

結晶光子場によるコヒーレント共鳴励起を用いた原子物理

Atomic physics using resonant coherent excitation
with crystal fields

東 俊行 (AZUMA TOSHIYUKI)

(独)理化学研究所・基幹研究所・主任研究員



研究の概要

高速重イオンが単結晶中の周期配列中を通過する際、イオンは時間とともに変化する振動電場を感じるために、その内部準位は共鳴的に励起される。コヒーレント共鳴励起と呼ばれるこの過程において、数10ギガ電子ボルトの高エネルギー重イオンを用意することによって、X線領域に相当する準位間遷移が可能になる。本研究では、この共鳴励起を利用した光を使わない量子状態の操作や、精密原子分光法としての原子物理における新しい可能性を探る。

研 究 分 野：物理学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キ ー ワ ー ド：原子・分子

1. 研究開始当初の背景

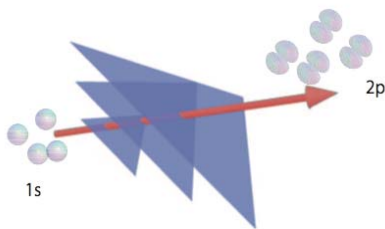
高速イオンが結晶という周期的配列を通過する際、イオンは原子列を構成するひとつひとつの原子の傍を周期的に通過する。これは、通過イオンの静止系から眺めると、イオンが時間とともに変化する振動電場を感じることに相応する。つまり、イオンが通常の「光」を照射されている状況に対応するため、電場エネルギーがイオンの内部自由度の準位差に一致すれば、イオンの準位は共鳴的に励起され得る。この現象は一般にコヒーレント共鳴励起 (resonant coherent excitation, RCE) と呼ばれる。核子あたり数100MeVのイオン速度と、結晶格子定数というÅオーダーの周期間隔を考慮すると、RCEによってX線領域に相当

する準位間の遷移が可能になる。最近、RCEのダイナミクスが理解されるとともに、X線領域における全く新しい精密原子分光法としての可能性や、レーザー光などと対比される強光子場としての側面が明らかになってきた。

2. 研究の目的

我々は、標的結晶として1ミクロン厚の極薄膜Si結晶を採用し、非チャネリング条件下、即ちランダムな方向からイオンを入射したときに、3次元的な空間における原子面の周期的配列による3次元RCE (3D-RCE) が起こることを観測した。これによって、RCE現象は非常に特異な現象であるという従来の観念を覆し、高エネルギーイオンと結晶の相互作用として極めて普遍的な現象であることを示した。この3D-RCEの発見というブレークスルーにより研究の画期的展開が可能となった。本研究では以下の2つのテーマを研究目的として掲げた。

- [1] ダイナミクス研究(光を使わないX線領域のコヒーレントな3準位系量子状態の操作)
－ 2重共鳴によるX線領域のポンプ&プローブ実験およびドレスト原子の観測
- [2] スペクトロスコーピー研究(精密原子分光によるQEDの検証) － 多価重イオン1s基底準位のラムシフト測定



(図は、結晶面周期配列を通過することによって特定の磁気副準位へ励起するイオンを示す)

3. 研究の方法

本研究は高エネルギー重イオン加速器を利用した実験であり、国内の HIMAC(放射線医学総合研究所・重粒子がん治療装置)において Ar や Fe の束縛電子をはぎとった多価イオを利用して、ダイナミクス研究を行った。試料標的として極薄膜結晶 Si を用意し、高精度ゴニオメーターに設置して結晶を回転することにより、入射ビームに対する結晶角度を走査し、励起条件を満たす原子面配列を選択する。共鳴の観測は、入射イオンが基底状態から電子励起した際には、結晶原子と衝突して電子がはげやすくなることを利用して、結晶通過後のイオンの電荷を観測した。また、励起後に再び X 線を放出して脱励起する場合に放出される X 線を観測する手法も、同時に採用した。スペクトロスコープ研究には、質量数の大きい U ビームが利用できるドイツ・GSI(重イオン科学研究所)の SIS シンクロトロンから供給されるビームを利用した。

4. これまでの成果

3D-RCE の特徴の一つは、2 方向の結晶角度の走査により原子面配列を適切に選択すると、フーリエ次数の異なる周波数成分の結晶振動電場を同時に使った「2 重共鳴」が容易に実現できることである。即ち、ふたつの光源で異なる準位間を同時共鳴励起できると考えられる。HIMAC における実験では、この手法により 2 準位間の強い相互作用に起因する「Autler-Townes 2 重項」の分裂幅を観測することから直接 2 準位間のラビ振動数を決定した。一般に強光子場中の原子の振舞いは「ドレスト原子」という描像で良く説明されるが、我々の観測した状況は、結晶振動電場によって形成された「ドレスト原子」という概念によって統一的に解釈された。

選択した原子面配列による振動電場は直線偏光している性質を利用して、励起原子の配向が可能となる。これを脱励起 X 線の放出角度分布の観測によって確認した。2 重共鳴に用いるポンプおよびプローブ用の結晶原子面配列による偏光方向の組み合わせを選択することによって、様々な量子操作が可能であることも実証した。また 2 重励起によって原子に束縛されている 2 つの電子を共鳴励起することにより 2 重励起状態が選択的に生成できることを、励起後のオーグジュ電子を捕らえることによって明瞭に示すことができた。

RCE の多価重イオンの精密分光への応用としては、強電場下での QED 効果の検証のため、ドイツ・GSI において、Li 様の U^{89+} イオンの $1s^2 2s \rightarrow 1s^2 2p_{3/2}$ 遷移の観測に挑戦した。その結果、結晶原子面間にイオンを通過させる面チャネリング条件を利用した原子列周期配列による 2 次元 RCE (2D-RCE) によって共鳴励起する様子を観測することに初めて成功した。質量数の大きい U では励起状態は、短寿

命で X 線を放出して脱励起するので、共鳴観測には新たに開発した大面積 Si 半導体検出器を多数個配置して、脱励起 X 線を観測した。

5. 今後の計画

今までの研究で、磁気副準位を選択して励起することにより任意の配向重イオンが用意できるようになったので、特定配向重イオンの原子衝突という新しい研究を展開予定である。またスペクトロスコープでは、U ビームの速度幅を狭めるために結晶入射前にイオン冷却リングを利用することを予定している。

6. これまでの発表論文等

[1] Y. Nakano, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Nakai, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, "Polarization Control in Three-dimensional Resonant Coherent Excitation", **Phys. Rev. Lett.** 102, 085502(2009).

[2] Y. Nakano, T. Inoue, T. Azuma, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, "Resonant Coherent Excitation of Li-like Ar^{15+} Ions in a Thin Si Crystal", **J. Phys. Conf.** 163, 012094(2009).

[3] Y. Nakai, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, C. Kondo, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, "Dressed Atoms in Flight through a Periodic Crystal Field: X-VUV Double Resonance", **Phys. Rev. Lett.** 101, 113201(2008).

[4] Y. Nakano, S. Masugi, T. Muranaka, T. Azuma, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami, "Doubly-resonant coherent excitation of HCI planar channeled in a Si crystal", **J. Phys. Conf.** 58, 359-362 (2007).

[5] C. Kondo, S. Masugi, T. Muranaka, A. Ishikawa, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Nakai, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, "Trajectory dependent resonant coherent excitation of planar-channeled ions in a thin Si crystal", **Nucl. Instrum. and Methods B** 256, 157-161(2007).

ホームページ等

<http://atom.phys.metro-u.ac.jp/>