



# ひさき衛星で解き明かす 彗星の核近傍のガス中で生じる物理現象

鈴木 雄 大

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: suzuki.yudai@jaxa.jp

彗星は、初期太陽系環境の理解に重要な研究対象である。彗星のガスの観測から核の化学組成を推定するためには、核近傍で生じる物理現象の理解が不可欠である。そこで、ひさき衛星による高空間分解能の紫外線分光観測が重要な役割を果たす。本稿では、ひさき衛星による彗星の観測例と、それを基に構築された光の放射伝達モデルから得られた新たな知見について紹介する。

ひさき衛星は、木星系を始めとする惑星環境の観測的解明を主目的として様々な惑星の観測を行ってきた。一方で、惑星以外の天体の観測も多く行っている。そのうちの一例が彗星である。本記事では、ひさき衛星による彗星の観測例と、そこから明らかになった彗星大気（コマ）中で生じる物理現象に関する研究成果について紹介する。

## 惑星科学における彗星研究の意義

### 彗星と初期太陽系環境

時に夜空で美しい姿を見せてくれる彗星。2024年にC/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS)、いわゆる紫金山・アトラス彗星を見た（見ようと頑張った）方もいらっしゃるだろう。一般的には彗星といえばやはり美しい尾をイメージする方がほとんどだが、本来の彗星の定義は揮発性物質を多く含む希薄な大気（コマ）をまとった小天体である。その「本体」と言える固体の核の大きさはせいぜい数km程度だが、核表面の氷の昇華により放出されるガスは数百万km、すなわち太陽に匹敵するほどの大きさにまで広がる。放出されたガスやチリの一部は太陽光等の影響を受けて彗星核から遠くまで輸送され、時に美しい尾として観測

される。

彗星の多くは海王星以遠の太陽系外縁部に起源を持つと考えられている。中でも、短周期彗星は太陽から約30-50天文単位に存在するエッジワース・カイパーベルトと呼ばれる小天体群、長周期彗星は太陽から約1-10万天文単位ほどに存在するとされているオールの雲と呼ばれる小天体群が起源であると考えられてきた。小惑星同様、彗星も初期太陽系の姿をとどめた微惑星の生き残りである可能性が高く、微惑星の集積・成長過程や初期太陽系外縁部の温度・酸化還元環境等を現在に伝える貴重な研究対象である。また、彗星は初期地球への水の供給源の候補天体としても注目されている。特に短周期彗星の重水素・水素同位体比（D/H比）は地球に近いものが多く、水起源の1つとして有力視されている。ESA（European Space Agency）のRosetta探査機による67P/Churyumov-Gerasimenkoの周回探査（2014-2016年）では当初、地球の3倍以上（ $5.3 \times 10^{-4}$ ）という非常に高いD/H比が報告された[1]。しかし、最新の再解析結果[2]からダスト表面へのH<sub>2</sub>Oの再凝結・再昇華に伴うD/H比の一時的な上昇が明らかになり、同彗星の核のD/H比は地

球の約1.7倍 ( $2.6 \times 10^{-4}$ ) であると見積もられた。一方で、非常に活動的でダストの放出量が多い彗星ほどD/H比が低くなるという傾向も指摘されており [3], 彗星の起源や活動度と同位体比の関係性についてはさらなる丁寧な議論が必要である。

### 彗星の化学組成とコマの観測

彗星の形成環境は核の化学組成に現れる。例えば低温環境で形成された彗星はCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比が高く、還元的な環境で形成された彗星はCO/CO<sub>2</sub>比が高い可能性が高い [e.g. 4]。一方で、彗星が遠方から太陽に接近する際、表面温度の変化に応じて核からのガスの放出率は大きく変化する。このとき、分子種により昇華温度が異なるため、日心距離に応じて遠方ではNH<sub>3</sub>, CO, CO<sub>2</sub>中心、地球近傍付近ではH<sub>2</sub>O中心、というようにコマの組成が変化する。また、分子の質量等に応じてコマ中での速度が異なるほか、ガス中では光解離反応が進行しており、解離生成物(娘分子)の観測から解離前の分子(親分子)の放出量を推定する場合には分子種により解離率も異なる。したがって、コマの観測から核の組成を推定するためには、核からの水の昇華過程やコマ中での運動様式 の理解が必須となる。特に核近傍では分子の光解離・電子衝突解離や原子間衝突等の複雑な現象が生じていると考えられているが、探査機会の乏しさや高空間分解観測の少なさから、核付近でのコマ(内部コマ)における物理現象の理解は進んでいない。

### 紫外線による彗星の観測

紫外線による彗星観測では、水分子や二酸化炭素分子から解離生成した水素原子、酸素原子、炭素原子など、親分子から解離生成した原子(一般化して娘分子と呼んでしまうことが多い)が発する輝線が主に対象となる。地球大気が紫外線を強く吸収するため、紫外線観測には、地上望遠鏡は使用できず宇宙望遠鏡や探査機の打ち上げが必須であるという最大の欠点が存在する。しかしその一方で、娘分子は親分子に比べて軽く速度が大き

いため非常に広がった分布を持っており、飛翔体搭載という制約の強い望遠鏡であっても観測しやすいという利点がある。Rosetta探査機搭載の紫外線分光器Aliceでは、水素・酸素・炭素原子の輝線の観測結果とモデルの組み合わせにより、親分子にあたる水分子や二酸化炭素分子の核からの放出率を推定し、核全体の化学組成や核表面におけるガス放出領域が議論されてきた [e.g. 5, 6]。水放出率に関しては、SOHO衛星に搭載された太陽風観測カメラSWANが数多くの長周期彗星のLy- $\alpha$ 線の放射輝度を観測してきた [e.g. 7]。これらの研究により、大まかには太陽接近経験の少ない彗星ほど水放出率の日心距離依存性が緩やかになるという傾向が見られた。

しかし、Rosetta/Aliceが近接観測を行った67P/Churyumov-Gerasimenkoは非常に軌道周期が短く活動度が低いため、先述した内部コマ特有の現象の観測的実証に至ったとは言いがたい。また、SOHO/SWANの空間分解能は1°であり、コマ中におけるLy- $\alpha$ 線の放射輝度の詳細な空間分布は捉えられていない。

ここまで述べたように、彗星の核(さらには初期太陽系外縁部)の化学組成を明らかにするためには、彗星のコマ中で生じる物理現象の解明が重要である。紫外線分光観測では核から放出された分子から解離生成される娘分子の分布を捉えることができるが、これまでに活動度の高い彗星の内部コマの高空間分解観測の例はほとんどなかった。そこで登場するのが、我らが「ひさき衛星」である。

## 彗星コマ中のLy- $\alpha$ 線の放射輝度分布

### ひさき衛星による彗星観測

一般的に、長周期彗星の方が短周期彗星よりも太陽接近経験が少ないため、より始原的な姿をとどめていると考えられる。また、活動度(ガス放出率)がより大きく、コマ中の物理現象の研究にも向いている。したがって、本研究ではひさき衛星による4種類の長周期彗星の観測データを解析

表1 解析対象とした長周期彗星

彗星名	近日点 通過日	近日点距離 (天文単位)	観測期間	観測時の 日心距離 (天文単位)	観測時の 地心距離 (天文単位)
C/2013 US10 (Catalina)	2015/11/15	0.823	2015/11/22-2015/12/02	0.829-0.884	1.50-1.69
C/2013 X1 (PanSTARRS)	2016/04/20	1.31	2016/05/30-2016/06/02	1.44-1.46	0.910-1.01
C/2015 ER61 (PanSTARRS)	2017/05/09	1.04	2017/06/02-2017/06/03	1.11-1.12	1.38-1.40
C/2015 V2 (Johnson)	2017/06/12	1.64	2017/06/25	1.65	0.892-0.901

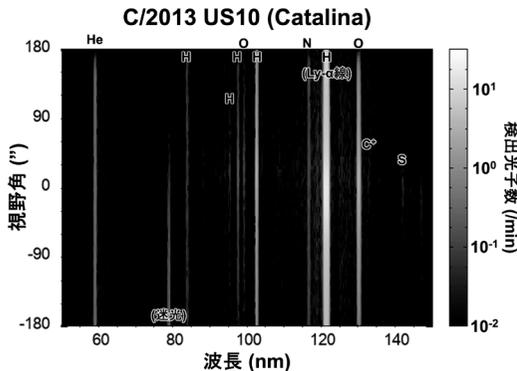


図1 ひさき衛星で得られた彗星のデータの例

した(表1). ちなみにこれら以外にも、観測した  
が暗くて輝線がほとんど検出できなかった彗星な  
どもあった. 得られたスペクトルの例を図1に示  
す. 横軸は波長, 縦軸はスリット長手方向に沿っ  
た視野角を表している. 他のひさき衛星関連の記事  
でも同様のスペクトル図が登場するが, 彗星は  
コマまで含めると非常に広がっているため, 惑星  
等の観測データとは異なり縦方向一杯に信号が  
入っているのが特徴である. 横軸(波長)方向に  
データを見ていくと, 水素(121.6, 102.6, 97.4 nm  
など), 酸素(130.4 nmなど), 硫黄(142.5 nm),  
窒素(116.8 nm), 炭素イオン(133.5 nm)等の  
様々な原子種の発する輝線が検出されていること  
がわかる. 縦軸(視野角)方向に見ると, 各輝線  
の放射輝度の1次元の空間分布がわかる. 視野中  
心に核が来るように観測しているため, 視野角0°  
付近で各輝線の放射輝度が最大となっている. 空間  
分解能は約10"なので, 例えば波長121.6 nmの  
領域の明るさの分布を見れば, Ly- $\alpha$ 線の放射輝

度, さらにはコマ中の水素原子の分布を $10^4$  kmより  
高い空間分解能で算出することができる.

### データの1次処理: 新たな感度較正手法の導入

ひさき衛星の観測データを用いて彗星の核からの  
水放出率を評価するためには, Ly- $\alpha$ 線の放射輝  
度分布の測定が必要である. しかし, Ly- $\alpha$ 線の輝  
線波長付近における感度の評価は困難を極めた.  
彗星に限らずLy- $\alpha$ 線は非常に明るいため, 長年の  
蓄積により検出器の波長121.6 nmにおける感度  
(正確には, マイクロチャンネルプレート: MCP  
のゲイン)は他波長に対応した領域に比べて著し  
く低下している. 特に, 木星圏の観測の際等に視  
野中央付近は幅20", 視野角約45"以上は幅140"  
というダンベル型のスリット[e.g. 8]が頻繁に用い  
られていたため, 視野の両端付近では中央以上に  
感度低下が急速に進行していた. ひさき衛星では  
恒星の観測データを用いて感度較正を行ってきた  
が, 感度の空間不均一性を評価するためには, 視  
野内の1点のみを占める恒星の観測では不十分で  
あり, 検出面全体を包括できる新たな感度較正手  
法を適用する必要があった. そこで, 観測データ  
に混入した地球高層大気(ジオコ罗纳)起源の輝  
線の放射輝度を評価するために取得された, 各観  
測天体から視野角を少し外した観測データ(スカ  
イ観測データ)を用いた感度較正法を新たに考案  
した. ジョコ罗纳のLy- $\alpha$ 線/Ly- $\beta$ 線放射輝度比が  
視野内で一定と仮定した場合, 得られたデータの  
Ly- $\alpha$ 線/Ly- $\beta$ 線検出光子数比の時空間変化には検  
出器の感度変化が直接反映されているとみなして  
各観測時における感度を評価した(図2).

得られたLy-α線の放射輝度分布

感度較正を行ったのち、観測データからスカイ観測データを引くことにより、視野内に混入するジオコ罗纳の信号を除去し、彗星起源の信号を抽出する。こうして得られた長周期彗星のLy-α線

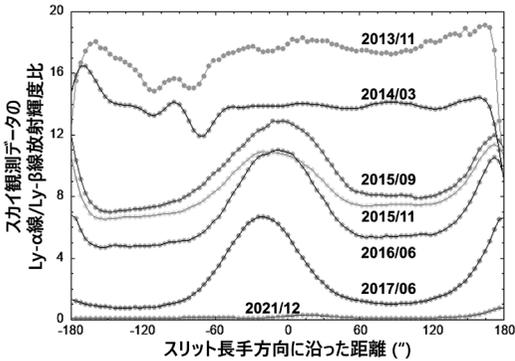


図2 ひさき衛星のスカイ観測データにおけるLy-α線/Ly-β線放射輝度比の時間変化。検出器の感度はこれらの値に比例していると考えられる。

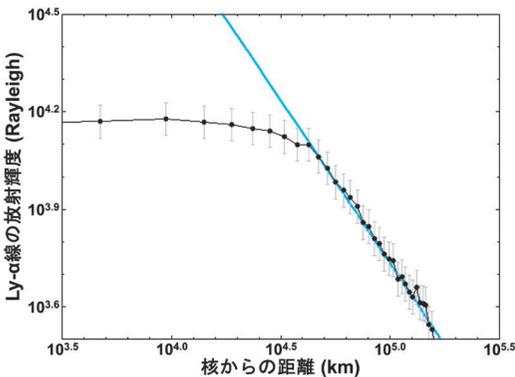


図3 ひさき衛星で得られた彗星コマ中のLy-α線放射輝度分布の、解析解によるフィッティング例。黒点が観測データ、青線が解析解を表す。

の放射輝度分布を図3に黒点で示す。図3の彗星の場合、核から $4 \times 10^4$  km以上遠い領域では、放射輝度が核からの距離に反比例して減少する一方で、核に近い領域では減少がほとんど見られないことがわかる。

彗星の活動度の評価

彗星の水放出率と活動領域の面積

まず、得られたLy-α線放射輝度分布から、各彗星の活動度を算出する。計算コストを抑えるために非常に単純化した解析解 [9] で計算した水素原子数密度分布を用いて観測データへのフィッティングを行うと、上述の核から $4 \times 10^4$  km以上の領域ではモデルと観測データがよく適合することがわかる (図3青線)。ここから水放出率を計算すると、表2の2列目の値が得られる。

続いて、各彗星の観測時の日心距離から期待される単位面積あたりの水分子放出量 [10] を観測で得られた水放出率と比較すると、それぞれの核表面における活動領域の面積を計算することができる (表2の3列目)。さらに、活動領域の面積を核の表面積 [11] で割ることにより“active fraction”と呼ばれる核表面における活動領域の割合の指標を算出することができる (表2の4列目)。今回解析した4彗星のうち、C/2013 X1 (PanSTARRS) については核の大きさの測定例が存在しなかったためactive fractionを算出することができなかったが、他の3彗星については最大でも25%程度という結果が得られた。C/1996 B2 (Hyakutake) など、一部の彗星ではこのactive fractionは100%を大きく超えることがある [3]。これは水を

表2 ひさき衛星のデータ解析から得られた長周期彗星の活動度の評価

彗星名	水放出率 (l/s)	核表面の活動領域の面積 (km <sup>2</sup> )	核表面における活動領域の割合 (%)
C/2013 US10 (Catalina)	$(4.8 \pm 0.2) \times 10^{28}$	$8.8 \pm 0.1$	$25.8 \pm 0.4$
C/2013 X1 (PanSTARRS)	$(6.9 \pm 0.7) \times 10^{27}$	$7.4 \pm 0.6$	—
C/2015 ER61 (PanSTARRS)	$(4.3 \pm 0.6) \times 10^{27}$	$1.8 \pm 0.4$	$16.7 \pm 0.3$
C/2015 V2 (Johnson)	$(1.4 \pm 0.3) \times 10^{27}$	$1.9 \pm 0.4$	$5.3 \pm 1.1$

含んだダストがガスと共に核から噴出され、さらにそのダスト表面からも水分子の昇華が進んでいる場合、水放出領域の総面積が核の表面積よりも大きくなるためである。しかし、今回解析対象とした彗星ではこのような現象は支配的ではなかったことがわかる。

## 彗星コマ中で生じる物理現象

### 光子の多重散乱効果

前節では、単純化した解析解を用いて外部コマにおけるLy- $\alpha$ 線放射輝度分布から水放出率を得た。しかし、図3が示す通り、内側については本モデルでは観測データを全く再現できず、モデルでは考慮していない物理過程が生じていることがわかる。核近傍でのLy- $\alpha$ 線の放射輝度の折れ曲がりにはSOHO衛星搭載コロナグラフLASCOによるC/1997 H2 (SOHO)の観測でも見られており[12]、こちらはHaser modelと呼ばれる他の単純な解析解[13]で再現されている。しかし、C/1997 H2 (SOHO)は近日点距離が非常に小さいサングレーザと呼ばれる彗星で、我々の研究で解析した彗星とは軌道要素ならびに親分子の光解離寿命等のパラメータが大きく異なるため、同様の解析解ではひさき衛星の観測結果は再現できない。

核近傍では分子の光解離・電子衝突解離に加えて原子間衝突が起こりうる。しかし、原子間衝突を考慮した数値計算結果[e.g. 14]を見ても、 $10^4$ – $10^5$  kmの領域に水素原子数密度分布の顕著な変化は見られていない。また、今回の解析結果を見ると、いずれの彗星においても、水素の視線に沿った柱密度が $(1-3) \times 10^{22}/\text{km}^2$ となる高度付近からLy- $\alpha$ 線の放射輝度の傾きが大きく変化していることがわかった。そこでこの折れ曲がりの原因として我々が目をつけたのが、光子の「多重

散乱」と呼ばれる現象である。

彗星は揮発性物質を激しく噴出している天体だが、それでもガスは非常に希薄であり、コマ中の多くの領域ではある水素原子が放出したLy- $\alpha$ 線は他の水素原子に再吸収されることなくコマを出て観測者まで届く(単散乱)。しかし、核付近や活動度が高い場合など、水素の密度が上昇すると、ある水素原子から放出されたLy- $\alpha$ 線の一部は他の水素によって吸収・再放射されるようになる(多重散乱)。このとき、再放射の効率が100%でないことや再放射する方向がランダムであることにより、水素原子の数密度と観測されるLy- $\alpha$ 線の放射輝度が比例しなくなり、単散乱のみを仮定した場合に比べて放射輝度が暗い傾向になる。ここからは、ひさき衛星で観測されたLy- $\alpha$ 線放射輝度の折れ曲がりへの多重散乱の寄与を検証するために、コマ中でのLy- $\alpha$ 線の放射伝達モデルを構築し、多重散乱が支配的となる条件を考察する。

### 多重散乱効果を考慮した放射伝達モデルの構築

ここではモンテカルロ法を用いて多重散乱による光の伝搬を再現する。放射伝達計算に必要な彗星コマ中の水素原子の数密度分布は、 $\text{H}_2\text{O}-\text{OH}-\text{H}$ の光解離系を考慮した解析解[15]\*1を用いて計算

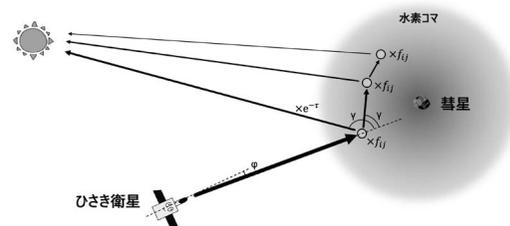


図4 多重散乱を考慮した放射伝達モデルの概念図  
計算コストの削減のため、実際の現象とは正反対に、ひさき衛星から放射された光子が彗星のコマ中で数回吸収・再放射されたのち太陽に到達する確率を計算する。

\*1 3種類の解析解[9, 13, 15]が登場していてややこしくなりましたが、いずれも仮定している条件は非常に類似している(大まかに言えば、先に登場するものほど単純化度合いが高い[9>13>15])。特に、放射伝達モデルの構築に使用した解析解[15]は、Haser modelと呼ばれる彗星コマ研究で最も広く使われている解析解[13]を $\text{H}_2\text{O}-\text{OH}-\text{H}$ の3世代へ拡張したものである。

した。本来、観測される光は太陽から放射され、彗星のコマ中の水素原子によって吸収・再放射されたものである。しかし、最終的にひさき衛星の視線に沿って水素原子の数密度やLy- $\alpha$ 線の放射輝度を積分することを鑑みて、ここでは計算コストの削減のため、先行研究[16]に倣いひさき衛星から放射された光子が彗星のコマ中で数回吸収・再放射されたのち太陽に到達する確率を計算した(図4)。コマ中の水素の温度が高いほど、

水素原子同士の相対速度が大きくなりドップラー効果の影響で多重散乱が生じにくくなるため、 $10^3$ - $10^4$  Kの範囲の様々な温度を仮定して計算を行った。

**放射伝達モデルによる観測データの再現**

放射伝達モデルを用いてひさき衛星による観測を再現した計算結果を図5に示す。上述の通り水素温度を $10^3$ - $10^4$  Kの間の様々な値に設定して計算した結果、同じ水素数密度分布でも高温の場合の方が多重散乱が起こりづらく、Ly- $\alpha$ 線の放射輝度が大きくなる事が確認された。多重散乱効果を考慮していない場合(図5青線)と比べて、多重散乱の考慮(図5灰色領域)によりひさき衛星の観測結果(図5黒点)と整合的なLy- $\alpha$ 放射輝度分布が得られることがわかる。単一水素温度を仮定して観測データを再現することは難しいが、観測データが低高度では低温の、高高度では高温の水素を仮定した場合の計算結果と近くなっていることは、核から離れるほど水素の温度が上昇するという過去の数値計算結果[e.g. 14]と整合的である。

**多重散乱効果が支配的となる条件**

前節までに構築した放射伝達モデルを用いて、一般的な彗星のコマ内でLy- $\alpha$ 線の多重散乱が無

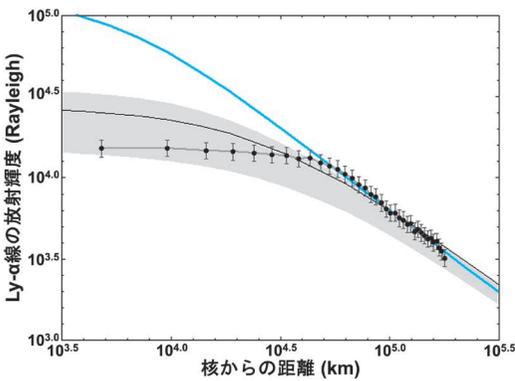


図5 ひさき衛星の観測データと放射伝達モデルによる計算結果の比較。

黒点が観測データ、灰色の影領域が1,000-10,000 Kの計算結果の範囲、黒線が7,000 Kの場合の結果、青線が単散乱のみを考慮した場合の結果を表す。

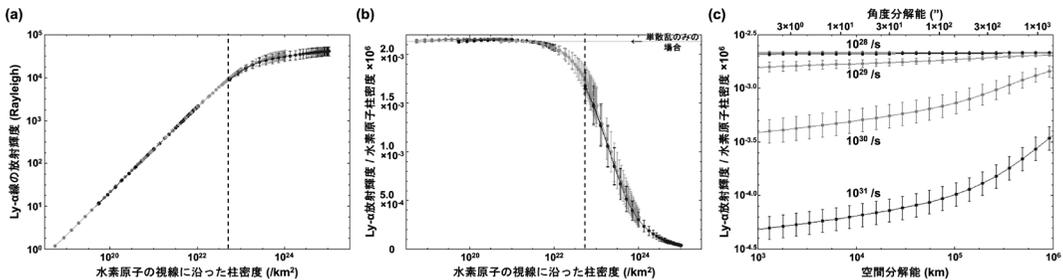


図6 彗星のコマ中において多重散乱が支配的となる条件

- (a) 水素原子の視線に沿った柱密度と観測されるLy- $\alpha$ 線放射輝度の関係。  
水素原子柱密度が $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ 付近で比例関係から外れ始めることがわかる。
- (b) 水素原子の柱密度とLy- $\alpha$ 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係。  
値が小さいほど、多重散乱が支配的であることを意味する。
- (c) 観測装置の空間分解能とLy- $\alpha$ 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係。  
各線に添えられた数字は彗星の水放出率を表す。

視できなくなる条件を考察する。このために現実的な彗星を一旦離れ、日心距離1天文単位・地心距離1天文単位という仮想条件のもと、様々な水放出率を持つ彗星に対して観測者の視線に沿った水素原子の柱密度と観測されるLy- $\alpha$ 線の放射輝度の関係を調べた(図6a)。図6bはLy- $\alpha$ 線の放射輝度と水素原子の柱密度の比に $10^6$ を乗じた値<sup>\*2</sup>を水素原子柱密度の関数として示したものである。水素原子の柱密度が約 $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ 以下の場合、柱密度とLy- $\alpha$ 線の放射輝度がほぼ比例関係になっており、単散乱が支配的であることが窺える。一方で $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ を超えると、多重散乱の寄与が次第に大きくなりLy- $\alpha$ 線の放射輝度の水素原子柱密度に対する比率が小さくなる様子が定量的に示された。これまでにも、彗星の活動度が大きいときに多重散乱効果の寄与が大きくなることは定性的に予測されてきたが、実際に考慮が必要になるような観測データがなかったこともあり、定量的な議論例はほとんどなかった。ひさき衛星による高空間分解能の紫外線分光観測が行われたことにより、彗星の内部コマの理解が進んだことがよくわかる例である。

では、具体的に観測装置の空間分解能がどれくらい高い場合に多重散乱の考慮が必要になるか。構築したモデルを核から半径 $n$  kmの範囲で積分することにより空間分解能 $n$  kmの観測を再現すると、図6cのような空間分解能とLy- $\alpha$ 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係が得られる。例えば先述のSOHO/SWANの場合、空間分解能は $1^\circ$ 程度であり、これはSOHOと彗星の間の距離が1天文単位の場合 $10^6$  km以上に相当する。図6cを見ると水放出率が $10^{29}/\text{s}$ までの彗星であれば多重散乱の考慮は不要だが、水放出率 $10^{30}/\text{s}$ ほど活動的な彗星に対しては多重散乱を考慮しないと水素原子密度を半分程度にまで過小評価してしまうこと

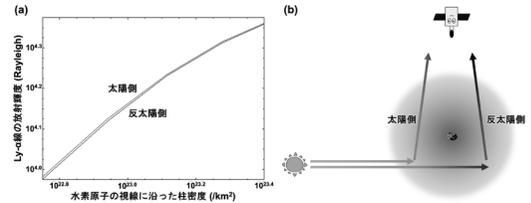


図7 (a) 太陽側と反太陽側におけるLy- $\alpha$ 線放射輝度と水素原子柱密度の関係。太陽側の方がわずかに放射輝度が大きくなるのがわかる。(b) 太陽側と反太陽側からひさき衛星に到達する光の経路の違いの模式図。

がわかる。

## 多重散乱効果によって生じる現象

### 対称的な密度分布が作る非対称的な放射輝度分布

前節では「水素原子柱密度」対「Ly- $\alpha$ 線放射輝度」で括って議論したが、計算結果を注意深く分析すると、視線に沿った水素原子柱密度のみならずコマ内の位置によっても多重散乱の効果の強さがわずかに異なることがわかった。図7aに太陽側と反太陽側における水素原子柱密度とLy- $\alpha$ 線放射輝度の計算結果を示す。太陽側の方がわずかに放射輝度が大きくなっていることが見てとれる。図6a, bでは「視線に沿った水素原子の柱密度」の関数として議論をしており、太陽を出た光子が彗星の水素に最後に散乱されるまでに通ってきた道のりのことは議論中は気にしていなかった。しかし実際には反太陽側の水素の方が、太陽からその水素に至るまでに光子が通る道のり(光路長)が長いため、より多くの散乱を受けやすく(図7b)、視線に沿った水素原子柱密度は同じでも反太陽側の方が放射輝度が小さくなるのである。とはいえ視線積分をすればこの効果の寄与はそこまで小さくなく、今回の計算結果では非常に活動的な水放出率 $10^{31}/\text{s}$ の彗星であっても太陽-反太陽非対称性は高々1.5%ほどとなっ

<sup>\*2</sup>  $10^6$ を乗じたのは「g-factor」と呼ばれる単散乱の効率に対応する係数と合わせるためだが、本稿の範囲では気にしなくてよい。

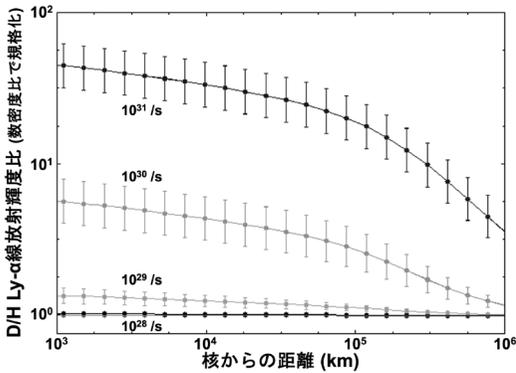


図8 核からの距離とD/H Ly- $\alpha$ 線放射輝度比の関係。放射輝度比はD/H数密度比で規格化しており、単散乱が支配的な場合は1に近づく。各線に添えられた数字は彗星の水放出率を表す。

た。現実の観測では水素原子の数密度や温度の非対称性や測定誤差等の方が大きく検出は困難だと思われるが、対称的な原子数密度分布が非対称な輝線放射輝度分布を作るという帰結は興味深いものである。

### 核近傍でのD/H放射輝度比の急激な上昇

前節の効果の観測的検出は困難だが、構築したモデルからもう1つ、観測に大きく影響する可能性のある現象が発見された。それは、光学観測の場合、核に近づくほど重水素・水素同位体比(D/H比)が上昇して見えるということである。

質量数1の水素原子の発するLy- $\alpha$ 線の波長が121.567 nmである一方、重水素原子のLy- $\alpha$ 線の波長は121.534 nmと33 pmだけ短い。また、典型的には彗星のD/H比は $10^{-4}$ オーダーである。このため、水放出率が異常に大きな彗星でない限り、重水素のLy- $\alpha$ 線は光学的に薄く、単散乱が支配的とみなせる。本稿で繰り返し述べてきたように、核に近づくとき水素原子数密度の増加量の割には水素原子の発するLy- $\alpha$ 線放射輝度が伸び悩む。その一方で、光学的に薄い重水素のLy- $\alpha$ 線の放射輝度は重水素原子の数密度増加に合わせて順調に増加していく。よって、D/H数密度比分布が一定だったとしても、D/H Ly- $\alpha$ 線放射輝度

比は核に近づくほど急増するのである(図8)。

今回解析したひさき衛星のデータの場合は波長分解能が1 nm程度のためそもそもD/H比の算出は不可能であったが、2029年に打ち上げが予定されているComet Interceptorミッション[17]では超小型紫外線望遠鏡によるD/H比の光学観測が予定されており、本節で紹介した効果が観測結果に大きな影響を及ぼすだろう。

## まとめ：ひさき衛星と彗星

本稿では、ひさき衛星による彗星のガス(コマ)の観測結果とそれを基に構築した放射伝達モデルを用いて、多重散乱効果の光学観測への影響を考察した。彗星の放射伝達モデルは2000年[16]以降ほとんど発展がなかったが、ひさき衛星の高空間分解能のお蔭で大きく理解が進んだのである。

高い空間分解能を持ち、比較的チームが小さく柔軟に観測計画を組みやすいひさき衛星は、長周期彗星の研究に最適である。生憎、筆者がひさき衛星の観測計画に携わり始めた頃には、指向性能の低下により彗星の核を視野中心に捉えることが難しくなっていた。しかし、それでも彗星の物理・化学の理解や今後の様々な彗星関連ミッションに向けて、多数の彗星の紫外線高空間分解観測データをもたらしてくれたことは非常に大きい。本稿で紹介したLy- $\alpha$ 線の多重散乱効果に関する研究以外に、現在も化学組成等に関する研究が進行中である。運用は終了してしまったが、これからもまだまだひさき衛星×彗星の新しい成果が続けるだろう。続報にご期待いただきたい。

## 参考文献

- [1] Altwegg, K., et al., 2015, Science, 347, 6220-1261952
- [2] Mandt, K. E., et al., 2024, Sci. Adv, 10, 46
- [3] Lis, D. C., et al., 2019, A&A. 625, L5.
- [4] Ootsubo, T., et al., 2012, ApJ. 752, 15
- [5] Feldman, P. D., et al., 2015, A&A. 583, A8
- [6] Noonan, J., et al., 2016, Acta Astronautica, 125, 3
- [7] Combi, M., et al., 2019, Icarus, 317, 610

- [8] Yoshioka, K., et al., 2013, *Planet. Space Sci.*, 85, 250
- [9] Kaneda, E., et al., 1986, *Nature*, 321, 297
- [10] Cowan, J. J., & A'Hearn, M. F. 1979, *The Moon and the Planets* 21, 155
- [11] Paradowski, M. L. 2020, *MNRAS*, 492, 4175
- [12] Mancuso, S., 2015, *A&A*, 578, L7
- [13] Haser, L., 1957, *Bulletin de la Class des Sciences*, 43, 740
- [14] Tenishev, V., et al., 2008, *ApJ*, 685, 659
- [15] O'Dell, C. R., et al., 1988, *ApJ*, 334, 476
- [16] Richter, K., et al., 2000, *ApJ*, 531(1), 599
- [17] Jones, G. H., et al., 2024, *SSR*, 220, 9

## What Did the Hisaki Satellite Tell Us about Comets?

Yudai SUZUKI

*Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan*

Abstract: Comets are important targets for understanding the environment of the early solar system. To estimate chemical compositions of the cometary nuclei from observations of surrounding gas, it is essential to clarify physical phenomena occurring in the vicinity of nuclei. We observed several long-period comets using the Hisaki satellite and investigated the Ly- $\alpha$  radiance distributions in detail. Combining observations and a radiative transfer model, we found that multiple scattering becomes dominant at altitudes below tens of thousands of km and when the hydrogen column density is  $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ . We also found that a slight radiance asymmetry occurs between the sunward and anti-sunward sides even if the hydrogen number density is spherically symmetric, and the D/H Ly- $\alpha$  radiance ratio increases rapidly near nuclei.