# コンプトン散乱の観測と再構成

課題研究P6 SOIグループ 井戸垣 洋志・奥野 智行・小野坂 健



X線検出素子XRPIX2bを用いて<sup>241</sup>Amの59.5keVの ピークのコンプトン散乱を観測し、反跳電子と散 乱光子が観測された位置とエネルギーの情報から コンプトン再構成を行い、線源の位置を特定する。

#### コンプトン散乱の観測と再構成

1. 実験の原理、用いた素子

2. 実験のセットアップ

- 3. コンプトンイベントの抽出と再構成
- 4. 角度分解能についての考察
- 5. まとめ



#### コンプトン散乱

• 簡単のため、散乱前の電子は静止しているとすると、





## XRPIX2bでのコンプトン散乱の観測





2. 実験のセットアップ

実験で得られたスペクトル例(<sup>241</sup>Am)



※ノイズ(暗電流)を減 らすため、-40°Cに冷 やして実験を行った。

13keVのピークが大き く、コンプトン散乱の 反跳電子の作る Compton Edgeが見ら れない。

→60keVは通し、〜13keV は通さないような遮蔽が 必要。





遮蔽前後のスペクトル比較(<sup>241</sup>Am)



### 3. コンプトンイベントの抽出と再構成



コンプトンイベントの抽出  

$$\cos \theta_{comp} = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

先ほどのイベントから

 -1 < cos θ<sub>comp</sub> < 1 を満たす</li>
 E<sub>1</sub>、 E<sub>2</sub>を持つイベントのみ
 を取り出して再構成を行う。





## 再構成の結果(線源の位置:中央)





#### 取り出すエネルギー帯の決定

次に線源が中央にあるデータを用い、双曲線が素子の真上を通るイベントのみを取り出し、エネルギー再構成を行った。



### 再構成の結果(線源の位置:中央)



#### エネルギー再構成(線源の位置:中央) **Energy summation** hist Entries 495 ~70keVのピークの原因 60 35 63.19 Mean (偶然同時計数) Std Dev 7.945 $\sim$ 60keV 30 E<sub>2</sub>(keV) b<sup>2</sup> 50 ~60keVのピーク にピーク $\sim$ 70ke 25 20 30 15 20 10 10 $E_1(keV)$ 0<sup>L</sup> 30 20 50 60 70 10 40 80 90 100 Energy(keV) 0. 20 60 30 50 10 40

#### エネルギー再構成(線源の位置:中央)



60keVのピークを gaussianでfitting した時の Sigma=1.90(keV)





#### 線源の位置:中央



#### 線源の位置:素子の右下



## 再構成の結果の比較(合計58-62keVのevent)



コンプトン散乱角の比較(合計58-62keV)



#### コンプトン散乱角度の比較 (60-120度、150eventで比較)

**Compton Angle** hist2 hist2 Entries 150 150 Entries 91.94 Mean 91.62 Mean 12 Std Dev 15.21 12 Std Dev 19.24 10 10 8 8 6 6 4 2 2 90 100 60 70 80 110 120 70 80 90 100 60 110 angle(deg) 線源の位置:素子の右下 線源の位置:中央

**Compton Angle** 

120



## Angular Resolution Measure(ARM)

• Angular Resolution Measure(ARM)とは、compton散乱の式

$$\cos\theta_{comp} = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \label{eq:ellipsi}$$

から計算した角 $\theta_{comp}$ と線源、反跳電子、散乱光子の位置から計算した角 $\theta_{geom}$ の差

$$\theta_{\rm ARM} = \theta_{\rm comp} - \theta_{\rm geom}$$

で算出され、その半値全幅がコンプトンカメラの角度分解能の 指標として用いられる。



#### (Mean)=-8.88(deg) (Sigma)=23.1(deg)

#### ARMに幅ができる原因

- •エネルギー分解能(素子の性能によるもの)
- ・位置分解能(pixelに有限な大きさがあることによる誤差)
- Doppler Broadening

#### エネルギー分解能 •エネルギー分解能と角度分解能の関係

$$\cos\theta_{comp} = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2}\right)$$

$$\begin{split} \Delta(\cos\theta) &= m_e c^2 \left[ -\frac{\Delta E_1}{(E_1 + E_2)^2} + \left( \frac{1}{E_2^2} - \frac{1}{(E_1 + E_2)^2} \right) \Delta E_2 \right] \\ \Delta\theta_{\text{Energy}} &\simeq -\frac{\Delta(\cos\theta)}{\sin\theta} \end{split}$$

以上の式を解析に用いた各eventについて計算、ヒストグラムを描画。この平均値を $\Delta \Theta_{\text{Energy}}(エネルギー分解能の角度分解能への寄与)とする。$ 

#### **Energy Angular Resolution**



#### (Mean)=9.96(deg) (Sigma)=4.13(deg)



 今回の解析では、平面方向に30μm×30μm、深さ方向に 180μm(空乏層厚)の有限なサイズによる誤差がある。





 解析に用いたイベントの反跳電子、散乱光子の持つ位置情報を 元に、前スライドの許される範囲内からランダムに点を選んで 線源との角度を求め、 $\theta_{geom}$ との差、 $\theta_{Position} = \theta - \theta_{geom}$ を取るという試行を10000回行った。 この分散を $\Delta \theta_{\text{Position}}$ (位置分解能の角度分解能 θ geom への寄与)とする。 θ





#### Doppler Broadening

ここまでは散乱前の電子は静止していると仮定してきたが、実際 には電子は運動量を持っている。そのため散乱光子はドップラー 効果を受け、同じ散乱角でもエネルギーにずれが生じる。

このずれは散乱前の電子の運動量の大きさ、向きによるので、角度分解能への影響を定量的に測ることは難しい。

しかし、このDoppler Broadeningの影響はエネルギーが小さく なるほど大きくなるので、60keVという低エネルギー領域ではか なり大きく効いてくると考えられる。

# 角度分解能の考察 $\theta_{ARM} = \theta_{comp} - \theta_{geom}$

・ 位置分解能は $\theta_{geom}$ に効き、エネルギー分解能とDoppler Broadeningは $\theta_{comp}$ に効く。各値の関係、

$$\Delta \theta_{\rm ARM}^2 = \Delta \theta_{\rm Energy}^2 + \Delta \theta_{\rm Doppler}^2 + \Delta \theta_{\rm Position}^2$$

より、Doppler Broadeningの効果を見積もると、

$$\Delta \theta_{\rm Doppler} = \sqrt{23.1^2 - 9.96^2 - 3.76^2} = 20.5$$

となる。

## 角度分解能のまとめ

ARM	エネルギー分解能	位置分解能	Doppler Broadening
23.1	9.96	3.76	20.5

単位:deg

#### 5. まとめ

- Compton散乱特有の<sup>241</sup>AmスペクトルをXRPIX2bを用いて観測 することができた。
- 再構成で位置を特定するには至らなかった。
- 角度分解能にはDoppler Broadeningの寄与が大きい。