多層シリコンストリップとBGO・フォトダイオードを用いた宇宙軟ガンマ線コンプトンカメラの開発

中本 達也
広島大学 大学院 理学研究科 物理科学科専攻
M1479020
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

平成 16 年 3 月 28 日

概 要

銀河団、ブラックホール、超新星残骸などの高エネルギー天体からは、相対論的エネルギーまで加速された粒子が非熱的な制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などを起こし硬 X 線・ガンマ線の広い波長域に信号を出していると考えられる。しかし、硬 X 線・軟ガンマ線の波長域では光電吸収の確率が低く、コンプトン散乱による検出が支配的である。そのため、入射光子の到来方向やエネルギーを精度良く決定できない。また、この波長域では目標の天体からのフラックスが小さく、バックグランドが大きいので感度のよい測定が難しく、詳しい解析がなされていない。

我々のグループではこの波長域の高感度測定を行うため、多層半導体コンプトンカメラと高阻止能結晶シンチレータ BGO を用いた軟ガンマ線検出器の開発を行っている。コンプトンカメラとは釜江ら (T.Kamae et al,1987) によって提案され、この波長域でよく起こるコンプトン散乱を積極的に利用し、数回反応した位置とエネルギーを取得することによりコンプトン運動学から、入射方向を天体上に一つのコーンとして描くことができる。それを複数イベント重ね合わせることによって、発生源を決定できる。この際に、角度分解能を決めるのは検出器のエネルギー分解能である。高い角分解能を実現するためには、Doppler Broadening に対してエネルギー分解能による影響を最小限に抑える必要がある。また、Anti 検出器として用いられる BGO は阻止能が高く大型の構造物でなくても軟ガンマ線を効率良く検出できるが、蛍光量が少ないという欠点があった。

我々は、素粒子実験において使用されているシリコンストリップ検出器をさらに小型化し容量を下げた両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) を開発した。シリコンは散乱効率が良く Doppler Broadening 影響が小さいという特性もある。本研究ではこの DSSD を 2 枚並べ、コンプトンカメラを構成し測定した。^{57}Co の 122keV のラインで ~ 1.3keV という素晴らしいエネルギー分解能を達成し、Compton Reconstraction を行った結果 ~ 10 ° という角分解能を達成した。また、BGO をアバランシェフォトダイオードで読みだすことにより、^{137}Cs の 662keV のラインで ~ 6 % といういままでにないエネルギー分解能を達成し、これらが多層コンプトンカメラのパーツになりうる可能性を実証した。

目 次

第 1 章　序論 **6**

第 2 章　半導体検出器を用いた硬 X 線、軟ガンマ線検出 **8**

2.1　半導体検出器 8

2.1.1　シリコンストリップを用いた硬 X 線検出 8

2.1.2　CdTe 検出器 8

2.2　結晶シンチレータと半導体検出器を用いた軟ガンマ線検出 9

2.2.1　結晶シンチレータ・BGO 9

2.2.2　フォトダイオード 10

2.2.3　アバランシェフォトダイオード 10

2.3　半導体検出器のノイズ 11

2.4　結晶シンチレータと半導体検出器のエネルギー分解能 13

2.5　コンプトンカメラ 14

2.5.1　コンプトンカメラの検出原理 14

2.5.2　Doppler Broadening 14

2.6　NeXT 計画と軟ガンマ線検出器 14

第 3 章　BGO とフォトダイオードを用いたアクティブシールドの改良 **17**

3.1　BGO とフォトダイオードの組み合わせの可能性 17

3.2　実験方法・セットアップ 17

3.3　フォトダイオード・アバランシェフォトダイオードの基礎特性 20

3.3.1　暗電流の測定 20

3.3.2　端子間容量の測定 20

3.4　低雑音 CSA(CP5102) とフォトダイオードの組み合わせ 21

3.5　APD と BGO を用いた測定 22

3.5.1　軟ガンマ線領域でのエネルギー分解能 22

3.5.2　APD+BGO の threshold 25

3.5.3　APD+BGO のゲイン、エネルギー分解能の安定性 25

3.6　板 BGO での測定 28

3.7　まとめ 28

第 4 章　DSSD の多層化へ向けたセットアップの構築 **31**

4.1　多チャンネル読み出しシステム 31

4.1.1　アナログ LSI VA32TA 31

4.1.2　VADAQ 32

4.1.3　Front-end Card・Adapter Card 33

4.1.4　読み出しの流れ 33

4.2 多チャンネル読み出しのセットアップ . . . 33
4.3 DSSD・RCchip の基礎特性 . . . 36
4.3.1 DSSD・RCchip の暗電流の測定 . . . 36
4.3.2 DSSD・RCchip の Capacitance の測定 . . . 36
4.4 VA32TA の設定値 . . . 37
4.5 X 線検出 . . . 38
4.5.1 解析方法 . . . 40
4.5.2 ゲインの安定性 . . . 41
4.5.3 Energy calibration . . . 41
4.5.4 RCchip による電荷損失 . . . 44
4.5.5 エネルギー分解能 . . . 44

第 5 章 2 層 DSSD で構成したコンプトンカメラ 48
5.1 セットアップの構築 . . . 48
5.1.1 コンプトン再構成に適した線源の決定 . . . 48
5.1.2 コリメータのセットアップ . . . 48
5.2 解析方法 . . . 49
5.3 実験結果 . . . 51
5.3.1 エネルギー分解能 . . . 51
5.3.2 2 層 DSSD で構成したコンプトンカメラの角分解能 . . . 51
5.3.3 コンプトンイベントの解析 . . . 52
5.3.4 コンプトン再構成 . . . 54
5.4 Geant4 との比較 . . . 54
5.4.1 Geant4 . . . 54
5.4.2 ジオメトリの構築 . . . 55
5.4.3 解析方法 . . . 55
5.4.4 シミュレーション結果 . . . 56

第 6 章 まとめ 58

表 目 次

2.1 放射線検出のためのシンチレータ特性比較 10

4.1 用いた RCchip の組合せ 35
4.2 出力波形の減衰時定数に関わるパラメータとその設定値 39
4.3 その他の測定パラメータ 39
4.4 光電 peak と 2 回の測定の差の絶対値の平均 41
4.5 一次・exp 関数値と実測値の差の絶対値の平均 42
4.6 p^+ ストリップと n^+ ストリップの ^{57}Co:122keV の ADCChannel の比と、電荷収集効率 ε 44
4.7 各チャンネル毎のエネルギー分解能 (FWHM) を各 VA32TA 毎に上下 2 つのデータを除き平均した実験値と理論値。理論値は () 内に示している。単位は keV。 . . . 45

5.1 コリメータ実験の各 VA32TA 毎に全てのチャンネルのデータを足し合わせたスペクトルでのエネルギー分解能 (FWHM)。 52
5.2 2 つの Gaussian のフィッティングパラメータ。 52
5.3 Geant4 シミュレーションでの角分解能 56

図 目 次

1.1 Si, CdTe, BGO での吸収係数 [2]。 7

2.1 左 (A)pn 接合、中央 (B) 順方向に電圧を印加、右 (C) 逆方向に電圧を印加 10
2.2 フォトダイオードの放射線検出原理 11
2.3 半導体検出器系の雑音に対する等価回路 11
2.4 多重コンプトンガンマ線カメラの検出原理はコンプトン散乱の運動学 15
2.5 軌道上の NeXT 予想図 (左)、軟ガンマ線検出器 (SGD) の予想図 (右) 16

3.1 卒論時、$5\times5\times5\mathrm{mm}^3$ の立方体の BGO と GSO を恒温槽で-30 ℃に冷却し、PD と PMT で読み出した実測値の比較 18
3.2 今回の測定に用いた結晶シンチレータ、ライトガイドと PD・APD 18
3.3 PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の量子効率 19
3.4 PD で測定したときのブロック図 (上) と APD で測定したときのブロック図 (下) . 20
3.5 PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の暗電流 21
3.6 PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の端子間容量 21
3.7 CP5102 と CP580H の容量勾配 22
3.8 BGO+PD(赤線) と BGO+PMT(青線) で読み出した ^{137}Cs のスペクトル。 23
3.9 CP5102 と CP580H を用いて PD+BGO を測定した結果。BGO+PMT の結果も併せて載せている。実線は式 2.10 から求めたエネルギー分解能の推定値。点線は電気回路系ノイズ $\delta E_{noise} = 6.5(E/662keV)^{-1}$。 23
3.10 ^{137}Cs のスペクトル。CsI(上)、BGO(下) からの蛍光を APD で読み出した。 . . . 24
3.11 APD と結晶シンチレータを組み合わせた各ガンマ線源のエネルギーにおけるエネルギー分解能 (FWHM)。§3.5.2 の threshold の測定の結果も反映している。実線は式 2.10 から求めたエネルギー分解能の推定値。点線は統計的な劣化 $\delta E_{stat} = 5.5(E/662keV)^{-0.5}$。 25
3.12 BGO からの蛍光を APD で読み出した、^{109}Cd(上) と ^{57}Co(下) のスペクトル。 . . 26
3.13 -20 ℃, -290V 一定で 1 時間間隔で 7 日間測定した ^{88}Y 898keV の peak channel の位置 (左) とエネルギー分解能 (右)。平均値はそれぞれ、623.1ch と 5.28% 27
3.14 HV -290V, 137Cs の-35 ℃ (上)、-30 ℃ (中央)、-25 ℃ (下) のスペクトル 27
3.15 -35 ℃から-25 ℃まで温度を変化させて測定した、peak channel の位置 (左) とエネルギー分解能 (右)。 27
3.16 -35 ℃, 137Cs 662keV の-290V のゲインを 1 とした場合の他の HV で測定したピーク位置との比 (左) とエネルギー分解能 (右) 28
3.17 板 BGO で測定した ^{137}Cs のスペクトル。青：APD、赤：PMT 29
3.18 板 BGO で測定したエネルギー分解能 29
3.19 板 BGO で測定した ^{133}Ba のスペクトル 30

4.1 多チャンネル読み出しシステムの全体図 32
4.2 読み出しの流れ。VA32TA のブロックダイアグラム (上)、タイミングチャート (左下)、AC での信号の誘導 (右下) 34
4.3 DSSD P400 × 64 の構造。p^+ と n^+ のストリップが互いに直交するように配置されている。 35
4.4 DSSD 読みだしセットアップ。DSSD n^+側(左)、p^+側 右 36
4.5 図 4.4 の模式図、DSSD 読みだしセットアップ 37
4.6 DSSD P400 の暗電流 (左)、Body Capacitance(中央)、Interstrip Capacitance(左) のセットアップ 38
4.7 DSSD ストリップ#10、#30、#50(左) と RCchip 全ストリップ (右) の暗電流 . . . 38
4.8 DSSD・RCchip の Body Capacitance(左) と Interstrip Capacitance(右) 40
4.9 各 VA32TA の全チャンネルを足し合わせた ^{241}Am のスペクトル。縦軸:カウント数、横軸:ADCChannel。右から 59.5keV、26.3keV、20.9keV、17.5keV、13.9keV のピーク 42
4.10 2 回の測定の p^+ 側の各 ^{241}Am のピーク位置の差 42
4.11 ^{57}Co と ^{241}Am の光電ピークへフィッティング。左：一次関数、右：exp 関数 . . . 43
4.12 各光電ピークの理論値 [keV] との差 (絶対値)。左：一次関数。右：exp 関数 43
4.13 p^+ 側 chip1(黒線) と、n^+chip3 P200-1200 Ltype + P400-770 Ltype(赤線)、n^+ 側 chip7 P200-770 Ltype + P200-770 Ltype(青線) の ^{57}Co のスペクトル 44
4.14 ^{57}Co の全 256 チャンネル (上) と各 chip 毎の全チャンネルを足し合わせ (下) のスペクトル。 46
4.15 ^{57}Co 122keV のガウシアンフィッティング。 47
4.16 各チャンネルのノイズと ^{57}Co 14.4keV, 122keV エネルギー分解能。 47

5.1 エネルギーに対するシリコン 300μm 厚の各反応確率 (左) と、各線源のラインエネルギーのコンプトン散乱角に対する反跳電子のエネルギー (右) 49
5.2 コリメート実験のセットアップ 49
5.3 コンプトン運動学から θ_{comp}、ジオメトリから θ_{geo} を導く 50
5.4 各 VA32TA ごとに、全チャンネルのデータを足し合わせた、Pb コリメーターを用いた測定での ^{57}Co のスペクトル 51
5.5 p^+ 側 (左) と n^+ 側 (右) の e1(縦軸) と e2(横軸) の 2 次元図。 53
5.6 §5.2 の解析から求まった、θ_{comp}(左図赤線)、θ_{geom}(左図青線)、$d\theta$(右図黒線)。右図のピンク色の点線はフィッティングに用いたそれぞれの Gaussian、赤線がその重ね合わせになる。 53
5.7 コンプトン散乱→光電吸収のイベントのエネルギーを足し合わせたピーク (左) とその飛跡 (右)。右図において、赤線はDSSD-2(上) → DSSD-1(下)、青色はDSSD-1(下) → DSSD-2(上)、緑線は同一 DSSD 内のイベントを表している。 54
5.8 コンプトン再構成した結果 55
5.9 Geant4 で構成したジオメトリ 56
5.10 gun position を点源 (青線) と 2ϕ(赤線) でシミュレートした時の角分解能の劣化 . . 57

第1章　序論

銀河団、ブラックホール、超新星残骸などの高エネルギー天体からは、相対論的エネルギーまで加速された粒子が非熱的な制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などを起こし硬X線・ガンマ線の広い波長域に信号を出していると考えられる。しかし、硬X線・軟ガンマ線の波長域では図1.1にあるように光電吸収の確率が低く、コンプトン散乱による検出が支配的であるため、入射光子の到来方向を精度良く決定できない。また、この波長域では目標の天体からのフラックスが小さく、バックグランドが大きいためS/N比が悪く感度のよい測定がされてこなかった。そのため、このような粒子の加速機構やその場所は特定されておらず、現代宇宙天文学の謎のひとつとなっている。非熱的放射がどの場所で起こっているか、また放射のエネルギーの総量や上限調べることがこの謎を解く鍵のひとつだと考えられる。

アインシュタイン衛星から続く、あすか、Chandra、NewtonといったX線天文衛星は、主に10keV以下の軟X線を集光結像するX線望遠鏡によって観測がなされてきた。しかし、この10keV以下のエネルギー領域では熱的放射が支配的なため非熱的放射は姿を見せない。そこで、現在宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部(Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science: JAXA/ISAS)を中心に、次期X線天文衛星NeXT(New X-ray Telescope)計画を進めている。NeXTの特徴は非熱的放射を観測するため、これまで困難だった~1MeVまでの幅広い帯域を高感度観測を行なう。それにより、世界に先駆けた非熱的な宇宙の解明を行ない、「非熱的な宇宙像」の確立を目指している。我々のグループではNeXT計画の一環としてこの硬X線・軟ガンマ線の観測を目的とした軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector: SGD)の開発を行っている。SGD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シリコンストリップ検出器(Silicon Strip Detector: SSD)とテルル化カドミウム(CdTe)ピクセル検出器から構成される多層半導体コンプトンカメラを置いた構造になっている。コンプトンカメラとは釜江ら[1]によって提案され、この波長域でよく起こるコンプトン散乱を積極的に利用し、数回反応した位置とエネルギーを取得することによりコンプトン運動学から、入射方向を天体上に一つのコーンとして描くことができる。それを複数イベント重ね合わせることによって、発生源の方向を決定できる。SGDは2005年2月打ち上げ予定の日本の5番目のX線天文衛星Astro-E2に搭載される硬X線検出器(HardX-ray Detector: HXD)に比べ、軟ガンマ線まで感度を持たせる。アクティブコリメータによって視野を絞りコンプトンカメラと組み合わせることにより、天体以外からのバックグランドの混入を極限まで引き下げ、軽量ながら高い感度を持たせることができる。このSGDでは広い波長域で観測する事により、天体のエネルギー分布を調べ、逆コンプトン散乱やシンクロトロン放射などの加速のエネルギーの上限がわかるのではないかと期待される。さらにこの波長域で偏光測定も可能となる。

コンプトンカメラとしては、1991年に米国から打ち上げられたガンマ線観測衛星コンプトン(CGRO)に搭載された検出器の1つであるCOMPTEL(The Imaging Compton Telescope)がある。COMPTELは上方に液体シンチレータ、下方にNaIシンチレータを置いた2重コンプトン散乱ガンマ線カメラである。エネルギー分解能、位置分解能が悪いため角度分解能がよくなく、液体シンチレータで散乱した光子を吸収するためのNaIシンチレータへの立体角が小さく検出効率が低かった。高い感度や角分解能をもつコンプトンカメラを構成するためには、エネルギー分解

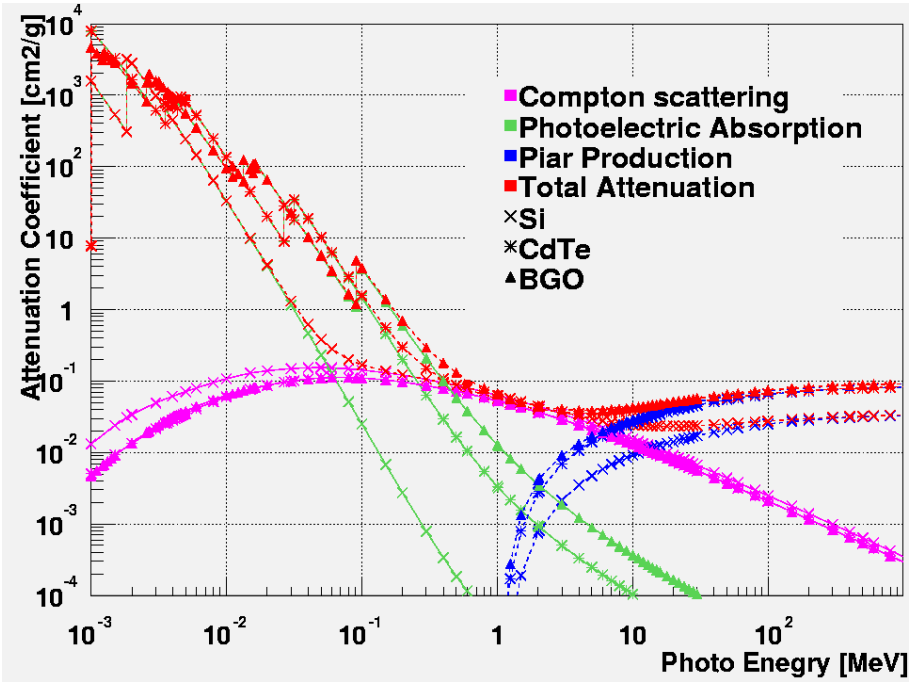


図 1.1: Si, CdTe, BGO での吸収係数 [2]。

能、位置分解能が良いと共に、硬 X 線・軟ガンマ線の波長域の光子と相互作用することが要請される。特に、エネルギー分解能はコンプトンカメラの角度分解能を決めるので重要である。そこで我々は素粒子実験において使用されているシリコンストリップ検出器をさらに 小型化し容量を抑えた両面シリコンストリップ検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector: DSSD) を開発した。シリコンは硬 X 線・軟ガンマ線の波長域でコンプトン散乱する効率が良い。さらに、最終的に角分解能を制限する Doppler Broadening の影響が他の半導体物質に比べて小さいという特性もある。優れた角分解能を持つコンプトンカメラを構成するため、Doppler Broadening に対して DSSD のエネルギー分解能による影響を最小限に抑える必要がある。また、Anti 検出器として用いられる BGO は阻止能が高く大型の構造物でなくても軟ガンマ線を効率良く検出できるが、蛍光量が少ないという欠点があった。従来の光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) の読み出しでは量子効率が ~ 20%とエネルギー分解能の向上に限界がある。そのため、エネルギー分解能があまり良くなく、threshold の向上が望まれる。

よって本研究では、DSSD を用いた優れたエネルギー分解能を有する、多チャンネル読み出しの構築を行なう。さらに、DSSD を多層化させてコンプトンカメラを形成し、その角分解能を評価する。BGO の読み出しには、新たにアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode: APD) を用いて読み出し、エネルギー分解能と threshold の向上を試みる。本論文 2 章では、半導体検出器の放射線検出についての基礎的な事柄について述べる。3 章では高阻止能結晶シンチレータ BGO とフォトダイオード・アバランシェフォトダイオードの組み合わせた軟ガンマ線検出について述べる。4 章では DSSD を用いた優れたエネルギー分解能を有する、多チャンネル読み出しの構築について述べる。5 章では DSSD を多層化させてコンプトンカメラを形成し、その角分解能を評価について述べる。最後に 6 章で全体のまとめを述べる。

第2章　半導体検出器を用いた硬X線、軟ガンマ線検出

2.1　半導体検出器

硬 X 線・軟ガンマ線を検出測定する場合、ガスなどに比べて密度の大きい固体を使用するのが有効である。固体は気体よりも阻止能が大きいため小さな体積で放射線を止めることができるのが利点である。固体の検出媒体としてはシンチレーション検出器と半導体検出器があげられる。

半導体検出器は放射線検出器として多数のキャリアを得られるという利点がある。シンチレーション検出器はひとつのキャリアをつくるのに ~ 100eV というエネルギーが必要になるため、硬 X 線・軟ガンマ線の波長域ではキャリアの数は数千個にしかならない。そのため、ポアソン揺らぎによるエネルギー分解能の劣化が顕著である。半導体検出器を用いた場合、Si だと 3.65eV あたりにつきひとつのキャリアを生成するため、よいエネルギー分解能が得られる。

2.1.1　シリコンストリップを用いた硬 X 線検出

現在の素粒子物理実験において、重要なテーマとなっている短寿命粒子の検出のため、シリコンストリップ検出器 (Silicon Strip Detector: SSD) が開発されてきた。この SSD の大きな特徴は高速応答性と高位置分解能である。典型的な 300μm 厚での deadtime は ~ 30ns であり、プラスチックシンチレータと同等の速い応答をする。また、SSD は固体結晶であるためガスなどと比べて密度が高く、電子の拡散係数が格段に小さいため、センサーエレメントの大きさで放射線位置測定分解能が決まる。現代においてはマイクロエレクトロニクスの製造技術の発展により、数 10μm のストリップピッチを並べた検出器を信頼度高く作ることが可能である。

放射線の検出原理としては、逆バイアスの状態にすることによって、両電極間の空乏層を広げる。空乏層に放射線が入射し、電離作用により電子・ホール対が発生する。それらは、逆バイスの電場によって収集される。 シリコンは 1.12eV のバンドギャップエネルギーを持っているが、実際にはシリコン中を荷電粒子が通過する時に電子ホール対を生成する以外にも消費されるので、平均エネルギー損失は 3.65eV に一対の割合で電子・ホール対が出来る。

シリコンストリップ検出器には、p 型ストリップのみの片面シリコン検出器と、互いに直交する p 型と n 型ストリップを構成する両面シリコンストリップ検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector: DSSD) がある。多層半導体コンプトンカメラを考えた場合、硬 X 線・軟ガンマ線の散乱位置を詳しく知る必要から DSSD が望まれる。

2.1.2　CdTe 検出器

ガンマ線検出器として最近開発されている半導体に、テルル化カドミウム (CdTe)・テルル化亜鉛カドニウム (CdZnTe) がある。これらの半導体は Si(Z=14) や Ge(Z=32) に対して Cd(Z=48) や Te(Z=52) と大きい原子番号を持っているため、高い阻止能を持つことが特徴である。また、CdTe

はバンドギャップエネルギーが E_g=1.5eV と大きく室温で十分動作させることができる。

CdTe は素子内での電子・ホールの移動度が小さく、電荷収集効率が低いためエネルギー分解能のよい検出器が作られてこなかった。最近、JAXA/ISAS によって 10keV のエネルギーのガンマ線に対して、FWHM ~ 1keV のエネルギー分解能をもち、数 100μm の撮像素子を持つ CdTe ピクセル検出器が開発されている。これは多層半導体コンプトンカメラへの応用も考えられている。[3][4][5]

2.2 結晶シンチレータと半導体検出器を用いた軟ガンマ線検出

結晶シンチレータとは放射線を吸収した時に、そのエネルギーにほぼ比例した数のシンチレーション光が発生することを利用したエネルギー計測装置である。放射線が蛍光体に当たると、多数の励起分子を生じ、励起分子が基底状態に戻る際に光を放出する。この光のことをシンチレーション光という。このシンチレーション光を PMT や PD を用いて電気信号に変換する。

硬 X 線、軟ガンマ線領域において結晶シンチレータからのシンチレーション光を検出する検出器として昔から PMT が使われてきた。PMT は内部増幅するので BGO の弱い蛍光でも S/N 比がよいが、周囲の磁場に影響を受けやすい、構造が複雑で大きい、量子効率が 10 % ~ 20 %と低い、~ 1000V の高圧がいるなどの欠点がある。特に、結晶シンチレータは 1 個のシンチレーション光子を生成するエネルギーが大きく、さらに PMT の量子効率が ~ 20 %と低いため、キャリアの数が少なく統計揺らぎによるエネルギー分解能の劣化が顕著である。

PD は PMT よりも各結晶シンチレータの発光領域に合わせたものを使用した場合、量子効率が ~ 100 %に近いので、情報キャリアであるシンチレーション光子を無駄なく電子ホール対に変換でき原理的にエネルギー分解能が上回る。強磁場の影響も受けにくく、構造がシンプルで小さいため、阻止能の高い結晶シンチレータと組み合わせると、軟ガンマ線領域においても小型の検出器を構成することができる。

2.2.1 結晶シンチレータ・BGO

結晶シンチレーターの最大の特徴は、検出媒体が固体であり阻止能が大きいという点である。固体の密度は気体の密度と比べると約 1000 倍大きいので、ガスを使った比例計数管などに比べ小さな体積で放射線を止めることが利点である。結晶シンチレータにガンマ線が入射した場合、光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成などの相互作用を起こし、自由電子を放出する。この電子がシンチレータ内の束縛電子を励起することによってシンチレーション光を発生する。理想的なシンチレーション材料が持つべき性質として、放射エネルギーの蛍光への変換効率が高い、その蛍光に対する透明度が高い、蛍光の減衰時間が短いといった点が挙げられる。また、蛍光の波長分布が PD の分光度特性に適合している事も重要な点である。この全てを兼ね備えた結晶シンチレータは存在しないので、測定にあった結晶シンチレータを選ぶことが求められる。

代表的な結晶シンチレータには、NaI、CsI、GSO、BGO が挙げられる。このうち、BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$)は比較的最近使用され始めた結晶シンチレータで、古くから使われてきた NaI, CsI 比べて蛍光出力は小さいが阻止能が大きいのが特徴と言える。また、阻止能が大きいのでそれだけ結晶を小さくでき、潮解性がないのでコンパクトな検出器を作れる。そのため、MeV 領域の放射線を検出したい場合には BGO が大変有利であるといえる。BGO の蛍光は活性化物質の代わりに結晶の主成分である Bi^{3+} イオンの光学的遷移を伴っている。Bi^{3+} の光吸収スペクトルと放出スペクトル間にはストークスシフト (Stokes shift) と呼ばれる相当大きなシフトがあるのでシンチレーション光の自己吸収は少ししか起こらず、大きな寸法の結晶でもその発光に対して透明度を保っている。BGO

表 2.1: 放射線検出のためのシンチレータ特性比較

特　性	NaI:Tl	CsI:Tl	BGO	GSO
実効原子番号	50	54	74	59
密度 (g/cm^3)	3.67	4.51	7.13	6.71
最大発光波長 (nm)	410	565	480	430
蛍光出力 (相対値)	100	45	12	20
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 (511keV : cm^{-1})	0.34	0.41	0.955	0.674

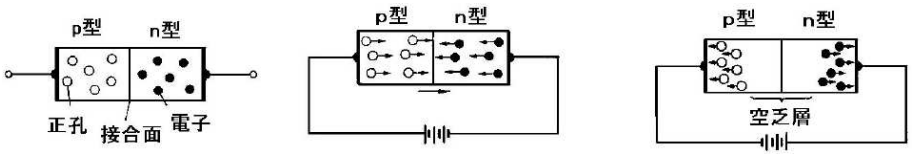


図 2.1: 左 (A)pn 接合、中央 (B) 順方向に電圧を印加、右 (C) 逆方向に電圧を印加

は温度を下げると蛍光出力が増加するという特性をもっているので、温度を下げるとノイズの減る PD と組み合わせるのに有利である。各結晶シンチレータの特性を表 2.1 に示す、阻止能は BGO が一番大きい。

2.2.2　フォトダイオード

p 型半導体と n 型半導体を接合させると (図 2.1(A))、pn 方向と np 方向とで異なる電気抵抗が見られる。図 2.1(B) のように p 型に正、n 型に負の電圧をかけると、正孔と電子はお互いの方向へ移動する。正孔と電子は両電極から次々に供給されるので、電流は継続して流れる。これとは逆に、図 2.1(C) のように p 型に負、n 型に正の電圧をかけると、正孔と電子は離れる方向へ引き付けられるため、pn 接合面にはキャリアの存在しない領域が広がる。これを空乏層と呼ぶ。空乏層は高抵抗の絶縁層なので、電流はほとんど流れない。

フォトダイオードは図 2.1(C) のように、pn 接合の両端に逆方向の電圧 (逆バイアス電圧) をかけると、空乏層が生じるので電流は流れない。ところが図 2.2.2 のように、空乏層に可視光あるいは放射線が入射すると、相互作用により価電子帯の電子が伝導帯に励起され、価電子帯には正孔をつくる。この電子正孔対を逆バイアス電圧による電界により電極に集め信号となる。フォトダイオードでは電流パルスの大きさ、言い換えると空乏層の中で生じたキャリア対の数が、失われた放射線のエネルギーに比例するので、出力パルスの電荷量から入射放射線のエネルギー E がわかる。シリコンの場合、空乏層中で生じるキャリア対の数は $n_e = \frac{E(eV)}{3.65eV}$ となる。

2.2.3　アバランシェフォトダイオード

PD は検出した信号を増幅しないので BGO, GSO の弱い蛍光では信号が小さく、読み出しの電気回路系雑音によってそのエネルギー分解能が制限されてしまう。アバランシェフォトダイオード (APD) は PD と同様に磁場への耐性、構造がシンプルで小さい、量子効率が ~ 100 %に近いと

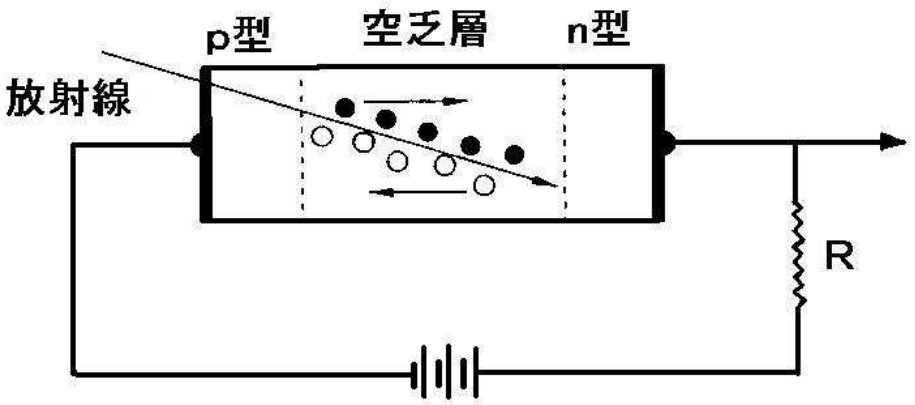


図 2.2: フォトダイオードの放射線検出原理

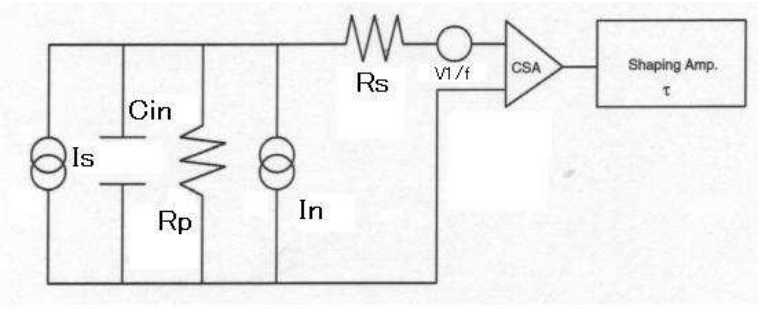


図 2.3: 半導体検出器系の雑音に対する等価回路

いう特徴を持つ。その上、さらにシリコンのアバランシェ現象を利用して電子, ホールを内部増幅するので S/N 比をよくすることができる。APD は PMT と PD の両方の利点を持っていると言え、エネルギー分解能や threshold の性能を向上できるのではないかと期待される。しかし、今までの APD は小面積でブレイクダウンがおこったり、増幅率が安定せず良い結果が得られなかったが、最近性能のよい APD が市販されるようになっており、東工大の五十川ら [6] や M.Moszyński ら [7][8] によって報告されている。

2.3 半導体検出器のノイズ

半導体検出器の情報キャリアは電子・ホールである。それは、電流信号として信号処理回路に入力される。今回の測定では、その信号処理回路は 電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier:CSA)、波形整形アンプ (shaping amp) を通ったあと、アナログデジタル変換器 (Analogue Digital Convertor:ADC) に入力される。今回の測定では半導体検出器、CSA および整形アンプの雑音に対する等価回路が図 2.3 になるので、この時の雑音を考察する。

I_s ; X線による信号電流

C_{in} ; 等価入力容量 (PIN 検出器の接合容量、ケーブル、初段 FET の入力容量)

R_p ; 等価並列抵抗 (帰還抵抗、高圧負荷抵抗)

I_i；回路全体のリーク電流（PIN 検出器、CSA の初段 FET のリーク電流）

R_s；等価直列抵抗（$\equiv A/g_m$、A；0.5 ~ 0.7 程度の定数、g_m；初段 FET の相互コンダクタンス）

$V_{1/f}$；雑音による電圧源

$C_{1/f}$；1/f 雑音の大きさを表す比例係数

半導体検出器のエネルギー分解能は、発生する電子正孔対の統計ゆらぎによってではなく、初段電気回路系の雑音によって支配される。ここで、初段電気回路系とは半導体検出器からＣＳＡまでを指す。一般に雑音は抵抗でキャリアの熱運動によって発生するジョンソンノイズ、暗電流の変動によって発生するショットノイズ、およびパワースペクトルが 1/f に比例する特徴を持つ 1/f 雑音の和になる。

全電圧のパワースペクトル $\overline{V_{noise}^2}/df$ は

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_BTR_s + \frac{C_{1/f}}{f} \qquad [\mathrm{V^2/Hz}] \tag{2.1}$$

となる。この式において、第 1 項と第 3 項がそれぞれ R_p, R_s によるジョンソンノイズ、第 2 項が I_n によるショットノイズ、第 4 項が 1/f 雑音の和になる。エネルギーは電荷量で計るので、等価雑音電荷 $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$（Equivalent Noise Charge:ENC）で表せば

$$\frac{\overline{\Delta E_{rms}^2}}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_BTR_sC_{in}^2 + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f} \qquad [\mathrm{C^2/Hz}] \tag{2.2}$$

となる。この式を見ればわかるように、初段回路の雑音強度は周波数特性を持つのでフィルターをかけて波形整形を行なうことによって S/N を最適化することができる。例えばガウシアン整形を行なった場合

$$\overline{\Delta E_{rms}^2} = \left(\frac{4k_BT}{R_p} + 2qI_n\right) \cdot A_1\tau s + 4k_BTR_sC_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau s} + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f} \cdot A_3 \qquad [\mathrm{C^2}] \tag{2.3}$$

となる。ここで、$A_1A_2A_3$ は波形整形回路のフィルター特性で決まる係数であり、理想的なガウス整形 (CR-RC^n, n$\rightarrow\infty$) に対しては、(A_1, A_2, A_3)=(0.6267, 0.6267, 0.5) である。τ_s は波形整形アンプの時定数である。第 1 項と第 2 項がそれぞれ、τ_s,$1/\tau_s$ という特性を持つため ΔE_{rms}^2 を最小にする τ_s が存在するはずである。その最適値を τ_{opt} とすると

$$\tau_{opt} = \sqrt{\frac{4k_BTR_sC_{in}^2A_2}{\left(4k_BTR_p^{-1} + 2qI_n\right) \cdot A_1}} \tag{2.4}$$

となる。(2.4) 式の雑音の単位を等価雑音電荷ではなく半導体検出器のエネルギー分解能に換算した場合、$T = 270K$ において

$$\text{第 1 項} \simeq (3.0 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.65 \cdot I_n) \cdot \tau_s \qquad [\mathrm{keV^2}] \tag{2.5}$$

$$\text{第 2 項} \simeq (2.1 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g_m})/\tau_s \qquad [\mathrm{keV^2}] \tag{2.6}$$

となる。ここで雑音の原因のわかりにくい第 3 項を用いずに近似した。今回測定に用いた CSA の R_p は $\sim$1.2GΩ なので第 1 項はほぼ I_n が支配する。第 1 項を電流性雑音、第 2 項を容量性雑音と呼ぶ。それぞれのパラメータの単位は、R_p(GΩ), I_n(nA), τ_s(μsec), C_{in}(pF), g_m(mS) である。

多チャンネル読み出しに用いる Viiking シリーズの VA32TA ではこれらの雑音は経験的に判明しており、ジョンソンノイズ

$$ENC_{bias} = 770\sqrt{\frac{\tau \ \ (\mu\mathrm{sec})}{R_{bias} \ \ (\mathrm{M}\Omega)}} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.7}$$

ショットノイズは

$$ENC_{lc} = 110\sqrt{I_{lc}\tau \ \ (\mathrm{nA}\cdot\mu\mathrm{sec})} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.8}$$

となる。VA32TA のアンプノイズは

$$ENC_{amp} \ \ (\mathrm{e}^-) = (45 + 19 \times C(\mathrm{pF}))/\sqrt{\tau} \ \ (\mu\mathrm{sec}) \tag{2.9}$$

となる。

2.4 結晶シンチレータと半導体検出器のエネルギー分解能

結晶シンチレータと半導体検出器や PMT の組み合わせのエネルギー分解能 $\frac{\Delta E}{E}$ は以下のように表せる。

$$(\frac{\Delta E}{E})^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2\frac{F}{N} + (\frac{\delta_{noise}}{N})^2 \tag{2.10}$$

第 1 項目において、δ_{sc} は結晶シンチレータの結晶自体の特性によるものである。結晶位置によるシンチレーション効率や結晶表面での反射条件の不均一性、シンチレーション応答の非直線性などによりエネルギー分解能が劣化する。第 2 項は統計的なエネルギー分解能の劣化である。N は半導体検出器で作られる電子ホール対、または PMT で作られる光電子の数、F はファノ因子または excess noise factor である。ファノ因子とは、電荷キャリアの生成過程が独立していないため、キャリアのポアソン統計からのずれを定量化したもので、シリコン場合は ~ 0.1 になる。excess noise factor とは検出器特有のノイズで、APD ならばアバランシェ過程でのゆらぎなどで F は 2-3 となる。

結晶シンチレータや半導体検出器に光子が入射した場合、それぞれシンチレーション光子と電子ホール対を生成する。この情報キャリアの生成がポアソン過程である仮定し、平均として総数 N_0 個の情報キャリアが生成されたとき、統計的変動の標準偏差 σ は $\sqrt{N_0}$ になる。実際には結晶シンチレータを用いた場合、シンチレーション光子が PMT や PD に到達するまでや、光電子や電子ホール対に変換される際に損失があるので情報キャリアの数は N となる。エネルギー分解能は標準偏差よりむしろピークの半値幅 (full width at half maximum: FWHM) で定義される。ガウス分布を仮定すると FWHM=2.355σ となる。よって、ピークの半値幅がガンマ線光子エネルギーの平方根に比例することに注目すると、平均パルス波高はガンマ線エネルギーに直接的に比例し、F を入れると統計的なエネルギー分解能の劣化は分解能は第 2 項のようになる [8][9]。第 3 項は電気回路系雑音である。$\delta noise$ は §2.3 のとおりである。

結晶シンチレータの蛍光を PD で読み出した場合、検出器で作られるシンチレーション光子の数のポアソンゆらぎだけを考えればエネルギー分解能は、量子効率の違いから光電子増倍管に比べて約半分になる。しかし PD では光子によって作られた電子ホール対が、増幅されることなく初段増幅器に入る。このため、電気的に扱う信号レベルが小さく S/N 比が悪くなるため、電器回路系の雑音がエネルギー分解能に大きな影響を及ぼす。DSSD で放射線を検出した場合も同様に、

電器回路系の雑音がエネルギー分解能に大きな影響を及ぼす。この時、第 1 項は入らない。一方、結晶シンチレータを PMT で読み出した場合、光電子を増幅するので S/N 比がよく、電気回路系雑音の成分の寄与は小さくなる。しかし、情報キャリアの数が少ないため第 2 項の統計的なエネルギー分解能の劣化が激しい。結晶シンチレータを APD で読み出した場合、量子効率が PD と同様によく、内部増幅もするため第 2 項と第 3 項の影響が小さくなり、第 1 項の結晶特有の分解能が見えて来る。

2.5 コンプトンカメラ

2.5.1 コンプトンカメラの検出原理

コンプトンカメラの検出原理はコンプトン散乱の運動学

$$cos\theta_1 \quad = \quad 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2} \tag{2.11}$$

を基にしている。図 2.4 のように p_1 でコンプトン散乱をし、その後 p_2 で全てのエネルギー (E_2) が吸収されたとする。その時の反跳電子のエネルギーを E_1 とする。この式から、入射光子の到来方向を θ を持つ円錐面に制限できる。到来する複数の光子の円を描くことにより、ある 1 点でこれらの円が重なり合ったところを光子源の方向として求めることができる。方向の決定精度は検出器の角度分解能に対応し、ジオメトリや位置分解能の他に式 2.11 のとおりエネルギー E_1, E_2 をどれだけ精度良く測定するかで決まる。角度分解能の最終的な限界は散乱される電子が原子核の周りで持つ運動量によって決まる (Doppler Broadening)。また、アクティブシールドを用いて視野を絞ることにより、天体の方向以外からの信号をバックグランドとして除去でき感度の向上が期待できる。

2.5.2 Doppler Broadening

静止した電子がターゲットの場合、散乱角は式 2.11 に従う。しかし、実際には散乱物質の原子内のターゲットの電子の運動量を確定できないため、反跳電子と散乱された光子のエネルギーが一意には決まらない。その結果、標準のコンプトン運動学の式で計算する散乱角とはずれがあり、その散乱角のまわりに広がりが出てくる。この効果は Doppler Broadening と呼ばれている。Doppler Broadening は光子のエネルギーが低い、散乱角が大きい、散乱物質の Z が大きいと影響が強くなる。また、アルカリもしくはアルカリ土類金属がよく、希ガスが悪い。[10]

コンプトンカメラを考えた場合、この Doppler Broadening は原理的に避けることができず、角度分解能の劣化をまねく。物質で考えた場合、アルカリもしくはアルカリ土類金属類が Doppler Broadening の影響が小さく、希ガス類が最も強くなる。よって、半導体物質は比較的 Doppler Broadening の影響が小さく、そのなかでも Si が一番有利だと言える。

2.6 NeXT 計画と軟ガンマ線検出器

X 線天文学において日本は 1979 年の「はくちょう」以来、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」と X 線観測衛星を運用し重要な役割を担ってきた。宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) では、2005 年 2 月に打ち上げ予定の Astro-E2 に続く次世代 X 線観測衛星 NeXT(New X-ray Telescope) の検討を行なっている。この NeXT 衛星には国内外の大学・研究機関が参加しており、2010 年の打ち上げを目指している。

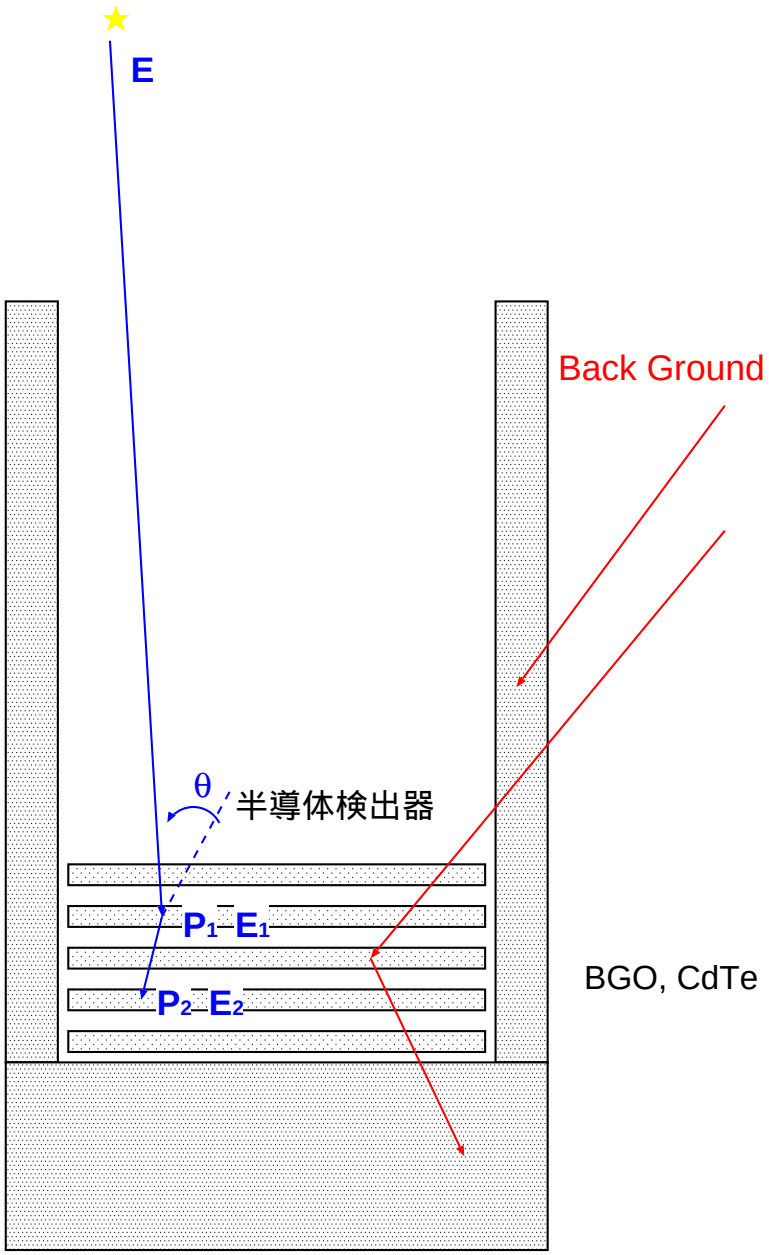
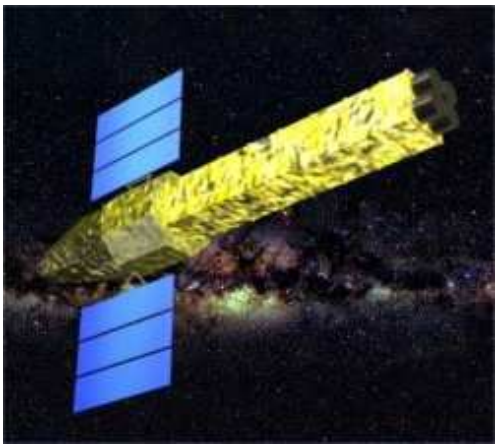


図 2.4: 多重コンプトンガンマ線カメラの検出原理はコンプトン散乱の運動学

現在運用されている Chandra、Newton といったこれまでの X 線観測衛星では主に熱的宇宙が見える 10keV 以下の軟 X 線を観測していたが、NeXT 衛星ではさらにその上のエネルギーを新しい観測手法で探り、新たに「非熱的な宇宙像」の確立を目的としている。

この NeXT 衛星には高感度軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector: SGD) を搭載する予定である。SGD はシリコンやテルル化カドミウム半導体の撮像検出器を多層に積み重ねた半導体多層コンプトンカメラを中心としたものである。これを Astro-E2 衛星の HXD で実現した狭い視野を持つ井戸形シールドとを組み合わせることで、「狭い視野を持つコンプトンカメラ」という、これまでにない概念に基づく検出器を実現する。多層に積んだ薄い検出器を用い、コンプトン運動学を応用することで、これまでの軟ガンマ線検出器の感度向上の最後の壁となっていたアクティベーションによるバックグラウンドを劇的に低減することが可能である。また、SGD の 4 度角の視野は、X 線望遠鏡の視野が 10 分角程度であるのに比べて大きく、銀河団などの広がった天体からの積分された非熱的成分を測定するのに有利である。さらに、SGD を用いることで、70 keV 以上の領域でコンプトン散乱の原理を用い偏光観測が可能である。偏光観測は、粒子が加速される環境における磁場やジオメトリの情報を与えるにもかかわらず、効率のよい観測手段がなかったためこれまで実現してこなかった。



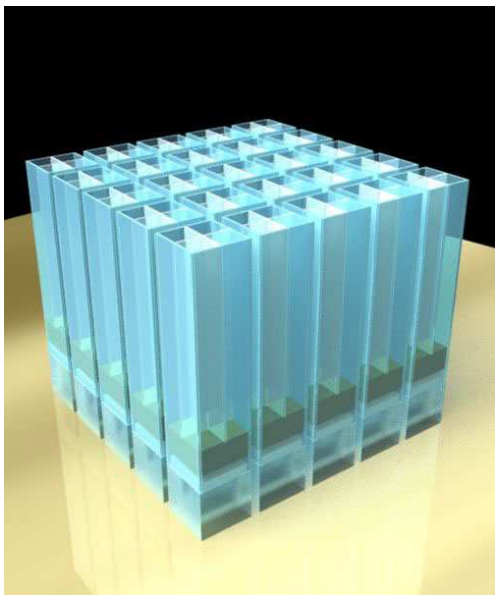


図 2.5: 軌道上の NeXT 予想図 (左)、軟ガンマ線検出器 (SGD) の予想図 (右)

第3章　BGOとフォトダイオードを用いたアクティブシールドの改良

3.1　BGOとフォトダイオードの組み合わせの可能性

無機結晶シンチレータBGOは他の結晶シンチレータに比べて阻止能が大きい、自身の蛍光に対して透明度が高く線形性がよい、潮解性がない、大きな構造物を作りやすい、といった特徴を持っている。そのため、大型の構造物でなくても軟ガンマ線を効率良く検出でき、HXD-2のアクティブシールドなどに使われている。しかし、BGOは蛍光量が小さいという欠点もある。シンチレーション光の読み出しに従来からよく使われているPMTは、量子効率が~20 %と低いためエネルギー分解能の向上に限界がある。

そこで我々はこれまでの研究でBGOの発光領域に対して量子効率が~80 %と高い受光領域を持つPDを用いて測定を行ってきた。PDはPMTに比べて量子効率の他に、構造が堅牢で小さい、消費電力も小さい、磁場の影響を受けにくい、といった利点を持っており、BGOと組み合わせ小型の軟ガンマ線検出器が構成できるものと期待される。また、BGOは低温にすると発光量が増加するという特徴を持ち、同じく低温にすると暗電流が減少し電気回路系雑音が低くなるPDとは相性が良い。

私が卒論で行った結果[11]を図3.1に示す。PDを用いた場合、~2MeVでPMTと同等のエネルギー分解能が得られることを確認している。それよりも低エネルギー側では電気回路系雑音が大きくS/N比が悪いためエネルギー分解能がPMTよりも悪くなっている。GSOはBGOより阻止能では小さいが、PMTで測定すると蛍光量が大きい。しかし、BGOの蛍光波長領域がPDの受光領域によく合っており、冷却することによる光量の増加も大きいため、PDで読み出すとGSOに比べてBGOの方が信号が大きくなり、エネルギー分解能も良くなるという発見があった。

ここでは、それ以降のBGOとPDを用いた軟ガンマ線検出器の開発とアクティブシールドへの応用について述べる。これまでの研究により、BGOとPDを組み合わせはS/N比の悪さがエネルギー分解能の劣化につながっているため改善を試みた。そのため、新たに性能のよいCSA CP5102(クリアパルス株式会社)とAPDを用意した。前者は電気回路系雑音を下げること、後者はCSAに入力される前に信号を増幅することでS/N比を改善しエネルギー分解能の向上を目指した。さらにAPDの安定性を調べるため、温度や電圧の変化に対する安定性を調べた。立方体のBGOで各検出器を比較したあとに、アクティブシールドを想定して板状のBGOを用いて測定を行い、アクティブシールドとしての性能を評価した。

3.2　実験方法・セットアップ

今回の測定では図3.2に示すように、$5\times5\times5\mathrm{mm}^3$の立方体のBGOとCsI、$40\times3\times100\mathrm{mm}^3$の板状のBGOを用意した。板BGOはその側面と、PD・APDの受光面と同じ大きさの両端を持ったライトガイドを使って読み出す。これまでの測定には今回と同様に$5\times5\times5\mathrm{mm}^3$の立方体の結晶シンチレータを用いている。

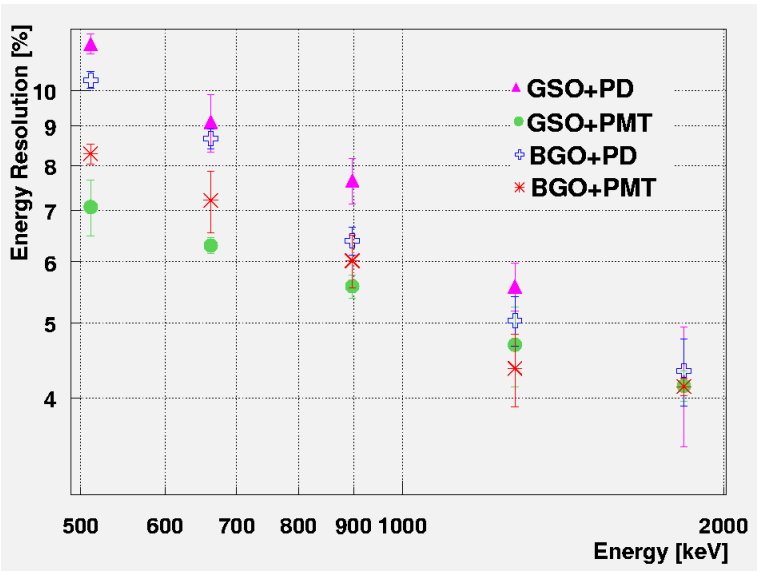


図 3.1: 卒論時、$5\times5\times5\mathrm{mm}^3$ の立方体の BGO と GSO を恒温槽で-30 ℃に冷却し、PD と PMT で読み出した実測値の比較

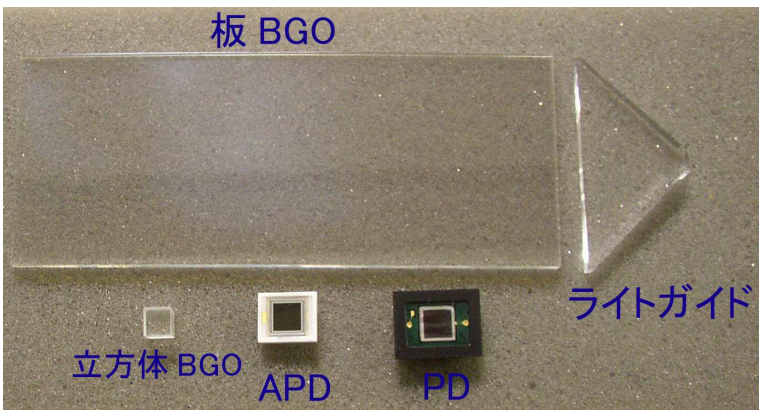


図 3.2: 今回の測定に用いた結晶シンチレータ、ライトガイドと PD・APD

PD は浜松ホトニクス株式会社に特注して製造した SiPINPD SPL PD typeA を用意した。この PD は電極構造の工夫により端子間容量の低減、青色領域での量子効率の向上がなされている。APD は同じく浜松ホトニクス株式会社の SiAPD S8664-55 を 3 個 (APD#1, APD#2, APD#3) 用意した。この内測定には、APD#1 を用いた。この APD は従来に比べて受光面が大きく、シンチレータの読み出しに適している。また、n 型の領域を厚くすることで容量の低減を行なっている。SiPINPD SPL PD typeA と GSO の組み合わせについては釜江らによって報告されている。受光面の大きさは両方とも結晶シンチレータと同じ $5\times\ 5\mathrm{mm}^2$ である。PD と APD の量子効率を図 3.3 に示す。PD は 400 ~ 980nm の範囲で、APD は 500 ~ 830nm の範囲で 80 %以上になり、各結晶シンチレータの蛍光領域とよく重なる。

各測定に用いた回路系のブロック図を図 3.4 に示す。各検出器のアノード、カソードからの信号は、CSA、Shaping Amp を通ったあと ADC に入力される。ADC でデジタル信号に変換された後、MCA に取り込まれる。PD, APD は遮光と電気的な遮蔽を兼ねてスチール製の箱の中に入れた。電圧は PMT は 800V、PD には逆電圧 40V、APD には逆電圧-290V をかけた。PD の逆電圧は §3.3.2 で測定した全空乏層化している電圧を選んだ。APD は §3.5.3 の図 3.16 よりゲインが大きくエネルギー分解能が良い電圧を選んだ。CsI を用いた測定は室温 (~ 20 ℃)、BGO, GSO を用いた測定は-30, -35 ℃に冷却して行った。低温にするのは PD, APD は常温では暗電流に起因する電気的雑音の影響が大きいのでそれを無視できるレベルまで減らすためと、低温では GSO, BGO の光量が増えポアソン揺らぎに起因する雑音が減るからである。CsI は低温にすると蛍光出力が減りエネルギー分解能が悪くなるので常温で測定した。測定に用いた線源は、^{137}Cs(662keV)、^{22}Na(511keV, 1275keV)、^{88}Y(898keV, 1836keV)、^{57}Co(14.4keV, 122keV)、^{109}Cd(22keV, 88keV)、^{133}Ba(31keV, 81keV)、^{241}Am(60keV) である。測定時には結晶シンチレータの微弱な蛍光を少しでも損失なく各検出器の受光面に到達させることが重要である。そこで各結晶シンチレータには反射材を巻いた。BGO と GSO は VM2000 または $BaSO_4$ を巻く、CsI にはバルガーテープを巻く、反射材の違いによる光量の変化はほとんどない。光学グリース (応用光研工業株式会社 6262A) で各検出器の受光面に接着した。

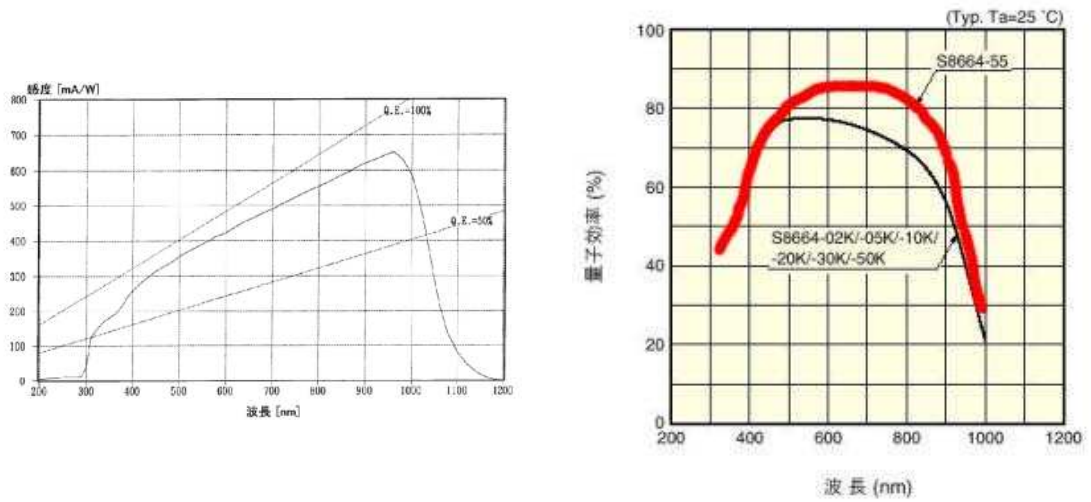


図 3.3: PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の量子効率

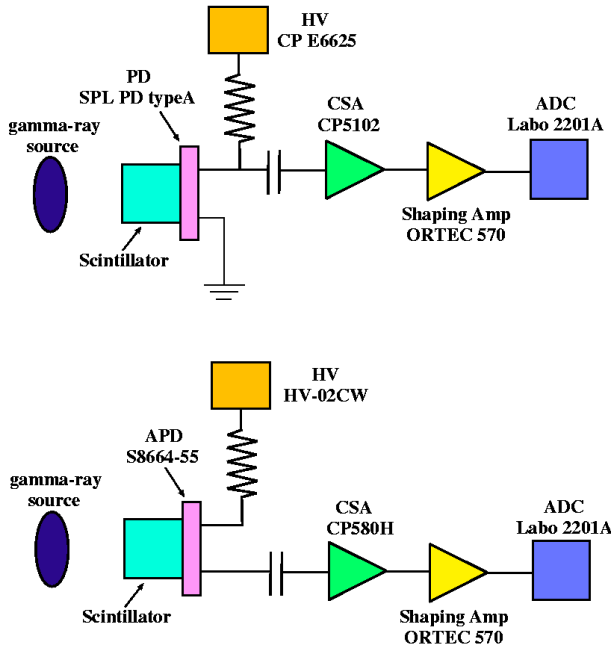


図 3.4: PD で測定したときのブロック図 (上) と APD で測定したときのブロック図 (下)

3.3 フォトダイオード・アバランシェフォトダイオードの基礎特性

§2.3 で言及したとおり、PD・APD のエネルギー分解能はそれらの基礎特性の一つである暗電流と端子間容量に大きく影響される。そこで、PD や APD の電気回路系雑音の主因となる暗電流と端子間容量を調べた。測定は室温 (~ 20 ℃) で行なった。

3.3.1 暗電流の測定

暗電流の測定には Keithley Instruments 社製の Model6517 を用いた。Model6517 は電源と電流計を内蔵しており、PD・APD の n 側から電圧をかけ p 側から電流を測定した。測定は 0V から 50V まで 20sec、2V ステップで電圧を上昇させた。その結果を図 3.5 に示す。PD は測定電圧の 40V で TypeA は ~ 1.19nA に、APD は各素子ごとにリーク電流の値が違った。これは、電圧に対する増幅率が各素子ごとに違ったためだと考えられる。APD#1 は測定電圧の 290V で 0.94nA となった。

3.3.2 端子間容量の測定

端子間容量の測定にはヒューレット・パッカード社製の LCR メータ HP4284A と Model6517 を用いた。HP4284A の high を Model6517 から電圧を供給し PD と APD の n 側につけ、p 側に low をつけた。測定は 0V から 50V まで 20sec、2V ステップで電圧を上昇させた。その結果を図 3.6 に示す。PD は 20V でほぼ空乏層が広がりきっている。PD は測定電圧の 40V で 11.6pF に、APD#1 は測定電圧の 290V で 99.2pF になった。PD を平行板コンデンサと近似した場合、容量は

$$C = \varepsilon_{si}\varepsilon_0 \frac{S}{d} \tag{3.1}$$

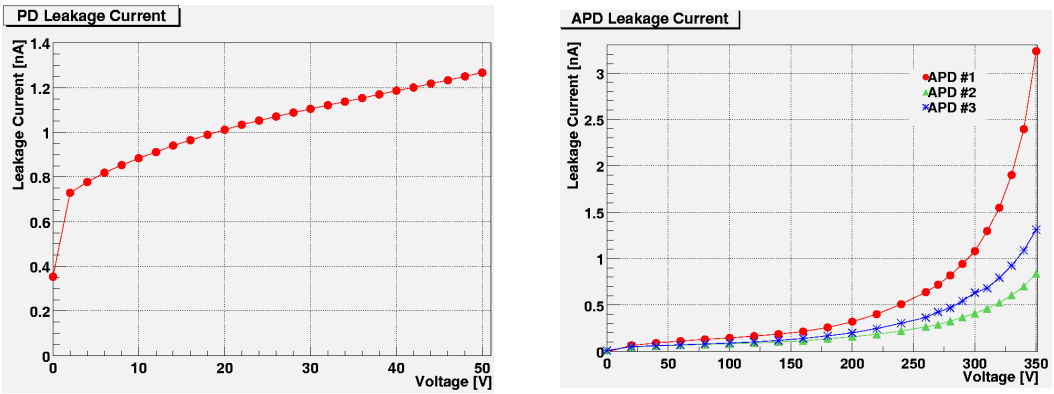


図 3.5: PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の暗電流

で計算することができる。ε_{si} はシリコンの比誘電率 $(=11.9)$、ε_0 は真空の誘電率 $(=8.85\times10^{-12}$ [F/m])、S はチップの面積で $6\times\ 6\mathrm{mm}^2$、d は PD の厚さで全空乏層化していると考えると 300μm である。これを用いて計算すると、PD の端子間容量は ~ 12.7pF と計算され、実測値とよく一致している。同様に APD の容量は 99.2pF と測定されたので、空乏層の厚さを計算すると 38μm と算出できる。APD は PD に比べると空乏層が薄い。

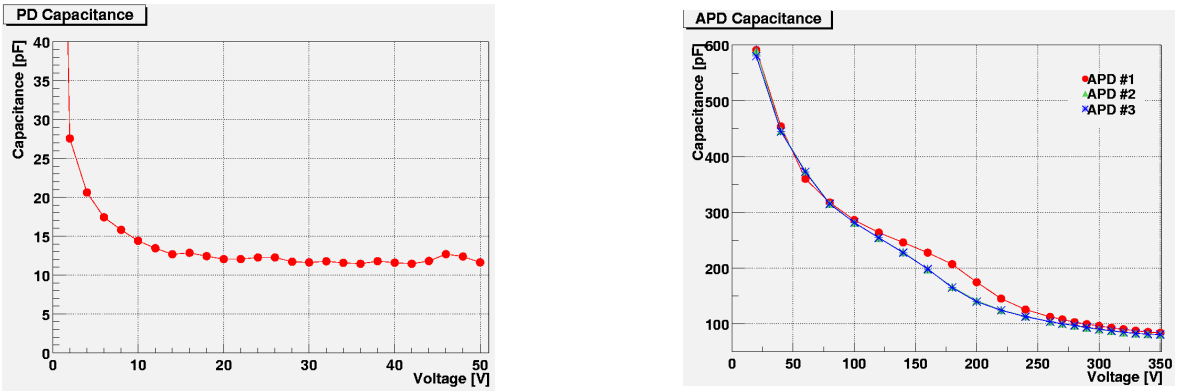


図 3.6: PD TypeA(左) と APD S8664-55(右) の端子間容量

3.4 低雑音 CSA(CP5102) とフォトダイオードの組み合わせ

BGO+PD で読み出しを行った場合、電気回路系雑音の影響を大きく受けることがわかっている。そこで、今回の測定では新たにクリアパルス株式会社製の低雑音 CSA CP5102 を用意した。この CSA の容量勾配を以前に用いていた CP580H も同時に図 3.7 に示す。PD の端子間容量 11.6pF なので、CP5102 のアンプノイズは 0.89keV と推定できる。CP580H を用いた場合のアンプノイズ 1.19keV と比べると電気回路系雑音が下がっているため S/N 比が改善され、エネルギー分解能の向上が見込まれる。

CP5102 に PD+BGO をつけて測定を行った ^{137}Cs のスペクトルを図 3.8 に、エネルギー分解能を図 3.9 に示す。^{137}Cs 662keV でエネルギー分解能は CP5102: 8.3±0.3%、CP580H: 8.6±0.3%、PMT: 7.0±0.1%となった。CP580H に比べてエネルギー分解能が少し向上していることがわかる。PMT+BGO と比べると 2MeV では同等のエネルギー分解能となっているが MeV 以下では PMT のほうがよい。PD で直接 X 線を測定した場合、^{133}Ba の 31keV で CP5102 を用いた場合 1.5keV、

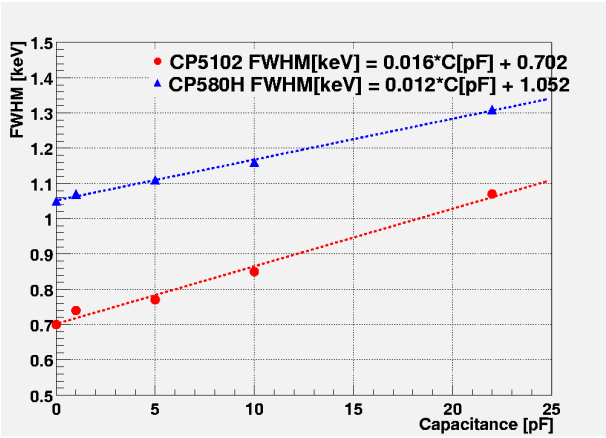


図 3.7: CP5102 と CP580H の容量勾配

CP580H を用いた場合 1.6keV となった。

§2.4 より、エネルギー分解能を推定してみる。電気回路系雑音は- 35 ℃で測定すると暗電流はほぼ無視できるくらい小さくなる事と、1.2GΩ のバイアス抵抗を用いているために、ショットノイズとジョンソンノイズの影響は無視でき、PD の端子間容量によるアンプノイズのみが影響すると考えられる。アンプノイズは図 3.7 より 0.89keV と見積もられるが、測定値の 1.5keV と比べて少し悪くなっている。PD と PD+BGO とでは情報キャリアの生成過程が違うため、パルスハイトは ^{137}Cs の 662keV^{133}Ba の 31keV とで 28.8±0.1 倍 PD のみのほうが大きい。そのため、S/N 比が違い電気回路系のノイズは

$$\delta E_{noise} = 6.5(E/662keV)^{-1} \tag{3.2}$$

となる。また、-30 ℃において BGO+PD の組み合わせは $(9.8\pm0.2)\times10^3$ 個の電子ホール対を作ることが知られている [12]。シリコンのファノ因子は ~ 0.1 なので統計的なエネルギー分解能の劣化は

$$\delta E_{stat} = 1.31(E/662keV)^{-0.5} \tag{3.3}$$

となる。これらより、δsc を求めると 3.6±0.3 となる。このエネルギー分解能の推定値 (実線) と電気回路系のノイズ (点線) を図 3.9 に示す。この推定値は測定値とよくあっている。BGO を PD で読み出した場合、エネルギー分解能はほぼ電気回路系のノイズと結晶特有の分解能に支配されている。今後、PD の厚さを広げる、さらに容量勾配の良い CSA を使うなどして電気回路系雑音を減らせば、PMT を上回るのではないかと思われる。

3.5 APD と BGO を用いた測定

3.5.1 軟ガンマ線領域でのエネルギー分解能

結晶シンチレータの蛍光を APD で読み出す実験を行った。APD は PD と同じ量子効率を持ち、さらに PMT のように内部増幅するので、PMT や PD を用いた場合よりも、さらに良いエネルギー分解能が期待される。測定で得られた ^{137}Cs 662keV のスペクトルを図 3.10 に、エネルギー

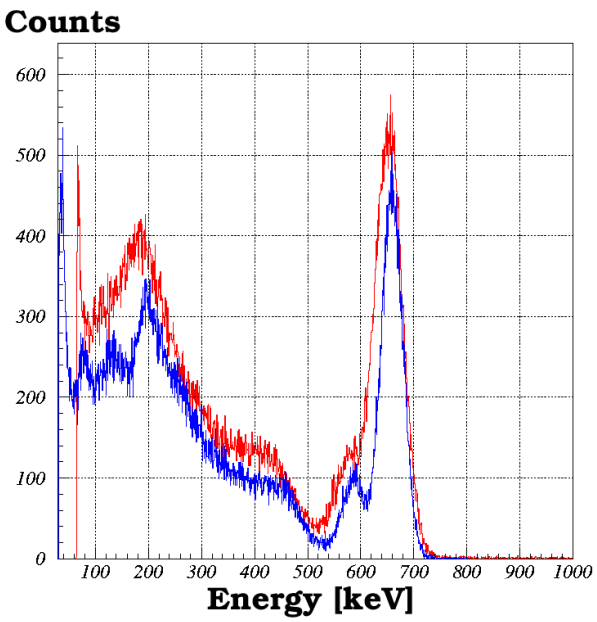


図 3.8: BGO+PD(赤線) と BGO+PMT(青線) で読み出した ^{137}Cs のスペクトル。

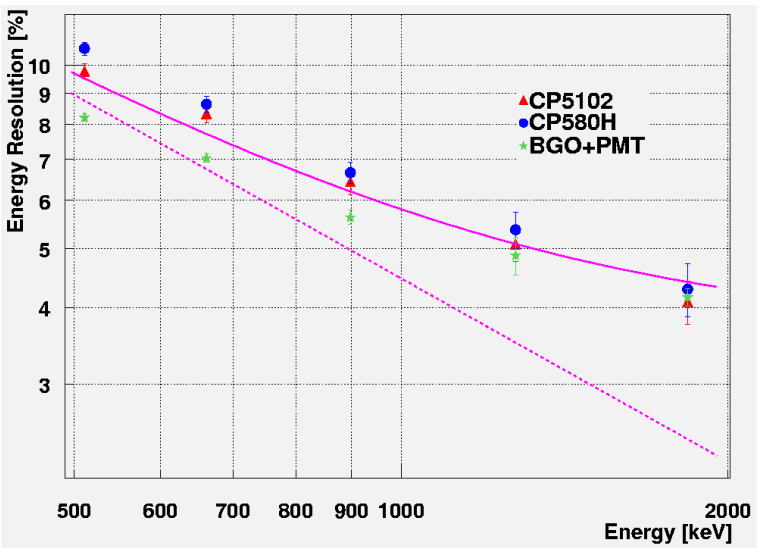


図 3.9: CP5102 と CP580H を用いて PD+BGO を測定した結果。BGO+PMT の結果も併せて載せている。実線は式 2.10 から求めたエネルギー分解能の推定値。点線は電気回路系ノイズ $\delta E_{noise} = 6.5(E/662keV)^{-1}$。

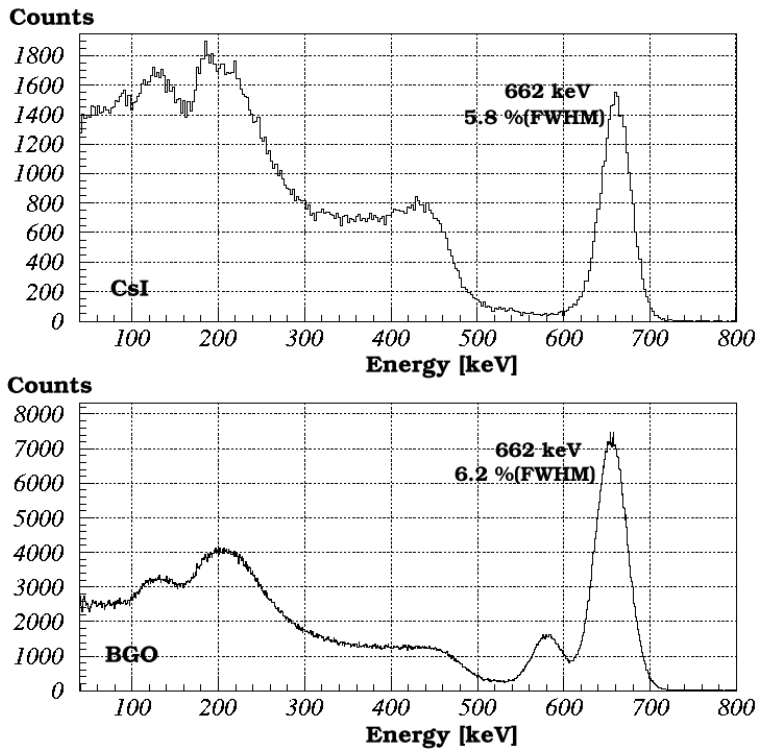


図 3.10: ^{137}Cs のスペクトル。CsI(上)、BGO(下) からの蛍光を APD で読み出した。

分解能を図 3.11 に示す。図 3.11 は §3.5.2 の結果も反映している。^{137}Cs662keV でエネルギー分解能は CsI は 5.8±0.1%、BGO は 6.2±0.1%になった。BGO を用いて ^{137}Cs 662keV が ~ 6 %という素晴らしい結果を得た。

先程と同様に §2.4 より、エネルギー分解能を推定してみる。電気回路系雑音は PD と同様にショットノイズとジョンソンノイズの影響は無視でき、APD の端子間容量によるアンプノイズのみが影響すると考えられる。アンプノイズは APD の端子間容量が 99.2pF なので図 3.7 より、2.3keV と見積もられる。APD に X 線を入射させた場合、アバランシェ領域が上方にあるためうまく増幅されない。よって、今は電気回路系ノイズは見積値の 2.3keV とする。APD は PD と違い ~ 20 倍に内部増幅するため、電気回路系のノイズは

$$\delta E_{noise} = 0.5(E/662keV)^{-1} \tag{3.4}$$

と見積もられる。§3.4 より、δsc=3.6±0.3 と S8664-55 は F=2[6] とわかっている。図 3.11 において、実線がエネルギー分解能の推定値、点線が統計的なエネルギー分解能の劣化である。エネルギー分解能の推定値は実験値から外れている。実験値はほぼ $E^{-1/2}$ に比例していることから、δsc はガンマ線のエネルギーに依存するのかもしれず、現在調査中である。APD ではエネルギー分解能は統計的な劣化にほぼ支配されている。PD や PMT で測定するよりもエネルギー分解能が良くなっている。これは APD 内で増幅され CSA に入って来る信号が大きいので、PD と比べ S/N 比がよくなったためである。

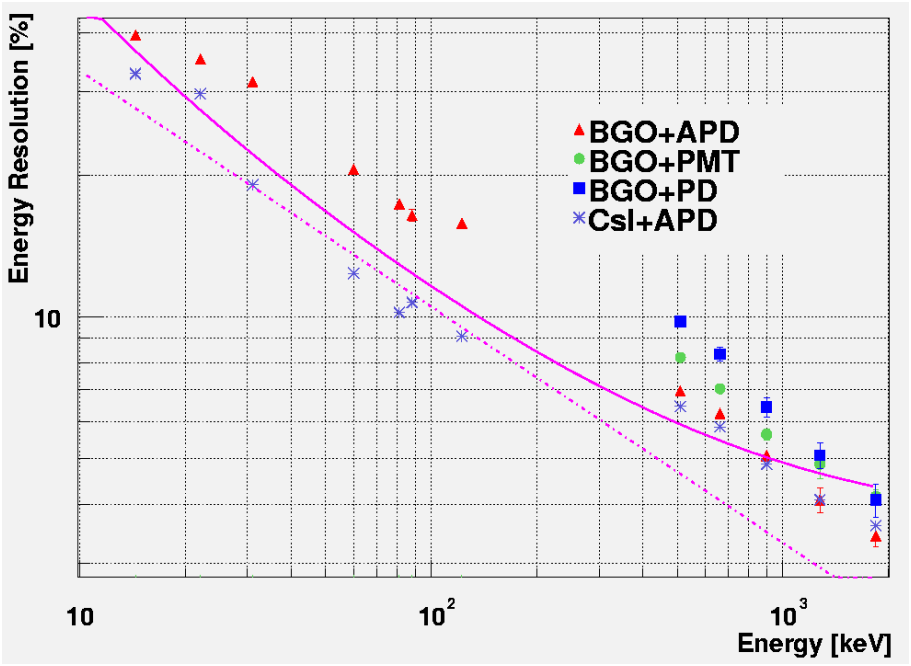


図 3.11: APD と結晶シンチレータを組み合わせた各ガンマ線源のエネルギーにおけるエネルギー分解能 (FWHM)。§3.5.2 の threshold の測定の結果も反映している。実線は式 2.10 から求めたエネルギー分解能の推定値。点線は統計的な劣化 $\delta E_{stat} = 5.5(E/662keV)^{-0.5}$。

3.5.2 APD+BGO の threshold

§3.5.1 では、MeV 領域で APD と BGO の組合せが PMT を上回るエネルギー分解能を持つことを確認した。ここではこの APD と BGO の組合せで測定できるエネルギーの下限を調べた。測定に用いた線源は ^{133}Ba の 31keV, 81keV、^{109}Cd の 22keV, 88keV、^{57}Co の 14keV, 122keV のラインである。 測定で得られた ^{109}Cd の 22keV, 88keV、^{57}Co 14keV, 122keV のスペクトルを図 3.12 に、エネルギー分解能を図 3.11 に示す。45keV 付近に小さなピークが見られる。これは Bi の K エスケープピーク (光電ピークの 77keV 左) である。図 3.12 にあるように、APD と BGO の組合せで測定できるエネルギーの下限は ~ 10keV という素晴らしい結果を確認した。エネルギー分解能は 14keV で 39.6 %、122keV は 15.8 %となった。エネルギー分解能は MeV 領域と同様に keV 領域まで $E^{-1/2}$ に比例しており、電気回路系雑音はほぼ無視できるといえる。

3.5.3 APD+BGO のゲイン、エネルギー分解能の安定性

APD と BGO の組み合わせについて検出器として実用できるかどうかを判断するのに重要な温度変化や電圧変化に対するゲインやエネルギー分解能の安定性について調べた。測定は以下のように行った。この測定に用いた恒温槽の温度揺らぎは± 0.3 ℃である。また、この恒温槽に入れると系統的に 0.2 %ほどエネルギー分解能が悪くなった。

1. 温度、電圧一定時での変化を調べるため、恒温槽の温度を-35 ℃に電圧を- 290V に保ったまま、20 分おきに 24 時間測定した。線源には ^{137}Cs を用いた。

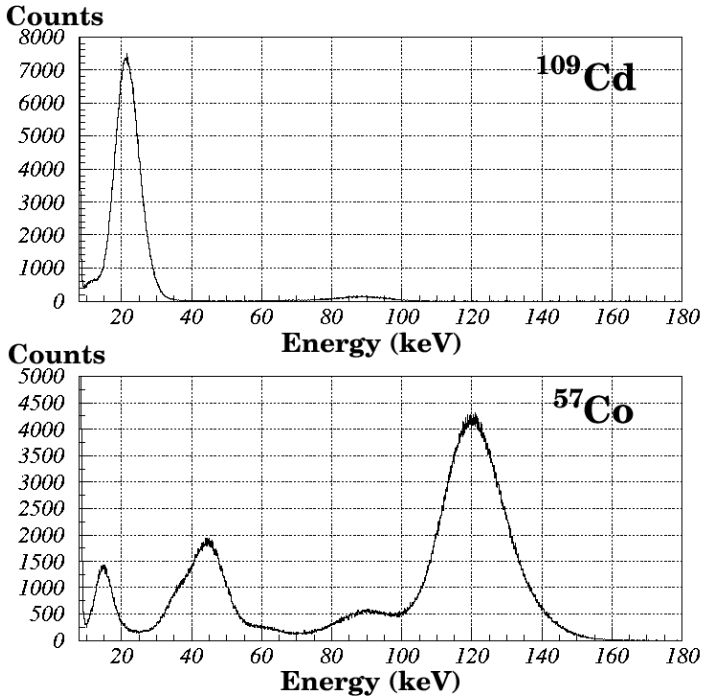


図 3.12: BGO からの蛍光を APD で読み出した、^{109}Cd(上) と ^{57}Co(下) のスペクトル。

2. 温度変化による安定性を調べるため、恒温槽の温度を-35 ℃から 40 分/℃で- 30 ℃まであげ 10 時間その温度を保つ。その後 40 分/℃で-25 ℃まであげ 10 時間その温度を保つ。その間 20 分おきに測定した。線源には ^{137}Cs を用いた。

3. 電圧変化による安定性を調べるため、恒温槽の温度を-35 ℃に保ったまま、250V ~ 335V まで HV を変えて測定した。線源には ^{137}Cs を用いた。

(1) の測定の結果を図 3.13 に、(2) の測定で得られたスペクトルを図 3.14 に結果を図 3.15 に、(3) の測結果を図 3.16 に示す。(1) 図 3.13 より peak の揺らぎに規則性があるのに思われるのは昼と夜の外気温の差の影響を受けているためである。温度が一定の場合、peak channel の偏差は peak と比べて 0.5 %以内なので gain の変化はほとんど無いといえる。エネルギー分解能のほうも平均値である 6.42 %にほぼ誤差内に収まるので安定性はいいといえる。(2) 図 3.15 のより、温度変化させてもエネルギー分解能はあまり揺らがなかった。また、-35 ℃と-25 ℃の peak の値は-35 ℃を 1 とすると-25 ℃は 0.76 ほど小さくなったが、エネルギー分解能は 6.42 %と 6.52 %で 0.1 %しか変わらず、安定しているといえる。(3) 図 3.16 より、HV が- 260 ~ -290V の間はエネルギー分解能 ~ 6.3 %と安定しているといえる。これらの結果より BGO と APD を組み合わせた検出器は温度や HV を変化させるとゲインは変わるがエネルギー分解能は安定しているということがわかる。パルスハイトのゆらぎを 2 %以内に抑えるためには電圧 V と温度 T をどれくらいの精度で与えればよいか計算した。電圧のゆらぎ ΔV=$\pm$0.2V、温度のゆらぎ ΔT=$\pm$0.5K に保てばよい。

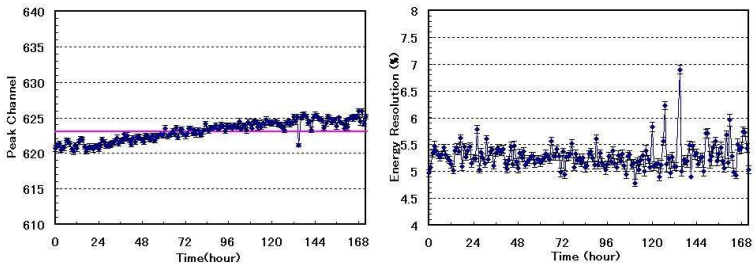


図 3.13: -20 ℃, -290V 一定で 1 時間間隔で 7 日間測定した ^{88}Y 898keV の peak channel の位置 (左) とエネルギー分解能 (右)。平均値はそれぞれ、623.1ch と 5.28%

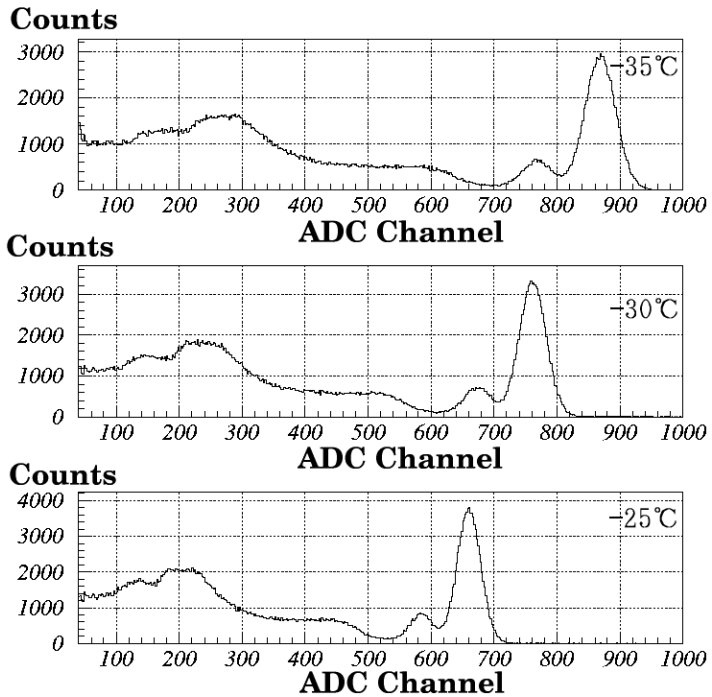


図 3.14: HV -290V, 137Cs の-35 ℃ (上)、-30 ℃ (中央)、-25 ℃ (下) のスペクトル

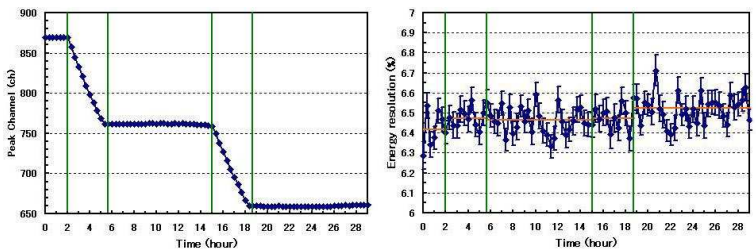
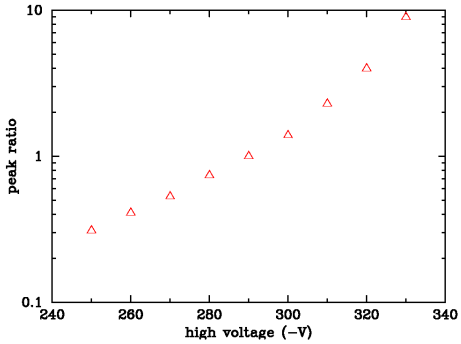


図 3.15: -35 ℃から-25 ℃まで温度を変化させて測定した、peak channel の位置 (左) とエネルギー分解能 (右)。



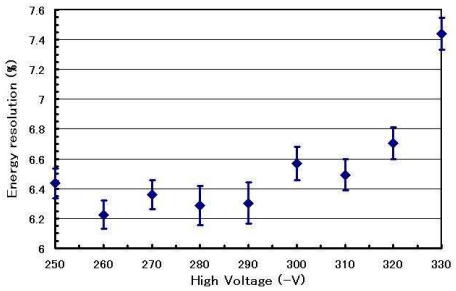


図 3.16: -35 ℃, 137Cs 662keV の-290V のゲインを 1 とした場合の他の HV で測定したピーク位置との比 (左) とエネルギー分解能 (右)

3.6 板 BGO での測定

これまで、小型の立方体 BGO と APD の組み合わせが PMT を上回る優れた性能を持つことを確認してきた。この節ではアクティブシールドを想定した板 BGO を APD で読み出す。この測定は同研究室の松浦、永江、高橋らと共同で行った。結果は ^{137}Cs のスペクトルを図 3.17 に示す。エネルギー分解能を図 3.18 に示す。^{137}Cs の 662keV のラインで APD を組み合わせると 15.0±0.1%、PMT を組み合わせると 17.9±0.3% となり、板 BGO でも APD のほうがエネルギー分解能が良い。threshold を図 3.19 に示す。~ 65keV となっている。この板 BGO と APD の組み合わせは松浦がさらに詳しい測定を行なっている。[13]

3.7 まとめ

阻止能が大きく軟ガンマ線検出に適している BGO は蛍光量が小さいため、エネルギー分解能やエネルギー threshold が悪いという欠点があった。これまでの研究では従来結晶シンチレータの読みだしによく使われてきた PMT に換わり PD を用いることでその改善を計った。その結果、~ 2MeV で PMT のエネルギー分解能と同等になるという結果を得た。MeV 以下のエネルギーでは信号に対して電気回路系雑音が大きく S/N 比が悪いためエネルギー分解能が悪かった。そこで、今回の測定では PD と性能のよい CSA の組み合わせと内部増幅する APD を用いて S/N 比の改善に努めエネルギー分解能の向上を目指していた。その結果、PD と性能のよい CSA の組み合わせはこれまでのエネルギー分解能より向上はしたが、MeV 以下のエネルギーで PMT を上回れなかった。APD を用いた場合、BGO は PMT や PD で読み出すよりも APD で読みだしたほうがエネルギー分解能がよくなり、^{137}Cs662keV でエネルギー分解能が 6.2 % となることを確認した。また、APD で読みだした場合、CsI より大きい阻止能を持つ BGO が CsI と遜色ないエネルギー分解能を得ることを確認した。また S/N 比がよいため threshold は ~ 10keV まで測定できることを確認した。また、PD で BGO を読みだした場合、MeV 領域になって来ると S/N 比がよくなり PMT と同等のエネルギー分解能が得られることを確認した。これらのことより、APD と 高阻止能結晶シンチレータ BGO の組み合わせはその大きい阻止能とよいエネルギー分解能で、MeV 領域の軟ガンマ線測定に大変有効な検出器であるといえる。また、PD と高阻止能結晶シンチレータ BGO の組み合わせも、今後の改良より MeV 領域の軟ガンマ線測定に大変有効な検出器であると言える。

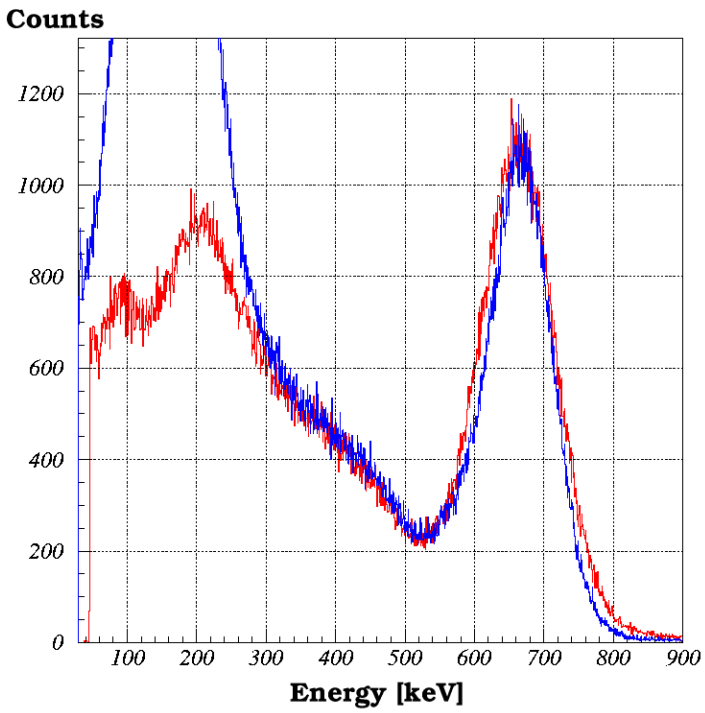


図 3.17: 板 BGO で測定した ^{137}Cs のスペクトル。青：APD、赤：PMT

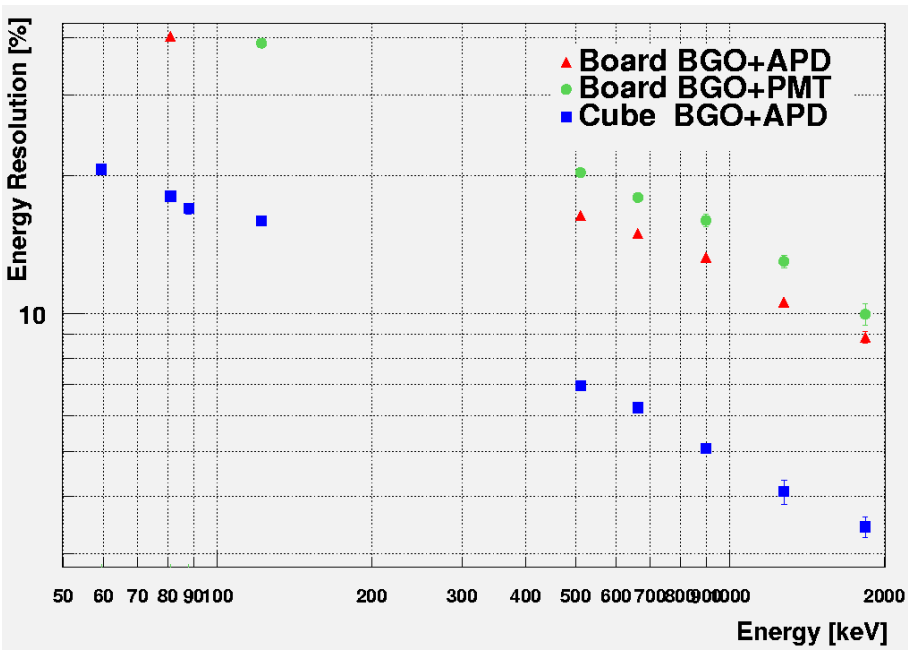


図 3.18: 板 BGO で測定したエネルギー分解能

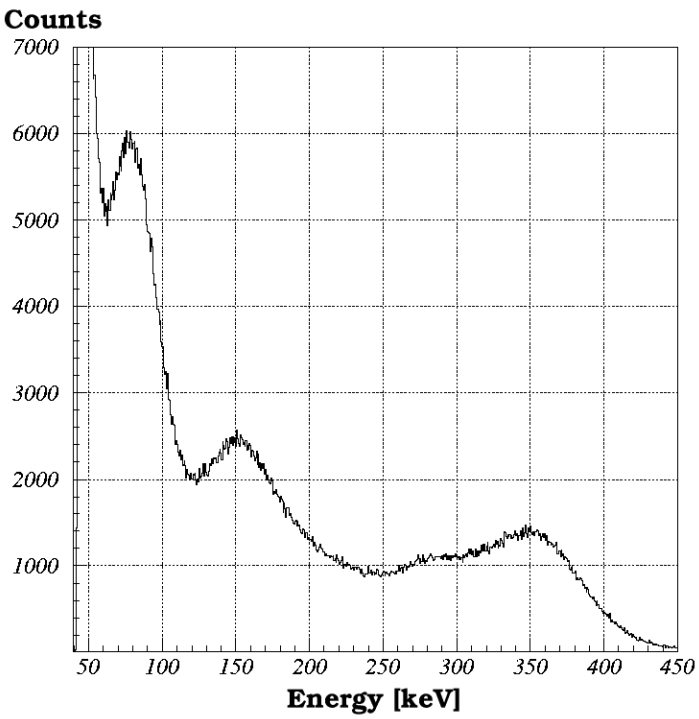


図 3.19: 板 BGO で測定した ^{133}Ba のスペクトル

第4章　DSSDの多層化へ向けたセットアップの構築

我々のグループでは次期 X 線天文衛星 NeXT において、硬 X 線・軟ガンマ線の高感度測定を行うため軟ガンマ検出器 (SGD) の開発を行なっている。この主要部分の多層半導体コンプトンカメラに使われる半導体検出器には、高いエネルギー分解能と位置分解能が必要である。そのため我々は、素粒子実験において使用されているシリコンストリップ検出器をさらに小型化し容量を下げた両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と低ノイズかつ小型のアナログ LSI VA32TA を開発している。シリコンは硬 X 線・軟ガンマ線の領域で散乱効率が良く Doppler Broadening 影響が小さいという特性もある。この章では DSSD の基礎特性について調べると共に、VA32TA を用い優れたエネルギー分解能を実現するためのセットアップの組み上げを行なった。

4.1　多チャンネル読み出しシステム

多層半導体コンプトンカメラを構成するためには、DSSD や CdTe ピクセル検出器などの複数のストリップやピクセルを読み出すためのシステムが必要になってくる。そのシステムは角分解能の劣化を防ぐためにも低ノイズで、かつ多層化し衛星搭載を目指す要求からコンパクトなシステムが必要である。この節では多チャンネル読み出しシステムの概要を説明する。このシステムの立ち上げは、宇野 [14]、三谷 [3]、中村 [15]、田島 [16] らによって行なわれた。システムの全体図を図 4.1 に示す。

4.1.1　アナログ LSI VA32TA

DSSD から信号を読み出す時、複数のチャンネルを低ノイズに読み出すコンパクトなシステムが必要となってくる。そこで我々のグループでは JAXA/ISAS、スタンフォード線形加速器センター (SLAC) と共に IDEAS 社と協力しアナログ LSI VA32TA[17] を開発している。

VA32TA は高エネルギー物理実験の分野で用いられている IDEAS 社の VIKING シリーズを元に設計され、32 チャンネルの低ノイズ・低電力の CSA、Shaping Amplifier を持ち、同時にサンプル、ホールドし読み出すことが可能である。VA32TA は 0.35μm の CMOS 技術を用いて製造されており、大きさは $7.035 \times 3.385 \times 0.725$mm と小型である。宇宙空間では高エネルギーの荷電粒子の飛来によってレジスタのビットが反転し、誤った情報が書き込まれる (Single-Event Upset: SEU) 事がある。それを防ぐため、1bit につき 3 つのレジスタを設けて、多数決判定し、誤った情報を修正できるようになっている。

VA32TA は VA と TA という 2 つの信号処理回路にわかれている。VA は slow-shaper、サンプルホールド回路、マルチプレクサからなり、ADC に入力するための波形生成をする。TA は fast-shaper、ディスクリミネータからなり、トリガー信号を作り出す。VA32TA のアンプノイズは等価雑音電荷 (ENC) で表すと、

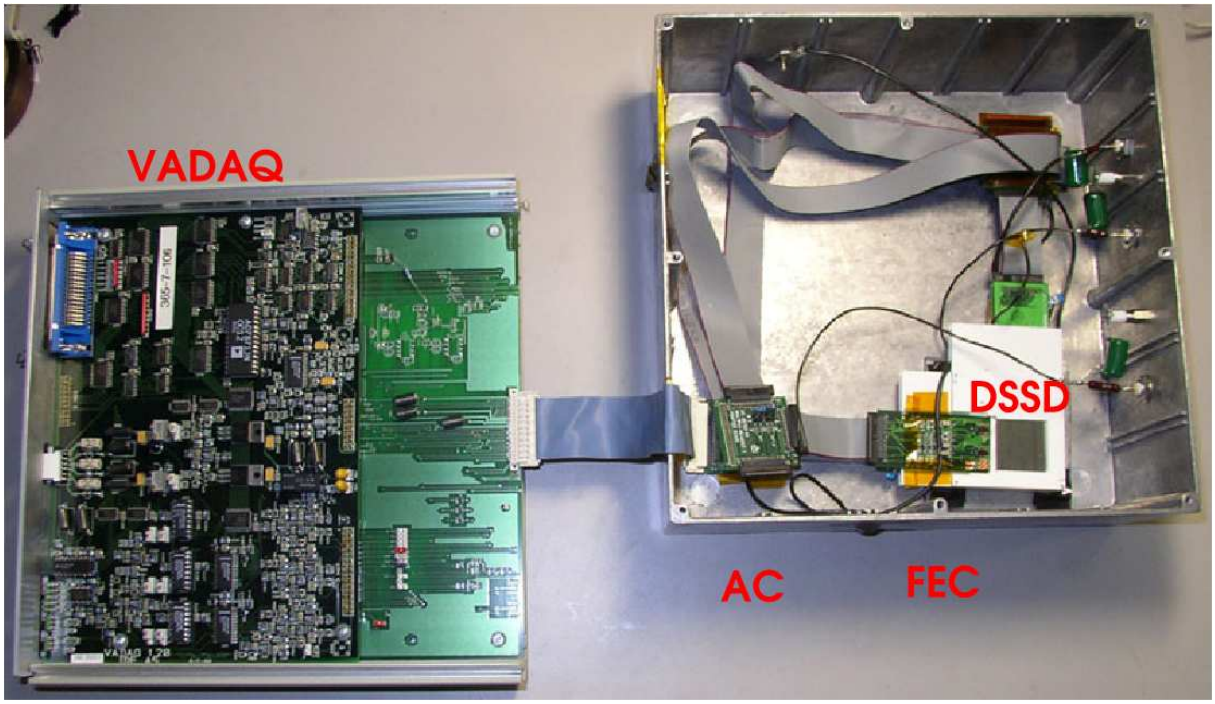


図 4.1: 多チャンネル読み出しシステムの全体図

$$ENC_{amp}\ \ (\mathrm{e}^{-}) = (45 + 19 \times C(\mathrm{pF}))/\sqrt{\tau}\ \ (\mu\mathrm{sec}) \tag{4.1}$$

となる。

4.1.2 VADAQ

VA-DAQ は VA/TA チップのテスト、読み出しを行なうため IDEAS 社が開発したデータ取得システムである。VA-DAQ はパラレルポートを介して PC と接続し、LabView を用いて制御する。LabView は National Instruments 社が開発した graphical programable language で、計測器や制御装置からデータ収集やコントロールするの特化している。VA-DAQ は 50 ピンの half-pitch コネクタが採用されている。

VA-DAQ はPARIO、SUPPLY、BIAS、ADC、PULSE という機能から構成されている。PARIO は PC と VA-DAQ を接続するパラレルポート (IEEE 1284) 規格としての機能を有する。SUPPLY は低ノイズの+2V、-1.5V を供給する機能をもつ。ADC は、AD 変換を行なう機能を持つ。PULSE はデジタルシグナルと calibration pulse を生成する機能を持つ。BIAS は VA へ供給するバイアスを生成する機能を持つ。今回測定に主に用いた機能として

- VA32TA に与えるバイアスを決定する。
- 199 ビットシフトレジスタの値を決め、デジタル信号を VA32TA に送る。
- Hold 信号のタイミングを 1 イベントごとに少しずつずらして、slow shaping amplifier 出力をサンプリングすることにより、slow shaping amplifier 出力の波形を確認できる。

- VA-DAQ 内でテストパルスを発生させ、VA32TA の cal に入力することで各チャンネルのゲインを測定できる。
- 全チャンネルのペデスタル (ゼロ点からのずれ) とノイズの大きさを測る。
- ノイズの大きさとゲインから各チャンネルの ENC を求める。
- 各チャンネルのスレッショルドのずれを測定、補正できる。
- DSSD を VA32TA に接続した場合、多チャンネル読み出しの制御し、リアルタイムでデータをヒストグラムにする。

4.1.3 Front-end Card・Adapter Card

Front-end Card(FEC) は 2 つの VA32TA とそのアナログ電圧、デジタル電圧を与えるために用いる抵抗や DSSD に供給するためのバイアスのフィルタ、テストパルスの電圧値を電荷量に変換するためのコンデンサなどが実装されている。34pin の half-pitch flat-cable で readout と接続している。Adapter Card(AC) は VADAQ からの 50pin を不必要なものを除き FEC を接続するため 34 ピンに変換する機能をもつ。また、DSSD などを多層化していった場合、複数の FEC を使う事になる。AC は VADAQ-VA32TA でやりとりされる shift_in, shift_out, reg_in, reg_out 信号を複数の FEC に分配する機能がある。

4.1.4 読み出しの流れ

読み出しの流れを図 4.2 に示す。DSSD から VA32TA に電荷が入力されると、各チャンネル毎に CSA を通り slow-shaper(VA) と fast-shaper(TA) に入力される。fast-shaper の出力がディスクリミネータに入力され、どれかのチャンネルが vthr で指定した threshold を超えた場合、全 32 チャンネルは OR されてトリガー ta・tb を生成する。その時、一定の遅延 (peaking time) を置き全チャンネルのサンプルホールド回路 (S/H) のスタートタイミングを表す Holdb が送られ、各チャンネルの波高値をホールドする。shift_in_b が入力され、Clkb を 1 クロック入力すると 0 チャンネル目のマルチプレキサにつながり、ホールドされていたデータを読み出す。それに続き、Clkb が入力される毎にチャンネルを 1 つ変えてデータを読み出していく。32 個の Clkb が入力されると、shift_out_b が出力され読み出しを終わる。この shift_out_b は次の VA32TA の shift_in_b となり、読み出しを始める。shift_out_b は AC のジャンパーを組み換えることにより次の FEC へと誘導できる。全ての VA32TA を読み終えた後、shift_out_b は AC で VADAQ に誘導し全ての読み出しを終わる。

4.2 多チャンネル読み出しのセットアップ

今回の測定では DSSD P400 × 64 を用いた。DSSD P400 × 64 は浜松ホトニクス株式会社によって製作された。構造は図 4.3 のように厚さ 300μm、ストリップ間が 400μm、ストリップの幅が 300μm で片面が 64 本のストリップを持っている。p^+ ストリップと n^+ ストリップは交差する。バイアスリングはストリップ周辺の電界を一様に整え、暗電流を抑える働きをする。

DSSD を読み出すためのセットアップを図 4.4 に、その模式図を図 4.5 に示す。コンプトン再構成を行う場合、角度分解能はエネルギー分解能に依存する。エネルギー分解能を良くするため、

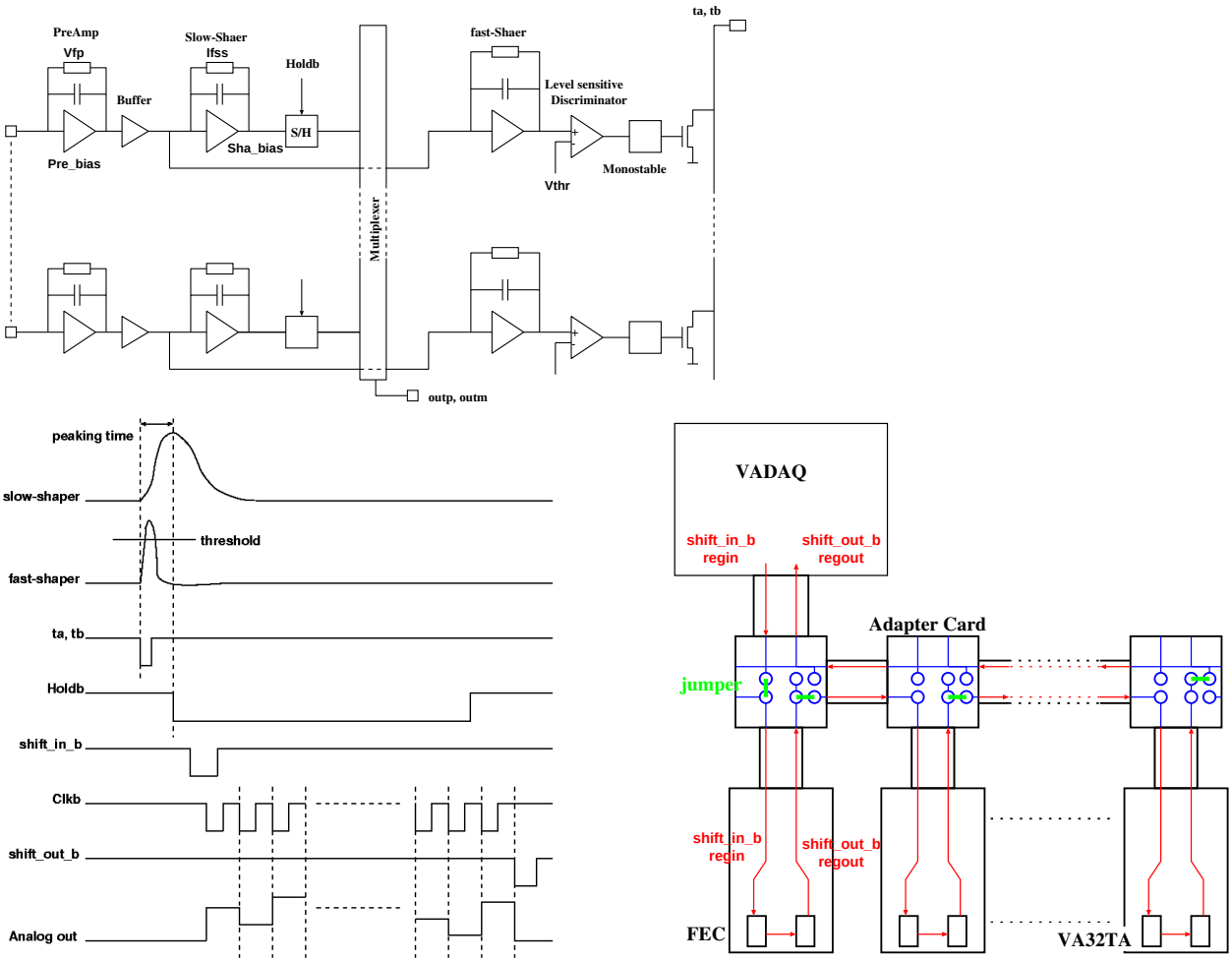


図 4.2: 読み出しの流れ。VA32TA のブロックダイアグラム (上)、タイミングチャート (左下)、AC での信号の誘導 (右下)

p^+ 側は DC 結合した。しかし、この場合 DSSD のリーク電流が直接 VA32TA に流れ込むため、温度が高いと測定できない場合がある。n^+ 側は+100V の逆電圧をかけるため RCchip を用いて AC 結合した。RCchip のカップリングコンデンサが 100V の電圧に耐えきれず壊れてしまうため、50V づつ分割してかけるため 2 枚用いた。また、RCchip に逆電圧をかけるためそれぞれの Nsub に+120V、+50V を与えた。各素子間はワイアボンドで接合している。DSSD をマウントしている治具はセラミックでできており三菱重工業が製作した。DSSD、RCchip、VA32TA の pitch の違いを合わすために用いられてきた pitch adapter はノイズがのるために使用しなかった。そのため端のチャンネルのワイヤボンディングが容易ではなく大きく伸びてしまい他のチャンネルよりノイズがのる結果となった。このセットアップを 2 組製作した、用いた RCchip とそのカップリングコンデンサ、バイアス抵抗、および VA32TA と各チャンネルの No. を表 4.6 に示す。RCchip にはバイアス抵抗の大きいタイプ (H type) と小さいタイプ (L type) がある。なお、DSSD-1 の n^+ 側の 47 ~ 63ch はその後のテストで破損していることが判明し、その影響を除くためワイヤボンディングをすべて外してある。

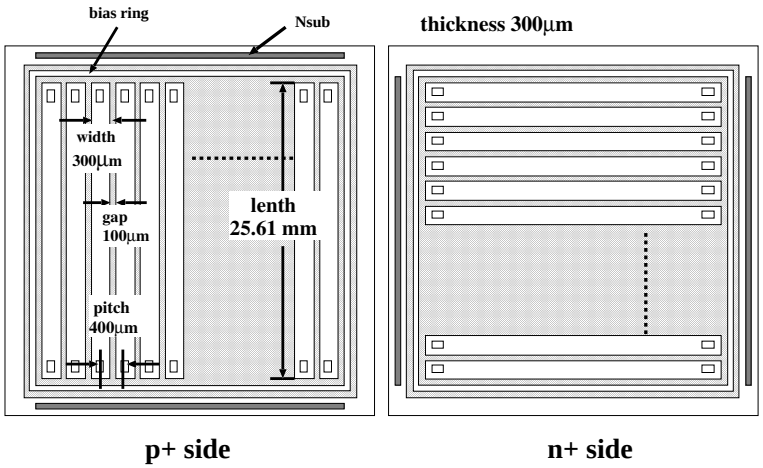


図 4.3: DSSD P400 × 64 の構造。p^+ と n^+ のストリップが互いに直交するように配置されている。

表 4.1: 用いた RCchip の組合せ

	VA32TA No.	RCchip type	C_{couple}[pF]	R_{bias}[GΩ]	ch No.
DSSD-1	chip1	DC Couple			0 ~ 31 (p^+ 0 ~ 31)
	chip2	DC Couple			32 ~ 63 (p^+ 32 ~ 63)
	chip3	P200-1200 Ltype+P400-770 Ltype	34, 54	1, 2.5	64 ~ 95 (n^+ 0 ~ 31)
	chip4	P200-1200 Htype+P400-770 Htype	34, 54	2, 5	96 ~ 127 (n^+ 32 ~ 63)
DSSD-2	chip5	DC Couple			128 ~ 159 (p^+ 64 ~ 95)
	chip6	DC Couple			160 ~ 191 (p^+ 96 ~ 127)
	chip7	P200-770 Ltype+P200-770 Ltype	22, 22	1, 1	192 ~ 223 (n^+ 64 ~ 95)
	chip8	P200-770 Ltype+P200-770 Ltype	22, 22	1, 1	224 ~ 255 (n^+ 96 ~ 127)

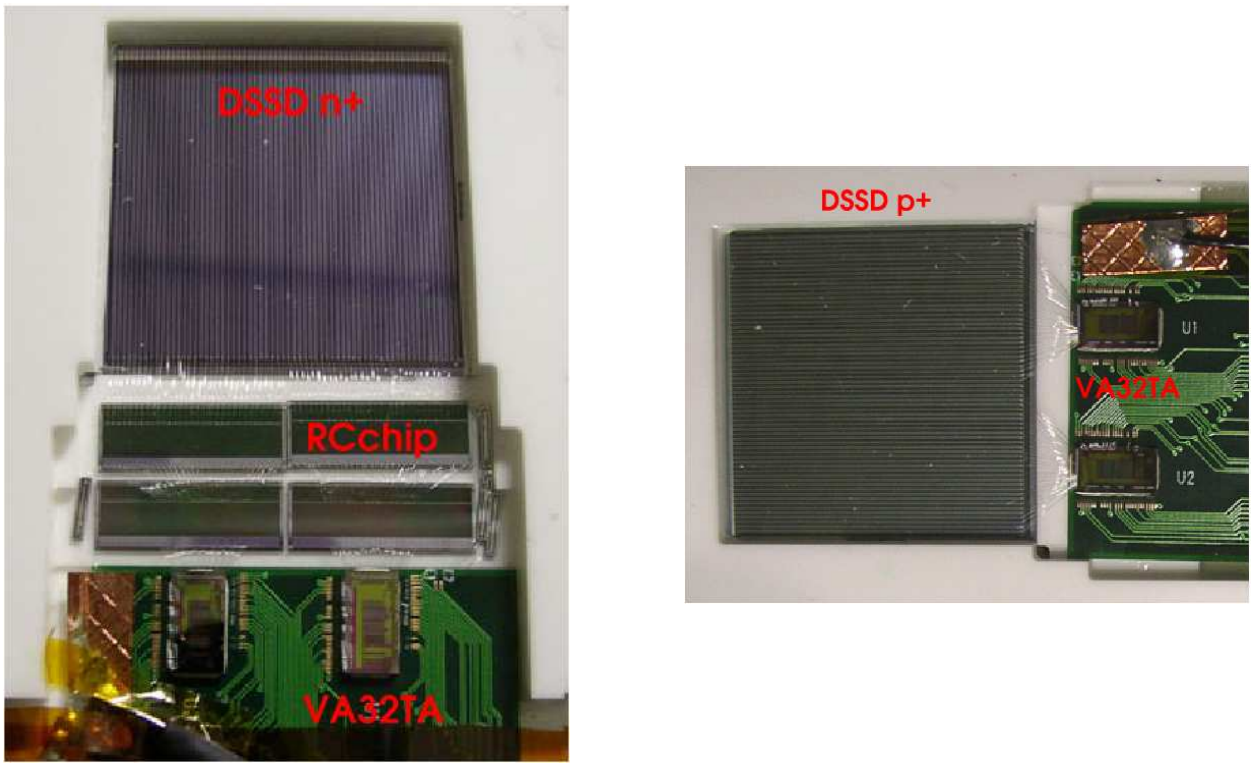


図 4.4: DSSD 読みだしセットアップ。DSSD n^+側(左)、p^+側 右

4.3 DSSD・RCchip の基礎特性

DSSD のエネルギー分解能は暗電流、Body Capacitance、Interstrip Capacitance に大きく依存する。そこで、今回の測定に使用した DSSD P400 × 64、RCChip と同型の素体について測定を行った。測定に用いたセットアップを図 4.6 に示す。

4.3.1 DSSD・RCchip の暗電流の測定

暗電流の測定には Keithley Instruments 社製の Model6517 を用いた。Model6517 は電源と電流計を内蔵しており、DSSD の n 側から正電圧をかけ p 側のストリップ番号#10, #30, #50 から読みだした。測定は 0V から 120V まで 20sec、5V ステップで電圧をあげ、20 ℃で行った。その結果を図 4.7 に示す。DSSD は測定電圧の 100V でストリップ#10 は 468μA、ストリップ#30 は 385μA、ストリップ#50 は 399μA となった。

RCchip は全ストリップをまとめて読み出した。40V で p200-770:2.33nA、p200-1200:1.88nA、p400-770:3.04nA と測定された。従って、ストリップ 1 本当たりの暗電流はそれぞれ、36pA、29pA、95pA となる。

4.3.2 DSSD・RCchip の Capacitance の測定

Capacitance の測定にはヒューレット・パッカード社製の LCR メータ HP4284A と Model6517 を用いた。HP4284A の high を DSSD の n 側につけ Model6517 から正電圧を供給し、p 側に low をつけた。測定は 0V から 120V まで 20sec、5V ステップで電圧をあげ、20 ℃で行った。その結果を図 4.8 に示す。100V での実測値 227pF となり、ストリップ 1 本当たりの容量は 3.54pF となる。ま

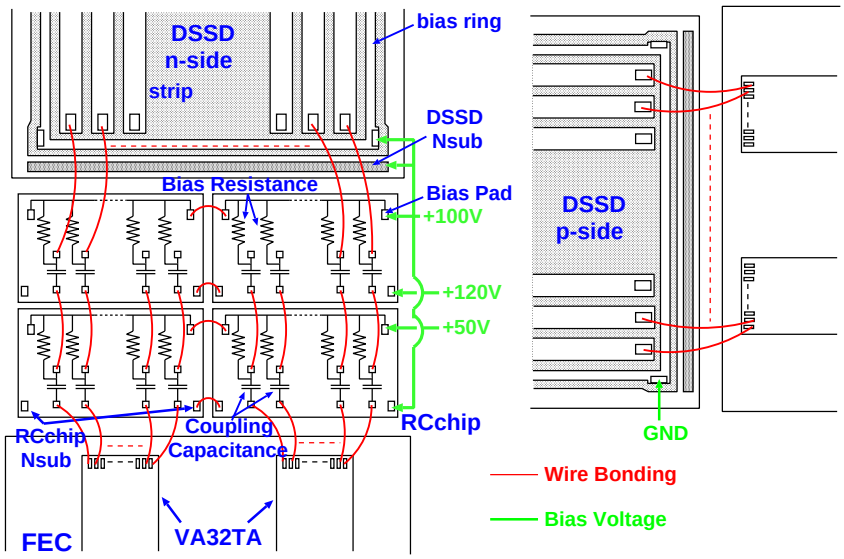


図 4.5: 図 4.4 の模式図、DSSD 読みだしセットアップ

た、80V で全空乏層化しているのがわかる。同様に、RCchip の全ストリップの Body Capacitance を測定した。40V で p200-770:4.8pF、p200-1200:4.6pF、p400-770:4.0pF と測定された。従って、ストリップ 1 本当たりの Body Capacitance はそれぞれ、0.07pF、0.07pF、0.12pF となる。

DSSD の Body Capacitance は平行板コンデンサと近似した場合、容量は

$$C = \varepsilon_{si}\varepsilon_0 \frac{S}{d} \tag{4.2}$$

で計算することができる。ε_{si} はシリコンの比誘電率 $(= 11.9)$、ε_0 は真空の誘電率 $(= 8.85\times10^{-12}$ [F/m]$)$、S は DSSD の面積で $25.6 \times 25.66\mathrm{mm}^2$、d は DSSD の厚さで 300μm である。これを用いて計算すると、DSSD の Body Capacitance は 230pF と計算され、100V での実測値 227pF とよく一致している。

Interstrip Capacitance も同様の測定を行った。100V ではストリップ#10 は 2.7pF、#25 は 2.8pF、n^+ ストリップは 4.7pF となった。RCchip は pitch 200μm では 1.1pF、pitch 400μm では 1.2pF となった。

4.4 VA32TA の設定値

VA32TA は様々なパラメータを持っており、セットアップに合った最適な値を見つける必要がある。通常パラメータの設定には 199bit のシフトレジスタを送ることで行なわれる。これは、reg_in、clk_in 信号によって書き込まれる。それにより、VA32TA 内部のメインのバイアスである mbias を抵抗分割して作り出されたバイアス電流によって動作する。各パラメータへのバイアスは VA32TA の各ボンディングパットにつなげることにより、外部からも供給できる。

VA32TA は各パラメータの設定値によってノイズやゲインが変化する。そこで、最適のエネルギー分解能を得るために宇野 [14]、三谷 [3] の設定値を元に同研究室の澤本と共同で測定を行なった。X 線を当てて測定し p^+ 側・n^+ 側の各チャンネルが総合的に優れたエネルギー分解能を表したパラメータを採用した。ここでは結果のみ載せる、詳しくは澤本の卒業論文 [18] を参照してほ

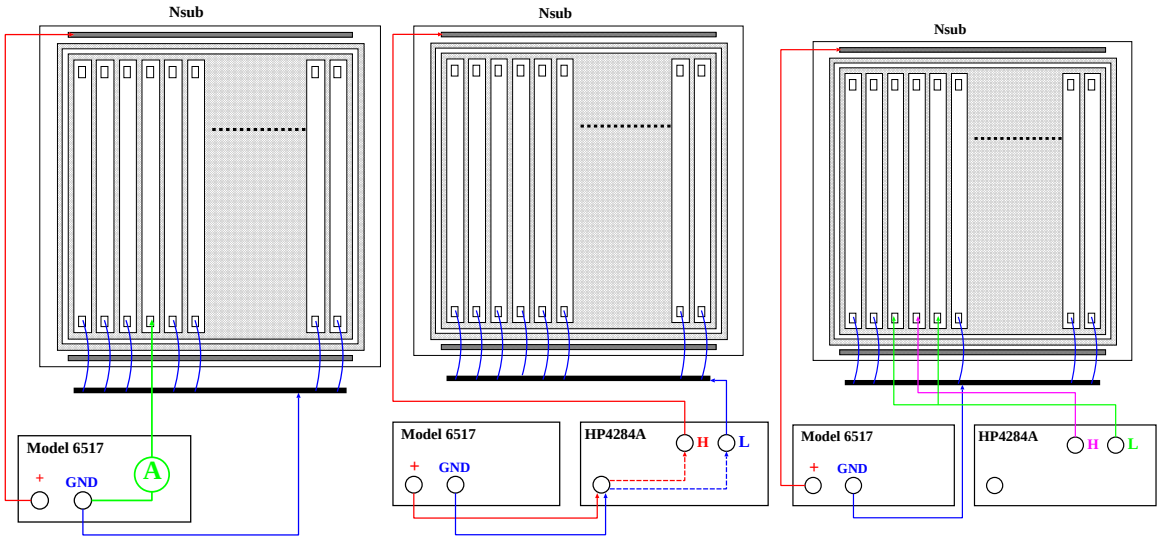


図 4.6: DSSD P400 の暗電流 (左)、Body Capacitance(中央)、Interstrip Capacitance(左) のセットアップ

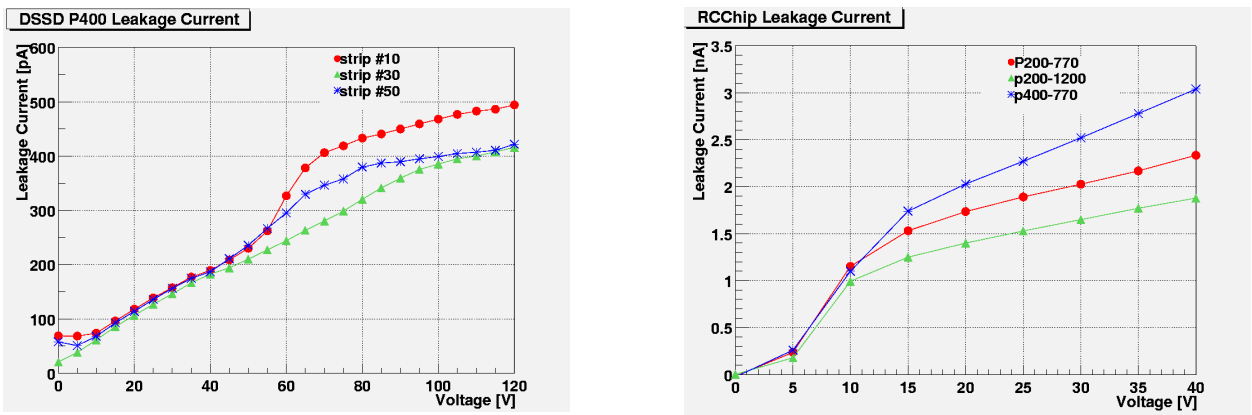


図 4.7: DSSD ストリップ#10、#30、#50(左) と RCchip 全ストリップ (右) の暗電流

しい。主にエネルギー分解能に影響を与えるパラメータついて、今回の測定に用いた値と共に表 4.2 に示す。これらのパラメータを変えることにより、出力波形 (slow shapar) の減衰時定数が変化する。peaking time は 1 ~ 4μsec まで変えられるので、各パラメータごとの出力波形のピーク部分に合わせることができる。低温時においては暗電流は大幅に減るので、検出器の容量によるエネルギー分解能の劣化が支配的になる。そのため、式 4.1 より peaking time が長いほうがエネルギー分解能が良い傾向にある。その他の測定に関する主要なパラメータの設定値を表 4.3 に示す。

4.5 X 線検出

このセットアップでのエネルギー分解能を調べるため、X 線を DSSD の全面に当てて測定した。測定は暗電流を抑え、DC 結合をしている p^+ 側を正常に動作させるため、恒温槽の中に入れ-10 ℃で行なった。トリガーは p^+ 側のみ立てるようにした。p^+ 側に反応があった場合、その DSSD 内の n^+ 側にも反応がある。

表 4.2: 出力波形の減衰時定数に関わるパラメータとその設定値

パラメータ	動作解説	設定値
Sha_bias	slow shaper に流すバイアス電流を設定する	Default-3 13μA
Ifss	slow shaper の feedback resistance に流す電流をコントロールする	Default-1 55nA
Pre_bias	preamplifier に流すバイアス電流を設定する	Default-2 200μA
Vfp	preamplifier の feedback MOS へのバイアス電圧	-701 mV
peaking time	出力波形をサンプルホールドするタイミング	3μsec

表 4.3: その他の測定パラメータ

パラメータ	動作解説	設定値
Tp300	fast shaper の peaking time を 300nsec or 75nsec に設定する	300nsec
Nside	入力信号を positive or negative に設定する	positive
Test_on	test mode を on or off に設定する	off
Enable or Disable	各チャンネルに対して、イベントが起きた場合にトリガーを	p^+ 側 Enable
	立てる (Enable) or 立てない (Disable) を設定する	n^+ 側 Disable
Vthr	トリガー threshold の設定	3000e^-
Current Compensation	CSA の帰還抵抗に暗電流と同じ大きさの電流を流し、暗電流	off
	の流れ込みが大きい場合でも VA32TA を正常に動作させる	

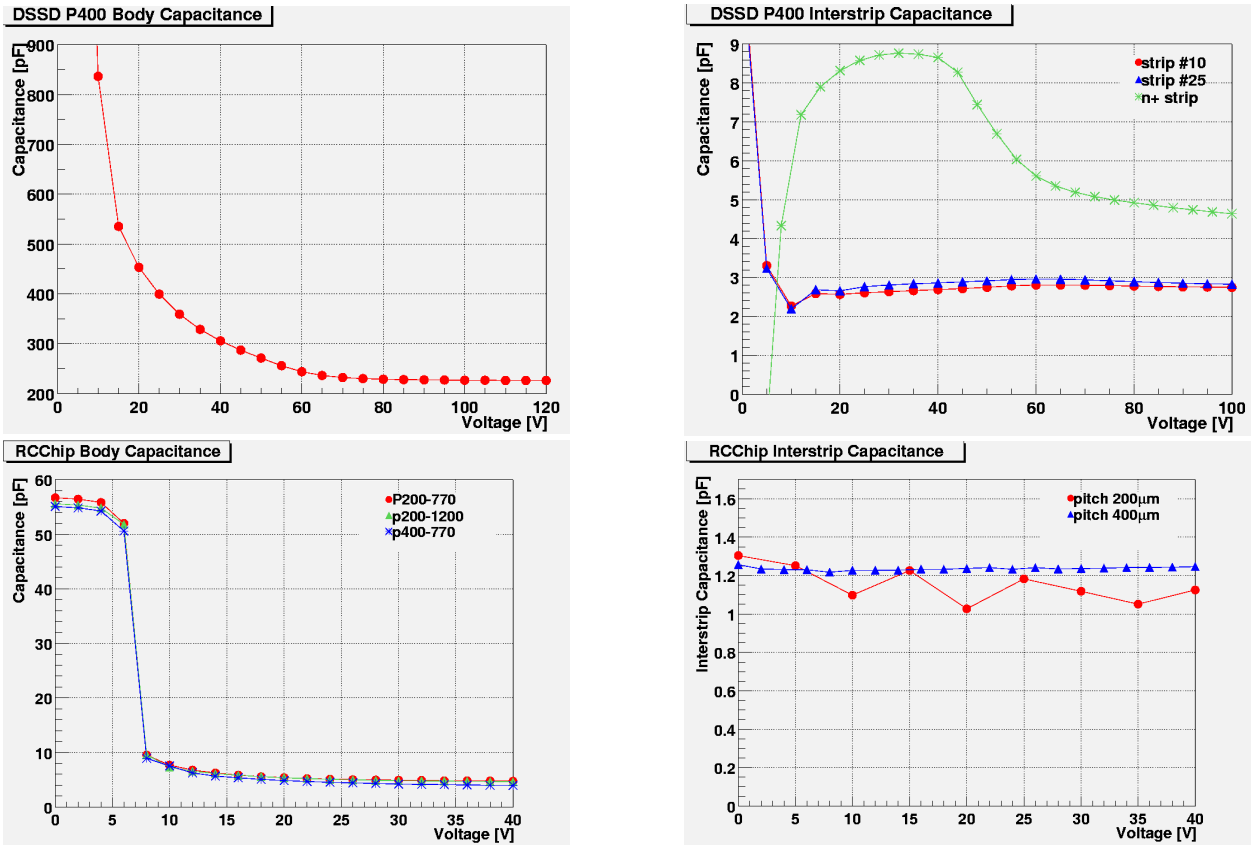


図 4.8: DSSD・RCchip の Body Capacitance(左) と Interstrip Capacitance(右)

4.5.1 解析方法

VADAQ から得られたデータは以下の手順を踏んで解析を行っていく。

1. 各チャンネル毎に存在するオフセット (ペデスタル) の補正
   (a) 各チャンネルについて、全イベントのパルスハイトのうち、最大と最小の値を除き、平均 (mean) と分散 (RMS) を計算する
   (b) 求めた平均から差が $2\sqrt{RMS}$ 以内のイベントだけを選び、再びその最大と最小の値を除き、平均と分散を計算する
   (c) 求まった分散と、前の分散との違いが 1%以下になるまで (1b) を繰り返す。5 回繰り返したらそこで終了
   (d) この時の平均をペデスタルとしてデータから引く
2. 各 VA32TA 毎にのっているコモンモードノイズ (CMN) の除去
   (a) 各イベント毎に、同じ VA32TA 内の全チャンネルのパルスハイトについて、最大と最小の 2 つの値と bad チャンネルを除き、平均 (mean) と分散 (RMS) を計算する
   (b) 求めた平均から差が $\frac{1}{\sqrt{30}}$ 以内のイベントだけを選び、再びその最大と最小の 2 つの値を除き、平均と分散を計算する
   (c) もう一度繰り返す
   (d) 最後の計算に用いたチャンネル数が 10 以下なら、そのイベントは捨てる

表 4.4: 光電 peak と 2 回の測定の差の絶対値の平均

	ADCChannel	差 [ADCChannel]
13.927keV	233.58±0.22	0.24±0.45
17.506keV	292.74±0.17	0.21±0.34
20.895keV	351.14±0.35	0.43±0.71
59.54keV	1018.90±0.53	0.72±1.07

(e) 最後に求まった平均をそのイベントのコモンモードノイズとして、全チャンネルから引く

3. ADC チャンネルをエネルギーに変換する

(a) 各チャンネル事にスペクトルピークをガウシアンでフィッティングし光電ピークの値を求める

(b) exponential 関数で最小自乗法を行い ADC チャンネルとエネルギーの変換式を求める

(c) ADC チャンネルをエネルギーに変換する

4.5.2 ゲインの安定性

このセットアップが測定毎に同じデータが得られるかを調べた。DSSD に ^{241}Am を全面に当てて 1 日おきに 2 回測定を行なった。測定されたスペクトルを図 4.9 に示す。各 VA32TA の全チャンネルのデータを足し合わせである。測定ゲインに揺らぎかないか、p+側の各チャンネルの ^{241}Am の 13.927keV, 17.506keV, 20.895keV, 59.54keV のピークについて Gaussian でフィッティングを行ない、2 回の測定の差を求めた。その結果を図 4.9 に示す。光電ピークと 2 回の測定の差の絶対値の平均 (上下 5 つのデータは除去) を表 4.4 に示す。測定毎で誤差以上の揺らぎが見えるが、~ 0.1%のしか変化しておらず、測定毎における gain の揺らぎはほぼ無いと言える。

4.5.3 Energy calibration

エネルギー分解能が角分解能に大きな影響を与えることは前から述べている。そのため、ADC チャンネルをエネルギー分解能に比べて無視できるような精度でエネルギーに変換する必要がある。^{241}Am と ^{57}Co の光電ピークを使い 1 次関数 (E=a*ch+b) でフィッティングを行なった (図 4.11)。その 1 次関数に実験での光電ピーク (ADCChannel) を代入した値 [keV] と各光電ピークの理論値 [keV] との差 (絶対値) を図 4.12 に示す。その差の平均 (上下 5 つのデータは除去) を表 4.5 にまとめた。122keV では平均 0.5keV のずれとなる。これは §4.5.5 で求めた 122keV での FWHM ~ 1.3keV と比べずれが大きすぎる。そこで、E=a-b*exp(-ch/c) という関数で同様にフィッティングを行ない Energy calibration をした。関数値と実測値の差が ~ 0.1keV 以下となっており exponential 関数はよく表現していると言える。exponential 関数になっているのは feedback resistor の non-linearity が原因だと思われる。

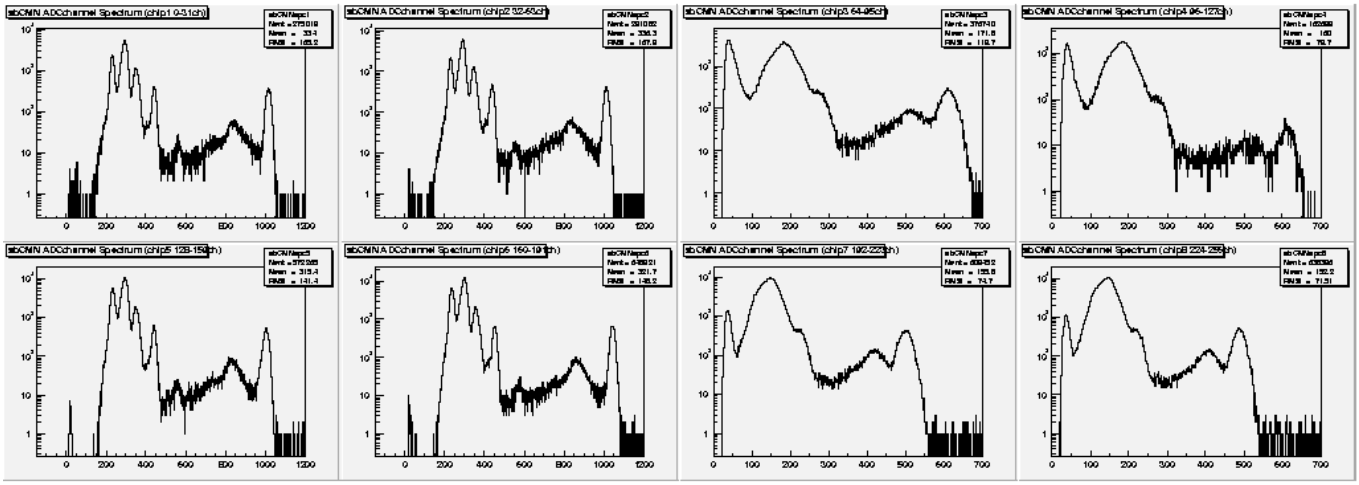


図 4.9: 各 VA32TA の全チャンネルを足し合わせた ^{241}Am のスペクトル。縦軸:カウント数、横軸:ADCChannel。右から 59.5keV、26.3keV、20.9keV、17.5keV、13.9keV のピーク

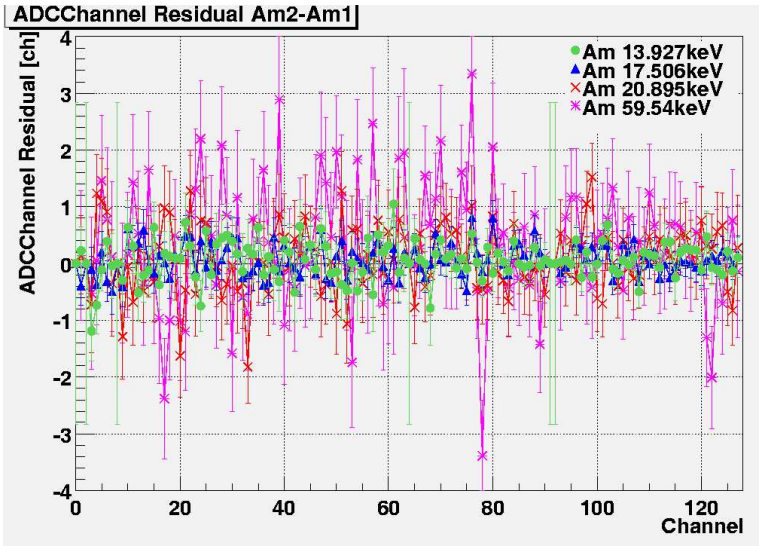


図 4.10: 2 回の測定の p^+ 側の各 ^{241}Am のピーク位置の差

表 4.5: 一次・exp 関数値と実測値の差の絶対値の平均

	一次関数 差 [keV]	exp 関数 差 [keV]
^{57}Co 14.4keV	0.131	0.018
122.06keV	0.507	0.017
^{241}Am 13.927keV	0.185	0.057
17.506keV	0.021	0.049
20.895keV	0.050	0.027
59.54keV	0.464	0.021

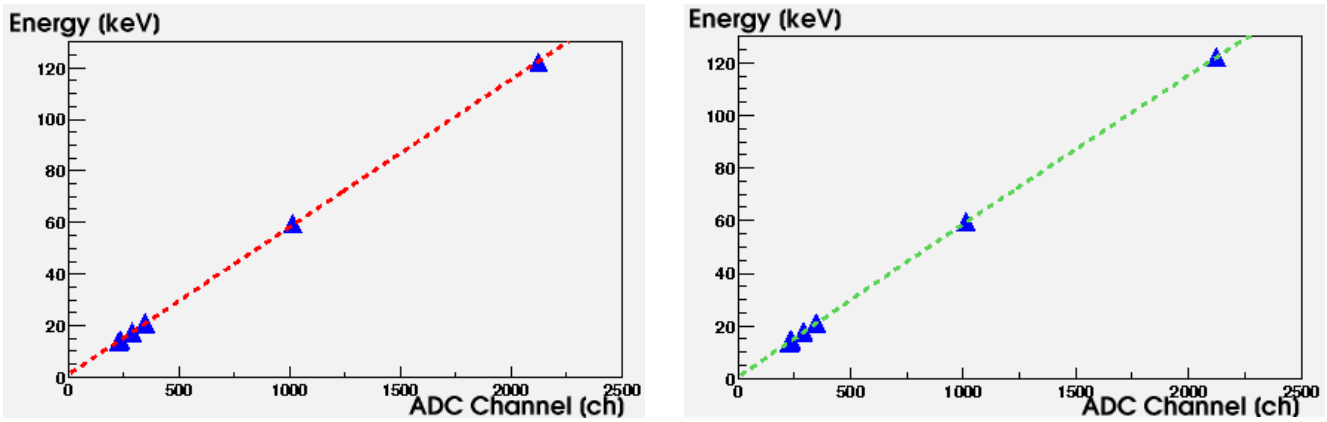


図 4.11: ^{57}Co と ^{241}Am の光電ピークへフィッティング。左：一次関数、右：exp 関数

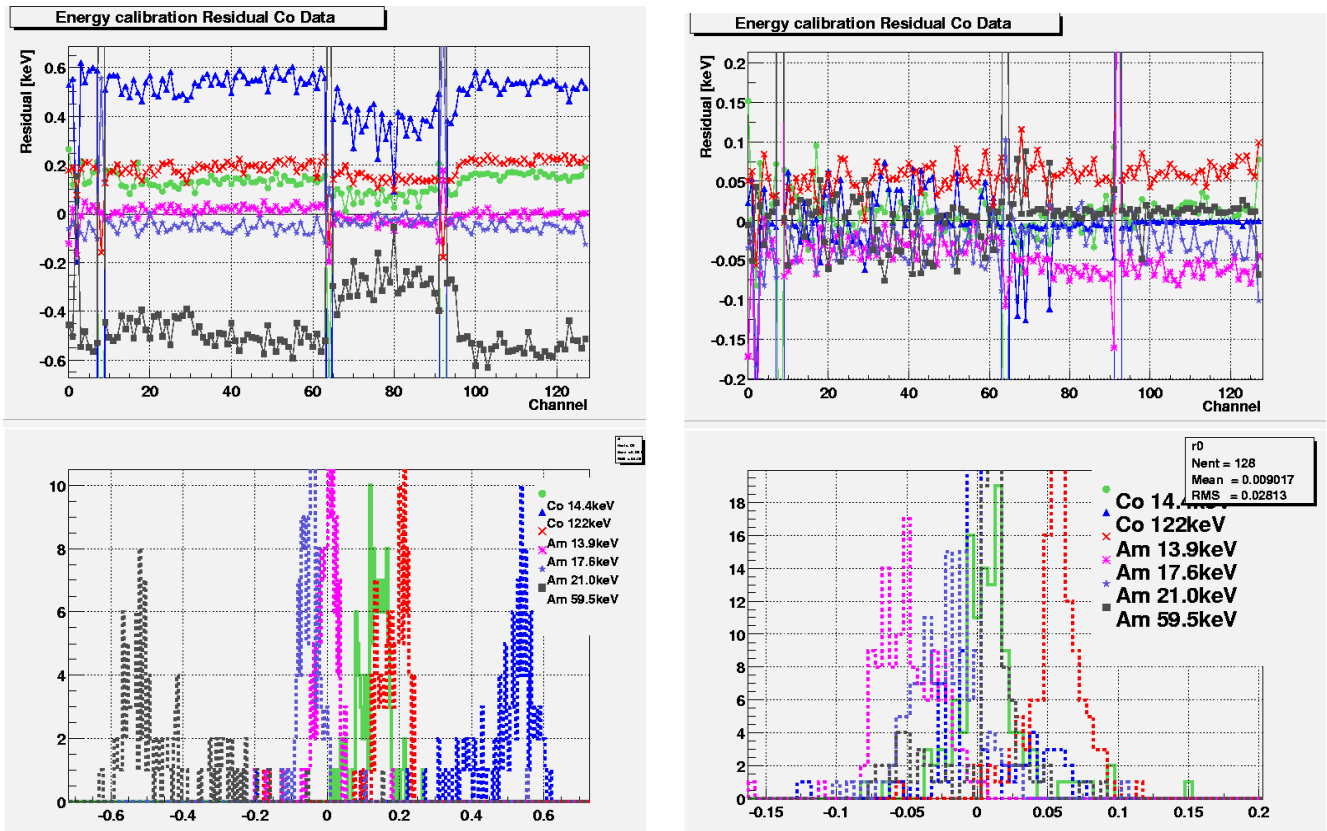


図 4.12: 各光電ピークの理論値 [keV] との差 (絶対値)。左：一次関数。右：exp 関数

表 4.6: p^+ ストリップと n^+ ストリップの ^{57}Co:122keV の ADCChannel の比と、電荷収集効率 ε

	RCchip type	C_{cupl} [pF]	計算値	測定値
DSSD-1 chip3	P200-1200 Ltype + P400-770 Ltype	34, 54	0.63	0.57
chip4	P200-1200 Htype + P400-770 Htype	34, 54	0.63	0.57
DSSD-2 chip7	P200-770 Ltype + P200-770 Ltype	22, 22	0.46	0.48
chip8	P200-770 Ltype + P200-770 Ltype	22, 22	0.46	0.44

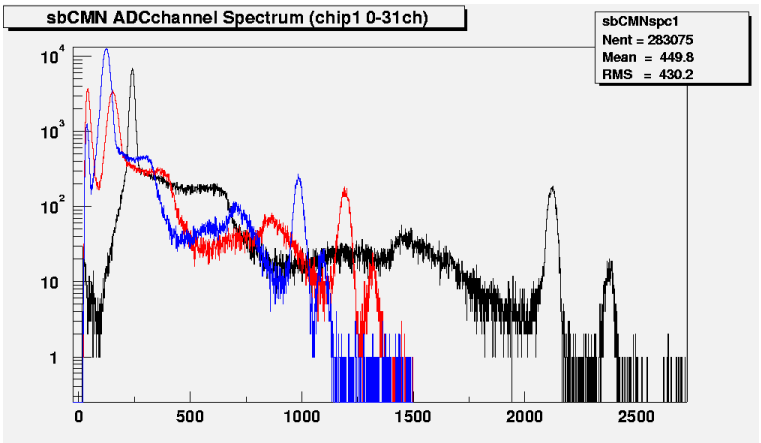


図 4.13: p^+ 側 chip1(黒線) と、n^+chip3 P200-1200 Ltype + P400-770 Ltype(赤線)、n^+ 側 chip7 P200-770 Ltype + P200-770 Ltype(青線) の ^{57}Co のスペクトル

4.5.4 RCchip による電荷損失

n^+ 側は RCchip を用いて AC カップルしている。通常の CSA などは検出器から得られた電荷を損失無く収集するために数 μF と大きな容量を備えている。しかし、RCchip は構造上大きなカップリングコンデンサを形成することが困難なため、表 4.6 からわかるよう小さい値となっている。よって、カップリングコンデンサに対してして DSSD や RCchip の容量が無視できない。検出器で生成された電荷 Q_0、VA32TA のプリアンプまで到達する電荷を Q とすると、電荷収集効率 ε は、

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C_{couple}}{C_{couple} + C_{DSSD} + C_{RC}} \tag{4.3}$$

で表せる [19]。この式より求めた ε の値を表 4.6 に表す。実際に ^{57}Co で測定したスペクトルを図 4.13 に示す。黒線は p^+ 側の chip1、赤線と青線はそれぞれ n^+ 側の chip3 と chip7 のの全チャンネルを足し合わせたスペクトルである。p^+ 側の chip1 と n^+ 側の chip の 122keV の ADCchannel の値の比を表 4.6 に示す。計算値と実験値がよく一致している。n^+ 側は電荷損失分だけ S/N 比が悪くなり、エネルギー分解能を劣化させる。

4.5.5 エネルギー分解能

これまでの結果を踏まえ、このセットアップでのエネルギー分解能を調べる。DSSD 全体に ^{57}Co を当て測定を行なった。§4.5.1 の解析手順を踏んで解析した結果の全チャンネルと各 chip 毎の全チャ

表 4.7: 各チャンネル毎のエネルギー分解能 (FWHM) を各 VA32TA 毎に上下 2 つのデータを除き平均した実験値と理論値。理論値は () 内に示している。単位は keV。

	type	ノイズ	14.4keV	122keV
DSSD-1	chip1 p^+	1.02 (0.90)	1.14±0.03 (0.91)	1.31±0.04 (1.03)
	chip2 p^+	1.01 (0.93)	1.12±0.02 (0.95)	1.34±0.02 (1.06)
	chip3 n^+	4.07 (2.06)	4.01±0.14 (2.06)	4.17±0.10 (2.19)
	chip4 n^+	4.66 (2.10)	4.53±0.28 (2.10)	4.47±0.12 (2.23)
DSSD-2	chip5 p^+	1.16 (0.93)	1.26±0.02 (0.95)	1.37±0.05 (1.06)
	chip6 p^+	1.12 (0.93)	1.18±0.01 (0.95)	1.34±0.02 (1.06)
	chip7 n^+	4.14 (2.83)	3.84±0.07 (2.88)	4.16±0.09 (3.06)
	chip8 n^+	4.07 (2.83)	3.69±0.07 (2.88)	4.20±0.10 (3.06)

ンネルを足し合わせのスペクトルを図 4.14 に示す。全チャンネルのスペクトルで 111 ~ 127ch が空白なのは deadchannel だからである。その光電ピークを Gaussian でフィット (図 4.15) し FWHM を求めた。その結果を図 4.16 に示す。この FWHM を各 VA32TA 毎に上下 2 つのデータを 捨てて平均した値を表 4.7 に示す。この表には各チャンネルの零点付近のピークから求めた FWHM をノイズとしてのせている。

この測定値が妥当がどうか、§2.3 で考察した電気回路系のノイズの理論値を考える。VA32TA の場合電気回路系雑音は、ジョンソンノイズは式 2.7、ショットノイズは式 2.8、アンプノイズは式 4.1 で表せる。バイアス抵抗は表 4.6 にある値をいれ、暗電流と容量は §4.3 で測定した値を使う。暗電流は約 7.5 ℃毎に 1/2 になる事を考慮にいれ、計算した値を表 4.7 のノイズの括弧内に示す。p^+ 側は理論値と良く一致しており、性能を良く引き出せている。統計的なエネルギー分解能の劣化は §2.4 より

$$\frac{\Delta E}{E} = 2.355\sqrt{\frac{F}{N}} = 2.355\sqrt{\frac{F}{E/\varepsilon_{Si}}} \tag{4.4}$$

と表せる。ここで F はファノ因子でシリコンの場合は ~ 0.1 とする。E は光子のエネルギーで、ε_{Si} はシリコンでの一対の電子ホール対を作る平均エネルギー損失で ~ 3.65eV である。光子のエネルギーを 14.4・122keV として計算し、電気回路系の雑音と合わせた理論値を表 4.7 の括弧内に示す。n^+ 側は電荷損失の効果も入れてあるが、あまり一致していない。VA32TA のパラメータによってエネルギー分解能は少しは変わりうるが、今回のパラメータは p^+ 側が優れたエネルギー分解能になるように設定してある。そのため、n^+ 側に対して最適になっていない可能性がある。パラメータの変数が多く全てを試したわけではないので、今後変更によって改善がみられるかもしれない。

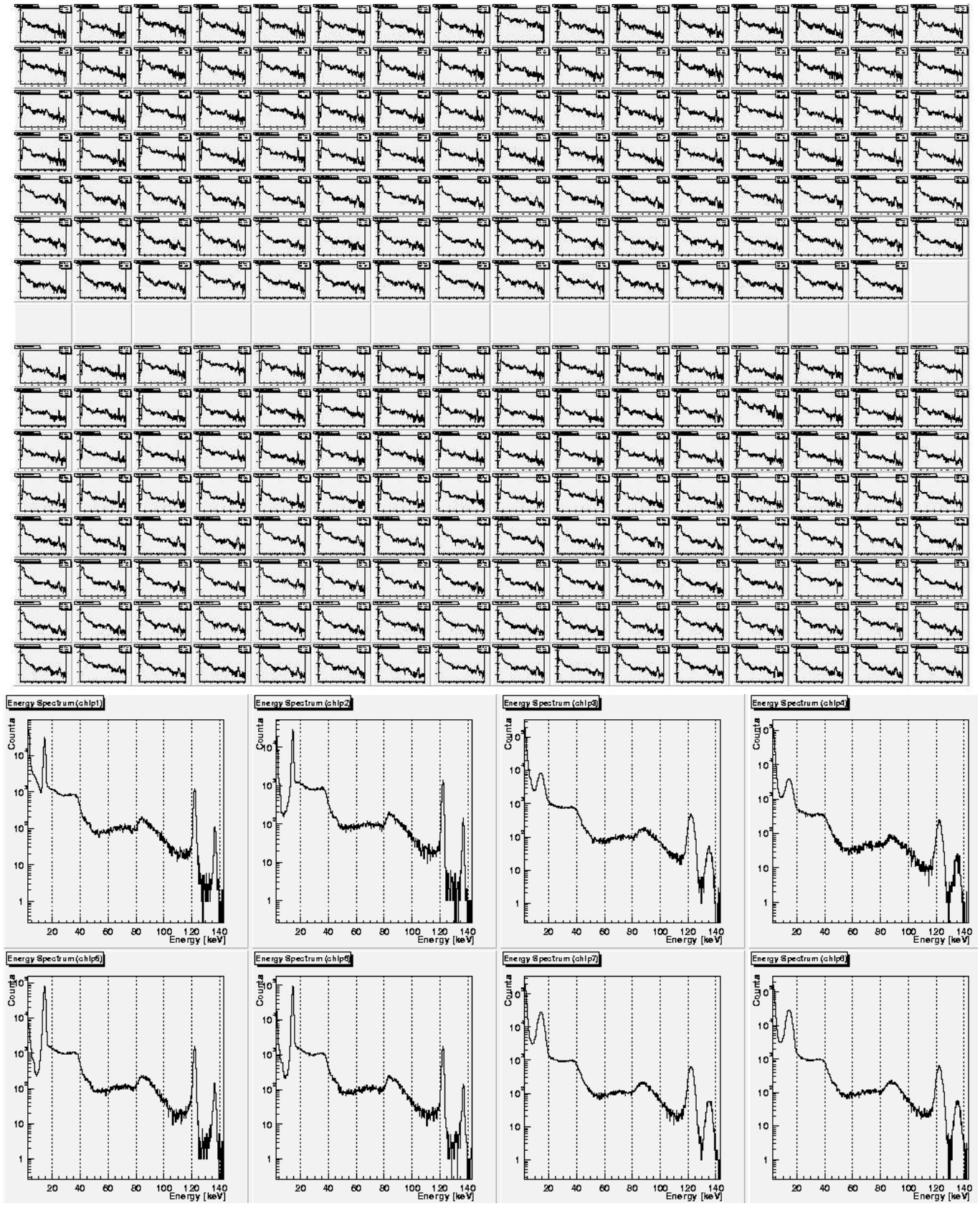


図 4.14: ^{57}Co の全 256 チャンネル (上) と各 chip 毎の全チャンネルを足し合わせ (下) のスペクトル。

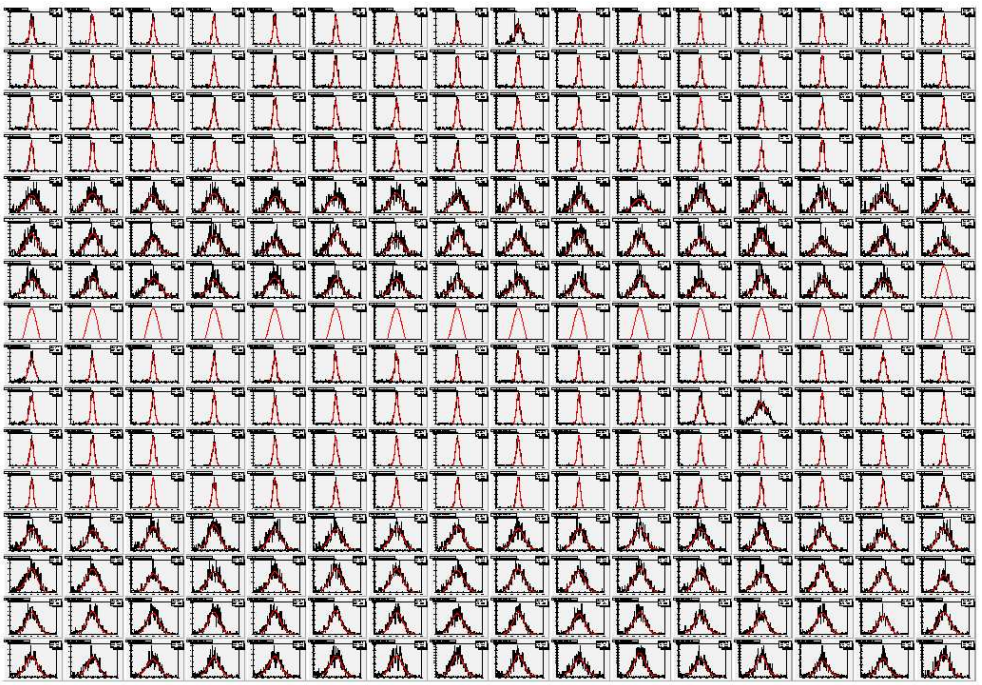


図 4.15: ^{57}Co 122keV のガウシアンフィッティング。

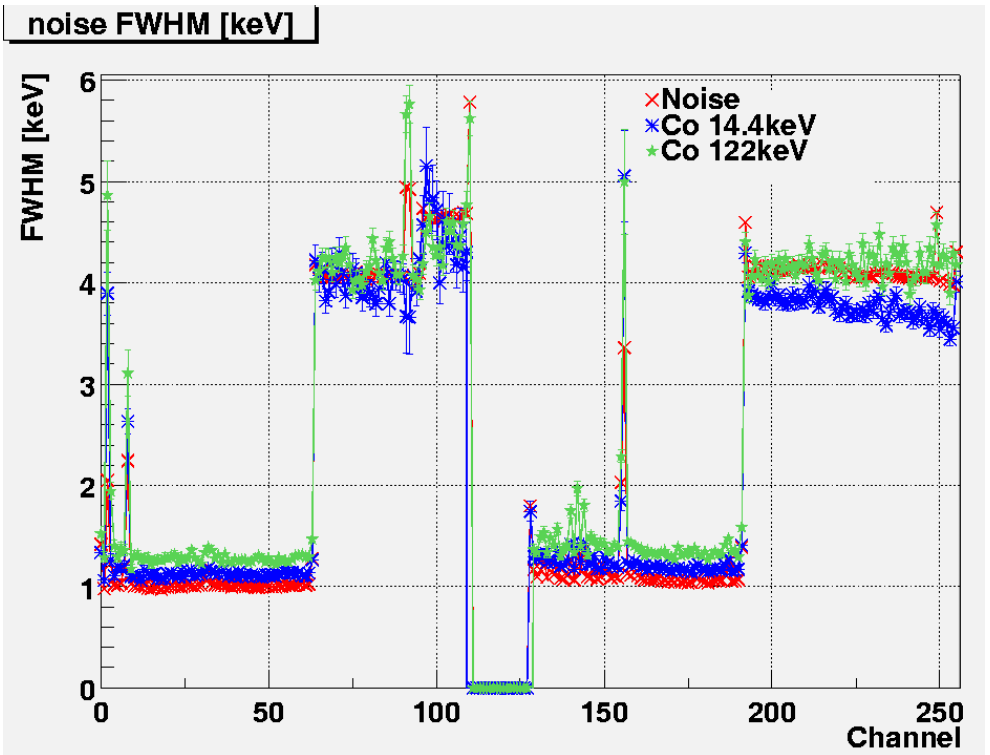


図 4.16: 各チャンネルのノイズと ^{57}Co 14.4keV, 122keV エネルギー分解能。

第5章　2層DSSDで構成したコンプトンカメラ

4章では優れたエネルギー分解能を持つDSSD多チャンネル読み出しセットアップの構築を行なった。この章では、前章に構成したDSSD-1とDSSD-2を並べ、2層のコンプトンカメラを構成する。そして、遠方から線源を照射しコンプトン再構成を行なうことによりその方向が特定できるか、またその時の角分解能を求めたを試みた。

5.1　セットアップの構築

5.1.1　コンプトン再構成に適した線源の決定

コンプトンカメラの検出原理は§2.5で述べた。線源への方向はコンプトン運動学から

$$cos\theta \quad = \quad 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2} \tag{5.1}$$

となる。この式より、2点で反応したエネルギーとその位置が判れば方向が求められる。今回はコンプトン散乱したのち、散乱光子の全エネルギーが光電吸収されるイベントを用いる。実験を行なうにあたり、このようなイベントの数を十分に確保でき、良い角分解能を得る線源のラインを選ぶ必要がある。Doppler Broadeningはエネルギーを高くするほど小さくなるため、エネルギーの高い線源のラインが好ましい。DSSDの厚さは300μmなので、シリコン300μmに対する反応確率と、代表的な線源のラインのコンプトン散乱時の散乱角と反跳電子のエネルギーの関係を図5.1に示す。シリコン厚さ300μmでは60keVからコンプトン散乱する確率が光電吸収する確率を上回り、1MeVまで~1%と変わらない。よって、十分なイベント数を確保するためには散乱光子のエネルギーが十分光電吸収できる確率である事が望まれる。^{241}Amの59.5keVのラインは散乱光子のエネルギーが50~60keVと十分光電吸収できるエネルギーにあるが、反跳電子のエネルギーが0~10keVと小さい。p^+ストリップ側のthrehsoldは~5keVなので90°以上の散乱については分解できるが、n^+ストリップ側のthresholdは~10keVなので雑音との分解が困難で散乱位置の判別ができない。^{137}Csの662keVのラインは散乱する確率は^{241}Amや^{57}Coと変わらないが、散乱光子のエネルギーが100~500keVと大きすぎるため、十分な数の光電吸収を見込めない。^{57}Coの122keVのラインは散乱光子のエネルギーが80keV~122keVと光電吸収できるレベルにあり、落すエネルギーが0~40keVと50°以上でノイズと分解できる。以上の理由により^{57}Coを使用する。

5.1.2　コリメータのセットアップ

線源に用いる^{57}Coは、日本アイソトープ協会402型で線源部が6ϕ(mm)になる。線源は点源に近いほうがよいので線源の付近で鉛でコリメートをして測定を行う。鉛コリメーターの厚さは2mm、穴の大きさとDSSDと鉛コリメーターとの間隔は線源の強さとの兼ね合いで、十分にイベントを貯めることができる2ϕ(mm)と55.4mmとした。この鉛コリメーターをDSSDの中心に来るように置いた。DSSDの上から見ると鉛コリメータの穴は~2°に広がって見える。実験の読み

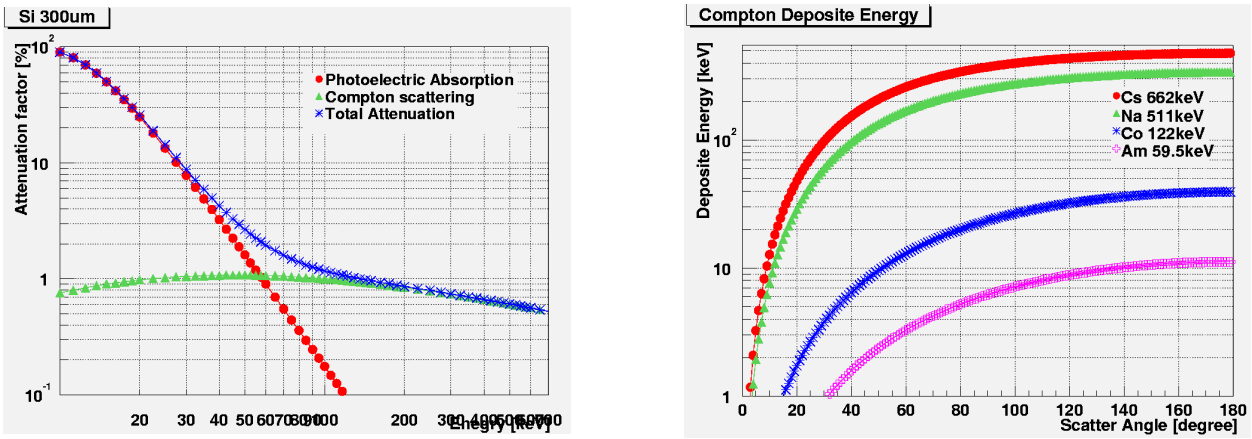


図 5.1: エネルギーに対するシリコン 300μm 厚の各反応確率 (左) と、各線源のラインエネルギーのコンプトン散乱角に対する反跳電子のエネルギー (右)

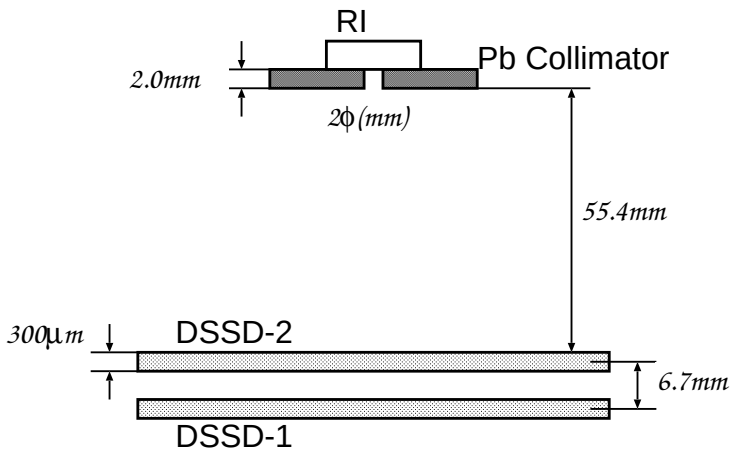


図 5.2: コリメート実験のセットアップ

出しセットアップ図 5.2 に示す。コンプトン散乱後、次の DSSD の立体角を増やすためセットアップが許す限り DSSD 間を狭くした。読み出しのセットアップは §4.2 と同じである。測定は恒温槽に入れ-10 ℃にして行った。

5.2 解析方法

コンプトン再構成 (図 5.3) をするのに、以下の手順を踏んで解析を行っていく。^{57}Co の 122keV の光子がコンプトン散乱し、散乱光子の全エネルギーが光電吸収されたイベントを扱う。図 5.1 より、散乱光子のエネルギーは反跳電子のエネルギーより必ず大きくなる。

1. 反応位置とエネルギーの収得
   (a) VADAQ で収得したデータを §4.5.1 と同じ解析手法でエネルギーに変換をする
   (b) イベント毎に p^+ 側と n^+ 側、それぞれ一番目と二番目に大きなエネルギーとそのチャンネルを収得する (e1, p^+ch1, n^+ch1), (e2, p^+ch2, n^+ch2)

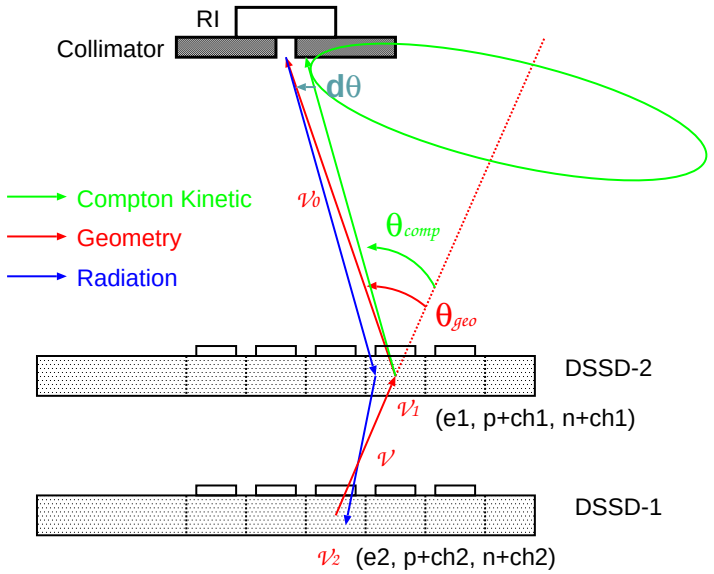


図 5.3: コンプトン運動学から θ_{comp}、ジオメトリから θ_{geo} を導く

2. ^{57}Co の 122keV の光子がコンプトン散乱→光電効果となるイベントの選別
   (a) ch1 と ch2 が隣合っている場合、スプリットイベントの可能性があるので削除する
   (b) 二番目に大きなエネルギー (e2) が、10keV<e2<45keV(n^+ の threshold と、図 5.1 より、e2 はこれ以上のエネルギーは有り得ない)
   (c) p^+ 側と n^+ 側で落したエネルギーに開きがある場合 (8keV 以内、n^+ 側 FWHM 4keV ~ 2σ)
   (d) p^+ 側と n^+ 側のチャンネルが同一 DSSD 内に無い場合
   (e) 119.4keV<e1+e2<124.6keV (p^+ FWHM 1.3keV ~ 2σ)
3. コンプトン運動学から θ_{comp}、ジオメトリから θ_{geom} 求める
   (a) ch1, ch2 を xyz 座標 ($\boldsymbol{V}_1$, $\boldsymbol{V}_2$) で表す。xy は p^+ch と n^+ch が交差する中心に、z は厚さの中央とする
   (b) $\boldsymbol{V}$=$\boldsymbol{V}_1$-$\boldsymbol{V}_2$ とし、$\boldsymbol{V}$ を軸とする
   (c) 式 5.1 より、θ_{comp} を求める
   (d) $\boldsymbol{V}$ と、$\boldsymbol{V}_1$ とコリメータの穴を結ぶ線 ($\boldsymbol{V}_0$) のなす角を θ_{geo} とする
   (e) θ_{comp}-θ_{geom} = $d\theta$ を求めて 2 つの gaussian でフィッティングし、角分解能を求める
4. コンプトン再構成
   (a) $\boldsymbol{V}$ を軸とし、θ_{comp} だけ傾けた線をランダム角で回していき、点で円を描く
   (b) それをコリメータの穴のある平面上に投射する
   (c) 円環を重ねていき、方向を特定する

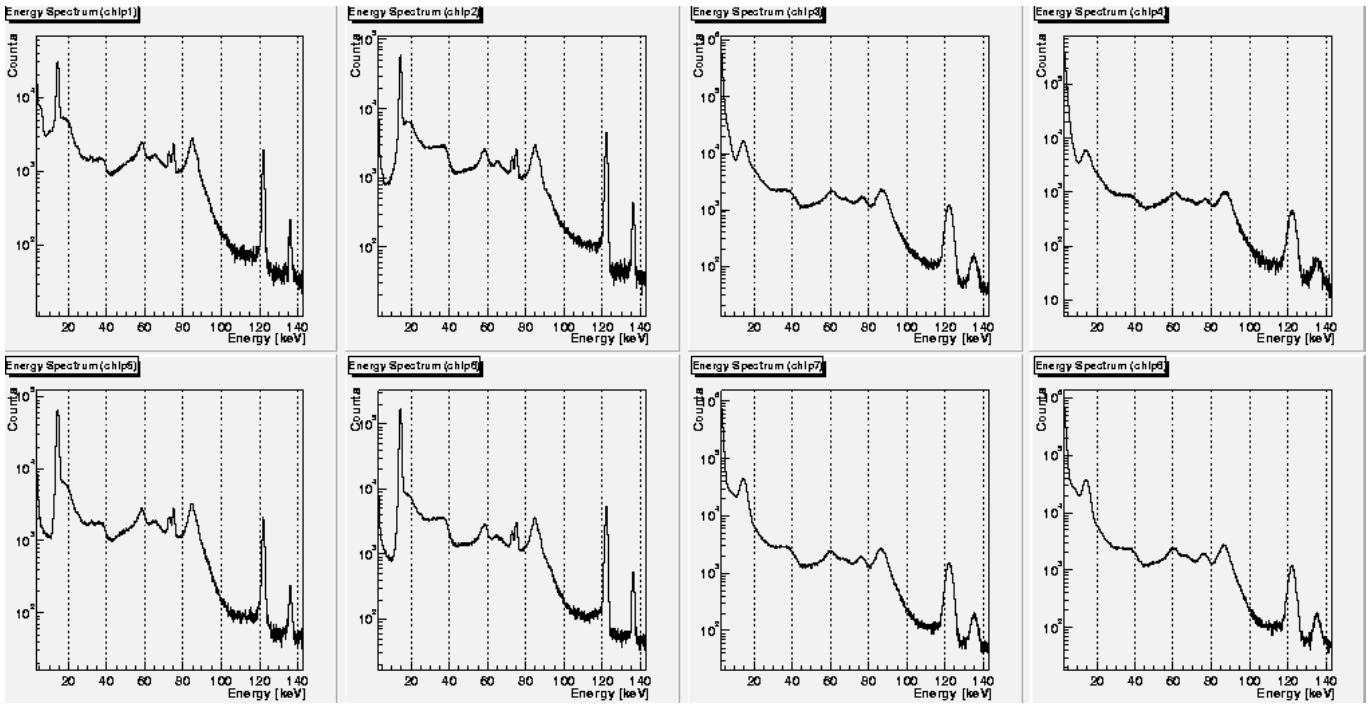


図 5.4: 各 VA32TA ごとに、全チャンネルのデータを足し合わせた、Pb コリメーターを用いた測定での ^{57}Co のスペクトル

5.3 実験結果

5.3.1 エネルギー分解能

Pb コリメータを用いた測定でのスペクトルを図 5.4 に示す。スペクトルは各 VA32TA の全チャンネルのデータを全て足し合わせてある。^{57}Co の 14.4keV、122keV、136keV の他に Pb の K_{α_1} 74.97keV、K_{α_2} 72.80keV がきちんと分解されて見えている。~85keV 付近のピークは Pb の K_{β_1} 84.94keV、K_{β_1} 87.30keV、K_{β_1} 84.45keV と ^{57}Co の 122keV の後方散乱ピーク (~82.6keV) の足し合わせである。~58keV と ~65keV 付近のピークは、それぞれ Pb の K_α と K_β の後方散乱である。

エネルギー分解能はストリップ 1 本づつではカウント数が少ないため、図 5.4 にあるように各 VA32TA 毎に全てのチャンネルを足し合わせたスペクトルを Gaussian でフィッティングを行ない求めた。その FWHM を表 5.1 に示す。Pb コリメーターを置いていない §4.5.5 とほぼ同じ FWHM となった。両面シリコンストリップ検出器の多チャンネル読み出しにおいて、^{57}Co の 122keV のラインで FWHM 1.22keV を達成した事は、世界でも類を見ない優れた結果だと思われる。

5.3.2 2 層 DSSD で構成したコンプトンカメラの角分解能

今回の測定ではイベント毎に p^+ 側の一番目と二番目に大きなエネルギー (e1, e2) を収得している。この e1 と e2 をそれぞれ縦軸と横軸にした 2 次元図を図 5.5 に示す。左斜め上がりの (e1+e2)$\simeq$122keV のラインが綺麗に見えている。これは ^{57}Co の 122keV の放射線がコンプトン散乱を起こした時の反跳電子と、その後散乱光子が光電吸収されたエネルギーの足し合わせだと思われる。角分解能を算出するのにはこれらのイベントを用いる。§5.2 の解析を行い、θ_{comp}-$\theta_{geom} = d\theta$ を求め

表 5.1: コリメータ実験の各 VA32TA 毎に全てのチャンネルのデータを足し合わせたスペクトルでのエネルギー分解能 (FWHM)。

	type	14.4keV	122keV
DSSD-1	chip1 p^+	1.13±0.01	1.22±0.01
	chip2 p^+	1.12±0.00	1.23±0.01
	chip3 n^+	4.09±0.03	3.80±0.03
	chip4 n^+	4.60±0.10	4.15±0.07
DSSD-2	chip5 p^+	1.26±0.00	1.37±0.02
	chip6 p^+	1.19±0.00	1.30±0.01
	chip7 n^+	3.82±0.02	3.93±0.03
	chip8 n^+	3.69±0.03	3.90±0.03

表 5.2: 2 つの Gaussian のフィッティングパラメータ。

A_1	17.80±4.49
θ_1	-0.16±0.43
σ_1	7.20±0.74
A_2	19.55±4.64
θ_2	-0.46±0.41
σ_2	2.85±0.57

た結果を図 5.6 に示す。左図の赤線は θ_{comp}、青線は θ_{geom} の分布、右図の黒線は $d\theta$ である。$d\theta$ はその形に合うように 2 つの Gaussian の重ね合わせ $f(\theta) = A_1 * exp(-\frac{1}{2}(\frac{\theta_1-\theta}{\sigma_1})^2) + A_2 * exp(-\frac{1}{2}(\frac{\theta_2-\theta}{\sigma_2})^2)$ でフィッティングを行なった。その 2 つの Gaussian(図 5.6 左の赤線) の FWHM を角分解能とすると 8.02° ±2.86° と求められた。この関数のフィッティングパラメータを表 5.2 に示す。図 5.6 左のピンク色の点線はそれぞれの Gauusian である。

5.3.3 コンプトンイベントの解析

角分解能を求めるのに用いた、^{57}Co の 122keV のコンプトン散乱→光電効果のイベントについて解析を行なう。そのエネルギーを足し合わせた (e1+e2) ピークを Gaussian でフィッティングを行なった結果を図 5.7 に示す。ピークは 121.9±0.0keV、FWHM は 1.81±0.06keV となった。光電ピークの値とのずれはほぼ無く、FWHM は p^+ 側の DSSD の各ストリップ毎の FWHM が 1.3keV と考えると、その FWHM は $1.3 \times \sqrt{2} = 1.8keV$ と良く一致する。これらから、§4.5.3 の energy calibration がうまくいっていると言える。

また、コンプトン散乱→光電吸収のイベントがどのような位置で反応しているかを調べた結果を図 5.7 に示す。(1).DSSD-2 でコンプトン散乱し、DSSD-1 で光電吸収されるイベントの割合は 9.9%、同様に (2).DSSD-1 でコンプトン散乱し、DSSD-2 で光電吸収されるイベントの割合は 23.5%、(3).DSSD-1 内でコンプトン散乱し光電吸収される割合が 22.4%、(4).DSSD-2 内では 44.2%となっている。同一 DSSD 内での反応が多い、これは同一 DSSD 内での反応はほぼ 90° に散乱しないといけないため、立体角は小さいが、DSSD を長く飛ぶため反応する確率が高いためだと考えられ

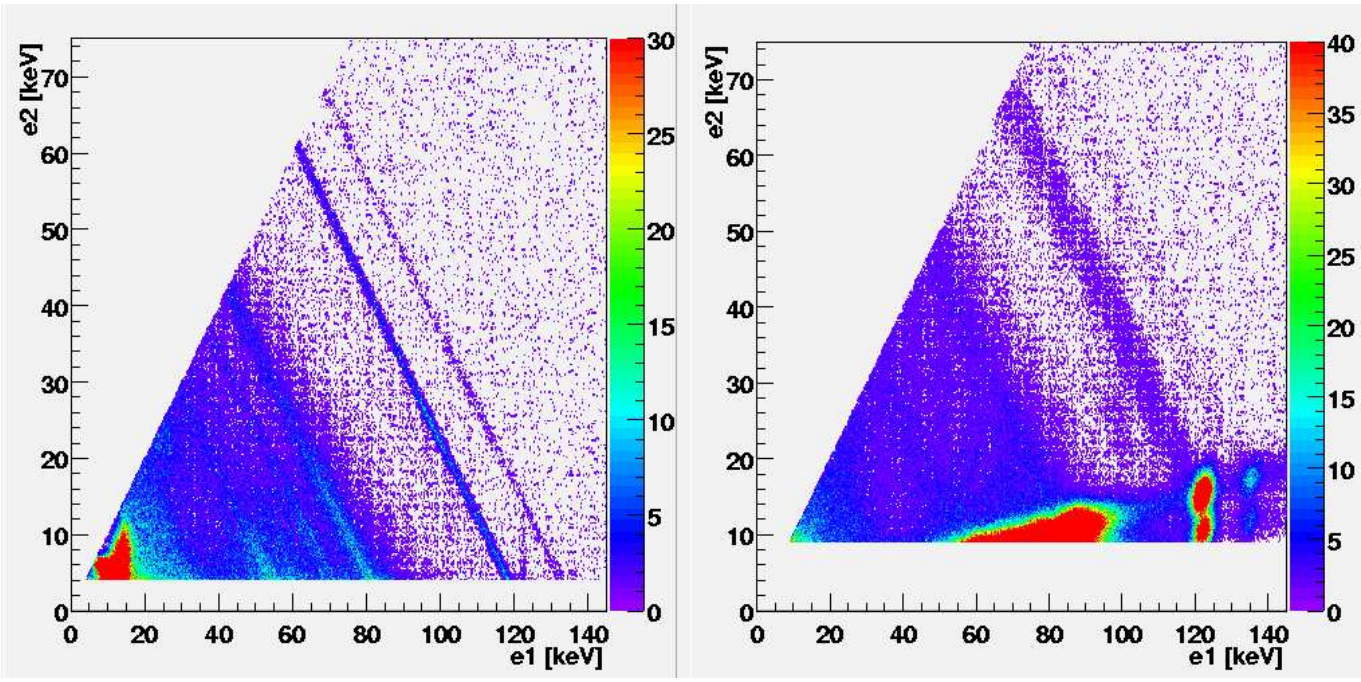


図 5.5: p^+ 側 (左) と n^+ 側 (右) の e1(縦軸) と e2(横軸) の 2 次元図。

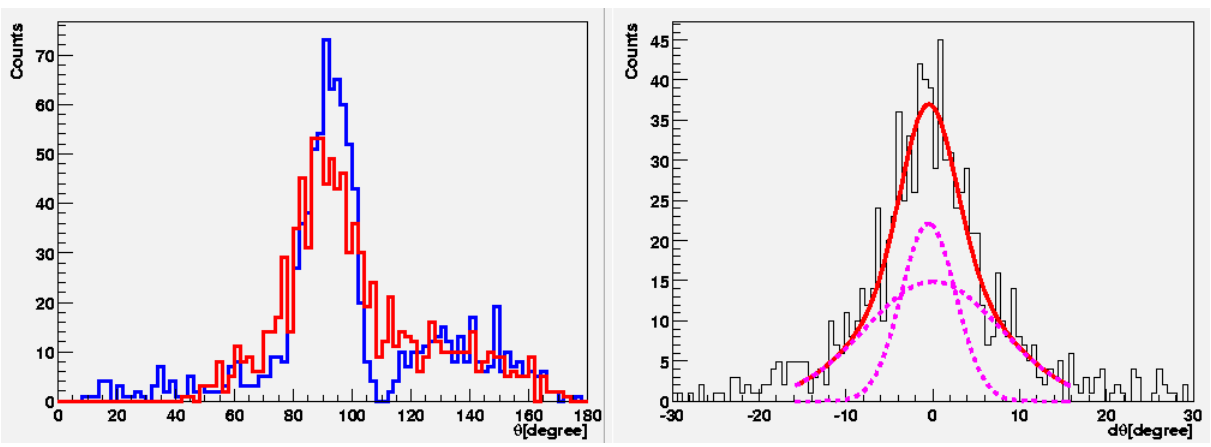


図 5.6: §5.2 の解析から求まった、θ_{comp}(左図赤線)、θ_{geom}(左図青線)、$d\theta$(右図黒線)。右図のピンク色の点線はフィッティングに用いたそれぞれの Gaussian、赤線がその重ね合わせになる。

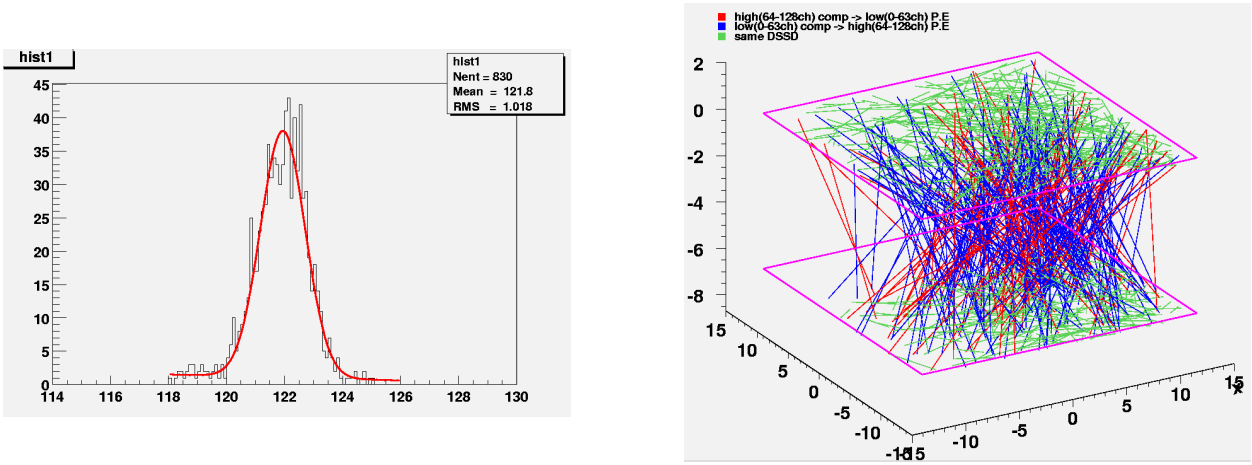


図 5.7: コンプトン散乱→光電吸収のイベントのエネルギーを足し合わせたピーク (左) とその飛跡 (右)。右図において、赤線は DSSD-2(上) → DSSD-1(下)、青色は DSSD-1(下) → DSSD-2(上)、緑線は同一 DSSD 内のイベントを表している。

る。この反応は、図 5.6 の θ_{comp}、θ_{geom}、が ~ 90 ° の頻度が多いのから見られる。(2).DSSD-1 でコンプトン散乱し、DSSD-2 で光電吸収されるイベントの割合が大きいのは、コンプトン散乱角を考えれば前方散乱する確率のほうが大きいために (1) の割合が大きくなるが、散乱後のエネルギーは (2) が小さくなるため光電吸収する確率が大きくなるためだと思われる。

5.3.4 コンプトン再構成

§5.2 の解析の手順でコンプトン再構成を行なった結果を図 5.8 に示す。左図はコンプトン再構成を行い多数の点で描いた円環をコリメーターの穴の高さの XY 平面に投影し、それを重ねていった結果を表している。右図はその XY 平面での多数の点で描いた円環の重なった数を示している。^{57}Co の線源は DSSD の中心にくるように置いてある。円環を重ねていった結果、その集合が中央に集まっており、線源の方向を特定できていると言える。

5.4 Geant4 との比較

上の実験の結果が妥当かどうか検証するために Geant4 で同様のセットアップを構成しシミュレーションを行った。

5.4.1 Geant4

高エネルギー・原子核実験などの分野において、容易に材質や形を選んで放射線と検出器の物理反応を予測できるシミュレーションは必要不可欠な要素である。Geant は高エネルギー粒子検出器をシミュレートするプログラムとして 1974 年に最初のバージョンが開発されて以来、世界各国で多くの研究者に利用されてきた。近年注目を集めているオブジェクト思考技術を用い、C++ 言語でかかれたのが Geant4(geometry and tracking) である。Geant4 は、CERN の主な LHC 実験や、SLAC の BABAR 実験で、本格的な使用が開始されるなど、現在標準となりつつある。今回のシミュレーションには Geant4 ver 5.1 を用いた。この version では Doppler Broadening の効果も取り入れることができる [20]。

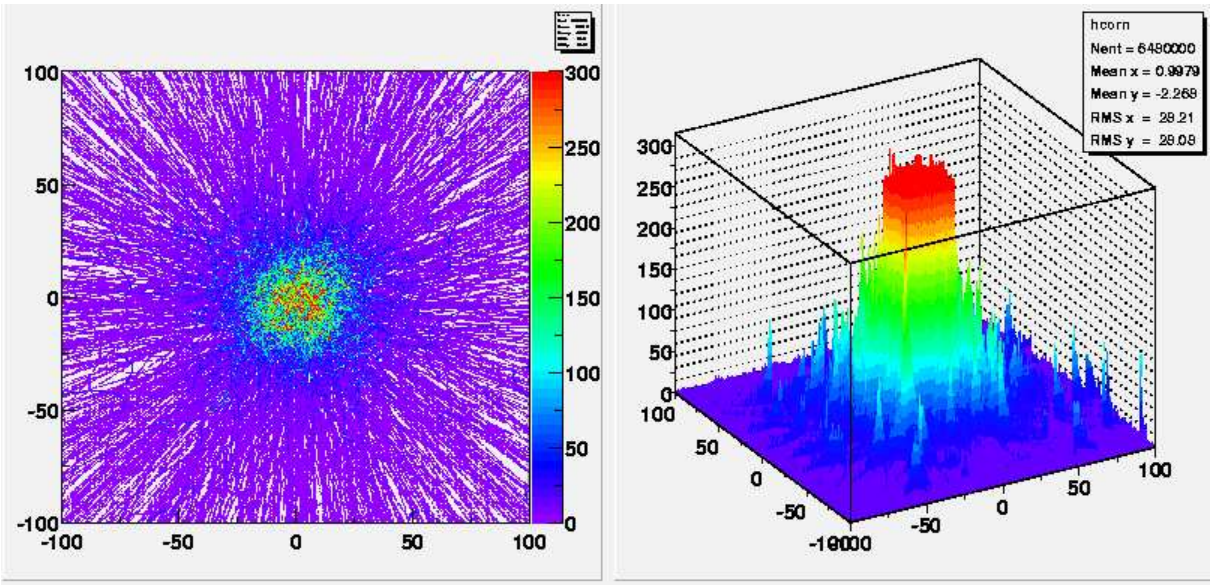


図 5.8: コンプトン再構成した結果

5.4.2 ジオメトリの構築

Geant4 で構成したジオメトリを図 5.9 に示す。マテリアル Si を DSSD に見立て、実験セットアップと同様に 6.7mm の間隔を開けて置いた。厚さは DSSD と同様に 300μm、長さは strip が実際にある範囲で 25.6mm 四方としている。DSSD から gun position までの距離は実験のコリメーターと DSSD 間の距離 55.4mm に、場所は DSSD の中心の真上に置いた。gun position の大きさはコリメーターの穴の大きさ 2ϕ(mm) と、点源とした。gun position からは 122keV のエネルギーを Si に向けて、ランダムに角度を振って入射させている。

5.4.3 解析方法

1. 反応位置とエネルギーの収得
   (a) 各イベントでコンプトン散乱→光電効果を起こし、落したエネルギーのトータルが 122keV になるイベントを収得する。
   (b) その時、落したエネルギー (e1, e2) と位置 (x, y, z) を収得する
2. DSSD への近似
   (a) エネルギー分解能劣化：§5.3.1 でエネルギー分解能 (FWHM) が 1.3keV と求められているので、ランダムな Gaussian で (e1, e2) に付け加える
   (b) 位置分解能劣化：反応位置 (x, y , z) を最寄りのストリップチャンネルの中心に置き換える
3. §5.2 と同様にしてコンプトン運動学から θ_{comp}、ジオメトリから θ_{geom} 求める

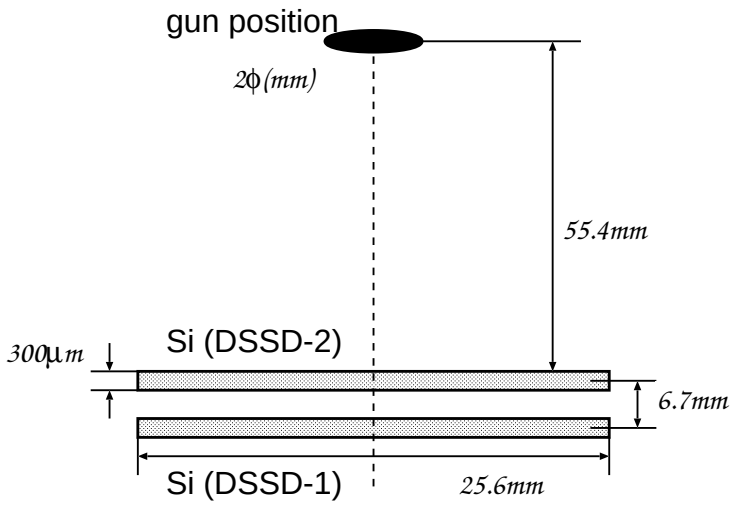


図 5.9: Geant4 で構成したジオメトリ

表 5.3: Geant4 シミュレーションでの角分解能

	点源	2ϕ	実験値
Doppler Broadening	3.42±0.98	5.12±0.84	
Doppler Broadening + FWHM 1.3keV	4.37±3.16	6.88±1.06	
Doppler Broadening + strip	4.17±2.34	7.87±0.83	
Doppler Broadening + FWHM 1.3keV + strip	7.00±1.28	7.92±0.93	8.02±2.86

5.4.4 シミュレーション結果

gun position を点源 (青線) と 2ϕ(赤線) でシミュレートし、§5.4.3 の解析を行ない求めた $d\theta$ を図 5.10 に示す。§5.3.2 と同様に、2 つの Gaussian でフィッティングを行ない、FWHM を角分解能とした。角分解能を表 5.3 にまとめる。Doppler Broadening の影響は、エネルギー分解能や位置分解能の劣化を加える前の点源のデータで見ることができ、$3.42^\circ \pm 0.98^\circ$ となった。2ϕ ではシリコンからみて gun position は $\sim 2^\circ$ と広がっているので、その分 $5.12^\circ \pm 0.84^\circ$ と劣化している。Doppler Broadening を off にしてシミュレートすると $\mathrm{d}\theta$ は 0 となる。実験を模した 2ϕ かつ全ての劣化を加えたシミュレートでは角分解能は $7.92^\circ \pm 0.93^\circ$ となり、実験値の $8.02^\circ \pm 2.86^\circ$ とほぼ一致しており実験をよく再現しているのではないかと思われる。

エネルギー分解能や位置分解能の劣化を加えたデータを見ると、エネルギー分解能や位置分解能による角分解能への影響を Doppler Broadening のレベルまで下げ切れていないことがわかる。また、角分解能も $\sim 8^\circ$ と満足できるレベルではない。今回の測定ではイベント数の確保のためから、122keV という比較的低エネルギーで行なった。 Doppler Broadening やエネルギー分解能による劣化は光子のエネルギーが大きくなれば小さくなっていくと思われる。また、位置分解能による劣化もジオメトリを最適化することにより抑えることができると思われる。

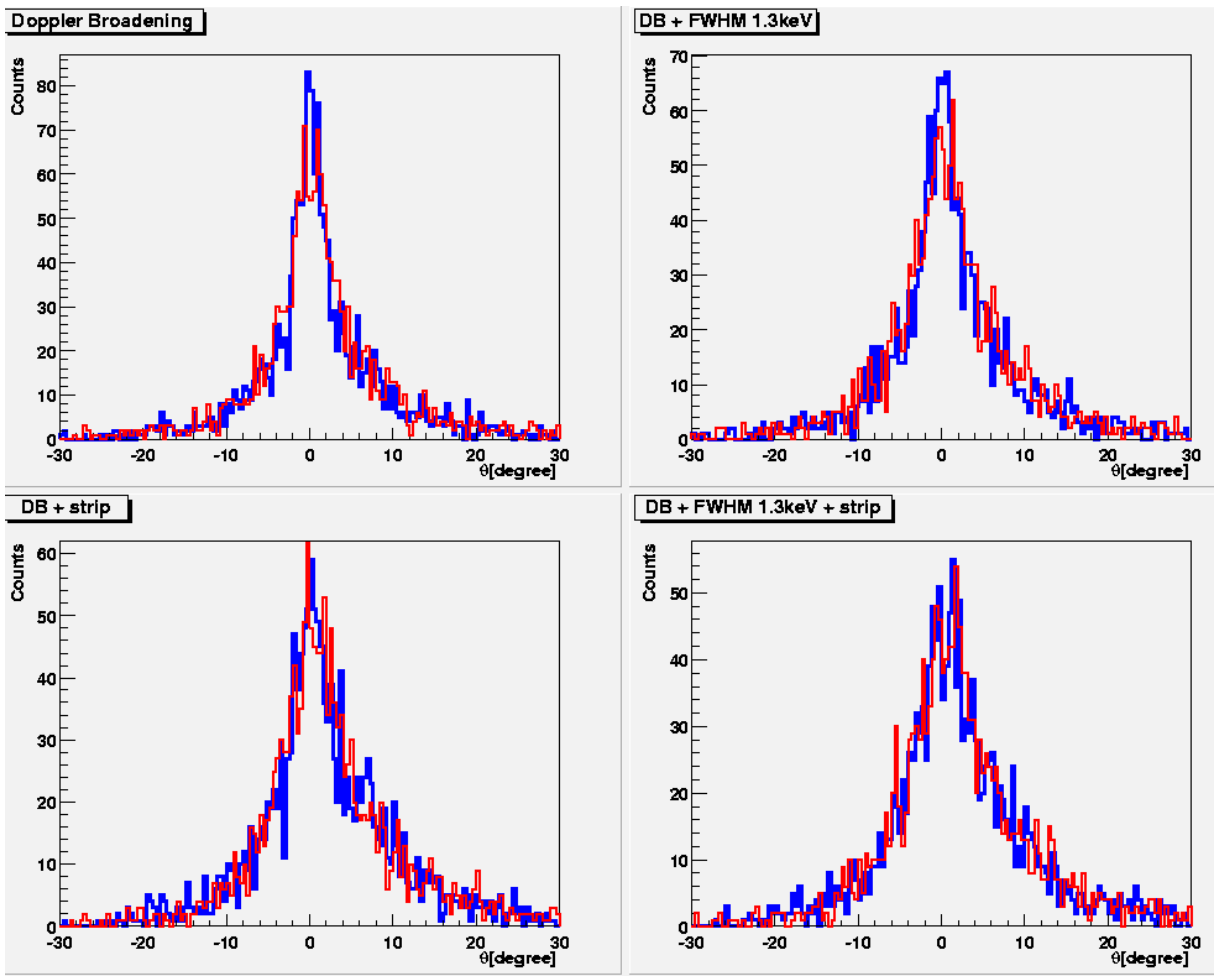


図 5.10: gun position を点源 (青線) と 2ϕ(赤線) でシミュレートした時の角分解能の劣化

第6章　まとめ

本研究では、BGO の読み出しに、新たにアバランシェフォトダイオードを用いて読み出し、エネルギー分解能と threshold の向上を試みてきた。また、DSSD を用いた優れたエネルギー分解能を有する、多チャンネル読み出しの構築を行ない。さらに、DSSD を多層化させてコンプトンカメラを形成し、その角分解能を評価を行なった。その結果についてまとめる。

- 結晶シンチレータ BGO は阻止能が大きく、軟ガンマ線の検出に適している。しかし、BGO は蛍光量が小さいため、従来結晶シンチレータの読み出しに良く使われていた光電子増倍管 (PMT) は、量子効率が ~ 20%と悪くエネルギー分解能の向上には限界がある。これまでの研究で PMT より量子効率 ~ 80%と良いフォトダイオード (PD) で BGO を読み出してきたが、S/N 比が悪く、エネルギー分解能が電気回路系雑音に支配されていた。本研究では新たに、アバランシェフォトダイオード (APD) を用いて BGO を読み出した。APD は、PD と同様に高い量子効率 ~ 80%、磁場への耐性、構造がシンプルで小さい、といった特徴を持つ上に、さらにシリコンのアバランシェ現象を利用して電子, ホールを内部増幅することができ、PD と PMT の両方の利点を持っていると言える。結果、BGO は PMT や PD で読み出すよりも APD で読みだしたほうがエネルギー分解能がよくなり、^{137}Cs662keV でエネルギー分解能が 6.2±0.1%となることを確認した。S/N 比がよいため threshold は ~ 10keV まで測定できることを確認した。また、アクティブシールドを想定した、板状の BGO を読み出したところ、これも PMT で読み出した場合のエネルギー分解能を上回り、15.0±0.1%になることを確認した。これらの測定より、APD と BGO の組み合わせはその大きい阻止能とコンパクトさから、小型で良いエネルギー分解能の MeV 領域の軟ガンマ線検出器が構成できると言える。この組み合わせは、NeXT の SGD のアクティブシールドへの応用も考えている。

- 我々のグループでは宇宙硬 X 線・軟ガンマ線の高感度観測を行なうため、この領域で支配的に起こるコンプトン散乱を利用した半導体多層コンプトンカメラの開発を行なっている。半導体多層コンプトンカメラは高いエネルギー分解能と位置分解能を要求される。そこで本研究では、両面シリコンストリップ検出器と低ノイズ多チャンネル読み出し用アナログ LSI VA32TA を用いて、高いエネルギー分解能を持つセットアップの構築を試みた。VA32TA と DSSD の p^+ 側を DC 結合、低温で動作、VA32TA のパラメータを調整することにより、さらなる低ノイズ化を計った。また、VA32TA のリニアリティを個々のチャンネルで調べることににより、正確な Energy Calibration を行なった。その結果、DSSD の多チャンネル読み出しで、^{57}Co 122keV で 1.22±0.01keV という世界最高水準のエネルギー分解能を達成し目標を十分に果たしたと言える。

- 上記の両面シリコンストリップ検出器を 2 層にしてコンプトンカメラを構成し、その評価を行なった。^{57}Co 122keV の光子がコンプトン散乱を起こし、その後光電吸収されたイベントを用いてコンプトン再構成を行なった結果、光子の到来方向を特定できた。また、その時の角分解能が 8.0 2° ±2.86° となることを確認した。この結果が妥当か、Geant4 で同様のジオメトリを製作しシミュレートした。同じく角分解能を求めたところ 7.92° ±0.93° となり、ほぼ

実験値と一致した。これにより、両面シリコンストリップを用いたコンプトンカメラは原理的に予想される性能を達成できることを実証した。今回の両面シリコンストリップ検出器を2層にしたコンプトンカメラでは、イベント数確保のためDSSD間を狭め、^{57}Coの122keVのラインを選んだ。そのため、位置分解能やDoppler Broadeningによる角分解能の劣化が激しかった。今後、CdTeピクセル検出器も併用しさらに多層化することにより、さらに高エネルギーの線源のラインで測定を行なっていきたい。それにより、Doppler Broadeningの影響や、多層化することにより位置分解能よる角分解能の劣化を抑えれるものと思われる。また、高エネルギーでの測定は同時にエネルギー分解能を下げる事ができ、さらなる角分解能の向上につながる。

謝辞

本研究にあたり、半導体検出器について御指導頂きました大杉教授に深く感謝致します。研究以外にも大学に入学した当時から 6 年間様々な事にお世話になりました、重ね重ね感謝致します。深沢助教授には本研究を通して、実験の方法や進め方を始め、研究に必要な事柄を一から教えて頂きました。その御指導の元、大変有意義な研究ができたと思います。深く感謝致します。吉田先生には半導体検出器の基礎特性について御指導頂きました。ありがとうございます。宇宙科学研究所の高橋教授には、同研究所での実験の場を整えて頂き、また御指導頂きました深く感謝致します。高橋研の中澤先生には何かと声を掛けて頂き、お世話になりました。ありがとうございます。SLAC の田島先生には、シリコンストリップ検出器の実験全般に渡って幾度となく的確なアドバイスを頂きました。大変ありがとうございます。

同期の井本さん、上田さん、大野さん、佐藤桂子さん、富永さんとは楽しい時間を過ごす事ができました。ありがとうございます。本研究室先輩の宇野さんは、一緒に研究を進めていく上で実験全般について色々な面で指導して頂きました。大変ありがとうございます。同先輩の、大戸さん、川本さん、川添さん、川埜さんには質問の度に親切に教えて頂きました。ありがとうございます。ドクターの榎園さんには ROOT のプログラムについて親切に教えて頂きました。ありがとうございます。澤本君、松浦君とは一緒に研究を行ない、手伝って行きました。また、阿部さん、河嶋君、木原君、佐藤慶二君、右田君、夫君、高橋君、永江君にも研究を進めて行く上で色々と手伝って頂きました。ありがとうございます。秘書の林さん、上原さん、石井さんには事務全般でお世話になりました。その他、広島大学高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室の皆様に感謝致します。高橋研の三谷さん、田中さんに同研究室での実験において、色々とお世話になりましたことに深く感謝致します。その他高橋研の皆様に感謝致します。

最後に、これまで心身共に支えてくれた家族に深甚なる謝意を表したいと思います。

参考文献

[1] T.Kamae, et al., A new method to measure energy,direction, and polarization of gamma rays, Nucl. Inst. and Meth A 260 (1987) 254

[2] XCOM, Photon Cross Section Database, http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html

[3] 三谷 烈史「高分解能 CdTe アレイ検出器の開発と宇宙観測用ガンマ線イメージャーへの応用」, 東京大学 学位修士論文, 2003

[4] T.Mitani, et al., Large area Gannma-ray Imaging Detector Based on High Resoluton CdTe Diode, IEEE,2002

[5] T.Takahashi, et al., High-resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope, SPIE,2002

[6] T.Ikagawa, et al., Performance of large area avalanche photodiode for low-energy X-rays and γ -rays scintillation detection, Nucl. Instr. Meth., vol. A 515,617-679, 2003

[7] M.Moszyński, et al., Application of large area avalanche photodiodes to study scintillator at liquid nitrogen temperatures, Nucl. Instr. Meth., vol. A 504,307-312, 2003

[8] M.Moszyński, et al., Avalanche photodiodes in scintillation detection, Nucl. Instr. Meth., vol. A 497,226-223, 2003

[9] Glenn F.Knoll 木村逸郎 阪井英次 訳「放射線計測ハンドブック 第 2 版」, 日刊工業新聞社, 1991

[10] A.Zoglauer, et al., Doppler Broadening as a Lower Limit to the Angular Resolution of Next Generation Compton Telescopes,

[11] 中本 達也「高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発」, 広島大学 卒業論文, 2001

[12] M.Moszyński, et al., Absolute Light Output of Scintillator, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1997

[13] 松浦 大介「APD+BGO プレートを用いた Anti 検出器の検証」, 広島大学 卒業論文, 2003

[14] 宇野 進吾「宇宙硬 X 線撮像用低ノイズ両面シリコンストリップ検出器の開発」, 広島大学 学位修士論文, 2003

[15] 中村 秀仁「二重ベーター崩壊測定のための多チャンネル読み出し回路開発」, 大阪大学 学位修士論文, 2003

[16] H.Tajima, et al., Low noise double-sided silicon strip detector for multiple-Compton gamma-ray telescope, SPIE, Vol.4851, 2002

[17] ideas VA32TA specification Version 0.92,

[18] 澤本 直之「シリコンストリップ検出器の X 線応答と多チャンネル読み出し回路のパラメータ調整」, 広島大学 卒業論文, 2003

[19] 岡田 祐「テルル化カドミウム半導体を用いた高速ガンマ線検出器とそのイメージングへの応用」, 東京大学 学位修士論文, 2002

[20] G4LECS GEANT4 Low-Energy Compton Scattering Package, http://nis-www.lanl.gov/ mkippen/actsim/g4lecs/

[21] 田中 孝明「Si と CdTe を用いたガンマ線コンプトン望遠鏡の実証実験」, 東京大学 学位修士論文, 2003