

多価イオンの極端紫外域スペクトルの観測

量子・物質工学専攻 中村信行研究室 渡辺越至

多価イオンとは原子から電子を2個以上取り去ったイオンのことで取り去る電子が q 個のときこれを q 価の多価イオンという。例としてアルゴン原子から8個の電子を取り去ると8価のアルゴン多価イオンとなる。電子を取り去るのに大きなエネルギーを必要とするため地上のような低温環境には存在しないが、天体プラズマや核融合プラズマのような高温プラズマ中には多く存在している。そのため、様々なプラズマを理解するために重要なものとなっている。

現在、太陽観測衛星「ひので」によって鉄多価イオンの極端紫外域の発光による太陽大気の診断が行われている。図1に太陽大気の電子密度と温度を示す。これからわかるように、太陽の表面付近では温度が6000度程度であるのに対し、上空のコロナでは数百万度までに加熱されている。このコロナ加熱と呼ばれる現象は、いまだに説明することのできない謎となっている。

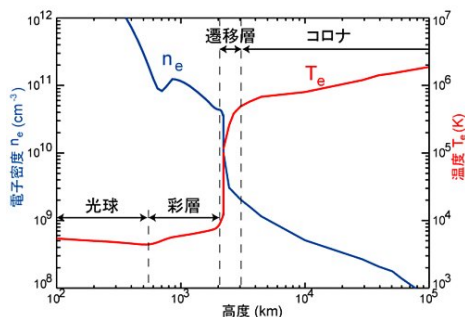


図1. コロナ加熱の様子[1]

この謎を解く鍵は、急激に温度が上がる

遷移層と呼ばれる領域にあるが、そこでは10価程度の鉄多価イオンが多く存在し、これらのイオンによる極端紫外領域の光が分光診断に利用されている。図2が実際にこの領域で「ひので」によって観測された200Å付近の鉄12価のスペクトルである。「ひので」による分光診断では観測したスペクトルとモデル計算との比較により行われており、モデル計算が分光診断の精度を決めている。

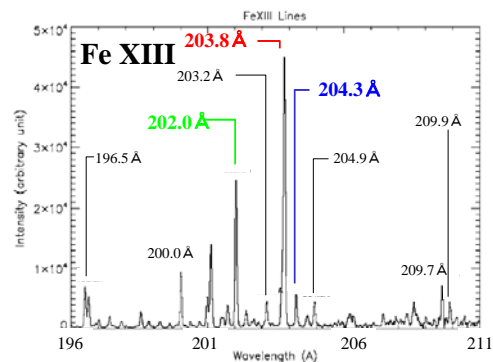


図2. 200Å付近の鉄12価のスペクトル[2]

モデル計算は衝突輻射モデルに基づき行われるが、そこで使われる放射、電離、再結合などの速度係数は実験による評価を受けていない計算値でありその正確さはあまりわかってはいない。使用するデータによって、計算の結果が大きく異なることもある。例えば図3にFe XIIIにおけるライン強度比の密度依存の理論値を示す。左図は203.8Åと202.0Åのライン強度比であり、いずれの計算結果でもほぼ一致しているが、右図の204.3Åと202.0Åの強度比では計

算によって大きな差異がある。どの計算が正しいかを知るために実験による計算の評価が必要とされている。そこで本研究では実験室の良く定義された条件下で得られる10 価程度の鉄多価イオンのスペクトル観測を行い、スペクトル強度比の電子密度依存性をモデル計算と比較した。

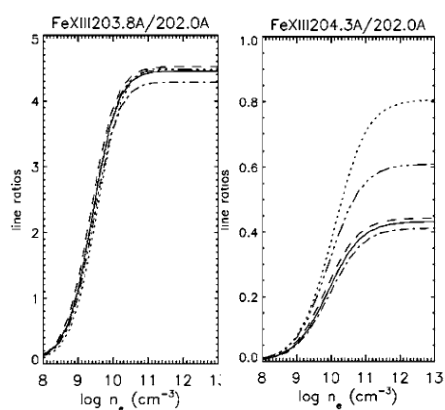


図 3. Fe XIII の計算結果の比較[2]

本実験で用いた多価イオン源は電子ビームイオントラップ (EBIT) [3]である。EBIT はドリフトチューブと呼ばれる円筒電極が作る井戸型のポテンシャルと超伝導コイルが作る磁場によって高密度に圧縮された電子ビーム自身で作る空間電荷によってイオンを 3 次元的にトラップし、そこへ電子ビームを照射することによって逐次電離により多価イオンを生成する装置である。電子ビームのエネルギーを調節することによって望みの価数の多価イオンを作ることが可能である。また、EBIT は単色電子ビームとトラップイオンからなる単純なプラズマであり、モデル計算の試験に最適であると言える。

我々の研究室には現在 2 種類の EBIT があがあるが、本研究では小型の EBIT 通称

(CoBIT)[4]を用いて実験を行った。CoBIT は最大電子ビームエネルギー 2.5keV、最大電子ビーム電流 20mA 程度であるが、原子番号 26 番の鉄多価イオンの場合 24 価まで生成可能である。また、低エネルギー、低磁場仕様のため装置全体の大幅な小型化が可能となっている。さらにコイル材に高温超伝導線を用いることで液体ヘリウムよりも安価な液体窒素のみでの運転が可能である。図 4 に CoBIT 全体の概略図を示す。

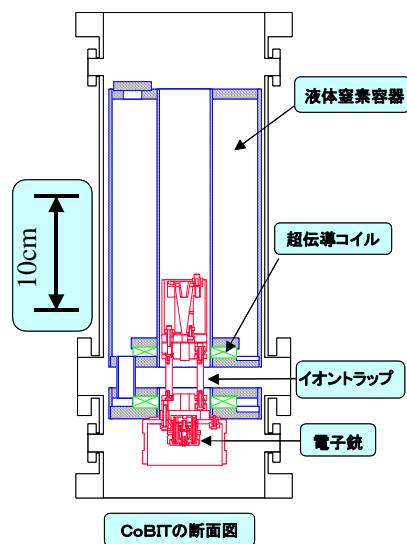


図 4. CoBIT 全体の概略図

我々の研究室ではこれまで CoBIT では可視分光しか行われていなかった。EUV 分光は Tokyo-EBIT において行われたことがあるが、他の研究室から借りてきた分光器により行われた程度であった。本研究のためには、CoBIT 専用の EUV 分光器が必要であるため、新たな分光器の立ち上げを行った。

図 6 に分光器の概略図を示す。まず分光素子は島津製作所社製で溝本数は 1200 本/mm の不等間隔凹面回折格子とした。EUV

領域では鏡面反射率が悪いため集光と分散の機能を持つ凹面の回折格子を斜入射に配置して反射率を高くする必要がある。また、CCD など平面の検出面を持つ検出器を使用可能なように計算して不等間隔に刻線されている。図 5 の写真のように回折格子は 2 軸のゴニオメーターにマウントされ真空の外から角度を微調整できるようになっている。

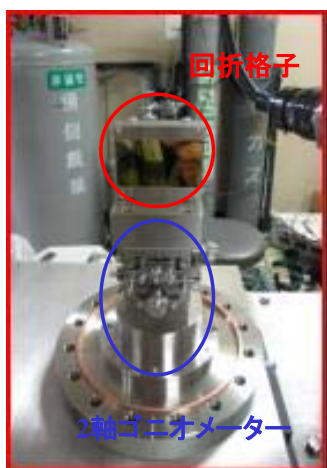


図 5.回折格子の写真

回折格子と CCD の位置関係が機械的精度で決められるように、分光器全体を 1 枚の板上に乗せ、それを XY ステージ上に配置し、位置の微調を可能となるようにした。回折格子と CCD の乗せられた板は、回折格子を中心に回転できるようになっており入射角度の微調整ができるようになっている。CCD 自体も結像平面で±20mm の移動が可能で約 5~35nm の波長範囲のスペクトルを観測することができる。CCD は背面照射型で 20 ミクロンのピクセルが縦 400×横 1340 に配置されている。光源である EBIT の電子ビームが線状であるため、それをスリットとみなすことによりスリットレス構

造としている。

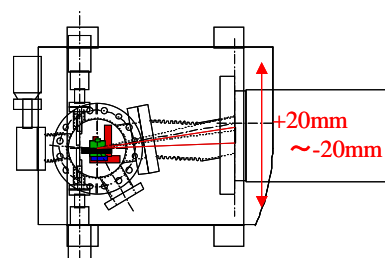
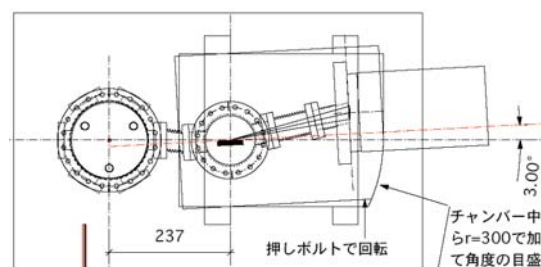


図 6.分光器全体の概略図

分光器が完成し測定をしてみたところ、図 7 上図のように迷光がひどくて測定にならなかった。CoBIT は Tokyo-EBIT に比べて電子銃からトラップ領域が近くどうしても電子銃のカソードの光が迷光として入ってきてしまう。その解決のため、図 8 のような遮光板を取り付けた。これにより図 7 下図に示すように迷光を大幅に遮断することに成功した。

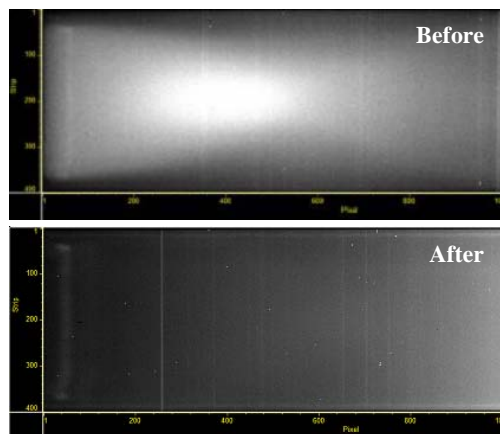


図 7.遮光板を取り付ける前後の測定例

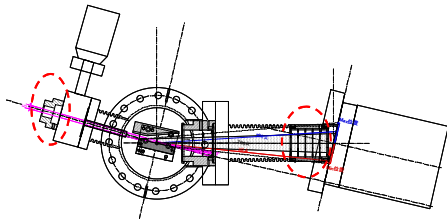


図 8 遮光板の配置

実験装置全体を図 9 に示す。CoBIT 本体のドリフトチューブ内で生成した多価イオンからの発光を分光器へと導き、極端紫外域スペクトルを観測する。2 つの観測ポートには電子ビーム径を測定するための装置を設置して、スペクトル観測と同時にビーム像の測定も行い、電子密度も求めた。

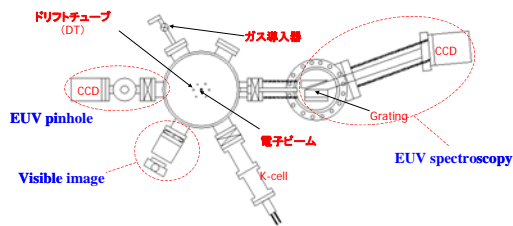


図 9.実験装置全体図

得られたスペクトルの例を図 10 に示す。電子ビームのエネルギーを変えることにより、生成する多価イオンの価数分布も変わっていく様子がよくわかる。この中で今回は特に、他の価数のラインとの重なりが少ない青い点線で囲った部分に注目した。

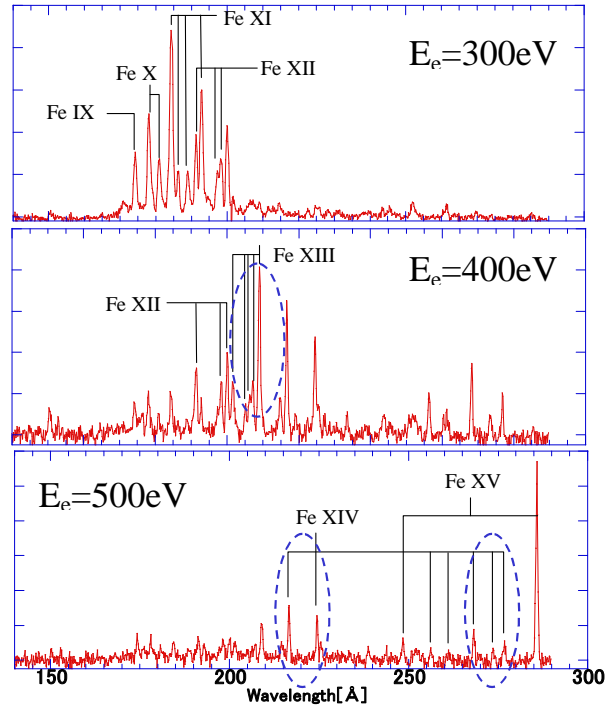


図 10.鉄多価イオンスペクトルのエネルギー依存測定

目的とするライン強度比の電子密度依存性を測定するために、電子ビーム電流を変化させて測定を行った。例として電子ビームエネルギー400eV で得られた 200Å 付近の Fe XIII のラインの電流依存性を図 11 に示す。ラインが完全に分離できないため、フィッティングにより相対強度を求めた。なお、ピーク関数はガウシアンを用い、各ピークの幅は等しいとした。

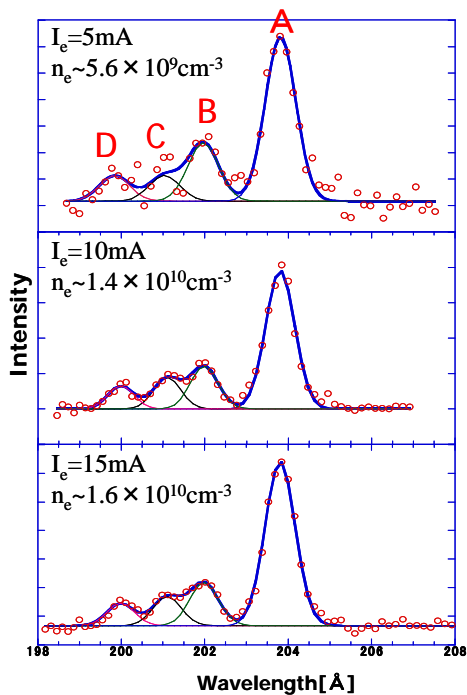


図 11.200 Å 付近の電子密度依存性

電子密度を決めるため、スペクトル観測と同時に EUV 発光の空間分布を調べることにより電子ビーム径の測定を行った。EUV 領域の発光は寿命が短いため電子ビーム衝突により励起されるとその場で発光する。よってその発光分布は電子の空間分布を表していると考えられる。これにより求めた電子ビーム径と電流計により測定した電流値を使えば電流密度が決まるが、イオンの感じる実効的な密度はイオンの空間分布（電子の空間分布との重なり）によっても変化する。そこで可視光の発光分布を調べることでイオンの空間分布を調べた。可視領域の光は寿命が長く、電子ビームの外でも光るのでその発光分布はイオンの空間分布を表していると考えられる。それぞれ図 12 のような装置を用いて測定をした。例として図 13 は 400eV、10mA 時のそれぞれの空間分布を測定したものである。上図

が電子の空間分布、下図がイオンの空間分布を表している。半値幅はそれぞれ 0.39mm、0.42mm と求められ、そこから得られた実効的な電子密度は $1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ となった。

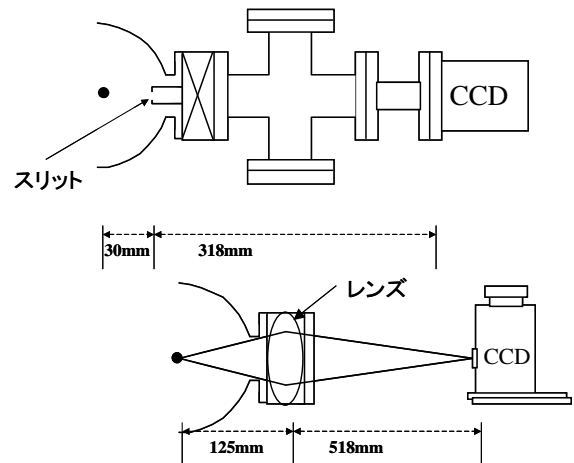


図 12. ビーム像測定装置

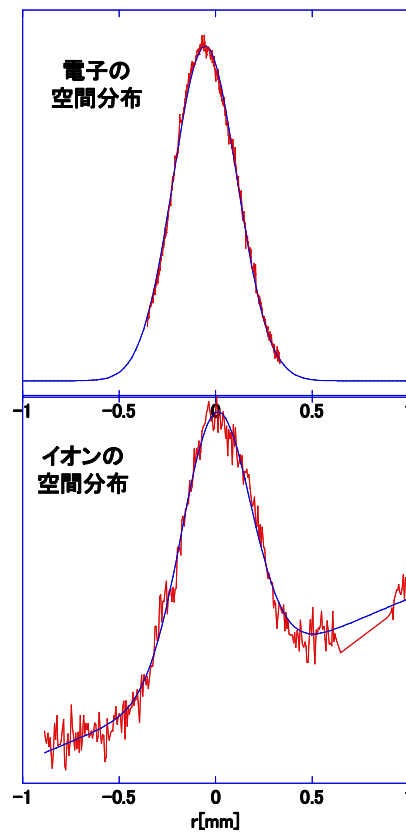


図 13. それぞれの領域のビーム像

以上により求めた電子密度の値と強度比の関係を図 14 に示す。これは、400eV で得られた鉄 12 価のライン強度比である。横軸が電子密度、縦軸が強度比で、曲線が計算値となっている。203.8Åのラインの近くには今回の測定では分解できない微弱なラインがあり、点線はそれらを考慮に入れた計算値である。ラインの重なりの影響を考慮に入れると計算が実験を良く再現していることが分かる。

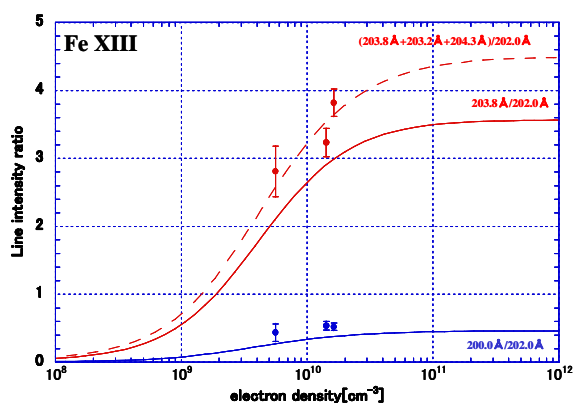


図 14. Fe XIII の計算値との比較

同様に 500eV で得られた鉄 13 価のライン強度比に対する結果を図 15 に示す。大よそ計算は実験値を再現しているものの実験誤差の大きいところもあるのでさらに精度を上げていく必要があると考えられる。

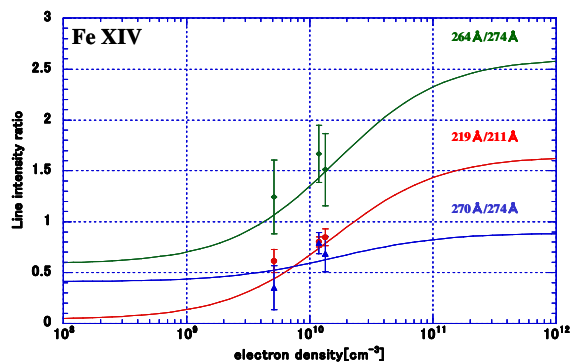


図 15. Fe XIV の計算値との比較

本研究では、10 価程度の多価イオンを効率良く生成できる小型 EBIT に専用の EUV 分光器を設置し、太陽の大気診断で使われるモデル計算を検証するための分光システムを立ち上げた。そして、鉄の 12 価及び 13 価においてモデル計算との比較を行った。モデル計算はおおよそ実験値を再現したが、ラインの重なりや実験誤差などを改善して精度を上げる必要がある。

参考文献

[1] http://hinode.nao.ac.jp/panf/make_corona.shtml

[2] T.watanabe et al , APJ , 692:1294-1304 (2009)

[3] M.A.Levine,R.E.Marss,J.R.Henderson, D.A.Knapp,and M.B.Schneider, Physica Scripta T22, 157 (1988)

[4] 菊池氏修士論文、電気通信大学(2007)