

## 立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)

## 個人研究

## 2023 年度研究成果報告書

研究代表者	所属部局・職名	氏名
	理学部・助教	澤田 真理
研究課題	EBIT をもちいた実験室宇宙物理実験による非平衡プラズマ X 線放射の理解	
研究期間	2023 年度	
研究経費 (1 円単位)	(支出金額) 1,000,000 円 / (採択金額) 1,000,000 円	

## 研究の概要 (200~300 字で記入、図・グラフは使用しないこと。)

本研究では米国リバモア国立研究所との共同研究により Electron Beam Ion Trap をもちいた非平衡プラズマの生成・分光研究を進めた。これはわれわれが 2023 年に打ち上げた XRISM 衛星によって得られる宇宙高温プラズマの精密 X 線分光観測データを正確に解析・解釈するために立ち上がった実験計画の一部である。本年度は Ar イオンをもちいた実験データの較正・解析手法の確立とその成果の取りまとめを行なった。また、本年度中に実施予定であった Fe イオンをもちいた同様の実験については、液体ヘリウム調達難などの都合で次年度に延期となったため、この次回実験の計画・準備も進めた。

## キーワード (研究内容をよく表しているものを 3 項目以内で記入。)

[ 実験室宇宙物理 ] [ 非平衡プラズマ ] [ 精密 X 線分光 ]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)**【背景】**

本研究では非平衡プラズマをターゲットとした実験室宇宙物理学実験を進めた。この研究は、私自身が開発に携わり 2023 年に打ち上げに成功した XRISM 衛星によって切り拓かれる精密 X 線分光学と相補的なものだ。精密 X 線分光にもちいるマイクロカロリメータは、これまで標準的だった X 線 CCD 分光器に比べ、典型的な X 線エネルギー (6 keV) でのエネルギー分解能が 30 倍程度向上する。これにより、これまでは計測不可能だった放射源のイオン温度やバルクな運動が測定可能になる。一方で、あまりに大きな性能向上のため、これまでは目立たなかった放射モデルの系統誤差が顕在化し、データの解析に困難をきたしたり、データの解釈に大きな不定性を生じることが懸念されている (e.g., Hitomi Collaboration, et al., 2018, PASJ, 70, 12)。さらに、その影響は XRISM の前身である Hitomi 衛星が観測した熱平衡プラズマよりも、XRISM の主たるターゲットとなる非平衡プラズマでより顕著と考えられる (Sawada et al. 2019, PASJ, 71, 61)。そこで、何らかの方法で放射モデルの系統誤差を評価し、これを較正する手段が必要となる。

私は、地上プラズマ実験装置 Electron Beam Ion Trap (EBIT) をもちいて天体プラズマ放射を地上で再現し、これを XRISM 衛星に搭載されたものと同型のマイクロカロリメータで分光することで模擬観測を実施する「実験室宇宙物理学実験」を米国リバモア国立研究所 (LLNL) と共同で進めている。特に、過去に観測的に知られているプラズマ状態の再現だけにとどまることなく、これまで分光器の性能によって発見を阻まれてきた特異なプラズマ状態を地上の制御された環境下で出現させ、そのような状態に固有のスペクトル構造を特定することを目標としてきた。その一例として、非熱的エネルギー分布電子がある場合の重元素スペクトルの変化に注目している。EBIT での天体プラズマ模擬として、電子ビームエネルギーを周期的にスイープすることで時間平均として熱的なマクスウェル分布を再現する手法が確立していた (Savin et al., 2000, RSI, 71, 3362)。私はこれを拡張し、2019 年の段階で非熱的分布の実験的再現を実現した。その後コロナ禍などによる長期中断を経て実験を再開し、Ar イオンをもちいた実験を実施、マイクロカロリメータのスペクトルデータを取得した。新規の実験手法であるため、実験データを精査し実験・較正・解析手法を確立することが急務である。本年度は特にこの観点での進展に注力した。以下にその内容を述べる。

**【手法】**

EBIT 実験では強磁場で絞り込んだ高密度 ( $\sim 10^{11-12} \text{ cm}^{-3}$ ) の電子ビームをイオンに照射することでプラズマを発生させる。イオンは電子ビームで生じた電場で動径方向に、また電極電場をもちいて軸方向にトラップされる。中性状態で注入されたイオンに一定時間電子ビームを照射することで、イオンの電離階数は徐々に上がり、1 秒程度で電離平衡に近い高階電離状態となる。バックグラウンドガスの混入を抑えるため、同程度のタイムスケールでイオンを排出する必要がある。この短時間ではマイクロカロリメータで捉えることのできるプラズマからの X 線放射はごくわずかなため、EBIT 実験では基本的にイオンの注入、電離の進展、イオンの排出の 3 段階を連続的に繰り返し、光子統計を貯めることが必要となる。マイクロカロリメータでは個々の X 線イベントに時刻タグがつくので、解析時に EBIT のイオン注入周期 (EBIT サイクル) で畳み込みを行うことで、電離の時間進化の段階ごとにスペクトルを評価することが可能だ。私が入り組む熱的・非熱的分布のプラズマ放射の再現実験では、このイオン注入サイクルのそれぞれで、電子ビームのエネルギーを時間的にスイープさせる。これには、イオントラップの中段部分の電極電位をファンクションジェネレータからの波形入力を受けたアンプで素早くドライブすることで電子が受ける加速度つまりビームエネルギーを時間変化させる。その周期は電離の進展のタイムスケールよりも短い必要があり、典型的に数 10 ms である。したがってこの実験データは、 $\sim 1 \text{ s}$  の EBIT サイクルと数 10 ms のスイープサイクルという 2 つの周期変動をもつ。

**【成果 1. 実験・較正手法の改善】**

2019 年の初測定で得た X 線イベントのうち、二電子再結合や放射性再結合に由来するものももちいて実際に達成されたビームエネルギーを時間の関数として解析したところ、意図した値に対して全体的に  $\sim 400 \text{ eV}$  以上の大きなオフセットが乗っていることが明らかになった。そこで今回はまず、データ解析や実験システムの部分ごとの試験を通じて、このオフセットの原因追及をした。その結果、アンプの負荷設定が正しくないことや、スイープ周期が短すぎた (10 ms) ために、アンプが入力に追従できていなかったことが判明した。そこで以降の実験ではアンプの負荷設定を見直し、スイープ周期を 30 ms 程度まで延ばすことでこのオフセットを最小化した。この改善後も  $\sim 60 \text{ eV}$  のオ

**研究成果の概要 (つづき)**

フセットが残った。これについては、空間電荷の推定誤差として矛盾がないため、解析時にこのずれを考慮し、実際に測定したエネルギー分布を決定することとした。今回の Ar イオンをもちいた実験では、熱的分布として電子温度  $kT = 1.5 \text{ keV}$ 、非熱的分布として同温度のマクスウェリアンコアを持つ  $\kappa = 2$  の kappa 分布を採用したが、オフセットを考慮し実際に実現された分布を近似的に求めたところ、パラメータの意図した値からのずれはいずれも 3% 以内だった。さらにスイープ位相が最大数十マイクロ秒程度ずれうることも特定し、ビームエネルギーと同じく二電子再結合と放射性再結合の X 線イベントをもちいて自己較正する手法を確立した。

**【成果 2. 理論計算の改善】**

EBIT の実験データは最終的には X 線スペクトルの理論計算結果を検証・較正するために使用する。しかし既存の放射計算コードのほとんどは、熱的 (マクスウェル) 電子分布しか計算できず、そのままでは本研究の対象である非熱的分布放射を生成できない。さらに一部の放射計算コードでは電子エネルギー分布を熱的分布の線形和に近似することで遷移レートを計算し、最終的な非熱的スペクトルを得ることが可能だが、これも EBIT の実験結果と直接比較できない。これは、EBIT で模擬する非熱的分布にはビームのスイープ範囲で決まる上下限があることに由来する。典型的な温度 ( $\sim 1\text{-}2 \text{ keV}$ ) の熱的分布であれば  $\gg 10 \text{ keV}$  の高エネルギー電子は元々少ないが、非熱的分布では実験的なエネルギー上限の影響は無視できない。われわれは放射計算コードの原典を遡り、マクスウェル分布で畳み込まれる前の、電子エネルギーの関数としての衝突励起レートなどを直接計算できるコードを構築した。

**【成果 3. 初期成果の創出】**

以上の実験・較正上の改善や、理論計算の準備を経て、Ar イオンをもちいて測定した精密スペクトルを詳細解析した。その結果、非熱的分布の場合には期待する輝線強度比の変化がみられることを実験的に初めて確認した。具体的には、熱的分布と比べて、二電子再結合による衛星線強度に対する衝突励起による共鳴線強度の比が非熱的分布の高エネルギー側テイルを反映して大きくなる。この効果を理論計算と比較したところ、実験データの統計誤差の範囲内で一致する結果を得た。現在この成果を学術誌への投稿論文としてまとめている。

XRISM 衛星で獲得予定の超新星残骸などの観測データへの応用という意味では、より重い元素、具体的には Fe イオンがより重要となる。本研究期間中にはその測定はできなかったが、Ar イオン実験の議論と並行して来年度予定する Fe イオン実験の詳細計画も進めた。

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ① 雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ② 図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③ シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④ その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

①  
なし

②  
なし

③  
なし

④  
"Updates on simulating non-equilibrium ionization plasmas with the LLNL EBIT-I electron beam ion trap", Hell, Natalie ; Sawada, Makoto ; Brown, Gregory ; Hubbard, Antonia ; Shah, Chintan ; Eckart, Megan ; Leutenegger, Maurice ; Kelley, Richard ; Kilbourne, Caroline ; Porter, Frederick Scott, AAS High Energy Astrophysics Division meeting #20, id. 103.69. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 55, No. 4