₂Oのスピニング温度が分子形成環境の温度を示している可能性を強く示唆している。ちなみにヘール・ボップ彗星については、池田らによるメタノール(CH₃OH)の電波観測結果[7]からもスピニング温度を求めたところ、水、アンモニアの結果と矛盾しない、約10K以上という下限値が得られている。

では、ここで得られたスピニング温度が分子形成環境の温度であるとして、それはいつ、どこの環境を反

表2: 彗星の分子におけるオルソ/パラ比 (あるいはE/A比) とスピニング温度

彗星	分子	統計重率比	オルソ/パラ比	スピニング温度 [K]	その他
ハレー彗星	H ₂ O	3	2.5 ± 0.1	29 ± 1	オールト雲彗星
ハートレイ第2彗星	H ₂ O	3	2.7 ± 0.1	34 ± 3	木星族短周期彗星(+)
ヘール・ボップ彗星	H ₂ O	3	2.45 ± 0.1	28 ± 1	オールト雲彗星
ヘール・ボップ彗星	NH ₃	1	1.16 ± 0.14(*)	28 ⁺¹⁷ ₋₅	オールト雲彗星
リニア彗星 (D/1999 S4)	NH ₃	1	1.16 ± 0.05	28 ± 3	オールト雲彗星
リニア彗星 (C/2001 A2)	NH ₃	1	1.21 ± 0.05	26 ± 2	オールト雲彗星
池谷・張彗星	NH ₃	1	1.10 ± 0.05	31 ⁺⁶ ₋₃	オールト雲彗星
ヘール・ボップ彗星	CH ₃ OH	1	1.08 ± 0.58	> 10	オールト雲彗星

(*) アンモニアの直接観測[4]から我々が求めたオルソ/パラ比は1.04^{+1.03}_{-0.99}であり、より精度の高い決定が可能となっていることに注目して欲しい。

(+) ハートレイ第2彗星は木星族短周期彗星であり、軌道の観点からはカイパーベルトに起源を持つと予想されたが、その分子組成はむしろオールト雲彗星に似ていることが指摘されており[8]、起源についてははっきりしていない。

映しているのであろう。H₂O およびアンモニア分子の大部分が分子雲中において形成されたとする、太陽系のもととなった分子雲の温度が約30Kであったことを表2の結果は示している。これは、太陽のような低質量星が単独性として暗黒星雲中で出来たと考えると、分子雲の温度としては高すぎるように思われる(典型的な暗黒星雲の温度は10K程度である)。つまり、私たちの太陽はおそらく星団の一員として生まれており、先に誕生した恒星によって分子雲が暖められていたと解釈できる(たとえばオリオン分子雲などのように)。

一方、彗星に取り込まれているH₂O およびアンモニア分子が、原始太陽系円盤中の化学進化の結果生成されたものだとしたら、原始太陽系円盤中の木星から外側の温度分布[9]に応じて、スピン温度は20~50K程度にばらつくと予想される。観測されたスピン温度はほとんど26~34Kの範囲であって、予想されるような大きなばらつきがない。しかし、これより直ちにスピン温度が表しているのは分子雲中の温度である、とするのは危険であろう。例えばオールト雲彗星の形成された領域として木星から海王星の領域が考えられるが、各巨大惑星のオールト雲形成に対する寄与は均等ではない。一般には木星・土星の重力散乱によって外へ飛ばされた微惑星は、その多くがオールト雲に捕獲されずに星間空間へと放出されてしまうと考えられているからである。木星・土星による重力散乱の場合、散乱された微惑星がオールト雲に捕獲される確率は、天王星・海王星の場合に比べて数倍から10倍程度小さいと考えられている[10]。すると、サンプル数が少ない場合、ほとんど全てが天王星・海王星領域から放出された微惑星であるという可能性もありえるのである。天王星から海王星領域では、温度のばらつきは小さく、25~35K程度であると考えられる[9]。現在のところ、得られた観測事実は前者の仮説:「スピン温度は太陽系のもととなった分子雲の温度を反映している」を支持しているように思われる。しかし、サンプル数が少ないこ

ともあって、後者の仮説:「スピン温度は原始太陽系円盤中の温度を反映している」を完全には棄却できない。いずれにせよ太陽系形成初期のある時点での温度を知ることができるわけではあるが、一体、どの段階における温度なのかということについては、更にサンプル数を増やして統計的な議論をする必要がある。

最後に、彗星において観測されている分子の組成やD/H比などから推定される結果とスピン温度の結果を比較しておきたい。星間などの低温度環境における分子形成では、分子のD/H比が大きな値を取ることが知られている[9]。そのため、D/H比は分子形成環境の温度プローブとして重要なのである。これまでに彗星において検出されているD化物はHDOおよびDCNだけであり、これらから求められる水およびシアン化水素におけるD/H比は、それぞれ、 3×10^{-4} および 2×10^{-3} となる。これらの観測事実を説明するためには、およそ20Kから40K前後の温度環境が必要とされている(表3参照)。このように、D/H比の観測からも、やはり分子生成の温度環境として30K前後の温度が示唆されている。結局(少なくともヘール・ボップ彗星において)、H₂O、アンモニアのスピン温度そしてD/H比の示唆する温度が一致し、スピン温度が分子形成環境の温度を表すという仮説を更に補強したことになる。

さて一方で、彗星氷の形成環境(分子形成環境と同一ではない可能性もある)を反映していると考えられる分子組成の観点からは、数個の彗星についてBar-Numらの実験に基づいて30Kよりも若干高い温度範囲が示唆されている(表3)[14, 15]。例えばヘール・ボップ彗星においては45~64Kとされている。また、前節の最後で述べたように、D/1999 S4 (LINEAR) 彗星においてもスピン温度よりも高い温度が分子組成から推定されている。これは、分子形成と彗星氷の形成が異なる環境で起こったことを示唆すると考えられる^(註3)。一つの解釈は、分子形成は分子雲中で起こっており、彗星氷の形成は原始太陽系

彗星分子のオルソ／パラ比で探る太陽系形成史／河北・渡部・布施・古荘

表3：彗星に含まれる分子のD／H比や科学組成から求められる形成温度

彗星	観測	温度範囲	備考
ヘール・ボップ彗星	[DCN]／[HCN], [HDO]／[H ₂ O]	20～0 K	コマ全体[9]
ヘール・ボップ彗星	[DCN]／[HCN], [HDO]／[H ₂ O]	> 30 ± 10 K	コマ全体[11]
ヘール・ボップ彗星	[DCN]／[HCN], [HDO]／[H ₂ O]	20～30 K	ジェット部分のみ[12]
ヘール・ボップ彗星	[HDO]／[H ₂ O], [CO ₂]／[H ₂ O]	25～40 K	[13]
ハレー彗星	[CO]／[H ₂ O]	48 K	[14]
百武彗星	[CO]／[H ₂ O], [C ₂ H ₆]／[CH ₄]	64～6 K	[14]
ヘール・ボップ彗星	[CO]／[H ₂ O]	45～64 K	[14]
C／1999 T1	[Ar]／[O], [CO]／[H ₂ O]	40～50 K	[15]
C／2001 A2 C／2000 WM1	[Ar]／[O], [CO]／[H ₂ O]	> 60 K	[15]

円盤中で起こったと考えることである。つまり、太陽系のもとになった分子雲は約30Kの温度であり、その環境で分子のオルソ／パラ比やD／H比が決まる。その後、原始太陽系円盤に降り積もった際のショック加熱^(注3)で気相にもどった分子が、原始太陽系円盤内で再凝縮した時に水の分子組成が決まったという仮説である[16]。

(注3) Bar-Numらによる彗星氷形成環境の温度推定については、H₂O氷形成の際のガス捕獲が重要となっており、彼らの実験が実際の彗星氷の形成過程を忠実に模擬していない可能性もある。

(注4) 原始太陽系円盤へのinfall shockがあった場合、オルソ／パラ比やD／H比がリセットされる可能性もある。例えば、水素分子のオルソ／パラ比は星間空間において統計重率比より小さい値を示すことが多いが、ショック領域では統計重率比をとる例が報告されている。

この仮説を検証するために、スピン温度を多数の彗星サンプルについて調べることは重要である。多数の彗星においてスピン温度がばらつかなければ、スピン温度が分子雲中の温度環境を示している可能性が高くなる。特にオールト雲彗星だけでなく、もともとはカイパーベルト領域で集積した彗星(木星族短周期彗星として観測される)についてもサンプルを増やすことが重要である。木星族短周期彗星がカイパーベルト領域

の温度を反映したスピン温度を示すなら、それは約20Kときわめて低温度であることが予想され、スピン温度のばらつきが大きくなると考えられるからである。逆にスピン温度が50～20K程度に分散すれば、原始太陽系円盤中の温度を反映している可能性が高くなり、Bar-Numらの実験結果との食い違いについて再検討する必要が生じるだろう。

以上、本稿で述べたことをまとめよう。我々は、アンモニアのオルソ／パラ比をNH₂輝線の可視高分散スペクトルから精度良く決定し、アンモニアのスピン温度を求める手法を確立した。この手法はH₂Oの場合と異なり、サンプルを容易に増加させることがきであるため、スピン温度について統計的な議論が可能となる。また、現在までに得られた彗星のスピン温度を示し、それがアンモニアおよびH₂O分子形成環境の温度を反映していることを示した。その温度は約30Kであり、ダスト表面上での分子生成を強く示唆する。また、スピン温度の反映している環境は、太陽系の元になった分子雲の温度であることが他の観測との比較から示唆され、暗黒星雲と比べると比較的暖かい30 K程度の分子雲中で太陽が形成された可能性が高いと考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたって御協力いただいた、福井大学の齋藤修二さん、国立天文台の青木和光さんに感謝します。また、Hale-Bopp 彗星の高分散スペクトルを提供していただいた H. Zhang さん、そして池谷-張彗星の高分散スペクトルを提供していただいた G. Cremonese さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] Mumma, M., et al., 1993, in *Protostar and Planets III*, 1177.
- [2] Crovisier, J., 1999, in *Formulation and Evolution of Solids in Space*, 389.
- [3] Irvine, W., et al., 2000, in *Protostar and Planets IV*, 1159.
- [4] Bird, M., et al., 1997, *Astron. Astrophy.*, 325, L5.
- [5] Kawakita, H., et al., 2001, *Science*, 294, 1089.
- [6] Mumma, M., et al., 2001, *Science*, 292, 1334.
- [7] Ikeda, M., et al., 2002, *Astron. Astrophy.*, 390, 363.
- [8] A'Hearn, M., et al., 1995, *Icarus*, 118, 223.
- [9] Aikawa, Y., & Herbst, E., 1999, *ApJ*, 526, 314.
- [10] Weissman, P., 1999, *Space Sci. Reviews*, 90, 301.
- [11] Meier, R., et al., 1998, *Science*, 279, 1707.
- [12] Blake, G. A., et al., 1999, *Nature*, 398, 213.
- [13] Bergin, E. A., et al., 1999, *ApJ*, 510, L145.
- [14] Notesco, G., et al., 1997, *Earth, Moon and Planets*, 77, 237.
- [15] Weaver, H., et al., *ApJ*, 576, L95.
- [16] Meier, R., & Owen, T., 1999, *Space Sci. Reviews*, 90, 33.