

【学位論文審査の要旨】

1. 研究の目的

X線による宇宙観測は1962年のロケット実験による太陽以外の天体からのX線放射の検出以来、ブラックホールや超新星残骸、銀河団などの強い重力、強磁場、高温状態といった宇宙における極限状態を明らかにしてきた。1990年代に入り、彗星からのX線放射が見つかったのを契機に、“冷たい”太陽系の天体からもX線が生じていることが明らかとなってきた。こうした中、1990年代にドイツのX線天文衛星 ROSAT は全天サーベイ中に奇妙なX線増光を検出した。この雑音は天空上の広い領域を観測しているにもかかわらず、1時間以下の短いタイムスケールで激しく時間変動を生じており、望遠鏡の応答関数を反映していることから、検出器の雑音ではなく、天空上から入射した広がった放射と考えられた。また太陽風観測衛星のデータと比較することで、太陽風の変動と良い時間相関が見られた。そこで提唱されたのが、太陽風に含まれる O^{7+} や N^{5+} といった多価イオンが、地球周辺に広がっている希薄な大気である外圏の主に水素原子と衝突して、電子を奪う電荷交換反応 (Charge eXchange, CX) に伴う発光という説である。CX放射は元々は彗星からのX線を説明するために提唱されたものであったが、2000年代に入って行われた日本の「すざく」衛星などによるX線分光観測から、CXに特徴的な輝線分布が確認され、CX説は現在までに確立されたものとなっている。

理論予測によれば、本放射は太陽風イオン密度が高い、地球磁気圏の昼側(太陽側)、特にシース(遷移)領域や、カスプ領域で強く放射されていると考えられる。しかし、どの領域からどのくらいの強度で放射されているか、というモデルはいくつか提案されているものの、観測中の平均的な強度予測にとどまっており、観測中の時間変動まで定量的に予測できるものはなかった。本放射は地球の周りを周回するX線天文衛星にとって、好むと好まざるとに係わらず常に前景放射として存在するものであるため、その正確な変動予測は天文観測にとって非常に重要である。さらに、地球磁気圏の構造を反映したX線の光度分布が見られるとすると、従来は「その場」のプラズマ計測によって点観測の集合で捉えるしかなかった地球磁気圏の把握に革新的進展をもたらす可能性がある。

そこで本研究では、本放射に世界最高の感度を持つ日本の「すざく」衛星によって観測された全データを解析し、中でも特に明るい5つの発光イベントを選んで、CX放射を定量的に求めた。さらに太陽風観測データ、地球外圏の密度モデル、電荷交換反応の断面積、地球磁場モデルを包括的に考慮した新しいモデルを構築して、観測と平均発光強度だけでなく時間変動まで含めた定量的な比較を行った。

2. 研究の方法と結果

本研究ではまず「すざく」衛星で観測されたCX放射のうち、最も明るい部類の5つの発光イベントを解析した。観測方向は地球磁気圏の極すなわちカスプ方向を指向しているのが3つ、磁気圏の横腹のシース方向を指向しているのが2つである。すでにCX放射が過

去の文献で確認されているものだが、CX放射を定量的かつ系統的に見積もるため、同一の手法で再解析した。まずX線イメージから天体を除去した上で、X線ライトカーブと太陽風データを比較し、安定期、プリフレア期、フレア期の3つに分類した。プリフレア期はX線ライトカーブの変動は顕著ではないが、太陽風に変動があった場合、すなわち太陽風プラズマの化学組成に変化があった場合について定義したものである。そしてそれぞれの期間におけるX線スペクトルを作成し、ガウシアンでフィットし、最も強く見られる輝線であるOVIIおよびOVIII K輝線について定量的に強度を求めた。

次にCX放射のモデル化を試みた。観測されるCX放射の強度は、入射する太陽風フラックス、地球外圏の中性水素密度分布、電荷交換反応の断面積および関係する輝線の遷移確率をかけあわせたものを、視線方向に積分することで求まる。太陽風フラックスは太陽風観測衛星ACEおよびWINDのデータ、外圏密度はHodgesの経験的モデル、電荷交換反応に関する値は地上実験および理論計算から求めることができる。視線方向の積分区間は最も予測が難しいが、太陽風プラズマは地球磁気圏の磁場が惑星間空間に対して開いている箇所には直接侵入可能であることから、Tsyganenkoの地球磁場モデルを用いて各観測時の太陽風動圧などから定量計算して見積もった。太陽風データは時刻付けしたものが公開されているため、時間変動まで含めた定量的なX線強度の見積もりが可能である。

観測とモデルを比較すると、OVIIの平均的発光強度についてはfactor 2程度で概ね一致したが、OVIIIの平均強度は4-200倍程度、観測がモデルを上回った。モデルで用いた各要素の不定性はfactor 3-4程度となるため、OVIIは概ね再現できたと言える一方で、OVIIIは単純なモデルの不定性では説明がつかない。一方、各輝線の時間変動についても見た所、平均強度をスケールリングして比較すれば、数十分程度のタイムスケールで観測を概ね再現できることが分かった。OVIIIのモデルと観測が大きく異なった原因としては、第一に太陽風観測データのO⁸⁺に系統誤差があることが考えられる。実際に観測されたOVIIとOVIIIのX線輝線強度比は太陽風イオンデータの比から予測される値に比べて5-10倍程度大きかった。第二に電荷交換の発光強度の断面積の不定性が考えうる。OVIIIはOVIIに比べて衝突速度への依存性が大きく、特に低速領域においてはその影響は大きいと推定される。

3. 審査の結果

地球磁気圏に付随したCX放射は既に確立されてきたものだが、モデル化には太陽風データの解析、地球外圏の密度分布、電荷交換反応、地球磁場構造の知識といった複合的な知識を要するため難易度が高く、確たるモデルがない状況であった。本研究では「すざく」衛星によるCX放射の定量解析を行いつつ、自ら構築した新たなモデルで定量的な比較を行うことで、観測中の時間変動まで含めた予測を試みたものである。これは異なる軌道を周回するあらゆるX線天文衛星の観測中でのCX放射の影響を定量予測することを可能にする点で画期的である。同時に本放射は地球磁気圏のグローバル撮像にも活用できると期待されている。本学を中心とした本放射を観測するためのGEO-X衛星や、輝線放射に高い感

度を持つ XRISM 衛星も打ち上げが間もなくであり、今回のモデルはこうした将来の地球磁気圏観測や X 線天文観測に幅広く活かされると期待できる。なおモデルによる OVII 輝線予測は平均強度と時間変動のおおまかな再現に成功した。一方で OVIII 輝線については平均強度が大きすぎており、この点においてはさらなる研究の余地があることも分かった。こうした論文の内容や審査会での質疑応答は申し分なく、本研究は博士(理学)の学位に十分値するものと判定した。

4. 最終試験の結果

本学の学位規定に従って、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。