

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：22604

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22375

研究課題名（和文）木星磁気圏における粒子加速の解明に向けたX線放射モデルの構築

研究課題名（英文）Verification of Jupiter's X-ray emission mechanism for understanding particle acceleration in Jovian magnetosphere

研究代表者

沼澤 正樹（Numazawa, Masaki）

東京都立大学・理学研究科・特任助教

研究者番号：10880437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではX線天文衛星「すざく」による木星の観測データと木星磁気圏における理論的な粒子分布モデルを用いて、木星からの広がった硬X線放射に関する放射メカニズムの検証を行った。独自の解析ツールを用いて、木星観測データをイメージとスペクトルの両面から解析し、木星磁気圏における粒子加速に大きく関係する高エネルギー電子の空間・エネルギー分布についての議論へと発展させた。木星からの硬X線放射を新たなプローブとして、将来的に木星磁気圏内の高エネルギー粒子をモニターできる可能性を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は木星系にX線観測という新たな手段を確立することを目指したものであり、惑星進化や系外惑星の理解に繋がる惑星科学の進展だけでなく、宇宙の様々なスケールで起こる粒子加速物理、プラズマ物理に寄与する成果へと発展しつづける。電磁場を介した粒子加速の理解に、数十 MeV もの電子を加速する木星磁気圏が理想的な実験室としてもたらす知見は大きいと考える。本研究の成果は、木星磁気圏の高エネルギー粒子の分布を知る手段としてX線観測が有効であることを示唆するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have verified the emission mechanism of diffuse hard X-ray emission from Jupiter using Jupiter X-ray data observed by Suzaku and a theoretical particle distribution model in the Jovian magnetosphere. Using our original analysis tools, we analyzed the observation data set in terms of both images and spectra, and developed a discussion on the spatial and energy distribution of high-energy electrons, which are related to the particle acceleration in the Jovian magnetosphere. The result provided the possibility of monitoring the Jovian magnetospheric particles in the future using such hard X-ray emissions from Jupiter as a new probe.

研究分野：X線天文学

キーワード：木星 X線天文学 惑星磁気圏 粒子加速

1. 研究開始当初の背景

木星は太陽系惑星の中で最大最強の磁気圏を持ち、その内部にある放射線帯では数十 MeV に達する相対論的電子や数百 MeV のイオンが確認されている (Bagenal 他 2004 CUP)。この高エネルギー粒子の起源は太陽風やイオプラズマトーラス (IPT) などのプラズマ粒子であるとされるが、単純な磁気圏境界面からの粒子輸送による断熱加速ではそのエネルギーを説明できない。磁気リコネクションや波動粒子相互作用など理論的試みが提唱されているものの、正確な加速機構は長い間謎のままである (Horne 他 2008 Nature Phys.)。

木星磁気圏における粒子加速の理解は、地球を含む惑星磁気圏・放射線帯の形成という共通の物理過程に直結し、さらに宇宙物理において普遍的な粒子加速過程の本質的理解に寄与する。

探査衛星による木星系「その場」での局所粒子・電磁場計測や木星のごく近傍 (<3 木星半径; R_J) の強磁場と数 MeV 電子の相互作用で起こるシンクロトロン電波の地上観測は長年に渡る膨大なデータを蓄積しており、極端紫外線分光衛星「ひさき」による IPT 周辺の観測は磁気圏の外から内への粒子輸送を捉えた初めての証拠となった (吉岡他 2014 Science)。これらと相補的に木星磁気圏における粒子加速研究を大きく後押しするのが、本研究対象の木星 X 線である。木星系に X 線観測という新たな手段を確立することで、惑星進化や系外惑星の理解に繋がる惑星科学の進展だけでなく、宇宙の様々なスケールで起こる粒子加速物理、プラズマ物理に寄与する革新的な成果が期待できる。電磁場を介した粒子加速の理解に、数十 MeV もの電子を加速する木星磁気圏が理想的な実験室としてもたらす知見は大きいと考える。

2. 研究の目的

本研究では、木星磁気圏における粒子加速の理解を発展させるべく、木星 X 線の理論的な放射モデルを検証する。申請者らは、「すざく」衛星による木星の広がった硬 X 線放射 (1-5 keV) の観測から、木星磁気圏の高エネルギー電子が太陽可視光を逆コンプトン散乱する可能性を示した (申請者他 2019 PASJ, 江副他 2010 ApJL)。これは木星磁気圏における「粒子加速の到達点」ともいべき最高エネルギー電子の空間・スペクトル分布を広範囲かつ時間発展的に取得できる可能性を示唆している。そして、太陽風や IPT のプラズマ粒子 (多価イオン) が木星のオーロラで中性大気と衝突し引き起こす電荷交換反応 (Charge eXchange; CX) 輝線を観測すれば、「加速の前段階」にあるプラズマの組成・運動を知ることができる。すなわち X 線観測は、木星磁気圏の粒子加速過程における「始点」と「終点」の情報を一度に取得できる強力な手段になりうる。

3. 研究の方法

日本の X 線天文衛星「すざく」による木星の観測データ (全 3 回; 2006, 2012, 2014 年) を用いて、木星の周りに広がった硬 X 線放射についてイメージ・スペクトル解析を行った。さらに、その結果を理論的な粒子分布モデルに基づいた数値計算による見積もりと比較し、放射メカニズムの推定を行うとともに、不定性の大きい粒子分布モデルに改良の余地がある可能性を見出した。

4. 研究成果

(1) 木星「すざく」観測データのイメージ・スペクトル解析

「すざく」は木星を 2006、2012、2014 年の計 3 回観測しており、本研究においてそれらの系統的な解析を行った。まず木星が他の天体を大きく異なる点として、観測中に視野内を移動することが挙げられる (図 1)。そのため解析における前段階として、この木星の移動を補正し、木星の静止座標系に変換する必要があった。申請者の知る限りでは「すざく」データの解析において、天体の移動を補正してイメージを作成しかつス

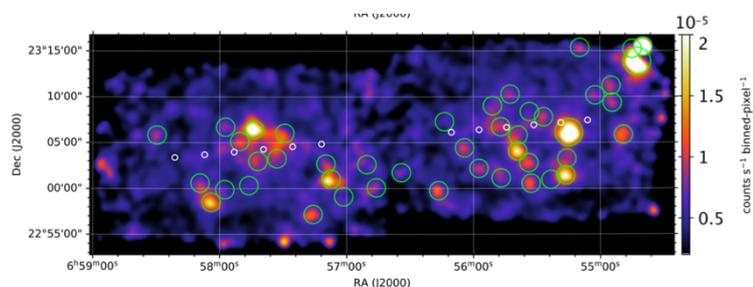


図 1. 天球座標上における木星の「すざく」XIS 観測イメージ (1-5 keV)。図中、白円で木星のサイズと位置を、緑円で背景点源を示した。例として、2014 年に観測されたもの。

ペクトルを抽出できるツールは存在しない。申請者自らこの座標変換ツールを作成し、木星の静止座標系において「すざく」のイメージとスペクトルを同時に抽出することで、より定量的な議論を可能にした。

図 2 に独自のツールにより座標変換した後のイメージとその横軸に対する投影プロフィールを示す。図 1 中に緑円で示された背景点源はイベントから予め除去しているため、図 2 のイベントは木星由来のもので、1-5 keV 帯においては木星本体からの点源状の放射とその周りに広がった放射の 2 成分からなると考えられる。その投影プロフィールから、2 成分の割合を定量的に見積もり、後述のスペクトル解析において利用した。

図 3 に木星静止座標系において抽出した木星のスペクトルを示す。スペクトルは、木星本体からの放射である太陽 X 線散乱成分 (APEC モデル) とオーロラからの放射成分 (Gaussian モデル、熱制動放射モデルなど) 及び非熱的放射成分 (Power-law モデル) でよく再現できた。ここで、帯域の重なるオーロラからの硬 X 線放射と広がった硬 X 線放射とを定量的に切り分けるため、イメージ解析で空間領域の違いに注目して取得したこれらの強度比を用い、広がった硬 X 線放射の成分のみの X 線光度を算出することに成功した。

以上より、木星からの X 線放射を①木星本体からの軟 X 線放射、②木星本体からの硬 X 線放射、③木星の周りに広がった硬 X 線放射の 3 成分に切り分けて、2006-2014 年に渡る長期間の変動を初めて明らかにした (図 4)。①と②の成分は太陽活動に依存して変動しているのに対し、③の成分は有意に変動せず定常していることを示唆する結果といえる。

(2) 放射メカニズムの検証

木星からの広がった硬 X 線放射のメカニズムとして考えられるのは (a) 木星磁場との相互作用によるシンクロトロン放射、(b) 非熱的な keV 電子による制動放射、(c) 数十 MeV 電子による太陽光子の逆コンプトン放射である。

(a) については木星磁気圏の磁場 (例えば、約 $6 R_J$ で約 0.01 G) を考慮すると TeV オーダーの電子が必要と考えられる。これまでの木星系の「その場」観測ではそのような高エネルギーの電子は観測されておらず、磁気圏内に存在する可能性は限りなく小さいといえる。従って、この放射メカニズムは現実的ではなく棄却できる。

(b) は電子分布を考えると可能性が高い。keV 電子が広く分布する場合にイオプラズマトーラス (衛星イオ由来の高エネルギーブ

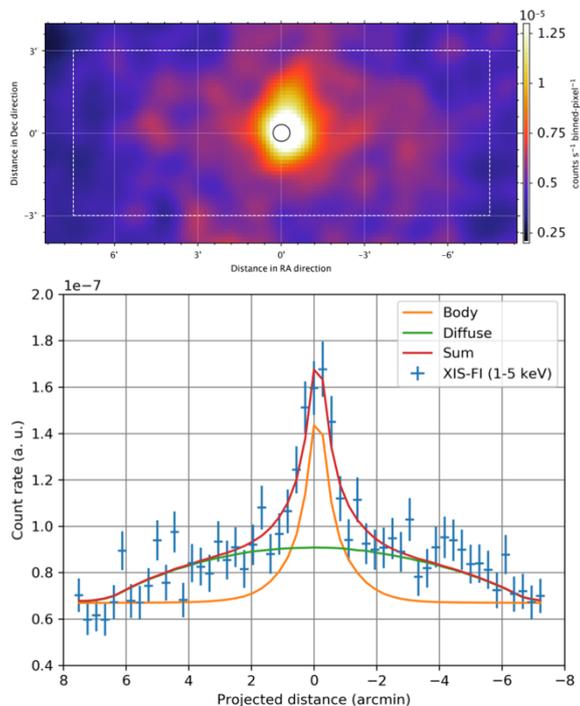


図 2. 木星静止座標系における木星のイメージ (上段) とその投影プロフィール (下段)。上段図、中央の黒円は木星のサイズと位置を示す。いずれも 1-5 keV 帯で、2014 年に観測されたもの。

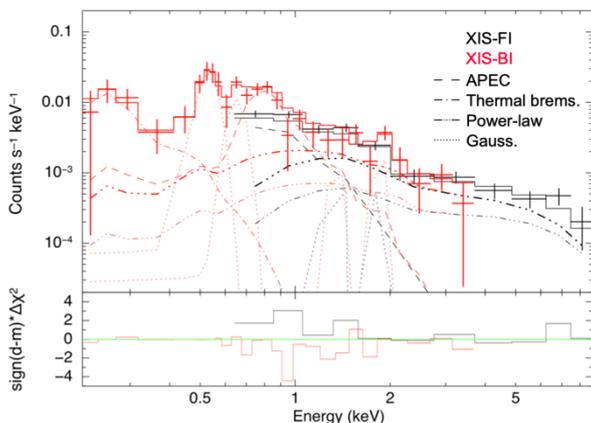


図 3. 木星静止座標系において抽出した 0.2-8 keV のスペクトル。例として、2014 年に観測されたもの。

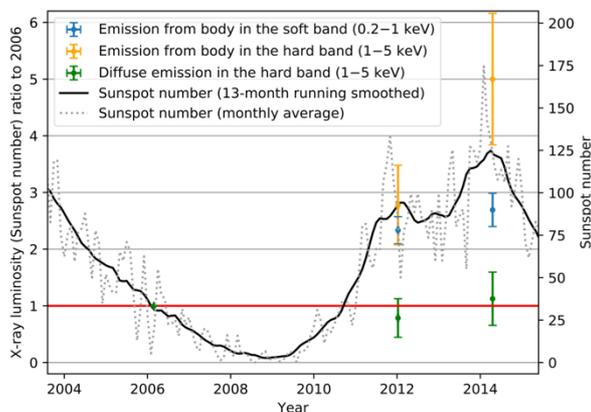


図 4. 木星からの X 線放射の各成分の X 線光度変動と太陽黒点数。2006 年観測を 1 とした。

ラズマで満ちた領域)中の硫黄イオンとの相互作用によってX線輝線(2.3 keV)が放射されると考えられる。しかしながら、観測したスペクトルにはそのような傾向が見られないことから、この放射メカニズムの可能性も棄却できると考えた。

(c)に関しては、木星系における過去の「その場」粒子計測から数十 MeV 電子の存在が確認されている。しかし、その空間・エネルギー分布は明らかでなく、「その場」観測に基づく典型的なモデル(Divine & Garrett 1983 JGR)も、特に数 R_J より外側の領域では十分な観測がないことから、10 倍程度過小評価していると予想されている(Bagenal 他 2004 CUP)。申請者は放射メカニズムの可能性を議論するため、本粒子分布モデルを用いて木星磁気圏の高エネルギー電子の空間・エネルギー分布から逆コンプトン散乱されるX線の光度を見積もった。

図5にDivine-Garrettモデルに基づく数値計算から見積もった逆コンプトン散乱X線の強度分布を示す。木星近傍(数 R_J 以内)の領域においては、観測結果と概ね一致する傾向があることを明らかにした。これは逆コンプトン散乱によってX線が放射されるメカニズムを後押しする結果であると考えられる。一方で、Divine-Garrettモデルにおいて不定性が大きいとされる外側の領域においては10-100倍程度の差が見られ、この領域では粒子モデルの予測よりも多くの高エネルギー電子が存在している可能性を示唆する結果となった。

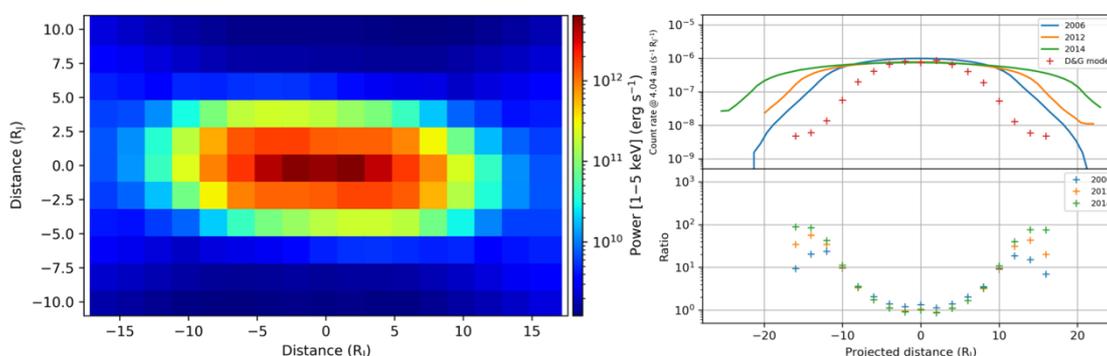


図5. 木星磁気圏における高エネルギー粒子分布モデル(Divine-Garrettモデル)を用いて数値計算した逆コンプトン散乱X線の強度分布(観測視線方向に積分; 左)とその投影プロファイル(右)。右図において観測結果を重ねて比較した。

以上の結果は、投稿論文(沼澤他 2021 PASJ)や国際会議(沼澤他 2021 COSPAR)において発表済みである。将来的に木星からのX線放射を観測することで、木星磁気圏における高エネルギー粒子の分布や粒子加速メカニズムの解明へと繋がりを重要な結果であると捉えている。

本研究費による多大なご支援に深く感謝申し上げます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Numazawa Masaki, Ezo Yuichiro, Ohashi Takaya, Ishikawa Kumi, Miyoshi Yoshizumi, Shiota Daikou, Uchiyama Yasunobu, Kimura Tomoki, Branduardi-Raymont Graziella	4. 巻 73
2. 論文標題 Suzaku observations of Jovian diffuse hard X-ray emission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 894 ~ 911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psab053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masaki Numazawa, Yuichiro Ezo, Takaya Ohashi, Kumi Ishikawa, Yoshizumi Miyoshi, Daikou Shiota, Yasunobu Uchiyama, Tomoki Kimura, Graziella Branduardi-Raymont
2. 発表標題 Suzaku observations of Jovian diffuse hard X-ray emission
3. 学会等名 COSPAR 2021 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 沼澤正樹, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 石川久美, 三好由純, 塩田大幸, 内山泰伸, 木村智樹, Graziella Branduardi-Raymont
2. 発表標題 「すざく」による木星磁気圏に広がった硬X線放射の観測
3. 学会等名 惑星圏研究会 2021
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------