# 小型多チャンネル FPGA/ADC ボードを用いた複数機器同時 読み出しシステムの立ち上げ

広島大学理学部物理学科 高エネルギー宇宙可視赤外天文学研究室

B155658

廣瀬憲吾

主查 大野雅功 副查 檜垣浩之

平成 31 年 2 月

#### 概要

宇宙の様々な高エネルギー現象を解明するために重要な放射線観測においては、2種類の検出器の同時 計数法より偏光情報を取り出す散乱型偏光計や、主検出器をシンチレータで覆い反同時計数法を用いてバッ クグラウンド成分の除去を行うアクティブシールドなど、複数機器を同時読み出す技術が重要な役割を持 つ。一方、このような複数の入力信号を扱うためにはその処理系は大規模なものになることも多いため、コ ンパクトな情報処理システムが必要である。本研究は、雷雲ガンマ線観測実験で用いられた高速 ADC と FPGA を組み合わせた小型多チャンネルボードを利用した複数機器の同時読み出しシステムの構築を目的 とした。システム立ち上げ後、従来放射線計測に用いられてきた汎用読み出し系とエネルギー分解能の比較 を行い、大きな差がないことを確認した。また、線型性も ADC 入力上限値まで ~0.3 %以内で保たれてお り、このシステムで正常に放射線計測を行うことができることを確認した。次に、フォトダイオードに CsI シンチレータを組み合わせた検出器を二組用意し、両検出器と等距離に置いた放射線源からのガンマ線エ ネルギースペクトルを図1のようにデータを取得でき、同時読み出しシステムを構築することができた。



図 1: 今回構築した同時読み出し系で取得した<sup>22</sup>Naのガンマ線エネルギースペクトル。二つの検出器で読み出したデータを赤色と青色でそれぞれ示した。

目 次

第1章	序論	6
1.1	X 線ガンマ線観測と放射線検出器	6
1.2	目的	8
第2章	放射線検出器の基本原理	9
2.1	放射線検出器部	9
	2.1.1 半導体検出器	10
	2.1.2 シンチレータ	12
2.2	前置増幅器(プリアンプ)....................................	12
2.3	整形增幅器	12
2.4	アナログデジタル変換器 (ADC:Analog to degital converter)	13
第3章	複数機器の同時読み出し	<b>14</b>
3.1	同時計数法と反同時計数法....................................	14
	3.1.1 コンプトン散乱型偏光計	14
	3.1.2 半導体多層コンプトンカメラ	16
	3.1.3 アクティブシールド	17
第4章	GROWTH	
	小型多チャンネルADCボードを用いた複数信号処理システムの構築	18
4.1		
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ .................................	19
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ	19 19
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ4.1.1セットアップ4.1.2実験方法	19 19 20
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ	19 19 20 20
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1       セットアップ         4.1.2       実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3       実験結果	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> </ol>
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> </ol>
4.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> </ol>
4.1 第5章	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性         複数機器同時読み出し試験	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> </ol>
4.1 第 <b>5章</b> 5.1	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1       セットアップ         4.1.2       実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3       実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性         ***	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> <li>30</li> </ol>
4.1 第 <b>5章</b> 5.1 5.2	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性         地力応答線形性         *22Na 511 keV back-to-back 事象を利用した同時計数実験         セットアップ	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> <li>30</li> <li>31</li> </ol>
4.1 第 <b>5章</b> 5.1 5.2 5.3	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性         * <td><ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> <li>30</li> <li>31</li> <li>33</li> </ol></td>	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> <li>30</li> <li>31</li> <li>33</li> </ol>
4.1 第5章 5.1 5.2 5.3 5.4	高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ         4.1.1 セットアップ         4.1.2 実験方法         GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ         4.1.3 実験結果         エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較         出力応答線形性         *         2 <sup>2</sup> Na 511 keV back-to-back 事象を利用した同時計数実験         生ットアップ         実験方法         実験方法	<ol> <li>19</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>28</li> <li>30</li> <li>31</li> <li>33</li> <li>33</li> </ol>

# 第6章 まとめと今後の課題

# 図目次

1	今回構築した同時読み出し系で取得した <sup>22</sup> Naのガンマ線エネルギースペクトル。二つの検 出器で読み出したデータを赤色と青色でそれぞれ示した。	1
1 1		-
1.1	超新星残骸であるかに星雲を様々な電磁波波長で観測したイメーン図。中心のリンク構造か X線(チャンドラ X線望遠鏡) 外側の広がった構造は可視光(ハッブル字宙望遠鏡) 赤外	
	線 (スピッツァー宇宙望遠鏡) で観測したもの。[1]	7
1.2	ガンマ線バーストの想像図 [2]	7
1.3	電磁波の波長に対する大気の吸収深さ。緑の領域では電磁波が地上に届かない [3]	8
2.1	放射線検出の一般的な読み出しシステム	9
2.2	n 型半導体のキャリア模式図 [4]	10
2.3	p 型半導体のキャリア模式図 [4]	10
2.4	一般的な Si フォトダイオードの断面構造	11
2.5	pn 接合型半導体における順方向電圧印加時 (左) および逆方向電圧印加時 (右) におけるキャ	
	リアの移動の模式図とバンド構造 [6]	11
2.6	ガンマ線1光子の信号に対する整形増幅器出力のオシロスコーブデータ例	13
2.7	左図のようなアナロク信号を AD 変換したナジタル波形ナータ	13
3.1	コンプトン散乱の概念図 [8] ...................................	15
3.2	コンプトン散乱型偏光計の構造	16
3.3	PoGo+に使用された検出器	16
3.4	$\boxtimes 3.4$	16
3.5	SGD の断面図	17
3.6	アクティブシールドの概念図....................................	17
4.1	雷雲ガンマ線実験における検出器小型化の経緯。当初は人が入れるぐらいのサイズの検出器	
	系 (左上) を 40cm 四方程度にまでコンパクト化 (左下)。特に小型多チャンネル ADC ボード	
	はわずか 9.5cm 四方で 4 入力まで高速同時処理可能 (右下)[11] ..........	19
4.2	立ち上げ実験の全体写真。暗幕内に PD と線源が入っている	20
4.3	立ち上げ実験セットアップ図....................................	21
4.4	yaml 形式で与える GROWTH ADC ボードの設定例	21
4.5	GROWTH ADC ボードで得られた ROOT 形式データの一例	23
4.6	ADC board で取得した <sup>241</sup> Am のエネルギースペクトル	25
4.7	ADC board で取得した <sup>109</sup> Cd のエネルギースペクトル	25

4.8	ADC ボードのエネルギー較正直線フィッティング。用いた関数は一次関数 y=p1x+p0	26
4.9	汎用 MCA8000D で取得した <sup>241</sup> Am のエネルギースペクトル	26
4.10	汎用 MCA8000D で取得した <sup>109</sup> Cd のエネルギースペクトル ..........	27
4.11	汎用 MCA8000D で得られた結果に対するエネルギー較正直線フィッティング。用いた関数	
	は一次関数 y=p <sub>1</sub> x+p <sub>0</sub>	27
4.12	パルス発生装置の信号で得られた GROWTH ADC ボードのスペクトルー例 ......	29
4.13	GROWTH ADC board の出力応答線形性と直線との残差	29
5.1	<sup>22</sup> Na の壊変図	31
5.2	同時計数試験セットアップ写真	32
5.3	同時計数試験セットアップ図....................................	32
5.4	2チャンネルに同時信号入力した際に得られたトリガーチャンネル分布	33
5.5	2チャンネルに同時信号入力した場合に同時計数なしで得られたそれぞれのチャンネルの <sup>22</sup> Na	
	ガンマ線スペクトル	34
5.6	同時計数処理を行った結果図....................................	35

# 表目次

4.1	本研究で用いた高速 ADC/FPGA ボードの主な仕様 ................	18
4.2	GROWTH ADC ボードを使用する際の設定ファイルパラメータ ..........	22
4.3	GROWTH ADC ボードで得られたデータの各項目一覧	24
4.4	GROWTH ADC ボードと汎用 MCA8000D とのエネルギー分解能の比較	28

# 第1章 序論

# 1.1 X線ガンマ線観測と放射線検出器

宇宙空間では、地上では実現不可能なスケールの高エネルギー現象が多数存在する。例として超新星残 骸(図 1.1)やガンマ線バースト(図 1.2)などが挙げられる。超新星残骸では超新星爆発によって吹き飛ば された放出物が星間物質と衝突して生じた衝撃波において粒子加速が起こっていると考えられているが、未 だその全貌が明らかになっていない、宇宙線の加速現場の有力な候補の一つである。超新星残骸では、光速 近くまで加速された荷電粒子からは、非熱的な放射が X 線およびガンマ線で観測されると考えられる。ガ ンマ線バーストは未だその正体が謎に包まれている宇宙で最大級の爆発現象であり、 $10^{49} \sim 10^{52} 
m ~erg$ もの 莫大なエネルギーをわずかミリ秒から数10秒の間に放出する。そのエネルギー源として有力な候補として、 大質量星の崩壊や、中性子星やブラックホールで構成されるコンパクト連星系の合体が考えられている。こ のような中心エンジンのエネルギーが爆発的に解放されることで周辺物質との間で衝撃波が形成され、衝 撃波加速された荷電粒子からのシンクロトロン放射や中心エンジン近傍における熱的放射が超相対論的な 速度で視線方向に向かってくることでガンマ線として観測されていると考えられている。しかし、未だその ガンマ線放射機構やエネルギー源については謎に包まれている。これらは宇宙で起こる高エネルギー現象 のごく一例であり、他にも銀河団における高温プラズマからの X 線放射や銀河中心からの高エネルギーガ ンマ線探査によりダークマターの間接的観測が行えるとも考えられているほか、多くの銀河中心に存在す る 10<sup>6</sup> 太陽質量以上にも及ぶ超巨大ブラックホール周辺や我々の銀河系内に存在すると考えられているブ ラックホール連星からの X 線ガンマ線観測を行うことで、宇宙におけるブラックホールの成り立ちを探る こともできると考えられている。いずれの高エネルギー現象も、X 線ガンマ線を放射しており、このような 宇宙で起こる諸現象についての情報を持つ X 線ガンマ線の観測は高エネルギー現象の理解と解明のために 非常に重要であるといえる。



図 1.2: ガンマ線バーストの想像図 [2]

図 1.1: 超新星残骸であるかに星雲を様々な電磁波波 長で観測したイメージ図。中心のリング構造が X 線 (チャンドラ X 線望遠鏡)、外側の広がった構造は可視 光 (ハッブル宇宙望遠鏡)、赤外線 (スピッツァー宇宙 望遠鏡) で観測したもの。[1]

しかし、図 1.3 に示されるようにX線ガンマ線の波長帯をもつ電磁波は宇宙空間では吸収散乱を受け難 いが、大気による吸収の影響が大きく、地上での充分な観測が困難である。そのためX線ガンマ線検出器 は衛星やロケット、気球などの飛翔体に搭載され、上空での電磁波観測が行われる。X 線ガンマ線天文学 は、1962 年にリカルド・ジャッコーニらが初めて観測ロケットで宇宙から X 線で輝く天体を発見したこと から幕をあけ、1970年に NASA が世界初の X 線天文衛星 UHURU を打ち上げ、続々と X 線ガンマ線観測 衛星が打ち上げられてきた。日本も 1979 年初の X 線天文衛星「はくちょう」を打ち上げ、新しい X 線天 |体を次々と発見した。続いて「てんま」(1983 年)、「ぎんが」(1987 年)、「あすか」(1993 年)、「すざく」 (2005年)、「ひとみ」(2016年)と、継続して観測衛星を打ち上げ、NASA やヨーロッパ他が打ち上げてき た、「ROSAT」(1990年)、「Chandra」(1999年)、「XMM-Newton」(1999年)、「Swift」(2004)などに先駆 けて、最先端技術により数多くの成果を創出し、常に日本が世界を牽引してきた分野とも言える。ガンマ線 観測においては、10<sup>12</sup> 電子ボルト程度以上の超高エネルギーガンマ線では、地球大気を利用したチェレン コフ望遠鏡による地上観測が主流となるが、 $10^6 \sim 10^{12}$  電子ボルト程度の高エネルギーガンマ線では宇宙 望遠鏡による観測が必須である。ガンマ線分野でも 1960 年代から衛星観測が活発化し、「OSO-III」(1967 年)、「SAS-II」(1972年)、「COS-B」(1975年)、「CGRO-EGRET」(1991年)が NASA などによって打ち 上げられ、ガンマ線で輝く天体を続々と発見してきた。最近では、「Fermi」(2008 年) が 1000 を超えるガ ンマ線天体を発見し、特に 2017 年 8 月に重力波と同期して明るくなったガンマ線天体を捉えたことでマル チメッセンジャー天文学の幕開けが始まるなど、X線ガンマ線天文学は天文学のみならず物理学全般の発 展に大きく貢献していると言える。このような X 線ガンマ線天文学の発展には、X 線ガンマ線計測技術の 進歩が極めて大きな役割を果たしていると言える。特に複数機器からの信号処理技術は、近年の集積回路 技術の急速な発展などにより、非常に複雑で大規模な処理系をも衛星搭載可能な規模にまで収めることがで きるようになり、観測技術の向上、つまりは高精度な X 線ガンマ線観測を実現してきたといえる。

7



図 1.3: 電磁波の波長に対する大気の吸収深さ。緑の領域では電磁波が地上に届かない [3]

# 1.2 目的

ここまで述べたように、近年のX線、ガンマ線観測の発展はめざましく、特に複数機器読み出し技術の 発展が大きな役割を持っているといえる。しかし、はるか上空から到来するX線やガンマ線は大気による 吸収の影響で地上では充分な観測を行うことができない。そのため、検出器を人工衛星などの飛翔体に搭 載して観測を行う必要性がある。検出器搭載の際、小型化、低重量、低電力など、地上での検出器と比べ求 められる性能は厳しいため、採用が難しい。また、読み出しチャンネル数の肥大化もその要因となる。例え ば、後述するひとみ衛星搭載軟ガンマ線検出器コンプトンカメラには1万を超えるチャンネルがあり、チャ ンネルひとつひとつに対して解析のために信号を整形するための回路を取り付けると、検出器自体が非常 に複雑で大規模なものになってしまう。そのため、より大量の情報を処理し解析でき、かつ小型化された情 報処理系統が必要となる。

本研究では、雷雲ガンマ線観測実験である GROWTH 実験で用いられた高速 ADC と FPGA を組み合わせた小型多チャンネルボードを利用し、コンパクトで手軽な複数機器の同時読み出しシステムを構築することを目指した。

# 第2章 放射線検出器の基本原理

前章で述べたように、X線ガンマ線天文学の近年の発展は、複数信号処理技術の発展と密接に関連して いる。また、検出効率などの向上したX線ガンマ線検出器部の開発技術発展も重要な要素である。一方で、 処理する信号が複数であろうとも、また検出器の性能が向上したとしても、基づくX線ガンマ線検出原理、 つまり放射線計測技術の原理は同じものであるはずである。そこで、本章で放射線検出器の基本原理につ いて述べることで、本研究で取り組む複数信号処理システムの構築における検出器部の理解につなげる。

まず、放射線検出器の構造と読み出しのシステムについて説明する。一般的な放射線検出の流れとして は、到来した放射線はまず放射線検出器部で検出される。しかしこの放射線検出器自身が形成する信号は 非常に小さいため信号を増幅する必要がある。その後、増幅された信号の解析のため、信号を整形するため の回路を経て、増幅および整形が済んだ信号はアナログ-デジタル変換回路に入力され、そこで放射線のエ ネルギーに対応したアナログ電圧波高値をデジタル信号に変換 (A/D 変換) し、PC へと送られる。得られ たデジタル値の頻度分布を測定することで、天体からの放射エネルギーの分布が分かり、そこから天体の化 学組成・温度・運動の様子などといった様々な物理情報を引き出すことが出来る。このような放射線検出の 一般的な流れを図 2.1 に示した。



図 2.1: 放射線検出の一般的な読み出しシステム

# 2.1 放射線検出器部

一般に放射線の検出器部には、固体の検出デバイスを使用するのが有利であるといわれている。これは 固体の密度は気体と比べて約1,000 倍大きいため、測定の際等価な検出器を作ろうとするとガス入り検出器 に比べて固体デバイスを用いた検出器は小型化することができるためである。放射線が検出器と相互作用 を起こすと、検出器の有効体積中に電荷が生じる。この電荷を電極に収集することで検出器は入射した電磁 波のエネルギーを電気信号に変換している。この変換のメカニズムの違いによって検出器はいくつかの種類 があるが、今節では本実験で使用したフォトダイオード (半導体検出器) とシンチレータについて説明する。

### 2.1.1 半導体検出器

物質には原子最外殻にある電子(価電子)のエネルギー準位で構成されるエネルギーバンドが存在し、こ のバンド間のエネルギー領域を禁制帯という。電子はバンドをエネルギー準位の低い順に埋めていくが、こ の電子が絶対零度で存在することの出来る最大のエネルギーをフェルミエネルギー (E<sub>f</sub>) という。E<sub>f</sub> がバ ンド内に存在するときは電子は結晶中を自由に動くことができるが、E<sub>f</sub>が禁制帯内に存在するとき、E<sub>f</sub>以 下のバンド(価電子帯)は電子で満たされ、E<sub>f</sub> 以上のバンド(伝導帯)は電子数が0個となる。この状態 では電子は自由に動けないため、電気伝導性は示さず、このような物質を半導体、もしくは絶縁体と呼ぶ。 禁制帯のエネルギー幅をエネルギーギャップというが、何らかの形で電子がエネルギーギャップを超えるエ ネルギーを得て伝導体に励起された場合、この電子は電気伝導に寄与する。半導体は絶縁体に比べエネル ギーギャップが小さいため比較的エネルギーの低い光子でも励起が起こりうる。半導体検出器はこの性質を 利用し電磁波を電気信号として取り出している。また、半導体検出器には価数の異なる不純物をドープす ることで電子、あるいは正孔過剰状態にし、それらをキャリアとして利用する方法もある。例えば、5価の Pを4価のSiにドープすると、電子が余ることになり、この電子がキャリアとして寄与する (図 2.2)。こ れを n 型半導体と呼ぶまた、逆に不純物として 3 価の B をドープすると、電子が不足することとなり、こ れは正孔過剰状態である。この場合、正孔がキャリアとなる (図 2.3)。このような半導体を p 型半導体と呼 ぶ。さらに、これら p 型 n 型半導体を結合させたものを pn 接合型半導体と呼び、放射線検出機としてはこ の pn 接合型半導体が用いられる。



図 2.2: n 型半導体のキャリア模式図 [4]



図 2.3: p 型半導体のキャリア模式図 [4]

今回実験で用いた Si フォトダイオードは図 2.4 に示すような断面構造になっており、受光面側の p 型半 導体、基板側の n 型半導体を接合させた pn 接合型ダイオードを形成している。この pn 接合型ダイオード は前述のようにそれぞれの多数キャリアが異なり、p 型半導体では正孔が、n 型半導体では電子がそれぞれ 多数キャリアとなる。接合部の一部では拡散によりお互いの多数キャリアが再結合することでキャリアの少 ない空乏層を形成している。このような pn 接合ダイオードに電極を設置し、順方向 (p 型半導体にプラス、 n 型半導体にマイナス) 電圧を加えた場合、図 2.5 左に示すように、それぞれの電極から電子、正孔が供給 され、接合面では再結合されることで電流が流れることになる。逆方向電圧を印加した場合、図 2.5 右のよ うにそれぞれの電極から異なるキャリアが供給され、p,n 型半導体内のキャリアは電極側に移動し、結果空 乏層が広がるが電流は流れにくい状態が形成される。このような逆方向電圧印加状態で、空乏層に放射線 が入射すると、前述の通り、放射線のエネルギーに対応した数の電子正孔対が形成され、新たに発生した キャリアは、逆方向電圧印加により生じた電界に沿ってそれぞれの電極へと移動し、電気信号として取り 出される。このように、pn 接合型ダイオードはドは逆電圧をかけることで、通常は電流を流さず、電荷収 集に必要な電界を形成しておき、放射線由来の新たなキャリアを効率よく取り出すことができ、Si フォト ダイオードはこの pn 接合型ダイオードの応用例となっている。半導体検出器では1個の電子正孔対をつく るのに必要なエネルギーが数 eV と電離箱に比べ小さく(空気の場合は約 34eV である)、エネルギーあた りに生じる電子正孔対の数が多い。また、今回実験で使用したフォトダイオードの半導体に用いられてい るシリコンはバンドギャップが他の半導体に比べ比較的小さいため、電子正孔対を励起するための電離エネ ルギーが小さく済む。そのため他の半導体よりも同じエネルギーで励起される電荷キャリアの数が増加し、 キャリア数の統計的な変動が相対的に小さくなるためエネルギー分解能に優れ、エネルギースペクトル測 定に長けている。



図 2.4: 一般的な Si フォトダイオードの断面構造



図 2.5: pn 接合型半導体における順方向電圧印加時 (左) および逆方向電圧印加時 (右) におけるキャリアの 移動の模式図とバンド構造 [6]

### 2.1.2 シンチレータ

シンチレータとは、放射線が入射することで蛍光する物質のことをいう。シンチレータは化学組成によ り無機シンチレータと有機シンチレータに大別されるが、本研究で用いた CsI シンチレータは無機シンチ レータに分類される。シンチレータに放射線が入射した時、光電効果、コンプトン散乱などの相互作用に よって物質中の電子が放射線のエネルギーによって運動エネルギーを得る。その電子は運動エネルギーを失 うまで周りの分子を励起し、それらが基底状態へと戻る際に差分のエネルギーを持つ光(シンチレーション 光)を発生させる。そのため、シンチレータの発光量は基本的にはじめに電子が得た運動エネルギーに比例 することになる。透過力の高い X 線ガンマ線を検出するためには、それらを検出器が検出可能な領域の波 長に変換する必要があるが、シンチレータはこの変換を行うものである。本実験では、フォトダイオードに CsI シンチレータを組み合わせたものを検出器部として採用しており、シンチレータに入射したガンマ線か ら発生したシンチレーション光をフォトダイオードで電気的信号に変換するという流れで検出を行った。そ のため、シンチレータには放射線のエネルギーが効率よく蛍光エネルギーに変換されることや蛍光の波長 が検出器の感度と対応していることなどが求められる。

# 2.2 前置増幅器(プリアンプ)

放射線検出器が形成し出力する信号は放射線のエネルギーに比例した量の電荷信号であり、この電荷量 を計測することで放射線のエネルギーを測定することができる。電荷量の計測方法は様々であるが、本研究 では前置増幅器として CSA(Charge Sensitive Amplifer:電荷有感型前置増幅器)を用いた。

電荷有感型前置増幅器の簡略化した模式図を図??に示す。このように回路に並列に配置された静電容量  $C_c$ のコンデンサに検出器から出力された電荷 Q が入力されると、検出器の電荷収集時間 d が  $R_cC_c$  に比べ て短ければ、出力電圧  $V_{out}$  はパルスの全電荷 Q の  $1/C_f$  倍となる。

$$V_{out} \sim -Q/C_f \quad (d \ll R_f C_f)$$
 (2.1)

このように、電荷有感型前置増幅器を用いることで検出器から出力された電荷量に応じた大きさの電圧信 号を得ることができ、この電圧信号の大きさを測定することで放射線のエネルギーを計測することができ ることになる。また、一般的に検出器から出力される電荷信号は、光電子増倍管のように検出器自身で大き く増幅しない限り非常に微弱であるため、外来ノイズの影響を抑えるために前置増幅器と検出器はできる だけ近くに配置することが望ましい。

# 2.3 整形増幅器

一般的には前置増幅器は長い減衰時間が設けられている。これは出力パルスの完全な電荷収集を行うた めであるが、検出器と放射線光子の相互作用が多いとあるパルスが減衰しきる前に次のパルスが入ってき て、前の信号のテイルと被ってしまうため出力パルスは本来の信号よりも高い波高値を得る。このような データは電荷量のよい目安となりえず、結果として歪んだエネルギースペクトルを得ることとなる。これを パイルアップという。このような問題を解決するためには、パルスを整形 (Shaping) して信号のテイルを 可能な限り取り除くことが要求される。検出器からの信号パルスの形状を変えるような操作をパルス整形 といい、パルス整形をすることによってパルスの最大波高が持つ情報は保存され、その結果パイルアップ の影響を減らすことが可能である。 CR 微分回路の後に数段の RC 積分回路を組み合わせた場合、パルス 波形をガウス分布の形状に整形することができる。これをガウス型整形増幅器と呼ぶ。整形された波形の ピーキングタイム (整形パルスが最大波高値に到達するまでの時間)は整形増幅器内の微分回路の時定数 と用いた積分回路の段数の席の形で表わされる。ガウス型整形は CR-RC 整形回路などの他の整形回路に比 ベパルスひとつひとつのノイズ耐性がよい。[7] 整形回路がパルスを感知する時間をシェーピングタイムと いい、この時間は整形回路の時定数に依存する。前置増幅器からの信号を受けた整形回路は、 シェーピン グタイムの間に入力された電圧の積分値に比例する波高値をもった信号をガウシアンに整形して出力する。 そのためシェーピングタイムは信号のノイズ特性に影響を与える。シェーピングタイムを短くするほどパル ス波を重複して数えないようにできる反面、短すぎるシェーピングタイムは信号を正しく整形できないと いうデメリットも併せ持つ。

# 2.4 アナログデジタル変換器 (ADC:Analog to degital converter)

アナログ信号をデジタル信号に変換する機器をアナログデジタル変換器 (ADC) という。放射線検出デバ イスに光子が入射して出力される信号はアナログ信号のパルスであり、これをデジタルパルスに処理するた め放射線検出器にも ADC が用いられている。ADC は、入力されたアナログ電圧に比例したデジタル値を 出力し、これは連続量を離散的なデータに変換すると言い換えることもできる。図 2.6 は一般的な放射線源 からのガンマ線一光子を検出した場合の整形増幅器の出力をオシロスコープで表示したデータであり、それ を ADC を通じデジタル値にしたものが図 2.7 である。検出器や前置、整形増幅器を通じて生成されたアナ ログパルス信号が、デジタル変換によりあるサンプリング数でデジタル値に変換されていることがわかる。





図 2.6: ガンマ線1光子の信号に対する整形増幅器出 図 2.7: 左図のようなアナログ信号を AD 変換したデ 力のオシロスコープデータ例 ジタル波形データ

# 第3章 複数機器の同時読み出し

前章において、基本的な半導体検出器を用いた放射線検出器の原理について述べてきた。多くのX線ガ ンマ線検出器は、検出器自体の発展こそあれ、原理的にはすでに述べたような物理描像に基づいてX線ガ ンマ線観測を行なっており、そのデータ取得、処理方法の工夫として複数機器の同時読み出しが近年大きく 発展してきている。本章では、代表的な同時読み出し手法とその利用例について述べる。

# 3.1 同時計数法と反同時計数法

同時読み出し法の代表的な例として同時計数法(コインシデンス法)と反同時計数法(アンチコインシデ ンス法)が挙げられる。コインシデンス法では、複数の端子から同時に検出されたイベントのみを計数する という手法をとっており、時刻、反応位置、検出した放射線のエネルギーなど、複数機器が同時に反応した 放射線情報を総合することで、もともとの放射線の情報に制限をかける手法である。コインシデンス法に 対し、複数の端子から同時に検出されたイベントを計数しなという手法をアンチコインシデンス法という。 この場合は、本来取得したい放射線が複数機器において同時に計数されないような検出器を構成し、アン チコインシデンスをとることで、逆に取得したい放射線の情報を選択することができる、という手法であ る。前者は特に天体からのX線ガンマ線情報を引き出すために用いられ、後者は主に天体とは別のX線ガ ンマ線、あるいは荷電粒子などを天体由来の放射線とそれ以外とを区別するために用いられることが多い。 以下にその具体的な利用例を示す。

# 3.1.1 コンプトン散乱型偏光計

コンプトン散乱型偏光計は散乱体とそれを囲むように配置された吸収体の二種類の検出器で構成されて おり、同時計数法を利用しガンマ線の偏光情報を得ることを目的としている。このときガンマ線と検出器の 間で起こる相互作用であるコンプトン散乱の性質を利用している。入射するガンマ線は、コンプトン散乱 前後で進行方向が曲げられ、入射ガンマ線の持つエネルギーの一部が散乱する電子に渡される。図 3.1 に示 すように、散乱されるガンマ線と散乱角の関係は、

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)}$$
(3.1)

と表すことができる。 $h\nu(=E_{\gamma})$ は散乱前、 $h\nu'(=E_{\gamma}')$ は散乱後のガンマ線のエネルギー、 $m_ec^2$ は電子の静止質量エネルギー、 $\theta$ は散乱角である。

散乱光子の微分散乱断面積は以下の式(クライン-仁科の式)で与えられる。



図 3.1: コンプトン散乱の概念図 [8]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{{E_\gamma'}^2}{{E_\gamma}^2} \left( \frac{E_\gamma}{E_\gamma'} + \frac{E_\gamma'}{E_\gamma} - 2\sin^2\theta\cos^2\varphi \right)$$
(3.2)

ここで r<sub>0</sub> は古典的電子半径、φ は光子の散乱方位角を表す。この式を散乱方位角のみの関数とすると、 定数 A,B を用いて

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A - B\cos^2\varphi \tag{3.3}$$

と書き換えられる。散乱型偏光計ではこの性質を利用し、散乱体と吸収体で同時に計数されたイベント の位置情報とエネルギー差から偏光ベクトルに対する角度 φ への依存性を調べることで偏光情報を得てい る。図 3.2 にこのような原理に基づいたコンプトン散乱偏光計の模式図を示す。このような偏光計を用いた 観測の例としては、気球による硬X線領域の偏光観測を目的とした PoGo+プロジェクトなどがある。この 観測には SDC(Sandwich Detector Cell) と呼ばれる散乱型偏光計を組み込んだ 61 個のユニットが蜂の巣状 に並べられた構造の検出器が使用され、世界で初めて 2-16 万電子ボルトの X 線で、天体からの偏光を高い 信頼性で検出することに成功している。[9] 図 3.3 に PoGO+検出器の模式図を示した。





BGOシールド(SAS)

図 3.2: コンプトン散乱型偏光計の構造



# 3.1.2 半導体多層コンプトンカメラ

散乱型偏光計と同じく同時計数法を利用した検出系にコンプトンカメラがある。これも散乱体と吸収体 で構成されており、同時計数法によりに検出されたエネルギーと位置からコンプトン散乱の運動学に従って ガンマ線の到来方向を制限するものである。コンプトン散乱を起こした光子のエネルギーと散乱角の関係 は、式 3.1 を変形すると

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{h\nu'} + \frac{m_e c^2}{h\nu + h\nu'}$$
(3.4)

とわかる。散乱体と吸収体で観測されたエネルギーをこの式に代入すると、図 3.4 に示すように角度 2θ を頂角に持つ円錐が書ける。よって線源の位置はこの円錐の底面の円周上に制限することができる。この円 錐を Compton Cone と呼ぶ。また、同じ線源から到来する複数の光子について散乱角を求めることで、一 つの θ につき一つの Compton Cone を描くことができ、放射線の到来方向が Compton Cone の交点である 確率が高いといえる。



図 3.4: コンプトンカメラの原理図と Compton Cone による放射線到来方向の制限 [10]

ひとみ衛星に搭載された軟ガンマ線検出器(SGD: Soft Gamma-ray Detector)では、BGO シンチレー タを用いた井戸型のアクティブシールドの底にコンプトンカメラを置いた構造になっている。コンプトンカ メラは図 3.5 に示すように Si と CdTe 半導体を多層重ねた構造を取っており、検出効率と角度分解能の向 上に成功している。



図 3.5: SGD の断面図

# 3.1.3 アクティブシールド

放射線検出を行う際、目的としている情報のほかに検出器の視野外からやってくる荷電粒子や X 線ガン マ線などがバックグラウンドとして検出されてしまうことがほとんどである。また、陽子が主検出部に当た ることで主検出器が放射化し、それもバックグラウンド源となってしまう。アクティブシールドはそれらの 問題を解決するためのものである。下の図 3.6 にアクティブシールドの概念図を示す。アクティブシールド は主検出器の周りをシンチレータなどで構成されるシールド検出器で覆っている構造をしている。これを 採用している検出器の一例である ASTRO-H 衛星 SGD では、主検出器を BGO シンチレーターユニットで 取り囲んでいる。これにより、視野外からの宇宙線を遮断することで主検出器をシールドしているがそれだ けではもちろん放射線がシールドを通り抜けて主検出器部に入ってしまうことがある。このとき、BGO シ ンチレータの信号との反同時係数処理を行うことによって、それらをバックグラウンド成分として除去する ことができる。バックグラウンド成分の除去が可能となると、これまで検出レートが低くバックグラウンド に埋もれてしまっていた信号などを検出することができるようになる。この BGO シールドは、図 3.5 にお ける緑色の部分に対応しており、主検出器を取り囲んでいることがわかる。



図 3.6: アクティブシールドの概念図

# 第4章 GROWTH 小型多チャンネルADCボードを用いた複 数信号処理システムの構築

本研究では、GROWTH 実験と呼ばれる雷雲ガンマ線の粒子加速機構の解明を目的とした実験において 用いられた高速 ADC と FPGA を組み合わせた小型多チャンネルボードを使用した。雷雲ガンマ線実験は 東京大学などの大学院生が中心となって雷雲内の電場という高密度な大気内における電子の相対論的加速 現場を捉えるために発足している実験である。雷雲からのガンマ線を捉えるために、観測装置はすでに述べ た反同時計数法により荷電粒子によるバックグラウンドを除去する構成となっており、複数機器からの信号 を処理する必要がある。さらに、日本における雷雲発生場所の多地点における観測を実現するために、コン パクトな複数信号処理システムが開発された経緯がある。図 4.1 に示すように、実験当初では人が入ること ができるほど大規模の計測系が必要とされていたが、近年の技術進展により、装置全体を 40cm 四方程度ま でコンパクト化すること成功している。特に、本研究で立ち上げを行う小型多チャンネル ADC ボードは1 辺わずか 9.5cm で最大 4 入力の信号を高速同時処理することが可能である。搭載されている ADC はアナ ログデバイセズ社の AD9321BCPZ-65 であり、50Msps、12bit 分解能で入力アナログ波形のサンプリング を行う。取得した波形データは、GROWTH チームにより開発、提供された FPGA(Field Programmable Gate Array: Artix-7 XC7A35T-1FTG256C XILINX 社) プログラムを用いることで、時刻情報などを付加 されて、USB 通信で PC(Mac/Linux) で読み出すことができる。Rapberry Pi と組み合わせることで独立 したシステムを構築することも可能となっている。本研究では、USB 通信で Mac PC を介してデータ通信 を行なった。本ボードの主な仕様を表 4.1 に示した。[12]

式 4.1. 本前先 Chi V C向述 ADO/II OA A 「 V L な L 体			
サイズ	$9.5 \ge 9.5 \text{ cm}^2$		
搭載 ADC	AD9321BCPZ-65 (アナログ・デバイセズ/65Msps MAX)		
搭載 FPGA	Artix-7 XC7A35T-1FTG256C (XILINX)		
動作電圧	12 V		
消費電力	5 W		
入力 ch 数	4 ch (50Ω インピーダンス)		
サンプル周波数	$50 \mathrm{Msps}$		
ADC 分解能	12 bit		
最大転送速度	8 Mbps		
最大取得レート	> 10kHz (取得設定、PC 性能に依る)		

表 4.1: 本研究で用いた高速 ADC/FPGA ボードの主な仕様



図 4.1: 雷雲ガンマ線実験における検出器小型化の経緯。当初は人が入れるぐらいのサイズの検出器系 (左上)を40cm 四方程度にまでコンパクト化 (左下)。特に小型多チャンネル ADC ボードはわずか 9.5cm 四方で4入力まで高速同時処理可能 (右下)[11]

# 4.1 高速 ADC/FPGA ボードの立ち上げ

本研究では、前節で述べた ADC ボードを用いて多チャンネル読み出しシステムの構築を目指すが、その前段階として本実験では Si フォトダイオードによる単チャンネルでの読み出しを行う。

立ち上げにおいては、まず、ADCボードに放射線検出器からの信号を1チャンネルのみ入力し、ADC ボードの動作に必要な手順について確立する。続いて、ADCボードが正常に動作し、今後の複数信号読み 出しに用いても問題ないか確認するため、放射線計測において一般汎用的に利用されてきて実績の深い市 販のADCと測定結果を比較する。また、入力信号に対する線型性も確認する。

# 4.1.1 セットアップ

本測定において、ADC ボードに入力する信号として、§2.1.1 で述べた放射線検出器の一例である、Si PIN フォトダイオードを用いた。図 4.2, 4.3 にセットアップ概念図および実際の写真を示す。Si PIN フォ トダイオードとして浜松フォトニクス社が提供する S3590-08 を使用した。静電遮蔽のため、2mm 厚のア ルミ箱の中に配置し、クリアパルス社製 E6625 電源を用いて、50V の逆電圧を印加した。§2.1.1 で述べた ように、半導体検出器は逆電圧をかけることで空乏層が広がり、放射線検出感度が増加する。一方、逆電圧 が高くなりすぎると、素子がブレークし、大量の電流が流れてしまう。本測定に先立って、素子がブレー クしない程度の最適な逆電圧を調べ、50V の逆電圧を印加することとした。Si PIN フォトダイオードから 読み出された電荷信号は、電荷有感型前置増幅器クリアパルス社製 CP580K により電圧変換、信号増幅さ れる。図 4.2 に示すように、フォトダイオードと前置増幅器はなるべく近づけて配置するようにする。前置 増幅器の出力信号は整形増幅器 (ORTEC 社 572) により、波形整形し、適切な波形に整形する。ここでは 整形時定数として 1µs を用いた。整形増幅器を経た電圧信号の波高値を計測し、放射線のエネルギースペ クトルを取得するための ADC として、本実験では、今回立ち上げる ADC ボードと、汎用 ADC である、 Amptek 社 PocketMCA MCA8000D の二つの ADC へと入力し、得られるエネルギースペクトルを比較す る実験と、放射線源の代わりに出力信号がわかっており、かつ安定しているパルス発生装置 (クリアパルス CP9028) からの信号を GROWTH ADC ボードに入力し、出力応答の線型性を確認する実験を行う。



図 4.2: 立ち上げ実験の全体写真。暗幕内に PD と線源が入っている

### 4.1.2 実験方法

前節で構築したセットアップで、放射線源からのガンマ線エネルギースペクトルを計測し、エネルギー 分解能を GROWTH ADC ボードで取得した場合と、汎用 MCA MCA8000D で取得した場合で比較する。 ここで、エネルギー分解能とは、入射した放射線が全てのエネルギーを検出器に与えた場合にエネルギー スペクトルに現れるピーク構造の半値幅: FWHM(Full Width At Half Maximum) で評価される。理想的 な検出器の場合は、このピークはデルタ関数として現れるはずであるが、電気的ノイズや統計限界によって エネルギー分解能は有限の幅を持つ。今回セットアップした GROWTH ADC ボードが問題なく動作して いるのであれば、従来の汎用データ取得系である MCA8000D との間にエネルギー分解能の大きな違いが現 れないはずである。

### GROWTH ADC ボード でのデータ取得の流れ

計測ソフトウェア growth\_daq の設定と起動



図 4.3: 立ち上げ実験セットアップ図

まず、GROWTH ADC ボードを用いてデータ取得を行う際の手順についてまとめる。前節で述べたよう に、ADC ボードと PC とのデータ通信は GROWTH チームが提供、公開してる FPGA コードにしたがっ て制御され、PC にデータが送られることになる。PC 側では、データ取得の条件を設定することができる。 このような条件設定は、図 4.4 に示したような yaml 形式で記述する。ここで設定可能な条件を表 4.2 で 列挙した。この設定ファイルに基づいてデータ取得を PC 側から制御するソフトウェア (growth\_daq) が GROWTH チームから提供されている。データ取得には、設定ファイルに適切なパラメータを設定したの ち、以下のように動作させる。

growth\_daq /dev/tty.usbserial-FT2FKFVCA configuration.yaml 100

ここで、第一引数は、PC 側で USB ポートで認識されているデバイス名を指定する。/dev 以下に tty.usbserial として認識されているはずであるので、それを確認しておく。第二引数に設定ファイル名を指定し、最後に 第三引数に計測時間を秒で指定すると計測が開始される。

File Edit Options Buffers Tools Help
DetectorID: growth-fy2017
PreTriggerSamples: 20
PostTriggerSamples: 500
SamplesInEventPacket: 520
DownSamplingFactorForSavedWaveform: 1
ChannelEnable: [yes,no,yes,no]
TriggerModes: [4, 4, 4, 3]
TriggerThresholds: [26, 30, 23, 30]
TriggerCloseThresholds: [2050, 2050, 2050, 2050]

図 4.4: yaml 形式で与える GROWTH ADC ボードの設定例

DetectorID	検出器名
PreTriggerSamples	スレッショルドを超えた波高値を持つ
	パルスを処理する際、トリガー前のい
	くつまでのサンプルを使用するか
PostTriggerSample	前者と同様で、トリガー後のサンプル
	数に対応
SampleInEventPacket	上記で処理した波形データのうち、何
	サンプルまでデータとして保存するか
ChannelEnable	どのチャンネルのトリガーを有効にす
	るか
${\it DownSampleingFactorForSavedWaveForm}$	保存する波形データをダウンサンプリ
	ングし、データ量、転送速度を確保す
	3
TriggerModes	トリガー判定モード
	3: 現在の波高値が TriggerThresholds
	を超えたらトリガーとみなし、Trig-
	gerCloseThresholds を下回ると次の
	トリガーを受け付ける
	4: 差分トリガー。PreTriggerSamples
	前の波高値をベースラインとして現在
	の波高値との差分でトリガー判定を行
	う
TriggerThreholds	トリガー閾値設定
TriggerCloseThresholds	TriggerModes=3 の場合に、トリガー
	判定後に波高値がこの値を下回った
	場合、次回のトリガーを受け付ける。
	1

表 4.2: GROWTH ADC ボードを使用する際の設定ファイルパラメータ

### 計測ソフトウェア growth\_daq で取得したデータ

データ取得が終了すると、日付と時間が記されたファイル名

(yyyyddmm\_HHMMSS.root or .fits) が生成される。ここで、拡張子は .root と .fits の2通りあり、素粒子・ 原子核物理分野で開発された解析フレームワーク"ROOT"(https://root.cern.ch/) と、天文業界で使われる データフォーマット "FITS" (Flexible Image Transport System) のどちらかで解析可能である。growth\_daq ソフトコンパイル時に、-DUSE\_ROOT オプションをつけるかどうかで出力フォーマットを選択できる。本 研究では、前者の ROOT フォーマットで解析を進めることにする。前述の通り、GROWTH ADC ボード では放射線イベントごとにデータが記録される。その内容を図 4.5 に示し、詳しい内容の説明は表 4.3 にて 行なっている。例えば、イベントごとの最大波高値が phaMax コラムに記録されている。すでに述べたよ うに最大波高値は入射放射線のエネルギーに対応するので、この phaMax コラムの頻度分布を作成すると、 入射放射線のエネルギースペクトルを得ることができる。

以上の手順を経ることで、GROWTH ADC ボードを用いてデータ取得が可能となる。本研究では、<sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd 放射性同位体から放射されるガンマ線を計測し、GROWTH ADC ボードおよび汎用 MCA8000D を 用いてそれぞれエネルギースペクトルを作成し、エネルギー分解能を評価する。エネルギー分解能は前述 の通りスペクトルピークの FWHM で表されるが、異なる測定系で比較するため、エネルギー較正を行う必 要がある。エネルギー較正は<sup>241</sup>Am および<sup>109</sup>Cd から放出されるもっとも放出割合の高い、59.5 keV お よび 22 keV のピークを用いて行う。線形性測定試験では、パルス発生装置の出力設定を変えながら、同様 に GROWTH ADC ボードでスペクトルを取得し、入力設定と出力 ADC チャンネルの関係を調べた。

[root [2] eventTr	ee->Show(5)			
=====> EVENT:5	=====> EVENT:5			
boardIndexAndCh	nannel = 0			
timeTag	= 413897047596			
unixTime	= 1548742124			
triggerCount	= 36867			
nSamples	= 520			
phaMax	= 3921			
phaMaxTime	= 135			
phaMin	= 2068			
phaFirst	= 2068			
phaLast	= 2115			
maxDerivative	= 27			
baseline	= 2067			
waveform	= 2069,			
	2068, 2068, 2068, 2068, 2069, 2069, 2070, 2071, 2071, 2072,			
	2072, 2074, 2075, 2076, 2077, 2079, 2081, 2082, 2085			
. 533				

図 4.5: GROWTH ADC ボードで得られた ROOT 形式データの一例

教 4.5. GHOW III ADO ホートで待ちれたアーズの音項目 見			
boradIndexAndChannel	検出したチャンネル番号		
timeTag	トリガー時刻 (FPGA 内部クロックカウンタ		
	$100 \mathrm{MHz}/40 \mathrm{bit})$		
unixTime	同上、ただし PC 内時刻		
triggerCount	トリガーカウント 16bit 通常は連続するが、デー		
	タ抜けなどがあると飛びが生じる		
nSamples	取得した波形サンプル数		
phaMax	取得した波形で計測された最大波高値		
phaMaxTime	最大波高時のサンプル数		
phaMin	取得した波形で計測された最小波高値		
phaFirst	取得した波形における最初のサンプルの波高値		
phaLast	取得した波形における最後のサンプルの波高値		
maxDerivative	波高値の最大変化率		
baseline	トリガーから preTriggerSample だけ遡った時点の		
	波高值		
waveform	取得した波形データ。一イベントごとに nSample		
	分だけ記録されている		

表 4.3: GROWTH ADC ボードで得られたデータの各項目一覧

### 4.1.3 実験結果

### エネルギースペクトル計測とエネルギー分解能比較

図 4.6 および、図 4.7 に、前節の手順に従い、GROWTH ADC ボードを用いて取得した<sup>241</sup>Am と<sup>109</sup>Cd からのガンマ線エネルギースペクトルを示す。積分時間はいずれも 3 時間 (= 10,800 秒) である。これらの 図から、GROWTH ADC ボードを用いて放射線のエネルギースペクトルを得ることができていることがわ かる。スペクトルを見ると、~2000ch より上のチャンネルでデータが取得されていることがわかる。これ は、GROWTH ADC ボード内部で、ADC への負極性入力を避けるために DC オフセットを与えているた めである。得られたエネルギースペクトルについて、<sup>241</sup>Am の 59.5keV、<sup>109</sup>Cd の 22 keV 光電吸収ピーク ををガウシアンでフィッティングし、ピークにおける ADC channel とガウス関数の分散σを求めた。フィッ ティング結果は各図で赤い曲線に示してある。

次にこの結果を利用し、エネルギー較正を行った。これは、ADC で出力されるエネルギーに対応する値 (図の横軸:ADC channel)をエネルギー値に変換するために行う。得られたスペクトルのピークに対し、 その中心位置の ADC channel 値を縦軸、ピークに対応する放射線のエネルギーを横軸にデータ点をプロッ トすることでエネルギー較正直線を得ることができる。結果を図 4.8 に示す。

フィッティング結果は、 $p_0 = 2058.79 \pm 0.24$ 、 $p_1 = 10.37 \pm 0.07$ であった。これにより任意の channel 値 をエネルギー値に変換することができる。



図 4.6: ADC board で取得した <sup>241</sup>Am のエネルギースペクトル



図 4.7: ADC board で取得した <sup>109</sup>Cd のエネルギースペクトル



図 4.8: ADC ボードのエネルギー較正直線フィッティング。用いた関数は一次関数 y=p1x+p0

同様の解析を汎用 MCA である MCA8000D を用いた場合で行なった。得られたスペクトルを図 4.9, 4.10 に示す。MCA8000D を用いた場合でも同様にエネルギースペクトルが取得できていることがわかる。 GROWTH ADC ボードと同様に、それぞれの光電吸収ピークをガウシアンでフィッティングし、エネル ギー較正直線を求めたのが図 4.11 である。得られたパラメータは、 $p_0 = 23.81 \pm 0.58$ 、 $p_1 = 18.83 \pm 0.02$ である。



図 4.9: 汎用 MCA8000D で取得した <sup>241</sup>Am のエネルギースペクトル



図 4.10: 汎用 MCA8000D で取得した <sup>109</sup>Cd のエネルギースペクトル



図 4.11: 汎用 MCA8000D で得られた結果に対するエネルギー較正直線フィッティング。用いた関数は一次 関数 y=p<sub>1</sub>x+p<sub>0</sub>

ここまでの結果を用いて、GROWTH ADC ボードと汎用 MCA8000D のエネルギー分解能 FWHM を 比較する。エネルギー分解能は

$$FWHM[keV] = \frac{2.35\sigma}{p_1}$$
(4.1)

で求められる。GROWTH ADC ボードで求めた結果および汎用 MCA8000D で求めた結果を比較した のが表 4.4 である。ここに示すように、GROWTH ADC ボードと汎用 MCA を用いて得られたエネルギー 分解能には大きな差が見られないことがわかる。<sup>109</sup>Cd のみ、若干の違いが見られるが、要因の一つとし て、<sup>109</sup>Cd のみ、GROWTH ADC ボードと汎用 MCA8000D の測定期間が大きく異なったために、温度な ど実験環境に変化があった可能性がある。半導体検出器は温度によりノイズ性能が異なり、エネルギー分解 能に影響を及ぼすためである。今後温度条件に注意して比較する必要があるが、エネルギー分解能の観点 からは、今回立ち上げた GROWTH ADC ボードは汎用 MCA8000D に比べて大きく違いがないことがわ かった。

表 4.4: GROWTH ADC ボードと汎用 MCA8000D とのエネルギー分解能の比較

	$^{241}\mathrm{Am}$	$^{109}\mathrm{Cd}$
FWHM(GROWTH ADC)	$5.56{\pm}0.02$	$5.59{\pm}0.06$
FWHM(汎用 MCA8000D)	$5.47{\pm}0.06$	$6.25{\pm}0.03$

### 出力応答線形性

図 4.12 にパルス発生装置の信号に対して得られた GROWTH ADC ボードの出力スペクトル例を示す。 パルス発生装置の出力信号の安定性から放射線源のエネルギースペクトルに比べて非常に狭い波高値分布 を示すが、電気的ノイズの影響により有限の広がりを持つ。そこで、今回はピーク値をスペクトルのピーク を示すビン位置と定義し、入力パルス設定値との関係性を取得した。その結果が図 4.13 である。入力パル ス設定値 10 以下のデータ点を用いて一次関数フィットした結果とその残差も同様に示す。

ADC の出力上限値 (12bit=4096ch) まで各点で残差は ~ 0.3 %以内に収まった。この結果から、今回立 ち上げた ADC ボードを用いて問題なく放射線計測が行えることが確認できた。



図 4.12: パルス発生装置の信号で得られた GROWTH ADC ボードのスペクトルー例



図 4.13: GROWTH ADC board の出力応答線形性と直線との残差

# 第5章 複数機器同時読み出し試験

前章でコンパクトで高速で複数機器からの信号処理が可能な ADC/FPGA ボードを立ち上げ、1 チャン ネル動作の手順を確立し、その性能も従来広く使用され実績のある汎用 MCA8000D と比較しても大きな問 題がないことを確認したことから、本章で今回立ち上げた GROWTH ADC ボードを使用して複数機器の 同時読み出し試験を行う。

# 5.1 <sup>22</sup>Na 511 keV back-to-back 事象を利用した同時計数実験

本章で行う複数機器同時読み出し試験においては、ある程度の頻度で同時に発生することが保証されて いる事象を準備する必要がある。例えば、§3.1.2 で述べたコンプトンカメラで利用しているコンプトン散 乱などは良い候補であるが、同時発生事象を選び出すことが必ずしも明確ではない。他にも、<sup>241</sup>Amの 崩壊を利用して、<sup>241</sup>Amをプラスチックシンチレーターに封入し、アルファ線がプラスチックシンチレー ターで検出された事象と<sup>241</sup>Amのガンマ線事象を同時に捉えることもよく利用されているが、本研究では <sup>22</sup>Na を利用した同時計数実験を行う。以下にその原理を述べる。放射性同位体である<sup>22</sup>Na は図 5.1 に示 したように、半減期およそ 2.7 年で<sup>22</sup>Neの励起状態に高い確率で $\beta$ +崩壊過程で遷移する。さらにガンマ 崩壊により<sup>22</sup>Neの基底状態へと遷移し、その際に差分のエネルギーを 1274keV ガンマ線として放出する。  $\beta$ +崩壊では、核子レベルでは以下のような反応が起こっている

$$p \to n + e^+ + \nu_e \tag{5.1}$$

すなわち、陽子が陽電子および電子ニュートリノを放出して中性子に変化する。これにより、原子番号 がひとつ下がることになる。ここで発生した陽電子は有限の運動量を持つが、陽電子の飛程は短く、一般的 な放射線源が収められているアクリルケースから飛び出すことはほぼなく、ケース内で運動量を失い、最 終的に電子と対消滅反応を起こす。この際に 511keV ガンマ線を放出する。このことから、<sup>22</sup>Na は、1274 keV と 511 keV を放出する放射線源として広く利用されている。ここで、511 keV は電子陽電子対消滅に より発生するのでその発生方向は正反対 (back-to-back) になるはずである。すなわち、検出器を <sup>22</sup>Na 放射 線源に対して対称に配置することで、511 keV は必ず二つの検出器で同時に検出されると予想される。



図 5.1: <sup>22</sup>Na の壊変図

# 5.2 セットアップ

本実験では、<sup>22</sup>Na 511 keV ガンマ線事象の同時計数を狙う。ここまでの実験では、Si PIN フォトダイ オードで直接 <sup>241</sup>Am 59.5 keV ガンマ線などを検出してきた。しかし、511 keV ガンマ線は、フォトダイ オードの厚さ 0.5 mm で光電吸収を起こす確率が極めて低いため、フォトダイオードだけでは本実験を 行うことはできない。そこで、§2.1.2 で述べたように、シンチレーターを用いてガンマ線をそのエネルギー に対応した数の可視光に変換し、その光をフォトダイオードで読み出す。ここで、シンチレーターとして常 温でも比較的光量が高い CsI(TI) シンチレーターを選び、取り扱いの容易さと出来るだけ発生したシンチ レーション光を集光するために 1cm<sup>3</sup> の大きさのものを選別した。図 5.2 および図 5.3 に実際のセットアッ プ写真とその模式図を示す。基本的なセットアップは前章と同じであるが、検出器として CsI(TI) シンチ レーターをフォトダイオードで読み出すシステムとなっている。同時計数を行うために同じ検出器を 2 つ 用意した。なお、二つの検出器系統で整形増幅器の型番が異なっていることに注意が必要である。一方は ORTEC 社の 572, もう一方はクリアパルス社の CP4417 を用いた。異なる整形増幅器を用いると、設定す る時定数パラメータは同じでも §2.3 で述べたような微分回路と積分回路の組み合わせ方が異なる場合があ り、出力波形に若干の違いが生じる。本実験ではあえて異なる整形増幅器を用いることで、異なる検出器か らの入力信号を想定した実験とした。なお、整形時定数は両者とも 1  $\mu$ s である。図 5.3 に示すように <sup>22</sup>Na 放射線源を二つの検出器に対して対称かつできるだけ近い位置に配置し、511 keV 事象の同時計数を狙う。



図 5.2: 同時計数試験セットアップ写真



図 5.3: 同時計数試験セットアップ図

## 5.3 実験方法

今回用いる GROWTH ADC ボードはそれぞれのチャンネルで独立にデータ収集を行なっており、デー タ収集時に他のチャンネル情報から同時計数かどうか確認するなどのアルゴリズムは実装されていない。す なわち、他チャンネルとの関連性を調べるためには、取得したデータに記載されているトリガー時刻がある 時間幅で一致しているイベントを選別する必要がある。さらに、取得したデータが二つあるうちのどちら のチャンネルで取得したのかを区別する必要がある。そこで、本実験では、取得したイベントデータに含ま れる、"timeTag"と"boardIndexAndChannel"の二つのパラメータに着目する。timeTag がある時間幅以内 に、boardIndexAndChannel が異なるイベントが記録されていれば、それらは同時計数である、とみなす こととする。この時間幅 (coincidence window) は整形増幅器の出力波形の時間スケール程度広く取ること が一般的である。本実験では整形時定数を 1 $\mu$ s と設定したが、実際にオシロスコープの信号出力波形を観 察して、この coincidence window を 2 $\mu$ s に設定することにした。<sup>22</sup>Na の計測を約1日継続し、得られた データを上記条件により解析し、同時計数試験を行う。

# 5.4 実験結果

すでに述べたように、本実験で重要なパラメータとして、トリガーしたチャンネルを区別する"boardIndexAnd-Channel"がある。このパラメータが正しく取得できていないと、同時計数解析は困難である。図 5.4 に、 本計測データの一部を用いて、boardInexAndChannelの頻度分布を作成した結果をしめす。本実験では、 channel0 と channel2 に信号を入力したため、得られる頻度分布も0と2 に分布するはずである。



図 5.4: 2 チャンネルに同時信号入力した際に得られたトリガーチャンネル分布

図 5.4 から、異なるチャンネルでそれぞれデータを取れていることがうかがえる。boardIndexAndChannel=0,2 のイベントデータを区別してスペクトルを書くと図 5.5 のようになった。



図 5.5: 2 チャンネルに同時信号入力した場合に同時計数なしで得られたそれぞれのチャンネルの <sup>22</sup>Na ガン マ線スペクトル

それぞれのチャンネルから、<sup>22</sup>Na による 1274keV, 511 keV の光電吸収、コンプトン散乱成分、さらに は後方散乱成分が観測されていることがわかる。すでに述べたように、この読み出し系では検出器それぞ れに異なる整形増幅器を接続しているため、ゲインやシェーピング波形が若干異なっている。このようなこ とからも、2 チャンネルによる同時読み出しができていることがわかった。

次に同時計数処理を行った。同時計数処理では、各チャンネルで独立に取得されたデータのうち、連続したイベント同士の時刻差がある時間以内であれば同時計数であるとみなし計数した。結果を図 5.6 に示す。

上図で、赤色と青色のヒストグラムは図 5.5 と同様各チャンネルで取得したイベントデータのスペクト ルである。この2種類のデータについて同時計数を行ったものが緑色にあたる。紫色のヒストグラムは、比 較対象のため青色をスケールしたものである。図 5.6 の緑と紫のヒストグラムの比較からも 511 keV のイ ベントを残しつつ 1274keV のイベントを削減できていることがわかり、ADC ボードを用いた同時計数処理 が成功しているといえる。



図 5.6: 同時計数処理を行った結果図

# 5.5 考察

以上の結果から、511keV のイベントを残しつつ 1274keV のイベントを削減できていることがわかった が、<sup>22</sup>Na1274keV 線はある一方向への放射であることから 2 つの検出器で同時に検出されることはないはず なので、1274keV 線の同時計数イベントは0 になることが期待される。511keV と 1274keV の放射が偶然同 じタイミングで検出されたことによる結果だと思われる。二つの放射原理は異なる物理現象であるが、その タイミングあるいは方向が必ず一致しないわけではなく、ある確率で設定した時間差 (coincidence window) 以内に検出器で検出される。その結果このように少数ではあるが同時計数されたイベントとして 1274keV が残ったのだと考えられる。

このような事象は同時計数とみなす連続したイベントの時間幅 (coincidence window) を小さく設定する ことで避けやすくなるが、coincidence window を小さくしすぎると time walk 効果によって生じる対消滅 線の検出時間差より短くなってしまうことがあり、その結果同時計数したいイベントも検出できないことに つながるため、適切な時間幅の設定が必要となる。

# 第6章 まとめと今後の課題

本研究では、高速 ADC と FPGA を組み合わせた小型多チャンネルボードを利用した複数機器の同時読 み出しシステムを構築することを目指し実験を行った。立ち上げ実験として、第4章では<sup>241</sup>Am と<sup>109</sup>Cd のガンマ線スペクトル取得から従来の汎用データ取得系とエネルギー分解能に大きな差がないことを確認 できた。またパルス発生装置を用いて ADC のエネルギー応答の線形性を確かめる実験では、ADC の出力 上限値まで各データ点で残差が~0.3 %以内に収まっており、使用した ADC ボードを用いて問題なく放射 線計測が行えることを確認できた。第5章では別々の検出器から得られたデータを区別しスペクトルを描 けることから2 チャンネルによる同時読み出しができていることを確認した後、<sup>22</sup>Na の 511keV 線が正反 対方向に放射されるという性質を利用し、連続したイベント同士がある時刻差以内であることを条件に同 時計数を行い、511keV 線のイベントを残しつつ、同様に<sup>22</sup>Na から放出される 1274keV 線のイベントを削 減することに成功した。これは 1274keV 線の放射が 511keV 線のような back-to-back 事象ではないことか らも期待されたことであったが、理論的には 0 となるはずの 1274keV 線の同時計数イベント数がある程度 存在するという課題も残した。今後は、このような結果の妥当性の検証を行い、この ADC ボードを他の複 数チャンネル読み出し実験へ応用していくことを検討していく予定である。

# 謝辞

本研究を行うにあたり、充実した研究環境を提供していただいた深澤泰司教授をはじめとするスタッフ の皆様に感謝し申し上げます。また、本論文主査でもある大野雅功助教におかれましては既有知識も乏しく 何かとやらなければいけないことの多い私に対してもいつも丁寧に対応していただき、理解の助けとなり ました。この研究を卒業論文として形にすることが出来たのは、ひとえに大野助教の熱心なご指導のおか げです。また研究室同期メンバー・先輩の皆様、物理事務の皆様などにも温かく接していただき本当にお世 話になりました。係わったすべての方々に深く感謝いたします。ありがとうございました。

# 参考文献

- [1] http://chandra.harvard.edu/photo/2009/crab/, X-ray: NASA/CXC/SAO/F.Seward; Optical: NASA/ESA/ASU/J.Hester & A.Loll; Infrared: NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn./R.Gehrz
- [2] AAS Nova Collapsing Enormous Stars https://aasnova.org/2015/09/23/collapsing-enormous-stars/
- [3] 天文学事典

http://astro-dic.jp/atmospheric-window/

- [4] 甲南大学 半導体/電子デバイス物理http://kccn.konan-u.ac.jp/physics/semiconductor/top\_frame.html
- [5] 浜松ホトニクス ホームページ

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/ 02\_handbook.pdf

- [6] http://sp.chip1stop.com/knowledge/39-page
- [7] Glenn F.Knoll 共訳:神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次 オーム社 放射線計測ハンドブック 第4版
- [8] 青野博之 東京大学大学院 2009 年 修士論文
   「Si/CdTe コンプトンカメラによるガンマ線イメージング実験」
- [9] 広島大学 ホームページhttps://www.hiroshima-u.ac.jp/news/41138
- [10] 枝廣育美 広島大学大学院 2015 年 修士論文「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器コンプトンカ メラを用いた偏光ビーム試験」
- [11] http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/ enoto/misc/thundercloudproject/ 20160523\_jpgu16\_thundercloud\_enoto09\_public.pdf
- [12] http://ytkyk.info/blog/2016/09/04/growth-fpga-adc-board/