

## 論文内容の要旨

論文題目 非チャネリング条件下における高速多価イオンのコヒーレント共鳴励起

Resonant coherent excitation of fast highly charged ions  
under non-channeling conditions

氏名 近藤 力

イオンが結晶の軸もしくは面にほぼ平行に入射したとき、粒子は結晶原子と小角散乱を繰り返しながら結晶軸や面に沿った隙間(チャネル)を進行することがある。この現象をチャネリングとよぶ。このとき、粒子は結晶原子とほとんど衝突することなく進行できるため、イオンは衝突による励起や電離といった電子状態の変化を抑えられる。またイオンの軌道はチャネル内を蛇行しながら進む。

また、結晶内を進行するイオンは、結晶原子の周期配列を横切るため、それらが作る周期電場を振動電場として感じる。この電場の振動数がイオンの励起をおこす振動数に一致するとき、イオンの励起がおこる。このような、周期的な結晶場による励起現象をコヒーレント共鳴励起 (Resonant Coherent Excitation: RCE)とよぶ

RCE は、1966 年に提唱されて以来、実験・理論の両側面から研究がなされており、最近では高エネルギーの多価イオンを用いて、結晶の電場による電子準位の Stark シフトの観測や、多価イオンの精密分光の手法として応用されるなど、様々な発展を見せている。

ところで、これらの研究は、実験・理論を問わず、チャネリング条件下のイオンのみを対象として行われてきた。これは、非チャネリング条件下では、イオンは結晶原子との衝突によって、電子状態のコヒーレンスの位相緩和が強くなり、RCE が起こらないと考えられていたためである。しかし、敢えて強調するならば、イオンは非チャネリング条件下においても振動電場を感じており、コヒーレンスの位相緩和を抑えられれば、原理的には RCE が起こせるはずである。この位相緩和の

抑制には、高いエネルギーをもつ原子番号  $Z$  の大きい多価の重イオンを用いることで実現され、それには多価イオンの生成と、相対論的なエネルギーまでの加速できる加速器が必要とされた。

そこで本研究では、放射線医学総合研究所の重イオン加速器HIMACにおいて、入射粒子に  $391\text{MeV/u}$  H-like  $\text{Ar}^{17+}$  イオンおよび  $416\text{MeV/u}$  He-like  $\text{Ar}^{16+}$  イオンという高エネルギーの多価イオンを、また標的結晶に厚さ  $1\ \mu\text{m}$  の Si 結晶を用い、透過イオンの荷電分布を測定することで、非チャネリング条件下におけるコヒーレント共鳴励起の観測を行い、これに初めて成功した。

ここで、非チャネリング条件下におけるRCEは、図1に示すように結晶の原子面の立体的な周期配列を横切ることで、振動電場を感じる。そこで、これを三次元コヒーレント共鳴励起(3-D RCE)と呼ぶことにする。そして共鳴条件は、

$$\Delta E = \frac{h\gamma v}{a} \left[ (\sqrt{2}k \cos\phi + \sqrt{2}m \sin\phi) \cos\theta + l \sin\theta \right] \quad (1)$$

で表される。ここで、 $\Delta E$  は準位間のエネルギー差、 $h$  はプランク定数、 $\gamma$  はローレンツ因子、 $v$  はイオンの速度、 $a$  は結晶の格子定数、 $(k,l,m)$  は Miller 指数、 $(\theta,\phi)$  はビームの入射角で、 $\theta$  は(220)面内における $\langle 110 \rangle$ 軸方向からの角度、 $\phi$  は(220)面に対する入射角に対応する。 $391\text{MeV/u}$  H-like  $\text{Ar}^{17+}$  イオンの  $1s-2p_{3/2}$  への共鳴条件を $(\theta,\phi)$ に描くと図2のように $(k,l,m)$ 毎の曲線の集合となる。

図3に、 $\phi=0^\circ$  (面チャネリング条件)と  $0.1^\circ$  (非チャネリング条件)に固定し、それぞれ $\theta$ を回転させたときの、 $\text{Ar}^{17+}$ イオンの荷電分布の変化と、式(1)から求まる共鳴条件の図を示す。このとき、

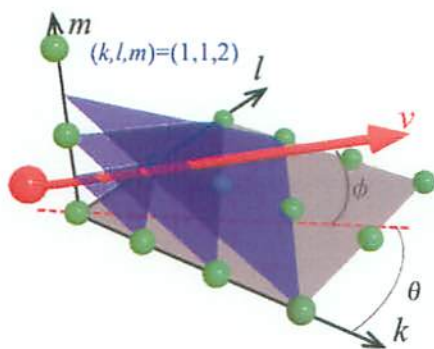


図1:三次元コヒーレント共鳴励起(3-D RCE)のイメージ図。イオンは、 $(k,l,m)$ で指定される原子面の周期配列を乗り越えることで、振動電場を感じる。

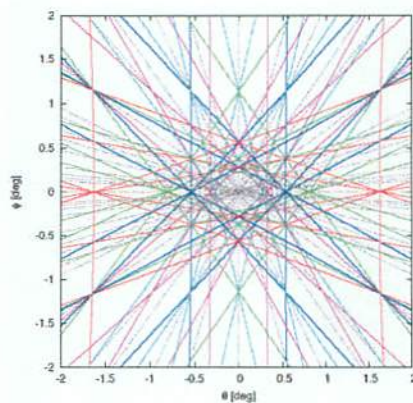


図2: 式(1)から求まる、 $391/\text{u}$  H-like  $\text{Ar}^{17+}$  イオンの  $1s-2p_{3/2}$  の共鳴条件を $\theta,\phi$ 面上に書き出した図。色の違いは $(k,l,m)$ の違いに対応する。

$\phi=0^\circ$  のチャネリング条件下では共鳴条件付近において幅広いディップが観測され、また $\phi=0.1^\circ$  の非チャネリング条件下においても、予想される共鳴条件において鋭いディップが確認された。この非チャネリング条件下における RCE によるディップは、3-D RCE が起きていることを示している。

$\phi=0^\circ$  の(220)面チャネリング条件下では、幅が 15eV 程度の共鳴ディップが観測された。この幅広い構造は、(220)原子面の作る電場による Stark シフトによってできる。今、イオンは(220)原子面にほぼ平行に進行しているため、この原子面の作る電場を静的な電場として感じる。このとき、イオンの準位が DC Stark シフトで広がり、それに合わせて共鳴プロファイルも幅広になっているためである。

一方、 $\phi=0.1^\circ$  の非チャネリング条件下では、 $1s-2p_{1/2}$  と  $1s-2p_{3/2}$  への共鳴励起によるディップは、その幅が狭く、また予想される位置にほぼ一致している。これは、3-D RCE では Stark シフトが消失していること示している。この Stark シフトの消失はイオンが原子面の作る電場を動的な電場として感じるためにおこる。イオンは、 $\phi=0.1^\circ$  で結晶に入射したとき、(220)原子面を次々と横切るため、その原子面の作る電場は、面を横切る周波数 ( $1.6 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ ) の整数倍の周波数をもつ様々な周波数の振動電場として感じる。このように、イオンが AC 的な電場を感じる時、準位のシフトは AC Stark シフトとして取り扱われる。この Stark シフトは、

$$\Delta E = -\frac{\left| \langle 2s | e\vec{F} \cdot \vec{r} | 2p \rangle \right|^2}{2} \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_{ij}^2 - (\hbar\omega)^2}$$

で表される。ここで、 $\Delta_{ij}$  は準位間のエネルギー差、 $\vec{F}$  は振動電場の振幅ベクトル、 $\omega$  は電場の振動数である。いま、各電場の振動数は、イオンのエネルギー差に対応する振動数 ( $2s-2p_{1/2}$ :  $2.4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ,  $2s-2p_{3/2}$ :  $7.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ .) よりも大きいため、それぞれの電場によるシフトは無視できる

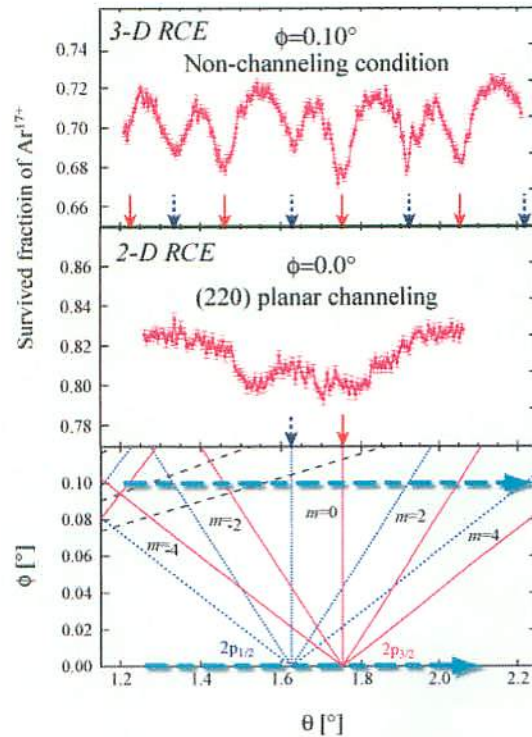


図 3: (中央)  $\phi=0^\circ$  ;(220)面チャネリング条件および(上) $\phi=0.1^\circ$  ;非チャネリング条件下のときの  $\text{Ar}^{17+}$ イオンの生き残り確率。横軸上の矢印は、予想される共鳴条件の位置を示す。また、下図に共鳴条件を示す。図中の横矢印は測定した範囲を示す。

ほど小さくなる。このように、3-D RCE では結晶電場の全ての成分を振動電場として感じ、それぞれの振動数がイオンの準位間のエネルギー差に対応する振動数から十分に離れていると、Stark シフトは無視できるほど小さくなる。

また、この共鳴幅から電子状態のコヒーレンスの位相緩和確率を求める。ビームの速度広がりなど実験的な広がりが約 1eV 程度と見積もられ、この幅を観測した幅から差し引いた値が位相緩和による幅とすると、位相緩和確率は約  $8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$  となる。これは、位相緩和が起こるまでにイオンが結晶内を 0.3 $\mu\text{m}$  以上進むことを示しており、(220)原子面を3つ以上乗り越えることになる。すなわち、電子数密度や核数密度の高い(220)原子面を通過しても、イオンのコヒーレンスは保たれていることがわかる。

今回、3-D RCE を観測できた理由として、高エネルギーの多価イオンを用いたことだけでなく、標的結晶に厚さ1 $\mu\text{m}$  の薄膜結晶を用いたことも大きな要因である。荷電分布測定によるRCE の観測は、透過イオンの生き残り確率の減少の観測であり、そのためには非共鳴条件下においても生き残り確率が大きい必要がある。これには、イオンが非チャネリング条件下においても、結晶原子との衝突によってイオン化する前に出射する必要がある。今回、非チャネリング条件下における  $\text{Ar}^{17+}$  イオンの生き残り確率はおよそ 74%程度あり、共鳴条件下における生き残り確率の減少を観測するのに十分大きかった。