

著者	ひらた れお ふりがな氏名 平田 玲央
表題	天文応用に向けた小型電子ビームイオントラップの開発と 大型放射光施設 SPring-8 での多価イオン精密分光実験

本論文の内容に捏造・改ざん・盗用はない（チェックをお願いします）

論文概要（全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません）

■ 導入（1章）

宇宙に存在する通常の物質の99%以上は高温のプラズマ状態にあり、例えば銀河団や超新星残骸のような天体を形成しX線を放射している。天文学では、これらの天体の構造や成り立ち・元素組成などの重要課題を解き明かすために高温プラズマのX線観測が鍵となる。2023年に打ち上げられた最新のX線天文衛星XRISMが搭載する軟X線分光装置Resolveは非常に高い分光性能($\text{FWHM} < 5 \text{ eV} @ 6 \text{ keV}$; XRISM Collaboration 2024a)を実現している。

これを用いたX線精密分光によって、天体に含まれる様々な元素に由来する特性X線を詳細に分離し、プラズマ状態や元素組成比など天体の重要な物理

的情報をこれまでになく高精度に測定できるようになった(図1)。例えば、プラズマの光学的厚さに感度を持つ共鳴散乱(イオンによる光子の吸収・再放射)による特性X線の正確な測定により、天体プラズマの3次元構造や速度分布を明らかにできる。しかし、多数の電子を持つイオンは構造の複雑さゆえに特性X線の波長や遷移確率といった原子データの理論値の不定性が大きく(e.g., Gu+2019)、これに基づいた現状の放射モデルによる解釈では最新の精密分光データから情報を最大限に引き出すことができない。この問題を解決するためには、地上プラズマ実験を行い、天文学で用いる原子データベースを高精度な実験値で検証し、補っていく必要がある。そこで我々は、原子物理分野で多価イオンの分光研究によく用いられている「電子ビームイオントラップ(EBIT)」という装置の本格的な天文応用をしたいと考え、天体プラズマで起こる様々な素過程を再現できるように放射光と併用可能な仕様のEBIT(図2上)をMPIKとの共同研究でISAS/JAXAに導入した(3章)。本修士論文では、このJAXA-EBITが原子データ測定に必要な性能を有することを確認するための性能評価実験を行った(4章)。また、EBITを使って原子データを網羅的に測定する研究の第一ステップとして、本修士論文では特に、銀河団ガスや超新星残骸の観測的研究でしばしば着目される鉄のL殻遷移輝線に注目した。

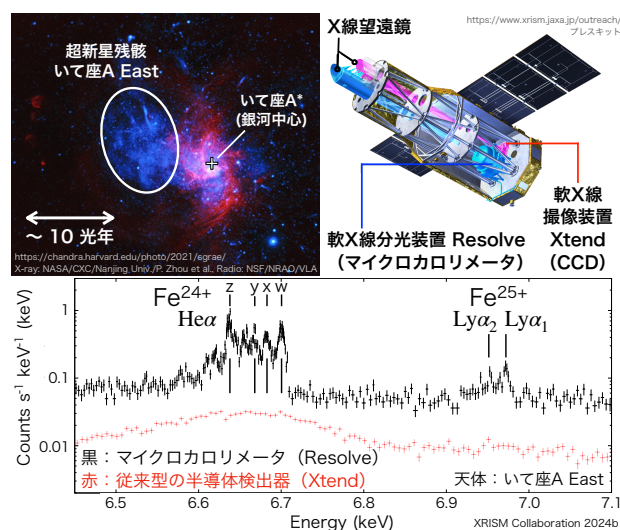


図1: (左上) 超新星残骸 いて座 A East の X 線観測 (青: Chandra 衛星/米 NASA)と電波観測(赤: VLA/米 NSF)の擬似カラー合成画像/(右上) XRISM 衛星の内部構造の概略図/(下) XRISM 衛星で観測した、超新星残骸 いて座 A East の X 線スペクトル

閉殻構造で天体プラズマ中に安定して存在するネオン様鉄イオンの 3d-2p, 3s-2p 共鳴遷移による輝線 3C, 3G の強度比は、プラズマによる共鳴散乱の効果調べるのに有効であるが、理論と観測が合わない問題が長年存在している (e.g., de Plaa+2012)。そこで我々は 3C, 3G 輝線の原子データを高精度に測定してこの問題を検証するべく、JAXA-EBIT を用いた放射光実験を行った(5章・6章)。

■ 装置開発 (3章) ・ 性能評価 (4章)

EBIT(Marrs+1988)は、磁場で圧縮した単色電子ビームを標的物質に照射して任意の価数の重元素イオンを生成、電極が作るポテンシャル井戸で狭い領域に閉じ込めて電子遷移に伴う特性 X 線を検出する装置である(図 2 下)。JAXA-EBIT は光軸外から電子ビームを曲げて入射させる電子銃(図 2 左下)を搭載し、放射光と電子ビームの同軸入射が可能で、これにより電子ビームによる価数制御と放射光による励起・電離を独立に行えることで、天文学で重要な素過程が EBIT プラズマで再現できる。

まず JAXA-EBIT に重元素が注入できることを確認し、電子ビームの基本的性能を評価するため、EBIT で生成した酸素・アルゴン・鉄イオンの二電子性再結合(DR; 図 3)輝線の測定実験を行った。ここでは DR が特定の共鳴エネルギーでのみ起こることを利用している。

検出光子数の電子ビームエネルギー依存性(図 4)から、EBIT に注入した重元素のイオンが生成・トラップされたことを確認し、本 EBIT の電子ビームエネルギーに、電子ビームとイオンの空間電荷に由来する 12 eV から 16 eV 程度のオフセット(@2236 - 2425 eV)が存在することがわかった。また、図 4 (c)のスペクトル上の DR の輝線幅から電子ビームのエネルギー分解能は < 2.6 eV (@2383.89 eV)に制限され、非常に高い単色性が示された。これにより JAXA-EBIT が、MPIK で先行して開発された同型の装置である PolarX-EBIT(e.g., Grilo+2021)と同等の性能を実現し、放射光実験で様々な元素について原子データを測定するのに十分な性能を有していることが確認された。

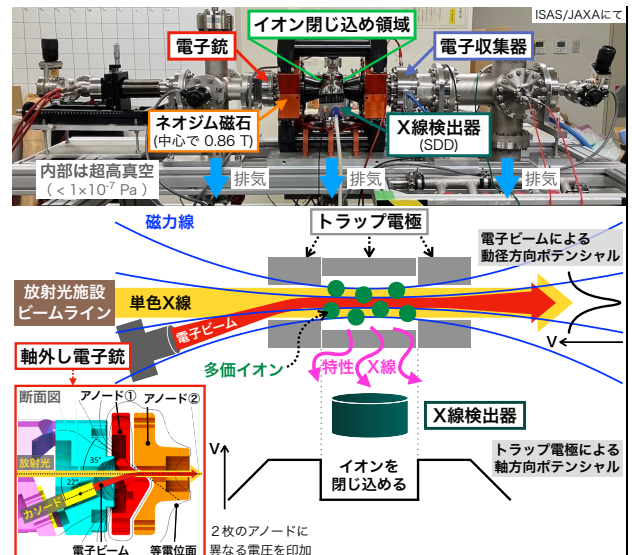


図 2: (上) JAXA-EBIT 外観と各部名称/(下) EBIT で多価イオンを生成・閉じ込める原理、および EBIT の電子ビームと同軸上に放射光を入射し、イオンの特性 X 線を検出する実験の概念図/(左下赤枠内) JAXA-EBIT の軸外電子銃の断面図

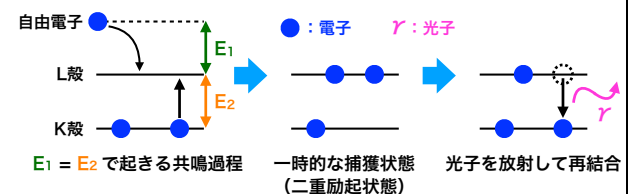


図 3: 二電子性再結合における状態遷移の過程

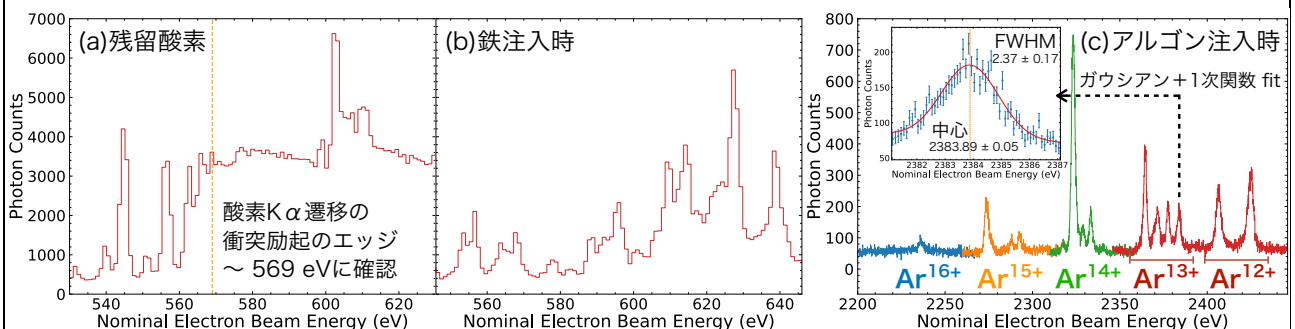


図 4: JAXA-EBIT による (a) 残留酸素/(b) 鉄注入時/(c) アルゴン注入時の電子ビームエネルギースペクトル/(c 図中のプロット) 測定されたアルゴンの DR 輝線構造の 1 つをガウシアンモデルでフィッティングした結果/何も注入しない場合、(a) のように残留ガス由来の酸素イオンが生成される。(b),(c) の輝線構造がそれぞれ同様の測定をした先行研究と一致したことから、注入した各元素のイオン生成・トラップに成功したと判断した。

■ 放射光実験 (5章・6章)

次に、この EBIT を大型放射光施設 SPring-8 に持ち込み、ネオン様鉄の L 殻遷移の精密分光測定を行った。EBIT 内のイオンに単色化した放射光を入射して共鳴散乱(図 5)を再現、入射光子エネルギーに対する散乱光子数の依存性を調べた。その結果 3C 輝線が 6%の精度で検出され、輝線幅が $\text{FWHM} = 0.189 \pm 0.009 \text{ eV}$ (@ $825.658 \pm 0.003 \text{ eV}$)の非常に精密なスペクトルの取得に成功した(図 6 左)。一方で 3G 輝線については S/N 比が十分ではなく今回は検出に至らなかった(図 6 右)。これらの測定結果をもとに、3G/3C 振動子強度比を 0.306 (95%上限)に制限した。これは理論値 (~ 0.0504)と矛盾しない結果である。

■ まとめ・今後の展望 (7章)

本研究によって、EBIT と放射光施設を併用して、放射光の高い単色性による既存の X 線検出器を凌ぐエネルギー分解能で多価イオンからの特性 X 線を精密分光する手法を確立することができた。今後は、EBIT の装備をアップグレードするなどして今回は未検出となった 3G 輝線のフィージビリティの改善を行うとともに、本研究で確立した手法を用いて、天文学で重要な他の様々な遷移・元素について原子データの網羅的な測定を展開していく。

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で 4 ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

本研究は、私が指導教員の山口准教授、同研究室の天野研究員と共同の小規模なチームで推進している、天文分野への応用を主目的とした多価イオン X 線分光実験プロジェクトの一環であり、これに参加している学生は私一人である。JAXA-EBIT は私の配属時点で山口氏と天野氏およびドイツ MPIK の共同研究者らによって主要部分が組み上がってはいたものの、実用性能があるかどうかは未確認であり、適切な性能評価の方法や、放射光施設での実験手法も未検討であった。そこで私が主体となって、まず本論文に述べた実験を行う上で必要な試料注入機構やデータ取得システムを開発したほか、電極電圧などの運転パラメータや鉄などの試料の注入方法の最適化を行った。また、性能評価実験・放射光実験とそれらのデータ解析の大部分は私が主導し天野氏と協力して行った。特に性能評価は、私が先行研究を調査して実験内容を提案するところから具体的なオペレーション、データの解釈まで主体的に進めた。さらに、放射光実験で鉄の L 殻輝線を分光するために必要となった電子ビームエネルギーを高速で切り替える測定方法も、先行研究の手法を参考にして私が中心となって実装した。JAXA-EBIT を放射光施設に持ち込んで行う実験で、多価イオンの特性 X 線の精密スペクトルを取得するという具体的なデータを伴う成果を得たのは、JAXA-EBIT の開発の中で今回が初めてである。

私は学部時代には主に天体の X 線観測データを解析する卒業研究を行っており、修士課程に入って初めて本格的な実験を伴う研究を行うようになったため、本研究を進めていく中で実験に関わる多く

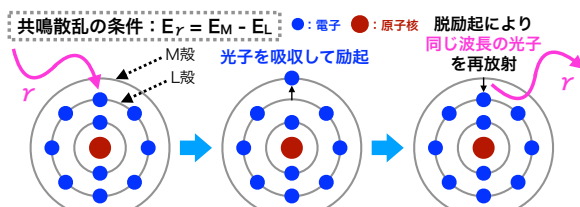


図 5: 共鳴散乱における状態遷移の過程 (4π 方向に再放射された入射光子と同じ波長の光子を EBIT の光軸と垂直に置いた検出器で検出する。)

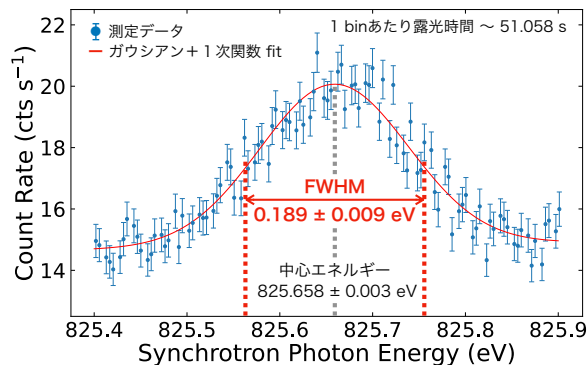


図 6: JAXA-EBIT で取得したネオン様鉄 3C 輝線の X 線スペクトルをガウシアンモデルでフィット

のことが自分にとって新しい挑戦となり、仮説を立てて手を動かし、試行錯誤を繰り返しながら問題解決に取り組むことの連続であった。特に本研究で用いた JAXA-EBIT は新規に立ち上げたばかりの装置であるため運転マニュアルや過去の実験データの蓄積がなく、測定やデータ解析のためのソフトウェアも必要に応じて新しく作る必要があったので、EBIT を用いた実験の経験が豊富な戸川博士 (MPIK)、坂上助教(NIFS)、中村教授(電通大)、澤田助教(立教大)や、宇宙 X 線・ γ 線の検出器開発に精通した鶴教授(京都大)、高田准教授(京都大)、鈴木特任助教(ISAS)をはじめとした原子物理・宇宙物理分野の研究者らに自ら働きかけて協力を得つつ、様々なタイプの EBIT を用いた実験の先行研究を参考にするなどして、運転方法や測定データの扱いを徐々に習得しながら開発と研究を進めてきた。また、ハードウェアの改良や不具合の調査と修理のために、自らの手で EBIT の主要部分を格納する真空チャンバーを開けて内部を確認し、既存の装置の組み換えやメンテナンス、新しい部品への換装などの作業をする機会が多くあった。こうした経験は、今後この JAXA-EBIT を用いてより多彩な研究を展開していく上で非常に重要なものであり、将来的に別の新たな装置を立ち上げる際にも大いに生かせるものであると考えている。

本修士論文で私が苦心して取り組み、研究を前進させる鍵となったと考える成果を以下に述べる。

1 点目は鉄試料の注入方法に関する工夫である。本論文で目的に据えたネオン様鉄イオンの輝線を EBIT で測定するには、鉄イオンの素となる試料物質を EBIT 内に気体として注入する必要がある。そこで今回は EBIT 内が超高真空であることに着目し、十分な蒸気圧を持つ鉄の有機化合物を用いることを考えた。常温で固体のフェロセンの粉末試料を効率的に気化させるために、試料を封入したボンベ内部を十分な真空度にまで排気できるシステムを構築した。さらに、トラップ部分に十分な量の鉄原子を安定して送り込める最適な注入圧と、鉄をネオン様にまで電離するエネルギーの電子ビームを出力するための各電極の電圧設定を予備実験を行って探索し、SPring-8 での限られたビームタイムでも速やかに鉄イオンを作って測定を行うことができるようになった。

2 点目は性能評価において、電子ビームエネルギーのオフセットの原因を理解するため、理論的な推定値との比較を行ったことである。今回の測定時の条件のもとで電子ビームの空間電荷に由来するオフセットを計算した。さらに、トラップされているイオンの空間電荷からの寄与も考慮したところ、この理論値が実験値と概ね一致したため、オフセットの要因としては電子ビームとイオンによる空間電荷の寄与が支配的であることが理解された(4.5.1)。単なる測定にとどまらず、物理的理解にまで落とし込んだことにより、放射光実験での測定データの信頼性も担保することができた。

3 点目は放射光実験において、強度が比較的小さい鉄の L 殻輝線の測定でノイズを低減するための、電子ビームエネルギーの高速切替システムと付随するデータ取得システムの開発である。データリダクションの際に必要なエネルギー切替タイミングを記録するため、電極電圧をスルーレート $150 \text{ V}/\mu\text{s}$ の高速で 1 kV 近く上下させるアンプのモニター波形をトリガーとして利用することを考えたが、ほとんど矩形波となるため、ピークを検出して作動する後段の ADC でこれを正しく処理することに非常に苦労した。波形変換回路を自作してアンプ-ADC 間に挟むなど試行錯誤を繰り返し、ADC の信号検出の原理やデータ構造を詳細に調べて理解したことで、意図したデータ処理を実現できた。これにより、鉄の L 殻輝線の S/N 比を改善して測定することが可能となった(5.4.1, 5.6)。