デジタル回路を用いた
Clover 型 Ge 検出器アレイの γ 線分光実験

東北大学　理学部物理学科
原子核物理　ストレンジネス核物理グループ
B0SB2013　市毛夏実

平成 26 年 5 月

概要

大強度中間子ビームを用いたハイパー核 γ 線分光実験を行うにあたり、現行のアナログ回路ではパイルアップやリセット後の不感時間などにより実験が困難となるため、その代替となる新たな回路が必要となる。今回、新しく開発されたトランジスタリセット型ゲルマニウム (Ge) 検出器用のデジタル回路を用いたデータ収集システムについてビームを使用した実験で動作確認を行った結果、デジタル回路のみで内部トリガーを生成・データ収集が可能であることが確認できた。また、線源を用いて、BGO サプレッションが可能であることを確認し、エネルギー分解能と検出効率について評価した。

目 次

第 1 章　はじめに **3**
1.1　ハイパー核 γ 線分光実験 3
1.2　Ge 検出器 4
1.2.1　Ge 検出器の動作原理 4
1.2.2　プリアンプ 4
1.3　現行のアナログ回路 5
1.4　デジタル回路 5
1.4.1　Ge 検出器のプリアンプ出力をそのまま入力した場合 . 5
1.4.2　微分反転増幅回路を挟んだ場合 6
1.5　目的 6
1.6　Clover 型 Ge 検出器 6

第 2 章　Clover 型 Ge 検出器アレイ **7**
2.1　線源を用いた評価 7
2.1.1　エネルギー校正 7
2.1.2　エネルギー分解能 8
2.1.3　検出効率 9
2.1.4　BGO サプレッション 9
2.2　ビームを用いた評価 10
2.2.1　CYRIC における実験 10
2.2.2　結果 10

第 3 章　まとめ **12**

第1章　はじめに

1.1　ハイパー核 γ 線分光実験

通常の原子核に K^- 中間子ビームを照射することで、K^- 中間子と中性子がストレンジクォークを交換し、Λ 粒子を生成することができる。この Λ 粒子が束縛されたハイパー核が脱励起する際に放出する γ 線のエネルギーを測定することで、ハイパー核の構造を調べることができる。元の原子核の準位が 0 でない角運動量を持っているとき、ハイパー核はコア核の角運動量と Λ 粒子のスピン $\frac{1}{2}$ の組み合わせによって縮退が解け、図 1.1 のように準位が 2 つに分岐する。この 2 重項のエネルギー間隔は非常に小さくなるが、それは ΛN 相互作用が NN 相互作用に比べて弱いことに起因しており、それらの γ 線を分けるためには良いエネルギー分解能が必要となる。したがって、γ 線の検出には 1 MeV の γ 線に対して 3 keV のエネルギー分解能を持つ Ge 検出器を用いるが、ハイパー核 γ 線分光実験は、荷電粒子の突き抜け等により、通常の原子核 γ 線分光実験に比べて高計数率・高エネルギー付与率環境となるため、トランジスタリセット型 Ge 検出器を使用する。

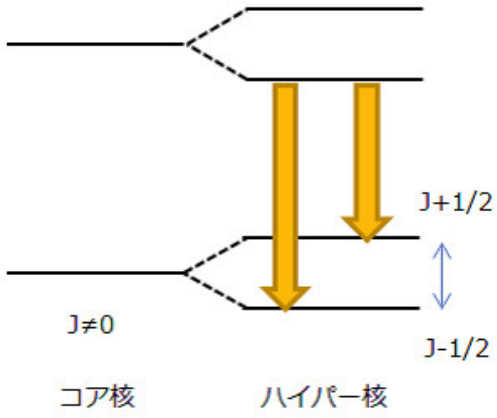

図 1.1: Λ ハイパー核の準位の概念図

1.2 Ge 検出器

1.2.1 Ge 検出器の動作原理

Ge 検出器は半導体検出器の一種であり、P 型半導体と N 型半導体を接合したダイオードに逆バイアスをかけることで、放射線に対する有感領域となる空乏層を広げている。その空乏層を荷電粒子が通過すると、3 eV あたり 1 電子・正孔対を生じる。この電荷を収集することで、エネルギー情報を得ることができる。γ 線を検出するには、光電効果や電子陽電子対生成によって荷電粒子にエネルギーを移行させる必要があり、これらはそれぞれ $\sim Z^5$、Z^2 に比例するので、Ge 検出器は他の半導体検出器に比べて Z が大きく、γ 線検出器に適している。

1.2.2 プリアンプ

Ge 検出器のプリアンプは電荷有感型で、抵抗放電型とトランジスタリセット型という 2 つの種類がある。抵抗放電型 (図 1.2 左) はコンデンサと抵抗がオペアンプに並列で接続しているので、その出力は図 1.3 左のような指数関数的に減衰するパルスとなり、その波高からエネルギーの情報が得られる。一方、トランジスタリセット型 (図 1.2 右) はコンデンサとスイッチがオペアンプに並列で接続していて、抵抗放電型が信号ごとに放電するのに対し、トランジスタリセット型では、コンデンサの容量まで電荷を溜めた時にスイッチが降りて一度に放電するため、図 1.3 右のような出力となる。この場合、ステップの高さがエネルギーの情報を持っている。

ハイパー核 γ 線分光実験では、前述したように高計数率・高エネルギー付与

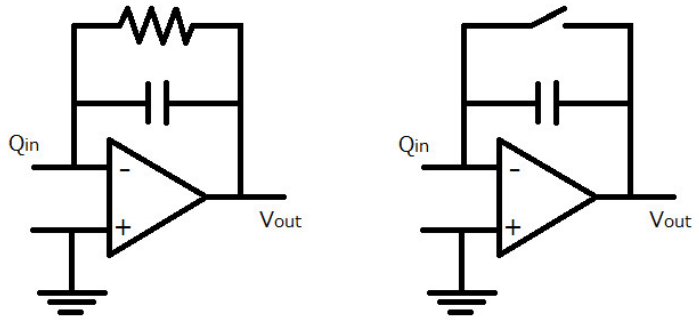

図 1.2: 抵抗放電型 (左) とトランジスタリセット型 (右) の回路図

率であるので、抵抗放電型を用いると、コンデンサが飽和して正しいエネル

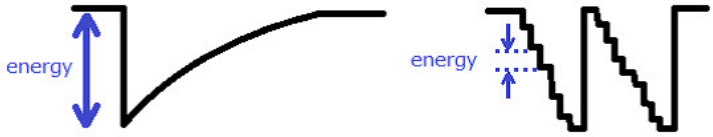

図 1.3: 抵抗放電型 (左) とトランジスタリセット型 (右) のプリアンプ出力

ギー情報を得られなくなってしまうため、トランジスタリセット型を用いている。

1.3 現行のアナログ回路

現在、データの収集にはエネルギー用に耐高計数率整形増幅回路とダイナミックレンジ 10 V、分解能 13 bit の ADC を使用し、トリガー生成にタイミング用整形回路とディスクリミネータを使用している。しかし、将来より大強度なビームを使用した実験を行うことを考えると、現行の回路ではパイルアップやリセット後の不感時間が増え、実験が困難になると推測される。

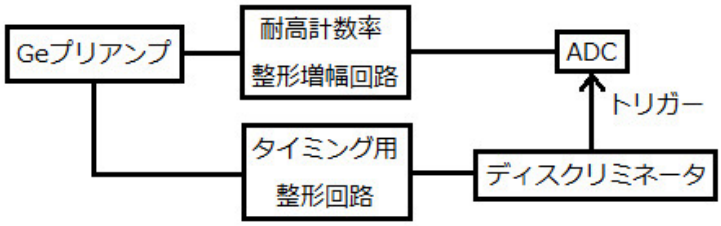

図 1.4: 現行の回路図

1.4 デジタル回路

今回の実験では、ダイナミックレンジが 2 V、分解能が 14 bit、サンプリングレートが 100 MHz のデジタイザーを使用した。

1.4.1 Ge 検出器のプリアンプ出力をそのまま入力した場合

このような場合では、主に 2 つの問題がある。まず、Ge 検出器のプリアンプ出力は、振幅が 5 V 程度であるため、デジタイザーのダイナミックレンジ

を超えてしまう。また、プリアンプの出力は 1 MeV あたり 25 mV であるため、この出力をデジタイザーに入れると 4.8 keV/ch となり、Ge 検出器の分解能を活かすことができない。

1.4.2 微分反転増幅回路を挟んだ場合

Ge 検出器のプリアンプ出力を微分増幅してからデジタイザーに入れることで、先程の問題を解決することができるため、今回の実験では微分、反転と 10 倍の増幅を行う回路を使用した。この回路は現在開発中が進んでおり、将来的には前述の機能だけでなく高エネルギー付与事象やリセット信号の処理も可能になる。

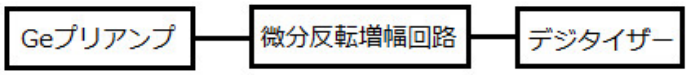

図 1.5: 今回の実験で使用した回路図

1.5 目的

本研究の目的は、新しく開発されたトランジスタリセット型 Ge 検出器用デジタル回路を用いてデータの収集が可能であるかを確認することである。まず線源を用いてエネルギー分解能、検出効率、BGO サプレッションについて評価し、次にインビームでのトリガー生成、データ収集の動作確認を行う。

1.6 Clover 型 Ge 検出器

Ge 結晶が 4 つ隣接している検出器である。4 つある結晶のうち、同時に信号を出した事象についてそれぞれの結晶で得たエネルギーを足し合わせることで、コンプトン散乱によるバックグラウンドを減少させることができる。この操作を add back といい、結晶が 1 つの検出器よりも検出効率が向上する。

第2章　Clover型Ge検出器アレイ

ACS付Clover型Ge検出器5台を図2.1のように設置した。

図 2.1: Clover型Ge検出器アレイ

2.1　線源を用いた評価

2.1.1　エネルギー校正

^{152}Eu線源を使用し、各Ge結晶についてエネルギー校正を行った。なお、使用したγ線のエネルギーと分岐比は表2.1。
エネルギーの校正には式2.1のような4次関数を用いた。

Energy [keV]	121.8	244.7	344.3	778.9	964.1	1112.1	1408.0
分岐比 [%]	28.67	7.607	26.6	12.96	14.65	13.69	21.07

表 2.1: ^{152}Eu線源からのγ線のエネルギーとその分岐比

$$Energy = a(ch)^4 + b(ch)^3 + c(ch)^2 + d(ch) + e \tag{2.1}$$

2.1.2 エネルギー分解能

^{60}Co 線源を用いて、各結晶についての 1332 keV におけるエネルギー分解能を測定したところ、アナログ回路を用いた場合とデジタル回路を用いた場合とで表 2.2 のような差異が生じた。
また、アナログ回路で分解能が最良であった結晶 Clover2-3 のヒストグラムが図 2.2 である。

Clover-crystal	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4				
アナログ [keV]	3.6	3.0	3.7	3.3	2.7	2.5	2.4	2.5				
デジタル [keV]	5.8	6.4	5.8	6.3	5.4	5.6	5.4	5.7				
	4-1	4-2	4-3	4-4	5-1	5-2	5-3	5-4	6-1	6-2	6-3	6-4
アナログ [keV]	3.3	2.9	2.9	2.8	2.4	2.1	4.0	2.4	3.0	2.7	3.6	2.7
デジタル [keV]	6.1	6.5	4.9	4.9	6.4	5.6	4.3	6.0	5.8	5.2	4.3	6.3

表 2.2: 各 Ge 結晶のエネルギー分解能 (FWHM@1332 keV)

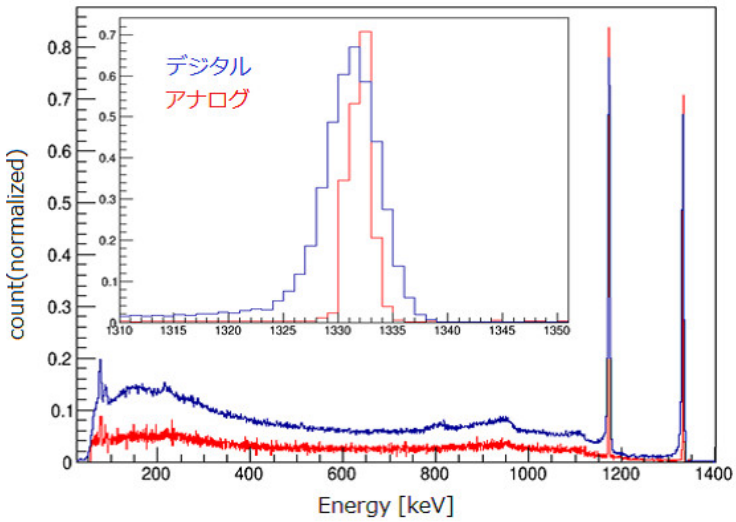

図 2.2: Clover2-3 のエネルギー分解能

2.1.3　検出効率

^{152}Eu 線源をターゲット位置に設置し、アレイ全体の検出効率を測定した。検出効率の導出には式 2.2 を用いた。

$$efficiency = \frac{count}{Br \cdot Bq \cdot livetime} \tag{2.2}$$

ここで、count はガウス関数フィッティングで得たピークのカウント数、Br は分岐比 (表 2.1 参照)、Bq は線源強度である。
図 2.3 の 244 keV 以上の点について、関数 $f(x) = \frac{a}{x} + b$ でフィッティングを

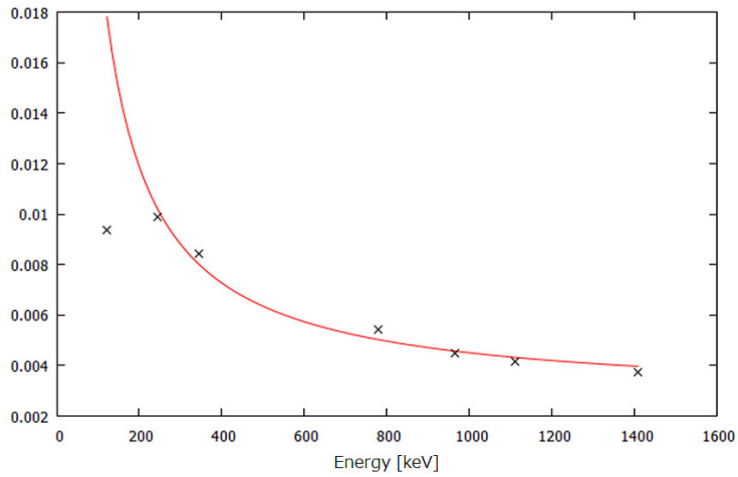

図 2.3: 検出効率のエネルギー依存性

行ったところ、1 MeV の γ 線に対する検出効率は 0.45 %となった。これはシミュレーションを用いて求めた値 1.6 %に比べて低くなっているが、現段階で原因は不明である。

2.1.4　BGO サプレッション

Ge 結晶のまわりに BGO 結晶を設置すると、Ge 結晶内でコンプトン散乱をして結晶外へ γ 線が出て行くというようなバックグラウンド事象があった場合には、Ge と BGO がほぼ同時に信号を出すことになる。すると、Ge 結晶と BGO 結晶でコインシデンスをとると γ 線のコンプトン散乱によるバックグラウンドをカットすることができる。この操作 BGO サプレッションといい、デジタル回路を用いて行った際のヒストグラムが図 2.4 である。図 2.4 より、コンプトン散乱によるバックグラウンドが BGO サプレッション後に

減少していることがわかる。

また、1332 keV についての Peak to Total は BGO サプレッション前は

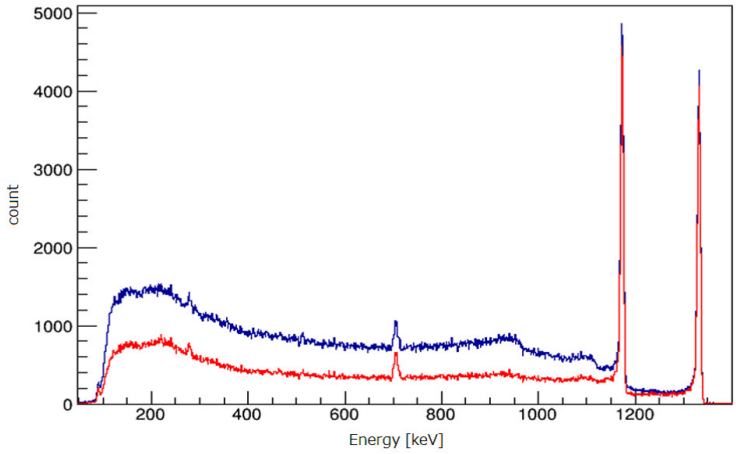

図 2.4: デジタル回路を用いた BGO サプレッション (線源：^{60}Co、結晶：Clover1-1)

1.8×10^{-3} であるのに対し、BGO サプレッション後は 5.6×10^{-2} となり、Peak to Total も向上している。これらから、デジタル回路を用いても BGO サプレッションが可能であるといえる。

2.2 ビームを用いた評価

2.2.1 CYRIC における実験

サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC) において、2014 年 2 月 3 日から 4 日にかけて 36 時間ビームを用いて実験した。使用したビームは 87 MeV の ^{10}Ne^{5+} で、強度を 1 から 6 pnA まで変えて照射した。ターゲットには厚さの 1.13 mg/cm^2 の ^{120}Sn を用い、^{120}Sn(^{20}Ne,4n)^{136}Nd 反応で生じた ^{136}Nd の回転バンドの観測を行った。

2.2.2 結果

実験の結果、図 2.5 のようなエネルギースペクトルが得られた。これより、^{136}Nd の 16^+ まで観測できたといえる。また、図 2.5 は 20 個の Ge 結晶のうち 2 個が同時に信号を出した際にトリガーを生成した場合のヒストグラムであるが、今回の実験では、トリガー生成の条件を同時に信号を出した結晶が

1 個の場合から 5 個の場合まで変え、いずれも支障なくデータを収集できた。よって、デジタイザーのみでトリガー生成、データ収集が可能であることが確認できた。

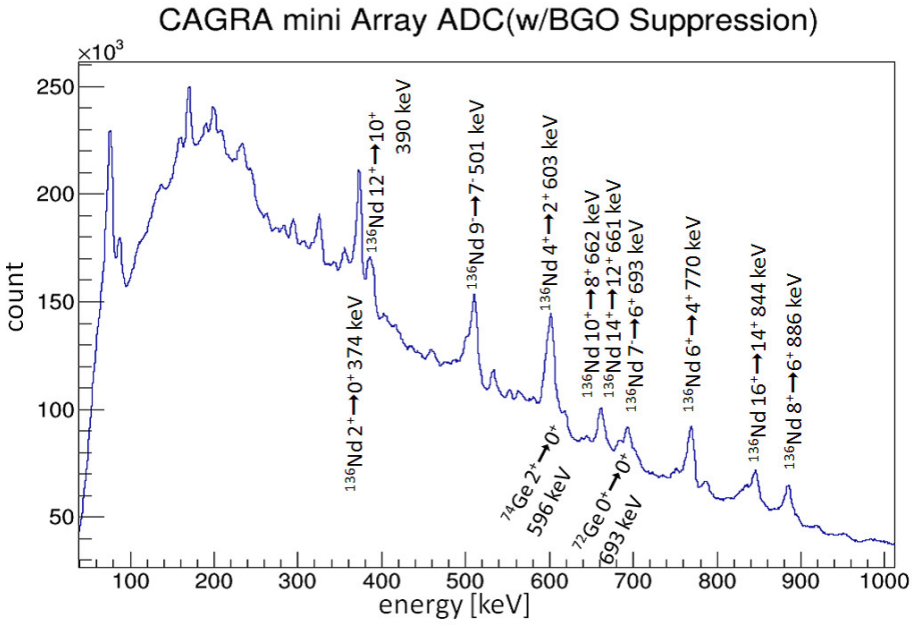

図 2.5: 実験で得たエネルギースペクトル

第3章　まとめ

γ 線源とビームを使用した実験で、大強度ビームを想定したハイパー核 γ 線分光実験のためのトランジスタリセット型 Ge 検出器用デジタル回路の動作確認を行った。線源を用いた評価では、1332 keV におけるエネルギー分解能について、アナログ回路を用いた場合が平均に 2.9 keV であるのに対してデジタル回路を用いた場合では平均 5.6 keV となることが分かった。また、デジタル回路を用いても BGO サプレッションが可能であることを確認し、Clover 型 Ge 検出器アレイの検出効率は 1 MeV で 0.45 %であった。ビームを用いた実験では、γ 線多重度の高い条件下でも、デジタル回路のみで内部トリガー生成、データ収集が可能であることが分かった。
今後の課題としては、エネルギー分解能を改善することや、データ解析方法を確立することなどが挙げられる。

謝辞

たくさんの方々の力を借りて、この卒業研究を全うすることができました。特に、担当教官である小池准教授には大変お世話になりました。ありがとうございました。