

論文内容要旨

| | | | |
|-------------|--|-----|---------|
| 氏名 | 高橋 慎 | 提出年 | 平成 12 年 |
| 学位論文 の題名 | Study on dynamical features of extended sodium distributions originated from Io (広域に分布するイオ起源ナトリウム原子分布の変動に関する研究) | | |

論文目次

Acknowledgments

Abstract

1 Introduction

- 1.1 Io, a major plasma source of the Jovian magnetosphere
- 1.2 Iogenic neutral particles
- 1.3 Distributions of Iogenic sodium atoms
 - 1.3.1 Io's atmosphere and exosphere
 - 1.3.2 Sodium cloud near the orbit of Io
 - 1.3.3 Extended sodium distribution outside Io's orbit
- 1.4 Purpose of this thesis

2 Observation

- 2.1 Observation instruments
 - 2.1.1 Narrow FOV observation
 - 2.1.2 Medium FOV observation
 - 2.1.3 Wide FOV observation
- 2.2 Observation method

3 Reduction of observed images

- 3.1 Subtraction of noise components
- 3.2 Revision of flat-field response
- 3.3 Subtraction of background light components
- 3.4 Calibration

4 Observation results

- 4.1 Narrow FOV observation

4.2 Medium FOV observation

4.3 Wide FOV observation

5 Method of model calculation

5.1 Purpose of model calculation

5.2 Motion of an atom under the gravity of Jupiter and Io

5.3 Development to the distribution of many atoms

5.4 Conversion of atoms density distribution to the D-line emission image

5.5 Consideration of the Sun's gravity and the solar radiation pressure

6 Model analysis based on observations

6.1 Two types of distribution in the narrow FOV observation

6.1.1 Band-shaped distribution in the narrow FOV images

6.1.2 Spray-shaped distribution in the narrow FOV images

6.2 Application of two source mechanisms to the wide FOV observational results

6.2.1 Simulated sodium nebula based on the charge exchange process

6.2.2 Simulated sodium nebula based on the molecular ion destruction process

6.2.3 East-west asymmetry of simulated images

7 Discussion

7.1 Summary of model analysis

7.1.1 Model analysis for the narrow FOV observational results

7.1.2 Model analysis for the wide FOV observational results

7.2 Lifetime of sodium-bearing molecular ions

7.3 Outward expansion speed of sodium nebula

7.4 Disturbed plasma flow near Io

7.4.1 Gyrovelocity of pickup ions

7.4.2 Velocity distribution of plasma flow

7.5 Source region of sodium atoms

8 Conclusions

References

Appendix A Transformation of coordinate

Appendix B Effect of the solar accelerations

太陽系最大の惑星である木星は、強大な磁場を持つと共に高速で回転し、巨大な磁気圏を形成している。この巨大な磁気圏では、太陽風との相互作用により、高エネルギー粒子の急速な加速、強力な電磁波の放射、木星極域での巨大なオーロラ発光、等の様々な電磁現象が発生している。一方で、内部磁気圏においては、活発な火山活動を行うイオ衛星の存在により、木星のプラズマ環境はより興味深いものとなっている。イオの火山活動により蓄積された火山性物質は、イオ - 磁気圏相互作用によって木星磁気圏内に放出され、太陽光や高エネルギー電子との衝突によって電離することにより、木星磁気圏の主要なプラズマ源となっている。従って、イオから放出される火山性ガスの量や空間分布、及びそれらの時間変動を調べることは、木星の電磁環境を解明する上で非常に重要である。

本研究では、イオの火山活動を起源とするガスのうちで、強い共鳴散乱光を放射するナトリウム原子に着目し、これをイオ起源ガスのトレーサーとして考え、このナトリウムD線発光を光学的に観測した。観測は主として、オーストラリア・アリススプリングスにおいて1998年、1999年に行われた。観測手法は2次元イメージング観測であり、木星を中心に $\pm 20R_j$ （以下、狭域観測と記述）、 $\pm 50R_j$ （同、中間域観測）、 $\pm 400R_j$ （同、広域観測）（ R_j ：木星半径）の3種類の視野について観測を行った。各視野での観測結果は以下の通りである。

狭域観測の結果、イオから木星赤道に沿って伸びる発光が観測された。この発光分布には、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。もうひとつは帯状分布よりも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い。

中間域観測においても、木星赤道に沿った発光分布が得られ、狭域観測結果で見られたものと同様の、赤道に対して傾きを持った形状が観測された。また、木星の東西での発光強度に非対称性が見られた。木星の東西で、イオの位置する側の発光が強くなっており、これはイオの公転運動の結果であると考えられた。

広域観測では、木星磁気圏境界を大きく越えた $400R_j$ 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、木星赤道に沿った発光強度が距離と共になだらかに減少するプロファイルが得られた。また、中間域観測でも見られ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さを $82.8 \pm 8.8 \text{ km/sec}$ と導出した。

次いで、本研究においては、これらの観測結果を基に、ナトリウム原子の放出機構、原子分布の空間・時間変動の解明を目的としたモデル計算手法を確立した。これを用いて、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。過去の研究では、今回我々が観測したような、イオ軌道より外側に広く分布するナトリウム原子の放出機構として、木星磁場と共回転しているイオンが中性化してナトリウム原子を生成し、磁場の束縛がなくなることにより放出されるという機構が考えられている。本研究では、まず、この機構に詳細な考察を加えた。即ち、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、いわゆる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。このような、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は、南北への拡がり小さいことから、イオンが中性化するまでのライフタイムは比較的短いと考えられる。従って、この帯状分布は、ナトリウムを含んだ分子イオンがイオトラス内で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)を起こすことによってナトリウム原子を生成し、反応前の共回転速度(~ 74km/sec)で放出される過程によるものであると結論づけ、モデル計算を行った結果、観測をよく再現する帯状分布が得られた。この過程で、木星磁場によるピックアップ時における分子イオンのジャイロ速度は 20km/sec と見積もられた。これは、イオ近傍で完全な共回転を考えた場合のジャイロ速度(57km/sec)に対して遅くなっている。また、スプレー状分布については、南北への拡がり大きいことから、木星磁場内で沿磁力線方向に十分に加熱された後のイオンが係わっているものと考えられる。従って、この分布は、木星磁場と共回転するナトリウムイオンが、イオ近傍のナトリウム原子と電荷交換を起こすことにより放出されるナトリウム原子によるものとした。この場合、放出される原子の初速度は、イオ近傍におけるプラズマ流の bulk 速度と、磁場に対する熱速度の和となる。典型的な値として、前者を共回転速度、後者をイオン温度 60eV に相当するランダム成分として与えた結果、モデル計算は観測されたスプレー状分布をほぼ再現したが、南北方向への拡がりやや観測結果より大きくなる結果となった。

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 37km/sec と 74km/sec にピークを持つ bi-Maxwell 分布、熱速度は 60eV を仮定した。分子イオン解離の場合は、木星磁気圏内で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放出に係わるパラメータについて以下のことが結論づけられた。

- ・イオ衛星起源のナトリウムガスの放出機構は、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。
- ・電荷交換反応によって放出されるナトリウム原子は、bi-Maxwell 分布を呈する bulk 速度を持つ。
- ・上記の bi-Maxwell 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。
- ・上記の bulk 速度分布を持つ(中性化前の)イオン温度は、高速成分が 60eV、低速

成分が 10eV と見積もられる。

- ・上記の bi-Maxwell 分布において、高速成分と低速成分の比は 2:3 が適当である。
- ・分子イオン解離によるナトリウム原子放出は、イオ近傍のみならず、木星を取り囲むイオトラス内全域で起こっている。
- ・分子イオンのライフタイムは 10 時間程度と推定される。
- ・電荷交換反応、分子イオン解離によるナトリウム原子の放出率は、それぞれ 1.5×10^{26} atoms/sec、 4.0×10^{26} atoms/sec と見積もられる。

また、これらの結果から、イオ近傍のプラズマ環境について以下のことが示唆された。

- ・ピックアップイオンは、近似的に、各磁力線上で一団となって磁場に沿って南北に振動を行うと考えられるが、この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。
- ・分子イオン解離についてのモデル計算結果から、完全な共回転の場合よりも遅いジャイロ速度が推定されたが、これはイオ近傍でのプラズマ流が遅くなっていることによるものと考えられる。また、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、前述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。

Abstract

Jupiter, the largest planet in the solar system, has a strong magnetic field and rotates with a rapid angular velocity. The strong magnetic field and its rapid rotation form an active and huge magnetosphere interacting with the solar wind. A variety of electromagnetic phenomena are generated in the Jovian magnetosphere, for example, the bursty acceleration of energetic particles, intense electromagnetic radiations, and giant auroral emissions. In the inner magnetosphere, the existence of innermost Galilean satellite Io makes the Jovian plasma environment more curious, because Io possesses most active volcanic activities in the solar system. A large amount of volcanic gases spreads into the Jovian magnetosphere through the interaction with the Jovian magnetospheric plasma. These emanated gases become a plasma source in the Jovian magnetosphere through the ionization by the solar UV and impact of the energetic electrons. Therefore the observation of the amount and spatial distribution of volcanic gases and its variability is very important in order to investigate the Jovian electromagnetic environment.

In the present study, 2-dimensional imaging observations of the D-line emission distribution of Iogenic sodium atoms, which is regarded as a tracer of Iogenic volcanic gases, were performed with the various field of views (FOV), namely $\pm 20R_J$ (narrow FOV), $\pm 50R_J$ (medium FOV), and $\pm 400R_J$ (wide FOV). From the observation results, the following characteristics of emission distribution were obtained.

In the narrow FOV observation, two different types of distribution extending to $\sim 20R_J$, that is, the band-shaped distribution and the spray-shaped distribution, were observed simultaneously. The band-shaped distribution is less expanded toward the northern and southern hemispheres, and is inclined, with respect to the equatorial plane, with inclination angle depending on the magnetic longitude of Io. The spray-shaped distribution is more expanded toward the northern and southern hemispheres, and shows no apparent inclination.

In the medium FOV observation, the emission distributes along the equatorial plane, and a slightly inclined distribution which is similar to the band-shaped one in the narrow FOV observation. An east-west intensity asymmetry is also observed, which is considered to be caused by the orbital motion of Io.

In the wide FOV observation, the elongated oval-like emission distribution extended to as much as $400R_J$ along the equatorial plane is observed. The east-west intensity asymmetry is also observed, with a dependence on the Io phase angle. The phase relation between the asymmetry and the Io phase angle changes systematically with respect to the distance from Jupiter. From this relation, an apparent outward expansion speed of sodium distribution was evaluated to be $v = 82.8 \pm 8.8$ km/sec.

Based on the observed images, we then made model analyses to investigate supply processes of sodium atoms and time variation of sodium distribution, and presented the comprehensive source process which can consistently reproduce the observed characteristics both in the narrow and wide FOV observation.

From the model analysis for the narrow FOV observation results, it is concluded that the band-shaped distribution is attributed to the molecular ion destruction process, and the typical

gyrovelocity of the molecular ions is estimated to be 20km/sec. It is also concluded that the spray-shaped distribution is produced through the charge exchange process. The sodium bulk velocity of 74km/sec and the ion temperature of 60eV are estimated from the comparison of the simulation with the observed feature, and simulated images reproduced the observed images, though the simulated north-south expansion was slightly larger than the observed one.

In the model analysis for the wide FOV observation results, both the charge exchange and molecular ion destruction processes are first examined separately to reproduce the observed feature characterized by the smooth decrease of the equatorial intensity as the distance from Jupiter increases. In the case of the charge exchange process, the bi-Maxwellian bulk velocity distribution with peak velocities at 74km/sec and 37km/sec and the ion temperature of 60eV are assumed. In the case of the molecular ion destruction process, it is found that molecular ions with long lifetime can reproduce the observed intensity profile along the equatorial plane. However, it is confirmed that neither process, i.e., the charge exchange or molecular ion destruction process alone, can reproduce the observed east-west asymmetry individually. Then a combination of the two processes was examined. The combined model analysis could fairly reproduce the observed features of the wide extended sodium distribution. In the course of the model analysis, some important physical processes and related parameters are suggested as follows,

- Sodium atoms produced through the charge exchange process have a bi-Maxwellian bulk velocity distribution.
- Such bi-Maxwellian velocity distribution determines the outward expansion speed of

sodium atoms.

- The ion temperature of the fast and slow components are estimated to be 60eV and 10eV, respectively.
- The source ratio of the fast component to the slow component is estimated to be 2:3.
- Sodium atoms produced through the molecular ion destruction process are emanated not only in the vicinity of Io but also from the plasma torus.
- The lifetime of these molecular ions are estimated to be an order of 10 hours.
- The source rate is estimated to be 1.5×10^{26} atoms/sec for the atoms produced by the charge exchange process, and 4.0×10^{26} atoms/sec produced by the molecular ion destruction process, respectively.

The following discussions on plasma environments near Io are derived from above model analyses. The coherent field-aligned oscillations of pickup ions should be gradually randomized and become incoherent as they corotate around Jupiter. It is also suggested that the slower gyrovelocity expected in the molecular ion destruction process should be caused by the decelerated plasma flow near Io, and that the slow bulk velocity component expected in the charge exchange process should be due to the low temperature ions in the Iogenic ionosphere.