

論文の内容の要旨

論文題目 High precision spectroscopy of helium-like heavy ions with resonant coherent excitation
(干渉性共鳴励起によるヘリウム様重イオンの精密分光)

氏名 高林 雄一

結晶は原子が周期的に配列したものであり、軸や面が存在する。その軸や面に沿って電子密度の小さい空間が存在し、チャンネルと呼ばれている。イオンが軸や面に平行に入射するとき、イオンは結晶原子との大角散乱を受けることなく、チャンネルを通過する。この現象はチャネリングと呼ばれている。チャネリングするイオンは結晶の周期的な電磁場を感じるが、その周波数 ν が、 E_{trans}/h (E_{trans} 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。これは干渉性共鳴励起(Resonant Coherent Excitation)と呼ばれている(今後、略して RCE と呼ぶ)。この現象は、1965 年にオコロコフが予言したものであり、提唱者の名前にちなんでオコロコフ効果とも呼ばれる。

イオンは励起されると電子の軌道半径が大きくなるので、結晶中では、結晶内の電子や原子核との衝突により電離されやすくなる。よって、RCE が起きると電離されたイオンの割合は増加する。また、励起状態の割合の増加に伴い、イオンの脱励起 X 線の強度も増加する。

今まで観測されてきた RCE の多くは、比較的軽い水素様イオンの $n=1$ から $n=2$ への励起である。イオンが重くなるほど、結晶の電場によるシュタルク効果と比較して、 l - s 相互作用の寄与が大きくなると考えられ、さらに重いイオンの RCE を観測することにより、このことが確認できると考えられる。

本研究では、相対論的重イオンビームを用いて、RCE の研究を行った。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 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) から供給される平行度の高い 390 MeV/u の Ar^{17+} 、383 MeV/u の Ar^{16+} 、460 MeV/u の Fe^{25+} 、423 MeV/u の Fe^{24+} 、423 MeV/u の Fe^{23+} イオンビームを用いて行ってきた。これらのイオンは、光速の約 70% の速さを持つ。標的としては、厚さ 21 μm の Si 結晶を用いた。本研究では、イオンを Si 結晶の (220) 面でチャネリングさせたが、その場合の共鳴条件は、次式で表される。

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

ここで、 E_{trans} はイオンの遷移エネルギー、 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を表す整数、 θ 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。この式から分かるように、面チャネリング条件下で結晶を傾け、 θ 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。Si 結晶は、3 軸回転可能なゴニオメーターに取りつけた。結晶透過後のイオンの荷電分布を測定するために、結晶の 1.3 m 下流に約 0.5 T のマグネットを設置し、結晶の 5.6 m 下流に 2 次元の位置敏感 Si 検出器 (PSD) を設置した。また、イオンの脱励起 X 線を測定するために、ビームの進行方向に対して 41° 方向に Si(Li) 検出器を設置した。Si(Li) 検出器は、水平面内と鉛直面内に 1 つずつ設置した。これは、X 線の放出角度分布の異方性を測定し、励起状態に関する情報を得るためである。

図 1 は、460 MeV/u の Fe^{25+} イオンを Si 結晶の (220) 面でチャネリングさせた場合の透過 Fe^{25+} イオンの割合を示す。横軸は、(1) 式を用いて角度 θ を遷移エネルギーに変換したものを示す。割合が減少しているところで、RCE が起きていると考えられる。高エネルギー側のピークは $n=1 \rightarrow n=2 (j=3/2)$ に、低エネルギー側のピークは、 $n=1 \rightarrow n=2 (j=1/2)$ に対応する。Fe は今までに RCE が観測されてきたイオンの中で最も重いイオンである。本研究では、Ar イオンの $n=1 \rightarrow n=2$ の RCE 観測も行ったが、Ar イオンの場合と比較して Fe イオンの方が、結晶の電場に起因するシュタルク効果による遷移エネルギーのシフトが小さいことが分かった。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によって説明される。また、イオンの脱励起 X 線測定による RCE 観測も行ったが、共鳴条件下で X 線の収量が増加することが確認された。さらに、共鳴条件下で放出されるコンボイ電子の収量も測定した。共鳴ピークの微細な構造が観測されたが、このような測定は、過去に例がない。

$n=1 \rightarrow n=2$ の RCE だけではなく、Ar イオンの場合は、 $n=1 \rightarrow n=3, 4, 5$ の RCE を、Fe イオンの場合は、 $n=1 \rightarrow n=3$ の RCE を観測した。この励起エネルギー 8 keV は、RCE による励起エネルギーの世界最高値である。シュタルク効果による準位のシフト、分裂は、 n が大きくなるほど大きくなることが分かった。

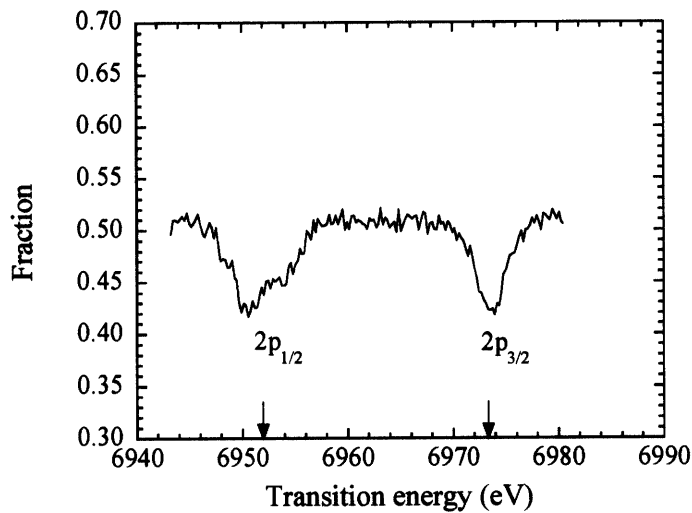


図1. 460 MeV/u の Fe^{25+} イオンを Si 結晶の(220)面でチャネリングさせた場合に観測した共鳴。横軸は、 $\langle 110 \rangle$ 軸からの角度 θ を遷移エネルギーに変換したものを示す。矢印は真空中の遷移エネルギーを示す。

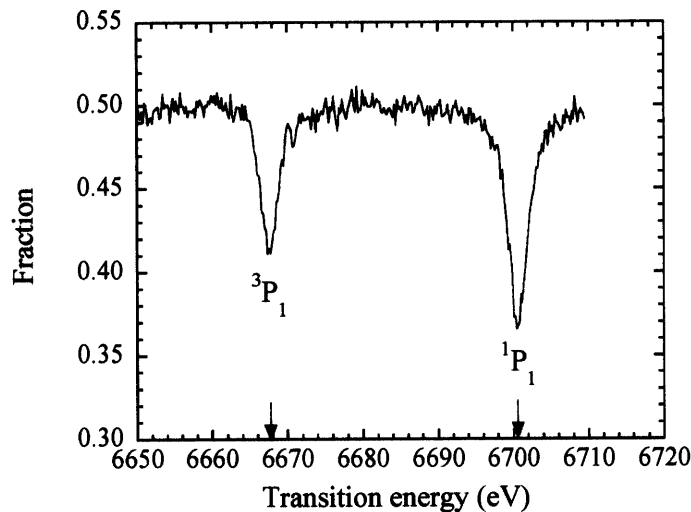


図2. 423 MeV/u の Fe^{24+} イオンを Si 結晶の(220)面でチャネリングさせた場合に観測した共鳴。矢印は、真空中の遷移エネルギーを示す。

本研究では、ヘリウム様の Ar^{16+} と Fe^{24+} イオンの RCE 観測にも成功した。図2は、423 MeV/u の Fe^{24+} イオンを Si 結晶の(220)面でチャネリングさせた場合の、透過 Fe^{24+} イオンの割合を示す。ピーク位置の遷移エネルギーから、高エネルギー側のピークは、 $1s^2 \rightarrow 1s2p \ ^1P_1$ に、低エネルギー側のピークは、 $1s^2 \rightarrow 1s2p \ ^3P_1$ に対応すると考えられる。ヘリウム様イオンの RCE は、過去に1例だけ測定例があるが、このように構造が観測されたのは、はじめてである。 1P_1 の方が 3P_1 よりも共鳴が大きかったが、これは、遷移の過程でスピンの変化しない 1P_1 の

方が励起確率が高いためであると考えられる。X線測定によるRCE観測も行ったが、 1P_1 の共鳴条件下で、大きなX線の角度分布の異方性が観測された。これは、定性的には、励起確率を考慮することによって説明される。

さらに、3電子系の Fe^{23+} イオンのRCE観測にもはじめて成功した。たくさんのピークが観測されたが、少数電子系の強電場によるシュタルク効果を調べるのに、好都合な系であると考えられる。

これらのRCEの研究で、共鳴のピーク位置(角度 θ)が高い精度で求まることが分かってきた。これは、エネルギーの高いイオンを用いたために、RCE過程のコヒーレンスがよくなり、共鳴ピークの幅が狭くなったことに起因する。共鳴条件の式(1)からわかるように、イオンの速さ v も高精度で求めることができれば、遷移エネルギーを高精度で決められることになる。加速器の加速条件から決まるイオンの速さの絶対精度はあまりよくないので、別の方法でイオンの速さを測定する必要がある。本研究では、水素様イオンとヘリウム様イオンの共鳴を観測し、ビームの速さは、水素様イオンの共鳴角度から求め、ヘリウム様イオンの遷移エネルギーを高精度で決めることにした。この場合、水素様イオンは結晶の上流に設置したAlフォイルで、ヘリウム様イオンから電子をはがすことによって生成する。水素様イオンの遷移エネルギーとして理論値を用いることにより、観測された共鳴角度からイオンの速さを求めることができる。シュタルク効果による遷移エネルギーのシフト、Alフォイルにおけるイオンのエネルギー損失は補正する。イオンの分光法として、結晶分光器などを用いて、イオンの脱励起X線を分光するという手法がとられてきたが、検出効率が低く、ドップラー効果によるエネルギーのシフトや幅の広がり問題になっていた。RCEによる分光法では、イオンを検出するので検出効率が高く、ドップラー効果の影響もない。

Ar^{16+} と Fe^{24+} イオンにこの方法を適用し、遷移エネルギー($1s^2 \rightarrow 1s2p \ ^1P_1, \ ^3P_1$)を求めた。 Ar^{16+} イオンの場合は、 3139.27 ± 0.15 eV (1P_1)、 3123.30 ± 0.16 eV (3P_1)、 Fe^{24+} イオンの場合は、 6700.22 ± 0.16 eV (1P_1)、 6667.52 ± 0.17 eV (3P_1)という値が得られた。この方法では、同時にビームエネルギーも高精度で求まるが、 Ar^{16+} イオンの場合、 382.931 ± 0.025 MeV/u、 Fe^{24+} イオンの場合は、 422.946 ± 0.013 MeV/uという値が得られた。

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、 Ar^{16+} イオンの場合は、理論値よりも約0.3 eV小さい値が得られた。イオンの出射角を制限することだけでは、振幅の大きい軌道の寄与を完全には取り除くことができず、シュタルク効果による遷移エネルギーのシフトが、見積もった値よりも大きかった可能性がある。結晶としてSi検出器(SSD)を用いた場合、イオンのエネルギー損失を測定することにより、チャネリングイオンの振幅をより厳密に選択することができるので、歪みのない、チャネリング実験の可能な薄いSSDが手に入れば、この問題は解決できると考えられる。

このRCEによる分光法は、新しい分光法であり、今後、さらに重いイオンやRIイオンの分光への応用が期待される。