

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25年 6月 3日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340111

研究課題名（和文）

自動電離状態における一般化ブライト相互作用効果の研究

研究課題名（英文）

Studies of the generalized Breit interaction effect in autoionizing states

研究代表者

中村 信行（NAKAMURA NOBUYUKI）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：50361837

研究成果の概要（和文）：重元素少電子多価イオンに関する2電子性再結合過程の観測を、電気通信大学の電子ビームイオントラップ Tokyo-EBIT を用いて行った。X線による測定と、Tokyo-EBIT から引き出したイオンによる平衡電荷分布計測による測定を合わせることで、2電子性再結合において放出されるX線の角度分布をリチウム様多価イオンについて測定し、角度分布に現れるブライト相互作用効果を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Dielectronic recombination processes of few electron heavy highly charged ions have been studied with the Tokyo electron beam ion trap at the University of Electro-Communications. By combining two experiments, X-ray measurements and ion abundance measurements, the angular distribution of X-rays emitted in dielectronic recombination processes has been measured for lithiumlike ions. The dominant contribution of the Breit interaction effect on the angular distribution has been clearly demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

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

キーワード：多価イオン・自動電離状態・ブライト相互作用・相対論効果

1. 研究開始当初の背景

本研究では、2電子性再結合の観測を通して自動電離状態を調べる。2電子性再結合は、自動電離状態（2電子励起状態）を中間状態とした共鳴的な再結合過程であり、その断面積は中間状態の自動電離確率により支配される（重元素多価イオンの場合はほぼ比例）。研究代表者らが2008年に発表したりチウム様多価イオンに対する2電子性再結合断面積において、顕著な原子番号(Z)依存性が見られ

たが、これは、ブライト相互作用効果が中間状態の自動電離確率を著しく変化させた結果であることを明らかにした。加えて、そのブライト相互作用効果が、ある特定の自動電離状態を介する再結合断面積に特に顕著に表れることを示した。つまり、同じリチウム様イオンであっても、他の自動電離状態を介する再結合過程に関してはこれほど大きな寄与は現れず、一般に Z^4 に比例するとされている相対論効果やQED効果のZ依存性は、状

態毎に大きく異なるため単純なスケール則では議論できないということが明らかになった。この成果は、自動電離状態に対する顕著なブライト相互作用効果を初めて明らかにした例として高く評価されたが、次項に示すような問題が未解明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自動電離状態に対するブライト相互作用効果において未解明となっている以下を調べることである。

(1) ブライト相互作用効果の内訳

磁氣的相互作用効果と遅延効果から成るブライト相互作用効果のうち、いずれの効果が主に寄与しているのか。また、計算簡略化のためしばしば省略される周波数依存項や虚数項の寄与がどのように影響するのかを調べる。なぜ特定の自動電離状態にのみブライト相互作用効果が強く現れるのか、その答を得るためにも各項の内訳を明らかにする。

(2) 微分断面積に対するブライト相互作用効果

これまでの研究は積分断面積を調べたものであったが、再結合過程において放出されるX線の観測を行うことで、その放出角度に対する微分断面積（中間自動電離状態の磁気量子数分布、放出光子の偏光度）へのブライト相互作用効果を明らかにする。

(3) 二重微分断面積に対するブライト相互作用効果

2電子性再結合過程では中間状態として2電子励起状態が生成されるため、その放射崩壊においてX線光子を2つ放出する過程がある。この2つの光子を同時計測することにより、光子間の角度相関を含めた二重微分断面積を測定し、そこに現れるブライト相互作用効果を明らかにする。

(4) 干渉効果に対するブライト相互作用効果

共鳴再結合である2電子性再結合過程は、非共鳴再結合である放射性再結合過程と干渉し、いわゆるFanoプロファイルとして現れる。干渉効果は一般には大きくないが、共鳴状態によっては非対称なFanoプロファイルが明瞭に観測されることがある。ブライト相互作用効果を取り入れつつ、両再結合過程をコヒーレントに扱う計算プログラムを開発し、計算結果を実験と比較することで、干渉効果に対するブライト相互作用効果を明らかにする。

3. 研究の方法

実験は、電通大の多価イオン生成装置Tokyo-EBITを用いて行う。EBITは、トラップされたイオンに対して高エネルギー電子

ビームにより逐次電離をすすめ、多価イオン化を進める。平衡状態に達した際、トラップ内イオンの価数分布（隣接する価数を持つイオンとの密度比）は、再結合断面積と電離断面積の比で表される。

ここで、非共鳴過程である放射性再結合と電離の断面積は電子ビームエネルギーに対して緩やかな依存性を示すのに対して、2電子性再結合は共鳴過程の断面積であり、共鳴エネルギーにおいてのみ非常に大きな値を持つ。従って、隣接する価数を持つイオンの比を電子ビームエネルギーの関数として測定することで、2電子性再結合を調べることが出来る。イオンの比は、平衡状態となった後にEBITからイオンを引き出し、分析磁石により価数分離し、それぞれの数を計数することで測定することが出来る。

光子の放出角度に対する微分断面積を調べるには、上述の引き出しイオン計測による積分断面積測定に加えて、放出X線観測による測定を行う。イオントラップ中央部に設けられたスリットから、電子ビームに対して90度方向に設置した半導体検出器により放出X線スペクトルを観測し、その電子ビームエネルギー依存性を測定する。EBITでは構造上、電子ビームに対して90度方向からしか観測を行うことができず、放出角度分布を測定することは出来ないが、積分断面積と90度方向における微分断面積との違いを理論計算と比較することにより、角度分布（＝偏光度）に対するブライト相互作用効果を検証する。

2光子を放出する再結合過程の二重微分断面積を調べるためには、イオントラップ側面に設けられた複数の観測スリット全てに半導体検出器を設置し、放出X線の同時計測を行う。平成20年度において既に、2台の検出器による同時計測の予備測定を行った。その結果、十分なコインデンス信号を得られることが分かった。予備測定では仮の計測システムを用いていたため、時間分解能が悪く、アクシデンタルコインシデンスの寄与も大きかったが、タイミング回路系を整備することで、時間分解能を向上させる。

4. 研究成果

(1) ブライト相互作用効果の内訳

特に、放射性再結合と2電子性再結合の干渉効果について、周波数依存項を無視した計算と考慮した計算を行い、実験の統計誤差以上の有意な差が出ることを見出した。これは、ブライト相互作用効果のうち周波数依存項の寄与を調べた最初の例であり、国内外の学会で発表され高い評価を得た。

(2) 微分断面積に対するブライト相互作用効果

2電子性再結合における放出X線の角度分布を調べた結果を図1に示す。

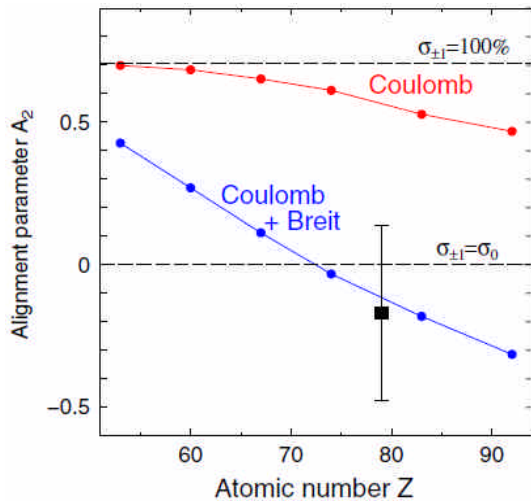


図1. リチウム様イオンの2電子性再結合において放出されるX線の角度分布を表す非等方性パラメータ。■が本研究の実験値。赤線はクーロン相互作用のみを考慮した理論で、青線がブライト相互作用を考慮した理論 (Hu et al. Phys.Rev.Lett.) これまで測定困難であった角度分布を、2つの実験を組み合わせることで得たこの実験は世界初演であり、理論計算と比較することにより、通常は小さな補正でしかないブライト相互作用が、角度分布に支配的な影響を与える (クーロン相互作用のみでは90度で極小を与える分布が、ブライト相互作用を考慮することにより90度で極大を持つ分布となる) ことが実験的に明確に示された。

この結果は、当該分野で最も権威の高い Phys.Rev.Lett.誌に掲載され、複数の国際会議での招待講演を得る成果となった。

(3) 二重微分断面積に対するブライト相互作用効果

対向する2つの半導体検出器で検出したX線の時間差スペクトルの例を図2に示す。

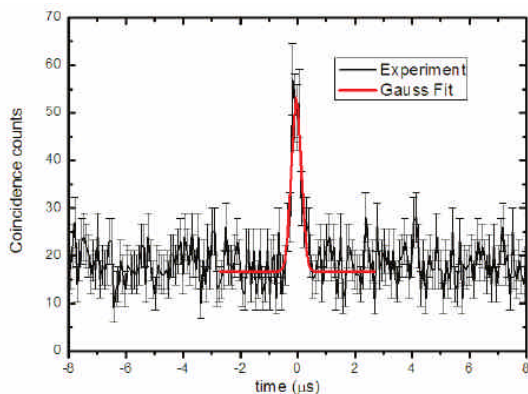


図2. 水素様クリプトンの2電子性再結合過程において放出される2つのK X線光子の時間差スペクトル。

図において、広い時間領域に均一に表れている

るのは偶発的に同時計測された信号であるが、その上にピークとして表れているのが、2光子放出過程を実験的にとらえたものである。EBITを用いた2光子の同時測定はこれが世界初演であり、2010年の多価イオン物理国際会議において、selected topicsとして口頭発表に選ばれた。

(4) 干渉効果に対するブライト相互作用効果

ブライト相互作用効果を取り入れつつ、両再結合過程をコヒーレントに扱う計算プログラムを開発した。このプログラムにより、ブライト相互作用のうち、周波数依存項などの寄与を詳細に調べることが可能となった。図3に計算結果の一例を示す。これにより、干渉効果にもブライト相互作用が強く表れることが初めて明らかになった。

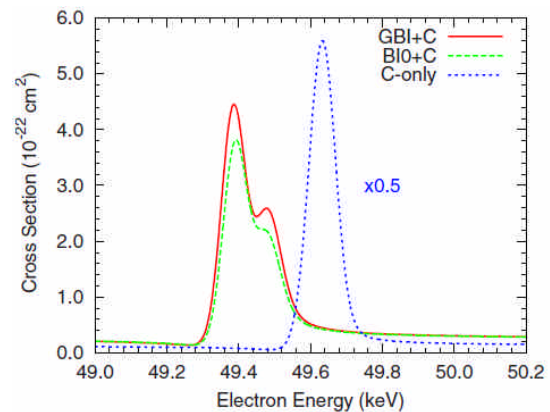


図3. ベリリウム様イオンの再結合断面積の計算結果。青はクーロン相互作用のみの結果、緑は周波数依存項を無視したブライト相互作用を含めた結果、赤は周波数依存項を取り入れた結果。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件) ※全て査読有

①Zhimin Hu, Yueming Li, and Nobuyuki Nakamura, Resonance strength for KLL dielectronic recombination of hydrogenlike krypton, Phys. Rev. A 87, 052706 (2013) [6 pages]
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052706

②Zhimin Hu, Yusuke Ishiguro, Hirofumi Watanabe, Shunsuke Ohtani, Nobuyuki Nakamura, Comparison between leaky and pulsed modes of ion extraction from an electron beam ion trap, Nucl. Instrum. Methods B 298, 96-99 (2013)
DOI: 10.1016/j.nimb.2013.01.006

③Zhimin Hu; Xiaoying Han; Yueming Li; Kato, D.; Xiaomin Tong; Nakamura, N., Experimental Demonstration of the Breit Interaction which Dominates the Angular Distribution of X-ray Emission in Dielectronic Recombination, Phys. Rev. Lett. 108,

073002 (2012)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.073002

④ Nakamura, N.; Zhimin Hu; Watanabe, H.; Yueming Li; Kato, D.; Currell, F.; Xiao-Min Tong; Watanabe, T.; Ohtani, S., Structure and dynamics of highly charged heavy ions studied with the electron beam ion trap in Tokyo, Hyperfine Interaction 199, 123-30 (2011)

DOI: 10.1007/s10751-011-0307-7

⑤ Zhi-min Hu; Yue-ming Li; Yamazaki, A.; Nakamura, N., Two-photon Observations of Dielectronic Recombination Processes, Phys. Scr. T144, 014047 (2011)

DOI: 10.1088/0031-8949/2011/t144/014047

⑥ Nakamura N, Currell F J, Hu Z, Kato D, Komatsu A, Li Y, Murakami I, Ohashi H, Ohtani S, Sakaue H A, Sakurai M, Tona M, Tong X M, Watanabe H, Watanabe T, Yamada C, Yamamoto N and Yamazaki A, Activities at the Tokyo EBIT 2010, Journal of Instrumentation 5, C08007 (2010)

DOI: 10.1088/1748-0221/5/08/c08007

⑦ Kavanagh A P, Watanabe H, Li Y M, O'Rourke B E, Tobiyama H, Nakamura N, McMahon S, Yamada C, Ohtani S and Currell F J 2010 Dielectronic recombination in He-like, Li-like, and Be-like highly charged ions in the KLL and KLM manifolds Physical Review A 81 022712 (7 pp.)

DOI: 10.1103/PhysRevA.81.022712

⑧ Nakamura N, Kavanagh A P, Watanabe H, Sakaue H A, Li Y M, Kato D, Currell F J, Tong X M, Watanabe T and Ohtani S 2009 Asymmetric profiles observed in the recombination of Bi⁷⁹⁺: A benchmark for relativistic theories involving interference Physical Review A 80 014503 (4 pp.)

10.1103/PhysRevA.80.014503

⑨ Tong X M, Nakamura N, Ohtani S, Watanabe T and Toshima N 2009 Green's function for multielectron ions and its application to radiative recombination involving dielectronic recombinations Physical Review A 80 042502 (5 pp.)

DOI: 10.1103/PhysRevA.80.042502

[学会発表] (計 16 件)

① 石黒雄介, 大橋隼人, 中村信行, 硬 X 線用偏光計の開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月, 横浜国立大学

② (招待講演) Z. Hu, X. Han, Y. Li, D. Kato, X. Tong, H. Watanabe and N. Nakamura, ANGULAR DISTRIBUTION OF X-RAY EMISSION IN DIELECTRONIC RECOMBINATION, 16th International Conferences on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2012), 2012 年 09 月, Heidelberg, Germany

③ (招待講演) NAKAMURA Nobuyuki, Dielectronic recombination of highly charged heavy ions studied with the Tokyo electron beam ion trap, 4th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, 2012 年 07 月, Lanzhou, China

④ 大澤 央 山田千櫻 中村信行, スピン偏極検出器校正のためのスピン偏極電子線源の開発, 原子衝突研究協会年会, 2012 年 7 月, 電気通信大学

⑤ 石黒雄介 大橋隼人 中村信行, 硬 X 線用偏光計の開発, 原子衝突研究協会年会, 2012 年 7 月, 電気通信大学

⑥ Zhimin Hu, Xiaoying Han, Yueming Li, Daiji Kato, Xiaomin Tong, and Nobuyuki Nakamura, Angular Distribution of X-ray Emission in Dielectronic Recombination, 日本物理学会, 2012 年 3 月, 関西学院大

⑦ 胡智民、中村信行, 重元素多価イオンの二電子性再結合: 偏極度におけるブライト相互作用の検証に向けて, 原子衝突研究協会年会, 2011 年 8 月, 新潟大学

⑧ Zhimin Hu, Akira Yamazaki, Yueming Li, Nobuyuki Nakamura, Dielectronic recombination of hydrogen-like krypton, XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2011 年 7 月, Belfast UK

⑨ Zhimin Hu, Michiharu Ureshino, Xiaoying Han, Yueming Li, Nobuyuki Nakamura, KLL dielectronic recombination resonance strengths in He- to O-like gold ions, XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2011 年 7 月, Belfast UK

⑩ 胡智民, 李月明, 山崎詔, 中村信行, Two-photon observations of dielectronic recombination processes, 日本物理学会, 2010 年 9 月, 大阪府立大

⑪ HU Zhi-min, LI Yue-ming, YAMAZAKI Akira, NAKAMURA Nobuyuki, TWO-PHOTON OBSERVATIONS OF DIELECTRONIC RECOMBINATION PROCESSES, 15th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, 2010 年 8 月, 上海 中国

⑫ (招待講演) Structure and dynamics of highly charged heavy ions studied with the electron beam ion trap in Tokyo, Nobuyuki NAKAMURA, 2010 年 4 月, Fifth Conference on Trapped Charged Particle, Saariselkä Finland

⑬ (招待講演) NAKAMURA Nobuyuki, Progress at the Tokyo EBIT, International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps (EBIST2010), 2010 年 4 月, Stockholm, Sweden

⑭ 胡智民, 李月明, 中村信行, Dielectronic recombination of hydrogen-like krypton, 日本物理学会, 2010 年 3 月, 岡山大学

⑮ Nobuyuki Nakamura, Anthony P Kavanagh, Hirofumi Watanabe, Hiroyuki A Sakaue, Yueming Li, Daiji Kato, Fred J Currell, Xiao-Ming Tong, Tsutomu Watanabe, and Shunsuke Ohtani, Interference between radiative and dielectronic recombinations of highly charged ions observed through the ion abundance in an electron beam ion trap, International Conference on Photonic Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2009), 2009 年 7 月, Kalamazoo USA

⑩ (招待講演) Nobuyuki Nakamura, Fred J. Currell, Daiji Kato, Yueming Li, Izumi Murakami, Shunsuke Ohtani, Hiroyuki A Sakaue, Masahide Tona, Xiao-Ming Tong, Hirofumi Watanabe, Tetsuya Watanabe, Tsutomu Watanabe, Chikashi Yamada, and Norimasa Yamamoto, Recent activities at the Tokyo-EBIT 2009, 3rd workshop on Physics at EBITs and Advanced Research Light Sources (PEARL2009), Dublin, Ireland

[その他]

ホームページ等

<http://yebisu.ils.uec.ac.jp/nakamura/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村信行 (NAKAMURA NOBUYUKI)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・
准教授

研究者番号：50361837

(2)研究分担者

山田千櫨 (YAMADA CHIKASHI)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：70037266

仝 曉民 (TONG XIAOMIN)

筑波大学・数理物質科学研究科・准教授

研究者番号：80422210

(3)連携研究者

加藤太治 (KATO DAIJI)

核融合科学研究所・連携研究推進センター
助教

研究者番号：60370136

