

広域に分布するイオ起源ナトリウム原子分布の変動について

Dynamical features of extended sodium distributions originated from Io

高橋 慎[1], 三澤 浩昭[1], 野澤 宏大[1], 森岡 昭[1], 岡野 章一[2]

Shin Takahashi[1], Hiroaki Misawa[1], Hiromasa Nozawa[1], Akira Morioka[2], Shoichi Okano[3]

[1] 東北大・理・惑星プラズマ大気, [2] 東北大・理

[1] Planet. Plasma and Atmos. Res. Cent., Tohoku Univ., [2] Planet. Plasma and Atmos. Res. Cent., Tohoku Univ., [3] PPARC, Tohoku Univ.

本研究では、イオ起源ナトリウム原子のD線発光の2次元イメージング観測結果と、原子分布のモデル計算との比較から、イオ起源ナトリウム原子の放出機構について考察した。観測で見られた、イオ軌道より外側に分布するナトリウム原子は、木星磁場と共回転するイオンの中性化によるものであると考えられ、ナトリウムイオンの電荷交換、及びナトリウムを含む分子イオンの解離・解離再結合が放出機構として適当である。また、これらの放出機構を用いたモデル計算から、ナトリウム原子の分布は、イオ近傍のプラズマ環境に大きく影響されるということを示した。

木星の衛星イオは活発な火山活動を行っており、この活動により蓄積された火山性物質が木星磁気圏プラズマとの相互作用によって放出されている。本研究では、この火山性物質の成分であるナトリウム原子のD線発光の2次元イメージング観測を、木星を中心に $\pm 20R_j$ (以下、狭域観測) $\pm 400R_j$ (広域観測)の視野について行った。狭域観測では、イオから木星赤道に沿って伸びる様相が大きく異なる2種類の分布が見られた。ひとつは南北方向への拡がり小さい帯状の分布である。この帯状分布は木星赤道面に対して傾きが見られ、かつその傾きがイオ磁気経度に依存することが明らかにされた。もうひとつは南北に大きく拡がるスプレー状の分布であり、この分布には木星赤道に対する明瞭な傾きは見られなかった。一方、広域観測では、木星磁気圏境界を大きく越えた400 R_j 付近まで、木星赤道に沿って拡がるオーバル状の分布が観測され、木星赤道面に沿った発光強度が距離と共にだらかに減少するプロファイルが得られた。また、発光強度の東西非対称性が観測され、非対称性の大きさがイオ位相角に依存していることを明らかにした。このイオ位相角依存性は木星からの距離と共に変化しており、この関係を用いて、イオから放出されたナトリウム原子が木星から外側に向かって拡がっていく速度を $82.8 \pm 8.8 \text{ km/sec}$ と導出した。

次いで、これらの観測結果とモデル計算を用いて、狭域、広域観測結果の双方を満たすナトリウム原子の放出条件を呈示した。本研究では、共回転イオンの中性化によってナトリウム原子が生成され放出されるという機構を考え、その機構を詳細に考察した。放出されるナトリウム原子の初速度は、イオンが中性化する直前のイオンの運動を反映するが、木星磁場は共回転方向に対してほぼ垂直であるので、イオ大気中でイオン化してピックアップされたイオンは、沿磁力線方向の速度成分をほとんど持たないリング型分布を示す。この分布は非常に不安定であるため、波動粒子相互作用などによってより安定な等方的分布に近づく。このリング分布から等方的分布にイオンの状態が移行する過程のどの時点でイオンの中性化が起こるかによって、放出されるナトリウム原子の初速度分布は異なってくる。

上記の放出機構を考えてモデル計算を実施し、観測結果の再現を試みた。狭域観測で見られた帯状分布とスプレー状分布は、それぞれの南北方向への拡がり方の違いから、それぞれナトリウムを含んだ分子イオンの解離反応または解離性再結合反応 (以下、分子イオン解離と記述) 及び木星磁場と共回転するナトリウムイオンによるイオ近傍のナトリウム原子との電荷交換反応によるものであると結論づけた。

次に、広域観測結果に関するモデル計算を行った。まず、狭域観測で推定された2つの放出機構それぞれについて、観測結果の再現性について検討を行った。赤道方向に拡がる強度プロファイルを再現するために、電荷交換反応の場合は、bulk速度は 37 km/sec と 74 km/sec にピークを持つ分布、熱速度は 60 eV を仮定した。分子イオン解離の場合は、木星磁気圏内の分子イオンのライフタイムが比較的長い(10時間程度)場合に観測結果をよく再現することがわかった。しかしながら、観測結果で見られた東西強度非対称性を調べた場合、上記の2つの放出機構いずれも、単独では観測結果を再現できないことがわかった。従って、次に、これら2つの放出機構を同時に考慮した原子分布を考えた結果、観測結果をよく再現した。

以上のモデル計算と観測の比較から、ナトリウム原子放出機構及びイオ近傍のプラズマ環境について以下のことが結論づけられた。(1)イオ起源のナトリウム原子の放出機構は、電荷交換反応及び分子イオン解離の2つの過程の合成が考えられる、(2)電荷交換反応によって放出されるナトリウム原子は、低速と高速の2成分分布を呈するbulk速度を持つ、(3)この分布が、ナトリウム原子が外側に拡がっていく見かけ上の速度に大きく影響する、(4)このbulk速度分布を持つ(中性化前の)イオン温度は、高速成分が 60 eV 、低速成分が 10 eV と見積もられ、放出量比は2:3が適当である、(5)分子イオン解離におけるライフタイムは10時間程度と推定される、(6)ピックアップ

パイオンの磁場に沿った南北振動は時間と共に各イオンがランダムに振動することによりコヒーレンス性を失っていく、(7)イオン流の低速成分の存在は、イオ近傍でプラズマ流が遅くなっていることを示し、電荷交換反応についてのモデル計算において、低速の bulk 速度成分のイオン温度が高速成分に比べて低いのは、この遅いプラズマ流がイオの近傍でイオとの相互作用により低温化する事を示唆している。