

二電子性再結合 X 線の偏光度測定

中村信行研究室 大石晋平

1. はじめに

二電子性再結合 (Dielectronic Recombination: DR) とは、電子がイオンに捕獲されると同時に内殻電子が励起することで多重励起状態が生成され、その後放射安定化する共鳴的再結合過程である。重元素多価イオンの DR において、通常はクーロン相互作用の補正項でしかないブライト相互作用という相対論効果が、共鳴強度や角度分布に大きな寄与を示すことがある [1]。特に、Li 様多価イオンにおいて $[1s2s^2p_{1/2}]_1$ の中間状態を経由する DR から放出される X 線の偏光度は、クーロン相互作用のみを考慮した場合とブライト相互作用を考慮した場合で理論計算に大きな差がある。さらに重元素の多価イオンになると、仮想光子の周波数をゼロと近似するブライト相互作用とその近似を用いない一般化ブライト相互作用の計算結果にわずかながら差が表れることが予言されている [2]。

そこで本研究の目的はこの DR X 線の偏光度を高精度に観測し、ブライト相互作用の計算に広く使用されているゼロ周波数極限近似の適用限界を初めて検証することである。

2. 実験方法

電気通信大学の電子ビームイオントラップ (Tokyo Electron Beam Ion Trap: Tokyo EBIT) で生成された Li 様 Bi 多価イオンからの DR X 線を Ge 検出器およびコンプトンカメラ (Electron Beam Ion Trap Compton Camera: EBIT-CC) を用いて観測した。実験装置の概略図を図 1 に示す。

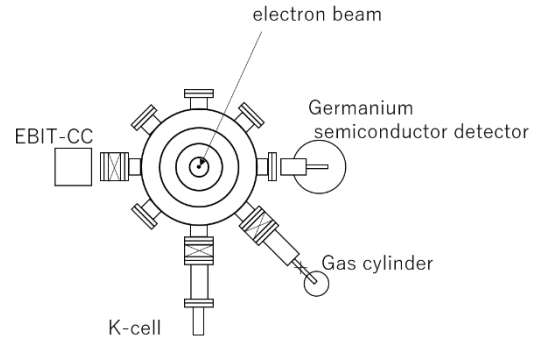


図 1 実験装置の概略図

2.1 電子ビームイオントラップ

EBIT の概略図を図 2 に示す。EBIT は主に電子銃、3 つの円筒電極から成るドリフトチューブ (Drift Tube: DT)、超伝導コイル、電子コレクターから構成される。DT の井戸型ポテンシャルと電子ビームの空間電荷ポテンシャルにトラップされたイオンに電子ビームが入射し逐次電離が発生することで、多価イオンを生成する。電子ビームのエネルギーは電子銃と DT2 の電位差で決定される。

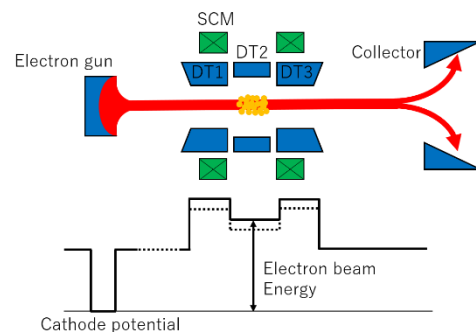


図 2 EBIT の概略図 (下: ポテンシャル)

2.2 EBIT-CC

EBIT-CC は Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ (Soft Gamma ray Detector: SGD) [3]

を基に EBIT から放出される低エネルギー X 線を観測するため新たに校正したコンプトンカメラである。SGD は天体からの軟ガンマ線の偏光度観測を目的として宇宙科学研究所を中心に開発され、ASTRO-H 衛星に搭載された検出器である。

EBIT-CC では検出器内で起きるコンプトン散乱の異方性から入射 X 線の偏光度を決定する。コンプトン散乱とは光子と吸収物体中の電子が衝突することで起こる相互作用であり、散乱光子の微分断面積はクライン・仁科の式で与えられる[4]。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} + \frac{E_2}{E_1} - 2\sin^2\theta\cos^2\varphi\right)$$

ここで E_1 、 E_2 は散乱前後のエネルギー、 r_e は古典電子半径、 θ は散乱角、 φ は入射 X 線の偏向方向に対する散乱の方位角である。

検出器の入射面には散乱体として 32 層の Si 検出器が置かれ、その下部および側面を覆う CdTe 検出器（下部 8 層、側面 2 層×4 面）により散乱 X 線を検出する構成となっている。各検出器層を 3.2mm 角のピクセルに分割することで位置検出を可能とし、入射 X 線の散乱位置および散乱 X 線の検出位置から散乱角度を決定する。2 つのチャンネルで同時に信号が検出されたイベントのみを選択し、Si、CdTe 検出器それぞれの検出位置から散乱角度を導出し、そのヒストグラムから非等方性を求め、偏光度を決定する。

また、コンプトンイベントを適切に解析するためエネルギーと散乱角を制限してバックグラウンドの寄与を少なくする必要がある。EBIT-CC では角度分解能 (Angular Resolution Measure : ARM) を幾何学的に求まる θ_g と運動量保存則およびエネルギー保

存則から求まる θ_k の差によって評価する。 θ_g および $ARM = \theta_g - \theta_k$ を制限することによってコンプトンイベントと矛盾しないイベントのみを選択することができる。CdTe の蛍光 X 線による 2hit イベントやバックグラウンド放射線などによって生じる 2hit イベントはコンプトン散乱の関係式を満たさないため、バックグラウンドとしてその多くを取り除くことができる。

EBIT-CC で観測した光子の偏光度は以下の手順によって求められる。

1. EBIT-CC で取得された全イベントから 2hit イベントを選択し、 φ 分布を取得する。本研究では Si でコンプトン散乱が起こり、散乱 X 線が Si もしくは CdTe side で吸収されるイベントを選択した。
2. 2hit の合計エネルギーを解析するスペクトル範囲に制限する。
3. バックグラウンド(偽イベント)の影響を減らすため θ_g および ARM を制限する。
4. 得られた φ 分布を積分値 1 となるように規格化し、装置の応答関数(無偏光 X 線測定時の φ 分布) で割る。応答関数は測定するイオンと同じ位置、同じエネルギーの点光源から放射される無偏光 X 線の φ 分布であるがそのような光源を現実に用意するのは難しいため、シミュレーションによって求める。
5. 得られた φ 分布をクライン仁科の式に基づき、

$$1 + Q\cos(2\varphi)$$

でフィッティングする。ここで Q を変調因子と呼ぶ。

6. 得られた Q を完全偏光の変調因子 Q_{100} で割ることにより偏光度 P が求まる。 Q_{100} についても測定するイオンと同じ位置、同

じエネルギーの点光源から放射される X 線によって求められる。このような光子も現実に用意するのは難しいため、シミュレーションによって求める。

2.3 共鳴エネルギーの探索

DR が発生する共鳴エネルギーを探索するため電子ビームエネルギーを掃引し X 線を Ge 検出器により測定を行った。2.1 節で述べたように電子ビームエネルギーは電子銃と DT2 の電位差で決まる。本実験では電子銃の電圧を -48.2 kV で固定し、DT 全体の電圧を図 3 のように 0.54 kV から 1.47 kV まで 100 Hz で掃引した。そのほかの実験の設定値を表 1 に示す。DT1,3 は DT2 との電位差であり、トラップポテンシャルの深さを表す。

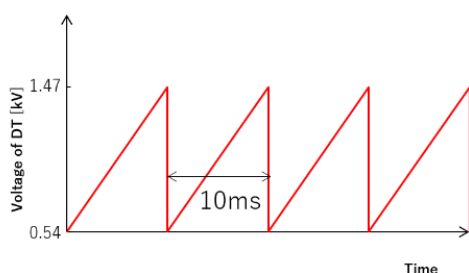


図 3 共鳴エネルギー測定のための DT 電圧の時間変化

表 1 共鳴エネルギー測定時の設定値

Electron beam energy	48.74-49.66 keV
Magnetic field	4 T
Electron beam current	115 mA
Bi temperature	580 °C
DT 1,3	15 V

Ge 検出器によるエネルギースペクトルを図 4 に示す。図中の L、M、N は L 殻、

M 殻、N 殻への放射性再結合(Radiative recombination :RR) X 線を表しており、 L_{12} と L_3 はそれぞれ全角運動量が $J=1/2, J=3/2$ であることを意味する。 L_{12} への RR X 線の中の強い発光線は DR X 線によるものであり、低いエネルギーから順に He 様、Li 様、Be 様イオンへの DR である。図 4 の L_{12} 領域を黄色い点線の範囲で電子ビームエネルギーに射影した図を図 5 に示す。図 5 より、二電子性再結合を起こす電子ビームエネルギーを求めた。

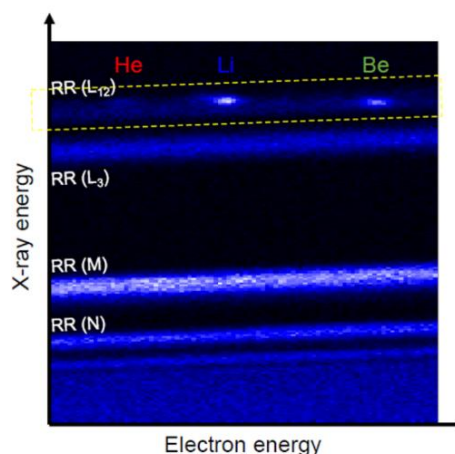


図 4 Bi 多価イオンにおけるエネルギースペクトルの電子ビーム依存性

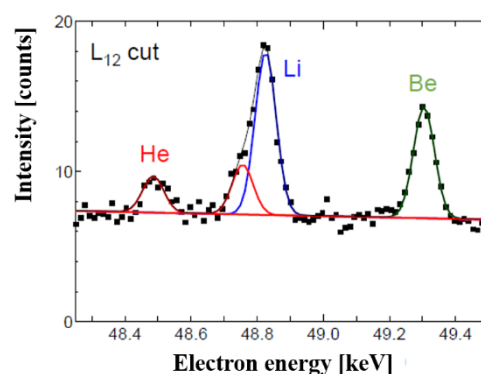


図 5 L_{12} 領域における X 線強度の電子ビームエネルギー依存性

2.4 DR X 線の測定

Tokyo-EBIT を用いて生成した多価イオンの観測を EBIT-CC および Ge 検出器を用いて行った。電子ビームエネルギーは目的とする二電子性再結合を起こすためのエネルギーに設定した。しかし、再結合 X 線の中には非共鳴過程である RR による X 線も含まれる。DR に由来する X 線の偏光度を取り出すためには RR による X 線の寄与を差し引かねばならない。そこで非共鳴条件に電子ビームエネルギーを設定したときの測定も行った。

Li 様 Bi 測定時の設定値を表 2 に示す。共鳴時の電子ビームエネルギーは図 5 より大まかな値を設定し、その後 DR X 線の強度が最大となるように調整した。電子ビーム電流および DT 電圧は多価イオンの価数分布が悪化せず、放出 X 線の強度が高くなる値を探し設定した。

表 2 Li 様 Bi 測定時の設定値

Electron beam energy (on-resnance)	49.26 keV
Electron beam energy (off-resnance)	49.44 keV
Magnetic field	4 T
Electron beam current	115 mA
DT 1,3	50 V
Live time of EBIT-CC (on-resnance)	134.1 h
Live time of EBIT-CC (off-resnance)	349.7 h
Bi temperature	580 °C

3. 実験結果

図 6 に Ge 検出器によるエネルギースペ

クトルを示す。スペクトルより、 $n=2, 3, 4$ への再結合による X 線がピークとして現れており、 $n=2$ のピークは全角運動量の値 $j=1/2, 3/2$ によって二つに分かれている。 $j=1/2$ への遷移では DR 測定時に X 線強度が増加していることが確認された。

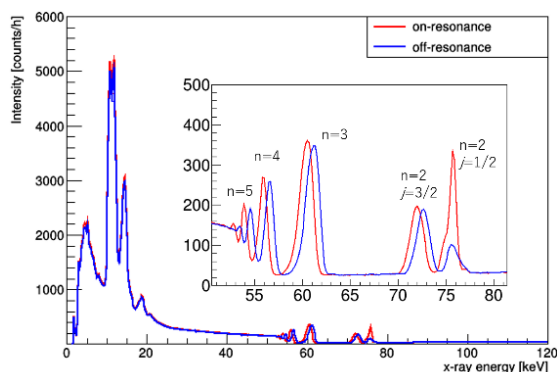


図 6 Ge 検出器によるエネルギースペクトル

EBIT-CC によるエネルギースペクトルを図 7 に示す。Si で散乱し Si もしくは CdTe で吸収されるような 2hit イベントを抽出している。散乱位置において付与するエネルギーと吸収位置において付与するエネルギーから再構成するため Ge 検出器によるスペクトルと比べると分解能、効率ともに低下する。

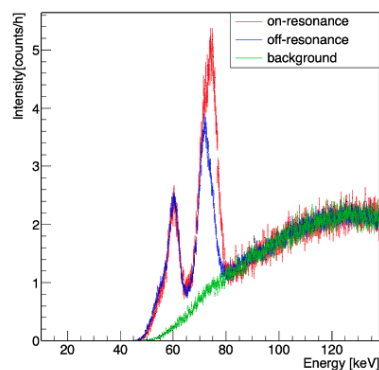


図 7 EBIT-CC によるエネルギースペクトル

3.1 RR X 線の偏光度

以下のイベント選択により $n=2$ への RR X 線スペクトルの偏光度を解析した。

- $65 \text{ keV} < \text{energy} < 78.5 \text{ keV}$
- $|\text{ARM}| > 30^\circ$
- $70^\circ < \theta_g < 130^\circ$

RR X 線の ϕ 分布を図 8 に示す。非共鳴時の ϕ 分布からバックグラウンドの寄与を差し引いた後に応答関数で割った ϕ 分布を図 9 に示す。フィッティングによって求めた変調因子 ($Q_{RR} = 0.490 \pm 0.010$) を 100% 偏光 X 線が入射した際の変調因子 ($Q_{100} = 0.740$) で割ると $P_{RR} = 0.663 \pm 0.013$ となる。

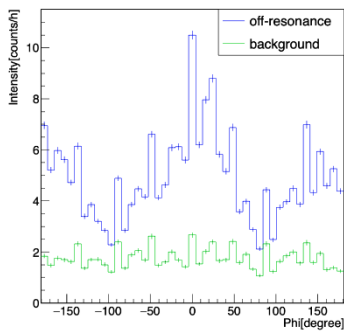


図 8 非共鳴 X 線の ϕ 分布

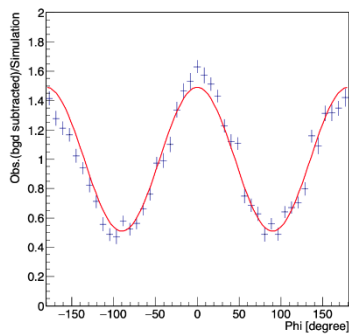


図 9 RR X 線の変調曲線

3.2 DR X 線の偏光度

偏光度を解析するイベントを以下のように選択した。

- $73 \text{ keV} < \text{energy} < 79 \text{ keV}$

- $\text{ARM} < 30^\circ$
- $60^\circ < \theta_g < 130^\circ$

ϕ 分布を図 10 に示す。共鳴時の ϕ 分布から非共鳴時の寄与を差し引いた後に応答関数で割った ϕ 分布を図 11 に示す。フィッティングによって求めた変調因子 ($Q_{DR} = 0.220 \pm 0.023$) を 100% 偏光 X 線が入射した際の変調因子 ($Q_{100} = 0.774$) で割ると偏光度は $P_{DR} = 0.284 \pm 0.030$ となる。

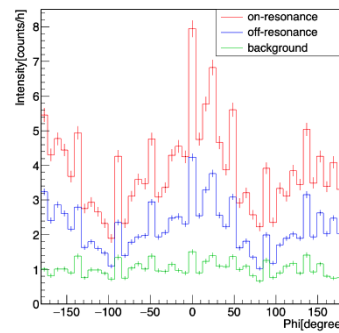


図 10 共鳴および非共鳴 X 線の ϕ 分布

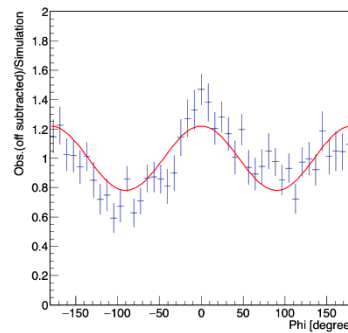


図 11 DR X 線の変調曲線

4. 考察

Li 様 Bi の DR X 線の偏光度を図 12 の赤点で記す。一点鎖線はクーロン相互作用のみを考慮した理論計算、破線はブライト相互作用、実線は一般化ブライト相互作用を考慮に入れた理論計算、各点は先行研究の結果を示す。

クーロン相互作用に加えブライト相互作用が大きな寄与を与えることを確認できる。また、以前の研究に比べ統計的不確かさが小さくなり、ブライト相互作用と一般化ブライト相互作用の差を議論できるまでの精度が得られている。本研究で得られた偏光度は一般化ブライト相互作用の理論計算とは差異が見られる。応答関数や Q_{100} を求めるシミュレーションの最適化を進めておりその結果によって絶対値は修正される可能性がある。

また、統計誤差が小さくなり、これまで議論してこなかった系統的な不確かさを議論しなければならない段階にきている。より詳細に検討するためシミュレーションによる評価が必要である。

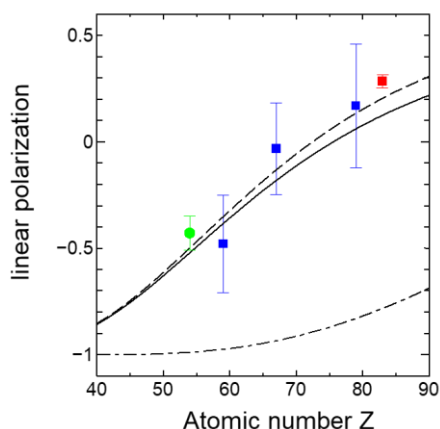


図 3 Li 様多価イオンに対する DRX 線の偏光度の理論計算および実験結果[2,5-8]

5. まとめ

- EBIT-CC を Tokyo-EBIT に設置することにより、多価イオンの再結合過程から放出される X 線の偏光度を測定した。

- Li 様 Bi の DRX 線の偏光度測定を行い、クーロン相互作用に加えブライト相互作用が大きな寄与を与えることを確認した。

- ブライト相互作用のゼロ周波数近似を検証可能な統計的不確かさを達成した。

- 系統的な不確かさの検討をより詳細に進める必要がある。

参考文献

- [1] N.Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 073203 (2008).
- [2] X.-M. Tong et al., J. Phys. B **48**, 144002 (2015).
- [3] S.Watanabe et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **765**, 192 (2014).
- [4] O. Klein et al., Zeitschrift für Physik, Vol.52, Issue 11-12, pp 853–868 (1929).
- [5] Z. Hu et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 073002 (2012).
- [6] Z. Hu et al., Phys. Rev. A **90**, 062702 (2014).
- [7] H. Jörg et al., Phys. Rev. A **91**, 042705 (2015).
- [8] C. Shah et al., Phys. Rev. A **92**, 042702 (2015).