MPPC検出器を用いた対生成の断面積測定

神谷有輝 西野裕基 乗竹剛志 萩原慶一 樋口匠 宮地真路 横田猛

2014/9/30

Contents

1	はじめに	3
2	理論 2.1 原子核の場による γ → ee ⁺ 反応の断面積 2.2 Compton 散乱の断面積	3 3 6
3	実験器具 3.1 MPPC(アバランシェフォトダイオード)	7 7 9 11 11
4	実験準備4.1 本実験における線源の材料の決定4.2 隣接するシンチレータへの影響の測定実験4.3 Geant4による対生成シミュレーションの解析4.4 予備実験から推定したガリウム推定量	11 11 12 13 16
5	セットアップ 5.1 実験装置の配置	17 17 18
6	本実験 6.1 NaI 実験データ	19 19 23
7	pair creation 解析 MPPC 7.1 対生成に対する MPPC データ解析 7.2 対生成シュミレーション解析 7.3 コンプトン散乱に対する解析	24 24 27 30
8	まとめ及び改善点	31
9	謝辞	32

1 はじめに

MPPCとは、Multi Pixel Photon Counterのことを指す。通常よく実験で用いられる検出器 (PMT)と比べて,優れた性能・特性を持つ。1つ目は、PMTが1000V以上の高電圧で用いるのに対して、低電圧 (70V 程度)で作動することである。2つ目は、小型であることである。この特長を生かして、本実験のセットアップをコンパクトに抑えることができた。3つ目は、これが最も優れた特性であるが、フォトンカウンティング能力である。MPPCは、文字通り光子の数を数えることができる程の分解能を持っている。これらの特徴については後に詳しく解説する。

京大の KUANS でガリウムに中性子照射を行って、ガリウム線源を準備 した。このガリウム72は2.508MeVと2.202MeVのγ線が出る。線源から 放射された高エネルギーγ線が鉛シートに飛び込む。511keV×2以上のエ ネルギーを持つので対生成が起きうる。この対生成の断面積を先の MPPC を用いた検出器で測定した。この対生成を物理学の言葉を用いて理論的に記 述し、実験結果と照合することが本実験の目的である。MPPCおよび最近開 発されたばかりの MPPC 専用モジュールを用いたことも特筆すべき事柄で ある。

2 理論

2.1 原子核の場による $\gamma ightarrow ee^+$ 反応の断面積

本実験の目的は Pb 原子核に γ線を入射した際の電子, 陽電子対生成の断面積 を求めることである。実験による結果を考察する上で理論による予想と比較 することが重要となる。ここでは, 電子陽電子対の断面積の理論計算につい て簡単に述べる。

運動量保存則により γ 線は真空中では電子, 陽電子対に崩壊し得ない. しかし, 原子核等の物質との相互作用により, このような対生成過程が起こりうる (図 1)。

原子核による対生成過程の断面積に対して,例えばBorn近似を用いた計算 が行われている。Born近似の計算に対してさらに高次の項の補正 (Coulomb 補正) や軌道電子による screening の効果を取り入れた計算結果は,次のよう になることが知られている [1]。

$$d\sigma = 4Z^{2} \alpha \left(\frac{e^{2}}{m_{e}c^{2}}\right)^{2} \frac{dE_{+}}{(h\nu)^{2}} \left\{ \left(E_{+}^{2} + E_{-}^{2} \left[\frac{\phi_{1}(\xi)}{4} - \frac{1}{3}\ln Z - f(Z)\right)\right] + \frac{2}{3}E_{+}E_{-} \left[\frac{\phi_{2}(\xi)}{4} - \frac{1}{3}\ln Z - f(Z)\right] \right\}$$
(1)



Figure 1: 原子核による $\gamma \rightarrow ee^+$ 反応の Feynman 図

ここで*Z*は原子核の原子番号, E_+,E_- は生成された陽電子,電子のエネルギー, ν は入射 γ 線の振動数である. また $\phi_1(\xi),\phi_2(\xi)$ は screening による補正を表す 関数,f(Z)は Coulomb 補正を表す関数で,以下のように与えられる。

$$\phi_1(\xi) = 20.863 - 2\ln[1 + (0.55846\xi)^2] - 4\left[1 - 0.6e^{-0.9\xi} - 0.4e^{-1.5\xi}\right](2)$$

$$\phi_2(\xi) = \phi_1(\xi) - \frac{2}{3}(1 + 6.5\xi + 6\xi^2)^{-1}$$
(3)

$$f(Z) = a^{2}[(1+a^{2})^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^{2} + 0.0083a^{4} - 0.002a^{6}] \quad (4)$$

ここでa = Z/137であり、

$$\xi = \frac{100m_e c^2 h\nu}{E_+ E_- Z^{1/3}} \tag{5}$$

である。但し Born 近似を用いたこれらの表式は, 低エネルギー, あるいは大きな Z に対しあまり正確でないと考えられる。

より様々なエネルギー領域での理論計算をまとめてデータベース化した ものが[2]である。[2]によると,鉛に対する対生成の断面積は,図2のように なる。

また,今回の実験ではエネルギー 2.2MeV と 2.5MeV の γ 線を用いたが,それらのエネルギーでの断面積の値は以下のようになる。

$$\sigma_{pair}(h\nu = 2.2 \text{MeV}) = 6.89 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{g})$$
 (6)

$$\sigma_{pair}(h\nu = 2.5 \text{MeV}) = 8.80 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{g})$$
 (7)

尚, これらの値は実際には [2] の出力する離散的なデータを適当に補間して得たものである。



Figure 2: 鉛原子核による $\gamma \rightarrow ee^+$ 反応の断面積



Figure 3: Compton 散乱の tree level での Feynman 図

2.2 Compton 散乱の断面積

今回の実験の解析では, γ 線に対する Compton 散乱の影響も考察した.ここでは Compton 散乱とその断面積の計算について述べる.

Compton 散乱とは,電子によって光子が散乱を受ける過程である.その tree level での Feynman 図を図3に示す.

Feynman 図より不変散乱振幅を書き下すと以下のようになる.

$$i\mathscr{M} = \bar{u}(p')(-ie\gamma^{\mu})\epsilon_{\mu}^{*}(k')\frac{i(\not\!p + \not\!k + m_{e})}{(p+k)^{2} - m_{e}^{2}}(-ie\gamma^{\nu})\epsilon_{\nu}(k)u(p) + \bar{u}(p')(-ie\gamma^{\nu})\epsilon_{\nu}(k)\frac{i(\not\!p - \not\!k' + m_{e})}{(p-k')^{2} - m_{e}^{2}}(-ie\gamma^{\mu})\epsilon_{\mu}^{*}(k')u(p)$$
(8)

ここで $\epsilon_{\mu}(k)$ は photon の偏光ベクトルであり, また u(p) は次式を満たす.

$$(\not p - m)u(p) = 0 \tag{9}$$

この不変散乱振幅より,初期状態の電子の静止系での,spin 平均をとった散乱 断面積は

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \left[\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} - \sin^2\theta\right]$$
(10)

となる [3]. ここで $k = (\omega, \omega \hat{z}), k' = (\omega', \omega' \sin \theta, 0, \omega' \cos \theta)$ とおいた.4 元運動 量の保存より ω と ω' の関係は

$$\omega' = \frac{\omega}{1 + \frac{\omega}{m_e}(1 - \cos\theta)} \tag{11}$$

であり,全散乱断面積は次のようになる.

$$\sigma = \frac{\pi \alpha^2}{m_e^2} \int_{-1}^{1} dx \frac{1}{(1 + \frac{\omega}{m_e}(1 - x))^2} \left[\frac{1}{1 + \frac{\omega}{m_e}(1 - x)} + \frac{\omega}{m_e}(1 - x) + x^2 \right]$$
(12)

電子の運動量が非常に小さいとし、実験室系でも初期の電子の静止系でも γ 線の振動数がほとんど変わらないとすると、 γ 線のエネルギーが2.2MeV,2.5MeVのときの実験室系での全散乱断面積は次のようになる.

 $\sigma_{compton}(h\nu = 2.2 \text{MeV}) = 0.139 \text{b} \tag{13}$

$$\sigma_{compton}(h\nu = 2.5 \text{MeV}) = 0.129 \text{b} \tag{14}$$

3 実験器具

3.1 MPPC(アバランシェフォトダイオード)



Figure 4: MPPC

MPPCとはアバランシェ・フォトダイオードの一つで光検出器である。 半導体中の電界により入射電子が加速され、他の半導体原子と衝突して電子 を複数はじき出す。この連鎖により微弱な光から大きな電位変化を発生させ、 受光感度を大きくすることが出来る。

アバランシェフォトダイオードの動作原理として、主に PIN 接合のフォ トダイオードを利用する。PN 接合は P 型半導体に+の電圧を、N 型半導体 に-の電圧をかける順方向のバイアスならば小さな電圧でそれぞれに正孔と 電子が供給されるので大きな電流が流れるが、逆方向のバイアスをかけると 電子と正孔はそれぞれの電極に移動するので PN 接合部を流れる電流は存在 しなくなる。この状態で光を当てると PN 接合の間の空乏層の原子を励起さ せ電子正孔のペアを作り出す。そしてそのペアは即座にそれぞれの電極に移 動し電流が流れる。これが逆電圧を印可した場合の光電流である。この正孔 電子対をできるだけ多く電流にするため大きな電圧をかけ、空乏層を広げる ことで感度や応答速度は高くなる。

これに対して PIN 接合では PN 接合の間に抵抗の強い素子 Iを挟むことで不 純物の少ない真性半導体 I ではキャリアが少ないためここが空乏層となり電 界が生じる。キャリアを移動させるために大きな電圧をかけないといけない PN 接合に比べ、PIN 接合ではこの電圧差はキャリアを動かす必要がないの でとても小さくなる。また、PIN フォトダイオードと同じく重要なのがアバ ランシェフォトダイオードであり、PIN 接合に大きな電圧差をかけると、生 成された電子は大きなエネルギーをもつので衝突すると他の原子を励起させ、 新たの電子正孔対をつくりだし、その電子が更に衝突するというように雪崩 のように電子が励起され、光電流が極端に大きくなる。このようにして入射 光に対して高い応答電流を流す機構がアバランシェフォトダイオードの動作 原理である。



Figure 5: APD の電場図

光電子増倍管と比較した場合の利点は

- ・
 照射された光に対して出力電流が高線形性を示す。
- シリコンの場合 190nm から 1100nm、他の材質の場合、長波長に対して、応答を示す。
- 低ノイズ
- 機械的ストレスに強い
- 低コスト

- 小型、低重量
- 長寿命
- 高い量子効率、約80%
- 高電圧が必要ない

光電子増倍管と比較した場合の欠点は

- 面積が小さい
- 内部利得がない (アヴァランシェ・フォトダイオードは除くが、この場合でも、光電子増倍管の利得 10⁸ と比較して、10² ~ 10³ 程度の利得しかない)
- 全体的に見ると感度が低い
- 光子の数を数えるには、特殊な方法が必要。通常、冷却したフォトダイオードと特殊な電子回路を用いる。
- 応答時間が遅い

3.2 EASIROC

MPPC はそれ自体の性質として独立の検出器であるため、多くの MPPC を 実験で用いるためにはそれぞれの MPPC を個別に制御してバイアス、ゲイ ンの調整をしなければ成らなかった。多チャンネルの MPPC をまとめて制 御するためのモジュールが EASIROC であり、主な性能は

- 1. 32ch 読み出し
- 2. 8bit DAC にて MPPC への H.V. を個別に調整可能
- 3. gain 調整可能な Preamp.
- 4. 時定数調整可能な Shaper
- 5. Trigger の生成
- となっており、今回の実験ではこのモジュールからのデータを解析した。



Figure 6: EASIROC モジュール

3.3 プラスチックシンチレーター

今回の実験ではガンマ線からの対生成の検出であり、検出したいのはベータ 線である電子、陽電子である。

また加工、構造上の観点からもプラスチックシンチレーターによっての検出 が最適であると判断した。このプラスチックシンチレーターからの蛍光を MPPCで増幅、検出を行った。構造上小型の検出器が適したのも両者を選択 した理由である。この検出器は、コンプトン散乱、片方あるいは両方の対消 滅光子が漏れたとき電子-陽電子対生成の光電ピークより低い 0.511*MeV* と 1.022*MeV* に現れる 2 つの小さなエスケープピーク、および後方散乱ピーク といった、低いエネルギーでもレスポンスを示す。

3.4 光電子増倍管

またガリウム自体のガンマ線の検出として NaI シンチレーターと PMT を使用した。NaI シンチレーターは無機結晶で Z が大きくガンマ線の検出に適していて、PMT はガンマ線の数を数えるのに適しているためである。

4 実験準備

4.1 本実験における線源の材料の決定

本実験に使用する γ 線源の材料を決定する。今回の実験に必要な条件は以下 の通りである。

- 条件1 発生する γ 線が 2MeV 以上
- 条件2 寿命が数時間~1日程度
- 条件3 常温で固体
- 条件4 容易に入手可能

条件1について、1MeV以上でないと電子陽電子対生成は起きない。さら にエネルギーがある程度高くなければ反応断面積が小さすぎて実験には不適 である。よって今回は2MeV以上という条件で探した。条件2について、す ぐに崩壊してしまうと実験回数が確保できないために数時間程度の半減期が 必要である。また実験にかける時間を考慮すると長くても半減期が1日程度 までであることが求められる。条件3について、線源の管理・安全性の観点 から液体・粉末等のものは除外し、常温で固体であるという条件が加わる。 条件1~3に該当するものが複数存在した。例えばナトリウムが候補に挙がっ た。しかしナトリウムは食塩に含まれるが塩素やその他の不純物が混じって いるために線源として不適である。またナトリウムの単体の入手は困難であ る。線源は単体で安価に入手できるものがふさわしい。これが条件4である。

これらの条件より線源を ⁷²Ga に決定した。 ⁷²Ga の半減期は 14.1 時間で 2MeV 以上の γ 線は主に 2.2MeV と 2.5MeV の γ 線を放出する。自然界に安定に存在するのは ⁶⁹Ga と ⁷¹Ga である。今回の実験では ⁷¹Ga に中性子線を 当て ⁷²Ga を作り線源とした。

4.2 隣接するシンチレータへの影響の測定実験

実験概要

シンチレータが発光した場合に一部シンチレータの外へ漏れ出す光が存 在する。その光が隣接するシンチレータに入り信号として読み出す割合を測 定する。

実験方法

シンチレータを2本用意し、片方のシンチレータにのみ放射線を当てた。 シンチレータを MPPC で読み取り、それぞれのシンチレータの検出数、2本 同時に検出したイベント数を測定した。信号の読み取りは図7のような回路 を用いた。



Figure 7: 読み取り回路

線源を当てたシンチレータは MPPC1 で、線源を当てていない方は MPPC2 に接続した。scaler1では2本同時に検出したイベント数をカウントし、scaler2、 3ではそれぞれ MPPC1、2の検出数をカウントした。

実験結果

10秒間測定した結果を以下に示す。

考察

実験結果よりシンチレータで検出するイベント数の約3%程度が隣接す るシンチレータの検出数に影響を及ぼしていることがわかる。

scaler1	scaler2	scaler3
95	2911	627

次に同じ条件でシンチレータを離して測定してみた。 その結果を以下に示す。

scaler1	scaler2	scaler3
0	703	313

これより少し距離をあけることによってほとんど影響がなくなることがわかる。

4.3 Geant4 による対生成シミュレーションの解析

Geant4を使って γ 線を鉛板に照射して起こる対生成の反応をシミュレーションした。その結果を以下にまとめる。

まず条件としてエネルギーが 2.20169MeV、2.50782MeV の γ 線をそれぞれ 10000 イベント入射した。標的となる鉛板の厚さは 200 μ m で、対生成が起こっ とものだけをピックアップした。電子と陽電子の運動量やエネルギー、電子 と陽電子の開きの角度がどの程度であるかを解析した。その結果が以下のグ ラフである。ビームの入射方向を z 軸としている。単位は運動量は MeV/c、 エネルギーは MeV、角度は radian である。





2.2MeV を入射したとき





2.5MeV を入射したとき



 $2.2 \mathrm{MeV}$

 $2.5 \mathrm{MeV}$

10000 イベント中対生成が起こったのは 2.2MeV、2.5MeV でそれぞれ 514 回、 505 回だった。このグラフよりほとんどが 2radian 以内の開きで生成されて いることがわかる。これらを元に Ga の必要量、検出器のサイズ、配置等を 決定した。

4.4 予備実験から推定したガリウム推定量

Ga72 から出てくる y 線の個数を測った 実験結果 time 865second

	2.2MeV(個)	2.5 MeV(個)	立体角 (rad)
1	84.62	39.33	2.220
2	164.8	83.23	4.266
3	103.4	49.46	4.266

全立体角での個数は

	2.2MeV(個)	2.5MeV(個)
1	478.9	222.6
2	483.4	245.2
3	304.6	145.7

シミュレーションでは対生成を起こし、ファイバーに入ってくる粒子の数は 入射 y 線100万に対し1000ほどであるのでこのことから本実験では中性 子の照射時間、ガリウムの量、測定時間を合計で1万倍ほど増やさないとい けないことがわかった。

5 セットアップ

5.1 実験装置の配置

この節では、実験装置をどのように配置したかを述べる。まず中性子を照射 して、 γ 線が放射されるようになった Ga を用意した。Ga は瓶状の容器に密 閉された状態で、出来る限り等方的に γ 線を放射するようビニールテープで 球状にまとめておいた。



Figure 8: γ 線を放出する Figure 9: 実験装置の全体図。Ga線源から、 γ 線が Gaの入った容器。 NaI と鉛板に照射される。

このGa線源を鉛板とファイバーの上におき、鉛板で対生成を起こした電子・陽電子対がファイバーで観測できるようにした。鉛板が乗っている部分

以外のファイバーに γ 線が直接照射されないよう、コリメーターと鉛ブロッ クで遮蔽した。コリメーターは円盤状のものを用い、穴の直径は 30mm、厚 さは 14.7mm であった。





Figure 11: ファイバーに

Figure 10: ファイバー。この上に鉛板が乗る。ファ 鉛板が乗った状態。この イバーの一方の端点は黒いビニールテープで覆い、上に Ga 線源が置かれる。 もう一方は MPPC に接続されている。

より詳しくいうと、ファイバーに直接鉛板が乗り、さらにその上に直接 コリメーターが乗るという形にした。そしてそのコリメーターの上に、直接 線源を乗せた。

ファイバーの一方の端点は、光が入らないよう黒いビニールテープで覆い、もう一方は MPPC に接続した。

また、Ga 線源から出る γ 線の線量を測定する為に、NaI を図 6 のように 配置して、線量を直接測定した。

以上のセットアップのもと、実験装置全体を黒いビニールで覆い、遮光 して実験を行った。

5.2 中性子生成

この小節では、我々が使用した中性子のどのようにして生成し、それをGaに照 射したかを述べる。まず本実験で中性子照射に用いた装置はKUANS(Kyoto University Accelerator-driven Neutron Source)と呼ばれる小型中性子源であ る。この装置は 3.5MeV、100 µ A の陽子加速器(AccSys Technology, Inc.) と、Be でできたターゲットからなる。

まず、水素を電離してできた陽子に電圧を掛けて加速させ、この高速な 陽子を Be 原子核に衝突させた。こうして高速な中性子が生成されるが、実 験に適する程度まで速度を落とすため、陽子ビームと垂直な方向に進む中性





Figure 12: コリメーターの穴の直径は 30mm、厚さは 14.7mm である。

Figure 13: 線源と NaI との位置関係及 び、NaI の立体角が示されている。

子のみを取り、さらにポリエチレンでできた減速材を使用した。このように して、実験に適切な低速の中性子ビームを得ることが出来た。

6 本実験

6.1 NaI 実験データ

NaIはCo60をつかって2点のエネルギーを決めることでのキャリブレーションした。

ピークごとの個数は図 15 のように目測で谷から谷までについての個数を足し上げた。

relative time は測定が始まってからの時間である。 中心時間は relative time に計測時間を2で割ったものを足したものである。 2.2/2.5 は単位時間当たりの個数の比である。 Gamma4



Figure 14: 中性子生成装置の内部構造。田崎 et al (2014)"京都大学小型中 性子源 (KUANS)の現状"より引用。

		back	ground02	2	誤差	.444.1	Ga7002	2	誤差		Ga7004	1	誤差	4
relative time(s)							(0			1808	3		
中心時間 (s)							4	5			2903	3		
計測時間 (s)			930)			90	0			2190)		
2.2MeV(個)			0.323	3 0.	0186	3	160'	7	40.49)	3772	1	200)
2.5MeV(個)			0.1989	9 0.	0146	3	768	8	28.06	3	18396	3	140.9)
2.2(個)/sec							18.18	8	0.4499)	17.5	5	0.0914	1
2.5(個)/sec							8.73	3	0.3118	3	8.599)	0.0643	3
2.2(個)/rad	sec						129.9	9	3.21	L	125	5	0.653	3
2.5(個)/rad	sec						62.38	8	2.2275		61.4	7	0.459)
2.2/2.5							2.08	8			2.04	1		
Ga7006	誤	差	Ga7008		搓	(Ga7010		誤差	G	a7014		誤差	
4388			6142				8152				12182			
4923			6687				9019				13010			
1069			1090				1734				1655			
17770	13	36	17756	-	136		27187		169	4	25384	1	63.9	
8769	96.0)5	8764	96	.09		13112		118		12487		115	
16.9	0.12	27	16.6	0.12	248		16.0	0.	0978		15.6	0.	0990	
8.40	0.089	98	8.239	0.08	881		7.76	0.	0684		7.74	0.	0699	
121	0.90)9	118	0.8	391		114	(0.699		111	().707	
60.0160	0.641	18	58.8	0.6	529		55.4	(0.489		55.3	(0.499	
2.016			2.01				2.06				2.02			



Figure 15: キャリブレーション(NaI シンチレータ)

Ga7016	誤差	Ga7018	誤差	Ga7020	誤差
14062		15992		17912	
14902		16834		19600	
1679		1683		3376	
24302	160	23721	158.9	45766	225
12006	113	11686	112	22551	160
14.79	0.0957	14.4	0.0944	13.88	0.0667
7.349	0.0677	7.14	0.0667	6.878	0.0474
105	0.683	102.9	0.674	99.1	0.4769
52.49	0.4839	51.0	0.4769	49.1	0.3389
2.01		2.018		2.01	

Gamma1										•				
		1	oackground	01	誤差	Ga70	01	誤	差	Ga700)3	誤差	Ga7005	誤差
						(494	8)				0		4388	
						(490	3)		0	109	95		4923	
計	測時間 (s)		9	30		9	90			219	90		1069	
2.2	2MeV(個)		0.2	69 0	.0170	52	80	72	.8	11789	99	346	55562	237
2.5	5MeV(個)		0.1	59 0	.0631	28	03	53.3	38	602	15	282	28610	182
2.2	2(個)/sec					58	8.9	0.80)9	54	.1	0.158	52.2	0.221
2.5	5(個)/sec					31	.1	0.59	93	27.4	49	0.128	26.7	0.170
2.2	2(個)/rad	sec				1	05	1.4	44	96	.6	0.282	93.29	0.3959
2.5	5(個)/rad	sec				55	6.6	1.05	59	49.0)9	0.230	47.79	0.3049
2.2	2/2.5					1.	89			1.9	96		1.95	
	Ga7007	調差	E Ga7009	調力	Ê G	a7011	L III L	呉差	G	a7013		誤差		
	6142		8152			10052				12182				
	6687		9019			10867				13010				
	1090		1734			1630				1655				
	56072	238	8 84258	29	2	82706		289		79903		284		
	28372	182	2 43053	23	5	42306		230		40374		227		
	51.7	0.218	3 48.8	0.16	8 51.	.00981	0.	177		48.5	0).172		
	26.0	0.167	7 24.8	0.13	5	25.9	0.	141		24.39	().137		
	92.3	0.390) 87.2	0.30	1 9	1.0889	0.	317	8	86.693	(0.307		
	46.48	0.298	3 44.3	0.24	2	46.3	0.	252		43.5	0.	2449		
	1.98		1.97			1.965				1.99				
	Ga7015	調差	E Ga7017	 誤注	Ê G	a7019		誤差]		
	14062		15992			17912								
	14902		16834			19600								
	1679		1683			3376								
	76752	279	9 74998	27	6 1	44445		385						
	38702	224	4 38093	22	2	73368		345						
	45.9	0.166	6 44.8	0.16	4 43	.05591	().114						
	23.0	0.133	3 22.6	0.13	2	21.7	().102						
	82.1	0.297	7 80.05	0.29	3	76.8	0.	2039						
	41.1	0.238	3 40.4	0.23	6	38.8	().182						
	1.99		1.98			1.98								
	L													

この単位時間当たりのy線の個数から、寿命は最小二乗法を使って(Excel で計算した)



Figure 16: 寿命のフィッティング

	Gamma1		Gamma4	
	$2,2 \mathrm{MeV}$	$2.5 \mathrm{Mev}$	$2,2 \mathrm{MeV}$	$2.5 \mathrm{Mev}$
寿命 (hour)	15.76	13.95	14.15	15.41
誤差+	14.61	12.97	13.58	14.46
誤差-	17.12	15.10	14.78	16.49

となることが分かる(図16)。実際の寿命は14.1hour であるので、この結果 は妥当である。

6.2 MPPC 実験データ

放射化した Ga 線源を用いて行った本測定と、線源を用いずに行ったバック グラウンドの測定から得られた全データをまとめると表1、2の通り。各デー タには MPPC の adc 値が各チャンネル毎に記録されている。バックグラウン ド測定のデータ2の計測時間は、タイムスタンプが壊れていたため分からな かった。

MPPCの ADC 値のヒストグラムの例として、データ 11 のチャンネル 12(ファイバーでは断面図で3段目右から5番目のものに対応)のものを図 17 にのせておく。MPPCの特徴である、光子数に対する敏感な反応は見られな かったが、ペデスタルと信号のピークははっきり分離しており、今回の実験 で重要になる、ファイバーにカレントが流れたか否かの識別には十分である。

rabie r.		
データ名	計測時間 (s)	全データ数
9	363	1000000
10	3641	10000000
11	1069	3000000
12	1049	3000000
13	1754	5000000
14	1708	5000000
15	1695	5000000
16	1679	5000000
17	1923	5000000
18	3376	10000000

Table 1: 本測定から得られたデータ

Table 2: バックグラウンド測定から得られたデータ

データ名	計測時間 (s)	全データ数
1	420	100000
2	不明	10000000

7 pair creation 解析 MPPC

我々の実験では結果的に MPPC から得られたデータに対して、対生成イベ ントを見るために様々な解析を行ったので、それらについてここに記す。私 たちの解析手順の不備や、実験までの計画不足などで解析は結果的に紆余曲 折を経たものになってしまっている。しかし、私たちが行った解析の記録と して、行った解析の時系列に沿った形で解析結果を記していくことにする。

7.1 対生成に対する MPPC データ解析

最初に MPPC から得られたデータから、対生成をとらえたと思われるイベ ント数を算出する過程を記す。

MPPCのADCのヒストグラムから信号を検出したか否かを区別する閾 値を目測で決定し、これを図17で、1000とした。あるイベントにおいて、 この閾値を超えたADC値をあたえていることををヒットと呼ぶことにする。 これにより、シュミレーションデータの解析と同様に、各イベントについて ファイバーにヒットしたか否かについてヒストグラム化できる。

実際に鉛板上で起きた対生成イベントの数を算出するために、次のよう な手順で解析を行う。まず対生成イベントに起因すると思われるダイアグラ ムの形の条件を決定し、次にデータの中に含まれるイベントのうちその条件



Figure 17: MPPCのADCヒストグラムの例。ペデスタルが大きすぎるため、 信号の部分のみを切り取ってある。図の左端に見えるのがペデスタルの一部

に適合するイベント数を数える。最後に、数えたイベント数を、シュミレー ションにより得られるその数え方による検出効率で割って、起きた全対生成 イベント数に直せばよい。

始めに、対生成シュミレーションから得られた、電子-陽電子角度分布か ら、次のようなダイアグラム条件を設定し解析を行うことにした。まず次の 三つを課す。

- 条件(1) 第一層は一点以上にヒット
- 条件(2) 第二層、第三層は二点以上でヒット
- 条件(3) (第二層の最長二点の幅) < (第三層の最長二点の幅)

これらの条件 (1)~(3) に加え、次の条件 (4) または (4)' を加える。

- 条件 (4) 2 粒子の軌跡のヒットの分布が分離していて、 それらの交点が鉛板上にある。
- 条件(4)' 2粒子の軌跡のヒットの分布が分離していなくてもよく、 軌跡の交点も鉛盤上になくてもよい。

条件 (1)、(2)、(3)、(4) を要求するものを条件セット A、条件 (1)、(2)、(3)、(4)'のを要求するものを条件セット B とする。このような二つの条件セット を考えるのは、条件の取り方に結果が強く依存していないかどうかを確認す るためである。これらの二つの条件セットをもとに解析を行うと、表3、4 に 記したとおりになる。

Table 3: 各本測定データに含まれる、条件セット A、B および条件 (5) に合 致したイベント数。条件 (5) については次の節を参照のこと。

データ番号	条件セット A	条件セット B	条件 (5)
9	1	2	9127
10	19	27	88124
11	2	3	25588
12	6	12	24963
13	9	13	40772
14	9	13	38735
15	6	11	37638
16	6	12	36606
17	9	11	35607
18	14	24	69939
計	81	128	407099

Table 4: 各バックグラウンドデータに含まれる、条件セット A、B および条件 (5) に合致したイベント数

「データ番号	条件セット A	条件セット B	条件 (5)
1	0	0	13
2	14	24	1145
計	14	24	1158



Figure 18: シュミレーションの 検出器の配置のイメージ



Figure 19: シュミレーションの照射のイメージ

7.2 対生成シュミレーション解析

上の条件セットA、Bを設定した上での検出率を理論的に算出するために、 GIANTによるシュミレーションを行ったので、その手法と解析結果をここ に記す。

このシュミレーションでは、コリメータ、ファイバー、鉛版の配置を実験 のセットアップと同じにし、線源の位置から 2201keV、2507keV ガンマ線を 照射している。この時、鉛版上で対生成を起こした場合のみデータへの書き 出し行い、ファイバー上で落としたエネルギー値を各 27 本のファイバーに ついて書き出している。このシュミレーションのセットアップのイメージ画 像と照射シュミレーションの様子のイメージ画像を図 18 と図 19 に記す。

このシュミレーションから得られたデータは基本的に MPPC の ADC 値 のデータと同じ構造になっているので、上で MPPC のデータに対して行っ た解析とまったく同じ解析を行うことができる。ただし、ファイバーのヒッ

ヒツト奴	余件	イベント奴
0	-	19
1	全て	243
	1層目	236
	2 層目	4
	3層目	3
2	全て	203
	1層目(横に隣接)	177
	1層目と2層目	25
	2層目と3層目	1
3	全て	43
	全て1層目	6
	1、2層目	36
	1、2、3層目	1
4	全て	6
5	全て	0
合計	-	514

Table 5: 2201keV ガンマ線のシュミレーションデータ解析結果。

ト判定は、ファイバーの位置で粒子が少しでもエネルギーを落とした場合に ヒットしたものとした。すると、全対生成イベントは2201keVで514イベン ト、2507keVで505イベントとることができたが、どちらのデータ中にも5 点以上でヒットしたものは一つもなった。上で考えた条件セットA、Bは5 点以上のヒットを要求するものであるので、この条件から対生成イベントの 寄与を取り出すことは不可能であることが明らかになった。そこで、ダイア グラムに別の条件を課して解析を行うことを考え、条件の再設定のために、 ヒット数やそのヒットの形で分けて解析を行ったところ、表5、6のとおりに なった。この結果から、我々は対生成イベントの算出として一層目にに隣接 して2点でヒットしているようなダイアグラムを使えないかと考えた。

そこで、前節の条件セットA、Bの代わりに、次に条件(5)を設定した。

条件(5) 第一層の隣接したファイバー二つのみにヒット

この条件を設定して、再度 MPPC からえられたデータの解析を行ったところ表3、4の条件(5)の欄に示す通りになった。この条件に合致した本測定のイベント数は、バックグラウンドのそれに比べて十分多いので、本測定のイベント数に含まれるバックグラウンドの寄与は小さいと思われる。すると、本測定で条件(5)に合致したイベント数が対生成のイベントによるものと考えた場合、推定される対生成イベント数よりもはるかに大きすぎる値になっ

ヒット数	条件	イベント数	
0	-	17	
1	全て	176	
	1層目	175	
	2 層目	0	
	3層目	1	
2	全て	220	
	1層目(横に隣接)	168	
	1層目と2層目	49	
	1層目と3層目	2	
	2層目と3層目	1	
3	全て	77	
	全て1層目	15	
	1、2 層目	61	
	1、2、3層目	1	
4	全て	15	
5	全て	0	
合計	-	505	

Table 6: 2507keV ガンマ線のシュミレーションデータ解析結果。

ている。これは、条件(5)ににあてはまるイベントの多くが主に対生成以外 のものを検出してしまっていることを示していると考えられる。しかし表5 と6からみるに、これ以外の条件から対生成イベントの寄与を取り出すのは 極めて困難である。そのため対生成の断面積を求めるという当初の目標はこ こで断念せざるをえなかった。

7.3 コンプトン散乱に対する解析

上の解析で条件 (5) を設定して抽出したイベントが実際はどのような物理的 過程からくるものなのかを確認するために、別の解析を行ったのでここに記 しておく。

表3と表4から、本測定とバックグラウンド測定との値に大きな差がある ことがわかるので、これは明らかに線源由来のイベントである。また、ファ イバーがとらえることができるのは荷電粒子である。これらの事実から、最 も考えられる物理過程は、線源から出たガンマ線が鉛とコンプトン散乱を起 こし、放出された電子が条件(5)を満たすようにファイバーにヒットする、と いうものである。この推測が妥当であるかを確かめるため、対生成に対する 解析で行ったのと同様にシュミレーションを行い、コンプトン散乱に対する 検出率を算出し、理論値から予想される検出数と実験結果が合致するか否か を確かめた。

NaI 検出器から得たデータの解析から、本測定で検出したガンマ線の各 スペクトルのエネルギーの値が分かっているので、それら全てのスペクトル に対してシュミレーションを行ったところ、表7の通りになった。ここで今 回のシュミレーションは、コンプトン散乱の有無に関わらず1万回のシュミ レーションの結果をとったものである。従って、条件(5)に合致したイベン ト数を全イベント数1万で割った「検出率」は、検出器で検出可能な立体角 に入った線源位置からのガンマ線のうち、条件(5)に合致するようなイベン トの割合を示している。

この検出率と NaI の解析データによるガンマ線の検出数から、実験の検 出数を見積もることを考える。表7の各エネルギースペクトル*i*の検出率を q(i)、ファイバー検出器と NaI 検出器の線源からの立体角の比率をx、検出 する時間の比率をyとする。また、NaI での各エネルギースペクトル*i*の検 出数を $N_{\text{NaI}}(i)$ この時、各エネルギースペクトル*i*に対して、予想される検出 器で条件 (5) に合致するようなイベントの数 $N_{\text{MPPC}}(i)$ は、

$$N_{\rm MPPC}(i) = N_{\rm NaI}(i) \times x \times y \times q(i) \tag{15}$$

となる。MPPC 検出器で検出される全コンプトンイベントの見積もられるイベント数 N は、次式でかける。

$$N = \sum_{i} N_{\rm MPPC}(i) = xy \sum_{i} N_{\rm NaI}(i)q(i)$$
(16)

Table 7: 各エネルギースペクトルのシュミレーションデータに含まれる条件 (5) に合致したイベント数、および検出率。検出率については本文中の記述 を参照のこと。また、NaI 観測比率は NaI の ADC 値の解析からえたもの。

	L 16: That > THE		<i></i>
ガンマ線エネルギー	NaI 観測比率	条件 (5)	検出率
533	0.267	7	0.07
767	0.332	8	0.08
1000	0.095	12	0.12
1333	0.077	9	0.09
1433	0.022	9	0.09
1567	0.026	16	0.16
1733	0.029	13	0.13
1833	0.055	6	0.06
2201	0.054	8	0.08
2507	0.027	10	0.10
2800	0.014	8	0.08

NaI 検出器での各エネルギースペクトルの全検出数に対する比率は表7で与えられているので、これを *p*(*i*) とすると、

$$N_{\text{NaI}}(i) = N_{\text{NaI}}(j) \frac{p(i)}{p(j)} \qquad (^{\forall}i,j)$$
(17)

今 N_{NaI}(2201)を用いて他の全てのスペクトルの数を算出することにすると、 式 16 は、次のように書ける。

$$N = xy N_{\text{NaI}}(2201) \sum_{i} \frac{p(i)}{p(2201)} q(i)$$
(18)

これを用いて N を算出すると、 $N = 4.8 \times 10^5$ となる。これは表3の条件(5) の総数と同じオーダーになった。これは条件(5)を用いた解析がほぼコンプ トン散乱の先行過程にによる電子を見ていたことを示すものであり、仮に対 生成イベントを観測できたとしても、この検出数に埋もれてしまうことが確 認できた。

8 まとめ及び改善点

本実験の目的は対生成の断面積測定であったが、上記のデータ解析の結果、 対生成のイベントを観測できていなかったことが判明した。実態は、コンプ トン散乱のイベントを観測していたと考えられる。 今後の改善点としては、*ファイバーを細くしたり、ファイバーの層を互い違いにしたりするすることで精密な観測を行うことや、*(放射線源を使わないような)高エネルギーのガンマ線を用意することで不要なイベントを減らすこと、などが考えられる。

9 謝辞

本実験を行うにあたって、一年間以上にわたって実験およびゼミの指導をし ていただいた、成木恵准教授と藤岡宏之助教授には深く感謝します。TAの 江川弘行さん、山上大貴さんにも、ゼミと実験の両方にお付き合いいただき ました。タンデム技官の広瀬昌憲氏のご協力にお礼を申し上げます。また、 理論ゼミに関しては、国広悌二教授、菅沼秀夫准教授、そしてTAの土居孝 寛さんに御指導いただきました。

References

- [1] W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
- [2] National Institute of Standards and Technology, "XCOM: Photon Cross Sections Database", http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcoml.html
- [3] M. E. Peskin and D. V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory, Westview Press, USA, 1995.