

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2007～2011

課題番号：19104010

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Atomic physics using resonant coherent excitation
with crystal fields

研究代表者

東 俊行 (AZUMA TOSHIYUKI)

独立行政法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・主任研究員

研究者番号：70212529

研究成果の概要（和文）：

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を実証し、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った。

研究成果の概要（英文）：

When the fast heavy atomic ions pass through the periodic structure of a single crystal, the ions have a chance to be resonantly excited by feeling the time-dependent oscillating electric field, which is called resonant coherent excitation. The electronic transition between the atomic levels corresponding to the X ray regions is feasible for several tens GeV heavy ions. The present research on this process demonstrated quantum states manipulation without using photon, and a new possibility for high precision spectroscopy is exploited.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	28,800,000	8,640,000	37,440,000
2008年度	20,100,000	6,030,000	26,130,000
2009年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2010年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2011年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
総計	83,600,000	25,080,000	108,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：

原子分子物理，量子エレクトロニクス，加速器，量子ビーム，放射線，X線，粒子線

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、我々の研究によって、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および偏光による配向イオンの生成

[2] スペクトロスコピー研究(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

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ンを利用して、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や生成される高速2次電子を観測した。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。スペクトロスコピー研究には、質量数の大きく、QED効果が健代であると期待されるウラン(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. 研究成果

[1] ダイナミクス研究

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った準

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」という概念により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。原子面配列を適切に選択することによって励起利用する振動電場の偏光を制御できる。このようにしてHe 様(2電子系)アルゴン(Ar^{16+})および鉄(Fe^{24+})イオンの1s電子を磁気副準位を選択した2p準位へ励起し、これを脱励起X線の放出角度分布の観測によって明瞭に確認した。さらにH 様(1電子系)イオンの1s準位から $2p_{1/2}$ および $2p_{3/2}$ 準位への励起の場合についても観測を行い、 $2p_{3/2}$ 準位からの等方的な放出を確認するとともに、 $2p_{3/2}$ 準位では軌道角運動量および軌道角運動量・スピン相互作用を反映して分布に偏りが見られることを観測した。このような情報が重イオンに対して得られたのは、理論的にも極めて興味深いにもかかわらず、本手法による観測が初めてである。これは、実験的には適したX線レーザーが利用できなかったことや、電子・イオン衝突による実験は報告されてきたが、このような衝突系から偏光効果を議論するのは容易ではなかったことに起因する。

さらにHe 様(2電子系)アルゴン(Ar^{16+})イオンの2重共鳴では、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。Ladder型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、励起後のオージェ電子を捕らえることによって明瞭に示すことができた。これらと同等な実験は将来達成されるX線自由電子レーザーを使った2種類のX線の同時照射によってのみ達成可能であると考えられていた量子操作に成功したことを意味する。

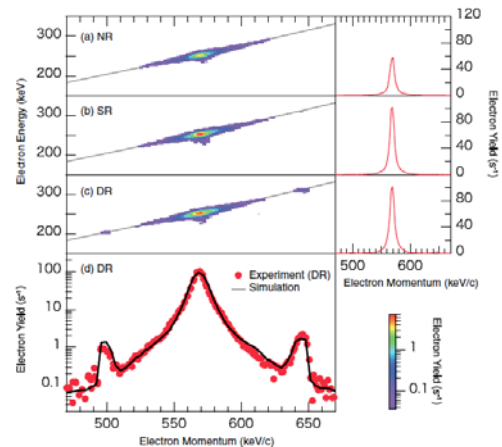


図1: (a) 非共鳴条件下(NR), (b) 1重共鳴条件下(SR), および(c) 2重共鳴条件下(DR) で観測されたゼロ度方向放出2次電子のエネルギー/運動量分布マップ。さらに、運動量軸への射影すなわち電子運動量分布がそれぞれ右に示されている。DR条件下での電子運動量分布が対数表示で(d)に示されており明確なオージェ電子のピークが観測された。

また束縛3電子を伴うLi 様アルゴン(Ar^{15+})イオンに対しても、Ladder型2重共鳴を起こさせることによって、基底状態($1s^2 2s$)からすべての電子が $n=2$ 準位に励起された($2s 2p^2$)特異な原子、すなわち3重励起状態、すなわちK殻がすべて空孔で3個の電子がL殻に存在する特異な状態の選択的形成を試みた。共鳴条件下での通過イオンの荷電分布、オージェ電子の増大、脱励起X線の収量の増加をすべて明確に観測し、3重励起状態の生成を決定的なものにした。

また本研究では、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ため、特定配向重イオンの原子衝突という新しい研究を開始することが可能となった。そこで配向重イオンと結晶内原子の衝突によって生成された2次電子をビーム進行方向で捉える実験を実施した。この電子収量の増大によって共鳴現象を確認できたのみならず、その共鳴幅がイオン化前のイオンの運動量分布を強く反映したエネルギー幅を持つことが観測された。

[2] スペクトロスコーピー研究

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 効果の検証実験をめざして、ドイツ・GSI において、SIS シンクロトロンより取り出された Li 様(3 電子系)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

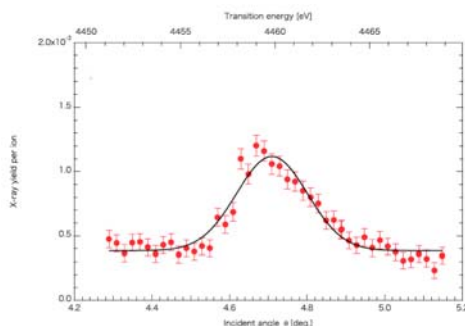


図2: 入射ビームに対する結晶角度を変化させて得られた放出X線収量変化における U^{89+} イオンの $1s^2 2s \rightarrow 1s^2 2p_{3/2}$ 遷移に対する共鳴プロファイル

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。

この成功を受けて、共鳴幅の狭窄化に向け

た実験を展開した。その目標は、よりエネルギー幅が狭く、角度拡がりの小さいウランビームの供給である。まず前者に対応するためSISシンクロトロンより取り出されたHe様(2電子系) U^{90+} ビームを、一度ESRイオン蓄積リングに蓄積し、等速の電子ビームと合流させることにより電子冷却(ビームエネルギー幅を狭窄化する)した上で、さらにこの等速電子を捕獲して生成されるLi様(3電子系) U^{89+} ビームを、リングより引き出して利用した。本手法により、前回のSISからの取り出し実験と比較して1桁以上エネルギー幅の狭いビームが得られた。実験結果の解析とESRリングからのビーム輸送による角度拡がり进行评估するシミュレーションを行い、もうひとつ共鳴ピーク幅の原因であるビームの角度拡がりは、ESRリングからの取り出しや実験室までの輸送におけるビーム角度拡がりを反映している解釈に達した。その結果本研究に引き続き、数10mに及ぶビーム輸送系の改造および診断装置の増強が現在も進行中である。このアップグレードが終了し次第再度実験が行われることが決定されている。

このように本研究による精密分光研究が国際的な実験グループを形成することによって開始され、今後引き継がれる開発により最終的なQED実験の成功へと繋がる道筋が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- [1] Y. Nakano, A. Hatakeyama, Y. Nakai, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami, "Selective production of the doubly excited $2p^2$ ($1D$) state in He-like Ar^{16+} ions by resonant coherent excitation", **Phys. Rev. A, Rapid Comm.** 85, (2012) 020701 (R). 査読有
- [2] S. Suda, Y. Nakano, K. Metoki, T. Azuma, Y. Takano, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, E. Takada, T. Murakami, "Electron emission from fast heavy ions associated with resonant coherent excitation", **Physica Scripta**, T144, (2011) 014044. 査読有
- [3] Y. Nakano, Y. Takano, T. Ikeda, Y. Kanai, S. Suda, T. Azuma, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, Th. Stöhlker, D. Dauvergne, Y. Yamazaki, "Observation of intrashell radiative decay of Li-like uranium ($2p_{3/2}-2s_{1/2}$) using silicon drift detectors", **Physica Scripta**, T144 (2011)014010. 査読有
- [4] 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). 査読有
- [5] 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). 査読有
- [6] 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). 査読有

- [7] 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 HCl planar channeled in a Si crystal", **J. Phys. Conf.** 58, 359-362 (2007). 査読有
- [8] 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). 査読有

〔学会発表〕(計12件)

- [1] 中井陽一, 「コヒーレント共鳴励起による水素様重イオンから放出される $Ly-a_1, Ly-a_2$ X線強度の角度異方性観測」, 日本物理学会2012年年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大学, 西宮
- [2] T. Azuma, "Crystal-assisted excitation of heavy ions in the EUV and X-ray energy regions", 3rd international conference on current developments in atomic, molecular optical and nano physics with applications (CDAMOP-2011)" (招待講演), 2011年12月16日, Delhi University, Delhi, India
- [3] 中野祐司, 「薄膜結晶におけるコヒーレント共鳴励起: 空イオンの選択的生成」, 第12回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会(招待講演), 2011年

- 12月10日, 東京大学, 東京
- [4] 須田慎一郎, 「コヒーレント共鳴励起に伴う電子放出の観測 IV」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 23 日, 富山大学, 富山
- [5] 中野祐司, 「コヒーレント共鳴励起による Li-like U^{89+} イオンの精密分光 II」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 23 日, 富山大学, 富山
- [6] T. Azuma, “Heavy Ion Channeling”, 8th International Topical SPARC Workshop”, 2011 年 9 月 9 日, Hotel Uzkoie, Moscow, Russia
- [7] T. Azuma, “From crystal-assisted excitation in the x-ray energy domain to molecular manipulation in a cryogenic ion storage ring”, 11th Symposium on Attoscience and Ultrafast Quantum Control (SASQC11) (招待講演), 2011 年 9 月 8 日, Imperial College, London, UK
- [8] 安田知世, 「コヒーレント共鳴励起を使った励起イオンからの電子放出の観測」, 原子衝突研究協会第 36 回年会, 2011 年 8 月 19 日, 新潟大学, 新潟
- [9] A. Bräuning-Demian, “Resonant coherent excitation of 191.1 MeV/u U^{89+} ions planar-channeled in a silicon crystal”, 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2011), 2011 年 7 月 27 日-8 月 2 日, Queen’s University of Belfast, Belfast, UK
- [10] 須田慎太郎, “Convoy electron emission following ionization of highly-charged ions excited by resonant coherent excitation”, 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2011), 2011 年 7 月 27 日-8 月 2 日, Queen’s University of Belfast, Belfast, UK
- [11] 中野祐司, “Controlling and probing of highly charged ions up to Li-like U^{89+} by resonant coherent excitation”, 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2011) (招待講演), 2011 年 7 月 29 日, Queen’s University of Belfast, Belfast, UK
- [12] T. Azuma, “resonant coherent excitation of heavy ions: from population control to precise spectroscopy”, 29th Brand Ritchie Workshop (招待講演), 2011 年 5 月 14 日, くにびきメッセ, 松江

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/amo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 俊行 (AZUMA TOSHIYUKI)

独立行政法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・主任研究員

研究者番号：70212529

(2) 研究分担者

田沼 肇 (TANUMA HAJIME)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：30244411

(H19→H21：連携研究者)

(3) 連携研究者

なし