

## ひさき衛星による極端紫外スペクトルを用いた彗星活動度に関する研究

野村 香菜枝<sup>1</sup>, 吉岡 和夫<sup>1</sup>, 益永 圭<sup>2</sup>, 村上 豪<sup>3</sup>, 木村 智樹<sup>4</sup>, 土屋 史紀<sup>4</sup>, 山崎 敦<sup>3</sup>, 鈴木 雄大<sup>1</sup>, 疋田 伶奈<sup>1</sup>, 吉川 一郎<sup>1</sup>

1. 東京大学, 2. コロラド大学, 3. ISAS/JAXA, 4. 東北大学

彗星の多くは約 46 億年前の太陽系形成時の情報を保持していると考えられており、太陽系形成時の物質分布や温度環境を知るために非常に重要である。彗星核の近傍をとりまく大気成分に相当するコマに含まれる分子や原子の発光から、それぞれ解離する前の親分子の生成率を導出できる。この彗星核の活動度を表す指標（分子生成率）を様々な彗星の間で比較し、系統的な特徴を見出すことで太陽系形成初期の環境に関する理解が進むと考えられている。

本研究では、地球周回衛星ひさきによって観測された非周期彗星 C/2013 US10 Catalina の極端紫外スペクトルデータを解析し、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$  の生成率を導出した。また過去の彗星観測との比較を通して Catalina 彗星の特徴について議論した。

「ひさき」は高度約 1000 km の地球周回衛星であるため、地球を取り巻く大気発光（ジオコロナ）が観測データに含まれてしまう。彗星のコマの主成分はジオコロナと等しく H、O であることから、まず観測データから適切にジオコロナの影響を取り除き、彗星に由来する輝線の抽出を目指した。そのために、観測時間に依存するジオコロナの変動を確認し、ひさき衛星がローカルタイム (LT) 15 時以降にいる時に、急激に増光することを確認した。この影響を排除するため、LT15 時以降に観測したデータを除去し、彗星の輝線を抽出した。

観測データをもとに、分子生成率を求めるために 2 分子版 Haser モデルを用いた。その結果、 $\text{H}_2\text{O}$  生成率が  $(3.0 \pm 0.1) \times 10^{30}$  molecule/s と求められた（下限値は一般的な Haser モデルより  $8.0 \times 10^{29}$  molecule/s と求められた）。また  $\text{CO}$  輝線から  $\text{CO}$  生成率は  $(6.7 \pm 0.6) \times 10^{28}$  molecule/s と導出された。したがって  $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$  比は約 0.02 と得られた。過去に観測された彗星と比較したところ、他彗星より低い値であった。しかし  $\text{H}_2\text{O}$  生成率、 $\text{CO}$  生成率の絶対値をそれぞれ比較したところ、他の彗星に比べて高い値であり、 $\text{CO}$  が枯渇している訳では無いと考えた。共に他彗星よりも高い値であったことから Catalina 彗星が形成時に冷えた環境で形成されたか、もしくは Catalina 彗星の核自体が極めて大きく、分子放出領域が大きかったと考えられる。

# ひさき衛星による極端紫外スペクトルを用いた彗星活動度に関する研究

野村 香菜枝<sup>1</sup>, 吉岡 和夫<sup>1</sup>, 益永 圭<sup>2</sup>, 村上 豪<sup>3</sup>, 木村 智樹<sup>4</sup>, 土屋 史紀<sup>4</sup>, 山崎 敦<sup>3</sup>, 鈴木 雄大<sup>1</sup>, 疋田 伶奈<sup>1</sup>, 吉川 一郎<sup>1</sup>

1. 東京大学, 2. コロラド大学, 3. ISAS/JAXA, 4. 東北大学

## 研究目的

- 地球周回衛星ひさきが観測した彗星の極端紫外スペクトルからH, CO輝線の発光強度を導出し、コマ中のH<sub>2</sub>O, COの生成率を導出する
- 他彗星とのH<sub>2</sub>O, COの生成率比の比較から、今回観測したCatalina彗星の形成進化過程について考察する

## 1. イントロダクション

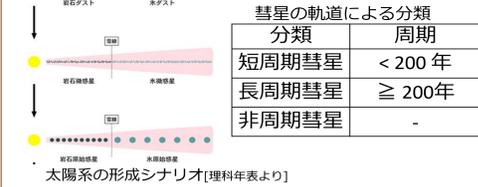
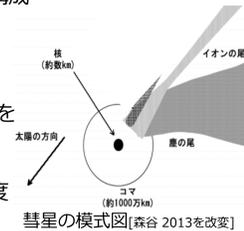
彗星について  
氷微惑星が成長せずに現在まで残ったもの  
短周期・長周期・非周期と3種類に分類できる

### 彗星の構造

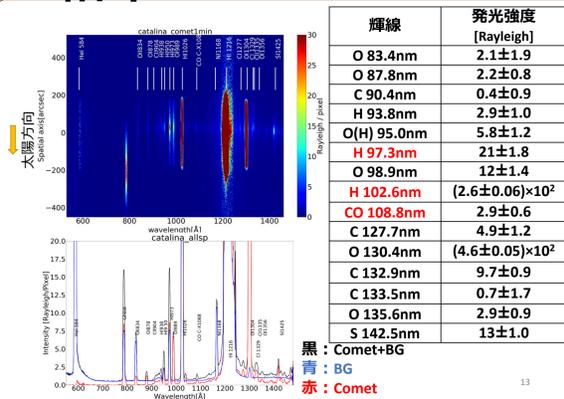
難揮発性の塵と揮発性の氷からなる核、核から揮発性物質が蒸発してきた大気、非周期彗星・長周期彗星の一部：太陽による熱の影響を一度も受けていない最も原始的な天体

一般的に彗星核の主要成分比は  
**H<sub>2</sub>O : CO<sub>2</sub> : CO = 100 : 10~20 : 10~20**  
H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, COの比率から形成環境を推定できる [Ootsubo et al. 2012]

本研究ではコマ中のH, COの発光強度からH<sub>2</sub>O, COの生成率比を求めた



## 5. 結果



### Hの柱密度の導出

発光強度と柱密度の関係式

$$N = \frac{10^6 I}{g} \times \left[ \gamma \times \pi F \times \frac{\lambda^2}{c} \times \pi \times \frac{e^2}{m_e c} \times f \right]$$

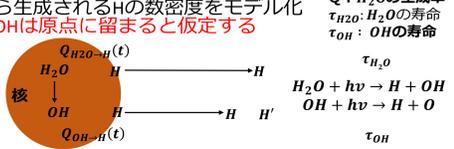
N: 柱密度  
I: 発光強度  
g: g-factor  
γ: 連続光に対する輝線の強度  
πF: 太陽光フラックス@1AU  
λ: 波長  
c: 光速  
e: 電気素量  
m<sub>e</sub>: 電子質量  
f: 振動子強度

※ H柱密度を求める際にLy-β, Ly-γの発光強度を用いた  
※ コマは希薄なので電子衝突発光は無視できると仮定し、太陽光共鳴散乱による発光のみを考慮  
得られた水素原子の柱密度

輝線	発光強度 [Rayleigh]	g-factor [1/s]	柱密度 [1/cm <sup>2</sup> ]
H102.6nm (Ly-β)	2.60 × 10 <sup>2</sup> ± 6	8.9 × 10 <sup>-6</sup>	(3.0 ± 0.1) × 10 <sup>13</sup>
H97.3nm (Ly-γ)	21 ± 1.8	5.9 × 10 <sup>-7</sup>	(3.6 ± 0.3) × 10 <sup>13</sup>

### Hの数密度を求めるモデル

- HはH<sub>2</sub>OとOH双方から発生する
- H<sub>2</sub>Oから生成されるHの数密度をモデル化
- H<sub>2</sub>OとOHは原点に留まると仮定する



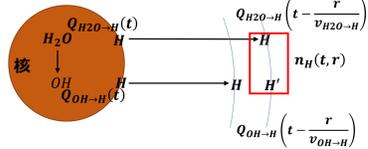
H<sub>2</sub>Oの生成率をQ, 噴出開始からの経過時間をtとする  
Q<sub>H2O→H</sub>: H<sub>2</sub>Oの光解離により生じるHの生成率  
Q<sub>OH→H</sub>: OHの光解離により生じるHの生成率  
※Q, tはパラメータ

H<sub>2</sub>OとOHの密度の微分方程式を解くと以下の式

$$Q_{H2O \rightarrow H}(t) = Q \left[ 1 - e^{-t/\tau_{H_2O}} \right]$$

$$Q_{OH \rightarrow H}(t) = \frac{Q}{\tau_{H_2O} - \tau_{OH}} \left\{ (\tau_{H_2O} - \tau_{OH}) - \tau_{H_2O} e^{-t/\tau_{H_2O}} + \tau_{OH} e^{-t/\tau_{OH}} \right\}$$

求めたQ<sub>H2O→H</sub>(t)とQ<sub>OH→H</sub>(t)を用いて、核からの距離rにおけるHの数密度を求める



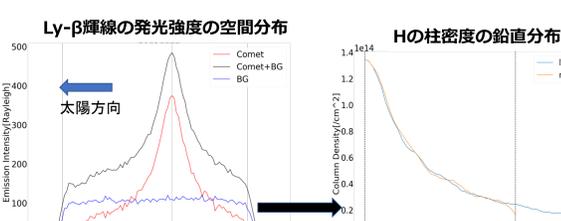
2つの親分子から生成されるHのモデルにおける数密度の式

$$n_H(t, r) = \frac{Q_{H2O \rightarrow H}(t) \exp\left(-\frac{r}{\tau_H \times v_{H2O \rightarrow H}}\right)}{4\pi r^2 v_{H2O \rightarrow H}} + \frac{Q_{OH \rightarrow H}(t) \exp\left(-\frac{r}{\tau_H \times v_{OH \rightarrow H}}\right)}{4\pi r^2 v_{OH \rightarrow H}}$$

H<sub>2</sub>Oから生成されるHの項 OHから生成されるHの項

### H輝線の鉛直分布とモデルの比較

観測から得られたHの柱密度とモデルから得られるHの数密度の視線方向積分を比較する



- 発光強度を柱密度に変換
- ピークの位置が核に相当するためピークの位置で左右に折り返す

## 2. 彗星の活動度

彗星の活動度とは

彗星が太陽に近づくスノーライン(※)を超えると核から揮発性ガスが放出されるが、放出率(生成率)は彗星により異なる  
Ex. 生成率が低い→活動度の低い彗星  
生成率が高い→活動度の高い彗星

※スノーライン…太陽から遠方で氷として存在している物質が昇華を始める境界  
H<sub>2</sub>O…太陽から2.7 au (火星、木星軌道の間)  
CO, CO<sub>2</sub>…太陽から約30 au

本研究では、H<sub>2</sub>O, COの生成率を用いて彗星の活動度を比較する

生成率(活動度)の導出

### ガスモデル

核から放出された親分子(例えばCO)の光解離によって生じる娘分子(例えばC)の空間分布を求めるモデル

- 光解離過程について以下の仮定を置いている
- ある親分子からは、ただ一種類の娘分子のみが生成される
- ある娘分子はただ一種類の親分子のみから生成される
- 光解離過程において分子の運動方向は変化しない

$$\frac{dn_p(t)}{dt} = -\frac{n_p(t)}{\tau_p} \quad \frac{dn_d(t)}{dt} = \frac{n_p(t)}{\tau_p} - \frac{n_d(t)}{\tau_d}$$

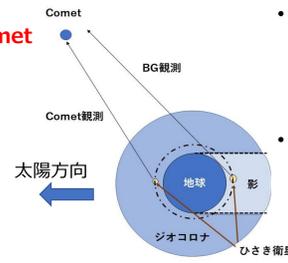
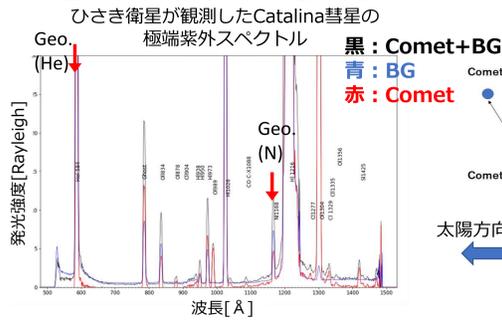
ガスモデルにおける数密度を示す式

$$n_d(r) = \frac{Q}{4\pi r^2} \times \frac{v_p}{v_d} \times \frac{Y_d}{Y_d - Y_p} \times \left\{ \exp\left(-\frac{r}{Y_d}\right) - \exp\left(-\frac{r}{Y_p}\right) \right\}$$

n<sub>p</sub>: 親分子の数密度  
n<sub>d</sub>: 娘分子の数密度  
Q: 親分子の生成率  
r: 核からの距離  
v<sub>p</sub>: 親分子の速度  
v<sub>d</sub>: 娘分子の速度  
Y<sub>p</sub>: 親分子スケール長 v<sub>p</sub> × τ<sub>p</sub>  
Y<sub>d</sub>: 娘分子スケール長 v<sub>d</sub> × τ<sub>d</sub>

## 4. 解析

### 地球大気由来の光の除去



- 観測データから単純にBGデータを引くと、彗星にほとんど存在しないHe, Nの輝線が混入する(赤矢印) → ジオコロナの影響が彗星スペクトルに残存している
- 観測位置により、ジオコロナの強度が大幅に変わる(右図) → LT毎のジオコロナの強度を確認し、観測データから除去する必要がある

## 3. 観測データ

ひさき衛星による極端紫外分光観測

- 波長範囲: 52-148nm
- 視野: 360°
- スリット: 60°
- 地球周回 高度: 約1000 km
- 周期: 105分



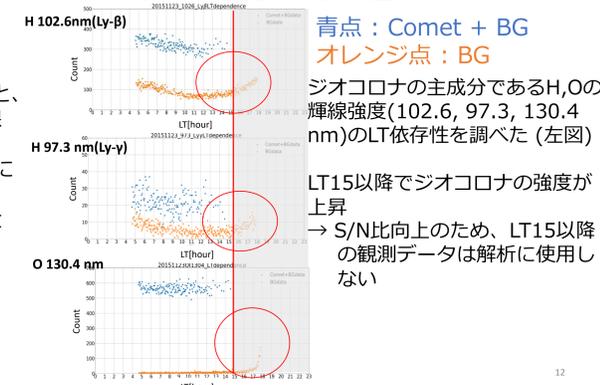
ひさき衛星[JAXA HPより]

ひさき衛星では空間分解能が低いため、核は認識できない

彗星名	公転周期	近日点	観測期間	BG観測期間
C/2013 US10 Catalina	非周期	0.823 AU 2015/11/15	2015/11/21 -12/2	2015/11/22- 11/30,12/2

※BG観測: 彗星から視野を5°外し背景光のみを観測

### ジオコロナの強度のLT依存性



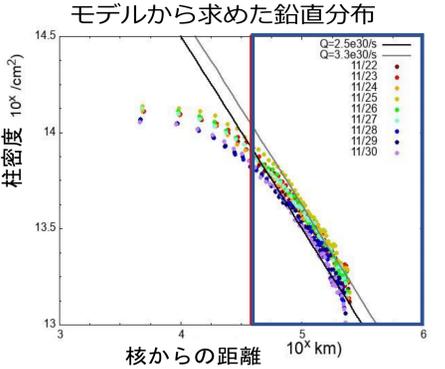
青点: Comet + BG  
オレンジ点: BG

ジオコロナの主成分であるH<sub>2</sub>Oの輝線強度(102.6, 97.3, 130.4 nm)のLT依存性を調べた(左図)

LT15以降でジオコロナの強度が上昇 → S/N比向上のため、LT15以降の観測データは解析に使用しない

## 6. 生成率の導出

### Hの柱密度の鉛直分布とモデルから求めた鉛直分布



- 黒線はモデル式を視線方向に積分して柱密度に変換したものを示すパラメータから  $Q_{H2O} = (3.0 \pm 0.1) \times 10^{30}$  [molecule/s]
- モデルでは核近傍の密度を過剰推定してしまう → H<sub>2</sub>O, OH分子が動径方向に移動する効果を無視しているため → 核近傍の観測データを比較対象から除外する

### COの生成率の導出

CO輝線を用いてCOの生成率を導出する  
CO輝線(λ=108.8nm)の発光強度の75%が核から放出されたCOの共鳴散乱光、25%がCO<sub>2</sub>から解離したCOからの発光と仮定する [Feldman et al. 2002, 2009]

導出したCOの柱密度

輝線	発光強度 [Rayleigh]	g-factor [1/s]	柱密度 [1/cm <sup>2</sup> ]
CO 108.8nm	2.2 ± 0.5	3.9 × 10 <sup>-8</sup>	(5.6 ± 0.5) × 10 <sup>13</sup>

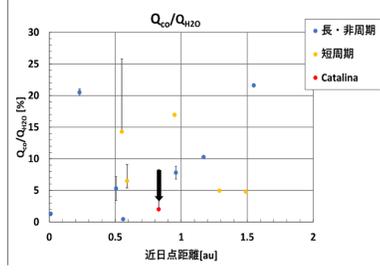
$$Q_{CO} = (6.7 \pm 0.6) \times 10^{28} \text{ [molecule/s]}$$

Q<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = (3.0 ± 0.1) × 10<sup>30</sup>, Q<sub>CO</sub> = (6.7 ± 0.6) × 10<sup>28</sup> [molecule/s]より  
CO, H<sub>2</sub>Oの生成率比は  $Q_{CO}/Q_{H2O} = 2.0\%$

## 7. 考察・まとめ

### COとH<sub>2</sub>Oの生成率比の比較

過去に観測された様々な彗星のQ<sub>CO</sub>/Q<sub>H2O</sub>比と得られた結果を比較する  
※異なる日心距離で観測している彗星の明るさを比較するために生成率を日心距離の逆二乗により規格化した



✓ Catalina彗星の値は短周期彗星よりも低い値となっている

✓ 彗星の分類による違いは確認できなかった

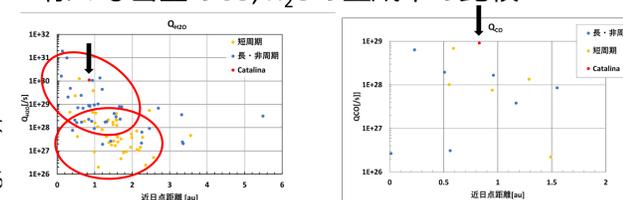
### Catalina彗星の形成環境

Catalina彗星のH<sub>2</sub>O・CO生成率は共に他の彗星よりも高い  
→ Catalina彗星がひさき衛星による観測時に初めて太陽近傍に訪れ熱の影響を受けたためである

しかし、Catalina彗星と同じ分類である非周期彗星や長周期彗星と比較しても高い

- Catalina彗星が他彗星より冷えた領域(太陽から遠方の領域)で形成された
- Catalina彗星の核の大きさが他彗星よりも大きい

### 様々な彗星のCO, H<sub>2</sub>Oの生成率の比較



### H<sub>2</sub>O生成率の比較

- ✓ 短周期彗星は1 × 10<sup>26</sup> - 10<sup>29</sup> [1/s], 長周期彗星は1 × 10<sup>28</sup> - 10<sup>31</sup> [1/s]
- 付近に観測例が多い → 短周期彗星が太陽による熱の影響を受けていることと整合
- ✓ 長・非周期彗星の中でもCatalina彗星はH<sub>2</sub>Oを多く含んでいた

### CO生成率の比較

- ✓ 短周期彗星・長周期彗星による違いは見られない
- ✓ 他の彗星よりCatalina彗星の値が大きい

## まとめ

- 地球周回ひさき衛星で観測したCatalina彗星のデータからコマに含まれるH, COの発光強度を導出した
- 観測値とモデルを比較し、Catalina彗星のH<sub>2</sub>OおよびCOの生成率を導出した
- CO/H<sub>2</sub>O比は他の彗星より低い値となったが、H<sub>2</sub>OおよびCOの生成率は共に他の彗星よりも高かった以下の2点を示唆
  - Catalina彗星が冷たい領域(太陽から離れた領域)で形成された
  - Catalina彗星の核が大きい

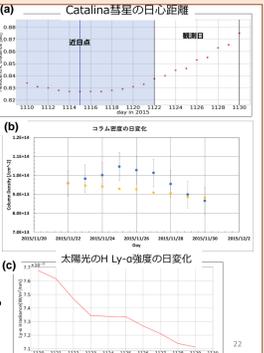
## Appendix

### H柱密度の日変化

図(b)は11/22-30のH柱密度の変動を表す※日心距離の逆二乗に比例する柱密度を黄色点で示す  
11/25 - 27日にH柱密度の極大値を確認した

図(c)は太陽から放射されるLy-α光の変動を表しCatalina彗星の観測期間中に減少していることが分かる

H柱密度の極大値の原因として核から突発的に放出されたジェットやコマ中の氷粒の昇華が考えられる



## 参考文献

A'Hearn et al., 1995 Chamberlin et al., 2020 Biver et al., 1999 Feldman et al., 1997 Biver et al., 2005 Feldman et al., 2002 Biver et al., 2006 Feldman et al., 2006 Feldman et al., 2009 Feldman et al., 2018 Haser, 1975 Lupu et al., 2007 Mumma et al., 2005 Ootsubo et al., 2012 Saxena et al., 2002 Tozzi et al., 1998 Weaver et al., 2002 Yoshikawa et al., 2014 金田 他, 1986