

鉄多価イオン発光線強度比の電子密度依存性について

中村信行研究室 細谷 征由

1 序論

1.1 背景

1.1.1 多価イオン

一般的に多価イオンは価数が2以上の正イオンまたは負イオンを指す。しかし、原子物理学では一般的に10価以上の正イオンを指すことが多い。多価イオンは電氣的に不安定な状態であり、その生成に膨大なエネルギーが必要であるため、核融合炉内や太陽コロナでの高温プラズマで生成される。特に宇宙に存在する物質はそのほとんどがプラズマ状態であるから多価イオンが多く存在している。そのため多価イオンについて理解することは太陽などのような恒星の理解や核融合実験炉の設計や運転において重要である。例えば、太陽コロナに多く存在している鉄多価イオンの発光線を調べることで太陽の電子密度などを診断することが可能である。

1.1.2 太陽コロナ

太陽は表面温度が約6000度であるのに対して、上空の太陽コロナの温度が約100万度であることが知られている。この太陽大気温度差や加熱のメカニズムの解明を目指して様々な研究が行われている。その一環として国立天文台は2006年9月に太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)を打ち上げた。このひのでは可視光、極端紫外線、軟X線という3つの観測波長で太陽を観測するた

め、可視光・磁場望遠鏡(SOT)、極端紫外線撮像分光装置(EIS)、X線望遠鏡(XRT)が搭載されている。太陽コロナに多く存在する鉄多価イオンの極端紫外(EUV)領域の発光はプラズマを説明する上で重要な電子密度や電子温度を求める際に重要なデータとなる。例えば、EISで観測されたスペクトルデータを衝突輻射モデル(CRモデル)により求められる電子密度依存性と比較・検討をすることで電子密度を求める。しかし、このCRモデルにおいて使用される断面積や遷移確率のデータは計算値が使われることが多い。そのためこのCRモデルは実験による評価が必要である。

1.2 目的

本研究で用いる装置である電子ビームイオントラップ(EBIT)は実験室プラズマの1つであり、多価イオンを生成できる装置である。この装置を用いることで太陽コロナに多く存在する鉄多価イオン発光線強度比の電子密度依存性を測定する。前述した実験的評価のなされていないCRモデルの評価を行いその整合性を確認することが必要である。そのため多く存在する発光線の中でも本研究では先行研究により解析・評価のされていない発光線についての発光線の強度比の電子密度依存性を求め、CRモデルと比較・検討することでCRモデルの整合性を確かめることを目的とした。

2 実験

2.1 実験装置

電子ビームイオントラップ (Electron beam ion trap:EBIT) は多価イオンを生成する装置である。EBIT は電子銃、3つの円筒電極からなるドリフトチューブ (DT)、超伝導コイル、電子コレクターからなる。電子銃から放出された電子はアノードとカソードの電位差によって加速され電子ビームとなる。この電子ビームはDT内で装置内に導入された物質のイオンと衝突する。電子のエネルギーによりイオンの電子が1つずつ逐次電離としてはぎ取られていく。このとき電子の持つエネルギーによって剥がれる電子の個数を調節することができるため必要な価数の多価イオンを生成することができる。DT内は軸方向の井戸型ポテンシャルが形成され、多価イオンは軸方向にトラップされる。動径方向のトラップはDTを通り抜ける電子ビームの空間電荷ポテンシャルによって起こる。したがって多価イオンは3次元的にトラップされる。本研究で用いた実験装置は小型の電子ビームイオントラップ (通称 CoBIT) である。この CoBIT の電子ビームエネルギーは 100eV-1000eV であり、太陽コロナの診断において特に重要となる 16 価程度までの鉄多価イオンが生成できるため本研究に用いた。本研究では鉄多価イオンの生成にあたってこの DT 内に鉄を導入する。鉄は室温でも高い蒸気圧となる有機化合物のフェロセン ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) を昇華させて導入する。図 2.1 に示すように CoBIT に可視分光器と極端紫外分光器を設置し観測を行った。

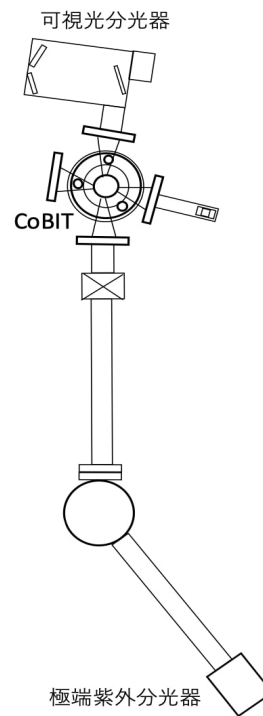


図 2.1: 実験装置概略図

2.2 実験

先行研究 [1] で得られたデータの対象の発光線 ($(186.85\text{\AA} + 186.89\text{\AA})/192.39\text{\AA}$) の強度比を求め、その条件下での電子密度を磁場内で圧縮された理想的な電子ビーム径を指す Herrmann 半径 [2] を用いることで求めた。また、先行研究で行われていた実験と同様に、CoBIT に取り付けられた極端紫外分光器と可視分光器を用いて、Fe XII のスペクトル観測を行った。対象の多価イオンである Fe XII が支配的に生成される電子ビームエネルギー $E_e = 340\text{eV}$ で観測を行った。

3 結果および考察

先行研究 [1] のデータから得られた発光線強度比の電子密度依存性についての結果を図 3.1 に示す。

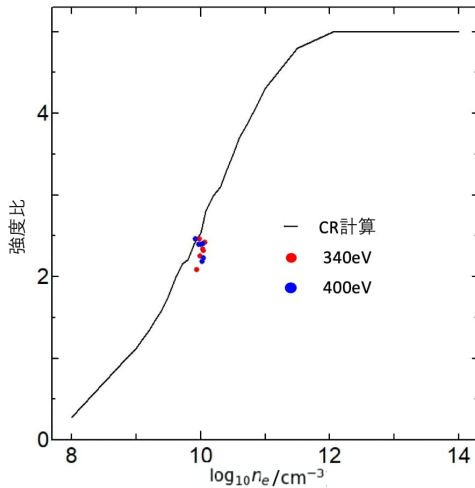


図 3.1: 発光線強度比の電子密度依存性

これを見ると、一部の測定値についてはCR計算と一致することが確認できたが、完全に全てのデータ点が一致しなかった。特に測定点が電子密度の大きい方にズレていると考えられる。本研究では電子密度を求めるために理想的な電子ビーム径を想定して求めた計算値を用いた。この計算値が本研究条件下で成り立っていることを確認するためにもピンホールカメラを用いた実験を行うことで実際の電子ビーム径の測定を行う必要があると考えられる。

次に先行研究同様に行った実験の可視分光の実験結果を図 3.2 に示す。

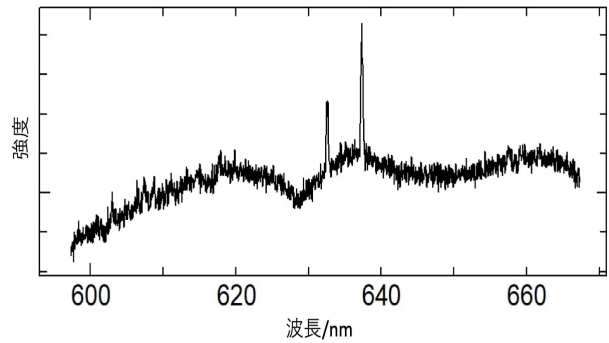


図 3.2: 鉄多価イオンの可視光領域での観測結果

この結果から得られた2つの発光線のうち波長の大きいものは637nmであり、この637nmの発光線は観測条件下で観測可能な10価の鉄多価イオンの発光線だと考えられる。しかし観測されたもう1つの発光線は鉄多価イオンの発光線ではなく、不純物などによる発光線だと考えられる。この不純物の除去方法は検討の必要がある。

極端紫外分光器での観測結果を図 3.3 に示す。

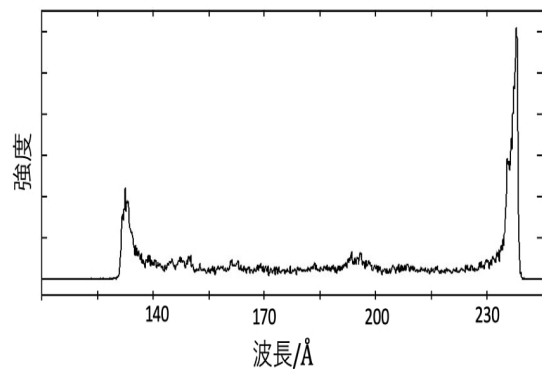


図 3.3: 鉄多価イオンの極端紫外領域での観測結果

この観測結果には鉄多価イオンの発光線と思われるピークが存在しなかった。観測結果に見られるピークは可視分光の結果と同様に、不純物による可能性や実験装置

上の問題であると考えられる。極端紫外領域での観測における CoBIT 内の鉄多価イオンの生成自体が行われているのかを確認するために電子ビームエネルギーを更に高くし強い発光線を持つ価数の高い多価イオンを観測する方法や別の元素の多価イオンを観測し観測装置に問題がないか確認する必要がある。

4 まとめと今後の展望

本研究では鉄多価イオンの極端紫外領域での発光特性を元に発光線強度比の電子密度依存性を求めることが目的であったため、先行研究で得られたデータを用いて先行研究では解析されていない発光線について解析を行った。解析の結果から一部の測定値について CR モデルとの一致が見られたが、完全に一致とはならなかった。この電子密度の導出にあたって用いた電子ビームの計算値を実際にピンホールカメラを用いて観測する必要がある。

先行研究と同様に行った実験結果において、可視光分光からは鉄多価イオンの発光線が確認できた。しかし、極端紫外領域については鉄多価イオンの発光線が確認できなかった。そのため、他の電子ビームエネルギーにおいて観測を行う方法や他の元素について観測を行うことで、CoBIT 内への鉄の導入確認や鉄多価イオンの生成確認、実験装置の確認が必要だといえる。

参考文献

[1] 清水恵理奈 修士論文 電気通信大学 (2016)

[2] The Electron Beam Ion Trap: A New Instrument for Atomic Physics Measurements, M.A. Lenine, R.E. Marss, J.R. Henderson, D.A. Knapp, and M.B. Schneider, Physica Scripta T22 157 163, (1998)