

修士論文

土星衛星エンケラドストーラス中の酸素原子と水分子
イオン発光のハレアカラ T60 望遠鏡可視高分散分光観測

Observation of the atomic oxygen and water
molecule ion emissions in the Enceladus torus with a
visible high-resolution spectrograph on Haleakala T60

東北大学大学院理学研究科
地球物理学専攻

小野 紘夢

論文審査委員

坂野井 健 准教授 (指導教員・主査)
笠羽 康正 教授
小原 隆博 教授
三澤 浩昭 准教授

平成 28 年

要旨

土星の衛星であるエンケラドスは、その南極域から水蒸気を主成分としたプルームを噴出している。このプルームを主な供給源とし、エンケラドス公転軌道上には環状に水系粒子が分布する。これをエンケラドストーラスと呼ぶ。その供給源には、プルーム以外にも衛星表面におけるスパッタリングなどが指摘されている。土星内部磁気圏には、このトーラス粒子と土星の環を構成する粒子の相互作用をはじめ、複雑な物理プロセスが存在する。したがって、エンケラドストーラスを構成する主要な中性粒子やプラズマの密度や空間分布、それらの変動、発光輝線のドップラーシフトから粒子の運動を遠隔観測することができれば、土星内部磁気圏のダイナミクスの理解に貢献することができる。このため、土星探査機 Cassini 等の観測が行われてきた。探査機によるその場観測に加えて、エンケラドストーラスを含む内部磁気圏に存在する中性粒子やプラズマについて、プルームのようなダイナミックな変動が予想される現象を大局的かつ長期的に捉えるためには、地上からの連続が不可欠である。

東北大学グループは、2009 年以降ハワイ・ハレアカラに設置した 40 cm 望遠鏡により、エンケラドストーラスの酸素原子 630 nm 発光の観測を行い、世界で初めてその検出に成功した(Kodama *et al.*, 2013)。また、2014 年にはハレアカラに新たに 60 cm 望遠鏡が設置された。本研究では、この 60 cm 望遠鏡と可視分光器 Vispec を用いて初めてエンケラドストーラス中の酸素原子 630 nm 発光の観測を行った。また、イオンは磁場に束縛されて運動するため、中性粒子とは別の振る舞いを示す。我々は、これまで地上観測での報告例のないエンケラドストーラス中水分子イオン発光の検出を目指し、検討と観測を行った。

2015 年の酸素原子 630 nm 発光観測の概要と結果を以下に示す。

1. 2015 年 7 月 23 日から 9 月 18 日にかけて、Vispec 高分散エシエルグレーティングモード（波長分解能 38000）を用いた観測を行った。総取得フレーム数は 126 枚、うち、土星から西側動径方向 4 R_s の位置に土星南北方向と平行にスリットを当て観測した 22 枚(総露光時間 440 分間)を選択し、詳細な解析を行った。解析の結果、トーラス酸素原子発光強度は $0.8 \pm 1.5 R$ (誤差は 3σ) となり、発光は検出限界以下と結論された。
2. 本研究でトーラス酸素原子発光が検出されなかった理由を考察した。本研究 (2015 年) と Kodama *et al.* (2013) (2011 年) では、土星赤道面と黄道面のなす角 (Ring Opening Angle; ROA) が異なるため、視線方向のトーラス厚さが変化する。ROA

の年変化による視線トーラス厚さを考慮し、*Kodama et al.* (2013)の酸素原子発光強度 $4.1 \pm 0.6 \text{ R}$ を用いて本研究で予想される発光量を見積もった。ここで、トーラス酸素原子の密度は経年変化がないものとした。その結果、予想される発光量は 1.3 R となり、本観測結果と整合的な結果となった。加えて、本観測によって決定された酸素原子柱密度の上限値から、その経年変化は 2011 年から 2015 年の間で 77%の増加を上回ることはないことが示唆された。

2016 年のトーラス水分子イオン発光観測の概要と結果を以下に示す。

3. まず、小天体近傍の水分子イオン発光の詳細なスペクトルを知るために、2015 年 12 月に 60 cm 望遠鏡と *Vspec* を用いてカタリーナ彗星の分光観測を実施した。この観測により得たスペクトルをもとに、615nm 付近と 620nm 付近の相対的に明るい 2 本の水分子スペクトル線を解析対象に選択した。トーラス内イオン存在比の動径分布ならびに電子密度動径分布のモデルからトーラス内水分子イオン密度を見積もり、期待される発光量を計算した結果 17.8 R となった。これより露光時間 200 分で $S/N=3$ を達成できる見込みとなった。
4. 2016 年 5 月 23 日から 7 月 23 日の期間に *Vispec* 中分散モード(波長分解能 10000)を用いて観測を行った。土星西側データを計 239 枚、土星東側データを計 137 枚取得した。このうち土星西側データ 120 枚(総露光時間 2400 分間)、土星東側データ 58 枚(総露光時間 1160 分間)について詳細解析を行った。この結果、発光が期待される範囲における発光強度は、東側スリット観測において $17.2 \pm 18.2 \text{ R}$ 、西側スリット観測において $18.9 \pm 12.9 \text{ R}$ となった(ここで誤差は標準偏差の 3 倍としている)。結論して、東西スリットデータともに有意な水分子イオン発光は検出されなかった。この解決のためには、土星散乱光の影響を精密に除去する手法の改良が必要である。