

硬 X 線用偏光計の製作

中村信行研究室 1133010 石黒雄介

1 背景・目的

近年の理論研究 [1] において、二電子性再結合から放出される X 線の角度分布および偏光度にブライト相互作用が顕著に表れることが示された。我々の研究室では角度分布の測定により、このブライト相互作用の効果を実験的に確かめたが [2, 3]、その実験では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遷移に規格化することにより、非等方性パラメータと呼ばれる角度分布を決定する因子を求めた。しかし、偏光度を測定することができれば、X 線のみでの測定で規格化することなく非等方性パラメータを決定することができる。

本研究は、多価イオンの二電子性再結合過程から放出される X 線の偏光度に対するブライト相互作用の効果を検証するために、硬 X 線用偏光計を開発する。

2 コンプトン散乱型偏光計の原理

コンプトン散乱とは、入射 X 線が物質中の電子と相互作用し、ある角度へと非弾性散乱される現象である。入射 X 線は散乱される時にエネルギーの一部を、衝突した電子へと付与する。散乱 X 線のエネルギー E と散乱角 θ の関係は次の式で表される [4]。

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

ここで、 E_0 は入射 X 線のエネルギー、 $m_0 c^2$ は電子の静止エネルギー (511 keV) を表している。入射 X 線のエネルギーが電子の静止エネルギーに対して十分小さいときは非相対論的に扱われる。この散乱はトムソン散乱と呼ばれ、散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーと変わらない弾性散乱である。

物質中のコンプトン散乱の散乱角に対する散乱確率は標的中の電子数に依存するので、原子 1 個当たりに対する散乱断面積は標的を構成する原子番号 Z に比例する。X 線のコンプトン散乱による微分断面積は次式のクライン・仁科の式で与えられる。

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

ここで、 φ は入射 X 線の偏光方向と散乱 X 線の進行方向のなす角である。式 (2) より、 $\varphi = 90^\circ, 270^\circ$ のときに散乱確率が最も大きくなり、 $\varphi = 0^\circ, 180^\circ$ のときに最も小さくなる。つまり、コンプトン散乱を起こした X 線は偏光方向に対して垂直に散乱される確率が高くなる。散乱 X 線の角度分布を図 1 に示す。

コンプトン散乱型偏光計は、X 線を散乱させる散乱体と、散乱 X 線を光電吸収させる吸収体によって構成されており、散乱 X 線強度の角度分布から偏光度を得る。

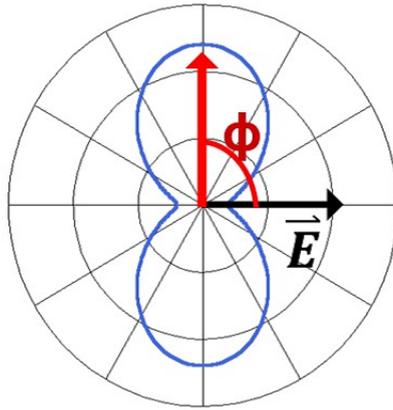


図 1: コンプトン散乱の角度分布

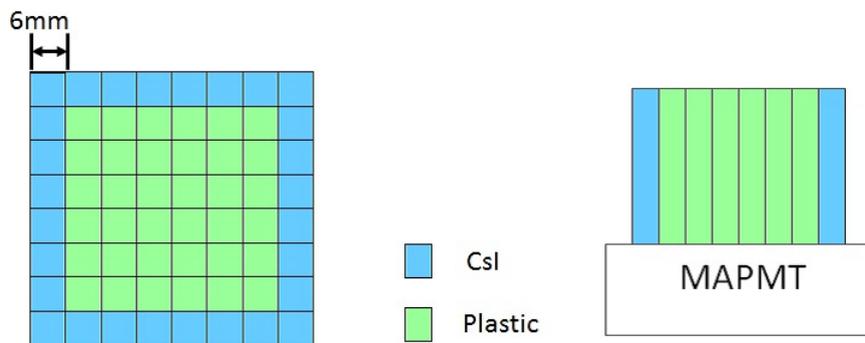


図 2: コンプトン散乱型偏光計の概念図

3 コンプトン散乱型シンチレーション偏光計の製作

我々が製作した偏光計(図2)では、中心に散乱体としてプラスチックシンチレータ 36 本、散乱体を囲うように吸収体として CsI(Tl) シンチレータ 28 本を配置した。シンチレータからの信号は 64 チャンネルマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) により検出する。それぞれのシンチレータのサイズは $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 30\text{mm}$ であるが、MAPMT のピクセルサイズは $5.8\text{mm} \times 5.8\text{mm}$ であるので、テフロンテープを巻くことで、サイズの調整を行う。サイズは適宜ノギスで計測しながら、テフロンテープの巻き数を調整した。テフロンテープはスペーサーとしてだけでなく、反射材としての役割も果たす。それぞれのシンチレータをテフロンテープで巻いたのち、間に階段状に折った反射材を挟み込みながらシンチレータアレイを組んでいく。組みあがったシンチレータアレイはステンレス製の抑えで固定し MAPMT に接合する。製作した偏光計の写真を図 3 に示す。

MAPMT はクリアパルス社製のヘッドアンプに接続した状態で、製作したアクリルプレートに固定しておく。MAPMT の下端は、シンチレータアレイを固定する部分のアクリルプレートよりも 1cm ほど高くなっている。これは、シンチレータアレイを抑えている金具の厚みを考慮し、シンチレータとピクセルの下端が合うようにしたものである。



図 3: 製作したコンプトン散乱型偏光計を横から見た図

4 検出器評価

4.1 エネルギースペクトルの取得

製作した偏光計の動作試験を行うために、放射性同位元素 (^{55}Fe 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am) を用いてエネルギースペクトルの取得を行った。その結果を 4 に示す。各放射性同位元素からの主要な X 線を用いて、線形関数によってエネルギー較正を行った。

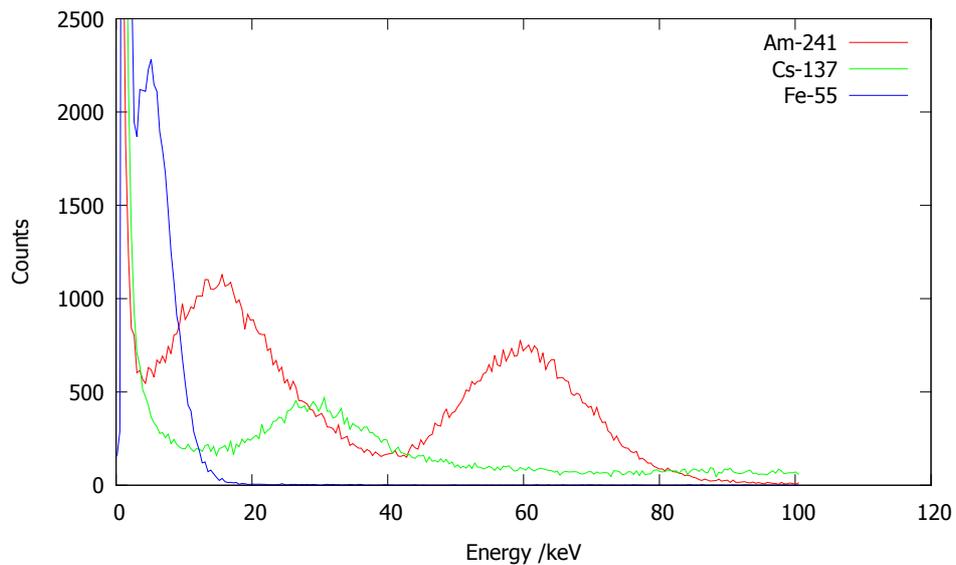


図 4: 較正したエネルギースペクトル

4.2 コンプトン散乱信号の検出

T3 のプラスチックシンチレータ (図 5 の挿入図参照) に ^{241}Am からの 60keV の X 線を入射した時のエネルギースペクトルを図 5 に示す。図 5 に見られるように、このスペクトルは ^{55}Fe からの 5.9keV の X 線によるスペクトルとほぼ同じ位置にピークを有するため、このプラスチックシンチレータからの信号はコンプトン散乱により約 5keV のエネルギーを得た反跳電子による信号だと考えられる。

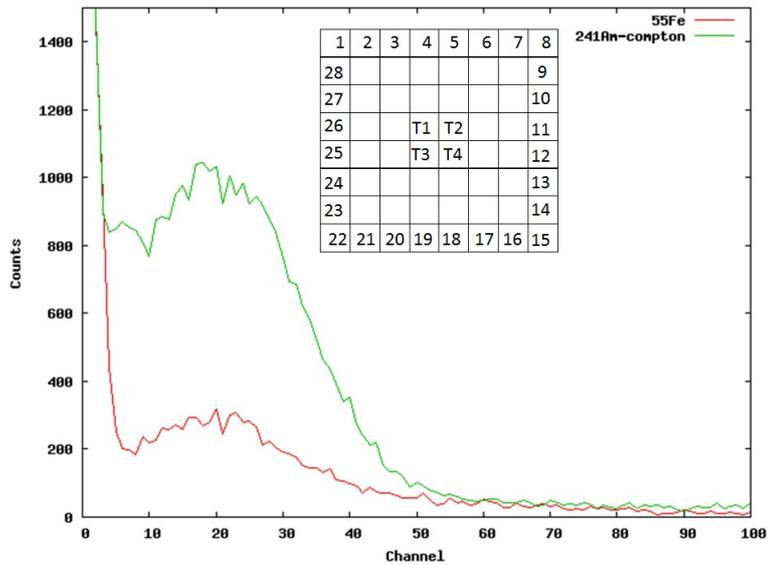


図 5: プラスチックシンチレータ (T3) で取得したコンプトン散乱による反跳電子のエネルギースペクトルと ^{55}Fe の光電吸収スペクトル

同時に CsI(Tl) シンチレータでも吸収信号の取得を行った。CsI(Tl) シンチレータでは散乱 X 線による光電吸収の信号を取得するため、エネルギーとして入射 X 線からコンプトン散乱で電子に付与したエネルギーを差し引いたエネルギーのスペクトルが観測できるはずである。つまり、図 5 で得られたエネルギーが約 5keV なので、CsI(Tl) シンチレータでは約 55keV のスペクトルが得られるはずである。

測定したスペクトルを図 6 に示す。

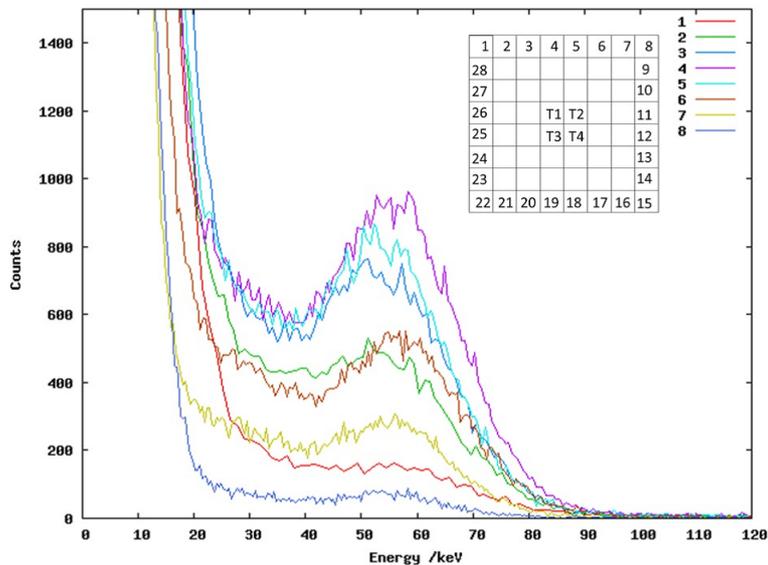


図 6: CsI(Tl) シンチレータで取得したコンプトン散乱の散乱 X 線による光電吸収のエネルギースペクトル (1~8ch)

図 6 に見られるように、予想された通り約 55keV にピークを持つ信号が得られたため、コンプトン散乱した信号及び散乱 X 線を光電吸収した信号が取得できたものと考えられる。

5 まとめと今後の展望

本研究では、ブライト相互作用の効果を検証するために、多価イオンの二電子性再結合過程から放出される X 線の偏光度スペクトルを解析するための偏光計を開発した。

製作した偏光計はシンチレーション検出器をセグメント化し、コンプトン散乱を用いて偏光度を得るものである。動作試験として、CsI(Tl) シンチレータで放射性同位元素のエネルギースペクトルの取得を行った。図 4 に示したように、使用した放射性同位元素の主なピークを取得することができた。

プラスチックシンチレータに X 線を入射したときの、散乱信号および吸収信号の取得を行った。図 5、6 に示したように、散乱信号及びコインシデンスした吸収信号を取得することができた。

以上から、製作した偏光計はシンチレーション検出器として動作していること、コンプトン散乱の信号を取得できていることを確認した。

今後、高エネルギー加速器研究所の偏光ビームライン等を用いた偏光計としての性能評価を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Stephan Fritzsche, Andrey Surzhykov, and Thomas Stöhlker. Phys. Rev. Lett., 103, 113001, (2009).
- [2] Z. Hu, *et al*, Phys. Rev. Lett. **108**, 073002 (2012).
- [3] Z.Hu, "EXPERIMENTAL STUDIES ON DIELECTRONIC RECOMBINATION OF HIGHLY CHARGED HEAVY IONS" The UNIVERSITY OF ELECTRO-COMMUNICATIONS, 2012, Ph.D. thesis.
- [4] Glenn F.Knoll, 「放射線計測ハンドブック第 2 版」(日刊工業新聞社、1991)