

# 二電子性再結合から放出される X 線の偏光測定

中村信行研究室 1233018 大澤央

## 1 背景・目的

我々の研究室では原子から多くの電子を取り去った多価イオンと電子との二電子性再結合 (Dielectronic Recombination: DR) 過程を調べている。この過程においては、自由電子が励起状態に捕獲されると同時に内殻電子を励起し、二重励起状態を形成する。形成された二重励起状態は X 線を放出し、脱励起する。

近年、DR の放出 X 線の角度分布においてブライト相互作用が支配的な影響を与えるという理論計算がなされた。[1] ブライト相互作用は電子間相互作用における相対論的効果を説明するために導入されたものだが、一般的にクーロン相互作用などに比べて寄与が小さい。しかしこの理論計算によれば、クーロン相互作用において  $90^\circ$  で凹であった分布が、ブライト相互作用によって  $90^\circ$  で凸となるなど角度分布が質的变化を示すことが予言された。

我々の研究室では電子ビームイオントラップ (EBIT)[2] を用いて、この理論による予言を実験で実証することに成功した。[3] しかし、その実験では EBIT 内イオン存在比の測定による積分共鳴強度と X 線強度測定による微分共鳴強度測定を組み合わせ、等方的な角度分布を持つ特殊な遷移に規格化することにより角度分布を決定することが必要であった。

一方、放出される X 線の偏光度の絶対値を測定することができれば、先の実験で用いたような規格化を必要としないため、あらゆる遷移について角度分布と等価な情報である偏光度に対するブライト相互作用の寄与を研究することができる。そこで、本研究では硬 X 線に対応した偏光計を製作し、DR から放出される X 線

の偏光度を測定することを目的とした。

## 2 コンプトン散乱型偏光計

コンプトン散乱は、電子による X 線の非弾性散乱である。X 線が物質に入射してコンプトン散乱を起こすと、衝突した物質中の電子にエネルギーを与える。この電子に与えられるエネルギーは、次式で表される。

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

ここで、 $E_0$  は入射 X 線のエネルギー、 $m_0c^2$  は電子の静止エネルギー、 $\theta$  は X 線の散乱角である (図 1)。式 (1) からわかる通り、 $\theta$  の増加に伴って散乱 X 線のエネルギーが減少する。例として  $60\text{keV}$  の入射 X 線に対して、散乱 X 線と反跳電子のエネルギーを散乱角の関数として図 2 に示す。

また、偏光 X 線を入射させた際のコンプトン散乱の微分断面積は、次のクライン・仁科の

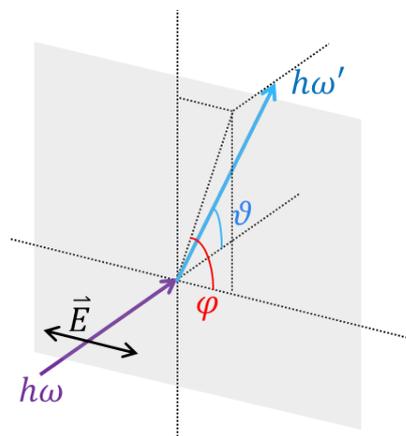


図 1 コンプトン散乱の概念図

式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z \frac{r_e^2}{2} \frac{E^2}{E_0^2} \left\{ \frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \right\} \quad (2)$$

ここで、 $Z$  は標的原子の原子番号、 $r_e$  は電子の古典半径、 $E$  は散乱 X 線のエネルギー、 $E_0$  は入射 X 線のエネルギー、 $\varphi$  は散乱角  $\theta$  の衝突平面への投影と偏光方向がなす角である。式 (2) は、図 3 から分かるように、偏光方向と垂直な方向に散乱されやすいことを示している。逆に、コンプトン散乱 X 線の角度分布を調べることで、入射 X 線の偏光方向を知ることが可能である。

コンプトン散乱型シンチレーション偏光計は、この原理を用いており、散乱体および散乱 X 線の吸収体にシンチレータを用いて散乱角度分布を測定するものである。

コンプトン散乱型シンチレーション偏光計の概略図を図 4 に示す。シンチレータ結晶により

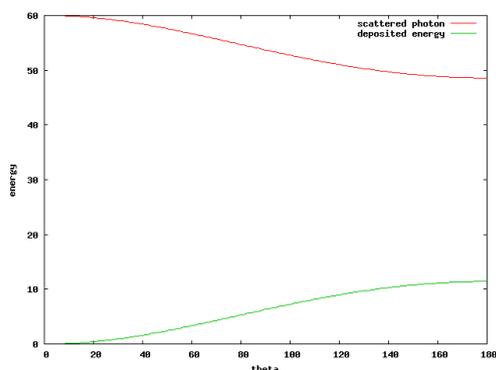


図 2 60keV の X 線がコンプトン散乱した際の散乱 X 線 (赤) と反跳電子 (緑) のエネルギー

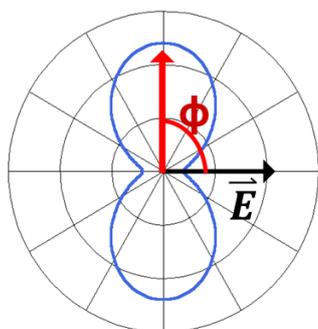


図 3 コンプトン散乱の角度分布

X 線がコンプトン散乱すると、付与されたエネルギーにより結晶原子が励起される。一方、散乱された X 線がシンチレータ結晶により光電吸収されエネルギーを失うことでもシンチレーション結晶が励起される。これらが脱励起する際に発する可視光を光電子増倍管を用いて電気信号として取り出す。シンチレータでの発光量はコンプトン散乱や光電吸収によって X 線が失ったエネルギーに比例するため、信号の波高分布からエネルギースペクトルを取得できる。

コンプトン散乱の断面積は原子番号  $Z$  に比例し、光電吸収の断面積は  $Z^{4-5}$  に比例する。そのため、散乱体としては比較的軽元素で構成されるシンチレータ、吸収体としては比較的重元素で構成されるシンチレータの二種類で構成される。散乱位置と吸収位置を関連付けることで、散乱方向を同定、角度分布を取得する。

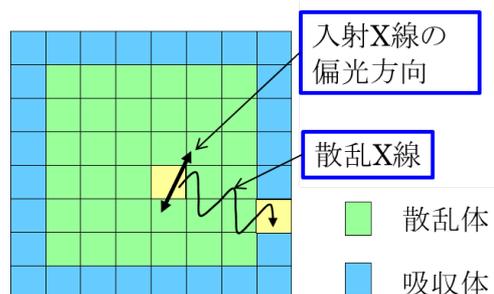


図 4 コンプトン散乱型シンチレーション偏光計

### 3 構成

図 5 に本研究で製作した偏光計の外観を示す。本偏光計では、散乱体として 36 本のプラスチックシンチレータを  $6 \times 6$  の正方形に並び、その周りを囲むように吸収体として 28 本の CsI シンチレータを配置した。コンプトン散乱によって生じたシンチレーション光を効率良く光電子増倍管へ導くため、これらのシンチレータをそれぞれ反射材としてテフロンテープで覆った。シンチレーション光の検出は、64 ピクセルに分けられてそれぞれで独立した信号を取得できる位置有感型光電子増倍管を採用する

ことでコンプトン散乱を起こした散乱位置、散乱 X 線を吸収した吸収位置の測定を行うことを可能とした。



図5 検出器外形

## 4 評価実験

放射性同位体からの放射線を用いて動作確認を行った。各ピクセルの ch 番号を図6のように定義した。

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64

図6 各ピクセルの ch 番号

### 4.1 エネルギースペクトル

シンチレーション検出器としての性能評価を行うため、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$  からの X 線を各 CsI シンチレータに照射し、そのエネルギースペクトルを取得した。得られた波高分布は、ピクセルによってピーク位置に大きな違いがあった。これを補正するため、 $^{241}\text{Am}(60\text{keV})$  と  $^{137}\text{Cs}(32\text{keV})$  のピークから各ピクセルのエネルギー較正を行った。

エネルギー較正後の波高分布と Ge 検出器を用いて得られたスペクトルを図7に示す。各ピクセルに対して補正が必要となるが、波高分布

によりエネルギースペクトルを取得することが可能であることが確認できた。

### 4.2 コンプトン散乱イベントの抽出

中央近くのプラスチックシンチレータ (29ch) に X 線源として  $^{241}\text{Am}$  を設置したときの、CsI シンチレータ、およびプラスチックシンチレータにおける波高分布を図8、図9にそれぞれ示す。 $^{241}\text{Am}$  を設置する際には、他のピクセルに X 線が入射しないようコリメータをシンチレータとの間に入れた。また比較のため  $^{241}\text{Am}$  を設置しないときの波高分布も示す。

図8において、5ch 付近に現れた鋭いピークは線源の有無に因らないバックグラウンド、線源を置いたことで現れた 20ch 付近と 50ch 付近の2つのピークは、 $^{241}\text{Am}$  からの X 線がプラスチックシンチレータによって散乱され、CsI シンチレータで吸収されたものと考えられる。

図9では、線源の有無に因らず 0ch 付近と 25ch 付近にピークが現れているが、0ch 付近のものは電気ノイズ、25ch 付近の物は環境からくるバックグラウンドである。

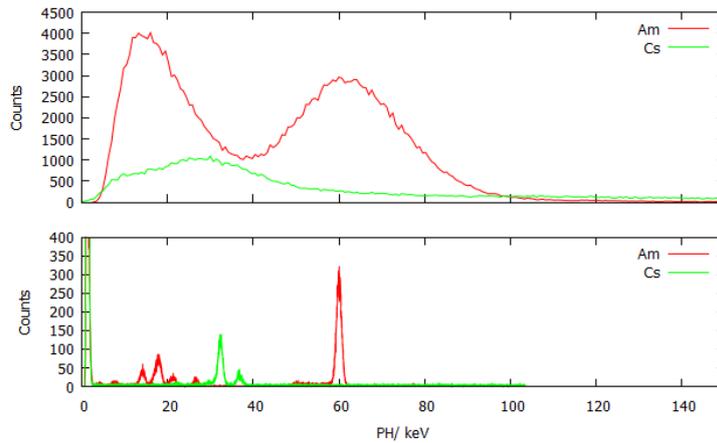


図7 (上) $^{241}\text{Am}$ (赤)、 $^{137}\text{Cs}$ (緑)の5ch(CsI)でのスペクトル。(下)Ge 検出器により得られた $^{241}\text{Am}$ (赤)、 $^{137}\text{Cs}$ (緑)のスペクトル

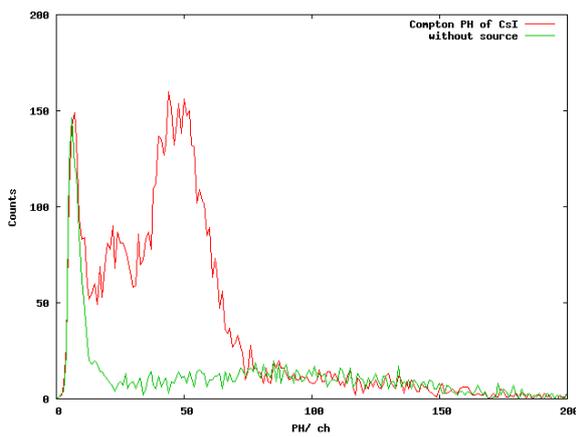


図8 29ch(プラスチック)に $^{241}\text{Am}$ を置いたとき(赤)と線源なし(緑)でのCsIシンチレータにおける波高分布。計測時間は700s。

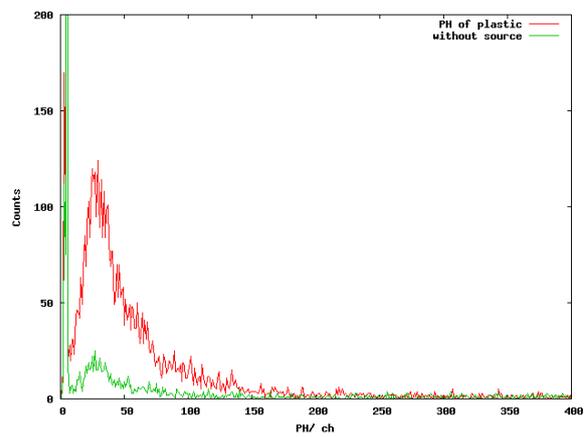


図9 29ch(プラスチック)に $^{241}\text{Am}$ を置いたとき(赤)と線源なし(緑)でのプラスチックシンチレータにおける波高分布。計測時間は700s。

$^{241}\text{Am}$ からの60keVのX線がプラスチックシンチレータでコンプトン散乱した場合、1~11keVのエネルギーがプラスチックシンチレータに付与される。これは、図9において10~110chに相当するが、50ch以下ではバックグラウンドの寄与が大きいため、プラスチックシンチレータで50~110chである信号を抽出すれば60keV X線によるコンプトンイベントのみを抽出できると考えられる。図8のCsIシンチレータスペクトルは、同時に検出されたプ

ラスチックシンチレータの信号の波高にかかわらず得られたものであるが、プラスチックシンチレータの波高に応じてスペクトルを分離した結果を図10に示す。赤がプラスチックシンチレータの波高が10~50chである場合のスペクトルで、緑が50~110chである場合のスペクトルである。前者では、60keVのX線による信号だけでなく、26keVなどの低エネルギーX線によるコンプトン信号が25ch付近に存在す

る。一方、後者では、この低エネルギー X 線によるピークが消滅している。これは、この低エネルギーの X 線のコンプトン散乱によるエネルギー付与が波高において 1~25ch 程度であるため、50~110ch の波高で抽出することにより除外することが出来るためである。以上より、プラスチックシンチレータで 50~110ch の波高を持つ信号のみを選ぶことにより、60keV X 線によるコンプトンイベントのみを抽出できることを確認できた。

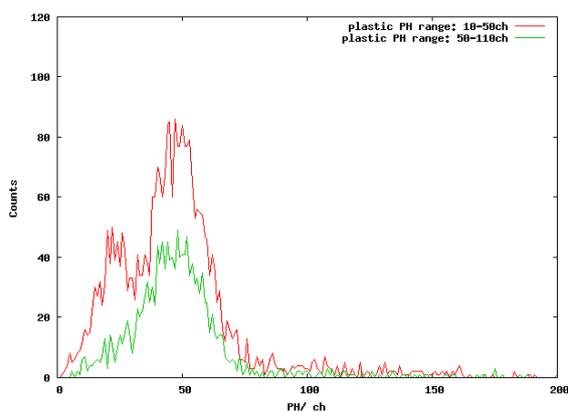


図 10  $^{241}\text{Am}(60\text{keV})$  を設置したときの CsI シンチレータの波高分布。プラスチックシンチレータの波高によるディスクリを 50ch 刻みで変化させた

## 5 角度分布測定

偏光計としての性能評価を行うため、コンプトン散乱を起こしたときに発光したプラスチックシンチレータと CsI シンチレータの位置を関連づけ、2 つのピクセルのなす角度を決定し、その分布を得た。

今回の実験では、偏光 X 線源を用意することが出来なかったため、シンチレータ検出器の性能評価にも使用した無偏光の X 線源  $^{241}\text{Am}$  を使用した。前節で得られた結果から、プラスチックシンチレータ 29ch で 50~110ch、CsI シンチレータで 35~80ch の波高の信号のみを使用することで  $^{241}\text{Am}$  の 60keV X 線によるコンプトン信号について角度分布測定を行った。

図 11 に散乱角の定義を示す。

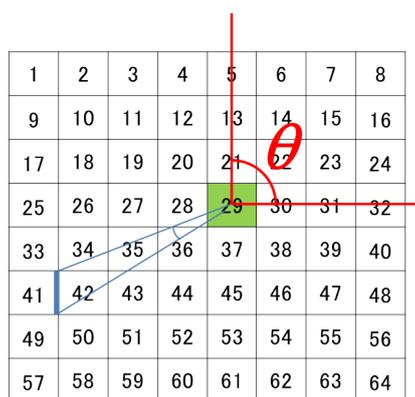


図 11 散乱角度の定義。29ch から 32ch の方向を  $0^\circ$  とし、反時計回りを正とした。青は 29ch から見た各 CsI シンチレータへの入射面。

線源を設置したプラスチックシンチレータ (29ch) から 32ch の方向を  $0^\circ$  とし、反時計まわりを正としたときの X 線の散乱角度分布を図 12 に示す。

29ch の中心から各 CsI シンチレータを見た際、29ch からの距離、角度で散乱 X 線を検出できる効率は異なる。図 12 の青線は、29ch の中心から各 CsI シンチレータの入射面へ引いた線分の角度を計算した結果である。29ch から見て  $45^\circ$  方向にあるピクセルのカウントが 0 になっているのは、隣接ピクセルに遮られるため 29ch から見た入射面が存在しないためである。この実験結果より、見込み立体角による補正が必要となることがわかる。

図 12 の見込み立体角を考慮した計算値 (青線) が一定となるように係数を乗じて補正をした結果を図 13 に示す。無偏光 X 線によるコンプトン散乱において、散乱 X 線は等方的に放射されるため、その角度分布は直線になるはずだが、図 13 には  $30^\circ$  周辺と  $230\sim 330^\circ$  周辺のカウント数が大きく落ち込んでいる。特に  $230\sim 330^\circ$  にあたるピクセルは、検出器の下一辺のシンチレータにあたるため、検出器の下一辺でのコンプトン信号が著しく少ないことを表し

ている。各 CsI シンチレータに直接  $^{241}\text{Am}$  を設置したときのデータにおいては、他のピクセルに比べて下一辺のカウント数が著しく低いということはないため、コンプトン信号の抽出を行っている解析プログラムに問題があると考えられる。

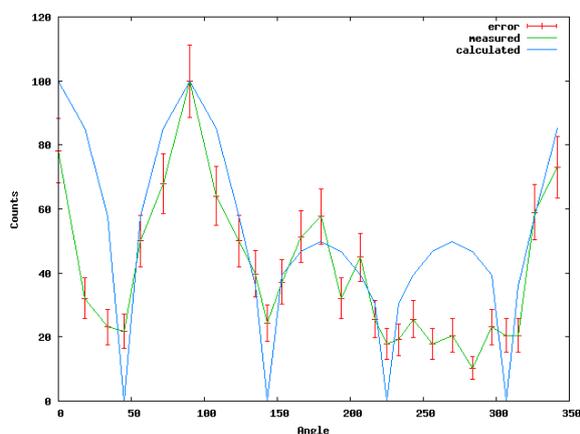


図 12 29ch に  $^{241}\text{Am}$  を置いたときの散乱方向の角度依存性。青線は見込み立体角を考慮した計算値。

29ch から見た CsI シンチレータへの入射面から計算値を決定しているため、四隅 (1、8、57、64ch) での値は 0 となっている。

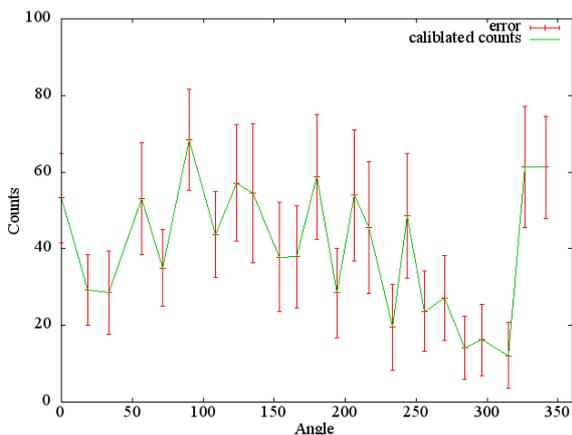


図 13 29ch に  $^{241}\text{Am}$  を置いたときの散乱方向の角度依存性。見込み立体角を考慮して補正を行った。

無偏光線源によるコンプトン散乱は等方的であるため、角度に依存せず一定のカウント数になるはずだが、 $300^\circ$  付近にカウントの落ち込みがある

## 6 まとめ

本研究では、重原子多価イオンにおけるブライト相互作用の寄与について理解を深めるため、多価イオンからの放射 X 線の偏光度を直接測定するためのコンプトン型 X 線偏光計の開発を行い、X 線スペクトルの取得を行った。

$^{241}\text{Am}$  からの X 線を製作した偏光計に照射し、プラスチックシンチレータにおけるコンプトン散乱、CsI シンチレータにおける散乱 X 線の光電吸収を、それぞれ波高弁別により選択することで、コンプトン散乱信号を取得することに成功した。

無偏光線源を用いたコンプトンイベントの角度分布測定では予想したような結果が得られなかったが、装置の幾何学的デザイン、位置有感型光電子増倍管のゲインの不均一さなどを考慮し、解析プログラムの改良を行っていく。また、本研究では偏光 X 線源を用意することが出来ず、偏光計としての性能評価が十分にできなかった。小型の X 線源とプラスチックシンチレータを用いた偏光 X 線発生装置の導入も考え、偏光検出能力の評価も行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] S. Fritzsche *et al.*, Phys. Rev. Let. **103**, 113001 (2009)
- [2] H. Watanabe *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn, **66**, 3795 (1997)
- [3] Z. Hu, 2012, 電気通信大学博士論文