

カメラを用いたシンチレータ中におけるガンマ線の減衰の観測

研究レポート

大阪府立北野高等学校1年 佐々木柚榎

実施期間: 2023年4月から(継続研究)

A. 研究の目的

放射線の観測方法の一つに、放射線が入射した時に光を発する物質であるシンチレータからの発光であるシンチレーション光を観測する方法がある。私はシンチレータを用いた放射線検出器を用いて宇宙線ミューオンを検出していた際に、中で実際にどの様にシンチレータが発光しているのかに興味を持ち、この研究を始めた。

この研究の一つ目の目的は、一般的に感度の良い光電子増倍管などの専門的な光検出器が用いられるシンチレーション光の検出を、私たち中高生にとってより直感的に理解しやすいようにカメラを用いて行うことだ。

二つ目の目的は、ヨウ化セシウム(CsI)シンチレータなどの密度が高いシンチレータでは、放射線がそのエネルギーに応じてシンチレータ内で減衰することから、発光分布の観測によってエネルギーを推定することが可能であるか確かめることだ。シンチレータ中の発光分布をカメラで撮影することができれば、明るさの変化の様子から、ガンマ線のエネルギーを推定することができると考えた。

先行研究として、シンチレーション光のイメージングからアルファ線などの一つ一つの粒子の軌跡に注目して測定を行った例 [1] はあったが、単一結晶中の光の分布に言及しているものは見つけれなかった。

そこで、①デジタルカメラでの撮影、②冷却CCDカメラを用いた撮影の、2つの実験を行った。

デジタルカメラを用いた撮影は、冷却CCDカメラでの撮影に比べ簡単であるが、ノイズが多い。一方で、冷却CCDカメラを用いた撮影は手間がかかるが、ノイズの少ない撮影を行う事ができる。そこで、今回の研究では、はじめにカメラを用いてシンチレータの中での発光分布を捉えられるか確かめるために、身近なデジタルカメラで測定を行った。次によりノイズの少ない天体観測用の冷却CCDカメラを用いた撮影を行い、放射線のCsIシンチレータ中での減衰の様子が画像からどれくらい正確に捉えられるかを調べた。

B. 研究方法

B. 1. デジタルカメラでの測定 (2023年8月から2023年12月)

図1のように暗箱中に $3.7 \times 3.7 \times 10 \text{ cm}^3$ のCsIシンチレータとデジタルカメラSONY製RX100VIIを置き、焦点距離20 cm、F値2.8、ISO感度12800、露光時間300秒で撮影を行った。表1に示す3つの放射線源を用いて測定を行った。

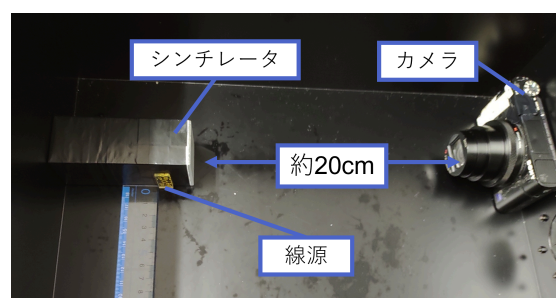


図1 デジタルカメラを用いた測定の様子

B.2. 冷却CCDを用いた測定 (2024年4月から)

図2の様に冷却CCDとデジタルカメラで撮影した時と同じ $3.7 \times 3.7 \times 10 \text{ cm}^3$ のシンチレータを置いて撮影した。撮影はASI533MM ProにレンズZhongyi Mitakon 20mm f/2 4.5x Super Macro lensを取り付け、焦点距離3 cm、F値 2、露光時間600秒で測定を行った。

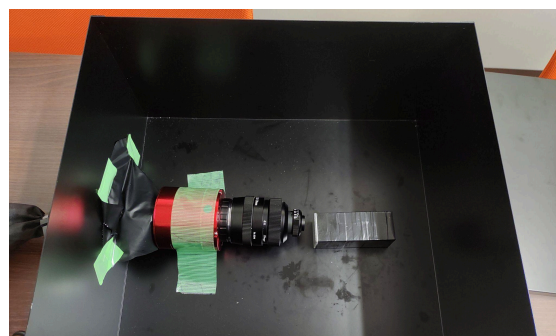


図2 冷却CCDを用いた測定の様子

表1 用いた放射線源の種類

核種	Cs-137 (セシウム137)	Ba-133 (バリウム133)	Am-241 (アメリシウム241)
放射能の強さ	203 kBq	89 kBq	377 kBq
崩壊の種類	β崩壊	軌道電子捕獲	α崩壊
放射線の種類	β線、ガンマ線、X線	ガンマ線、X線	α線、ガンマ線、X線
X/ガンマ線崩壊 エネルギー (割合)	662 keV (85.1%)	356 keV (62.1%) 31.0 keV (60.2%) 81.1 keV (32.9%) 30.6 keV (32.6%)	59.5 keV (35.9%)

B.3. 画像の処理 (2023年8月から2023年12月)

JPEGやTIFFなどの形式で保存された画像の各画素の明るさを表す値である画素値はそのままでは光量に直線的に対応しない。この為、参考文献[2]より、以下の式を用いて元の画素値 x から直線的に光量に対応する値 X を求めた。このレポートでは、求めた値 X を輝度とする。

$$X = \frac{x}{255} \div 12.92 \quad \left(\frac{x}{255} \leq 0.04045 \right)$$

$$X = \left(\frac{\frac{x}{255} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \quad \left(\frac{x}{255} \leq 0.04045 \right)$$

また、カメラ画像の画素値は主に光の三原色である赤、青、緑の3つに分けて記述されるが、CsIシンチレータの発光は主に緑色である為、取得した画像がカラー画像であるデジタルカメラについては、緑の値のみを用いて解析した。

B. 4. 画像から読み取った減衰の様子(2024年4月から)

冷却CCDで撮影した、CsIシンチレータの上にはAm-241を置いた画像について解析を行った。減衰の様子をどの程度捉えられているか確かめるため、画像から分かる減衰の様子

と、予想される減衰の様子を比較した。解析に当たっては、

(1) ガンマ線はシンチレータに対し垂直に到来している。

(2) Am-241から出るガンマ線は、そのすべてが写っている範囲内で吸収されている。

という二つの仮定の下に行った。(1)についてはガンマ線は空気中ではほとんど減衰せず、線源がシンチレータに密着していないため妥当であると考えた。(2)についてはAm-241から出るガンマ線は、エネルギーが59.5 keVと低く、10/1値層が約0.6 mmと小さい為、問題ないと考えた。

解析は下の手順で行った。

(1) 放射線の来る方向に対して垂直な同じ列の画像の輝度の加算平均をとる。求めた値はその列で反応した放射線の数に直線的な対応を示すと考えた。

(2) 列ごとの平均輝度を線源に近い方からその列まで足し合わせる。求めた値はその列までに反応した放射線の数に直線的な対応を示すと考えた。

(3) 全ての列の平均輝度を足し合わせたものから、(2)で求めた線源に近い方からその列までの輝度の合計を引く。求めた値はその列まで透過した放射線の数に直線的な対応を示すと考えた。

(4) 全ての列の平均輝度を足し合わせたものに対する、(3)で求めた全ての列の平均輝度を足

し合わせた物から、線源に近い方からその列までの輝度の合計の割合を求める。求めた割合が、そこまで透過した放射線の割合を表わすと考える。

C. 得られた結果

C.1. デジタルカメラを用いた測定(2023年8月から2023年12月)

Py-MLBUF [3]というガンマ線遮蔽計算のプラットフォームを用い、それぞれの放射線源が出すX線・ガンマ線の強度が50%になる半値層(HVL)、37%になる平均自由行程(mfp)、10%になる1/10値層(TVL)を求め、図3のように発光分布と比較した。

その結果、図3のように半価層や平均自由行程、1/10値層が大きくなるにつれて、発光分布も広がる様子が分かった。

C.2. 冷却CCDを用いた測定(2024年4月から)

冷却CCDで10分間露光して撮影した写真(図4)でも、デジタルカメラで撮影した写真(図3)同様、Am-241とCs-137で光の広がり方に差異が認められることを確かめた。

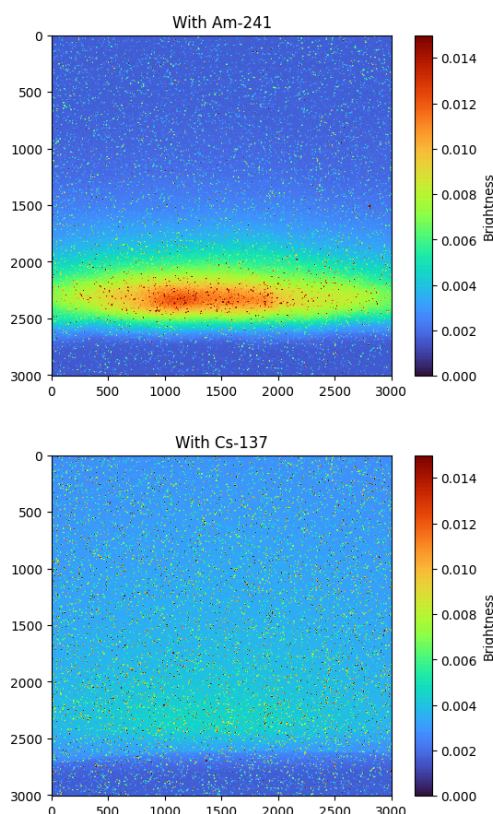


図4 線源が下にあるときの輝度を見ると、Am-241の方がCs-137に比べ光の広がりが小さくなっている。

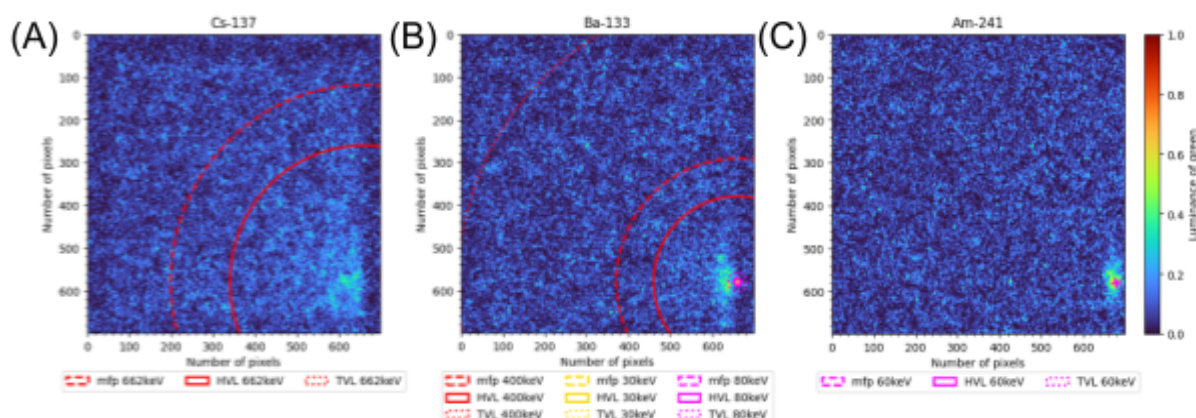


図3 線源を右下に置いた際の緑の輝度と、X線・ガンマ線の減衰に要する距離の比較から、半価層や10分の1価層、平均自由行程の長さに応じた発光分布が見られることが分かった。

そこで、Am-247について、減衰の様子をより詳しく調べるために、B. 4. 画像から読み

取った減衰の様子に示した方法で解析を行った。

(1)で求めた値をプロットした図5で線源に

近い側の傾きより、線源から遠い側の傾きが大きいことから、図4と同様に放射線の減衰の様子を捉えられていると考えた。(2)で求めた値をプロットした図6からは放射線が線源に近い部分でより頻繁に反応する事を読み取ることが出来た。(4)で求めた値をプロットした図7より、透過する放射線の数はい指数関数的に減少していることが読み取れた。

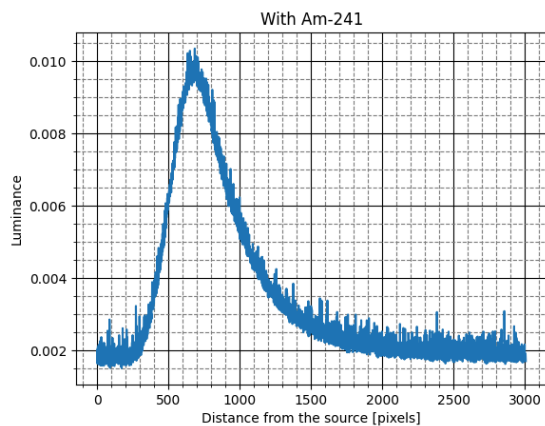


図5 放射線の来る方向に対して垂直な同じ列の画像の輝度の平均を見ると、線源からの距離が700ピクセルの辺りで輝度が最も大きくなっていることが分かる。この最も光が大きくなる部分が、シンチレータの端であると考えられる。

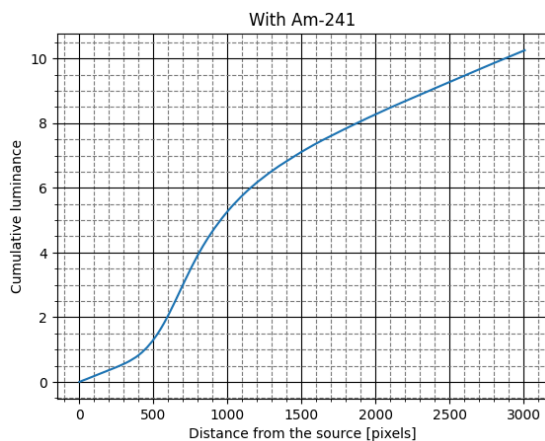


図6 列ごとの平均輝度を線源に近い方からその列までで足し合わせた値の変化が、シンチレータの端に当たる線源からの距離が700ピクセル前後の部分では大きい、線源から離れるにつれて変化が小さくなっている様子が分かる。

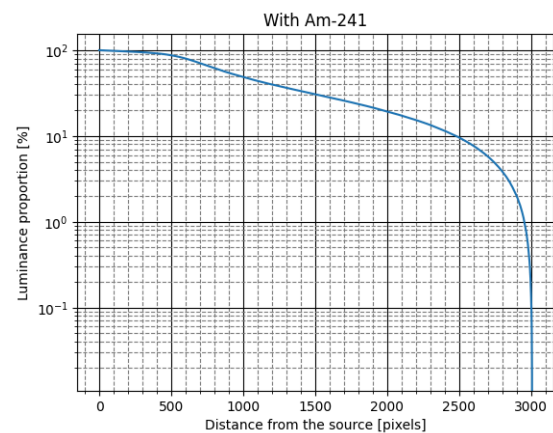
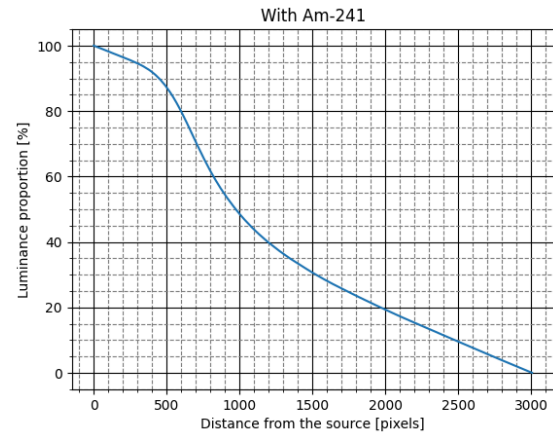


図7 全ての列の平均輝度を足し合わせたものに対する、(3)で求めた全ての列の平均輝度を足し合わせた物から線源に近い方からその列までの輝度の合計の割合の値。対数軸で表示した際に、直線になっている部分は指数関数的な動きをしていると読み取れる。

D. 考察

D. 1. デジタルカメラを用いた測定(2023年8月から2023年12月)

Cs-137からは比較的能量の高い661.7 keVのガンマ線が放出される。よって、強度が減衰するまでに要する距離が長く、発光分布も広がっていたと考えられる。Am-241からは比較的能量の低い59.5 keVのX線が放出される。したがって、減衰するまでに要する距離が短く、発光分布も小さく広がっていたと考える。また、Ba-133から356.0 keV、31.0 keV、81.1 keV、30.6 keV

と幅広いエネルギーのX線・ガンマ線が放出される。そのため、Cs-137とAm-241を重ね合わせたような発光分布になっていると考えられる。

また、Ba-133、Am-241において発光分布が1/10値層よりも大きく広がっているのは、実際にその位置で発光したのではなく、カメラで観測されるまでにシンチレーション光が拡散したことによると推測される。

D. 2. 冷却CCDカメラを用いた測定(2024年4月から)

ガンマ線の強度は、物質中で指数関数的に減少することが知られている。透過した放射線の割合が指数関数的に減少すること(図5)は、これに合致する。また、グラフから読み取ると、半値層は約950ピクセルの辺りにあると分かる。カメラの視界の幅を測定したところ、約2.5 mmだったため、950ピクセルは約0.79 mmである。Am-241から発生する59.5 kBqのガンマ線の半値層は約0.02mmであり、画像から求めた値は大きくずれている。

そこで、Am-241において、画像から求めた半値層が大きくずれた理由について考察した。

はじめに、放射線が平行に到来していると仮定したが、実際には斜めに到来していた可能性について考えた。放射線が斜めに到来していた場合、放射線がシンチレータ中を透過した距離のある地点での平均は、現在の想定よりも長くなる。したがって、画像から求めた半値層は実際よりも小さくなる。よって、他の要因が大きく関係していると考えた。

2つ目に考えたのは、カメラで観測されるまでにシンチレーション光が拡散した可能性だ。デジタルカメラを用いた測定で分かったように、AM-241由来の放射線の場合、光が拡散して10/1値層よりも大きく広がっている。このために、画像から求めた半値層も実際より大きい値になったと考えられる。

E. 結論

デジタルカメラ、冷却CCDカメラを用いた測定の結果から、下の二点が分かった。

(1)単一結晶中のシンチレーション光の分布をカメラで撮影することができること。

(2)カメラで撮影したシンチレーション光の分布からガンマ線の物質中での指数関数的な減少を捉える事ができること。

一つ目の目的については、シンチレータ中の発光を捉えることが出来たため、達成する事が出来たと考える。

二つ目の目的については、今回の方法では画像から求めた半値層と実際の半値層に大きなずれがあり、ガンマ線のエネルギーを正しく推定することができなかった。ただし、指数関数的な減少は捉えられたため、部分的には達成できたと考える。今後、より薄いシンチレータを用いて撮影を行い、光の拡散を抑えることでこの問題を解決できると考える。

また、今回の解析手法では、画像の中でガンマ線がほとんど全て吸収されていないと半値層が求められない。この問題を解決するために解析方法を工夫したい。

今後の展望としては放射線のエネルギーを身近な方法で捉えられる事から、多くの人がより分かりやすくガンマ線を観測出来る手法になると考える。また、先ほど述べた2つの課題を解決し、画像の中でガンマ線がほとんど全て吸収されている訳ではない場合に関して、エネルギーを求めることができれば、小型で軽量のガンマ線カロリメータを作ることにつながると思う。

F. 謝辞

この研究を進めるにあたり、たくさんのご指導を下さった他、実験の環境を整えて下さった大阪大学大学院工学研究科 和田有希助教、中村悠さん、松本寛輝さんに心より感謝申し上げます。また、丁寧な助言を下さった、早稲田大学理工学術院総合研究所 田中香津生准教授、東北大学医学部 佐々木真奈香さん、ありがとうございました。最後に、研究を始めるきっかけを作って下さった加速キッチン合同会社及び大阪大学SEEDSプログラムに厚く御礼申し上げます。

G. 参考文献

- [1] Yamamoto, Seiichi, et al.
"Development of an Ultrahigh Resolution
Real Time Alpha Particle Imaging System
for Observing the Trajectories of Alpha
Particles in a Scintillator." *Scientific
Reports*, vol. 13, no. 1, 2023, pp. 1-8,
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31748-9>. Accessed 9 Sept. 2024.
- [2] 河村尚登, and 杉浦博明. "sRGB 色空間
と国際標準化." 画像電子学会誌 35.6 (2006):
935-943.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/iieej/35/6/35_6_935/_pdf
- [3] Mann, K.S., Mann, S.S., 2021.
Py-MLBUF: Development of an
online-platform for gamma-ray shielding
calculations and investigations. *Ann. Nucl.
Energy* 150, 107845.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107845>