

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800254

研究課題名(和文) 偏光分光観測による木星衛星イオ周辺プラズマの温度異方性分布の可視化

研究課題名(英文) Ion temperature anisotropy measured from Spectro-polarimetry of atomic oxygen emission close to Io

研究代表者

鍵谷 将人 (Kagitani, Masato)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30436076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：木星衛星イオ近傍の酸素原子発光(630.0nm)の偏光分光観測を実現するために、ハレアカラ観測所の東北大学60cm反射望遠鏡に偏光分光機能を付与する開発を行った。この分光器は偏光プリズムと色消半波長板を組み合わせることで、直線偏光度のスペクトル分布を波長分解能5,000で測定することができる。2016年2月に観測を実施した結果、イオ起源の630nm酸素原子発光を検出することに成功した。発光輝線の直線偏光度は $21 \pm 32\%$ と導出されたが、より木星離隔が大きくなる2016年5月の観測機会に同様の観測を実施することで、木星回折光の影響を低減し、測定精度を7%まで向上させることができると期待される。

研究成果の概要(英文)：I have developed a spectro-polarimeter fed to 60-cm telescope at Haleakala observatory in order to observe atomic oxygen emission close to jovian satellite, Io. An observation made on February 2016 revealed that the degree of linear polarization (DoLP) is  $21 \pm 32\%$  for OI 630.0 nm emission line close to Io. Further observation on May 2016 will enable us to achieve an accuracy of DoLP better than 7%.

研究分野：惑星分光物理学

キーワード：イオ 偏光分光

### 1. 研究開始当初の背景

木星衛星イオ周辺の電磁環境は、大気を持つ天体とプラズマ流との相互作用を考えると興味深い。イオ近傍において中性ガスのイオン化により木星磁気圏にピックアップされるプラズマは、磁場に垂直方向に卓越した速度分布、すなわち温度異方性 ( $T_{\perp} > T_{\parallel}$ ) を持つこととなる。もし木星磁気圏内のプラズマ温度異方性をリモートセンシングすることができれば、それは磁気圏へのプラズマ供給領域の分布とその変動を可視化することに他ならない。本研究は、温度異方性を持つ電子による衝突励起発光が偏光を引き起こすことに着目する。電子が1方向に向かうとき、その直交方向において最も偏光した発光が観測されるという Oppenheimer-Penney 理論 (Percival and Seaton, 1958) である。この理論に基づくと、磁場に垂直あるいは水平な成分の電子温度の違い (温度異方性) が存在する場合、磁場に垂直な方向に最大の偏光をもつ発光が観測されることとなる (図1)。近年実験室での実験値を用いた研究が進展し、OI 630.0nm 発光において電子温度 5-10eV 付近では最大約 15% の偏光が観測されることが示唆されている (Bommier et al., 2011)。また、実際に地球超高層大気におけるオーロラ発光において、偏光結果を示唆する観測が実施されている (Lilensten et al., 2006)。木星磁気圏を地球から観測する場合は、ほぼ磁場に鉛直な方向から観測する配置となるため、観測される直線偏光は主に電子温度とその異方性のみに依存することとなる。

### 2. 研究の目的

温度異方性を持つ電子による衝突励起発光が偏光を引き起こすことを利用して、偏光分光観測による電子温度異方性の計測を、

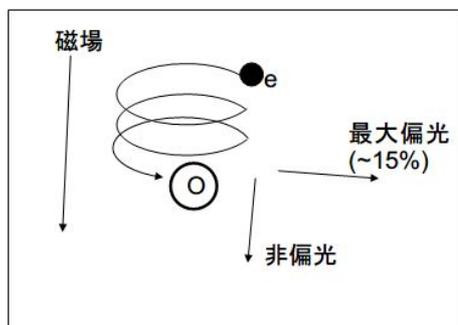


図1 背景磁場の方向と電子の運動方向、および衝突励起による酸素原子輝線 (OI 630.0nm) の偏光を示す模式図。磁場に垂直方向から発光を観測した場合、最大 15% の直線偏光が観測されることが示唆される。

新たなリモートセンシングの手段として確立することを目指す。その第一歩として、発光強度の比較的大きい木星衛星イオ近傍の酸素原子の電子衝突励起発光 (OI 630.0nm) に着目して、地上の中・小口径の望遠鏡を高分散偏光分光器と組み合わせて、OI 630.0nm 輝線の直線偏光を測定し、電子温度異方性を導出することを本研究の目的とする。偏光測定による電子温度異方性のリモートセンシングが惑星磁気圏において試みられた例はこれまでになく、他の惑星・衛星周辺プラズマ環境のリモートセンシングへの開拓の足掛かりとする。

### 3. 研究の方法

本研究では、視直径約 1 秒角のイオのごく近傍、2-3 秒角 (6 イオ半径) 以内に明るく分布する酸素原子の禁制遷移 (OI 630.0nm) 発光の直線偏光を測定し、最終的にはプラズマ流の上流側と下流側において、その空間分布を明らかとする。イオ周辺では極端紫外から近赤外域にかけて、さまざまな電子衝突発光が観測されているが、本研究では、地上からの精密偏光観測が比較的容易な、可視域に存在する酸素原子の禁制遷移発光に着目する。イオ周辺環境の電子温度 (1-10eV) とその異方性 ( $T_{\perp} > T_{\parallel} =$  約 10) から、酸素原子発光には 10-15% 程度の直線偏光が期待される。

### 4. 研究成果

#### (1) 偏光分光器の開発

観測装置には酸素原子 OI 630.0nm の輝線を背景の連続光と分離することのできる波長分解能 ( $> 2,500$ ) と、1% 以上の精度で直線偏光を測定することのできる能力が求められる。本研究では、ハワイ・ハレアカラ観測所の東北大学・60cm 反射望遠鏡 (T60) と可視撮像分光器 (VISPEC) を使い、新たに偏光分光測定ができる機能を開発、付与した。光路中に方解石から成る偏光分離プリズムと、色消し半波長板を用い、直交する 2 つの直線偏光の作るスリット像を検出器に結像させる。半波長板を 0 度から 180 度まで 22.5 度づつ 4 つの角度で分光スペクトルを取得することで、直交する直線偏光を同時に測定する。この測定方式は光子雑音限界に迫る精度で直線偏光測定を実施することができる (Piirola et al., 2014)。

実際に作成した偏光分光器の波長分解能は 630nm 付近でおよそ 2,500 であった。偏光機能を付加しない場合の波長分解能は約 10,000 であり、この波長分解能の低下は、偏光分離プリズムを構成する 2 枚の偏光分離板の光路長の違いによって引き起こされていることが判明している。今後偏光分離プリズムをより高精度に加工されたものと交換することで、波長分解能を向上させ、より高精度な偏光測定が可能となると期待される。

#### (2) 観測

酸素原子の電子衝突励起発光の明るさはイオ近傍領域で 5-10 kRayleighs(R)と比較的明るい、通常の状態では背景にイオの地表面で反射した太陽の連続光(40 MR/nm)を含むため観測は容易ではない。波長分解能 5,000 の観測では酸素原子発光の実に 240 倍以上の明るさの連続光が存在することとなる。本研究では、イオ表面での太陽反射光の影響を避けるため、図 2 に示す通り、イオが木星の日陰に入っており、同時に観測者からは可視状態にある条件下で観測を実施した。さらに、木星本体からの強い太陽反射光とその回折光を低減するために、木星遮光マスクと瞳マスク(リオマスク)とからなるコロナグラフを用い、観測を行った。

### (3) 観測結果と今後の課題

観測は 2016 年 2 月 9 日と 11 日に実施した。11 日の観測結果から 01630.0nm 発光の検出に成功した。図 3 にイオを中心とする木星東西 2 秒角の範囲で積分した強度スペクトルと、強度で規格化した直線偏光 2 成分(ストークス Q および U) のスペクトル分布を示す。総積分時間は 400 秒である。観測されたスペクトルの連続光部分は、酸素原子輝線発光強度の約 4 倍におよび、イオ近傍の木星回折光によるものである。観測された波長帯域で、連続光はおよそ  $20 \pm 8(2-)$  %の直線偏光度を有することがわかる。一方でイオ起源の 01630.0nm 付近の偏光度は  $21 \pm 32(2-)$  %と測定された。したがって、今回の測定精度の範囲内(16%)では背景連続光とイオ起源 01630nm 発光の有意な偏光度の違いは検出されなかった。図 4 は観測された 627nm から 635nm の範囲のスペクトルの直線偏光の向きと大きさを表示したものである。01630.0nm 発光付近のデータは赤で示されている。連続光部分の直線偏光の向きや大きさと比較して、顕著な違いは見られなかった。2016 年 2 月 11 日に行った観測では、衝の約 1 月前の観測であったため、木星表面とイオの離隔が

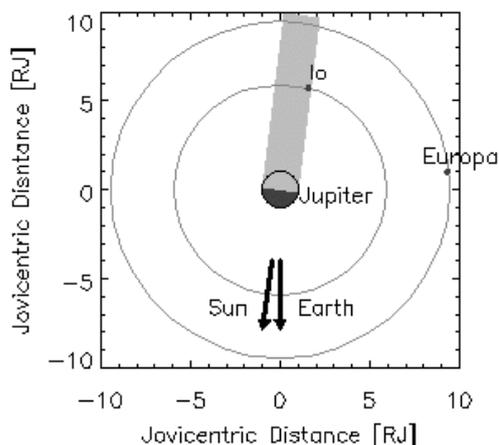


図 2 観測時のイオ、木星、太陽、観測者(地球)の位置関係。イオが木星の日陰に位置し、観測者からは木星の背後に隠れない条件下で観測を実施した。

最大でも 10 秒角しか離れなかった。このため、木星表面の回折光が輝線強度に対して 4 倍ほど強く、測定精度を引き下げる要因となった。今後、2016 年 5 月下旬以降に訪れる観測機会では、木星表面からの離隔が 20 秒角以上となり、回折光強度が 1 桁以上低減されると見込まれる。この場合、2 月 11 日と同様の積分時間で、目標とする 15%の測定精度を上回る約 7%より良い測定精度を達成することができると期待される。

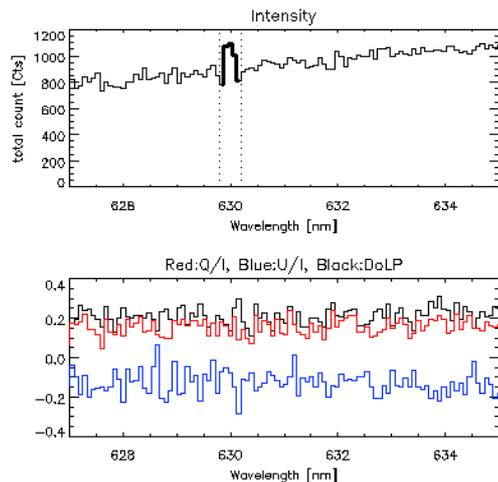


図 3 上:イオを中心とする木星東西 2 秒角の範囲で積分した強度スペクトル。630.0nm 付近において 200cts 相当の OI 輝線が見られる。下:直線偏光 2 成分(赤:ストークス Q、青:同 U、黒:直線偏光度)の強度規格化スペクトル分布。

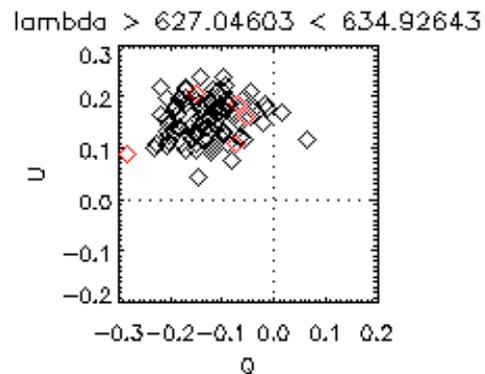


図 4 観測された 627nm から 635nm の範囲のスペクトルの直線偏光の向きと大きさを表示したものである。01630.0nm 発光付近のデータは赤で示されている。連続光部分の直線偏光の向きや大きさと比較して、顕著な違いは見られない。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

(1) Observation of ion temperature and

corotation deviation on Io plasma torus during an outburst in early 2015, M. Kagitani, M. Yoneda and EXCEED mission team, SGEPSSE, Nov.1, 2015. (東京都文京区)

- (2) Coordinated observation of Io plasma torus using Hisaki/EXCEED and ground-based telescopes, M. Kagitani, A. Steffl and S. Badman, JpGU, May 28, 2015. (千葉県幕張市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

<http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/ourlab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鍵谷 将人 (KAGITANI Masato)  
東北大学大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30436076

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：