

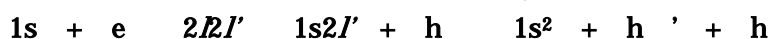
多価イオンの二電子性再結合過程の高分解能 X 線分光測定

中村信行研究室

仲村慎吾

多価イオンとは一般には2価以上に電離したイオンであるが、本研究室では重元素からほとんど電子を剥ぎ取った裸イオンに近いものを扱っている。このように高度に電離した多価イオンは地上のような低温環境下には希薄で、宇宙や核融合実験炉などの高温プラズマ内に多く存在する。高温プラズマ内では電子と多価イオンの衝突が常に起こっているため、それらプラズマの理解には電子 - 多価イオン衝突の基礎データが必要不可欠である。そのため本研究室では、電子 - 多価イオン衝突における電離や再結合について研究している。特に今回はイオン種を鉄とし、鉄の25価の水素様イオンに対して、共鳴的再結合過程である二電子性再結合過程 (Dielectronic Recombination; DR) について実験を行った。

水素様イオンの DR は以下のように表せる過程である。



DR 過程は図1のように、入射電子エネルギーが $E_1 = E_2$ を満たす特定の値を持つときのみ起こり、このとき入射電子が水素様イオンの空の準位に捕獲されると同時に、内殻電子が上準位に励起される。その後連続して起こる遷移により、二つの K - X 線が放出される。

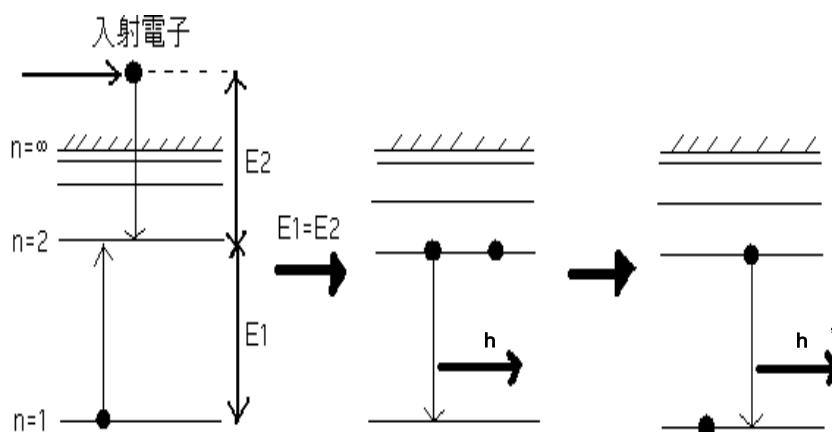


図1.水素様イオンの DR 過程の模式図

DR からの X 線を観測するのに、これまで効率の良さから半導体検出器 SSD (Solid State Detector) を用いていたが、分解能が悪く共鳴状態の微細準位を分離できなかった。そこで本実験は、結晶分光器で水素様イオンの DR から放出される X 線を高分解能分光測定し、共鳴強度 (DR 断面積) を求めることを目的とした。

実験は EBIT と呼ばれる多価イオン発生装置を用いて行った。標的元素の鉄を蒸気の状態にトラップ領域に導入し、ドリフトチューブ (DT) の電圧と、DT の周りの超伝導コイルの強磁場で圧縮された電子ビームの電子が作る空間ポテンシャルでイオンを閉じ込め、電子ビームの逐次電離により、水素様イオンを生成した。しばらくその状態を維持し十分な量の水素様イオンを生成した後、電子ビームのエネルギーをすばやく共鳴エネルギー (~5keV) に変化させ DR により放出される X 線を観測した。共鳴エネルギーはヘリウム様鉄イオンの電離エネルギーよりも低いため、短時間のうちに電子ビームのエネルギーを生成エネルギー (~15keV) に戻し、水素様鉄イオンの生成量を維持した。このように電子ビームエネルギーを高速走査しながら測定を約 80 時間行った。水素様イオンから放出された X 線を、電子ビームに対し 90° 方向に設置された結晶分光器で測定した。分光器の結晶には

平板結晶 $\text{LiF}(220)$ 検出器には2次元位置敏感型比例計数管(PSPC)を用いた。

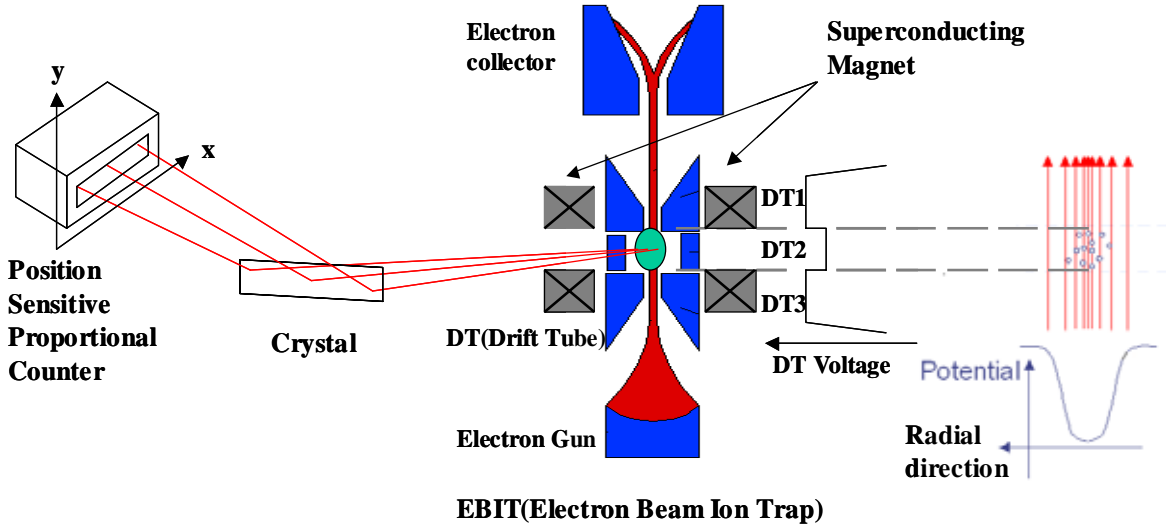


図2.実験装置配置図

次に PSPC による X 線の入射位置決定原理について説明する。PSPC 内には Ar ガスが封入されており、その構造は大きく分けて、X 線を透過する窓、陽極、陰極から成り(図3参照)、陽極には 1.5~2kV の高電圧がかかっている。陽極としては、直径 $5\ \mu\text{m}$ のタングステン線が 11 本張られており、陰極にはバックギャモン型のプリント基板を用いている。X 線が入射すると、ある確率で Ar ガスを電離し、陽極近傍の強い電場により電子が陽極線に向かって加速される。このときさらに Ar ガスが電離され陽極近傍で電子なだれが起きる。発生した電子は全て陽極線に接続された抵抗によって y 方向に電荷分割される。一方陰極では、陽極近傍に残ったイオン雲の誘導電荷が生じる。この誘導電荷をバックギャモン型陰極によって x 方向に電荷分割している。X 線の入射位置 x, y は分割された電荷 Q_a, Q_b と全電荷 Q の比をとり、どちらも Q_a/Q ($Q=Q_a+Q_b$) という演算で決定できる。なお原理上、y 方向の位置分解能は陽極線の間隔となる。X 線の検出は Q_a, Q_b を前置増幅器で電荷に比例した電圧パルスに変換し、更に波形整形増幅器で増幅した信号を、アナログ-デジタル変換器(Analog Digital Converter)を介してコンピュータに送ることにより行っている。

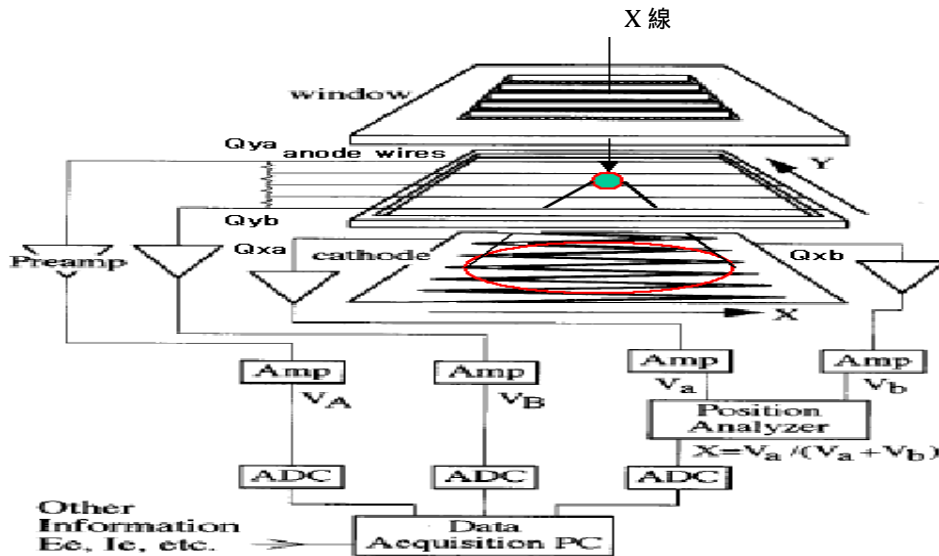


図3 .PSPC の原理

次に実験結果を図4に示す。左側の図はX線スペクトルの電子ビームエネルギーによる変化を表したもので、横軸がX線の波長、縦軸が電子ビームエネルギーである。生成エネルギーと共鳴エネルギー付近に注目し、それぞれ電子ビームエネルギー方向に積分すると右側の図になる。生成エネルギーでは、水素様イオンの直接励起が起こるエネルギー閾値より高いため、水素様イオンとヘリウム様イオンの直接励起のスペクトルが見えている。共鳴エネルギーではそれぞれのDRによるスペクトルが見えている。ここで低波長側のピークが最初の遷移によるX線(1st photon)、長波長側のピークが引き続き起こる遷移のX線(2nd photon)に相当している。2nd photonとヘリウム様イオンのDRによるスペクトルの波長は非常に近いため、ピークが一部重なっている。

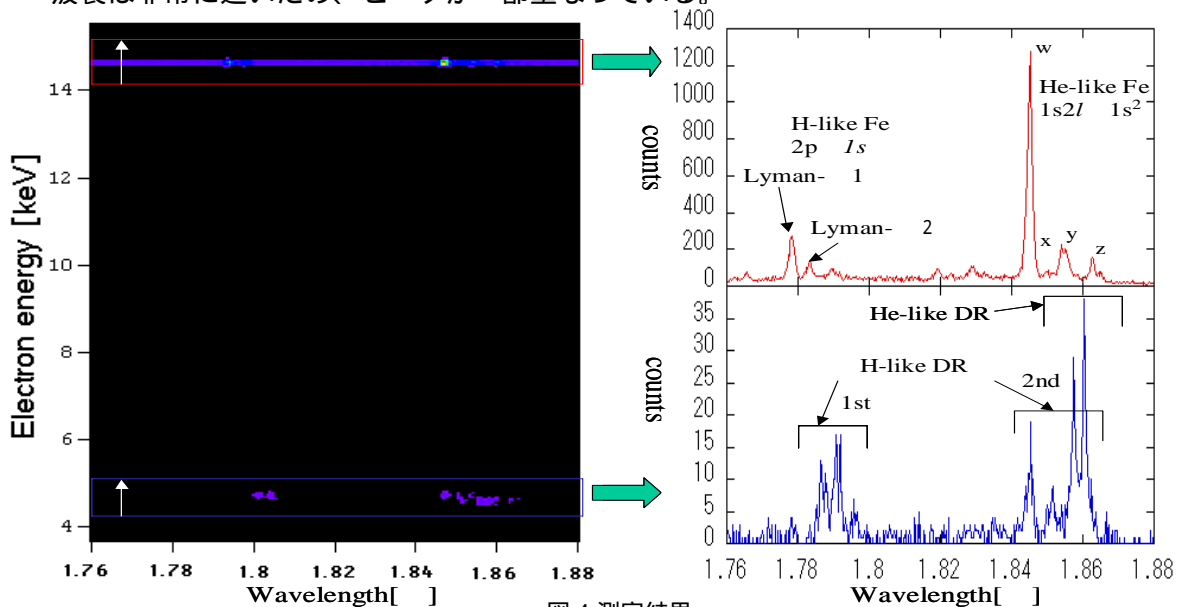


図4.測定結果

スペクトルからDR断面積を得るために、これまではLyman - ₂線、つまり $2p_{1/2} \rightarrow 1s$ 遷移に対するDRスペクトルの強度比を求め、 $1s \rightarrow 2p_{1/2}$ へ励起する際の励起断面積 σ_{ex} で規格化することで断面積の絶対値を得ていた。しかしその励起過程には一般に間接励起などが含まれるため、正確な値を得ることが困難である。そこでより良い規格化方法として、放射性再結合過程RR (Radiative Recombination) の断面積で規格化することを考える。RRとは入射電子が空の準位に捕獲される際に光を放出する過程で入射電子エネルギーに依らず常に起こる。RRは光電離の逆過程であり、断面積の正確な計算値を得ることが可能である。

RRで規格化するためには、そのX線を測定しなければならないが、結晶分光器では測定波長範囲が狭く測定できないため、SSDによるスペクトルを同時に測定する必要がある。そこで二つの検出器による情報を同時に扱えるよう信号取得システムの改造を行った。まず改善前のシステムを図5により説明する。現在のシステムは4台のアナログ-デジタル変換器(ADC)とコンピュータ(PC)から成る。PC側にはADCからきた信号を入出力するためのデジタル入出力ボードがあり、その中に8bitの入出力に対応したICが12個入っている。現在は比例計数管からの3つの信号位置x, Qya, Qyb (PSPC内の陽極でy方向に分割された電荷)と、これらに同期させた電子エネルギーEeの4つの信号を同時に取り込んでいて、一つの信号につき三つのICを使っている。そのうち二つのICはADCからの変換データの読み取りに使用しており、最大16bitの信号まで対応できるようになっ

ている。そして3つ目のICはADCとの信号受け渡しのタイミング制御を行っている。この状態ではこれら四つの信号だけで全てのICを使っており、SSDからの信号を取得できないため、次のように改造を行った。まず、比例計数管からの信号のうち位置 y と全電荷 Q を決める Q_{ya} と Q_{yb} は分解能がそれほど必要でないため、これらの信号を8bitにしてそれぞれ1つのICに取り込み、ICとADCのタイミング制御を1つのICで補えるようにした。これによって空いた3つのICにSSDからの信号を取り込みICの数を変えずに5つの信号を扱えるようにした。

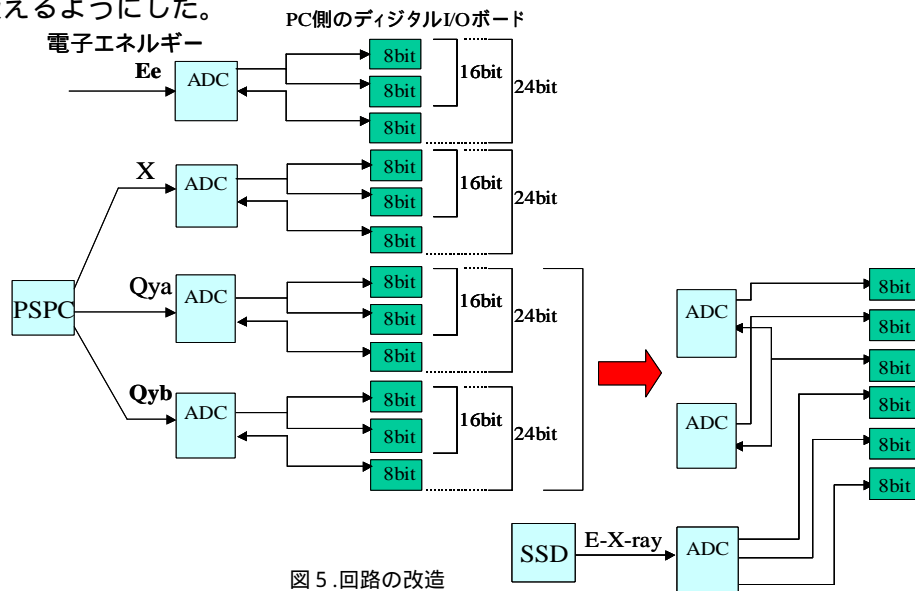


図5.回路の改造

この回路の動作確認として行った実験の結果を図6に示す。左側の図は結晶分光器で得られたX線スペクトルの電子ビームエネルギーによる変化であり、右側の図はSSDによって得られたスペクトルの電子ビームエネルギーによる変化である。右側の図ではDRとRRのスペクトルが見えており、左側の図ではDRスペクトルの詳細な構造が見えている。このように回路が正常に動作していることが確認できた。これは動作試験として行われたものであり、測定時間が短いですが、今後このシステムを使用することでより精度の高い共鳴強度を測定したいと考えている。

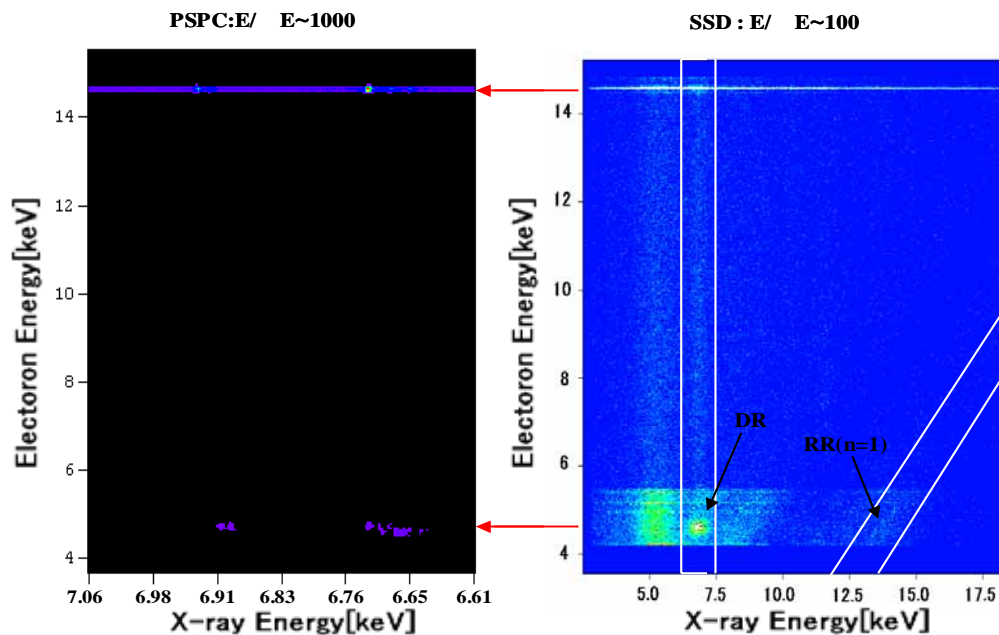


図6.回路のテスト結果