

# EBIT 中の多価イオンの可視分光

大谷研究室 益田 周防海

## 概要

我々のグループでは EBIT 中の多価イオンからの可視の発光線の分光を行ってきた。我々は数多くある多価イオンからの可視の発光線の中でも Ti-like 多価イオンの微細構造間の磁気双極子遷移 ( $3d^{45}D_{J=3} \rightarrow ^5D_{J=2}$ ) に特に興味を持った。何故なら、この遷移の遷移波長の原子番号依存性は極めて小さく、 $Z=50\sim 92$  の広い範囲で遷移波長が可視から近紫外域に留まることが理論的に予想されており、その為、これらの遷移は高温プラズマの分光診断への応用などに期待されている。これまでは遷移波長の理論計算や精密波長測定等が多く行われてきた。本研究ではこの流れを継承し、これらの Ti-like 多価イオンの更に詳細な情報を得る為、高分解能分光の為の Fabry-Perot 干渉計を立ち上げた。今回装置のテストとして過去に回折格子型分光器で測定経験のある  $Ar^{13+}$  からの発光を観測した。それと合わせて Ti-like Sn の蛍光寿命測定も行ったのでそちらは修士論文の方で報告する。

## 1 Fabry-Perot 干渉計による多価イオンの可視分光の高分解能化の試み

### 1.1 目的

これまで、Ti-like 多価イオンの  $[3d^4]^5D_2 - ^5D_3$  の遷移の波長測定は、様々な原子で行われてきた。我々はこの流れを継承し、更に高分解能な測定をする事で多価イオンの Doppler 温度測定、超伝導磁石による 3T の強磁場による Zeeman 分裂、核磁気モーメントによる超微細構造分裂の観測などを目的に、気圧掃引型 Fabry-Perot 干渉計を立ち上げた。

### 1.2 何故 Fabry-Perot 干渉計か？

これまで、多価イオンの可視分光では専ら回折格子型分光器が用いられてきた。しかし、回折格子型分光器では明るさを保ったまま分解能を上げることは非常に困難である。我々のグループでも過去にエッセル型分光器を作製し、 $2 \times 10^4$  程度の分光を試みたことがあるが、次数 100 前後の高次の回折光を用いるため非常に暗く多価イオンからの微弱な発光を見るには適さなかった。高分解能な波長測定ということではレーザー吸収を用いた実験も考えられた事があったが、我々が測定対象としている遷移はいずれも遷移確率が非常に小さく、更に EBIT 中のイオンは数百 eV の運動エネルギーで運動していて 100GHz 程度の広い Doppler 幅を持っている為レーザーの吸

取はあまり期待できなく現実的ではない。そこで、我々は明るさと高分解能を兼ね備えている Fabry-Perot 干渉計を採用した。

### 1.3 装置

本研究では気圧掃引型の Fabry-Perot 干渉計を用いた。これは、気密槽の中の気圧を変化させることで、エタロン板間の光路長を変化させて分光するタイプの Fabry-Perot 干渉計である。利点としては、先ず可動部が無い為、機械的に安定である。第2に、スペーサーに熱膨張率の小さい石英を用いているため温度変化の影響も小さい。(石英の熱膨張率: $0.4-0.55 \times 10^{-6} \alpha$  但し、 $l_0 \alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt}$ )、第3に、気密槽内の絶対圧を圧力計(バラトロン)で測定し直接制御する為、外気圧の変動の影響は全く受けない等の利点がある。今回は旧式の気圧掃引型 Fabry-Perot 干渉計を核融合科学研究所より譲り受けて、制御系・制御プログラム等を新たに自作して用いた。気圧掃引は気圧をバラトロンで測定し、気密槽外に取り付けられた二つのコンピューター制御されたパルスバルブを開閉することで  $10^{-3}$  気圧の精度で行った。信号は光電子増倍管を用いて Photon Counting 法で検出した。

### 1.4 性能検査

今回、我々が用いた Fabry-Perot 干渉計は旧式の物を転用した為エタロンの反射率や平面精度などは不明で今回の我々の測定したい波長域で使用できるのか調べる必要があった。そこで、水銀灯、YAG 第2高調波、Green He-Ne Laser 等の光源を用いて実効フィネスを測定しそこから大まかなエタロンの特性を見積もった。

#### 1.4.1 結果

各光源で気圧掃引スペクトルを撮った結果を表 1.4.1 に示す。FWHM は観測されたスペクトルをローレンツ関数でフィッティングする事で求めた。

| 光源                   | FSR(atm) | FWHM  | 実効フィネス | ピンホール ( $\phi$ [mm]) | 反射率    |
|----------------------|----------|-------|--------|----------------------|--------|
| YAG(SHG:532nm)       | 1.25     | 0.048 | 25.6   | 1                    | 88% 以上 |
| Green He-Ne(543.5nm) | 1.27     | 0.169 | 11.7   | 2                    | -      |
| Green He-Ne          | 1.27     | 0.065 | 29.8   | 1                    | 90% 以上 |
| Hg(435nm)            | 1.01     | 0.060 | 16.7   | 1                    | 83% 以上 |
| Hg(546nm)            | 1.28     | 0.107 | 11.9   | 1                    | 77% 以上 |

エタロンの特性

この結果より、このエタロンは少なくとも 435nm から 546nm の範囲でフィネス 10 以上を達成できる事が判った。なお Hg の 546nm で多少フィネスが悪くなっているのは近接する超微細構造分裂のスペクトルを分離できていない為である。この結果から Ti-like の  $[3d^4]^5 D_2 - ^5 D_3$  から

の発光の遷移波長が 450nm~550nm の原子番号 50 前後の Ti-like 多価イオンについて Zeeman 分裂や Doppler 広がりを観測するために使える事が判った。

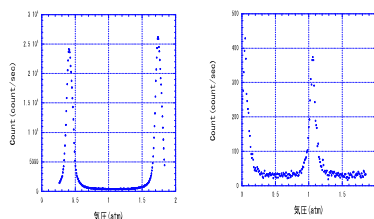


図 1: Fabry-Perot 干渉計によるスペクトル : (a)He-Ne Laser(543.5nm)(b)Hg ランプ 435nm

## 1.5 Oxford EBIT での実験

Oxford EBIT は電子ビームの最高エネルギーを比べると Tokyo-EBIT に遙かに及ばないが 1keV 程度の低エネルギーで 50mA という比較的大電流を取り出せる。この特徴は多価イオンの可視分光に非常に有利である。今回、Ti-like 多価イオンの観測を目的に Oxford 大学で Fabry-Perot 干渉計を組み立て、まずは、測定系の動作確認もかねて、過去に Oxford EBIT で回折格子型分光器で観測され強く光る事が判っていた  $Ar^{13+}$  からの発光線を観測した。

### 1.5.1 Set-up

実際の実験は下の図 2 の様な構成で行った。測定系全体は EBIT の電子ビームに対して垂直方向に構成されている。まず、可視の観測ポートより出てきた多価イオンからの発光を  $f=150\text{mm}$  の可動機構がついた集光レンズによりピンホールに集光し、その後に設置されたコリメートレンズにより、平行光にし、エタロンに入射した。エタロンからの透過光は集光レンズにより受光ピンホールに焦点を結ぶ。測定対象以外の発光を見ないように、受光ピンホールの手前には干渉フィルターを設置した。受光ピンホールの後ろには光電子増倍管が設置されていて、気密槽の中の気圧を掃引したときの透過光の強度変化を測定する。

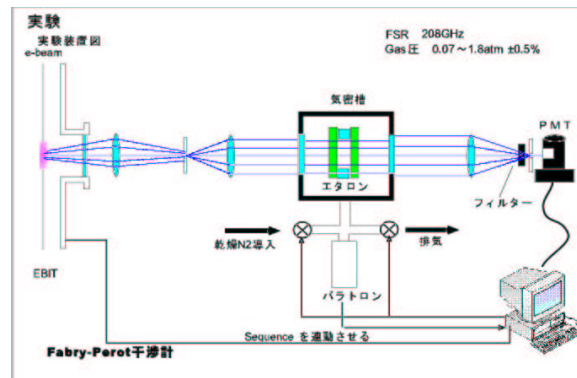


図 2: Oxford-EBIT での Fabry-Perot 干渉計の set-up

### 1.5.2 結果

$Ar^{13+}$  からの発光線  $2s^22p^2P_{\frac{1}{2}} - 2P_{\frac{3}{2}}$  (441nm) を Fabry-Perot 干渉計で観測したスペクトルを図 3(a) に示す。実験条件としては、電子ビームの加速電圧 1kV、軸方向のトラップの深さ 100V で、1 点測定するごとに軸方向のトラップを下げて生成した多価イオンを捨てている。超伝導コイルによる磁場が 2.7T、Ar ガスの導入は  $7 \times 10^{-6}$ Torr の圧力で行った。Fabry-Perot 干渉計の受光ピンホールの径は 3mm で行った。この場合、実効フィネスは 10 程度になり、 $3 \times 10^4$  (0.013nm, 20GHz) 程度の分解能が得られることが期待される。Fabry-Perot 干渉計の気圧は 0.065atm から 1.77atm までの範囲を 0.0065atm 刻みで 260 点測定した。一点の測定時間は 1 秒で、パルスのきた時間を 50 $\mu$ sec の時間分解能で記録している。得られたスペクトルは Back ground を差し引いた物で、 $Ar^{13+}$  では十分観測可能な程度の信号強度が得られている。

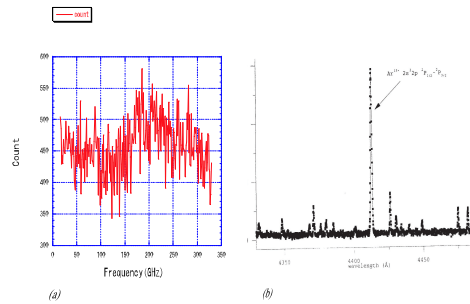


図 3: (a) $Ar^{13+}$  からの発光線  $2s^22p^2P_{\frac{1}{2}} - 2P_{\frac{3}{2}}$  (441nm) を Fabry-Perot 干渉計で観測したスペクトル。(b) 回折格子型分光器による  $Ar^{13+}$  のスペクトル J. Beiber 氏博士論文より

### 1.5.3 考察

図 3(b) に過去に Oxford 大学で回折格子型分光器で観測された  $Ar^{13+}$  のスペクトルを示す。このスペクトルを見ると 440nm 付近に  $2s^22p^2P_{\frac{1}{2}} - 2P_{\frac{3}{2}}$  以外の発光線も数多く光っていることが判る。これらの発光線は  $Ar^{13+}$  以外の低価数イオンや中性原子などからの発光である。そのため、今回 Fabry-Perot 干渉計で観測したスペクトルにも、これらの発光線が入っていると考えられる。それら中性や低価数イオンからの発光の効果を取り除く為に、時間分布を取り、生成に時間のかかる多価の成分だけを取り出すような解析をした。図 4

この時間を特定したスペクトルを見ると、確かに時間帯によってスペクトルに違いがある事が

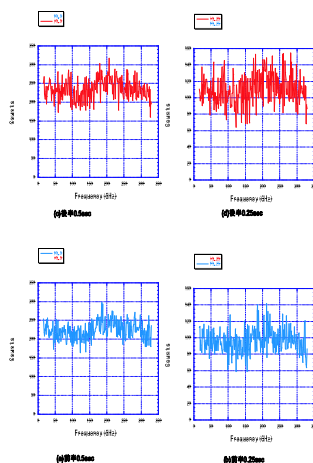


図 4: 時間を特定した  $Ar^{13+}$  の Fabry-Perot 干渉計によるスペクトル。(a) は前半 0.5sec(b) 前半 0.25sec(c) 後半 0.5sec(d) 後半 0.25sec

わかる。この実験では中性の Ar ガスを恒に噴き続けている為、中性や低価数イオンからの発光は恒に有るが、それらの強度は、ほぼ一定になるであろうと考えられる。それに対して多価イオンは生成されるのに  $100\mu\text{sec}$  程度の時間がかかる為、遅れて発光強度が増してくる筈である。図 4 で (a)(b) には (c)(d) には無い若しくは、(c)(d) では小さいピークが比較的大きく出ていて、これらは多価イオンからの発光であると考えられる。しかし、これだけでは今回  $Ar^{13+}$  からの発光を特定し Zeeman 分裂や Doppler 温度を見積もる所までは出来なかった。

## 2 まとめと今後の展望

今回  $Ar^{13+}$  からの可視の M1 遷移による発光線をこれまでに無い分解能で観測した。しかし、測定対象の遷移 (441nm) の近くに近接した発光が多くあり Fabry-Perot では、それらを分離することはできなかった。今後は近接線の少ない high Z で高価数のイオン種を測定対象に選ぶか、観測

効率は落ちるが、前置き分光器を用いる等すれば、今回の目的であった多価イオンの温度測定や Zeeman 分裂による  $g$  因子の測定等ができるようになるかと期待される。

また、今回作製した装置は、測定信号の来た時間も特定できるので、これまでのような Gas やカソードから蒸発してくる Ba 等連続的に入射できるものに限らず MEVVA 等で  $Z$  の大きな金属をパルスで入射するような測定にも用いる事ができるのではと期待される。今後の予定として、Ti-like の分光だけではなく Tokyo-EBIT の高エネルギー化に合わせて、今回制作した Fabry-Perot 干渉計を用いて種々の価数の異なるイオンからの可視の発光を高分解能で観測し Doppler 幅を見積りそれと併せて可視光でイオン雲の撮影を行うことで EBIT 中の Trap のコンディションを議論できるような実験を計画している。