

2021年度 卒業論文

反射材に均一な金属蒸着を用いた
CsIシンチレータ検出器の位置依存性の評価

広島大学 理学部 物理学科

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B180912 丹羽 怜太

主査：高橋 弘充

副査：伊藤 清一

2022年4月30日

概要

宇宙から来る γ 線や硬 X 線などの放射線を観測するためにしばしばシンチレータ検出器が用いられる。シンチレータは γ 線を多数の可視光に変換させる役割があり、発生した光を検出器に届けるためには周りに反射材を付ける必要がある。一般的には ESR 反射材を巻きつける方法が普及しているが、この手法は反射材との間に隙間ができ、個人差も生む。そこで本研究ではこの過程を金属蒸着に変え、個人差無く反射材を隙間なく均一に塗布した。作製された Ag と Al を CsI シンチレータ表面に蒸着したものと ESR を巻いたものの性能の比較を行った結果、蒸着 CsI は集光量が ESR の約 40% になっていることがわかった。また蒸着 CsI は放射線の入射する場所によって性能に差が見られたため位置依存性の評価と原因の考察も行った。

目次

第 1 章	研究背景・目的	1
1.1	シンチレータの反射材の役割	1
1.2	シンチレータに用いる一般的な反射材	1
1.3	本研究の目的	1
第 2 章	γ線とシンチレータの反応	3
2.1	光電吸収・特性 X 線	3
2.2	シンチレータ CsI	3
2.3	ファインシャット SP	4
第 3 章	均一に金属反射材が蒸着された CsI	5
3.1	蒸着に使用する金属	5
3.2	真空蒸着法	6
3.3	実際に金属蒸着させたシンチレータ CsI	6
第 4 章	光量測定	8
4.1	光量測定セットアップ	8
4.2	減衰器・前置増幅器・整形増幅器・ADC	8
4.3	使用するソースメータ	8
4.4	実験手順と使用する放射線源	9
4.5	全体に照射して測定	11
4.5.1	測定するものについて	11
4.5.2	測定条件	12
4.5.3	測定結果	12
4.5.4	考察	17
4.6	部分的に照射して測定	18
4.6.1	コリメータの作成	18
4.6.2	ステージを用いた測定箇所の決定方法	20
4.6.3	照射する箇所	21
4.6.4	実験準備	22
4.6.5	測定条件	23
4.6.6	部分照射測定結果	23
4.6.7	ファインシャット SP での部分測定	28
4.6.8	ESR、Al 蒸着の場所ごとの比較	30

4.6.9	それぞれの面の場所ごとの収集効率の対称性	32
4.7	ESR 反射材と蒸着反射材との違い	34
4.8	Al 蒸着とファインショット SP、ESR の全体的な考察	35
4.8.1	Al 蒸着とファインショット SP について	35
4.8.2	低エネルギー側での盛り上がりについて	36
4.8.3	^{137}Cs 照射 中期のコブの考察	36
第 5 章	補足説明	37
5.1	光学グリス	37
5.2	Ag を蒸着したシンチレータ表面の金属光沢が消える	38
第 6 章	まとめと今後の課題	41
付録 A	付録	42
A.1	再現性	42

目次

1.1 CsI シンチレータ	1
1.2 反射材の役割	1
1.3 ESR を巻く過程	2
1.4 ESR を巻いた後	2
2.1 光電吸収、特性 X 線	3
2.2 ファインシャット SP の反射率 [12]	4
3.1 アルミニウム、銀、金、銅の反射率	5
3.2 真空蒸着概略図	6
3.3 金属蒸着された CsI (Ag,Al 蒸着)	7
4.1 光量測定セットアップ	8
4.2 ソースメータとセットアップ	9
4.3 セットアップ	9
4.4 ^{137}Cs 線源と ^{241}Am 線源	10
4.5 全体照射と部分照射	10
4.6 ESR、Al,Ag 蒸着全体照射グラフ	13
4.7 ESR、Al,Ag 蒸着全体照射グラフ (光学グリスが少ない場合)	14
4.8 測定結果	15
4.9 ESR と金属蒸着 (Al) の裾の比較	17
4.10 ^{241}Am の鉛シート穴なし (青) と穴あり (赤)	19
4.11 作成したコリメータ	19
4.12 ステージを使った測定構図	20
4.13 測定する箇所の名前	21
4.14 継ぎ目の測定	22
4.15 発泡スチロール固定台	23
4.16 ESR 反射材の部分ごとの照射	25
4.17 正面 2 点と側面 MPPC に近い角	26
4.18 正面 2 点と側面 MPPC に近い角	27
4.19 Al 蒸着: 背面中央と継ぎ目 2 点	28
4.20 立体角を考慮した直接光の光量の差	29
4.21 ファインシャットを巻いたものの正面、背面比較	29
4.22 ESR と Al 蒸着のピークチャンネルの絶対値比較	31

4.23	背面中央のピークチャンネルからの相対比	32
4.24	測定する 9 点	33
4.25	それぞれの面の比較する点	33
4.26	Al 蒸着と ESR の反射の仕方の違い	35
5.1	グリス 0.5mm 以下と 1mm 以上塗った場合の性能の差	38
5.2	Ag 蒸着シンチレータの時間による表面 Ag の消失	39
5.3	下から LED ライトを当てたもの	39
A.1	測定開始直後と 100 分経過後	43
A.2	60 分経過後と 100 分経過後	43

表目次

4.1	使用する CsI の番号	11
4.2	Al 蒸着 ^{241}Am 測定解析結果	12
4.3	CsI、光学グリス、MPPC 受光面ガラスの屈折率	13
4.4	ESR、Al,Ag 蒸着全体照射	14
4.5	5 種類の解析結果	15
4.6	ESR を基準としたときの他の反射材の比	16
4.7	ESR ^{241}Am 測定解析結果	24
4.8	Al 蒸着 ^{241}Am 測定解析結果	27
4.9	Al 蒸着: 背面と側面のピーク位置の関係	28
4.10	ファインシャットを巻いたものの正面、正面角、背面解析	30
4.11	反射材のピークチャンネルの背面, 正面比	30
4.12	測定場所の番号	30
4.13	背面の 9 点	34
4.14	側面の 9 点	34
4.15	正面の 9 点	34
4.16	正面の 9 点	35

第1章 研究背景・目的

1.1 シンチレータの反射材の役割

シンチレータ内に放射線が入射するとガンマ線は可視光線に変化する。可視光の光子数は入射放射線のエネルギーに比例していてこの光子を計測することによって入射した放射線のエネルギーを知ることができる。シンチレータは透明な物質なのでシンチレータ内で発生した可視光は四方八方に外に出てゆく。ここで必要になるのが反射材である。シンチレータを覆うように反射材を装着することで発生した可視光は反射を繰り返し最終的には検出器へと向かうようになる。このように反射材にはシンチレータ内で発生した可視光線を効率よく光検出器（MPPC）へと送り届ける役割がある。

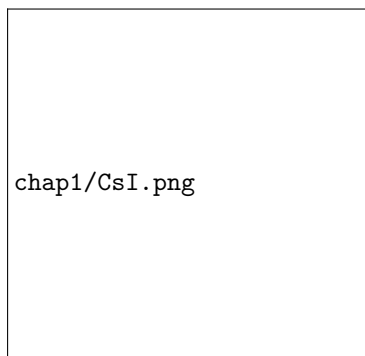


図 1.1: CsI シンチレータ
ヨウ化セシウムと呼ばれる蛍光
物質の一つ

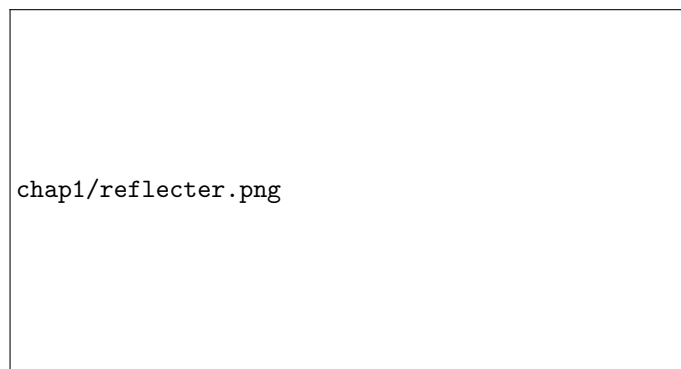


図 1.2: 反射材の役割

1.2 シンチレータに用いる一般的な反射材

一般的にシンチレータの反射材にはESRが使用されることが多い。ESRとは（Enhanced Specular Reflector）の略で素材は多層膜構造のポリエステル樹脂である。3M社¹が販売するESRは可視光領域での反射率が98%以上と非常に高く、シンチレータから発せられる可視光と相性がいい。[2]

1.3 本研究の目的

反射材であるESRにもデメリットもある。まず、ESRは可視光領域に限れば高い反射率を発揮するが、それよりも短波長になると反射率が急激に低下してしまう。また一般的にESRをシンチレータに装着する

¹3M ジャパングループ

際、シンチレータに巻き付けることが多いが隙間なく巻き付けることは難しく、シンチレータの角付近には空間ができてしまう。また巻き付けは手作業で行うので個人差がどうしても出てしまう。これは「ひとみ」、「XL-Calibur」、「GRBAlpha」プロジェクトでも同様のことが言える。この個人差は実際の検出器の性能の差としても出る。また ESR の厚みは $65\mu\text{m}$ ほどあり、巻きつけると検出器全体の厚みも増し、それだけ空間を必要とするので他の部分を圧迫してしまう。これは小型のシンチレータ検出器を横にたくさん並べる際に発生するデッドゾーンの大きさが、ESR と蒸着の厚みの差が無視できなくなるような場合に有効になる。

これを受けて本研究では ESR 反射材を巻く工程を、金属をシンチレータ表面に蒸着することによって代替することを考えた。この金属蒸着は専用の機械で行うので個人差が出にくく、また蒸着により生じる表面の厚さは $1\mu\text{m}$ ほどで ESR よりもかなり薄く反射材を装着することができる。また金属蒸着は対象の表面の形状に関係なく均一に金属膜を張り付けることができるのでシンチレータと反射材の間に隙間ができない。この点は ESR 反射材とは異なる構造である。本研究ではこの金属蒸着させたシンチレータの性能を評価することを目的としている。



図 1.3: ESR を巻く過程



図 1.4: 巻いた後

第2章 γ 線とシンチレータの反応

ここでは今回の実験を進めていく際に重要となる物理現象の説明をする。

2.1 光電吸収・特性 X 線

γ 線や X 線などの光子がある物質に入射すると、その物質の原子にある軌道電子に衝突する。その際、光子はすべてのエネルギーを電子に与えて原子に吸収され、消滅する。これを光電吸収と呼び、さらにエネルギーを与えられた電子は原子内の軌道からはじき出される。この電子は光電子と呼ばれ、物質内を移動する。すると放出された光電子がいた軌道上には空席ができ、空いた場所に同じ原子内のさらに上の準位の電子が遷移してくる。このとき遷移してくる電子はエネルギー準位的に下の軌道へ移動するために移動する軌道間のエネルギーを X 線として放出する。この X 線のことを特性 X 線と呼ぶ。[3]

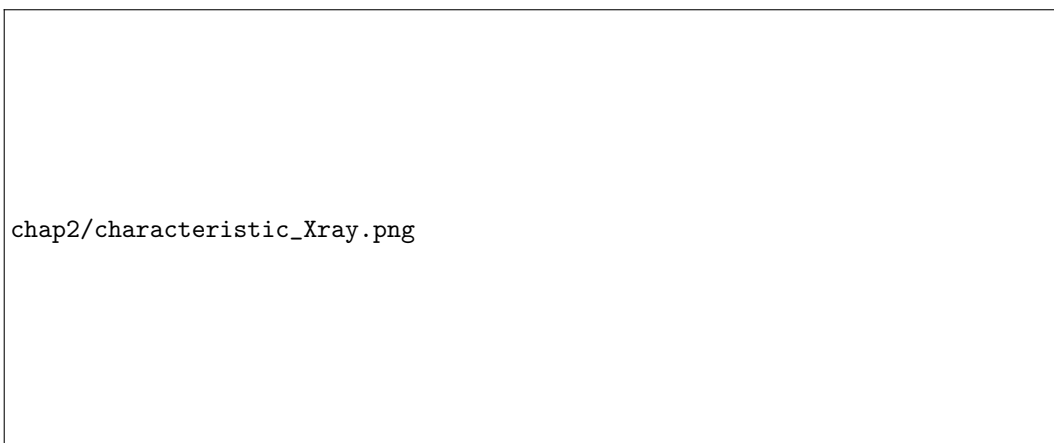


図 2.1: 光電吸収、特性 X 線の概略図

2.2 シンチレータ CsI

1 章で述べたように、シンチレータとは入射した放射線を多数の可視光に変換させ再放射する物質をいう。通常、透過力の高い γ 線、X 線は検出器を透過してしまうためそのままでは観測が難しい。しかしこのシンチレータの性質を利用することにより放射線を多数の可視光に変換して光検出器で読み取ることで、放射線の観測を可能としている。以下シンチレータの発光過程を説明する。

シンチレータに放射線が入射するとシンチレータの原子内にある電子と衝突をする。このとき光電効果やコンプトン散乱によってその電子は原子の軌道から叩き出される。この電子は放射線から受け取った分の

運動エネルギーがなくなるまでシンチレータ内を動き、その間に数万個の原子の最外殻電子、ホールを励起させる。これらが基底状態に戻るとき、シンチレーション光が発生する。よってシンチレータから発生する光子の量ははじき出された電子の運動エネルギー、すなわち入射した放射線のエネルギーに比例する。

今回使用するシンチレータは CsI(Tl) である。このシンチレータの発行波長は 550nm 程で可視光領域の光を出す。

2.3 ファインシャット SP

ファインシャット SP とは光陽オリエントジャパン株式会社が販売する光の吸収率の高いシートで、ポリウレタン樹脂でできており、表面は連続微細多孔質で表面積が大きいため光吸収効果が高い。光の反射率は 250nm~2500nm まで反射率が 1.6%以下である。[12]

今回の実験では反射材がなかった場合、つまりシンチレータ内で反射が起きなかった場合を比較対象として見るため、シンチレータのまわりに可視光の吸収率の高いファインシャット SP シートを巻き付け測定する。

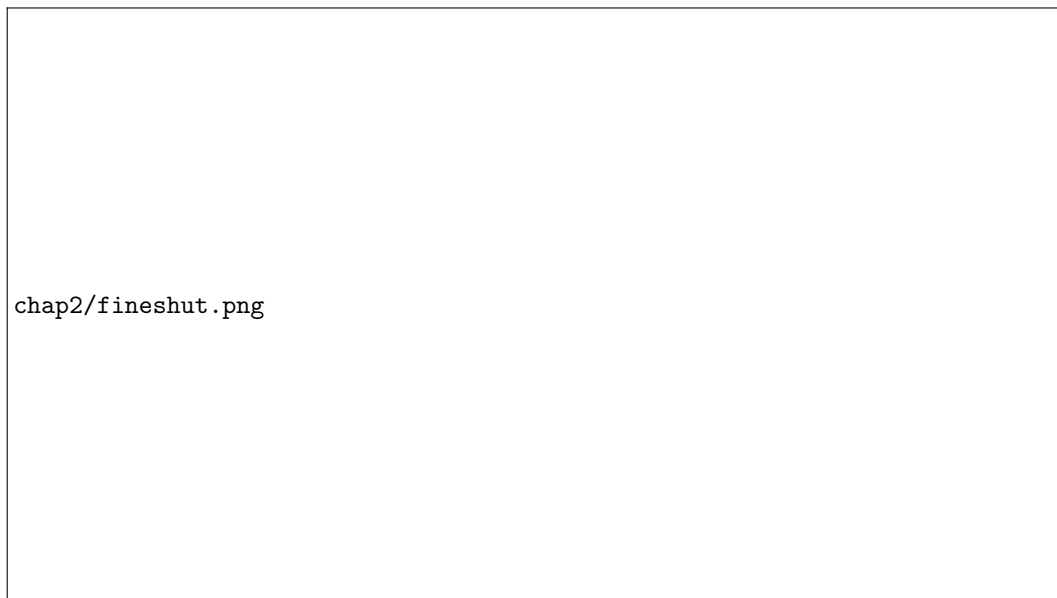


図 2.2: ファインシャット SP の反射率 [12]

第3章 均一に金属反射材が蒸着されたCsI

3.1 蒸着に使用する金属

今回、シンチレータ周囲に反射材として蒸着する金属としてアルミニウムと銀を選択した。この二種類を選択した理由はまずこの二種類の金属は可視光領域で高い反射率を有するためである。特に銀は可視光領域でESRと引けを取らない反射率を持つ。一方、アルミニウムは可視光領域の短波長側、長波長側でも反射率を保つことができる。図3.1に4種類の光の波長に対する金属の反射率をのせる。



図 3.1: アルミニウム、銀、金、銅の反射率 [4]

金銀銅は可視光領域の短波長側で反射率が低下しているが、アルミニウムは反射率を保っている

3.2 真空蒸着法

真空蒸着法とは真空中で金属を蒸発させ、対象の物質の表面に膜を生成させることを言う。真空中で金属を高温に加熱すると金属は蒸気となり真空槽の中で広がり始める。金属の蒸気は比較的温度の低い真空槽の内壁や蒸着対象の物質表面にぶつかるとそこで凝固し金属皮膜を生成する。また凝固の際に槽内の気圧も同時に下がるためさらに金属の蒸発が促進される。金属皮膜は真空中で得られるので余分な空気分子が薄膜に入り込んだり不純物と反応したりして化合物を生成することなく純粋なものが得られる。

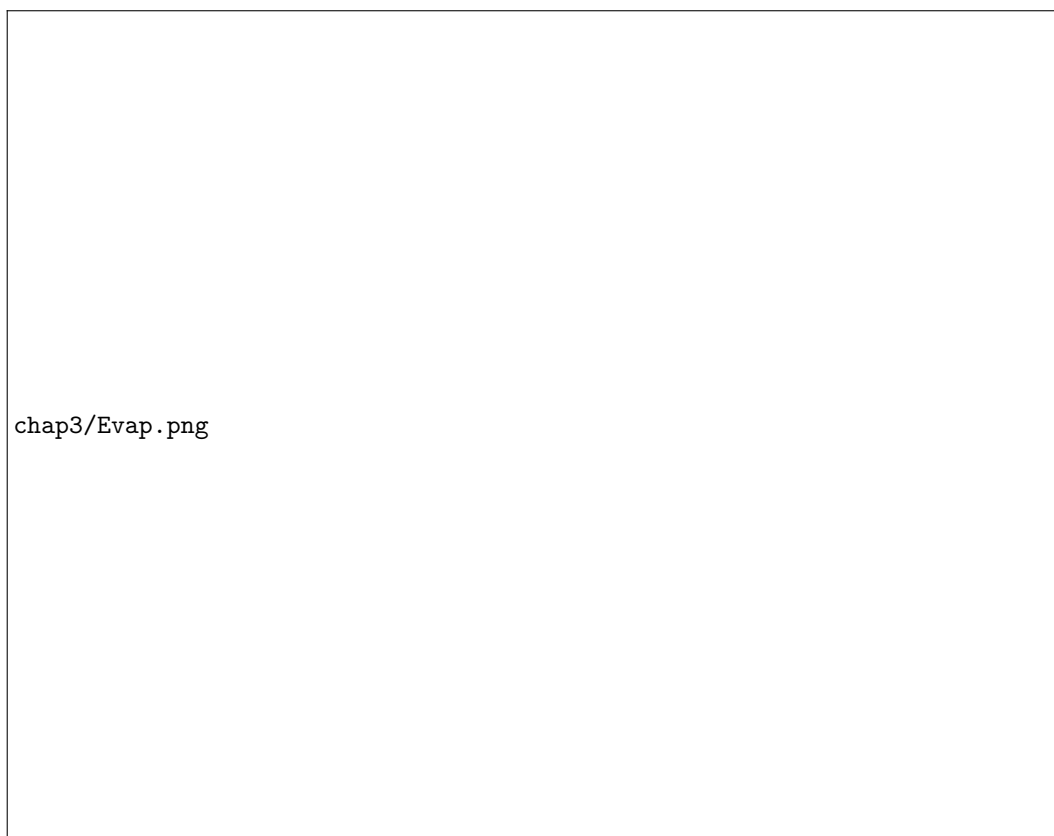


図 3.2: 真空蒸着概略図

蒸発した金属は真空槽内に飛び出し、CsI 表面に付着、凝固する

3.3 実際に金属蒸着させたシンチレータ CsI

今回シンチレータへの金属蒸着は沖縄科学技術大学院大学の宮澤さんに行ってもらった。下図 3.3 が実際の画像である。金属蒸着は MPPC を取り付ける正面以外の 5 面の CsI 表面に施されており、その上からはプラスチックのフィルムでコーティングされている。また CsI(Tl) のサイズは 1cm 角である。さらにその上から番号が書かれたカプトンテープが貼られているが、これは金属蒸着をした表面の順番になっている

- 1-1,1-2 → 側面の 2 つの面
- 2-1,2-2 → 残りの側面の 2 つの面

- 3 → 背面の1つの面

という順番で蒸着されたことを表している。MPPCを装着する蒸着されていない面を「正面」、そのまわりを囲む4面を「側面」、MPPCの装着部の反対側の面のことを「背面」と呼ぶ。

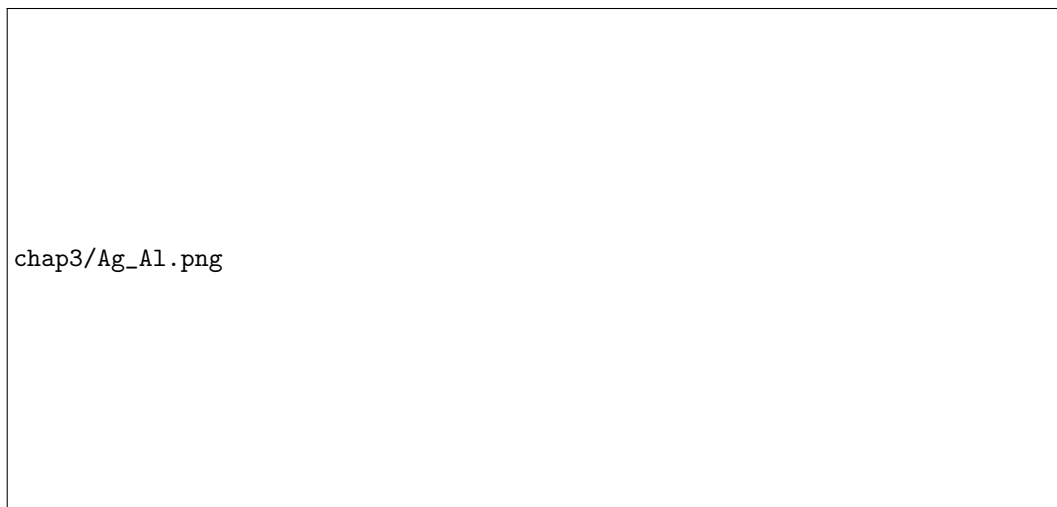


図 3.3: 金属蒸着された CsI

左が Ag、右が Al を蒸着させたもので蒸着された順に番号が振られている。

第4章 光量測定

4.1 光量測定セットアップ

光量測定セットアップは図 4.15 のようになっている。まずガンマ線がシンチレータ内に入射すると可視光に変化させて出す。その光を反射材で反射させながら MPPC へと送り読み取り、電気信号に変換する。出力される信号の大きさを前置増幅器、減衰器を用いて調節しシェイパーで波形を整形しそれを ADC でデジタル信号に変換してパソコンに送る。

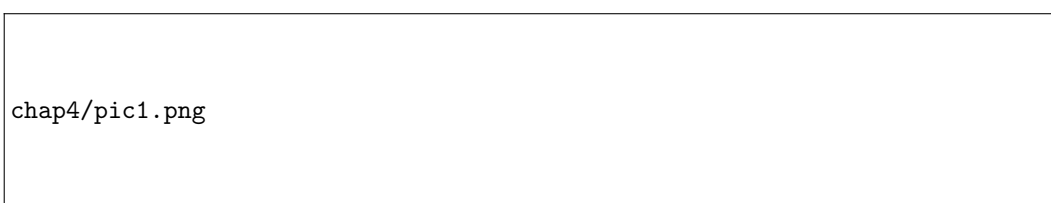



図 4.1: 光量測定セットアップ

4.2 減衰器・前置増幅器・整形増幅器・ADC

減衰器はアテネータとも呼ばれる。MPPC からの電気信号を減衰させ、測定器がサチュレーションを起こさないようにする役割がある。スイッチが付いており、減衰させる程度を調整することができる。前置増幅器はプリアンプとも呼ばれ、電気信号を増幅する役割があり同時にノイズを除去することができる。しかし時定数が長く、パイルアップする可能性が高くなってしまふ。そこで整形増幅器により波形を整形することによりパイルアップを防いでいる。ADC はアナログ・デジタル・コンバーターのことで計測したアナログ信号を読み取り、PC で読み取れるよう、デジタル信号に変換する役割がある。

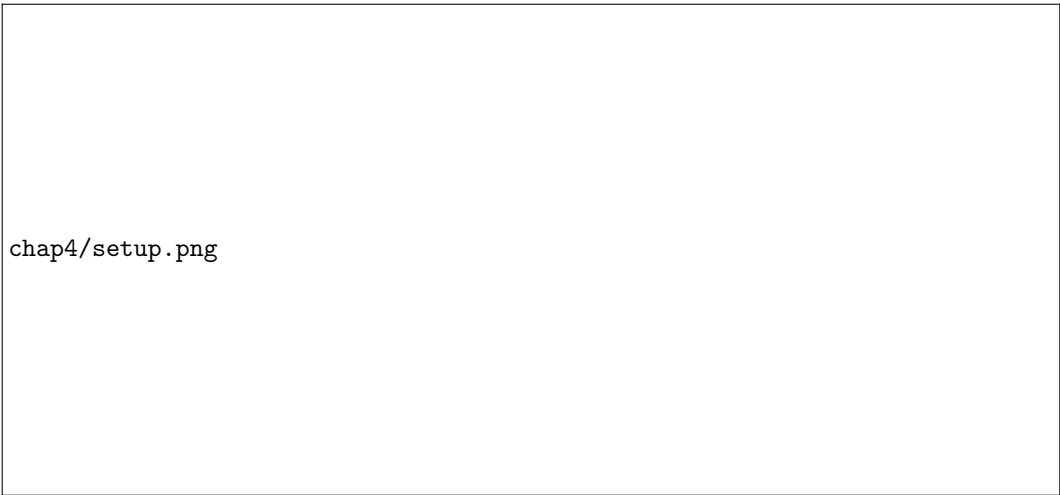
4.3 使用するソースメータ

今回の実験では、使用するソースメータは KEITHLEY の 2410 を使用した。接続はソースメータ、MPPC、アテネータ、プリアンプ、シェイパーの順に接続した。



chap4/source_meter.png

図 4.2: ソースメータとセットアップ



chap4/setup.png

図 4.3: セットアップ

4.4 実験手順と使用する放射線源

ここで実験手順とそれに伴い使用する放射線源について説明する。最初の実験で、それぞれ ESR, Ag, Al を反射材としたシンチレータに放射線を全体に照射し、ESR と金属蒸着したものの違いを大まかに調べる。またその他にも光漏れや反射しなかった場合など、比較対象として様々な条件でも調べる。使用する放射線源は ^{137}Cs 線源である。この線源を使用する理由は放射されるガンマ線のエネルギーが 661 keV と透過度が高く、阻止能の高いシンチレータであっても場所関係なく内部を均一に照射することに向いているからである。次にコリメータで放射線を絞ってシンチレータの中央や角、辺などの表面に部分的に照射する実験をする。この時使う放射線源は ^{241}Am 線源である。理由は先ほどの ^{137}Cs 線源とは逆で ^{241}Am の放射するエネルギーは 60 keV とシンチレータの表面で反応するものがほとんどなので表面に部分照射することに向いている。

実際に CsI に対する ^{137}Cs と ^{241}Am の透過率を計算すると

- ^{137}Cs の γ 線エネルギー 661 keV
- ^{241}Am の γ 線エネルギー 60 keV

- CsI の厚さ (d) = 1 cm
- 600 keV の γ 線を当てたとき CsI の散乱断面積 $\sigma_1 = 8.374 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{g}$
- 60 keV の γ 線を当てたとき CsI の散乱断面積 $\sigma_2 = 7.657 \text{ cm}^2/\text{g}$
- CsI の密度 $\rho = 4.51 \text{ g/cm}^3$

遮蔽率は NIST XCOM¹ を参考に計算した。計算は以下の過程のもと行った。

反応確率

$$P[\%] = [1 - \exp(-d \cdot \sigma \cdot \rho)] \times 100 \quad (4.1)$$

より ^{137}Cs 、 ^{241}Am を照射したときの CsI の反応率 P_1 、 P_2 は $P_1 = 31.5\%$ 、 $P_2 = 99.99\%$ また ^{241}Am が表面から 0.1cm 以内で反応する確率 P_3 は $P_3 = 96.8\%$ であるから ^{137}Cs は CsI の全体照射に、 ^{241}Am は表面に部分照射することにむいていることがわかる。

図 4.4: 左: ^{137}Cs 右: ^{241}Am 線源

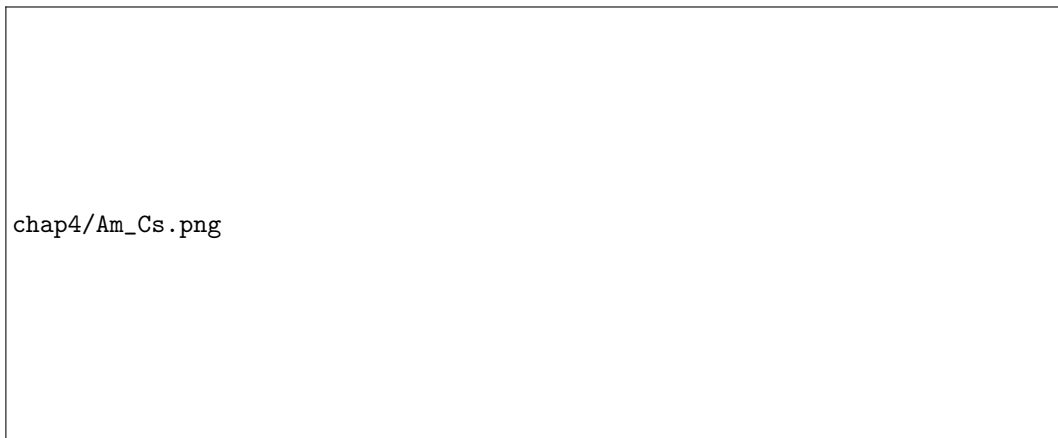
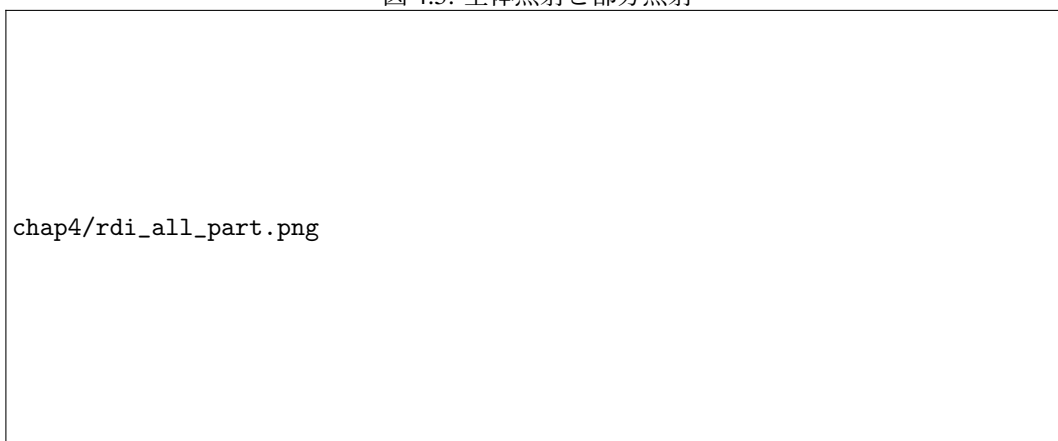


図 4.5: 全体照射と部分照射



¹NIST Xcom <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

4.5 全体に照射して測定

4.5.1 測定するものについて

シンチレータについて

今回の実験では反射材の比較を行う。シンチレータはすべて CsI を使用するが、全く同じ CsI を使い、反射材だけを付け替えて測定を進めるのではなく、複数個の CsI を用いて行う。そこで使用する CsI に予め番号を付けておく。

表 4.1: 使用する CsI の番号

No.	反射材
1	ESR 巻き
2	Al 蒸着 CsI
3	Ag 蒸着 CsI
4	ファインシャット SP 兼 ESR 巻き

No.1 の ESR 巻きは基準となるのですべての実験で巻き方を変化させていない。単に ESR や ESR 巻きと言及する場合、常にこの No.1 の ESR 巻き CsI を指しているとする。また、CsI に直接金属蒸着している Al, Ag 蒸着 CsI は取り外しが不可能のため常に同じ CsI を使用している。最後に No.4 のファインシャット SP は実際にファインシャット SP を巻き付けて測定する前に、性能比較のために ESR を巻いて測定しているが No.1 の ESR 巻きとは異なるものである。

測定する反射材は以下のとおりである。表 4.1 の番号も対応させてある。

- ESR (CsI No.1)
- Al 蒸着 (CsI No.2)
- Ag 蒸着 (CsI No.3)
- Al 蒸着 + ESR (CsI No.2)
- Ag 蒸着 + ESR (CsI No.3)
- ファインシャット SP 用の CsI に ESR を巻いたもの (CsI No.4)
- ファインシャット巻き (CsI No.4)

まずは全体に照射して測定を行った。全体に照射するにあたって測定する項目は主にエネルギースペクトルの形状、ピークチャンネル、エネルギー分解能の三つである。また蒸着したシンチレータに光漏れがないかを調べるために一つは蒸着面の上からそのままテフロンテープで固定したもの、もう一つは蒸着面の上からさらに ESR を巻いてからテープを巻いたもので実験した。そしてファインシャット SP を CsI に巻き付けたものでも測定を行った。その際、ファインシャットを装着するのに使うシンチレータに ESR を巻いたものも測定を行った。

4.5.2 測定条件

今回の実験は以下のような測定条件で実験した。

- 10mm × 10mm × 10mm の CsI シンチレータ
- 線源は ^{137}Cs
- 測定環境温度 20.0 °C
- 電圧 55V
- 300 秒間測定

4.5.3 測定結果

光学グリスの塗り具合による光量の変化

はじめに、今回実験では MPPC とシンチレータとの間に光学グリスを塗布している。シンチレータから MPPC を取り外してセットアップを変更する際、再度光学グリスを塗るときに前回と同じ塗り具合を再現して接着することが難しく、それがシンチレータの性能を変化させてしまうことに気づいた。 ^{137}Cs 照射実験でも光学グリスの塗り直しに伴うセットアップ変更が行われたため、他のセットアップは同じだが、光学グリスの塗り具合の違いのために性能が大きく異なる時期が大きく分けて3つある。初期が性能が一番良く、中期は塗りが少なく、全体的に性能が悪かった。後期は原因が光学グリスにあるとわかり、意識して光学グリスを均一に塗った。実験結果は3つの時期をすべて考慮して評価している。同じ時期のものは相対的に比べることができると仮定している。それによって時期の違うすべての反射材の評価をすることにした。また光学グリスによる性能の変化については付録でも説明する。

初期の測定結果

まず、初期に測定した結果を以下の表にまとめる。このとき測定したのは ESR 巻き、Al 蒸着、Ag 蒸着、Al 蒸着 + ESR、Ag 蒸着 + ESR である。また表中の σ は光電吸収ピークをガウスフィッティングした際の 1σ に対応する。エネルギー分解能は半値幅であり、 2.35σ をピーク値で除算して求めた。

表 4.2: Al 蒸着 ^{241}Am 測定解析結果

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
ESR	1762.4	60.8	8.1
Al 蒸着	693.2	35.1	11.9
Ag 蒸着	664.6	34.9	12.4
Al 蒸着+ESR	701.3	37.0	12.4
Ag 蒸着+ESR	660.9	36.2	12.8

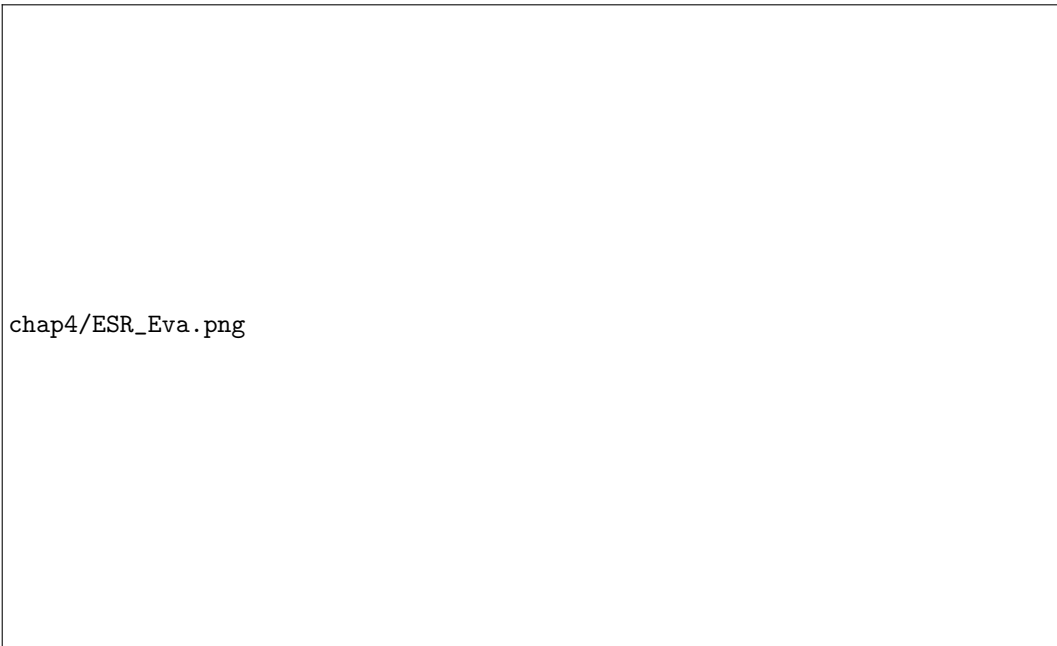


図 4.6: ESR,Al,Ag,Al+ESR,Al+ESR の全体照射比較

中期（グリスが不十分だったとき）の測定結果

次に中期のものである。このとき測定したのは ESR、Al 蒸着、Ag 蒸着である。光電吸収ピークの後に裾を引くのではなくコブのようなものもできているのが確認できる。このときの測定結果も図 4.7 載せる。高エネルギー側にまとまったピークが見えるのはシンチレータの中でも MPPC の真正面で発生した光子が直接 MPPC に入るためである。この理由については 4.6.6 にて詳しく解説する。一般に反射せず入射する直接光の影響はシンチレータ自身の大きさが小さければ小さいほど大きくなる。よって反射材に依存しない。初期、中期、後期の測定グラフを見ても高エネルギー側に裾が広がっているように見えるが、直接光の影響が考えられる。それを踏まえた上でグリスが少なかった場合にこぶのようなものができた原因を考察する。今回使用した光学グリスは「OKEN6262A」である。表 4.3 に検出器に入るまでに光子が通ると考えられる物質の屈折率をまとめる。[7][8][9][10]

表 4.3: CsI、光学グリス、MPPC 受光面ガラスの屈折率

材質	屈折率
CsI シンチレータ	1.78
光学グリス (OKEN6262A)	1.45
MPPC 受光面窓ガラス	1.41

ここで、全反射とは入射光が屈折率の大きい媒質から小さい媒質へと移動するときに媒質の境界面で全て反射されることをいう [11]。

発生した光子は「CsI」→「光学グリス」→「受光面」の順番に進む。入射光子は反射材で反射したか、直

接し入射するかで入射角度が大きく変わる。直接光は入射角が比較的小さいものが多い(図 4.19 参照)が、反射して MPPC に入射する光子は構造的に考えて入射角が大きくなる傾向にある。仮に光学グリスが不十分、または気泡が入るなどして屈折率が空気と変わらなかった場合、入射角の大きい光子は CsI と光学グリスの境目で全反射を起こす可能性が高くなると考えた。その場合、直接光による光子の影響が更に大きくなることが考えられる。その結果こぶの形のように高エネルギー側が強調されるようなスペクトルになったと考えた。



図 4.7: ESR,Al,Ag 蒸着の全体照射比較 (グリスが少ない場合)

図 4.6 に比べて全体的に光電吸収ピークの位置が下がっている。また光電吸収ピークの後にコブのようなものができている。

表 4.4: ESR、Al,Ag 蒸着全体照射

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
ESR	1205.4	66.4	12.9
Al 蒸着	491.3	33.5	16.0
Ag 蒸着	510.93	32.1	14.8

後期の測定

後期に測定したものをのせる。このとき測定したものは

- ESR 巻き
- ESR 巻き ファインシャット SP 用

- Al 蒸着
- Ag 蒸着
- ファインシャット SP 巻き

である。

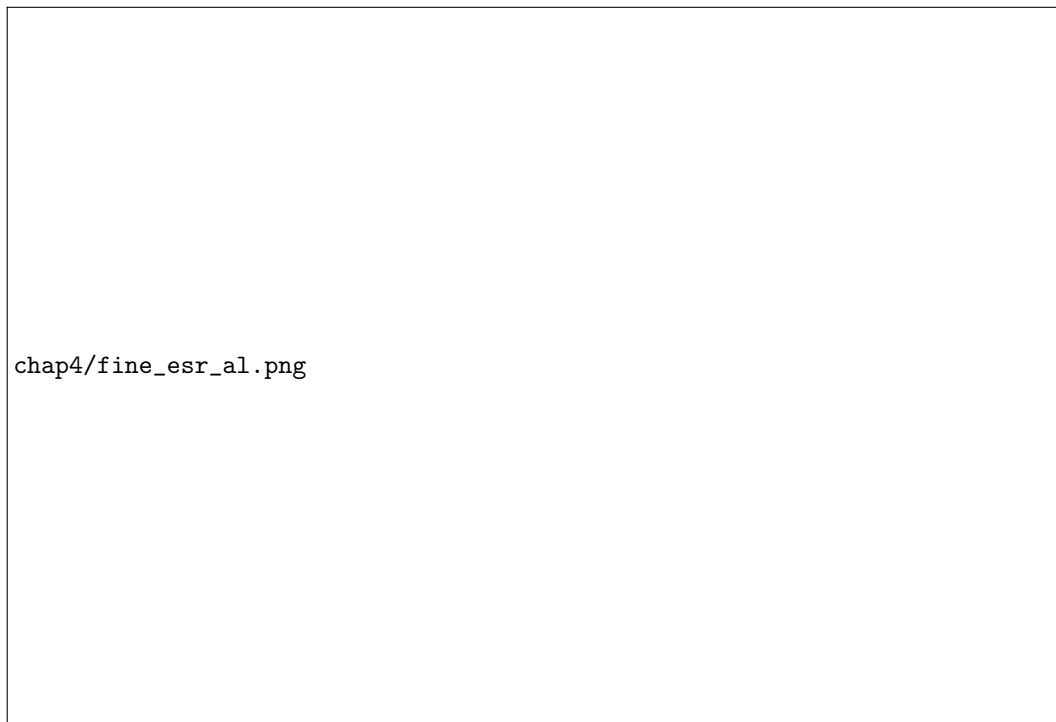


図 4.8: 測定結果

表 4.5: 5 種類の解析結果

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
ESR	1511.4	59.9	9.31
ESR(ファインシャット SP 用 CsI)	1536.2	52.0	7.96
Al 蒸着	716.6	38.2	12.5
Ag 蒸着	732.9	43.4	13.9
ファインシャット SP	742.0	42.3	13.4

反射材の比較

以上の結果よりまずそれぞれのピークチャンネルについて比べる。初期、中期、後期の ESR 巻きのピークチャンネルを基準としたときに他の反射材の相対比を表 4.6 にまとめる。

表 4.6: ESR を基準としたときの他の反射材の比

時期	ESR	Al	Ag	Al+ESR	Ag+ESR	ESR2	Fine Shut
初期	1	0.39	0.38	0.40	0.38		
中期	1	0.41	0.42				
後期	1	0.47	0.48			1.02	0.49

ESR と Al,Ag 蒸着の比較

表 4.6 を見ると Al,Ag 蒸着シンチレータのピーク値はどの時期も平均して ESR の 40%ほどであり、低いことがわかる。同じ線源のエネルギーを計測しているため、横軸のピークチャンネル値が大きければ大きいほどシンチレータ内の可視光の収集効率がよく、検出器の性能が良いということになる。またエネルギー分解能に注目してみると ESR の分解能は最高で 8%ほどであったのに対し、Al 蒸着は 12%、Ag 蒸着は 13% 程と性能が ESR を巻いたものよりも劣っていることがわかった。

光漏れについて

図 4.6 と表 4.8 より金属を蒸着したシンチレータとその上に更に ESR を巻いたものを比較してもピークチャンネル値や分解能に大きな差は見られなかった。よって金属蒸着シンチレータの内部からの光漏れの影響は無かったと判断した。

ファインシャット SP

ファインシャット SP をシンチレータのまわりに巻くとシンチレータ内で発生した可視光は壁面で反射をすることができず、ファインシャット SP の表面で吸収される。つまり発生した可視光でかつダイレクトに入ってくる光のみを計測することになる。

図 4.8 を見ると、ファインシャット SP を巻く前に ESR を巻いて測定したもの(ファインシャット SP 用 ESR) に比べてファインシャット SP を巻いたものはピークチャンネル値が 48%程になっている。基準の ESR と比べても 49%である。これはシンチレータに反射材を巻くか巻かないかで発生した可視光の収集効率が約 2 倍変わるということを示している。また Al と比べてみると、ピーク位置がほぼ同じであることがわかる。よって Al 蒸着ではシンチレータ内での反射がうまくいっていないと判断した。

スペクトルの形状について

次にそれぞれのスペクトル形状について注目してみる。図 4.6 に注目してみると、金属蒸着シンチレータのスペクトルは ESR のスペクトルを小さく圧縮したように見えるが、光電吸収ピークの山の形やその後のイベント数の振る舞いに少し違いが見られた。ESR のスペクトルは光電ピークをとったあとイベント数の減少が見られるが、金属蒸着を施した方はピークのあとも高エネルギー側にやや裾を引いているように見えた。このことについて、下の図 4.9 は実際に図 4.6 の Ag 蒸着 CsI グラフを引き伸ばして同じグラフの

ESR に後方散乱ピークと光電吸収ピークを重ねてみてどれほど裾が長くなっているのかを比べたものである。青色の Al 蒸着グラフの方が裾が長いことがわかる。光電吸収ピークの鋭さの違いからも Al 蒸着はピークの出る位置が分散していることがわかる。また図 4.9 のように ESR のグラフの右端の方で再びイベント数が増加しているように見えるがこれは測定できるチャンネルの上限を超えた信号がすべてチャンネルの上限にカウントされているために見えるものである。しかし ESR の方も Al ほど裾は広がっていないが、高エネルギー側に若干裾が広がっている。これについては次の節で詳しく説明する。



図 4.9: ESR と金属蒸着 (Al) の裾の比較
金属蒸着 (Al) の後方散乱ピークと光電吸収ピークを ESR のピークに合わせている

4.5.4 考察

反射率と反射回数

CsI は 550nm の波長の光を発するが、その時の Al と Ag の反射率をそれぞれ 90% と 97% とし、センチレータ内で何回反射するとどれだけもとの光量から減少するのかを簡単に計算する。Al の表面で 3 回反射するともとの 73% になり、5 回で 60%、10 回反射すると 30% 台まで減少する。Ag の場合、3 回で 91%、5 回で 85%、10 回で 73% となる。ここで ESR の反射率を 98% とすると 10 回反射したとき約 81% が残っているということになる。表 4.6 を見ると金属蒸着 CsI と ESR 巻きとのピークチャンネル値の違いは 2 倍以上あることがわかる。これは単純に光量が 2 倍違うということである。ここで 3 つの反射材をつけた CsI の内部の反射の仕方がすべて同じだとすると、ESR との光量差が 2 倍以上になるのは Al で 8 回以上、Ag で 68 回以上反射したときであった。Al と Ag でおおきな開きがあるが 2 つのピークチャンネル値の差はあまり大きくないので光量が大きく減少している原因は反射率のみではないと考えた。また使用した MPPC は受光面のピクセル数が 14400 であり、 γ 線を可視光に変換させる際、1 度に発生する光子の数はピクセル数よりも少ないため光子が飽和することはない。

裾の長さについて

先程のピーク付近での ESR と金属蒸着との振る舞いの違いについて。このような違いが引き起こされる原因の一つにピークの出る値のばらつき具合というものが考えられる。ESR の場合、立方体のシンチレータのどの部分に γ 線が入射しても光の収集効率にばらつきがないためピークチャンネルの値が揃いやすい。一方で金属蒸着させた方は γ 線が反応する場所によって光の収集効率が異なり、ピークチャンネルの値にばらつきが生じてエネルギー分解能が悪くなるので結果的に光電吸収ピークの山が広がっていると考えた。これと同じ理由で高エネルギー側に裾野が広がってしまっていると考えた。

山の裾が広がってしまったのではないかと推測し、場所ごとにシンチレータの性能が異なっているのではないかと考えた。そこで次の実験に向けてシンチレータに照射する放射線を限定し、部分的に照射して場所依存性を調べることにした。

4.6 部分的に照射して測定

4.6.1 コリメータの作成

部分的に照射するためにまず、線源から放射される放射線を限定するコリメータを作成する。これは数枚の鉛シートを重ねたものを 2 セット作り距離をおいて二重スリットのようにして放射線を絞る方法である。まず、 ^{241}Am の放射線を遮蔽するために鉛シートが何枚必要であるかを計算する。鉛の遮蔽率は NIST XCOM²を参考に計算した。計算は以下の過程のもと行った。

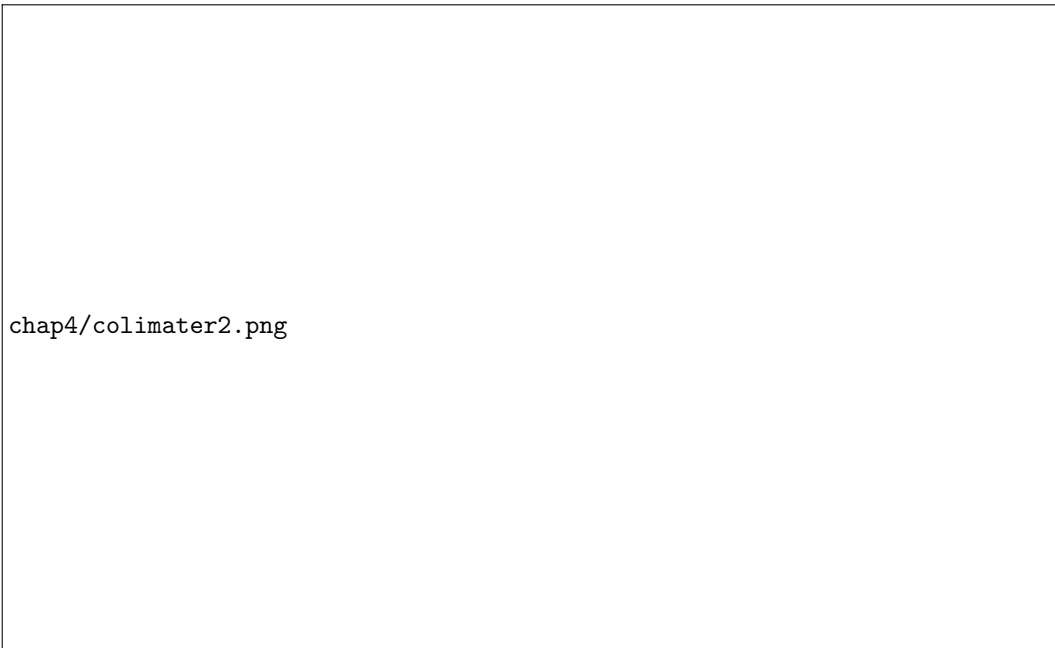
- ^{241}Am の γ 線エネルギーを 60 keV
- 鉛シート 1 枚の厚さ d 0.051 cm
- 鉛の散乱断面積 σ 5.02 cm²
- 鉛の密度 ρ 11.34 g/cm³

反応確率

$$P[\%] = [1 - \exp(-d \cdot \sigma \cdot \rho)] \times 100 \quad (4.2)$$

これにより鉛シート 1 枚では 94.5%、二枚では 99.69%、三枚で 99.98% となった。実際に ^{241}Am 線源の上に鉛シートをおいて遮蔽率を測定したところ一枚で 94% ほど遮蔽できていた。下の図 4.10 は鉛シート 3 枚に穴を開けずに線源の上において測定したものとシートの中央に 2mm の穴を開けたものを測定したものを比較したものである。縦軸はイベント数、横軸はチャンネルを表す。青いスペクトルは ^{241}Am の放射線をほぼ完璧に遮蔽しており、環境放射線とほとんど変わらないが中央に穴を開けた赤い方は ^{241}Am の光電吸収ピークとエスケープピークを確認できる。

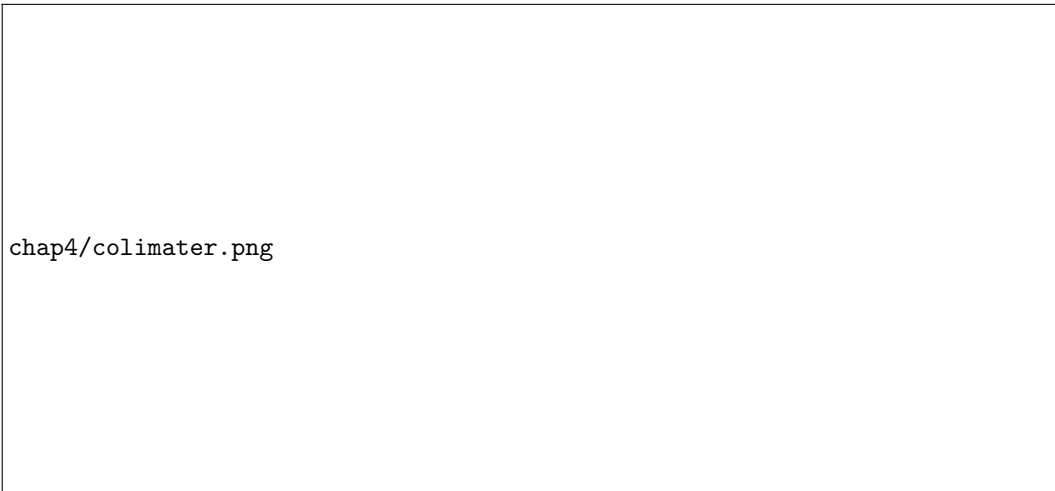
²<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>



chap4/colimater2.png

図 4.10: ^{241}Am の鉛シート穴なし (青) と穴あり (赤)

次に線源からコリメータ、コリメータからシンチレータまでの距離を計算し、鉛シートに開ける必要な穴の大きさを計算する。今回穴の大きさは 2mm に決めた。これにより限定された放射線がシンチレータの表面上直径 3cm の円形に照射されることになる。実際に作成したコリメータを図 4.11 に載せる。



chap4/colimater.png

図 4.11: 鉛シートを重ね、中央に 2mm の穴を開けたものを上下に設置したコリメータ
鉛シートは上に 3 枚、下に 3 枚ずつの計 6 枚である

4.6.2 ステージを用いた測定箇所の決定方法

一辺 1cm の立方体の表面に正確に放射線を照射する、また位置の再現性を確保するために場所を変える工程は手作業でなくステージを用いて行う。直動ステージを X 軸 Y 軸として二つ用いる。今回使用するステージは KOHZU である。下にステージの上に線源とコリメータを設置し、上からは固定したシンチレータをぶら下げる構図をとり、ちょうど図 4.12 のようになる。このとき、線源からシンチレータまでの高さは 2.76cm であるため、シンチレータ表面に照射される γ 線は直径 3mm の円形にコリメートされる。



図 4.12: ステージを使った測定構図

一つの面の中心と角を割り出すためにステージで線源を 1 ミリずつずらしながらその時の合計レートを調べる。コリメートされてシンチレータに届く線源の放射線は円形であり、そのすべてがシンチレータの表面に当たっているとき、レートは最大の値となる。照射円の直径はシンチレータの一辺より小さいので照射しながらずらしてもしばらくの間合計レートは最大値を保つ。やがて線源の照射がシンチレータから外れ始めるとレートが徐々に低下していく。完全に外れると環境放射線と変わらないレートを示す。この一連の測定で縦軸をレートのカウント数、横軸を位置座標とするとグラフは台形に近い形となる。この測定を X 軸、Y 軸と測定してそこから中心と角を決定する。

4.6.3 照射する箇所

測定箇所を決める前に簡単にシンチレータの場所に名前を付ける。MPPC が装着されている面を「正面」、その反対側の面を「背面」、その周りの面を「側面」と呼ぶことにする。側面は一つのシンチレータにつき四面あるが、MPPC からの距離や反射材の付け方に関しては対照的であるため側面の四面に差はないものと仮定する。

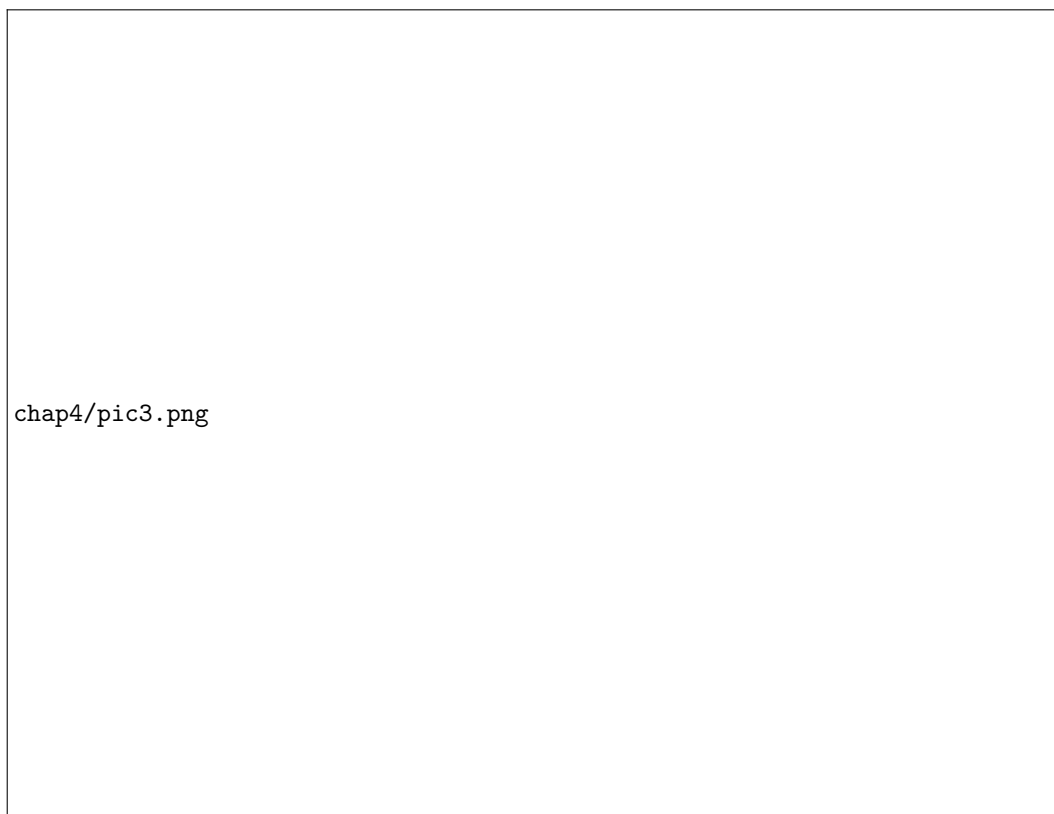


図 4.13: 測定する箇所の名前

測定箇所はそれぞれの面の中央と角である。角を測定する理由は、ESR の場合角に反射材を巻く際、どうしてもシンチレータとの間に隙間ができてしまう影響を調べるためである。一方、金属蒸着させた方は角でも隙間をつくることなく表面に反射材を付けることが可能なので、そこを測定することで ESR との差が出るのではないかと考えたからである。また側面に関しては MPPC に近い側と遠い側の 2 つの角で測定をする。これは MPPC からの距離の関係で発光した場所から MPPC までの距離により性能が変わる可能性があるからである。また今回、金属蒸着を 3 回に分けて行っているため角の継ぎ目で性能に差があるかどうか調べる。よって連続、不連続の継ぎ目の辺と背面の継ぎ目の辺も調べた。

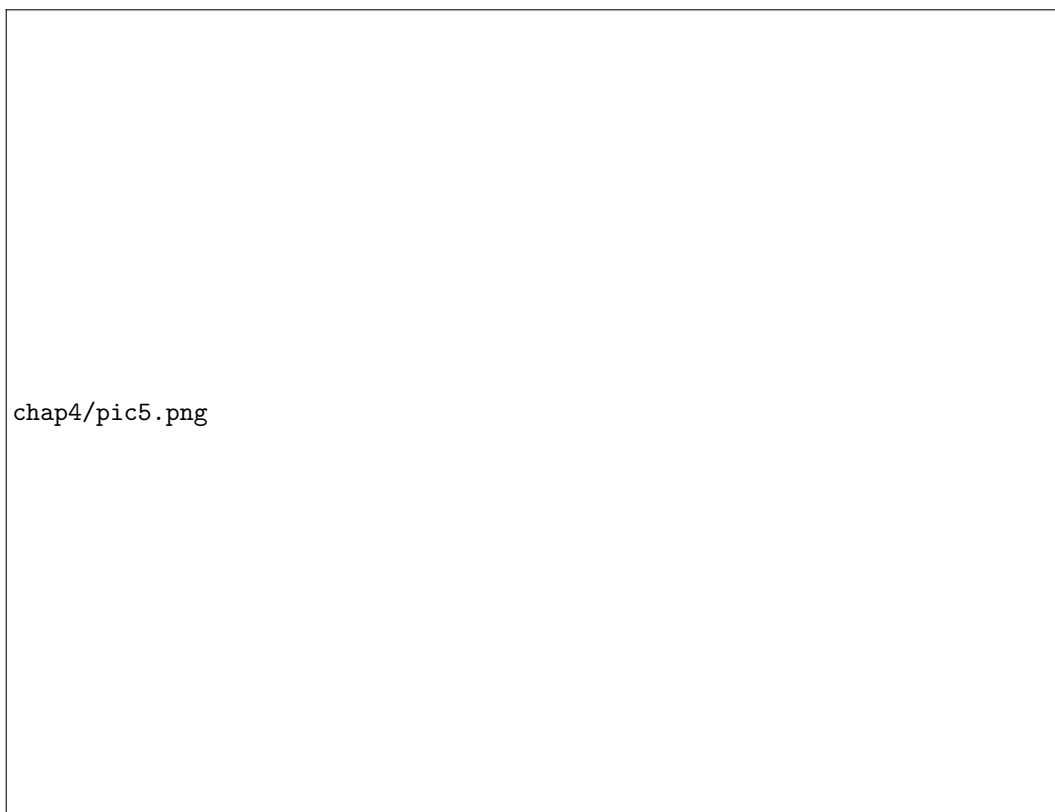


図 4.14: 継ぎ目の測定

測定箇所

- 正面中央、角
- 背面中央、角
- 側面中央、角 (MPPC に近い側)、角 (MPPC から遠い側)
- 継ぎ目側面辺、背面辺

4.6.4 実験準備

シンチレータの正面、背面、側面など、様々な場所に照射するために、 γ 線を妨げない発泡スチロールでアルミボックス内でもシンチレータの向きを固定できる台を作成した。

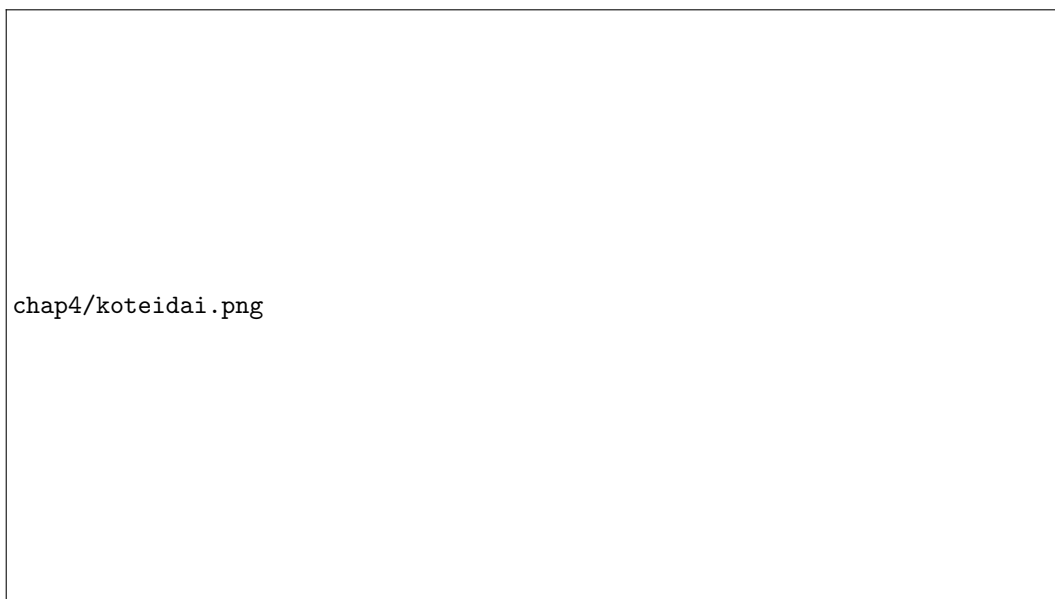


図 4.15: シンチレータ固定台: 右の写真は側面の継ぎ目の一辺を測定するためにつくられたもの

4.6.5 測定条件

また実験では以下のような測定条件で実験した。

- 10mm × 10mm × 10mm の CsI シンチレータ
- 線源 ^{241}Am をコリメートして照射
- 測定環境温度 20.0 °C
- 電圧 55V
- 300 秒間測定

4.6.6 部分照射測定結果

Ag 蒸着 CsI の表面の変化

測定結果を述べる前に、Ag 蒸着 CsI の表面の変化について先に説明する。今回、実験段階の途中で Ag 蒸着 CsI の表面の Ag が消失していることに気がついた。使用する前は均一に鏡面を保っていたが、徐々に表面の Ag が消え、光が漏れ出すようになった。原因については補足説明 5.2 で詳しく考察する。それにより今回の実験で Ag 蒸着 CsI の場所ごとの性能評価については行っていない。

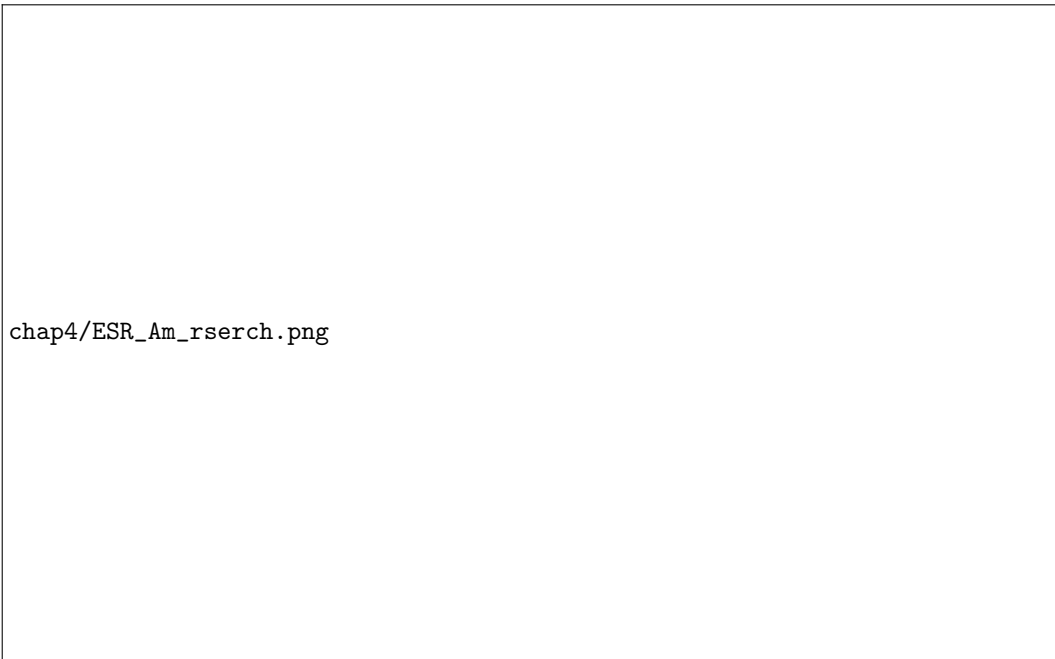
ESR 反射材の測定結果

ESR 反射材の背面、側面

まずは ESR 反射材の背面、側面の測定結果からみていく。解析結果のピークチャンネル、ガウスフィットした際のばらつきを表す σ 、エネルギー分解能は下の表 4.7 に記す。下の図 4.16 は背面の中央と角、側面の中央と側面の MPPC から遠い場所の角、側面の継ぎ目、背面の継ぎ目の 7 点をグラフにしたものである。下の赤い部分の面積はバックグラウンドを表している。この 7 点は大体のピークの出るチャンネルや半値幅が大体同じだったが継ぎ目 1,2 の辺のピーク位置 (ピンク色) が背面中央に比べて 5%程低く、特に継ぎ目 2 の分解能は悪かった。

表 4.7: ESR ^{241}Am 測定解析結果

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
背面中央	121.17	10.94	21.22
背面角	125.23	11.85	22.24
側面中央	119.85	11.35	22.25
側面角 (MPPC から遠い)	122.21	11.17	21.48
側面角 (MPPC 側)	108.10	11.03	23.98
継ぎ目 1	115.41	10.78	21.95
継ぎ目 2	112.77	12.96	27.01
継ぎ目背面	123.57	11.27	21.44
正面中央	160.34	13.46	19.73
正面角	104.56	12.01	26.99



chap4/ESR_Am_rserch.png

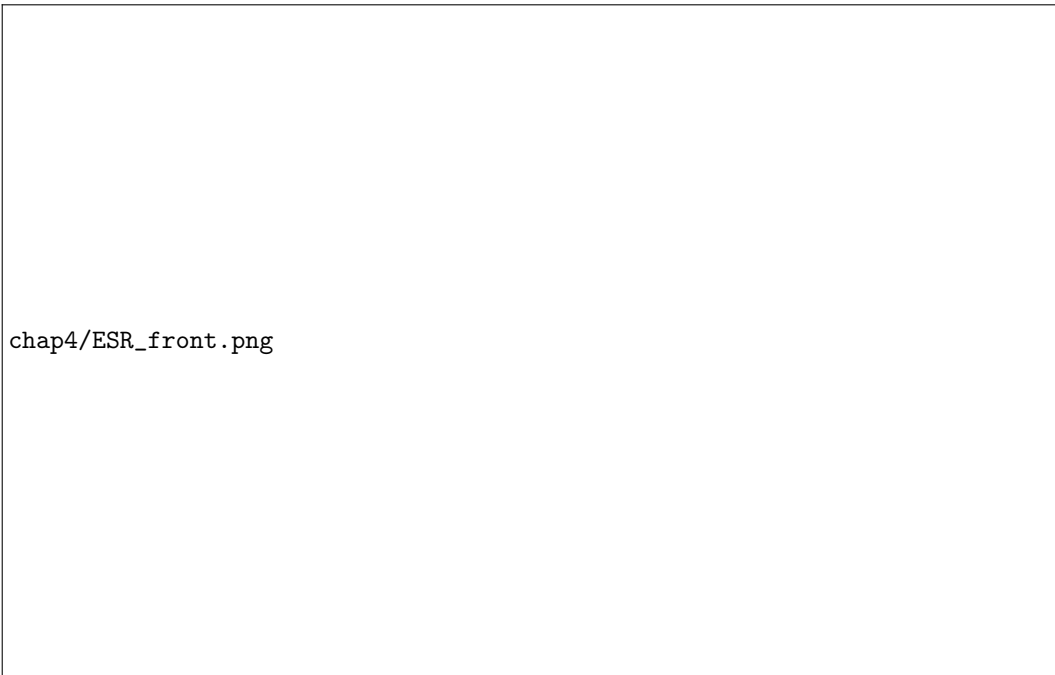
図 4.16: ESR 反射材の部分ごとの照射

正面の中央と角、側面の MPPC に近い側の角

次に正面の中央と角、側面の MPPC に近い側の角の 3 点の測定結果を図 4.17 に示す。また参考のために背面の中央のグラフ (緑色) も用意した。この 3 点は他の測定箇所のピーク位置の平均からのずれが大きかった。正面の中央の測定について、図 4.17 ではピンク色で示されているが、光電吸収ピーク位置が背面中央のものよりもかなり高い位置に現れている。これは発生した可視光が反射材で反射せずに直接 MPPC に入り込んできている割合が高いからと考えることができる。正面の中央はつまり検出器である MPPC 目の前のシンチレータの部分のことであり、ダイレクトに MPPC に入る光子の数の割合が多くなると考えられる。ダイレクトに入る光子が多ければ反射などで失う光子も少なくなるので結果的にピークチャンネル値も高くでると考えられる。

側面の MPPC に近い側の角と正面の角

次に側面の MPPC に近い側の角と正面の角の測定結果について。こちらのピークは背面の中央のピークよりも左にずれているのがわかる。このような結果になった原因はシンチレータと MPPC の受光面の大きさが関わっていると考えた。MPPC の受光面は $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ であり、シンチレータの正方形の一辺 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ よりもやや小さく、MPPC に近い側のシンチレータの角で発生した光が反射することなくそのまま MPPC に入ることは難しい。また発生した光がどこかの面で反射して MPPC に戻ってくることが考えられるが、そのためには一度背面で反射しなければならず、シンチレータ内を反射しながら往復することになるが、この過程で光子が失われ、結果的に光量が減ってしまうということが考えられる。



chap4/ESR_front.png

図 4.17: 正面 2 点と側面 MPPC に近い角

AI 蒸着 CsI の測定結果

同様に AI 蒸着 CsI の測定結果も載せる。

まず、正面 2 点と側面 MPPC に近い角のグラフをのせた図 4.18 について、ESR と振る舞いが似ていたところは、MPPC の正面中央 (緑) で高いピーク位置を示したことである。また側面の MPPC に近い側の角では ESR と同じようにピーク位置の出るチャンネルが低くなっていたがその差が大きく、背面のピーク位置よりも 30%程も低下していた。正面の角についてはピークが 2 つ発生してしまっていた。原因は角の決定がうまくいかず、中央、角に同時に照射してしまった可能性があったからである。後にグリスを塗り直し、再度測定したところ、ピークは低エネルギー側に現れ、ESR と同じ振る舞いを示した。

表 4.8: Al 蒸着 ^{241}Am 測定解析結果

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
背面中央	56.04	7.27	30.50
背面角	52.18	7.01	31.55
側面中央	52.28	7.04	31.63
側面角 (背)	50.06	7.58	35.57
側面角 (M)	41.37	8.02	45.56
継ぎ目 1	48.69	7.00	33.79
継ぎ目 2	47.80	6.80	33.42
背面継ぎ目	55.37	7.16	30.39
正面	82.24	10.14	28.99
正面角	79.13	10.12	30.06



図 4.18: 正面 2 点と側面 MPPC に近い角

次に ESR とは振る舞いが異なっていたところについてまとめる。まず背面と側面について、側面の光の収集効率は背面に比べて中央、角関係なく、すべての箇所で ESR よりも悪かった。これは ESR では見られなかった結果である。また背面、側面の中でもそれぞれ中央と角のピーク位置を比べてみると中央よりも角のほうがピーク位置が平均して 4%ほど下がっていた。このことを表 4.9 に示す。

表 4.9: Al 蒸着: 背面と側面のピーク位置の関係

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
背面中央	56.04	7.274	30.50
背面角	52.18	7.006	31.55
側面中央	52.28	7.036	31.63
側面角 (MPPC から遠い)	50.06	7.578	35.57

最後に側面の蒸着の継ぎ目とそうでないところの辺の測定についてだが、2つの差は特になく、蒸着の切れ目自体は性能に関与しているわけではないと判断した。しかし、側面の一辺はどちらも背面中央のピーク位置から平均して14%ほど低い位置をとっていることがわかった。この傾向はESRにも少し見られたものだった。

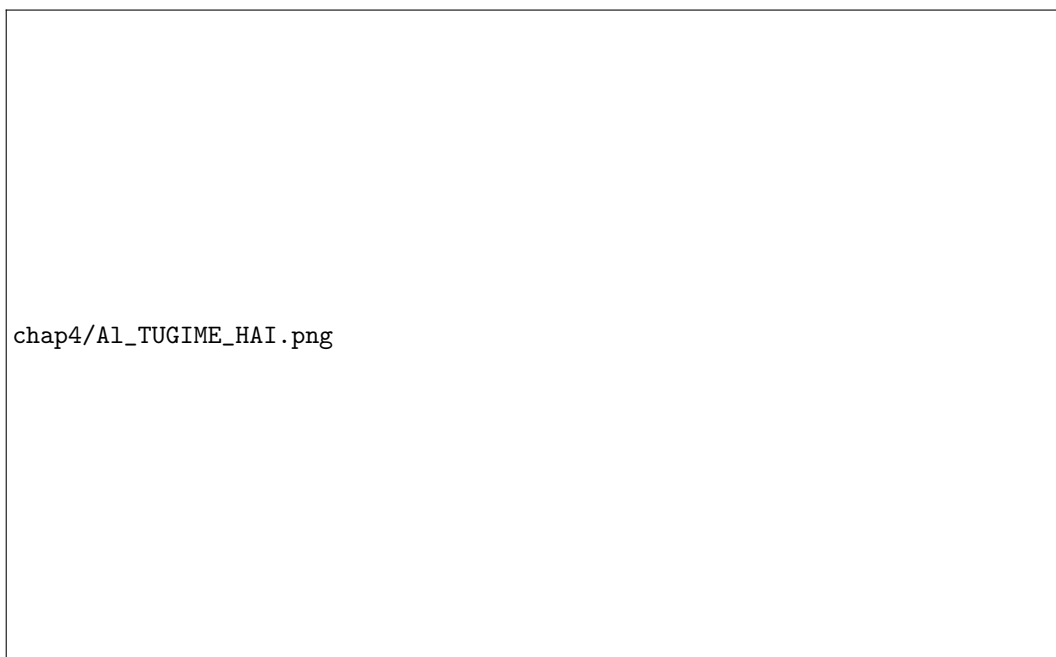



図 4.19: Al 蒸着: 背面中央と継ぎ目 2 点

4.6.7 ファインシャット SP での部分測定


ファインシャット SP を CsI に巻いたものでも数箇所測定を行った。測定場所は背面の中央と正面の中央と角の3点である。正面の中央と背面の中央の測定を比べることで実際に反射材がどの程度全体の集光に関与しているかを調べる。発生した可視光がファインシャット面では反射しないと考えると、正面も背面も直接入ってくる光子のみを測定することになる。よって MPPC との距離の違いで可視光の発生した場所を中心にした球面に MPPC が含まれている立体角の大きさに差が出る。これを求めることで立体角の違いでどのくらい光量が変わるのかがわかる。



chap4/riitaikaku.png

図 4.20: 可視光が発生する場所で直接光の量に変化する

正面、背面の中央に 241Am を照射して、それぞれ表面で可視光が発生すると仮定し、MPPC 受光面は 6mm×6mm、シンチレータの一辺は 1cm とする。正面の中央で発生した可視光は全立体角の半分、つまり 2π がそのまま入ってくることになる。一方、背面で発生した可視光はその場で球状に広がっていき 1cm 離れた 6mm 四方の受光面に届く、この場合 MPPC に届く可視光は全立体角の 3%ほどである。よって正面か背面かによってダイレクトに入ってくる光の量は 17 倍程の差が生じうる。実際に図 4.21 に正面中央、背面中央で測定したグラフをのせる。



chap4/FINE_front_back.png

図 4.21: ファインシャットを巻いたものの正面、背面比較

表 4.10: ファインシャットを巻いたものの正面、正面角、背面解析

測定箇所	ピーク値 [ch]	σ [ch]	分解能 [%]
正面中央	141.6	13.0	21.6
正面角	43.8	8.74	46.8
背面	84.3	8.90	24.8

背面中央のピークチャンネル値は正面中央の約 60%程であることがわかった。これにより他の反射材を付けたもので背面と正面を比べることで反射材がどれほど光の収集に関与しているかがわかる。表 4.7、表 4.8 から ESR、Al 蒸着の背面/正面中央 の比をまとめた。

表 4.11: 反射材のピークチャンネルの背面, 正面比

反射材	背面中央 [ch]	正面中央 [ch]	背面/正面 (%)
ESR	121.166	160.34	75.6
Al 蒸着	56.04	82.24	68.1
ファインシャット SP	84.33	141.61	59.6

ESR の背面中央のピークチャンネル値は正面中央の約 75.6%であり一番正面との差が少なかった。Al 蒸着は 68.1%とその後に続き、差が一番大きかったのはファインシャット SP であった。正面と背面のピークチャンネルの差が小さいほど反射材による光子の収集効率が高いと考えられる。

4.6.8 ESR、Al 蒸着の場所ごとの比較

ここで ESR, Al 蒸着の測定結果を場所ごとに並べて比べてみる。まず、2つの反射材の場所ごとのチャンネルの絶対値を比較して、次にそれぞれの背面の中央でのピーク位置を基準としたときにそこからどれくらいずれているのかを基準からの比で表した。測定箇所にそれぞれ番号を振り、場所ごとに測定結果をまとめた。

表 4.12: 測定場所の番号

番号	測定箇所
1	背面中央
2	背面角
3	側面中央
4	側面角 (背面側)
5	側面角 (MPPC 側)
6	継ぎ目 1
7	継ぎ目 2
8	継ぎ目背面
9	正面中央
10	正面角

今回の測定では Al 蒸着 CsI の No.10 の正面角の測定のみ、正しく角の決定ができていなかったため、後日グリスを塗り直したもので再度測定したものとなる。No.9 と No.10 を測定し、No.9 の正面中央と照らし合わせて 10 番に記入している。図 4.22 を見ると ESR と Al 蒸着ではすべての点においてピーク位置が低いことがわかる。しかし、大まかな振る舞い方はどの場所でも似ている。

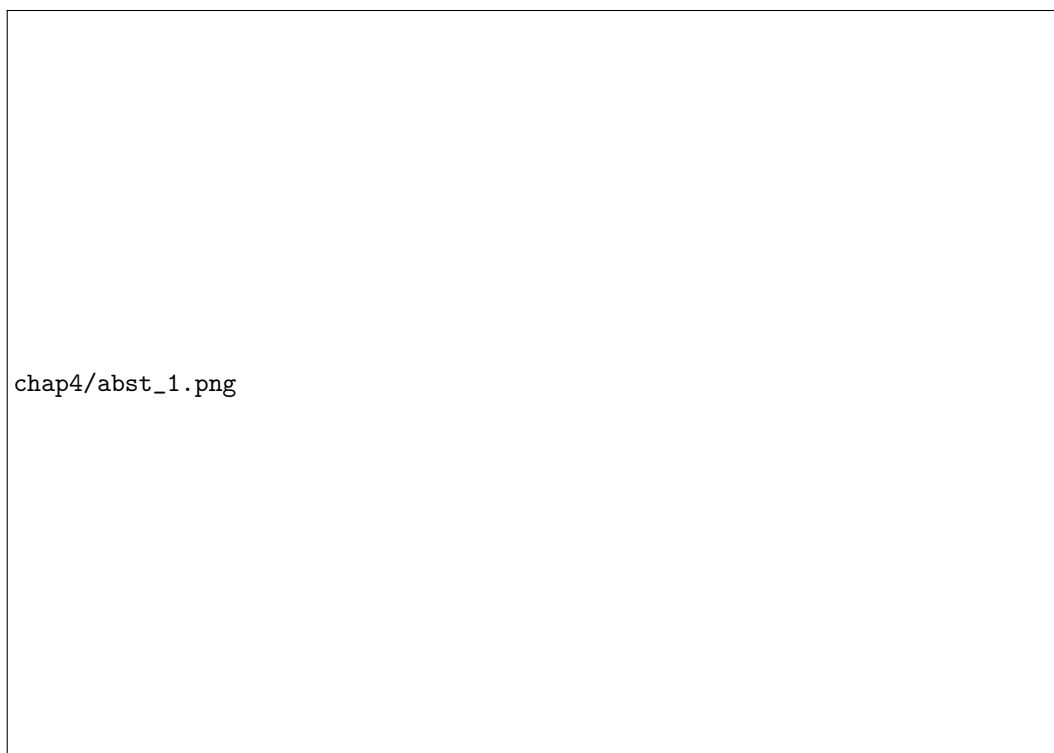
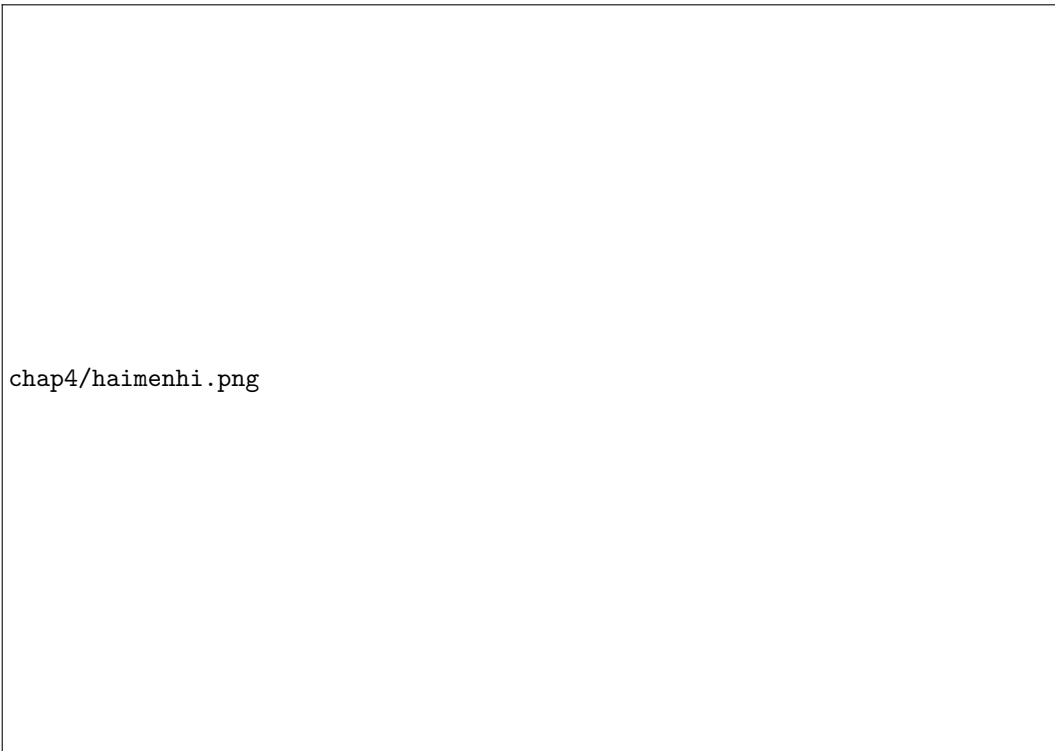


図 4.22: ESR と Al 蒸着のピークチャンネルの絶対値比較

次に図 4.23 について、それぞれの反射材の背面中央のピークチャンネルからの比をグラフにしたものである。またファインシャット SP を巻いたものでも No.1 の背面中央、No.9 正面中央、No.10 正面角の測定結果も重ねている。このグラフを見ると 5 番の側面角 (MPPC 側) や 9 番の正面中央、10 番正面角では ESR、Al 蒸着どちらもピーク位置の起伏が大きいと特に Al 蒸着では大きく変化していることがわかる。この 3 つの点を比較することでシンチレータ内の ESR との反射の具合の違いがわかる。

まず 9 番の正面中央では MPPC の目の前で可視光が発生するので直接光の割合が非常に大きい。一方で 5 番の側面角 (MPPC 側) や 10 番正面角は MPPC のすぐ横で可視光が発生するのでダイレクトに光子が MPPC に飛んでくることは難しく、シンチレータ内のどこかの反射面で数回以上反射をしないと MPPC まで辿り着くことができない。また図 4.20 にあるように背面の中央は MPPC のすぐ横よりかは直接光が MPPC に届きやすく、正面中央と正面角のピーク値の中間に位置している。そして ESR は背面の基準からのずれが大きくなると考えられる No.5,9,10 のピーク値を Al 蒸着よりも小さく抑えているということは、MPPC のすぐ横で発生した可視光も Al 蒸着よりも効率よく反射し、No.9 の正面中央とのピーク値の差を縮めている結果だと考えられる。No.9 から No.10 への変化で負の傾きが一番大きいのがファインシャット SP であり、それよりも負の傾きが小さい Al 蒸着 CsI は、ESR には及ばないが反射効果があると考えられる。



chap4/haimenhi.png

図 4.23: 背面中央のピークチャンネルからの相対比
基準（点線）からのズレが小さいほど全体のばらつきが小さい

4.6.9 それぞれの面の場所ごとの収集効率の対称性

ESR 反射材を巻いた CsI、金属蒸着 CsI はともに角の測定の際、時間短縮のため背面の角は一箇所を測定し、それ以外の 3 つの角もシンチレータ、MPPC、反射材の対称性を考慮して同じような性能を発揮するだろうと推測して 1 時間測定は行わなかった。ここではシンチレータ、MPPC の位置関係性から見て、対象的な位置にある箇所同士で本当に性能が同じであるかを確かめる。測定した面は Al 蒸着 CsI の正面、側面、背面の 9 点ずつである。

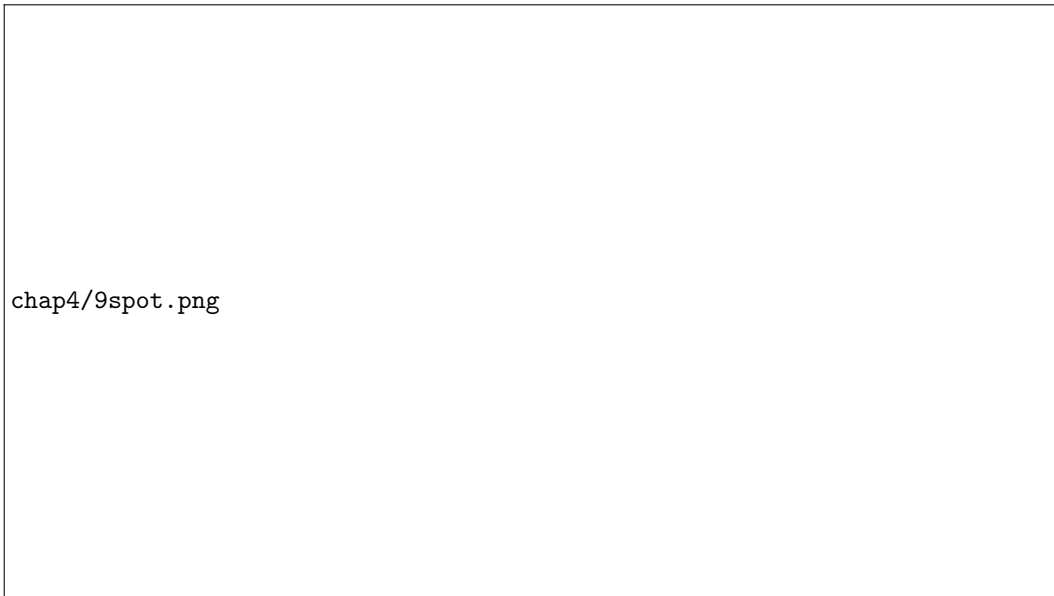


図 4.24: 測定する 9 点

- 測定箇所は Al 蒸着 CsI の正面、側面、背面のそれぞれ 9 点ずつ
- 測定時間はそれぞれ 10 分間

背面は長時間測定で中央と角に差が出たので中央と十字にクロスしている 4 点のピーク位置の平均、その他角の 4 点の平均を比べた。また側面は MPPC からの距離によってピークチャンネル値が変化していたので、側面を 9 点に分けたときの MPPC に近い列、中央の列、一番遠い列のようにまとめた。

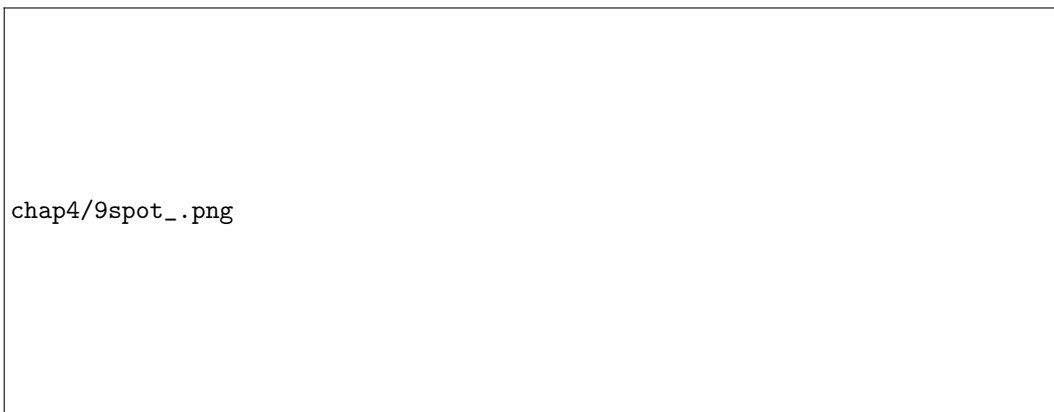


図 4.25: 背面、側面、正面の比べる点

背面の 9 点

角のピークチャンネル値が中央にくらべてわずかに低い、平均値は大きな差はなかった。背面の角はピークチャンネル値のばらつきが大きく中央の平均値よりも高いピークチャンネルをとる角もあったためだ

と思われる。正面は中央とそれ以外の点を比べた。

表 4.13: 背面の 9 点

測定箇所	平均ピークチャンネル値
中央 5 点	55.42
角 4 点	54.74

側面の 9 点

側面は MPPC からの距離が近ければピークチャンネル値は低く、遠ければ高いという結果になった。

表 4.14: 側面の 9 点

測定箇所	平均ピークチャンネル値
MPPC に近い列	43.40
中央列	48.47
MPPC から遠い列	51.50

正面の 9 点

最後に正面の 9 点を測定した。正面中央は高いピークチャンネル値をとったがそれ以外の点ではピークチャンネル値はすべて 60ch 以下であった。正面は直接光が大きな割合を占めており、また MPPC の受光面が 6mm×6mm であるため正面以外の点で発生した可視光のほとんどは直接 MPPC に入ることができないからであると考えた。

表 4.15: 正面の 9 点

測定箇所	平均ピークチャンネル値
正面中央	143.03
それ以外の 8 点	52.49

4.7 ESR 反射材と蒸着反射材との違い

ESR 反射材と蒸着反射材の構造や素材の違いをふまえて今回の測定結果に差が出た原因を考察する。今回の実験で差が出たところのひとつは背面の角や側面の角である。ESR では中央と角の性能を相対的に比べたときに同程度の集光効率であったのに対し、金属蒸着したものでは角で集光効率が悪化していた。この場所は「ESR 反射材を巻く」と「蒸着する」での二種類のやり方では差が出やすい位置である。反射材を巻く場合、立方体の角の辺にも巻きつけることになるのでどうしても側面の角の周りに隙間ができる。一方、金属蒸着することで付けられた反射材は角など幾何学的な形状の違いに関係なく均一に反射材がついている。このことを考えると蒸着により反射材を「隙間なく付ける」という特徴はシンチレータ角付近の性能について考えると逆効果であった可能性がある。

chap4/hansya.png

図 4.26: Al 蒸着と ESR の反射の仕方の違い
反射面が丸みを帯びている方が反射光が内側に広がりやすい

4.8 Al 蒸着とファインシャット SP、ESR の全体的な考察

4.8.1 Al 蒸着とファインシャット SP について

まず、4.5.3 の図 4.8 で Al 蒸着とファインシャット SP のピーク位置がほぼ一致していたことについて考える。部分照射測定では図 4.23 のように反射効率が異なっているように見えたが、全体に照射するとピーク位置が同じくらいになってしまう。これは場所ごとの測定結果が全体の測定結果のうちどれだけ寄与しているかを考えることでわかる。下の表は部分照射した結果とセシウム照射の結果を合わせたものである。 ^{241}Am を正面中央から照射した Al 蒸着、ファインシャット SP が同じだったことに注目する。これを同じピーク値だとみなして 1:1 として今度はそれを基準に表 4.16 を作る。また ^{137}Cs 照射は表 4.6 より 1:1:2 とする。

表 4.16: 正面の 9 点

線源	照射場所	ファインシャット SP	Al 蒸着	ESR(CsI No.4)
^{241}Am	正面中央 (直接光)	1	1	1.66
^{241}Am	背面 (MPPC から遠い)	0.595	0.681	1.25
^{241}Am	正面角	0.184	0.379	1.08
^{137}Cs	全体	1	1	2.0

このようにして、Al 蒸着とファインシャット SP に注目する。背面や正面角では 2 つの比が異なる数値だが、正面中央だけは同じ比率ということになる。また ^{137}Cs の照射の際も同じ比率となっていることから、Al 蒸着、ファインシャット SP は全体照射においても結局正面中央の寄与、つまり直接光の影響が支配的だ

ということが言える。これはどちらも MPPC 近くで発生した可視光しか十分にカウントできていないといえる。その他の点である背面や正面角は光子の光路距離が長かったり、反射を必要としたりするのでイベントが正面中央に比べて極端に減ってしまうということだ。また ESR に関しては正面中央の影響は支配的ではなく、表 4.23 の通り他の点でもある程度のイベント数がきてかつ、どの点でも同じくらいのピーク値を出すため、そのピークが全体照射した際に支配的になると考えた。

4.8.2 低エネルギー側での盛り上がりについて

これらの考察を踏まえると低エネルギー側での盛り上がりについても説明できるようになる。 ^{137}Cs の照射測定で初期、中期、後期すべての測定において蒸着 CsI は ESR に比べると低エネルギー側が盛り上がっていることがわかる (図 4.6 など)。これはコンプトン散乱によるものだと考えていたが、図 4.8 ではファインシャット SP でもこの低エネルギー側の盛り上がりを見せていた。先程の考察の考え方でいくと、 ^{137}Cs 照射で見られる光電吸収ピークはその殆どが正面中央の直接光によるものでそれ以外の場所で発生した光は低エネルギー側へと積み重なっていると考えられる。つまり低エネルギー側は「コンプトン散乱のイベント数 + MPPC から遠い場所のピーク」の合計になっていると考えられる。

4.8.3 ^{137}Cs 照射 中期のコブの考察

「Al 蒸着の ^{137}Cs 照射では直接光によるものが支配的」という考え方をすると図 4.7 での中期 (光学グリスの量が少ない時期) のコブについても少し考察ができる。4.5.3 で述べたように、直接光は構造的に入射角が比較的小さくなることが多い。また入射角が小さいとグリスが不十分でも入射できる。実際に Al 蒸着の高エネルギー側のコブのピークチャンネル値を読むと 750ch ほどで、このチャンネル値は図 4.8 の後期 (光学グリスが十分な時期) Al 蒸着のピークチャンネル値と同じくらいになることが説明できる。

第5章 補足説明

5.1 光学グリス

本文の4.5.3でも話したように、今回の実験では同じシンチレータ、同じ反射材の付け方でもMPPCを付け直すだけで性能が変化することがあった。調べるとその原因は光学グリスにあることがわかった。実験ではシンチレータと光検出器であるMPPCとの間に光学グリスを塗布しているが、今回の実験中に光学グリスの塗り具合でシンチレータ検出器自体の光の収集効率が大きく変わることに気づいた。

そもそも光学グリスの役割はMPPCとシンチレータの接着の他にシンチレータ表面とMPPC表面の屈折率の緩和に用いられている。光学グリスがない場合、シンチレータとMPPCの表面の屈折率の違いにより発生した光子が境界面で全反射を起こしてしまうためである。

塗布していたグリスの量はMPPCとシンチレータの接着が十分にできて、かつ表面にまんべんなく行き渡っていれば光学グリスの厚さは0.5mm以下程でも十分だと考えていたが、1mm以上の厚さで塗ると性能がそれまでよりも上がることに気づいた。また1mm以上の厚さになるとグリスの表面に気泡が入り込んでしまうため、接着した部分同士ですり合わせることで気泡をなくした。下の図5.1は光学グリスの接着面の厚さを0.5mm以下にした場合と1mm以上にした際に現れるピークの差をグラフにしたものである。

測定条件

- シンチレータ、ESR反射材の巻き方は同じ
- MPPCとシンチレータ間のグリスの厚さのみを変える
- 線源はCsI

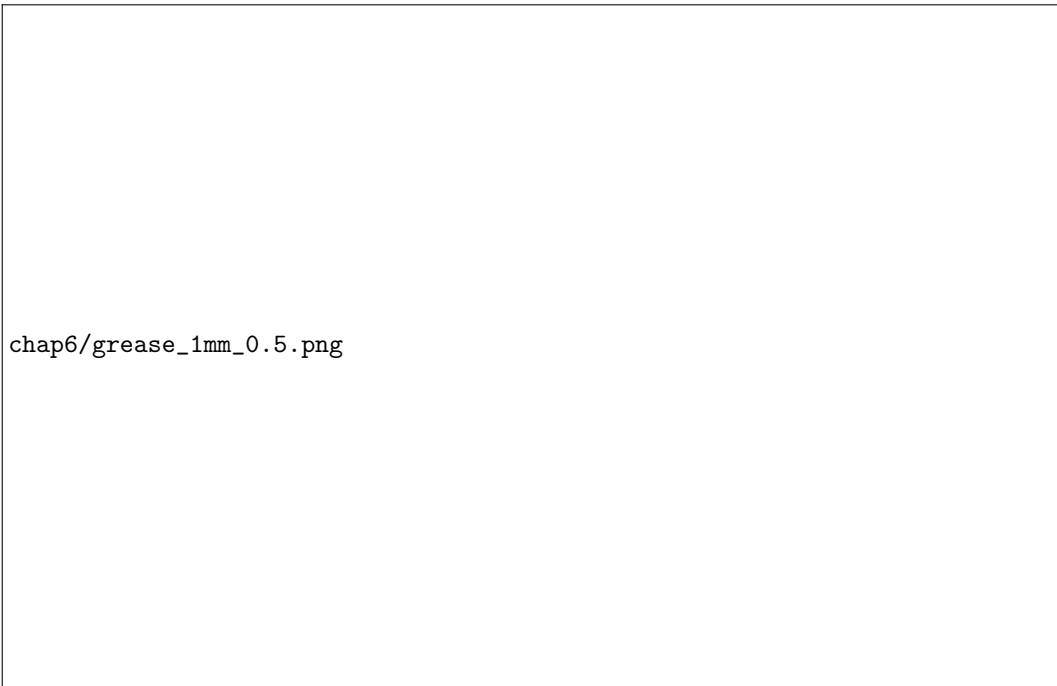
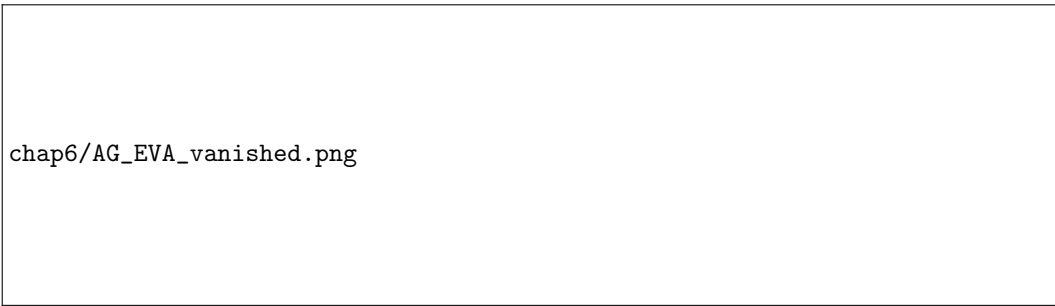


図 5.1: グリス 0.5mm 以下と 1mm 以上塗った場合の性能の差

このように光学グリスの塗り方を変えるだけで光電吸収ピークチャンネルが 1.2 倍程変化した。光学グリスの塗りが薄い場合、MPPC に入射するはずの光子が全反射される確率が高くなり、グリスを適量塗っている検出器よりも光子の収集効率が下がってしまったのではないかと考えた。また縦軸のイベント数に差があるが、これは線源の距離が違ったためだと思われる。また多量に光学グリスを塗ると若干ピーク位置が低下することもわかった。これはグリスがあまりにも多いと中の気泡が抜けにくくなるからと推測した。

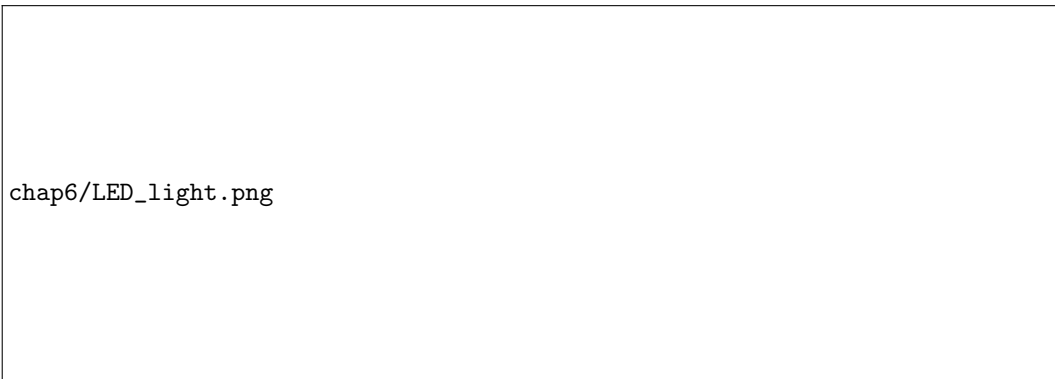
5.2 Ag を蒸着したシンチレータ表面の金属光沢が消える

今回沖縄科学技術大学院大学で作製された Ag 蒸着シンチレータは、到着直後はきれいに蒸着された状態であったが、開封し測定を続ける中で少しずつ Ag の蒸着部分が無くなっていき、最終的にはシンチレータの内側から外側に貼っているカプトンテープの番号が透けて見えるようになってしまった。つまり可視光がほとんど反射されずに外へ抜け出ていくような状態になっていたということである。図 5.2 は初期のころの Ag 蒸着 CsI と数ヶ月たった後の Ag 蒸着 CsI である。またどの程度光が漏れるのかを確認するために、使用していた Ag 蒸着 CsI、未使用の Ag 蒸着 CsI、Ag 蒸着プラスチックシンチレータの下から LED ライトを当てたものの写真が図 5.3 である。今回の実験では登場しなかったが Ag を蒸着させたプラスチックシンチレータもあり、こちらは光漏れしておらず、鏡面を保っていた。



chap6/AG_EVA_vanished.png

図 5.2: 左が初めてのころの Ag 蒸着シンチレータ。左は蒸着された Ag が無くなってしまった CsI。前面から背面に貼り付けられたカプトンテープの番号が確認できる。



chap6/LED_light.png

図 5.3: 使用していた Ag 蒸着 CsI、未使用の Ag 蒸着 CsI、Ag 蒸着プラスチックシンチレータの下から LED ライトを当てたもの

原因

このようになった原因としてまずテフロンテープによる固定などで表面の Ag が剥がれた可能性があったが、蒸着面の上からフィルムコーティングされたものはがれていなかったなのでその可能性は無いと判断した。よって Ag が他の物質と何らかの化学反応を起こして何かの化合物になったと推測した。

そこでまず、Ag が空気中の酸素と反応して酸化銀となった可能性について考えた。しかし、Ag 蒸着シンチレータは Ag を蒸着しした後に上からコーティングを施している。そのため側面、特に背面は Ag が直接空気に触れる可能性は低い。また Ag は単体で安定（イオン化傾向が小さい）していて、空気中の酸素とも反応しにくく、温度上昇や光の照射などですぐに銀と酸素に分離してしまう。そのため酸化銀に変化したという可能性も低いと判断した。

最後に表面の Ag がシンチレータである CsI と反応した可能性を考えた。この場合、化学反応にかかわる物質は Ag と I である。この化学反応が起こるとヨウ化銀 (AgI) が生成する。以下は化学反応式である。



ヨウ化銀は黄色であり、変化が起こった後の蒸着 CsI も少し黄色がかっているようにも見えた。しかし、やはり Ag の反応性は低く、 Ag^+ がどのようにして発生するのかが問題になったが、金属ナノ粒子という物性を考慮すると Ag^+ が発生するかもしれないと推測した。

金属ナノ粒子

金属ナノ粒子とは物質を小さな粒、ナノスケールの大きさまで小さくしたとき、一般的な大きさの物質とは異なる物性を示すもので、比表面積が通常の物質に比べて極めて大きいことや量子サイズ効果によるものだと考えられている。[5] また銀ナノ粒子について、この粒子は可視光や近赤外光を照射することによって、 Ag^+ に酸化されることが分かっている。[6]

以上のことをまとめると、まず CsI 表面に銀を蒸着する際、銀粒子は一度ナノオーダーの大きさのレベルの微粒子となってから徐々に CsI 表面に堆積していく。よって蒸着表面の Ag は銀ナノ粒子としての物性を示す。そして測定開始とともに CsI からの可視光線を浴び、内側の銀ナノ粒子は Ag^+ へと変換し、CsI との反応を始めたということになる。

この考え方だとフィルムでコーティングされていても可視光と内部の物質だけで反応が進むのでつじつまが合う。また使用していた Ag 蒸着 CsI は長時間の測定により最も Ag の消失が激しく、また使用していない方もデシケータの中にありながら蛍光灯の影響を少しずつ受けていたものだと思う。

第6章 まとめと今後の課題

今回の実験ではシンチレータに反射材を付ける工程を蒸着という新しい方法で試みた。測定により発生した可視光の収集効率が一般的な ESR 反射材よりも劣っていることがわかり、また場所により光の収集効率にばらつきがあることもわかり、角付近で収集効率が悪化していることがわかった。また部分ごとに照射することにより、全体照射によるピークの内訳は、ESR ではダイレクト光ではなく、シンチレータの各地からくる反射光が支配的であったが、Al 蒸着 CsI は MPPC すぐ近くで発生するダイレクト光の影響が全体に照射する場合でも支配的になることがわかった。これを踏まえて、まずは金属蒸着面表面での可視光の反射率を調べる。また入射角による反射率の変化についても調べていきたい。特にシンチレータ CsI に金属を蒸着させる場合、CsI の潮解性により表面に細かい凹凸が発生して鏡面反射がうまくできなくなっている可能性も考えられるため、それについても考えていきたい。そして、金属蒸着面で十分に反射することが確認できたら、次にモンテカルロ法によるシンチレータ内部の光子のシミュレーションを行い、具体的な光子の収集効率改善の方法を探っていきたい。

付録A 付録

A.1 再現性

今回の研究で扱うシンチレータは温度や湿度に敏感で条件が異なるとそれだけで性能も変わってしまう。部分ごとの測定では数日単位での測定が必要になるため、再現性を確保する必要があった。特に照射する位置の変更のためのセットアップ変更後やシンチレータと MPPC を固定するためにテフロンテープを巻いた直後は指からシンチレータへ体温が伝わってしまい、シンチレータの性能が落ちてしまう。また冬の朝などは温度が低いいためシンチレータ自身の温度が一定 (20.0 °C) になるまでに時間がかかる。セットアップをしてからすぐに測定を開始してしまうと時間が経つにつれてシンチレータ自身の性能が少しずつ変わってってしまう。

再現性確保のための ^{137}Cs 光電吸収ピークチェック

そこで測定を始める前に ^{137}Cs をシンチレータに照射してピークチャンネルが安定するまで測定を開始しないという方法をとった。実際のチェックの条件は以下の通り

- セットアップ後からの測定なので線源は ^{137}Cs 、 ^{241}Am が使用される
- 連続で 5 分間ずつ測定し 100 分間続ける
- 同じ場所、距離から線源を照射し続ける

上記の手順により計測を行った。実際の計測の結果 40 分経過後からはほとんどピークの変化は見られなくなった。下の図 A.1 と A.2 は十分時間経過後を 100 分後と仮定し、それを基準にそれぞれ計測開始直後と 60 分経過後のスペクトルを比べたものである。線源は ^{137}Cs 、 ^{241}Am が使用されている。1100ch あたりに ^{137}Cs の光電吸収ピークが確認できる。図 A.1 のピンク色のスタート直後のグラフでは右にずれていたピーク位置が、図 A.2 の 60 分後には十分経過後の青色のグラフに重なっていることが確認できる。これを確認することによって毎回の測定で再現性が確保できているかの確認の一つの目安になる。またこの確認により、ピークチャンネルの誤差を 2% 以内することができた。

また 130 チャンネル付近に鋭いピークが見られるが、これは ^{241}Am の光電吸収ピークである。今回は時間変化を調べるためにセットアップは変化していないが、 ^{241}Am のピークチャンネルはセットアップ変更時の照射箇所に変化するため毎回の再現性のチェックには使えない。

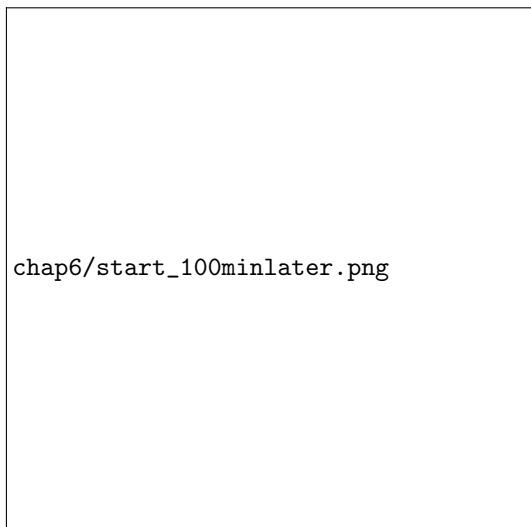


図 A.1: 測定開始直後と 100 分経過後

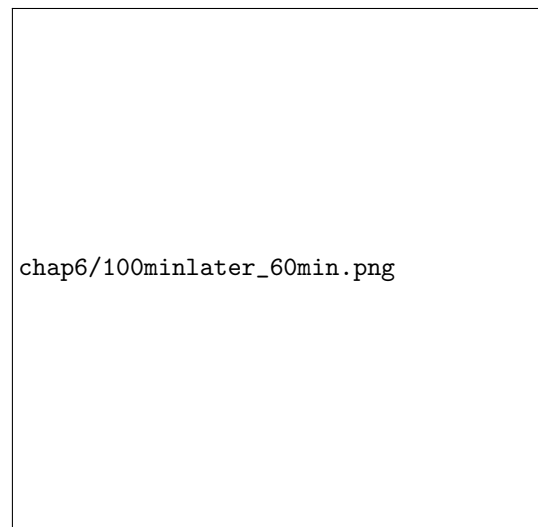


図 A.2: 60 分経過後と 100 分経過後

謝辭

参考文献

- [1] Element/Compound/Mixture Selection
- [2] 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 馬場・中澤研究室 清野愛海 大型シンチレータ検出器の光量増加と実用性向上を目指した反射材の改良と性能評価
- [3] <https://www.radiologist-study.org/photoelectric-effect/>
- [4] Living Library <https://eng.libretexts.org/>
- [5] ウィキペディア ナノ粒子 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%8E%E7%B2%92%E5%AD%90>
- [6] 立間徹 プラズモン誘起電荷分離とその機構
- [7] 無機結晶シンチレータに含まれる 放射性不純物の測定 東北大学理学部物理学科 鵜養 美冬 http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~db/human_resource/thesis/1995_B_1_B_1.pdf
- [8] 浜松ホトニクス https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [9] 株式会社ハナムラオプティクス http://www.hanamuraoptics.com/scintillatorcrystal/scintillatorcrystals/Tl_doped_CsI.htm
- [10] 新しい三次元位置有感型放射線検出器の実証 小林進悟 <https://kaken.nii.ac.jp/en/file/KAKENHI-PROJECT-24656573/24656573seika.pdf>
- [11] <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E5%8F%8D%E5%B0%84>
- [12] ファインシャット SP <https://www.ko-pro.tech/fine-shut/>