

# 論文審査結果の要旨

氏名 高林雄一

本論文は5章からなり、第1章は導入、第2章は実験の詳細、第3章は水素様イオン  $\text{Ar}^{17+}$  と  $\text{Fe}^{25+}$  の干渉共鳴励起の観測、第4章はヘリウム様イオン  $\text{Ar}^{16+}$  と  $\text{Fe}^{24+}$  の干渉共鳴励起の観測と精密分光、第5章はまとめにあてられている。さらに、付録Aに面チャネリング状態の水素様イオンのエネルギー準位の理論、付録Bにコンボイ電子スペクトルの観測についての記述が与えられている。

イオンが結晶の軸や面に平行に入射すると、結晶原子から大角散乱を受けることなく通過する。この現象はチャネリングと呼ばれている。その際、イオンは結晶の周期的な電磁場を感じるが、その周波数  $\nu$  が、 $E_{\text{traus}}/h$  ( $E_{\text{traus}}$  はイオンの遷移エネルギー、 $h$  はプランク定数) に一致するとき、イオンは励起される。この現象は干渉性共鳴励起 (Resonant Coerent Exccitation, RCE), あるいは提唱者の名前からオコロコフ効果と呼ばれる。

イオンに RCE が起きると、電子の軌道半径が大きくなるので、電離されやすくなる。また、脱励起に伴う X 線放出が観測される。

本研究では、Si 結晶の (220) 面にチャネリングする水素様イオンとヘリウム様イオンの RCE 観測を行った。

(220) 面をチャネリングするイオンの共鳴条件は

$$E_{\text{trans}} = \frac{\gamma h v}{a} (\sqrt{2} k \cos \theta + l \sin \theta) \quad (1)$$

である。 $v$  はイオンの速さ、 $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ ,  $c$  は光速、 $a$  は格子定数、 $(k, l)$  は結晶のフーリエポテンシャルの次数、 $\theta$  は、イオンの進行方向と結晶の  $\langle 110 \rangle$  軸のなす角度である。この式から、面チャネリング条件の下で結晶を傾け、 $\theta$  を変化させることにより、共鳴条件を満たすことができることがわかる。

実験は、放射線医学総合研究所の重イオンシンクロトロン HIMAC から供給される平行度の高い 390MeV/u の  $\text{Ar}^{17+}$ , 383MeV/u の  $\text{Ar}^{16+}$ , 460MeV/u の  $\text{Fe}^{25+}$ , 323MeV/u の  $\text{Fe}^{24+}$ , 423MeV/u の  $\text{Fe}^{23+}$  イオンを用いて行われた。これらのイオンは光速の約 70% の速さをもつ。結晶透過後のイオンの荷電分布を測定するために、下流に約 0.5T の磁石と 2次元位置敏感 Si 検出器を設置した。また、イオンの脱励起 X 線を測定するために、ビーム方向に対して  $41^\circ$  方向に結晶面内とそれに垂直な面内に Si (Li) 検出器を置いた。

まず、 $\text{Ar}^{17+}$  イオンと  $\text{Fe}^{24+}$  イオンの RCE を観測した。ビームと  $\langle 110 \rangle$  軸のなす角  $\theta$  を変化させて、入射イオンが減少しているところで共鳴が起きていると考えられる。Fe イオンは 2

次の RCE を用いて初めて励起されたものであり、今までに RCE が観測された中で、最も重いイオンである。

$\text{Ar}^{17+}$  と  $\text{Fe}^{24+}$  の RCE を比べると、Fe イオンの方が結晶の電場によるシュタルク効果の影響が小さいことがわかった。これは、Fe イオンの方が電子の軌道半径が小さいことや、 $j = 1/2$  と  $j = 3/2$  のエネルギー間隔が大きいことから理解することができる。

さらに、 $\text{Ar}^{16+}$  と  $\text{Fe}^{24+}$  イオンの RCE も観測した。透過イオンの割合から遷移エネルギーを知る。 $1s^2 \rightarrow 1s2p^1P_1$  と  $1s^2p^3P_1$  の構造を初めて観測した。X線測定による RCE 観測も行い角度分布の異方性を確認した。

Li 様イオン  $\text{Fe}^{23+}$  の RCE も初めて観測した。

本実験では、イオンのエネルギーが高いため、RCE 過程のコヒーレンスが良くなり、共鳴ピークが狭くなる。そこで、ヘリウム様イオンの RCE を高精度で求めることにより、エネルギー準位の精密測定を行った。この場合、イオンビームの速さ知る必要があるが、それには、上流に Al フォイルをおいてヘリウム様イオンから電子をはがして水素様イオンを生成し、その RCE 共鳴角度と水素様イオンの遷移エネルギーの理論値から速さを求めた。また、面に垂直な方向に広がったイオン分布の中から、面に平行に近い方向に出射したもののみを選ぶことにより、シュタルク効果を受けやすい大振幅でチャネリングしたイオンを除いた。

この RCE による分光法は新しい分光法であり、イオンの数を検出するため、従来から行われている X線の分光による方法に比べて、検出効率が高い、ドップラー効果の影響がないなどの特徴を持つ。

この手法により、 $\text{Ar}^{16+}$  と  $\text{Fe}^{24+}$  の遷移エネルギー ( $1s^2 \rightarrow 1s2p^1P_1, ^3P_1$ ) を求めた。結果は  $\text{Ar}^{16+}$  が  $3139.27 \pm 0.15 \text{eV}$  ( $^1P_1$ )、 $3123 \pm 0.16 \text{eV}$  ( $^3P_1$ )、 $\text{Fe}^{24+}$  が  $6700.22 \pm 0.16 \text{eV}$  ( $^1P_1$ )、 $6667.52 \pm 0.17 \text{eV}$  ( $^3P_1$ ) であった。

$\text{Fe}^{24+}$  イオンの場合は得られた遷移エネルギーは理論値とほぼ一致したが、 $\text{Ar}^{16+}$  イオンの場合は、理論値よりも約  $0.3 \text{eV}$  小さい値が得られた。これは、イオンの出射角の制限によっては振幅の大きい軌道の寄与を完全に取り除けず、シュタルク効果による遷移エネルギーのシフトが大きい Ar イオンでは、補正が十分な精度でできなかったためと思われる。この点に関しては、チャネリング用の結晶として、Si 検出器を用いれば、イオンのエネルギー損失がわかり、チャネリングの振幅をより厳密に選択することができる可能性がある。

なお、本論文は、小牧研一郎教授らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。