

次期 X 線観測衛星 ASTRO-H 搭載軟 線検出器用 Si 検出器
のスペクトルの性能評価

朴寅春¹

2010 年 1 月 15 日

¹広島大学理学部物理科学科

Abstract

宇宙で X 線で輝いている天体が発見されてから半世紀、地上では宇宙 X 線を観測できない難点を乗り越えて研究者たちは人工衛星や気球、ロケットなどを利用し、高エネルギー宇宙天文学は大きく発展をした。このような発展にもかかわらず AGN、Black hole, SNR などの天体から X 線を通じて観測される光子の非熱的放射の発生起源や加速原理はいまだに謎のままである。2014 年打ち上げ予定の次期 X 線観測衛星 ASTRO-H は 0.3keV の軟 X 線から 600keV の軟 γ 線までの広い領域で高感度分光観測能力を持ち、新しいサイエンスの発見が期待される。この論文では次期 X 線観測衛星 ASTRO-H に搭載予定である軟 γ 線観測装置 SGD の Si 検出器のスペクトルの性能評価を行い目標分解能である 2keV @ 60keV に近い平均 2.31keV の結果が得られた。また検出器の配線とエネルギー分解能の相関関係を調べ、検出器の最終設計のための指針を得た。

目次

第 1 章	はじめに:高エネルギー天文学と X 線観測	5
1.1	次世代 X 線衛星 ASTRO-H	6
1.2	軟ガンマ線検出器 SGD	8
1.2.1	SGD のコンセプト、要求性能	8
1.2.2	コンプトンカメラ	9
1.2.3	Si 検出器	10
1.3	SGD と高エネルギー宇宙天文学	11
1.4	論文の目的	14
第 2 章	Si 検出器の多チャンネルによる放射線検出	15
2.1	ガンマ線の特徴	15
2.2	半導体検出器の放射線検出原理	17
2.3	Si 検出器の特性	17
2.3.1	多チャンネル Si 検出器の構造的特性	17
2.3.2	Si 検出器の電気的特性	19
2.4	信号の処理	21
2.4.1	単チャンネルの読みだし	21
2.4.2	多チャンネルの読みだし	22
2.5	多チャンネル読み出しデータ解析	23
2.5.1	コモンモードノイズ補正	24
2.5.2	ペDESTAL補正	24
2.5.3	ADC 値のエネルギー変換	25
2.5.4	データのフィーティング	25
第 3 章	Si-pad のスペクトル性能評価	27
3.1	スペクトル測定のための実験環境	27
3.1.1	実験のセットアップ	27
3.1.2	データの記録	32
3.2	^{241}Am スペクトルの読み出し	32
3.2.1	ADC データの読み出し	33
3.2.2	ノイズの補正	33
3.3	Si-Pad のスペクトル性能評価	35
3.3.1	ピークのガウスフィット	35
3.3.2	ADC のエネルギー変換	35
3.3.3	Si-Pad の分解能導出	35
第 4 章	Si-Pad のノイズ特性	39

第5章 今後の課題	45
付録A ^{241}Am のスペクトル	47
付録B 59.5keV ピークのフィット	55

第1章 はじめに:高エネルギー天文学とX線観測

科学の発展は技術の進化と共に行われてきた。宇宙の神秘を明かす望遠鏡の発達には人類が宇宙を見るパラダイムを変えた。天文学において1990年代前半からは地上の天文台で行われてきた可視光での観測の他に観測方法の発達でもっと広い波長の領域(電波、赤外線、X線)で観測ができるようになった。特にロケットや人工衛星などの技術的進歩は地球大気の影響で地上に到達できなかったX線、ガンマ線を観測できるようにして高エネルギー天文学が誕生するきっかけになった。1962年 Aerobee ロケットにより初めてX線で輝いている天体 Scorpius X-1¹が発見された以来、数多くのX線観測装置が開発されてきた。人工衛星によるX線観測は1970年代からアメリカを始めとして多くの国が開発を進め、今ではNASA²のChandraやESA³のXMM-NewtonやINTEGRALなどが活躍中である。日本も1979年はくちょう(CORSA-b)を初め、五つのX線観測衛星を打ち上げ、今はすざく(ASTRO-E2)が活躍中である。現在これらの人工衛星によって多くの天体現象が発見されている。特に比熱的運動をする高エネルギー粒子に関する研究は宇宙の起源、物質の生成など科学の発展に大きい寄与をしている。

第1章ではすざくに続く日本の次世代X線観測衛星ASTRO-Hについて説明し、この論文で研究した軟ガンマ線検出器の紹介と期待される科学的発見について説明した。

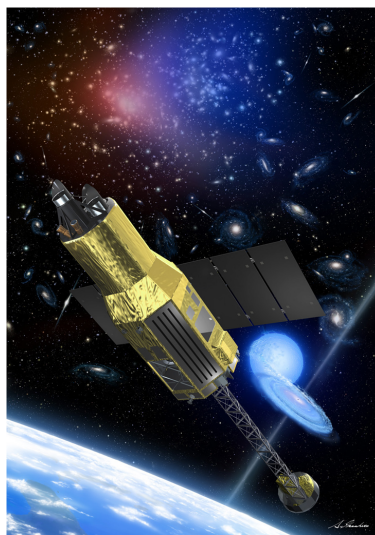


図 1.1: 2014年打ち上げ予定のASTRO-H衛星のイメージ [1]

¹太陽除いた天体の中でX線で一番明るく輝いている天体、この天体の発見したことでRiccardo Giacconiが2002年ノーベル物理学賞を受賞した

²アメリカ航空宇宙局

³欧州宇宙機関

1.1 次世代 X 線衛星 ASTRO-H

2014 年打ち上げ予定の次世代 X 線観測衛星 ASTRO-H について説明しておく。今運用中の日本の X 線観測衛星すざくに続く次世代 X 線観測衛星計画が ASTRO-H である。ISAS⁴を中心で広島大学などの国内の 6 つの大学、アメリカの Stanford 大学が計画に参加し開発を進めている ASTRO-H の目標としては宇宙巨大構造と進化過程の解明、宇宙極限状態の理解、非熱的エネルギー宇宙の研究、ダークマタとダークエネルギーの研究があげられる。この目標を達成するために ASTRO-H には 4 つの X 線望遠鏡と 4 種類の観測装置を搭載している。それぞれの特徴を次に述べる。

SXS(Soft X-ray Spectrometer)

マイクロカロリメータを用いた 4–7eV のエネルギー分解能を持つ超精密分光器。すざくで He ガスの漏出で観測に失敗した HRS の性能を改良した観測装置で軟 X 線望遠鏡 (SXT-S) から集光された光を 6mK で冷却されたセンサーで検出してスペクトルを得る装置。X 線でしか測れない銀河団の高温ガスの乱流や銀河団の衝突速度などを精密に測る。測定できるエネルギー範囲は 0.3keV から 10keV である。

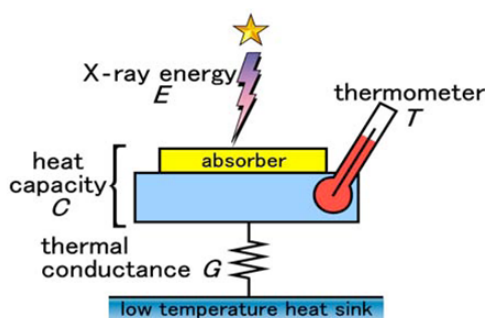


図 1.2: SXS の原理

SXI(Soft X-ray Imager)

広視野 (約 30 分) の軟 X 線イメージカメラ。軟 X 線望遠鏡 (SXT-I) で集光された光を CCD で受けて撮像及び分光する。エネルギー測定範囲は 0.5keV から 12keV である。下図は現在活動中であるほかの X 線観測衛星との観測視野を比べた図である。

HXI(Hard X-ray Imager)

硬 X 線イメージカメラ。硬 X 線領域で広い有効面積をもつ硬 X 線望遠鏡 (HXT) から集光された光を撮像及び分光する機能を持っている。高エネルギー領域での光子の検出のために必要である低バックグラウンドを実現し、5keV から 80keV の光子をすざく衛星の 10 100 倍の感度で検出する。2 台のこの装置が ASTRO-H に搭載される。

⁴宇宙科学研究本部

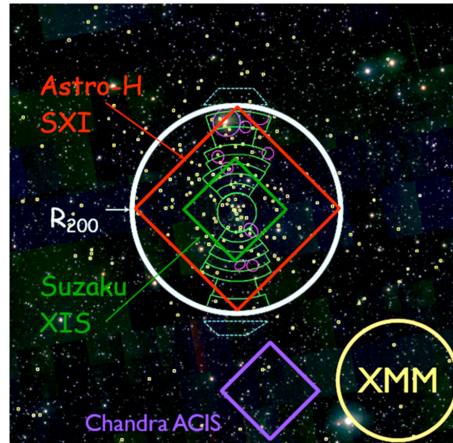


図 1.3: 他の X 線衛星との視野比較

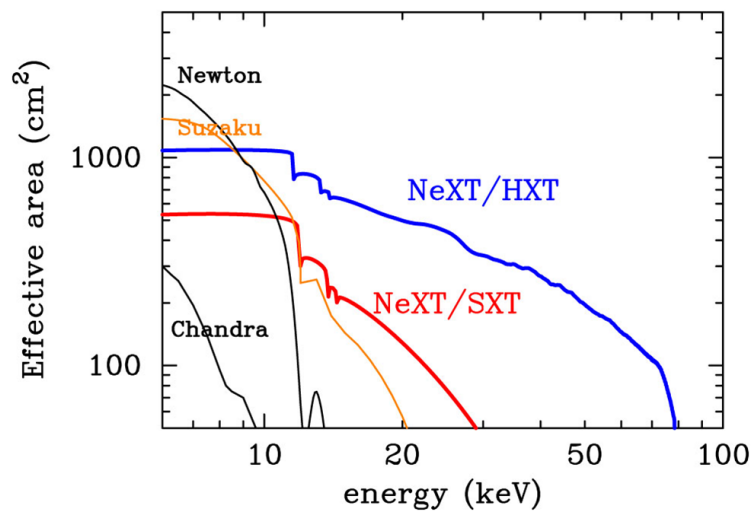


図 1.4: HXT の有効面積。硬 X 線領域で広い有効面積を持つ。

SGD(Soft Gamma-ray Detector)

コンプトンカメラを用いた狭視野軟ガンマ線検出器。HXI と同じく低バックグラウンドを実現し 10keV から 600keV までの軟ガンマ線を高感度で検出する。この装置については次の節で詳しく述べる。

ASTRO-H の観測装置が持つ特徴を簡略に書くと、0.3keV から 600keV まで広い領域での高感度分光観測能力、マイクロカロリメータを用いた軟 X 線精密分光観測、世界最初の硬 X 線イメージ撮像でまとめられる。このような特徴は現在活動中の X 線観測衛星 Chandra、Newton とは違う特徴を持ち、ASTRO-H による新たなサイエンスの発見が期待される。

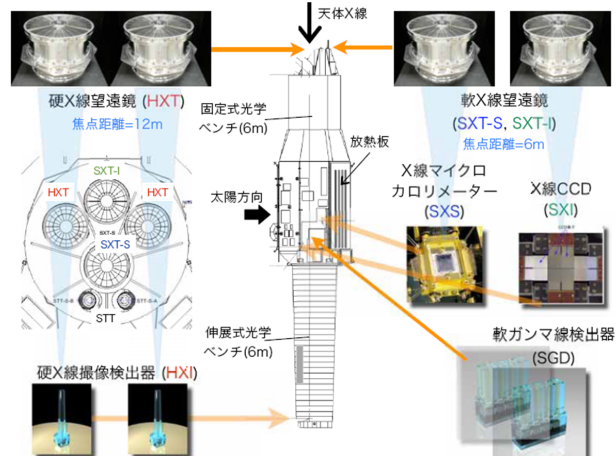


図 1.5: ASTRO-H の検出器配置図

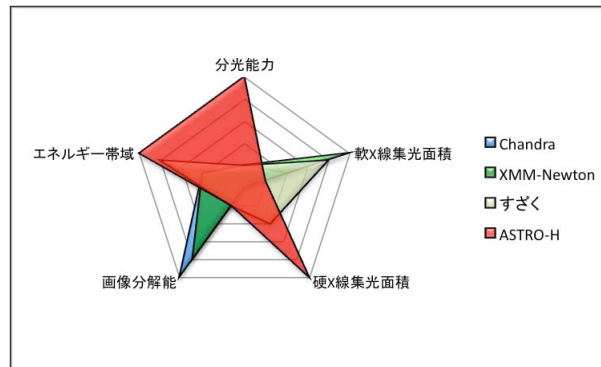


図 1.6: X線衛星の性能比較ヒストグラム。他のX線衛星とは違う特徴を持つ。

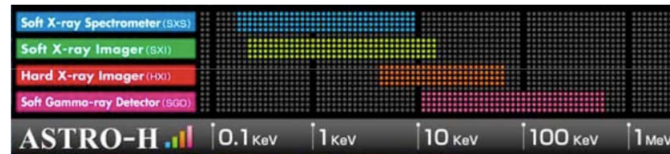


図 1.7: ASTRO-H の検出器別エネルギー領域

1.2 軟ガンマ線検出器 SGD

1.2.1 SGD のコンセプト、要求性能

SGD はすざく衛星の HXD⁵に続き宇宙の非熱的活動を観測するための装置として特定方向から来る軟ガンマ線を検出するための狭視野コンプトンカメラとして開発される。軟ガンマ線を感度良く検出するためには陽子や中性子などの他の高エネルギー粒子由来のバックグラウンド信号を除去するのが重要な課題であった。SGD はコンプトン運動学を用いたコンプトンカメラをすざく衛星で検証された BGO Active shield⁶と組み合わせて効果的にバックグラウンドを除去し、高感度検出ができるようにする。またコンプトンカメラの特

⁵硬 X 線検出器

⁶シンチレーション検出器を用いた高エネルギー粒子検出器

エネルギー領域	10–600keV
観測範囲	0.5 °–1 °
角度分解能	40 °
エネルギー分解能	2keV@40keV

表 1.1: SGD の要求性能

徴を活用して分光器での役割だけではなく、偏光観測能力も持つ観測装置である。SGD の詳しい要求性能を次の表で示す。

1.2.2 コンプトンカメラ

コンプトン運動力学によって高エネルギー光子を検出する装置をコンプトンカメラと言う。SGD のコンプトンカメラは多層の半導体検出器層を用いて光子をコンプトン散乱及び吸収して同時にその位置とエネルギーを測定して光子が来る方向を推定する。

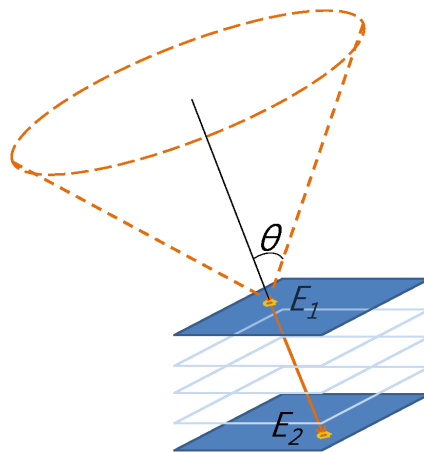


図 1.8: コンプトンカメラの概念図

SGD のコンプトンカメラは大きく散乱部、吸収部で分けられている。Si で出来ている散乱部は光子を散乱させて、反跳電子のエネルギー E_1 と散乱位置を測定する。CdTe で出来ている吸収部では散乱された光子を吸収、その吸収位置とエネルギー E_2 を測定して光子の散乱角 θ を決める。これら散乱位置、吸収位置、散乱角から到来方向を推定する。光子が SGD の視野内から来たときはイベントとして認識されるが、視野外から来たときみなされたイベントはバックグラウンドとして処理し無視される。またコンプトンカメラには軟ガンマ線のエネルギーを分光測定する機能以外に光子の散乱方向の異方性を用いて光の偏光も測定することが出来る。SGD のコンプトンカメラ 1 台には Si 検出器 32 枚、CdTe 検出器 16 枚 (Bottom8 枚、Side8 枚) で構成されてコンプトンカメラ 4 つが SGD1 台に含まれる。SGD は ASTRO-H のサイドパネルに 1 台ずつ 2 台が搭載される。

SGD 以外に代表的なコンプトンカメラとして 1990 年代の CGRO 衛星の COMPTEL 観測装置があるが、シンチレータをもちいて 1.5t と重くて巨大なもので、観測エネルギーも MeV 領域であり、SGD とは大きく異なる。

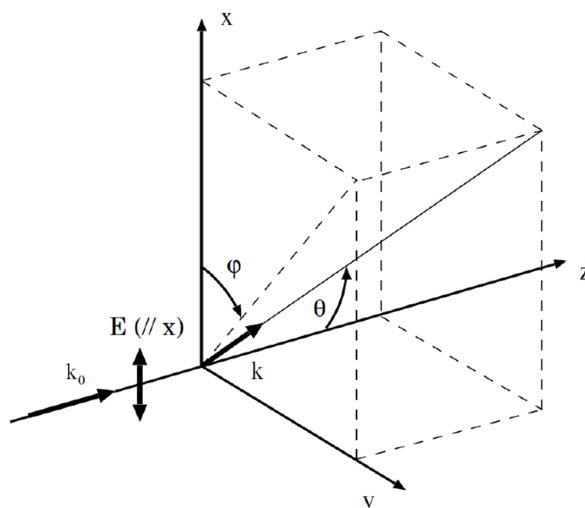


図 1.9: 偏光された光子のコンプトン散乱概念図



図 1.10: コンプトンカメラの構造モデル

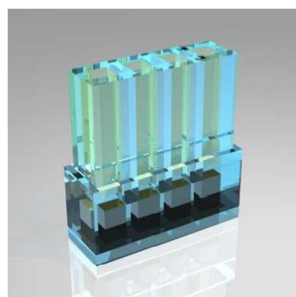


図 1.11: SGD の模式図。コンプトンカメラが BGO Active Shield に囲まれている。

1.2.3 Si 検出器

本研究で扱う Si 検出器について簡単に説明しておく。ガンマ線を検出する検出器として半導体検出器以外にシンチレーション検出器が挙げられる。シンチレーション検出器は阻止能が大きくガンマ線を吸収しやすい利点があるが、体積が大きく、シンチレーション光を光電子増倍管などを使い電気的信号に変えるとき効率が低くてエネルギー分解能が悪い弱点を持っている。Si 検出器のような半導体検出器は物質との相互作用で出る電子を直接測

定することが可能でエネルギー分解能が良い利点がある。特に信号処理技術の発達で多チャンネルの信号を早く処理するのが可能になり、回路の小型化、省電力化が進んで質量、体積が限られた人工衛星搭載検出器として最適の条件を持つようになる。コンプトンカメラとして作動する SGD の Si 検出器は数 10keV から数 100keV のエネルギーの光子に対してコンプトン散乱が支配的であり、要求性能が 10keV から 600keV であるコンプトンカメラの散乱体として適合である。Si 検出器はこれより大きいエネルギーでは光子との相互作用で電子対生成が、低いエネルギーでは光電吸収が起こる。

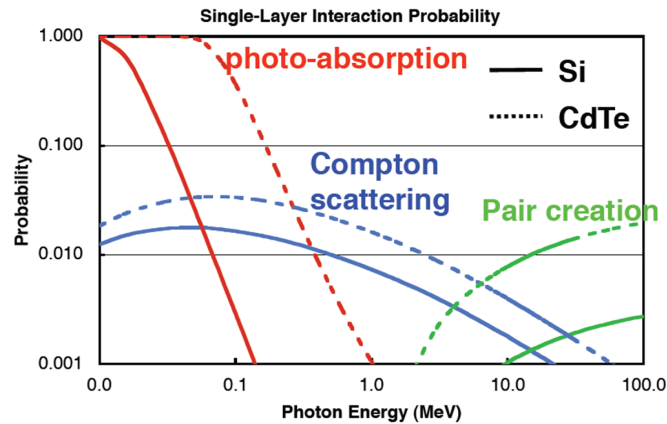


図 1.12: Si, CdTe と光子の相互作用。Si はコンプトン散乱体として、CdTe は光子吸収体として適当であることが分かる。

SGD に Si 検出器が使われる他の理由として Doppler Broadening が小さいこと、他の高エネルギー粒子加速器などでの実績が挙げられる。Doppler Broadening は電子の運動によって光子のエネルギー分解能が悪くなる現象で原子番号が小さくなるほどその影響は小さくなる。また原子番号が小さいほど放射化がされにくくなり、バックグラウンドの影響が小さくなって感度が良くなる。

Si 検出器の詳細は次 2 章で詳しく説明する。

1.3 SGD と高エネルギー宇宙天文学

X 線、ガンマ線による宇宙観測が行われてから熱運動だけでは説明できない高エネルギー現象について研究が始まって。近い距離では太陽フレア、パルサー、X 線連星、超新星残骸から銀河系外の遠いところでは活動銀河核、ガンマ線バーストなどがある。これらは宇宙の加速器とも呼ばれ、天体から生成される高エネルギー粒子は地上の粒子加速器で作られるエネルギーより高いエネルギーを持っている。これらの発生起源や加速原理、放射機構を解明するのは宇宙進化の過程、宇宙の構造はもちろん物質の根源研究などの科学全般にかけて影響を及ぼすと思われる。しかしこのような非熱的天体現象は技術的面で観測装置の制約と天体現象の少ない発生頻度などによりまだ詳しく知られていない。

SGD の観測からその現象が明らかになることが期待されるいくつかの天体現象について述べる。



図 1.13: Crab 星雲の波長別イメージ。左から X 線、可視光、赤外線、電波

高エネルギー宇宙線

20 世紀前半から高エネルギー粒子が観測され始めて以来、宇宙から主に数 MeV 以上の高エネルギー粒子が発見されてきた。この宇宙線の中には理論的予想を上回るエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線が発見され、その発生源などの詳しい情報は数年間謎であった。最近の研究で超高エネルギー宇宙線の発生源として銀河系外の巨大ブラックホールの中心にある AGN が推定された。高エネルギー宇宙線の発生源として活動銀河核 (AGN) 候補として挙げられている。以外に星間物質の衝撃波による放射、ガンマ線バーストなどが挙げられる。高エネルギー宇宙線の研究はダークマターの研究とも密接な関連がありその正体について明らかにするのが最近の高エネルギー天文学の重要な課題になっている。

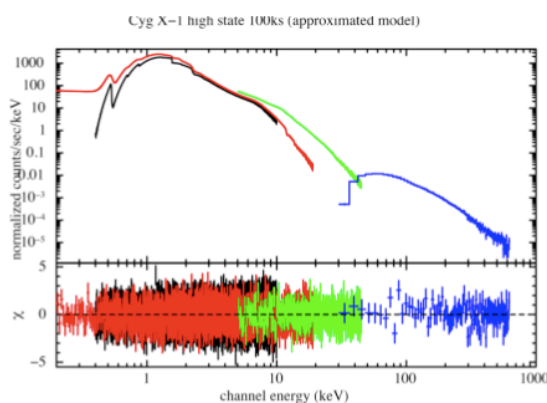


図 1.14: SGD の Cyg X-1 に対する感度図。SGD の感度は青色で緑と赤色は HXI の値。

相対論的加速運動

電波や X 線観測によって電波銀河、クェーサーなどからプラズマ粒子の相対論的加速運動が観測されていてジェットと呼ばれる。このようなジェットの発生源として巨大ブラックホールが推定され、ここから作られる螺旋状の磁場によりジェットがコリメートされていると考えられている。ジェットから光子は逆コンプトン散乱、シンクロトロン放射などで放射され、電波からガンマ線まで観測することができる。ジェット中の磁場の情報は偏光観測で測られるため SGD の優れた偏光能力は相対論的加速運動を解明するために重要である。

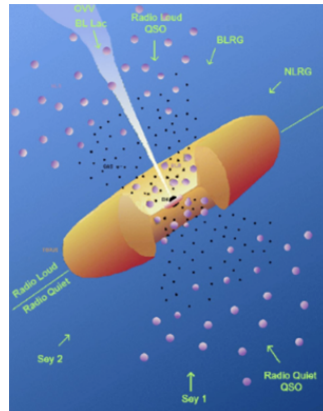


図 1.15: AGN の概念図

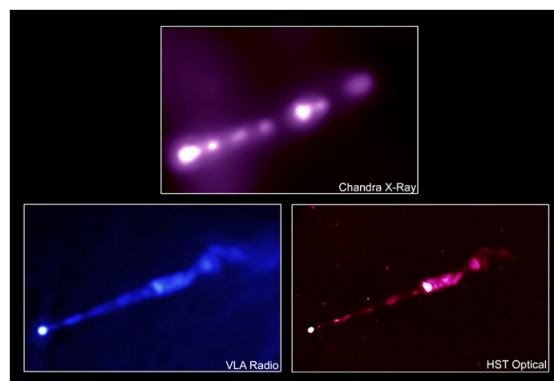


図 1.16: M87 の Jet 放出イメージ。Jet は代表的相対論的加速運動である。

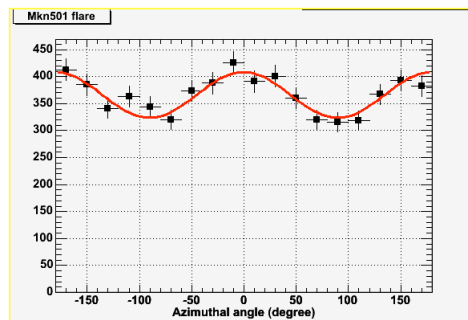


図 1.17: Mkn501flare の偏光観測

核融合

星の進化にとって核融合や核分裂は物質の起源だけではなく宇宙進化の重要な情報にもなる。星の進化の最終段階は新しい物質が作られる現場でもある。Ia 形超新星はガンマ線による分光観測で ^{56}Fe , ^{26}Al などの元素のガンマ線輝線が見えて星の進化の過程の研究の重要な手がかりとなる。このような輝線の強度は弱いためすざくの HXD の 10–100 倍の感度を持つ SGD の活躍が期待される。

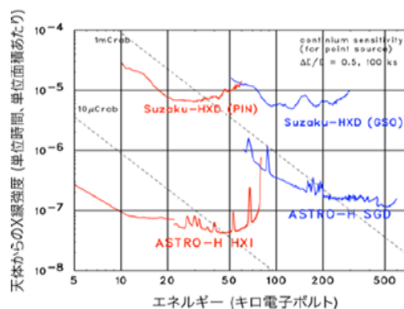


図 1.18: ASTRO-H の HXI,SGD と SUZAKU の PIN,GSO の感度比較。ASTRO-H は SUZAKU より 10–100 倍よい感度を持つ。

1.4 論文の目的

本論文では日本の次世代 X 線衛星 ASTRO-H に搭載される軟ガンマ線検出器 SGD の Si-Pad 検出器の原理と多チャンネル読み出しを理解し、実際に放射線検出実験を行い、線源のスペクトルを得て検出器の性能を評価し、衛星搭載モデル (FM) の Si-Pad 検出器設計に対する基礎データを得る。

第2章 Si検出器の多チャンネルによる放射線検出

この章では多チャンネル Si 検出器の放射線検出実験に必要な基礎知識について説明する。はじめは検出する放射線であるガンマ線の特徴について述べた後、Si 検出器のような半導体検出器の放射線検出原理、そして Si 検出器の特徴について述べる。最後には Si 検出器から出る電気的信号をスペクトルデータとして処理する信号処理の過程とデータの解析について述べる。

2.1 ガンマ線の特徴

電波及び可視光と同じようにガンマ線は電磁波の一種ある。可視光の光子が持つエネルギーが数 eV であることに対して、ガンマ線はおよそ数 10keV 以上の高いエネルギーを持つ。ガンマ線は同じく高エネルギーのエネルギーを持つ X 線との違いとして、放射機構が内殻電子の準位のエネルギー遷移による電磁波の放射を X 線、原子核の遷移によって放射される電磁波をガンマ線と呼んでいたが、今は特に区別せず、エネルギーの高低で区別している。ガンマ線は物質との相互作用として図 2.1 のように光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成を挙げられる。以下にそれぞれの相互作用について説明である。

光電吸収

ガンマ線と物質の相互作用として光子が持つエネルギーが原子の中の電子に吸収される現象を光電吸収と呼ぶ。光電吸収が起こるとガンマ線が持つエネルギーはすべてが電子のエネルギーに変換される。原子の束縛が強い K 殻の電子が断面積を大きいためガンマ線の約 80% 以上を吸収する。ガンマ線からエネルギーを受け取った光電子と呼ばれる電子は原子の束縛から外れて自由電子になる。このときの光電子のエネルギー E_{e^-} は次の式 2.1 ように表す。

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

ここで E_b は光電子が最初に存在した殻の結合エネルギーを表す。光電子が束縛から外れて自由電子になると、周囲の原子を電離させ、入射ガンマ線のエネルギーに比例した数の電子が出る。この電子を数えることでガンマ線のエネルギーを測定できる。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は物質中の電子とガンマ線との相互作用として、図 2.2 のように物質中の電子と光子の非弾性衝突によって電子にエネルギーを渡す現象である。電子が静止している

と仮定する場合図 2.1 のようにガンマ線が電子によって散乱されて運動方向が変わる。このときエネルギー変化を式 2.2 に表す。

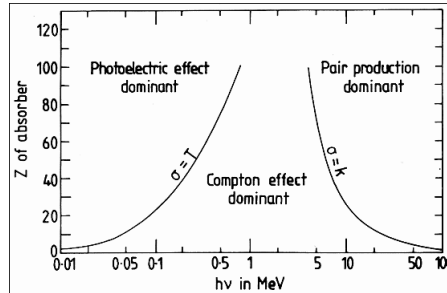


図 2.1: Z に対する光子と物質の間の相互作用

$$E_r' = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.2)$$

ここで m_0c^2 は電子の静止質量エネルギー (0.511MeV) である。

実際の原子では電子は静止していないため Doppler Broadening¹のような現象が現れ検出器のエネルギー分解能に影響を与える。

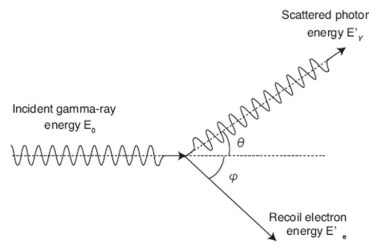


図 2.2: コンプトン散乱の概念図

電子陽電子対生成

高エネルギーを持つガンマ線が原子核が作る電磁場との相互作用によりと衝突して電子と陽電子を生成する反応。ガンマ線のエネルギーが電子の静止エネルギーの2倍である 1.02MeV 以上になると電子陽電子対生成が生じる。この反応を用いることで MeV 以上の高エネルギーを持つ光子を検出することができる。電子対生成を利用した代表的な検出器として Fermi 衛星の LAT 検出器がある。

SGD で使う Si は $Z = 14$ であり、図 2.1 のように数 10keV から数 MeV の領域ではコンプトン散乱が支配的である。今回の実験は Si 検出器のスペクトルを分析、分解能を調べるための実験であるため、数 10keV 光電吸収による Si 検出器の性能を調べた。実験で使用した放射線源は ^{241}Am で次の表 2.1 のエネルギーガンマ線を放射する。

¹電子の運動による相対的速度の差で生じる測定のゆらぎ。Z が大きいほど Doppler Broadening の影響が大きくなる傾向がある。

13.9keV	17.6keV	21.0keV	26.3keV	59.5keV
---------	---------	---------	---------	---------

表 2.1: ^{241}Am が出すエネルギーピーク

2.2 半導体検出器の放射線検出原理

半導体はキャリアとして正孔を多く持っている p 型半導体と、電子を多く持っている n 型の二つに分けられる。この二つの種類の半導体を接合させると電子と正孔の密度の差が生じて、接合面の電子と正孔はこの密度の差を小さくする方向に移動する。その過程で電気的に反対の特性を持っている電子と正孔がお互いに結合して中性になり、この半導体の接合面付近は中性になる。しかし中性になった領域の周辺の半導体は正孔、あるいは電子が少なくなるため、p 型半導体は負の電気を、n 型半導体は正の電気を帯びる。

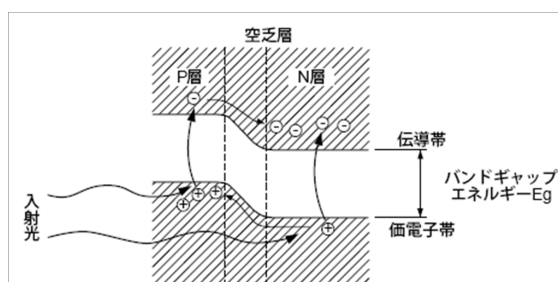


図 2.3: PN ダイオードの接合

この変化は図 2.3 のように n 型半導体から p 型半導体に向かう電場を作って電位の差、エネルギーギャップ (E_g) が発生する。このエネルギーギャップが PN 接合ダイオードを作る原因となる。この時、接合面の付近で電気的に中性になる領域を空乏層と呼ぶ。この空乏層を乗り越えて電流を流すためにはエネルギーギャップより大きい電圧が外部から供給されなければならない。この PN 接合ダイオードの p 型半導体に図 2.4 のように負の電極を、n 型半導体には正の電極をつなげて逆バイアス電圧をかけると電場の作用で正孔は負の電極がかかっている p 型半導体の方に、電子は正の電極がかかっている n 型半導体の方に移動して空乏層が広がる。

半導体検出器は PN 接合を持つ半導体に逆バイアスをかけて空乏化された状態で空乏層を通過する光子が相互作用によって電子を励起させ、励起された電子、つまり自由電子と同時に作られた正孔によって発生する電荷量を測定し光子のエネルギーを測る。この時、測定される電荷量は光子が失われたエネルギーに比例する。

2.3 Si 検出器の特性

2.3.1 多チャンネル Si 検出器の構造的な特性

半導体検出器は単純な構造で強度が強く、小型化しやすい利点がある。図 2.5 は Si 検出器の断面図である。光子が入る表面は酸化 Si (SiO_2) でコーティングされてその下におよそ $1\ \mu\text{m}$ の厚さを持つ p 型半導体が電極とつながっている。n 型半導体がほとんどの体積を占めていて n + 層を通して電極とつながっている。

多チャンネル Si 検出器は検出器の構造によってストリップ型 (図 2.7) とパッド型 (図 2.6) に分かれる。

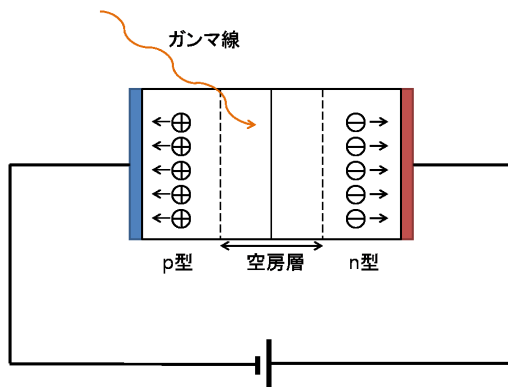


図 2.4: 半導体検出器のガンマ線検

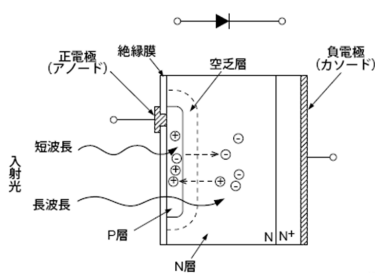


図 2.5: 単チャンネル Si 検出器の断面図

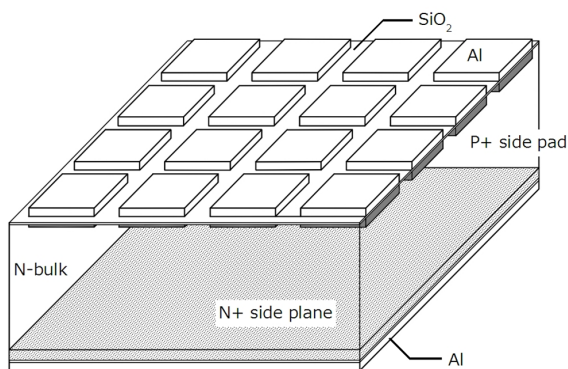


図 2.6: Pad 型 Si 検出器

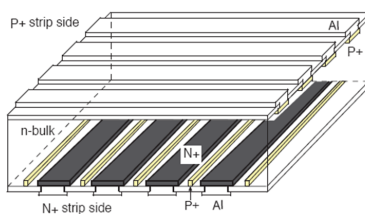


図 2.7: Double Stripe 型 Si 検出器 (DSSD)

SGD のようなコンプトンカメラを作るためには、2次元の位置分解能が要求される。2次元の位置分解能を持つ半導体検出器として、多数の単チャンネル検出器を格子状に配列した

	1.6mm	3.2mm
Doppler broadening	2.0 °	2.0 °
Geometrical error	2.2 °	2.2 °
Energy resolution	0.9 °	0.9 °
Total	3.5 °	4.1 °

表 2.2: 角度分解能に影響を与える要素のパッドの大きさ別比較

パッド型 Si 検出器 (Si-Pad) と、両面にストリップ構造を持つダブルストリップ型 Si 検出器 (DSSD) がある。DSSD は構造的特性上、パッド型検出器より良い位置分解能とエネルギー分解能を持っているが、弱点として製造工程と構造が複雑であることが挙げられる。

Si-Pad は DSSD より性能はよくないが、SGD が目標として目指している性能を十分実現できるためパッド型検出器を使用することになった。

SGD に使われる 1 枚の Si 検出器には 256 個のパッドが 16×16 の配列で配置されていて、 8×8 配列の 4 等分に分けられてパッドの—ヨロ見—からの信号を回収する構造になっている。検出器の 4 つの側面は高電圧がかけられたとき検出器に一樣な電場を作るためのガードリングで囲んだ構造をしている。

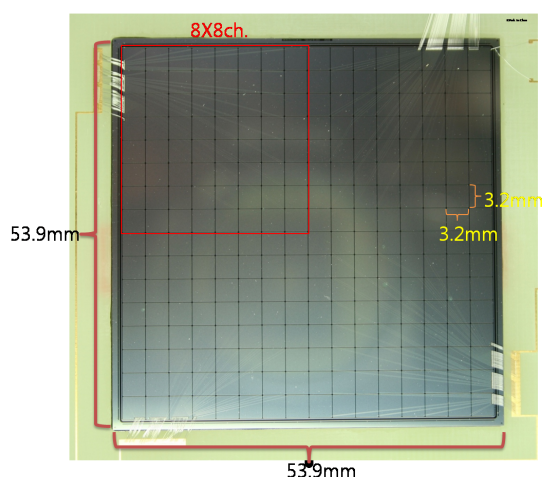


図 2.8: Si-Pad の大きさ

Si 検出器の一つのパッドの大きさは SGD の位置分解能の要求条件を満たすために決められた。1 つのパッドの大きさは 3.2×3.2 mm で要求性能である $4 \text{deg}@511 \text{keV}$ を満たすように作られている。表 2.2 に 1.6×1.6 mm のパッドと 3.2×3.2 mm のパッドを比べたシミュレーションによる位置分解能への影響を載せた。

Si 検出器の厚さも SGD の要求性能である位置分解能を満たすための条件としてパッド辺の $1/3$ 以下、つまり約 1mm 以下の厚さが要求されるが、できるだけガンマ線に対する阻止能を保持して使用枚数を少なくするため厚さは 0.6mm となっている。

2.3.2 Si 検出器の電気的特性

Si 検出器の性能を評価するためには検出器の電気的特性を知っておく必要がある。

ノイズ特性

Si 検出器のノイズ源としては外部からのノイズ、熱ノイズの2つが挙げられる。外部ノイズは実験装置以外の原因から来るノイズで、実験の条件をコントロールすることで制御できる。熱ノイズはリーク電流と静電容量の両方に関係がある。この二つの電気的現象を下に説明した。

静電容量特性

Si 検出器に逆バイアスをかけると電荷が充電されてるコンデンサとしてみることができる。逆バイアスの電圧を上げると空乏層が Si 検出器の厚さぐらいまで拡張される。このときを完全空乏化状態になったという。このときの静電容量は半導体の空乏層の厚さを d 、面積を S とすると以下のようなになる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (2.3)$$

Si 検出器の静電容量は検出器だけの容量以外に配線や、増幅装置に従う浮遊容量などがある。これらの静電容量はノイズと密接な関係があるため、静電容量の測定と予測は Si 検出器の性能向上のために重要である。この容量性ノイズは電子の熱的ゆらぎによって検出器などに電位を作ってノイズとして現れる。このノイズは静電容量が大きいほど影響が大きくなる。

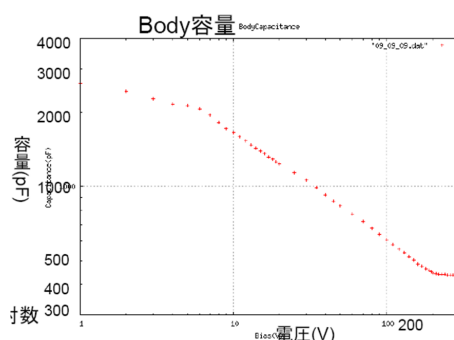


図 2.9: Si-Pad の静電容量曲線。200V 付近で完全空乏化する。

リーク電流

理論的にコンデンサに電荷が十分溜まったら電流は流れない。しかし Si 検出器が完全空乏化されても電流が流れる現象がある。この現象をリーク電流と呼ばれ、熱的ゆらぎによって電子が励起され微弱な電流が逆バイアスの電圧を乗り越えて流れる。リーク電流は検出器の性能に大きい影響を与え、大きくなるほど電気的ノイズになって現れる。そのためリーク電流の特性を理解しておくことが重要な課題になる。下はリーク電流を表す式である。

$$I \propto \exp\left(-\frac{E_g}{k_b T}\right) \quad (2.4)$$

リーク電流はいつも一定ではなく熱によってゆらぎを見せる。この時、電流はポアソン分布を見せ、そのゆらぎがノイズとして現れる。式からも分かる通りリーク電流は温度に影

響を受ける。つまり温度によって検出器の性能が異なってくるため検出器の作動温度を設定する重要な理由になる。温度以外にリーク電流はSiの不純物、劣化や汚染による表面の非均一性などにも依存する。Si検出器を扱うとき慎重に注意をする必要があるのはこのためである。

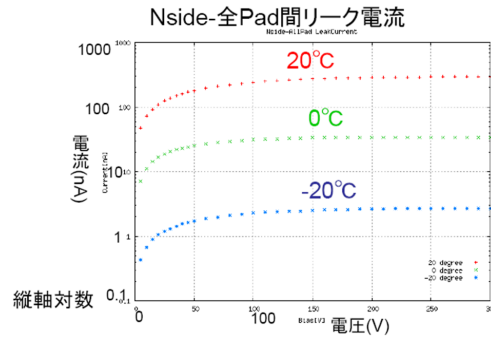


図 2.10: Si-Pad のリーク電流曲線

2.4 信号の処理

2.4.1 単チャンネルの読みだし

単チャンネルの信号の読み出しについて図 2.11 と共に説明する。



図 2.11: 単チャンネル検出器の信号処理

線源から出たガンマ線は逆バイアスが掛かった Si 検出器に光電吸収され電気的信号を作り出す。この信号はアナログ信号として処理するには微弱で前置増幅器 (PreAmp) と呼ばれる装置を通して数 mV 程度まで増幅された信号は図 2.12 のような波形になる。つまり信号の大きさは吸収されたガンマ線のエネルギーに比例する。この信号の大きさが後でスペクトルとして表現される。

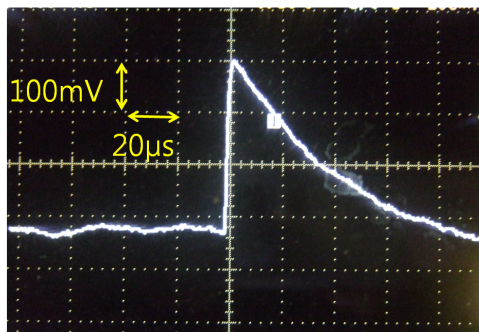


図 2.12: PreAmp を出た信号

PreAmp を通って増幅された信号は Shaper と呼ばれる装置を通してきれいなガウシアン波形に整形される。Shaper では信号のピーキングタイムや増幅度などを調節できる。図 2.13

は整形された信号を例として示した。Shaper を通った信号はアナログ-デジタル変換装置 (ADC) などを通して PC でデータとして読み取れる。取れたデータを横軸で信号の大きさ、縦軸でイベントの数として図 2.14 のようにガンマ線のスペクトルとして見えるようになる。

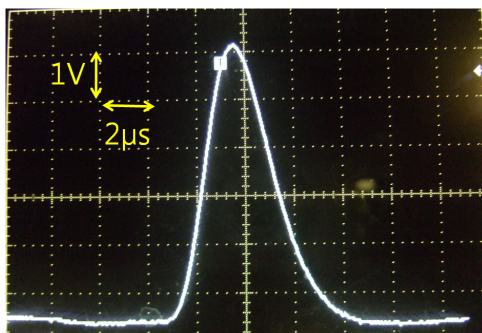


図 2.13: Shaper を通った信号

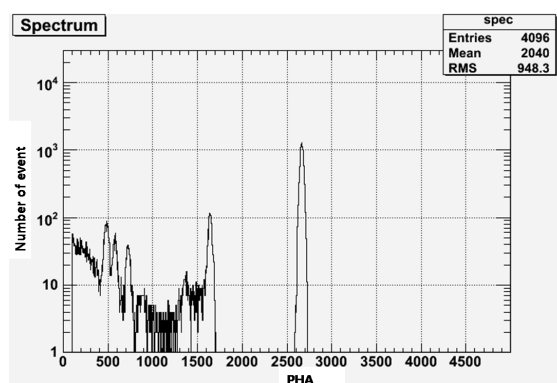


図 2.14: 単チャンネルスペクトルの例

2.4.2 多チャンネルの読みだし

多チャンネル信号処理は単チャンネルで行った信号の処理を数百チャンネルで同時に行うものである。しかし宇宙の極限状態や人工衛星の限られた空間で数百の信号処理のために実験室で使用した単チャンネル信号処理装置を数百個を並べて使うのは非常に難しい。この難点を乗り越えるために低ノイズを要求する放射線測定に特化されて ASIC として開発されたのが VA64TA2 である。VA64TA2 は ISAS、ノルウェーの Ideas 社、SLAC が共同で開発した。

VA64TA2

64 個の信号処理ができる低電力、低放射化の特徴を持つ ASIC。64 チャンネルそれぞれに対して PerAmp、同時サンプルホールド機能による多重アナログ信号処理やキャリブレーション装置などを持っている。この ASIC は以前開発され使用実績がある VA32TA を基に

して作られた。VA64TA2には多チャンネル同時信号処理のためのVAとTAの二つのアナログ信号処理回路を持っている。VA64TA2の構成を図2.15に表す。

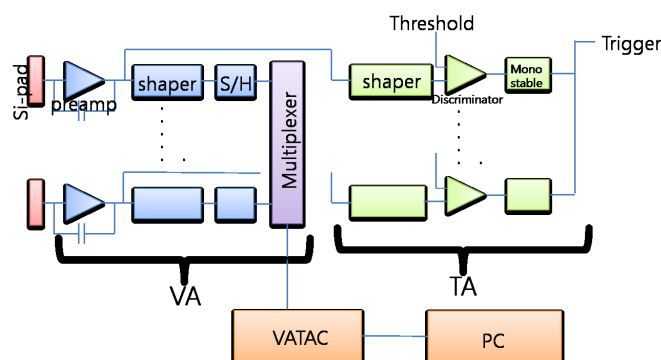


図 2.15: 多チャンネルの信号処理

VA64TA2はSi検出器から作られる信号の中で一定以上大きさの信号だけを処理するように設計されている。これは無駄なデータを捨てるためである。VA64TA2の信号処理過程を詳しく述べたのが次である。

Si検出器から作られた信号がPreAmpで増幅されるとVA回路とTA回路二つに分かれて処理される。VAのShaperで整形した信号のピークタイムが数 μ sであることと比べてTAのShaperから整形された信号は数100nsの早いピークタイムを持つ。VAのピークがまだ作られてない間、TAが信号の大きさによってSi検出器のイベントの有無を判断する。もしイベントがあると判断したらVAにトリガー信号を送ってすべてのチャンネルで信号を処理するように命令を出す。もしトリガー信号が送られてないとVAは読み出しをせずに捨てる。

VA64TA2で処理された信号はFEC(Front End Card)を通してADCを通してデータ化される。VA64TA2で出るデータのデジタル変換とVA64TA2の設定値の入力のためにはVME systemやVATACなどの特殊な装置が必要になる。我々の研究室では両面ストリップSi検出器(DSSD)のためのVME systemは持っているがPad型Si検出器に使用したことがないのと、まだ動作確認ができてないPad型Si検出器をVME systemに使うのは無理と判断し、動作実績があるVATACを使ってISAS²でPad型Si検出器の多チャンネル信号読み出しを行った。

2.5 多チャンネル読み出しデータ解析

SGD1台から1つのイベントに対して12288チャンネルから信号が送られる。Si検出器1枚からも1つのイベントに同時に256チャンネルから信号が送られるため、その信号たちを適切に処理してデータとして解析することは非常に大切である。多チャンネルSi検出器からASICなどを通して検出された信号は大きく3つの課程でデータ処理をした後、スペクトルデータとして解析が出来るようになる。

²宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA)

2.5.1 コモンモードノイズ補正

1つのイベントが起きたときある原因によって検出器全体のグラウンド電位が変わる現象に対して補正する作業をコモンモードノイズ補正と呼ぶ。図 2.16 は 1つのチャンネルの ADC 値と他の 63 チャンネルの ADC 値の平均値を比べたグラフである。このグラフで 1つのチャンネルと他の 63 チャンネルの平均 ADC 値が傾き 1 の相関関係を持っているのがみえる。この傾きは 1つのイベントが起きたときに、ある原因によって検出器全体のグラウンド電位が変わり、それぞれの検出器の ADC 値に同じ変化があることを意味する。この変化は 1つのイベントに対してトリガーしていない他のチャンネルでの ADC 値の平均を求めることによって得られる。そして、それぞれチャンネルの ADC 値から差し引くことで補正が可能である。

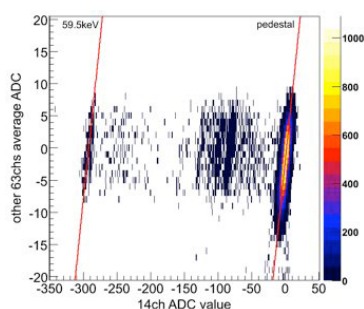


図 2.16: 1チャンネルの ADC 値と他の 63 チャンネルの ADC 比較

2.5.2 ペDESTAL補正

イベントが検出されていないときも ADC はある 0 でない値を出す。これをペDESTALと呼ぶ。補正の原理について今回の実験で使用した 64 チャンネルの信号を例として説明する。検出器の 64 チャンネルのうち一つのチャンネルで光子の相互作用が起きてトリガーが作動する。トリガーが作動するとイベントがあるチャンネルだけではなく他の 63 チャンネルの信号も同時に読み取る。イベントがあるチャンネルは光子のエネルギーを ADC 信号として記録するが他の 63 チャンネルのはペDESTALとノイズのゆらぎを ADC 値として記録する。こうして記録された光子と関係ないイベントの ADC 値は、ペDESTALを中心にガウス分布に従うので、それをガウシアンでフィットして各チャンネルのペDESTALを求める。それぞれのチャンネルから求めたペDESTAL値をコモンモードノイズ補正値から差し引くことでペDESTAL補正を行う。

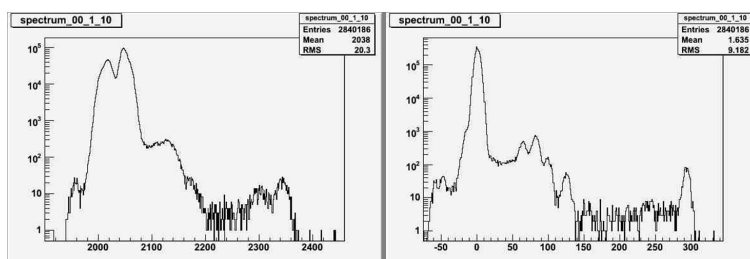


図 2.17: ペDESTAL補正前後

2.5.3 ADC 値のエネルギー変換

補正をした後のデータの処理として ADC 値をエネルギーで変換する仕事がある。光子のエネルギーと ADC 値は比例関係にあるため、二つの変数関係を知るためには、ある 2 つのエネルギーに対する ADC 値が必要になる。実験では ^{241}Am を使い 59.5keV での光電吸収のスペクトルを測定し、ADC 値と相関をとって ADC 値をエネルギーに変換させる。この時の ADC 値はコモンモードノイズ補正とペDESTAL補正をした値である。

2.5.4 データのフィッティング

得られたスペクトルデータのピークをフィットする方法は式 2.5 である。これをガウシアンと呼ばれる式で統計分布を表す式である。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.5)$$

エネルギー分解能ははガウスピークの半分の高さを持つところの値として半値幅 (FMHW) と呼ばれ、ガウシアン σ と以下のような関係がある。

$$\Delta E = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \quad (2.6)$$

第3章 Si-padのスペクトル性能評価

2章ではSGDのSi検出器と信号処理について述べた。3章ではSi検出器を実際に動作させてガンマ線を当ててそのスペクトルを測定し、検出器の分解能を測った。まず実験のセットアップ、環境について述べた後、スペクトルの測定結果について詳しく述べる。

3.1 スペクトル測定のための実験環境

3.1.1 実験のセットアップ

Si検出器を動作させたときのセットアップを図3.1に示す。

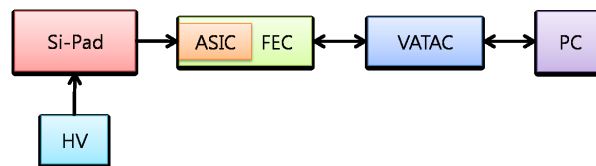


図 3.1: 実験装置のセットアップ

Si-Padを中心としてSi-Padに逆バイアスをかける高圧電圧(HV)とSi-Padから出て来る信号を処理するASIC(VA64TA2)を載せたFEC(Front End Card)、そしてASICに電源供給と設定を行うためのVATAC、トランジスタ電源(トラ電)、VATACを制御してデータを集めるパソコンで構成されている。これらの装置以外にも実験の温度条件を一定に保つ恒温槽とSi-Padの電圧の制御やリーク電流の記録のためのパソコンが今回の実験に用いられた。それぞれの装置の特徴を次に述べる

Si-Pad

Si-Padはエポキシ基盤の上にFECと共に設置されている。今回の実験では図3.2のようにSi-Padの1/4、64チャンネルだけをASICとつなげて実験を行うため、ASICとつながるチャンネル以外のチャンネルはガードリングと一緒にグラウンド電圧に落として測定を行った。¹Si-Padの0.5cm上には検出器の保護と放射線源をおくためのエポキシ板を設置した。検出器の真上には直径1.5cmぐらいの穴を開けてガンマ線のエポキシ板による吸収を最小化するようにした。

¹実際にボンディングの不良を直すとき5チャンネルのボンディングが外れてしまいグラウンド電位になるチャンネルは196チャンネルのうち191チャンネルである。しかしこれらのチャンネルは信号を読み取る検出器と離れているため実験結果に影響は少ないと思われる。

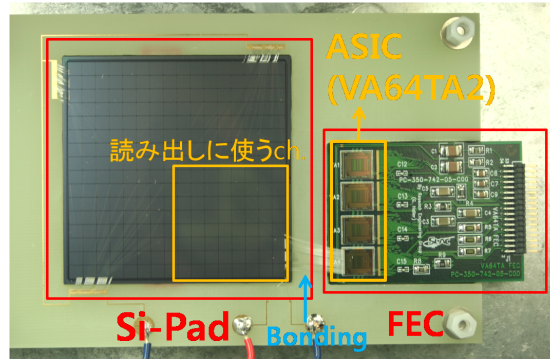


図 3.2: Si-Pad と FEC

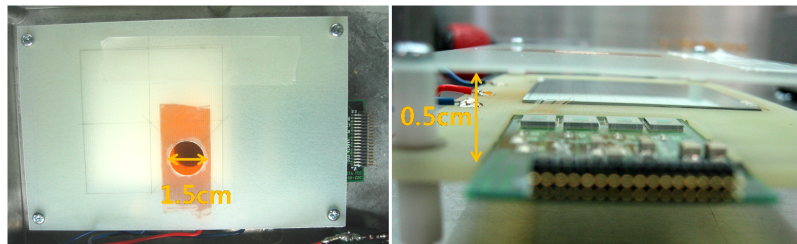


図 3.3: エポキシの設置

FEC

ASIC が付けられている基板。ASIC のためのアナログやデジタル電源の供給とテストパルスの電圧や電荷値を変えるための抵抗、コンデンサ、フィルタなどが付けられている。今回の実験で使った FEC には ASIC が 4 つ付いてるものでそのうち一つを使ってスペクトルを測定した。FEC は Si-Pad と同じ基板の上に 1.5cm ぐらいの間を開けて設置した。

FEC と VATIC の信号のやり取りのためのケーブルの規格が合わないためそれをあわせるために変換アダプタを使った。

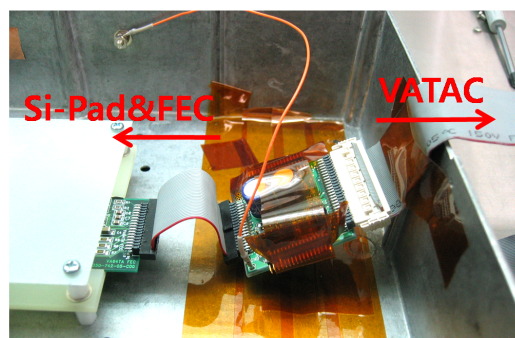


図 3.4: 変換アダプタ

高圧電圧 (HV)

今回用いられた高圧電圧は Keithley237 であり、電圧をかけると同時に精密に電流を測定できる。さらにパソコンを通して電圧、電流の調整や記録ができる。

アルミケース

放射線検出実験において重要な条件である低ノイズ環境を作るために Si-Pad 及び FEC があるエポキシ基板をアルミケースで遮蔽した。これは実験装置を電氣的衝撃や外からの電磁ノイズ、ほこりから Si-Pad を守る役割をする。また、アルミケースには HV が入るとき電圧の急激な変化で検出器が壊れることを防ぐためにローパスフィルタが付いている。

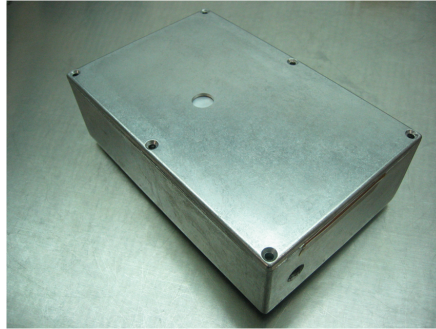


図 3.5: アルミケース

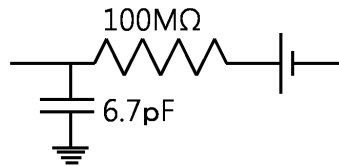
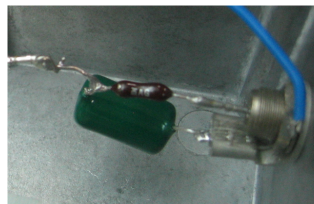


図 3.6: ローパスフィルタの写真 (左) と回路図 (右)

VATAC

ASIC に送る電源やテストパルスの設定や ASIC から送られる信号を解析するためのトリガーの電圧やピークタイムの設定、信号のアナログ→デジタル変換などをする装置である。VATAC を通じて設定される基本的な値を表にまとめた。



図 3.7: VATAC

No.of ASIC in chain	4
No.of channels pr.ASIC	64
cal. attenuation	40.00
cal. capacitor[pF]	1.8
VDD[mV]	1500
VSS[mV]	-2000
Threshold[mV]	50.00
HV control[mV]	0.00
current limit[mV]	0.0
Analog input level[mV]	-7000
calpulse[DAC step]	130
DAC Spare1	700
DAC Spare2	0
DAC Spare3	0
Peaking time[μs]	1.5
VA clock source	1.25Hz
IO-card.device no.	2

表 3.1: VATAc による設定値

No. of ASIC's In Chain	4
No. of ch.pr chip	64
twbi DAC	0
Global thr.DAC	31
sha-bias	7
ifss. DAC	5
ifsf. DAC	0
ifp. DAC	6
vrc. DAC	0
sbi DAC	0
pre-bias DAC	7
ibuf DAC	7
obi DAC	0
continuas readout	×
continuas readme	✓
Buffersize enable calpus	100000
Enable calpulse	×
VAtest on	×

表 3.2: Mask Set Up

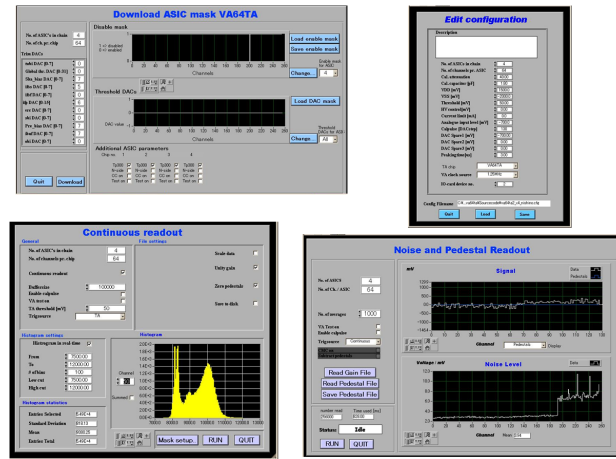


図 3.8: VATAC コントロール画面

	V	A
Digital	+5	0.1
+Analog	+5	0.258
-Analog	-5	-0.314

表 3.3: VATAC に供給される電源

電源装置 (トラ電)

VATAC や ASIC を動かすための装置。今回の実験では TEXIO 社の製品を用いた。デジタル電源やアナログ電源を供給する。表 3.3 はデジタル電源とアナログ電源の電圧設定と FEC がつながっているときの電流値である。

恒温槽

Si 検出器の性能に大きく影響をさせる温度を調節するための装置。恒温槽の中に Si 検出器や VATAC などを入れて実験を行った。

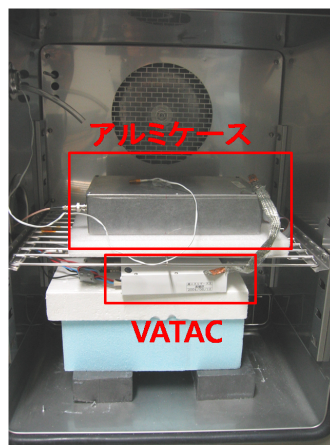


図 3.9: 恒温槽内部の配置

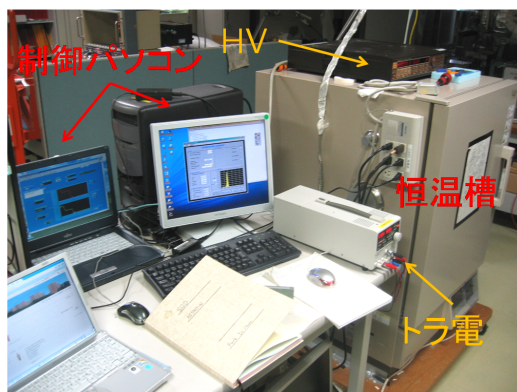
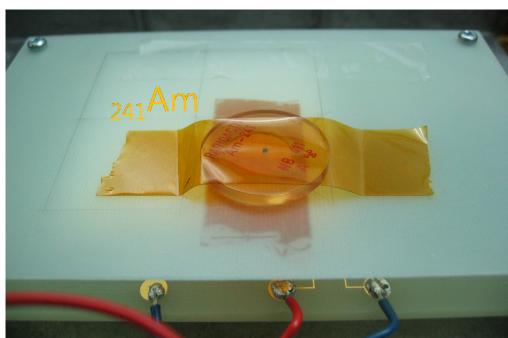


図 3.10: 実験装置の様子

放射線源の配置

今回の放射線源 ^{241}Am から出るガンマ線を照射したが、それから出る 59.5keV は Si-Pad ではなかなか止まらないのでカウントレートを上げるため Si-Pad にできるだけ近くに置くほうが良い。今回の実験では Si-Pad から 0.5cm ほど離れたエポキシ基板の上に ^{241}Am を置いて測定を行った。

図 3.11: ^{241}Am の配置

3.1.2 データの記録

実際のスペクトル測定において統計的に有意なデータを得るためには 59.5keV でガンマ線イベントが少なくとも 100 個以上必要である。今回の実験で 59.5keV のガンマ線の検出頻度が 2-4 個/分であることを考えると少なくとも 50 分以上データを取る必要がある。しかし 15 分に 2Gbyte 以上のデータが出る検出器に対してパソコンの 1 回最大データ保存限界が 2Gbyte であったため、10 分単位でデータを測定した。

3.2 ^{241}Am スペクトルの読み出し

Si-Pad を用いて ^{241}Am のスペクトルの測定をデータの処理と分解能を出すまでの過程を順番に説明する。

	温度	習得時間
実験 1	20	4785s
実験 2	-20	9000s

表 3.4: 読み出しの温度と習得時間

3.2.1 ADC データの読み出し

Si-Pad から生信号、つまり ADC 値を読み出す。前節で説明したとおり 1 回の測定は 10 分までが限度なので十分なデータが取れるまで 10 分刻みで分けてデータを習得する。今回の実験で取ったデータの温度条件と習得時間を表 3.4 で表せた。そしてここで取れた生データのスペクトルの例を図 3.12 で表せた。

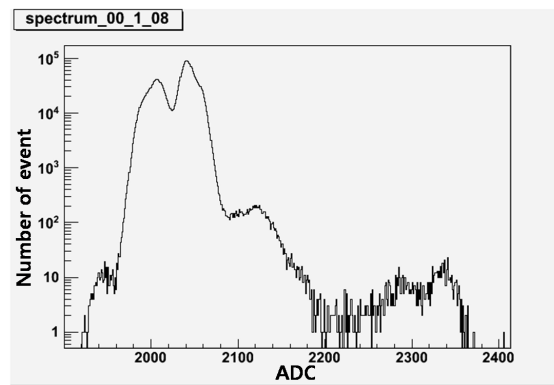


図 3.12: 取れた ADC データ

3.2.2 ノイズの補正

取れた ADC のデータはペDESTAL補正、コモンモードノイズ補正をしてからスペクトルデータとなる。

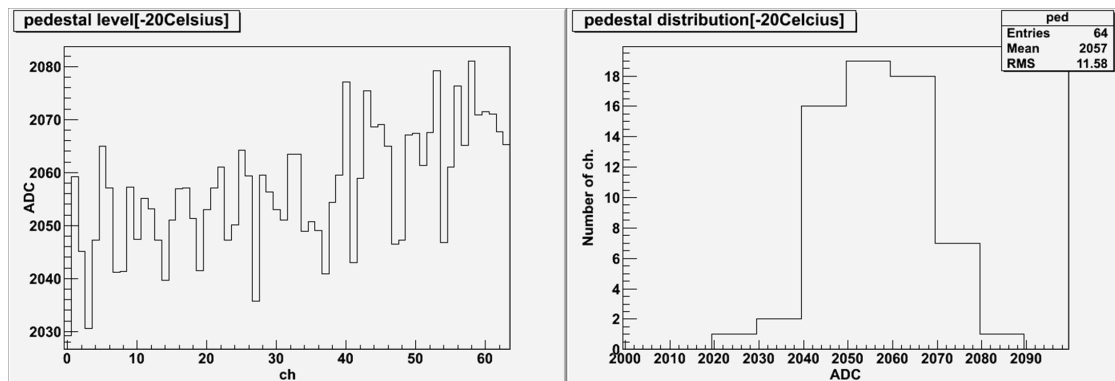


図 3.13: -20 のペDESTALの分布

図 3.13 と図 3.14 は -20 と 20 での Si-Pad のペDESTAL分布である。この分布を用いてペDESTAL補正を行う。ペDESTAL分布は -20 に比べて 20 のときが低くなっているこ

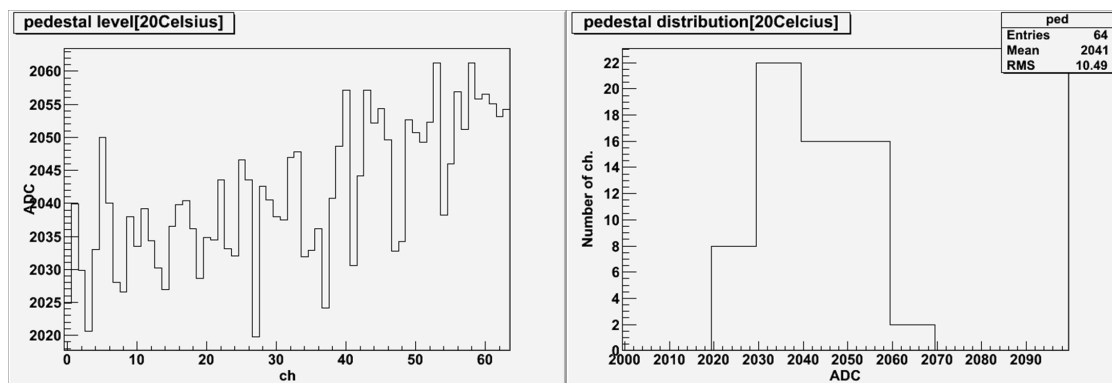


図 3.14: 20 のペDESTALの分布

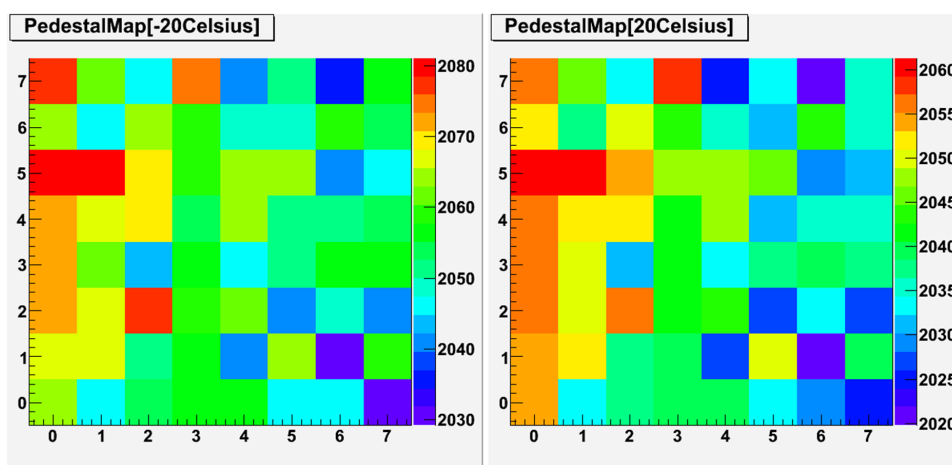
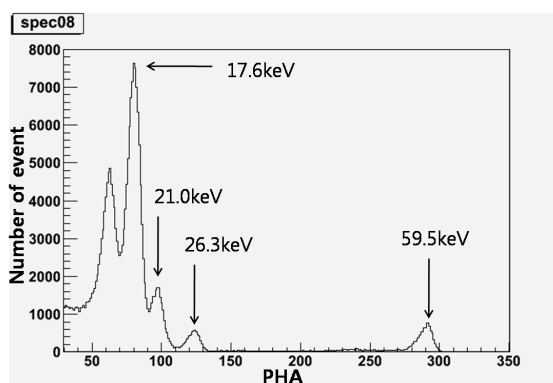


図 3.15: ペDESTAL分布の比較

図 3.16: ^{241}Am のスペクトル

とがグラフで分かる。この影響は ASIC の温度依存性によるものとして考えられる影響で、ASIC の抵抗やコンデンサなどのいろんな部品の性質が温度によって変わって影響を与えると考えられる。この影響はペDESTALだけではなく ASIC の増幅率などにも影響を与えて、次に出てくるゲインにも影響を及ぼす。ノイズ補正をした後、取れたデータのなかで分解能がもっともいいチャンネルのスペクトルが図 3.16 である。この図では ^{241}Am の 4 つのピークが良く見える。-20 と 20 での全チャンネルのスペクトルを付録 A に載せておく。

3.3 Si-Pad のスペクトル性能評価

3.3.1 ピークのガウスフィット

分解能を求めようとするピークをガウスフィットをする。今回の測定では 59.5keV のピークにガウスフィットを行ってその分解能を求めた。ガウスフィットのとき注意する点として、フィットの範囲を決めるとき、誤差がより小さくなるように決めないといけない。図 3.17 はフィットとして注意する必要があるいくつかのスペクトルの例である。

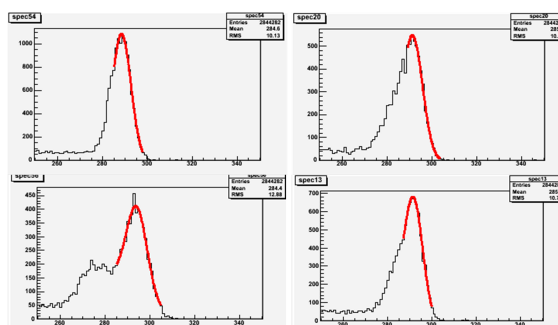


図 3.17: 悪いスペクトルの形の例

付録 B に-20 と 20 での全チャンネルのフィット図を次に載せておく。

3.3.2 ADC のエネルギー変換

ADC 値を X 線のエネルギー単位に変換する。この時の変換係数をゲインと呼ぶ。それぞれのチャンネル別ゲインマップとゲインの分布を図 3.18 と図 3.19 に表せた。ゲインもペDESTAL のように ASIC の温度依存性で数値が変わることを図 3.18, 3.19 のヒストグラムで確認できる。

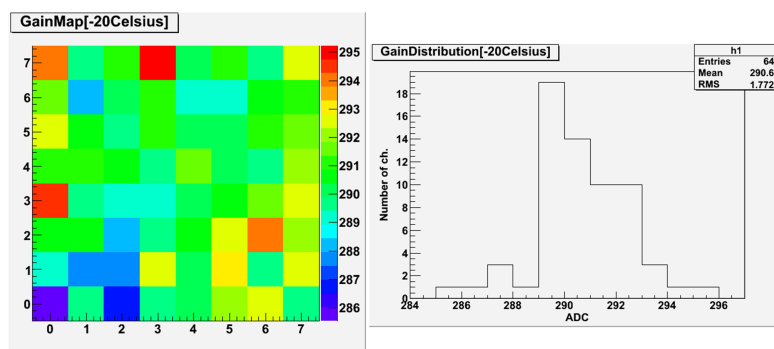


図 3.18: -20 のチャンネル別ゲインマップと (左) とゲインの分布 (右)

3.3.3 Si-Pad の分解能導出

求めたガウスフィットとゲイン分布を基にし、Si-Pad の分解能を導出することができる。求めた分解能とその分布を図 3.19 に表した。59.5keV で分解能 (FWHM) は-20 で平均

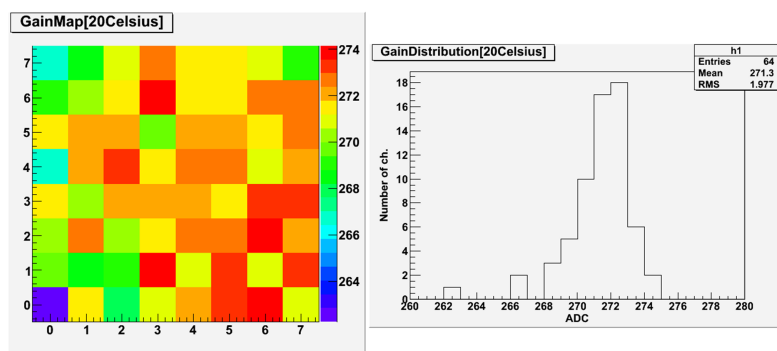


図 3.19: 20 のチャンネル別ゲインマップと (左) とゲインの分布 (右)

2.2keV、20 では 3.3keV であった。この値は Si-Pad の分解能が温度に依存していることを良く見せている。チャンネル別で特徴を見るとボンディングがあるパッド周辺で分解能が悪くなっているのを温度に関係なく確認できる。20 で測定したパッドからは外側のチャンネルの分解能が悪くなっているのが目立つ。これは電場を一様に作る役割をするガードリングの影響が温度の上昇と共に少なくなってリーク電流の寄与が大きくなることで説明できる。

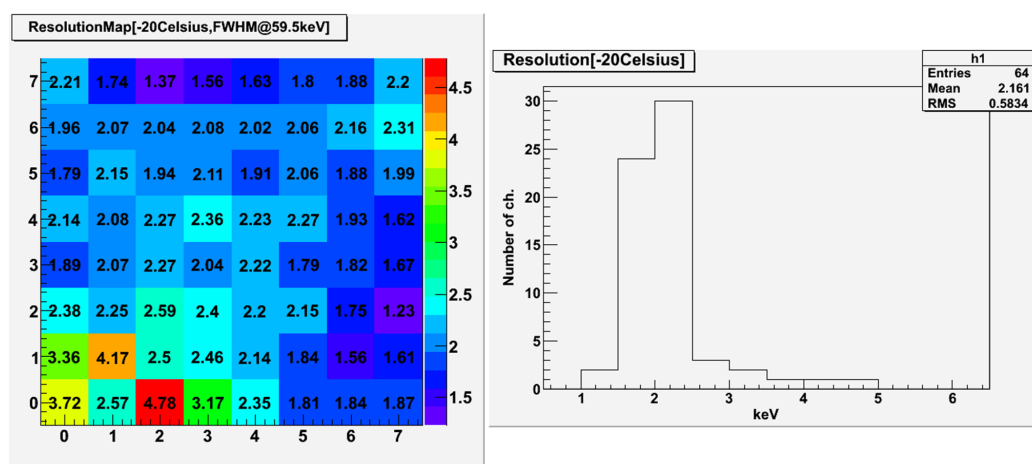


図 3.20: -20 の分解能のマップ

SGD の動作温度が低い点を考えると 20 で見える外側パッドの分解能の悪化は SGD 全体のノイズと比べて寄与が少ないと思われる。次の章での考察ではこれを勘案して主に-20でのノイズについて考察した。

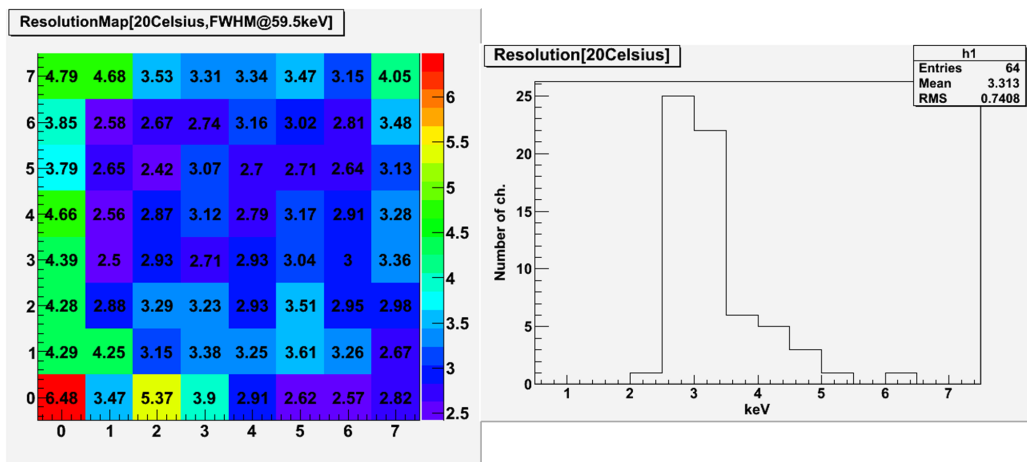


図 3.21: 20 の分解能のマップ

第4章 Si-Padのノイズ特性

実験結果から Si-Pad のそれぞれのチャンネルのノイズ特性が求められた。この結果を基にして、Si-Pad の配線の静電容量とそれぞれのチャンネルのノイズの相関関係について考察した。

温度が低い所ではリーク電流によるノイズの影響は少なくなり、主に容量性ノイズが支配的になる。Si-Pad の 2 つの静電容量の割合は理論的にだいたいの値を計算することができ、ノイズとしての作用を予想できる。Si-Pad が持つ静電容量は大きく検出器自身の容量と配線信号の引き出し線などによる浮遊容量の 2 つに分けられる。パッドの形が一樣であることを考えたら検出器自身の容量はそれぞれのパッドで一定であることが考えられる。

Si-Pad を平板なコンデンサと見ることができ、これから容量の予測値を計算することができる。同じように配線などの浮遊容量も予想することができる。図 4.1 は配線の構造図である。ASIC に接続するためのボンディングパッドは図の左下にあるため、ボンディングパッドから遠いパッドは配線の長さが長くなり、また、ボンディングパッドに近いパッドは自身のパッドの上を多くの配線が通ることになる。Si-Pad の上を通過して信号を伝える配線の構造、長さはそれぞれのパッドによって違ってそれは浮遊容量にも影響を与える。それがエネルギー分解能の悪化につながると考えられる。分解能のマップと比べてみると配線が集中したところが分解能が悪くなっているのが分かる。これら二つの図を重ね合わせて相関を見やすくした図が 4.2 である。

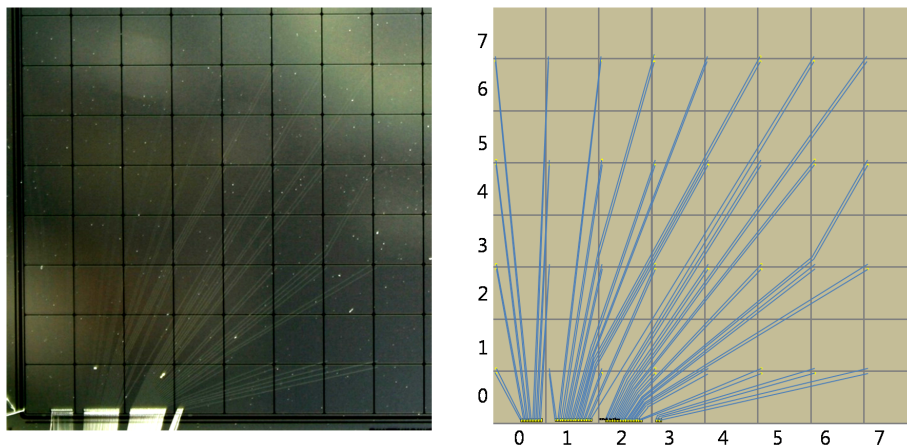


図 4.1: Si-Pad の実物 (右) と配線構造の模式図 (左)。青い線が配線で左下に集中されている。

配線が集中して分解能が悪くなることを定量的に比べるために配線の長さを測って相関関係について調べた。

配線の長さについて、ASIC につながるボンディング位置からそれぞれのピクセルパッドまでの長さを L_L 、ピクセルパッドの上を通る別のパッドからの配線の長さの和 L_c を測って、分解能と比べてみたグラフが図 4.4 である。

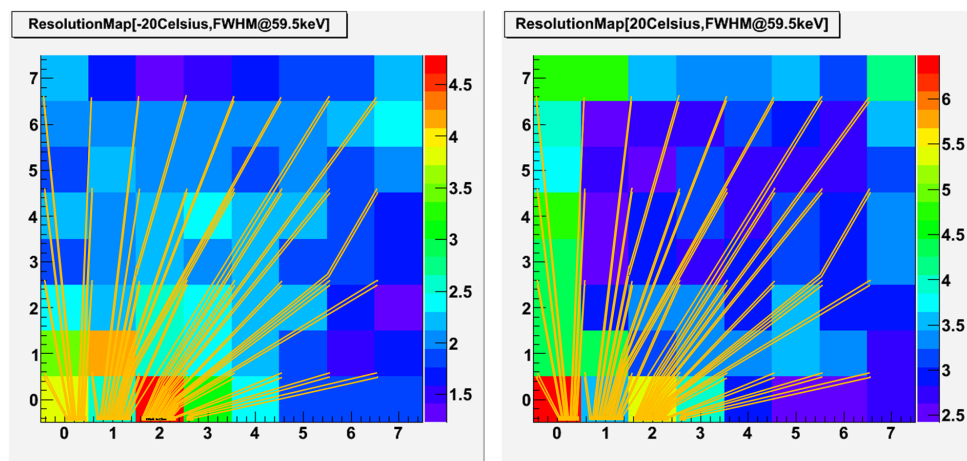


図 4.2: Si 検出器の分解能分布と配線図。左が-20 、右が 20 で分解能。配線が集中するほど分解能が悪い。

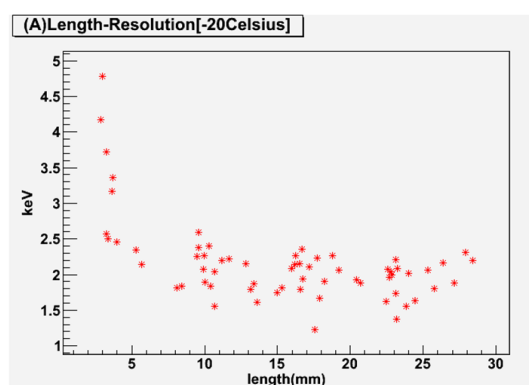


図 4.3: -20 でのピクセルパッドからボンディングまでの配線の長さとの分解能の関係

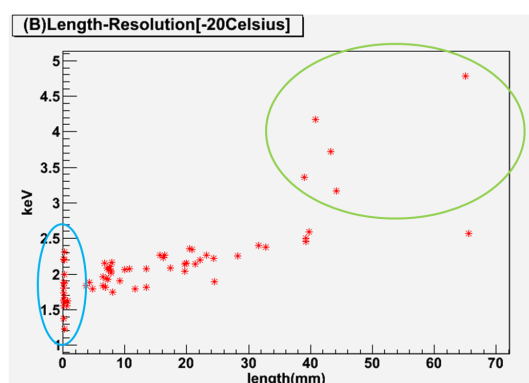


図 4.4: -20 でのピクセルパッドの上を通る配線の長さの合計との分解能の関係

図 4.3 の配線の長さが 5mm 以下の配線つまり、ボンディングの近くのパッドの分解能は悪くなっているの分かる。図 4.4 を全体的に見るとパッドの上を通る配線が多いほど分解能が悪くなっている傾向が見える。しかしグラフで緑色や水色で囲んだところはその傾向とは外れた降るまいが見える。水色で囲んだプロットは位置的に図 4.6 の水色のところで、パッドの上を通る配線 (L_c) がほとんどなく、ボンディングまでの距離が長い特徴がある。この

特徴を用いるとパッドからボンディングまでの配線の長さ (L_L) の影響を調べることができる。これら水色に囲んだプロットのパッドに対して L_L と分解能の関係をプロットした図が図 4.5 である。この図を見ると L_L と分解能はおおよそ比例関係にあることが分かる。しか

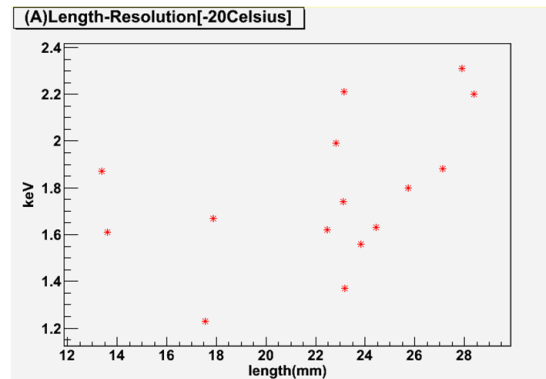


図 4.5: L_L と分解能の関係

し分解能はほとんど自身の上を通過する配線の長さ L_c で決まっており、 L_L の分解能に対する寄与は少ないことが分かる。図 4.4 で緑色に囲んだプロットのパッドはボンディングパッド付近の配線が集中されてるところのパッドである。これらの分解能が全体の傾向より高い理由として線と線の間から生じる静電容量によるノイズの影響と考えられる。図 4.6 は水色と緑色で囲んだパッドの位置を表せた。

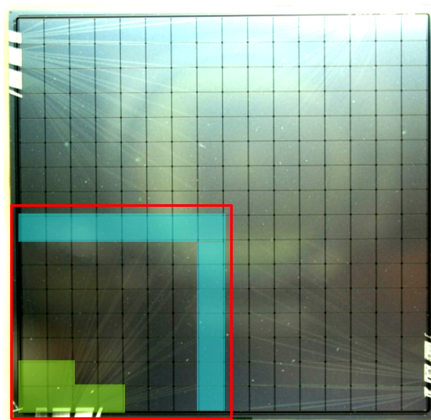


図 4.6: L_c -分解能関係で外れた振る舞いをするパッド

図 4.4 の傾向から分解能を悪くするノイズは主にパッドとその上を通る配線の間から生じる容量から発生すると思われる。この配線によるノイズが本当に静電容量と関係があって分解能に影響をするかを確かめるためには配線の静電容量を調べる必要がある。しかし現在の実験のセットでは静電容量を測定できないため、Si-Pad の構造を基に静電容量を予想した。静電容量予想の条件として Si-Pad と配線の間容量だけが存在すると仮定すると、次の式 4.1 で配線の予想浮遊容量を計算できる。

$$C_{line} = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon \frac{w \times L_c}{d} \simeq 9.208 \times 10^{-11} \times L_c \quad (4.1)$$

配線の構造は図 4.7 で見えるようにほぼ平面の構造をしている。これは Si-Pad の生産工程

で配線は蒸着で作るため、この構造より配線の容量を平行する導体の容量式から導出できる。

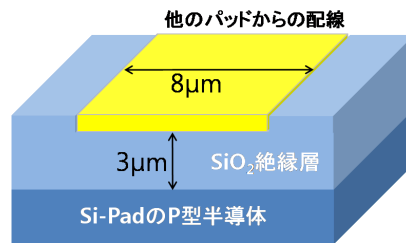


図 4.7: Si-Pad の配線の断面構造

パッドと配線間の静電容量以外に配線間の容量や Si-Pad と ASIC の間をつなぐ線の容量などがある。しかしこれらを計算に入れるのが難しい理由として、相対的にパッドと配線との容量より小さく、配線の位置や物質との誘電率などの問題が複雑になり、正確な容量を決定するのが難しいためである。隣り合う配線の容量を DSSD の開発から得た経験式 4.2 から予想はできるが、隣り合う線が一番近いときの距離である $100\mu m$ で一定と仮定した場合、単位長さあたり静電容量は式 4.1 で求めたパッドと配線間の静電容量より約 10 分の 1 の強度大きさである。

$$C_{next} = \left(0.8 + 1.6 \frac{w}{p}\right) \times L_t \simeq 0.9 \times 10^{-11} \times L_t \quad (4.2)$$

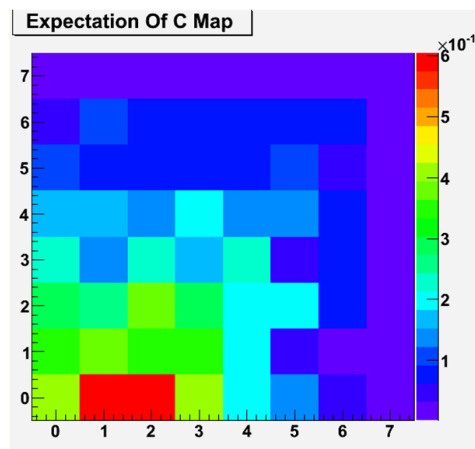


図 4.8: 予想容量の分布図

そこで配線とパッド間の容量のみ考え、式 4.1 から予想される容量と分解能についてプロットしたのが図 4.8 である。この予想容量図とエネルギー分解能の分布図を見比べると全体的ににていることが分かる。これはエネルギー分解能においてパッドの上を通る配線の容量がノイズ源として支配的であることを示唆する。

今までの考察をまとめると

- -20 の条件での Si-Pad のエネルギー分解能は 2.16keV として SGD の要求性能に近い

- ノイズの主な原因として配線の浮遊容量がある。
- 配線によるノイズはパッドの上を通る他のパッドの配線の長さの合計 L_c と比例する。
- ほとんどのチャンネルでは配線によるノイズが大きいですが、配線が集中しているチャンネルでは他のノイズ源が寄与していることが予想される。

第5章 今後の課題

今回の実験では Si-Pad の容量を直接測れず、予想される静電容量とノイズ源について考察した。この論文での予想した静電容量はパッドと配線の間で生じる静電容量が他の容量より最も大きいと仮定したが、実際の違う可能性もある。1つ目の今後の課題としてはパッド別静電容量を直接測ることで予想静電容量との相関関係と、分解能に対して影響を調べる必要がある。

2つ目の課題としては検出器の浮遊容量以外のノイズ源について調べることである。配線が集中されたパッドから見えたノイズ源を探って検出器に対する影響を少しでも減らすことで、沢山の半導体検出器が用いられる SGD の性能は大きく向上する。このためにはいろんな環境に対して検出器の性能を試してみる必要がある。しかし今回のように ISAS にしかなくて、利用者が多い VATIC を用いて実験することは実験の自由度が減ってしまい、十分なデータを集めることができない。よって我が研究室にある別の読み出し装置である VME system の立ち上げが課題となる。

付録A ^{241}Am のスペクトル

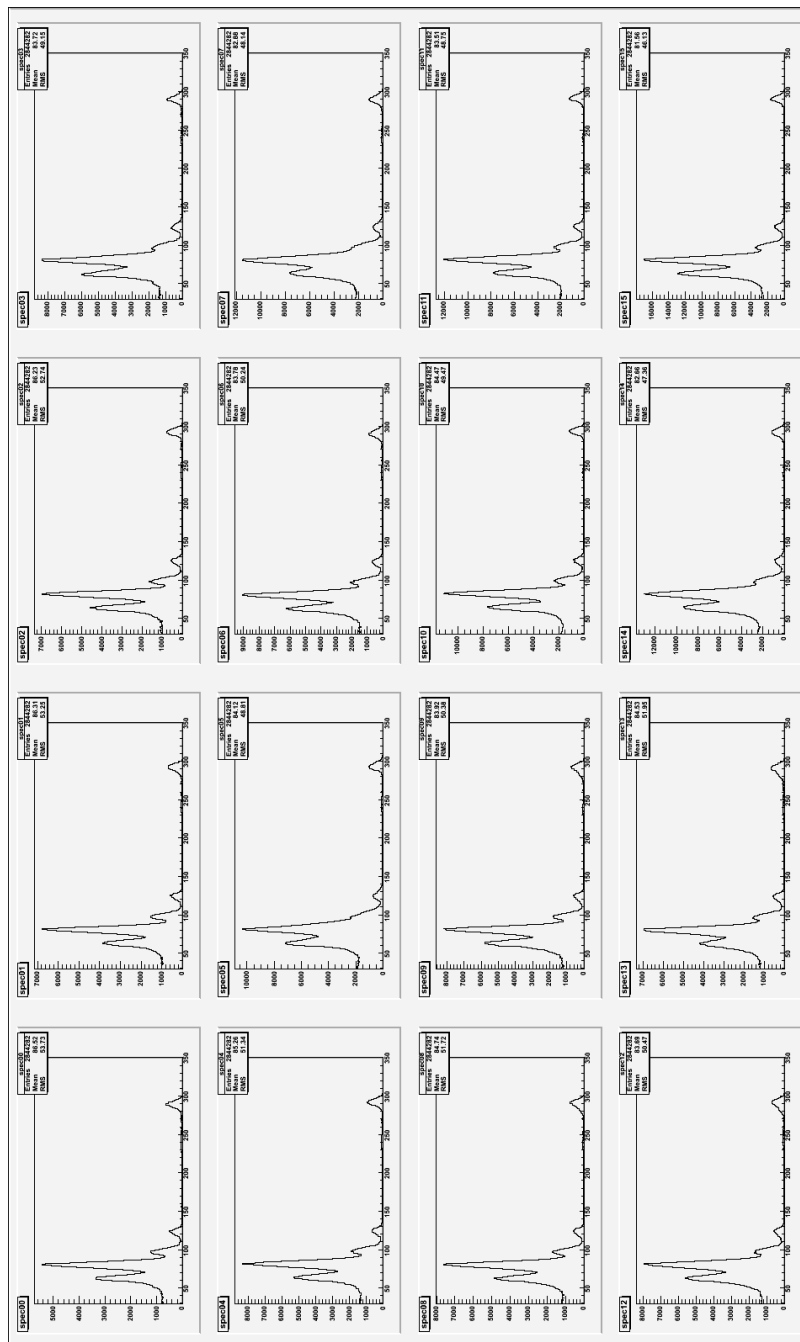
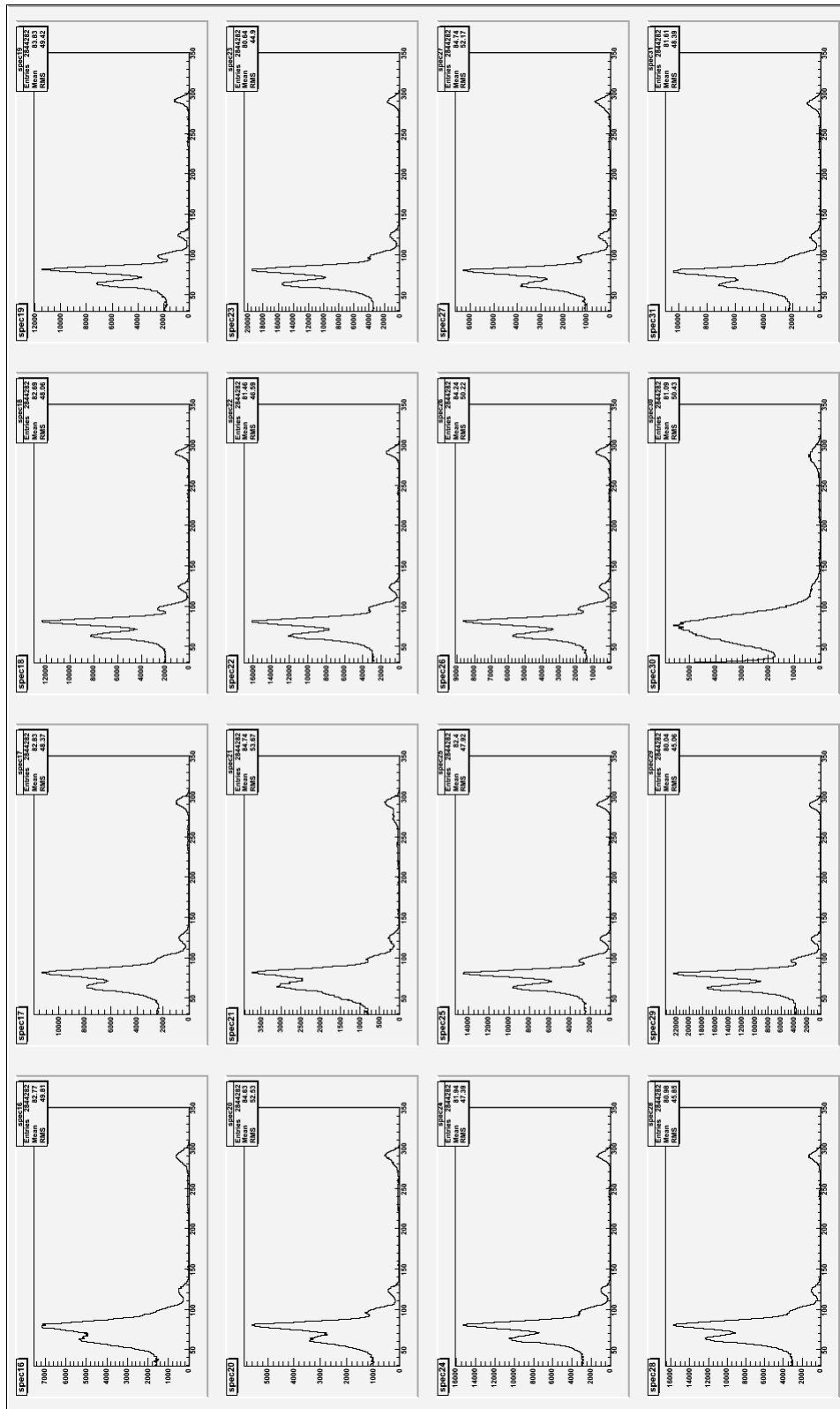
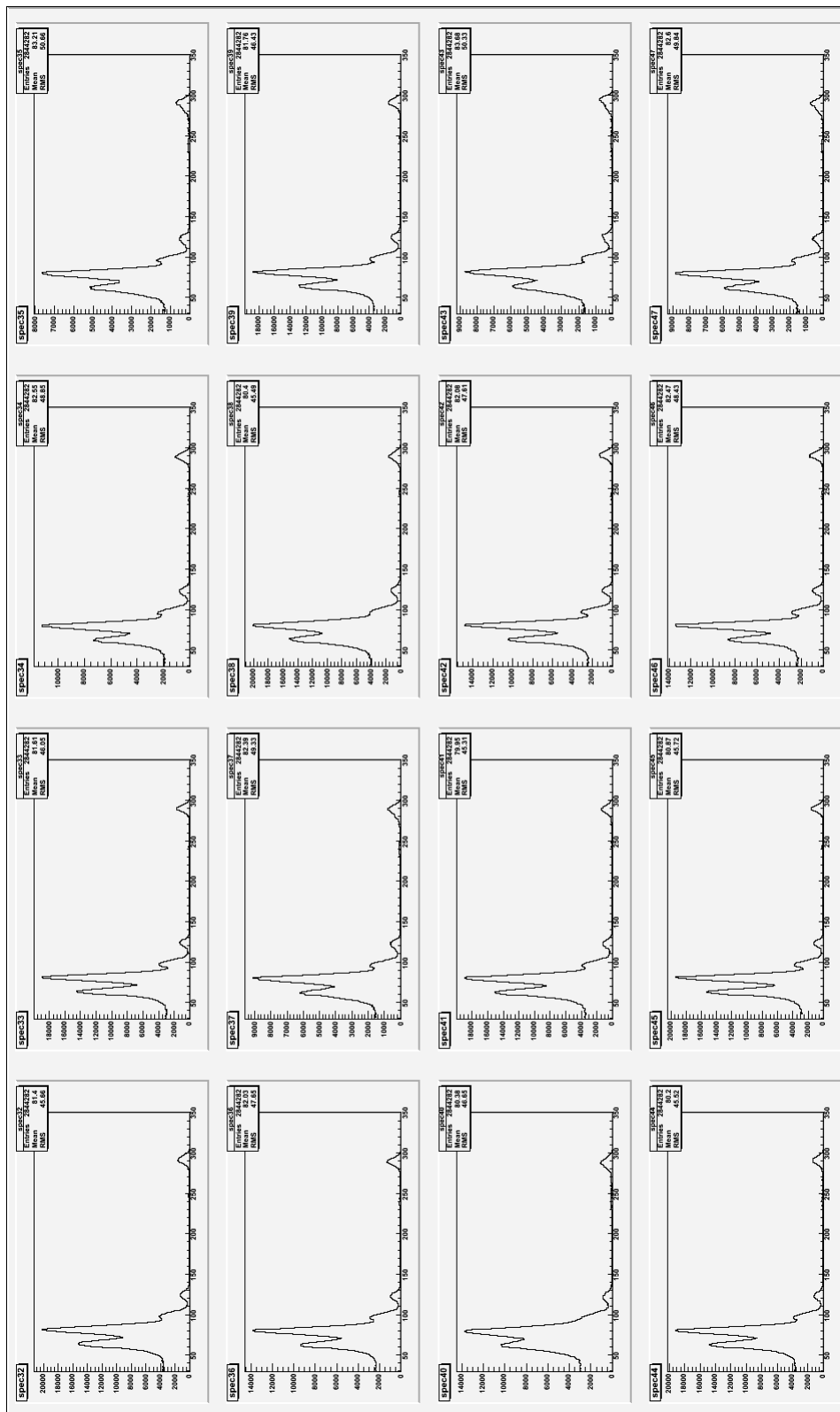


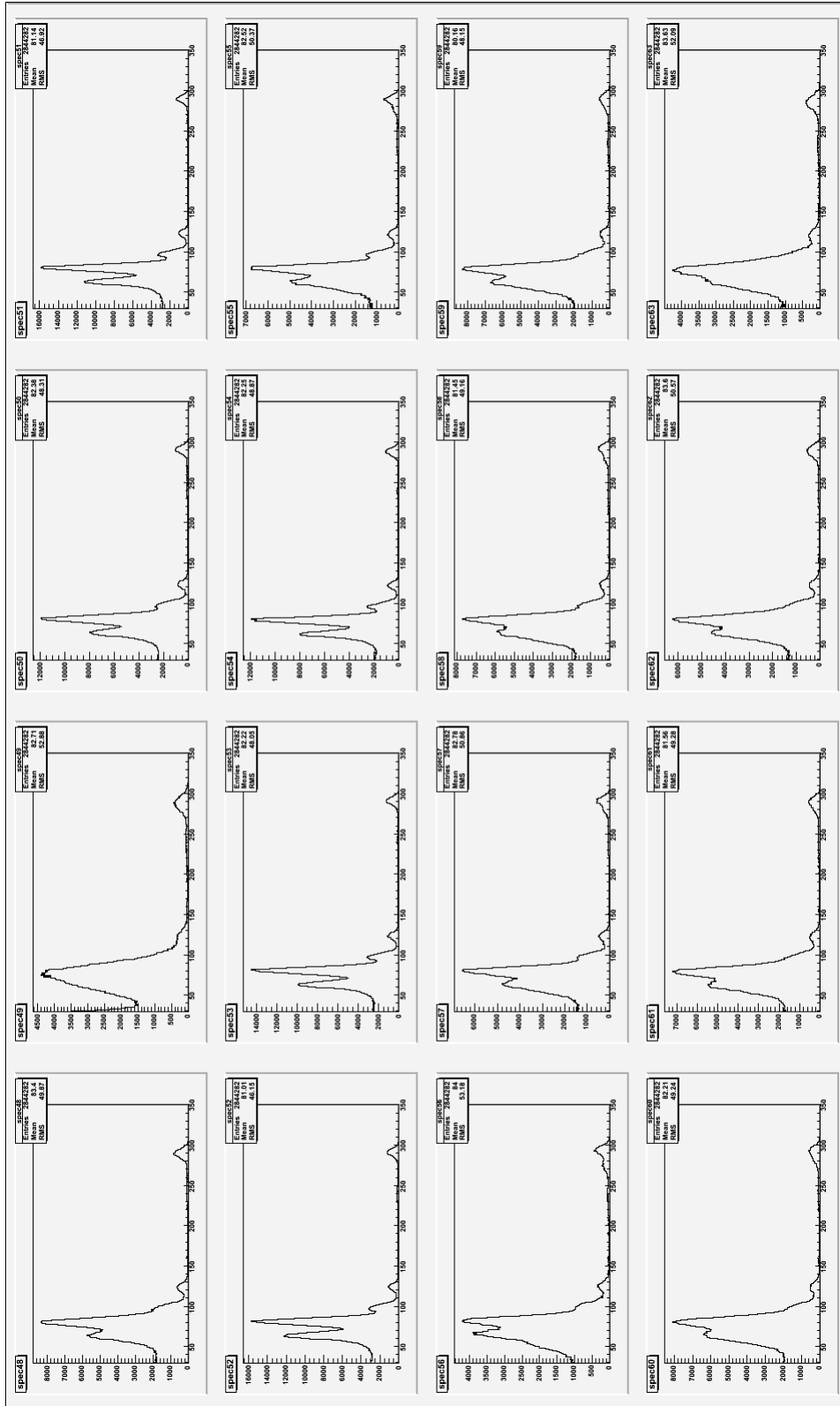
図 A.1: -20 での ^{241}Am のスペクトル (0ch.-15ch.)



☒ A.2: -20 での ^{241}Am のスペクトル (16ch.-31ch.)



☒ A.3: -20 での ^{241}Am のスペクトル (32ch.-47ch.)



☒ A.4: -20 での ^{241}Am のスペクトル (48ch.-63ch.)

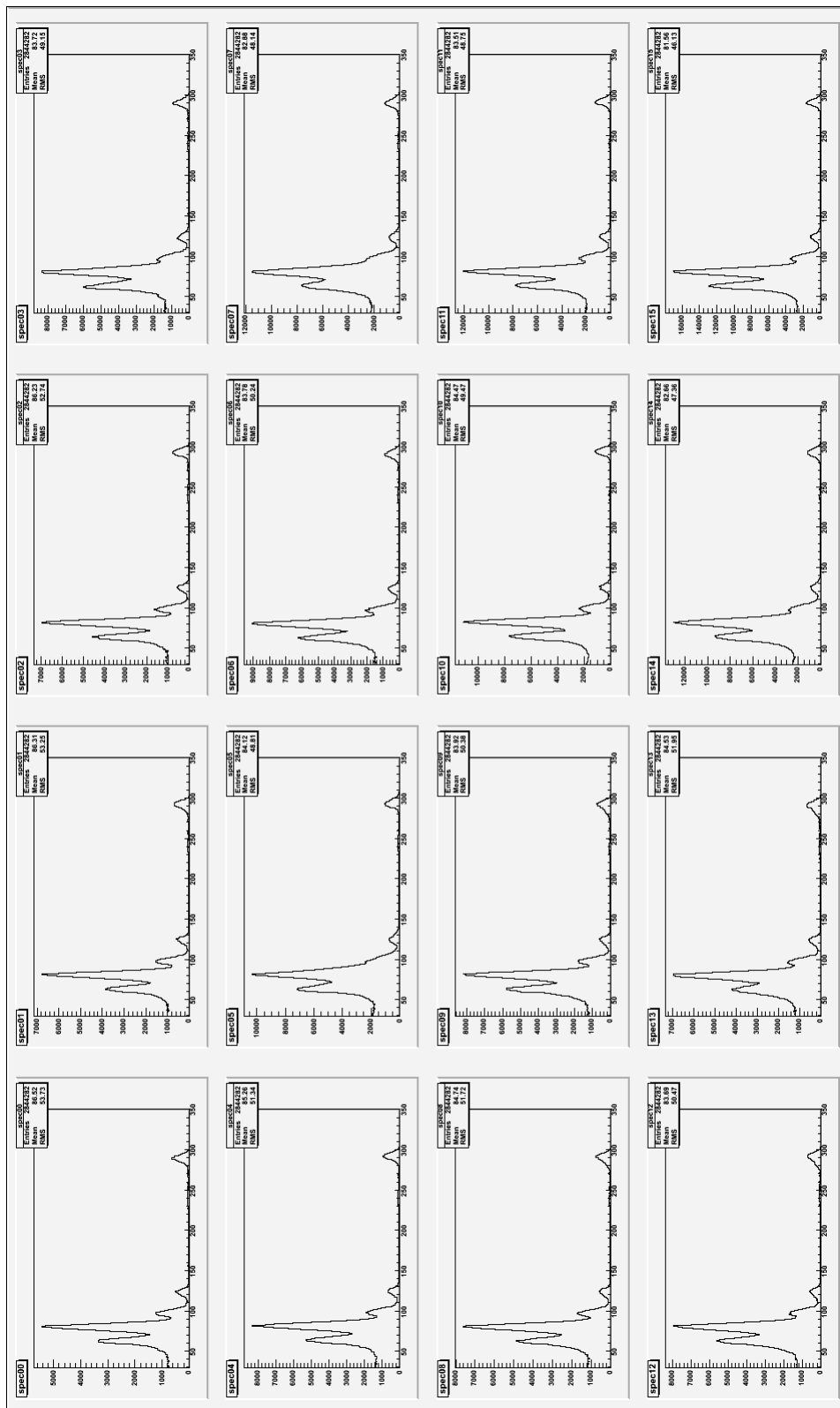


図 A.5: 20 での ^{241}Am のスペクトル (0ch.-15ch.)

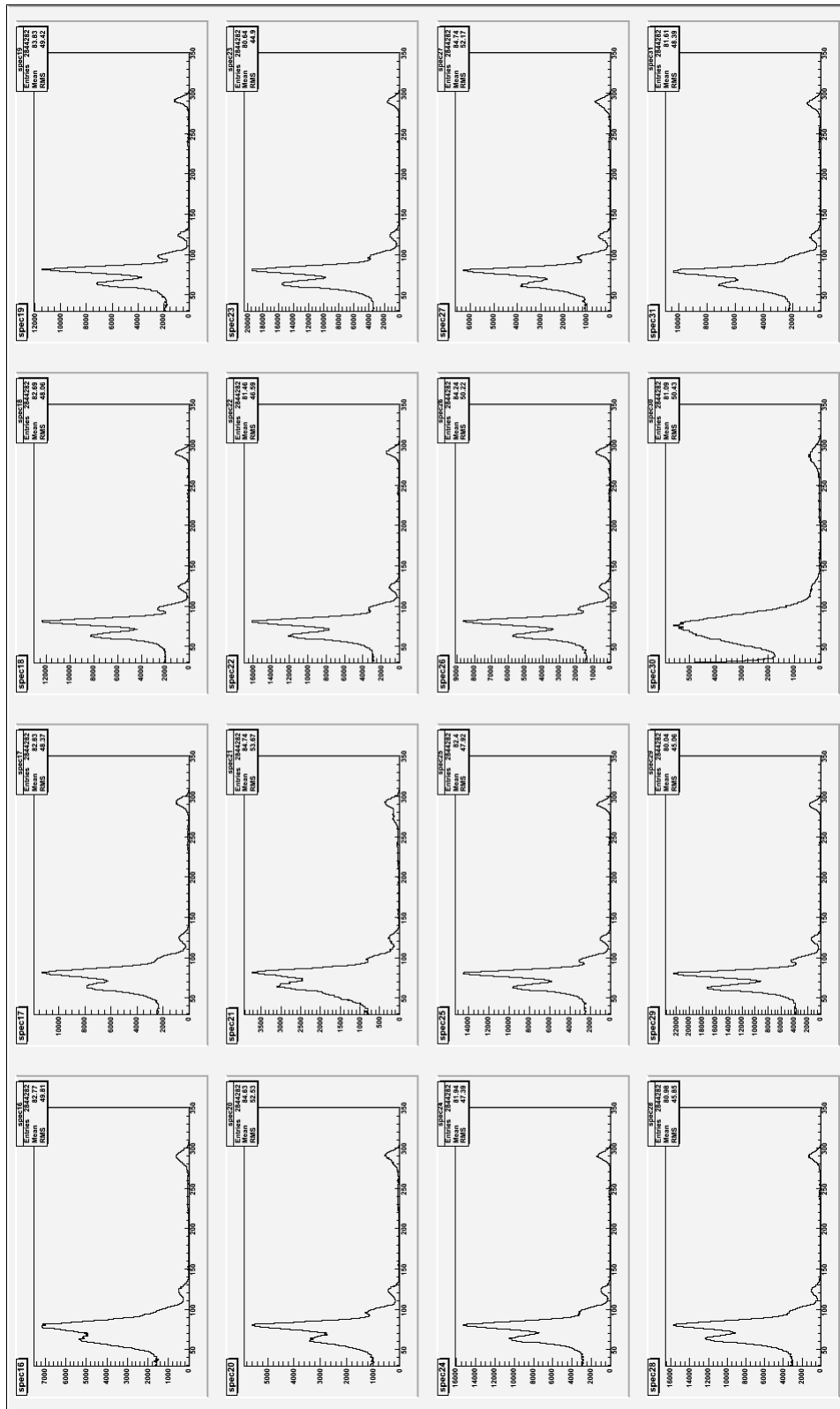
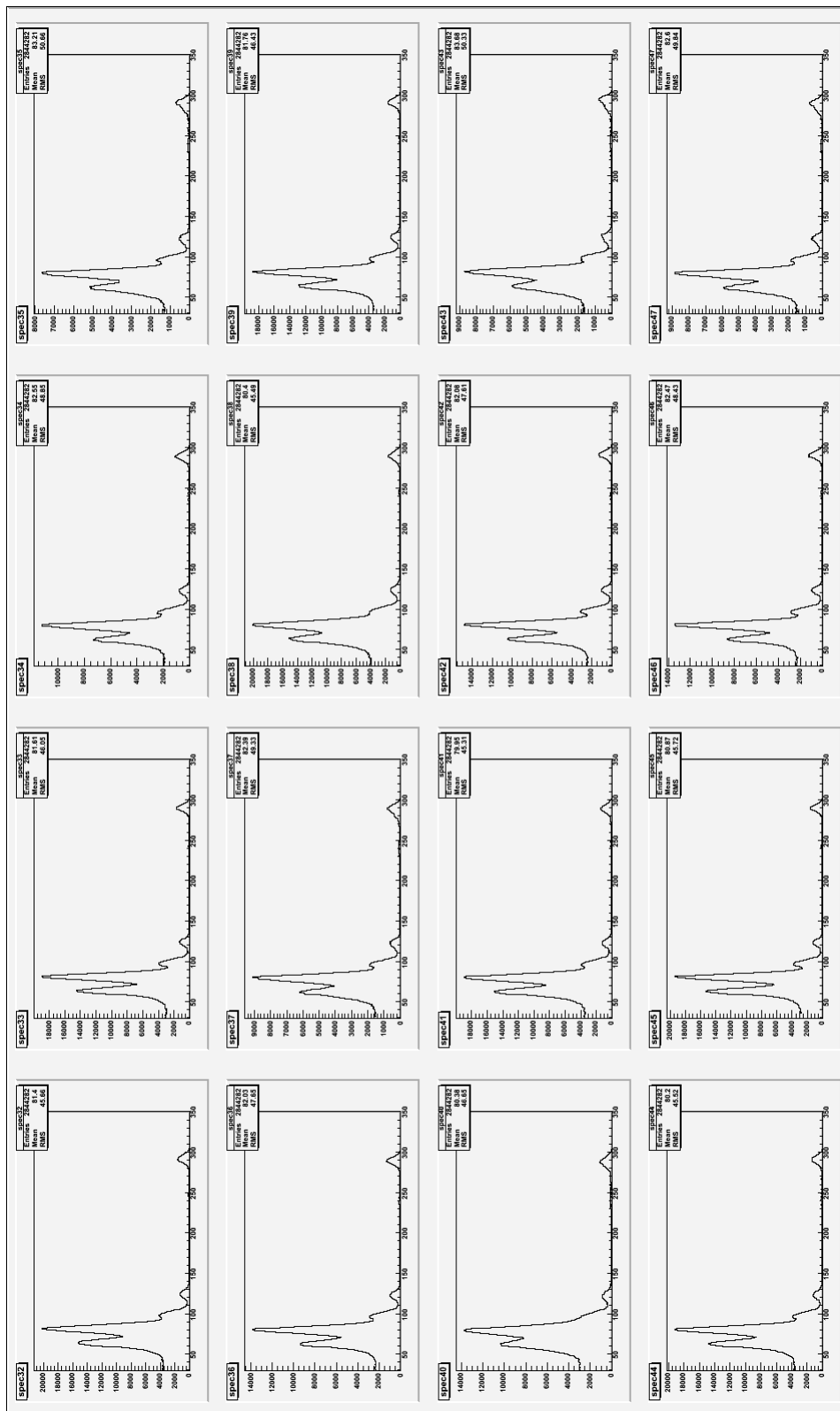


図 A.6: 20 での ^{241}Am のスペクトル (16ch.–31ch.)



☒ A.7: 20 での ^{241}Am のスペクトル (32ch.–47ch.)

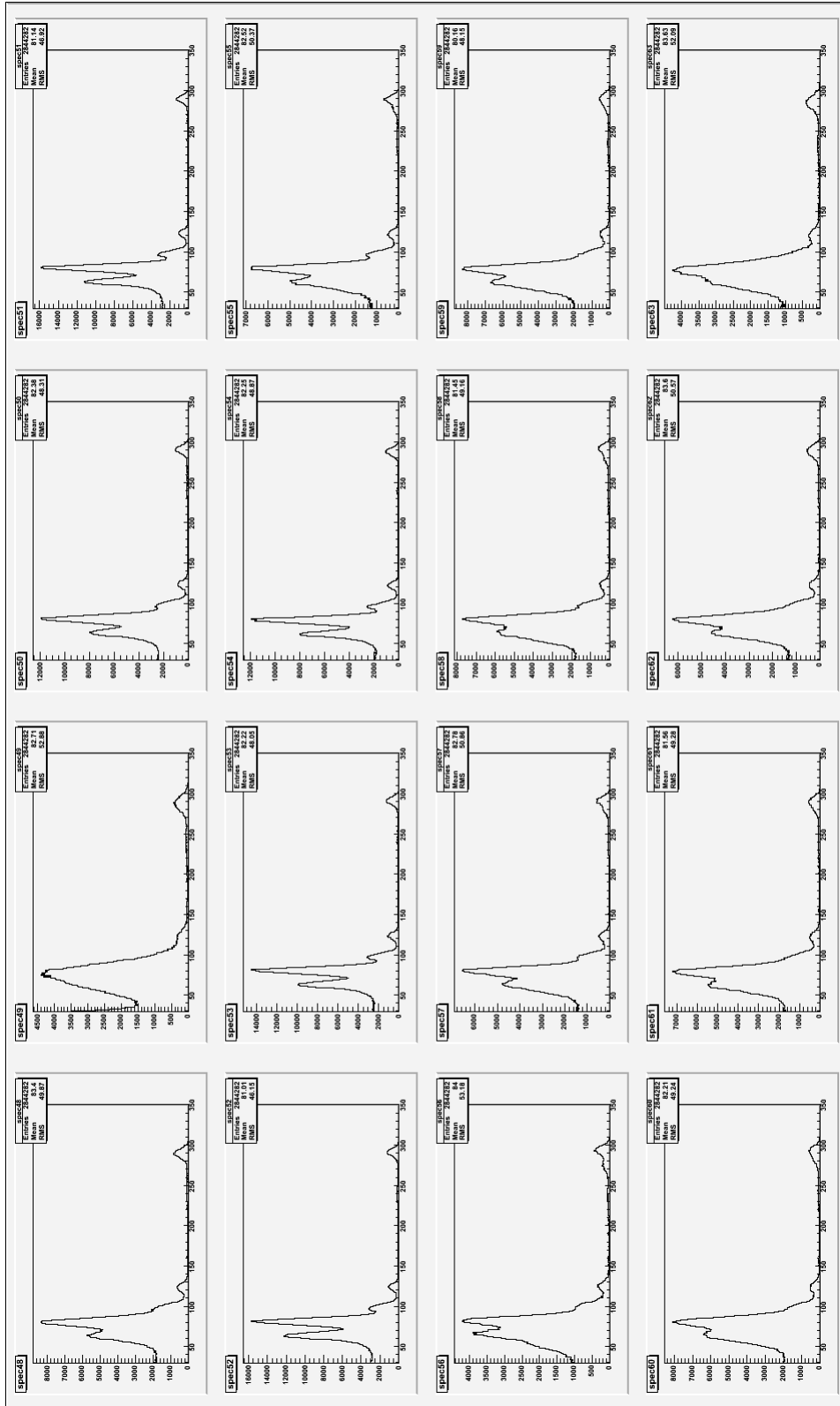
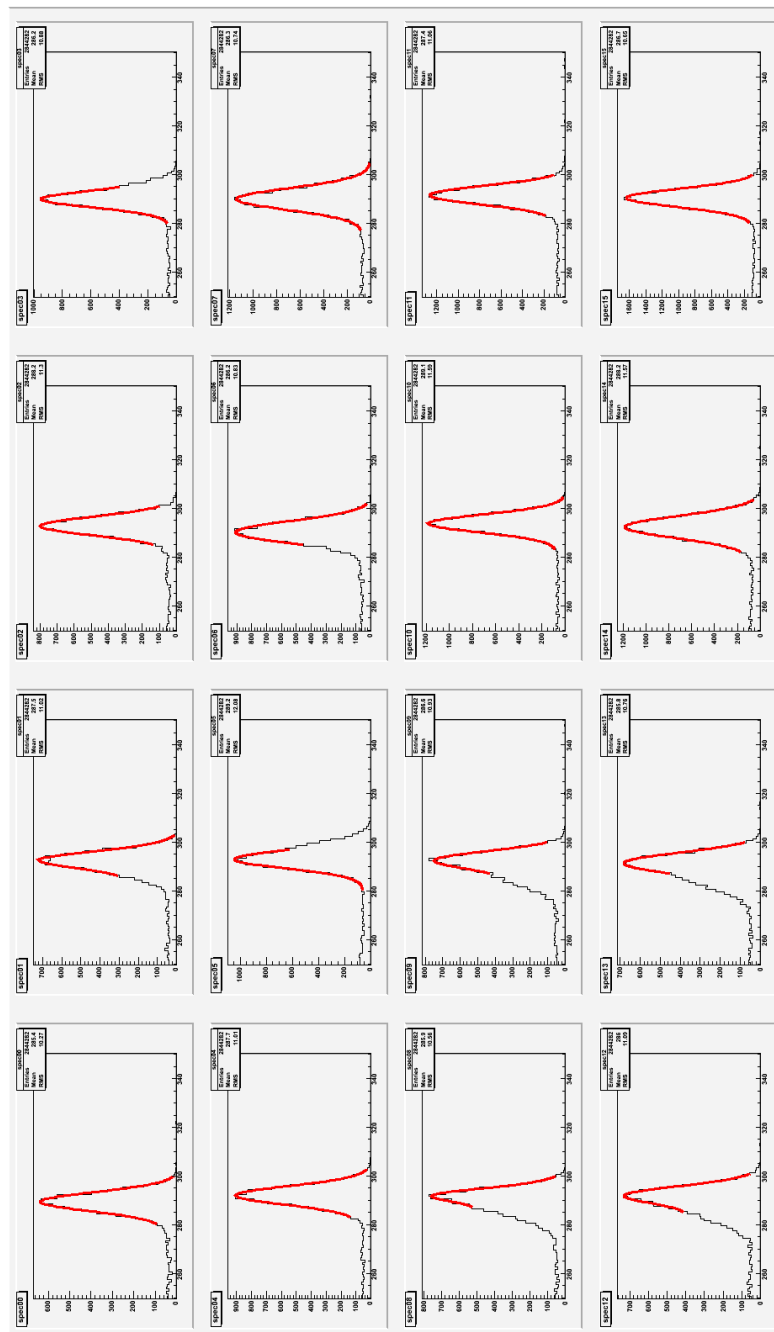


図 A.8: 20 での ^{241}Am のスペクトル (48ch.–63ch.)

付録B 59.5keVピークのフィット



☒ B.1: -20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (0ch.-15ch.)

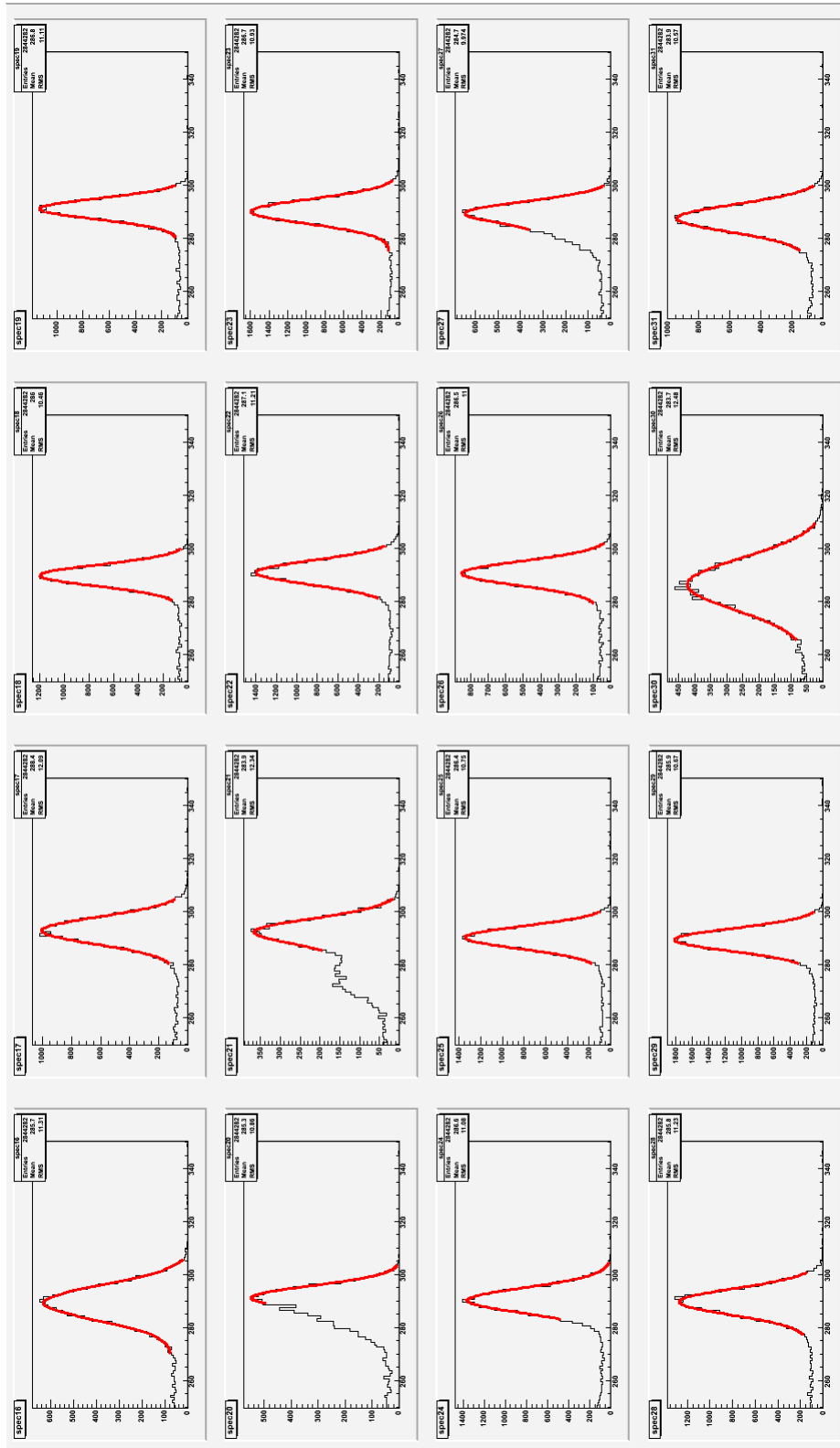


図 B.2: -20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (16ch.-31ch.)

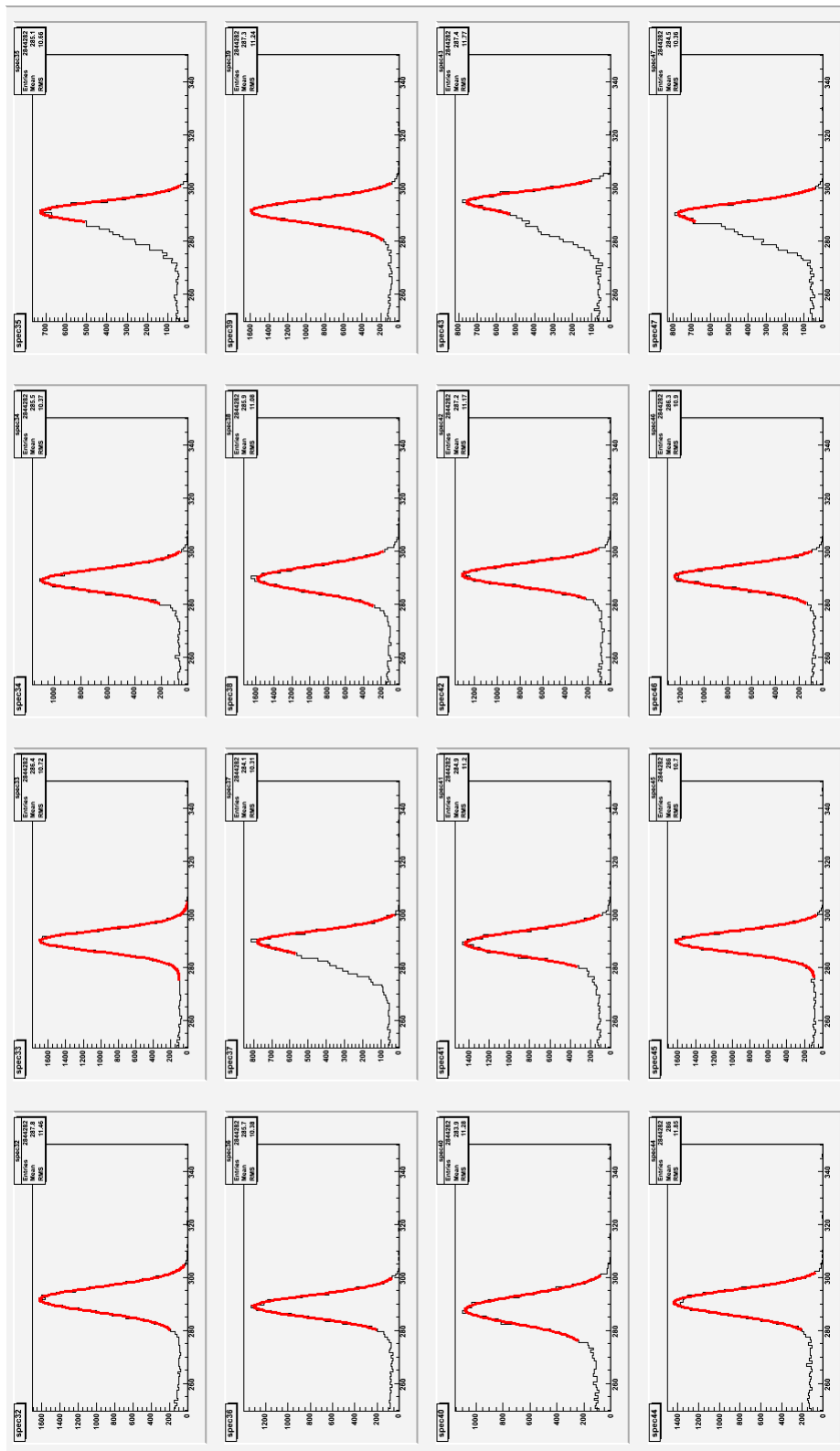


図 B.3: -20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (32ch.-47ch.)

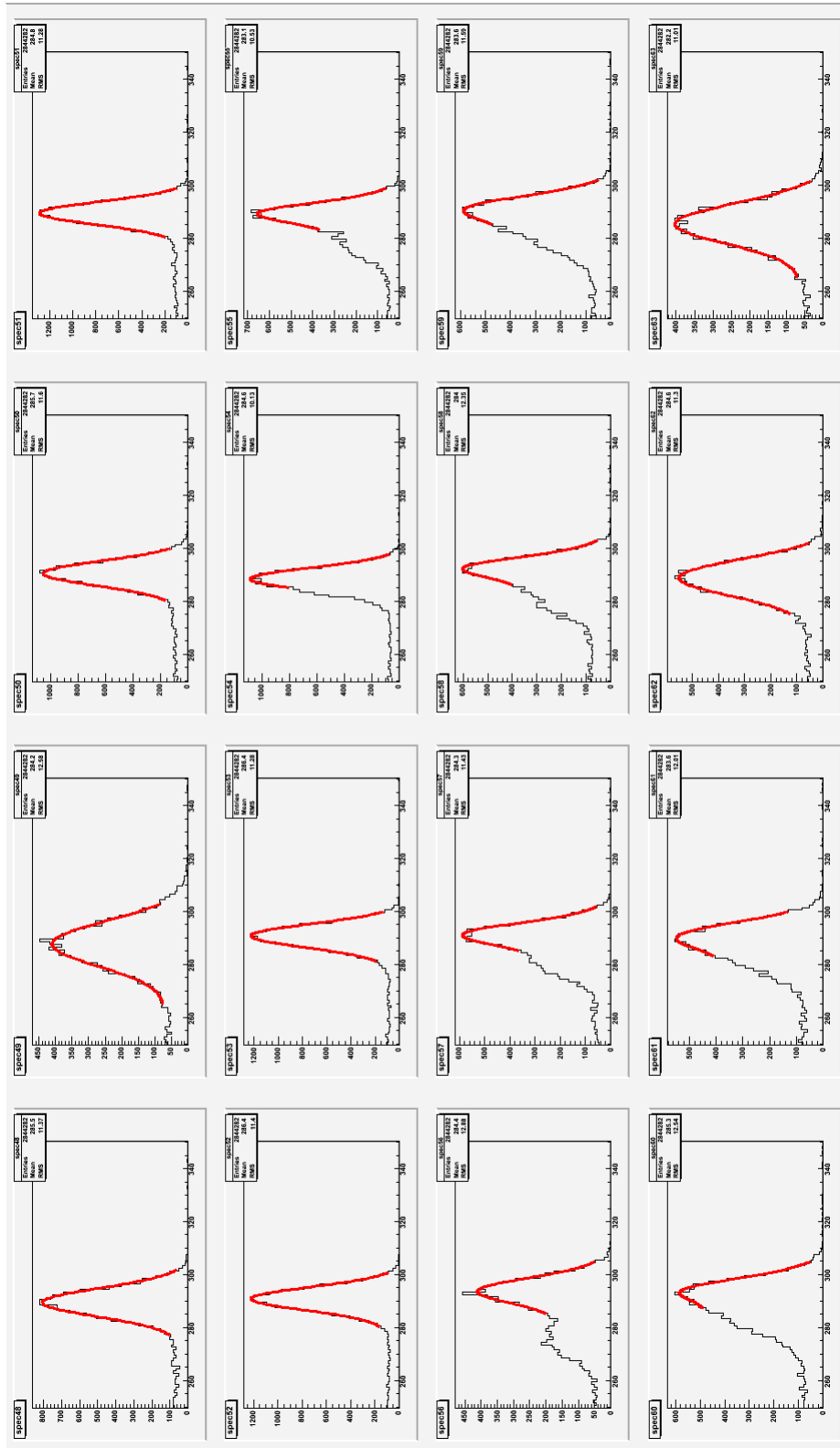
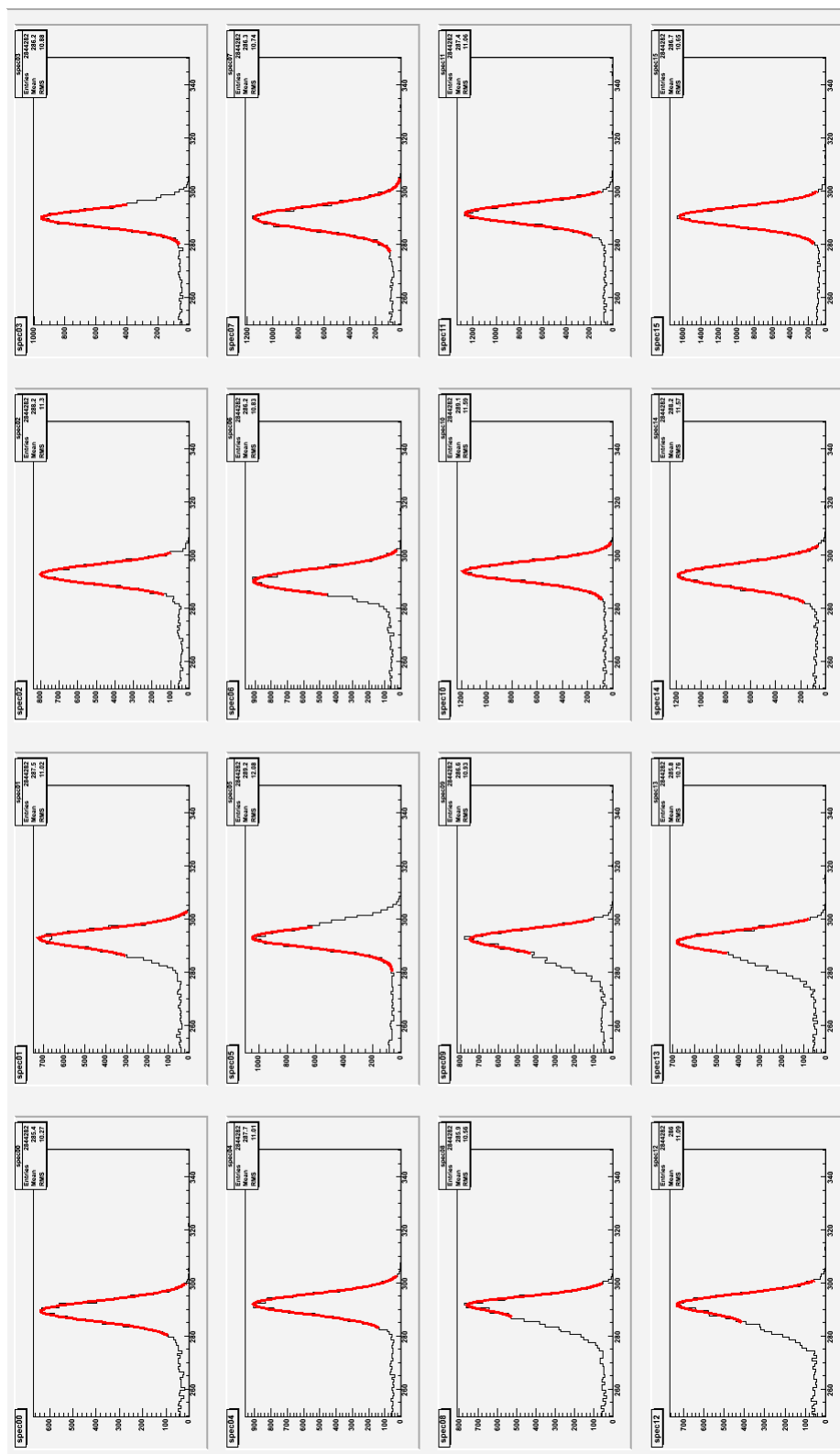


図 B.4: -20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (48ch.–63ch.)



☒ B.5: 20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (0ch.–15ch.)

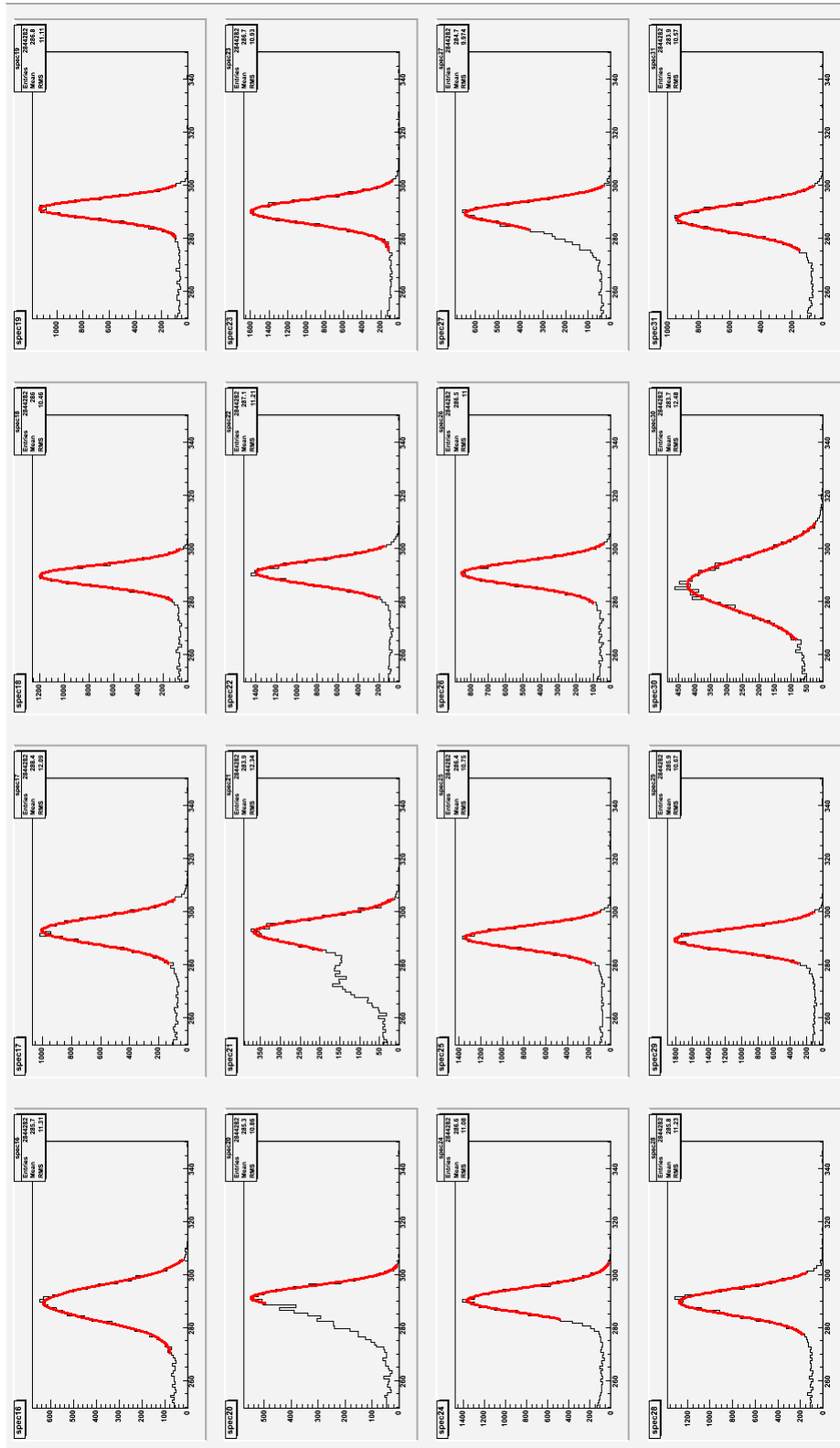


図 B.6: 20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (16ch.–31ch.)

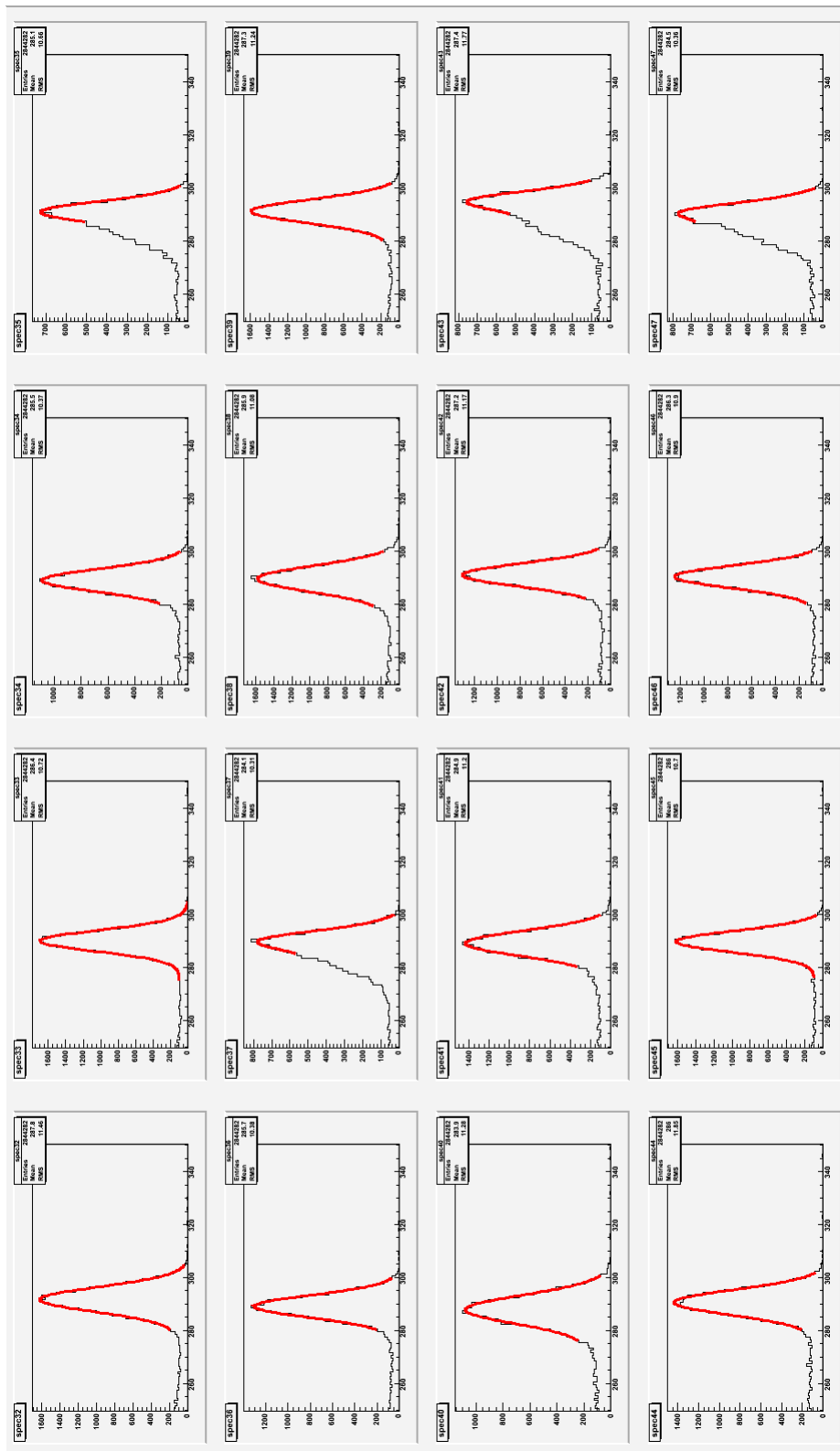


図 B.7: 20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (32ch.–47ch.)

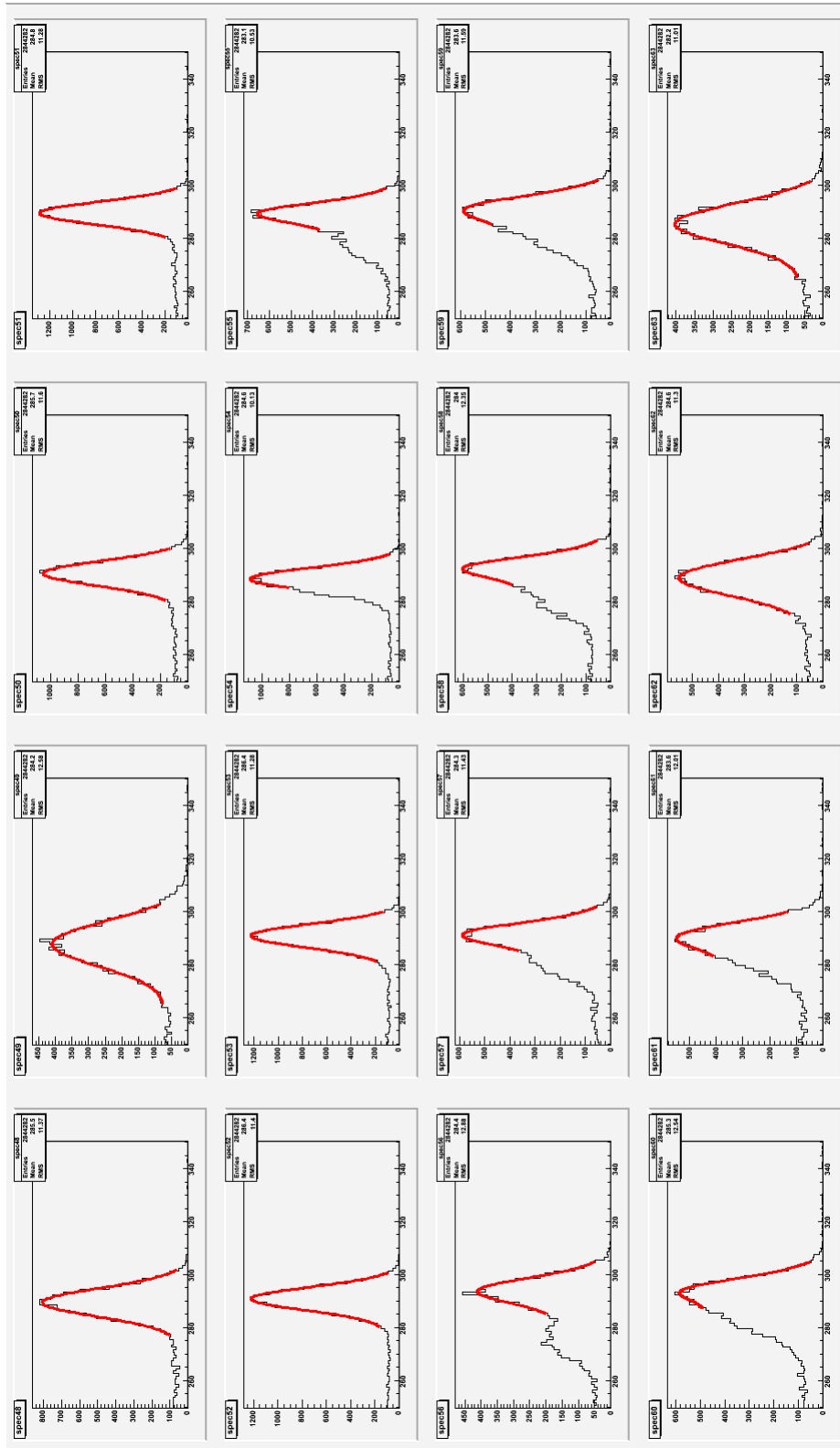


図 B.8: 20 での ^{241}Am の 59.5keV のフィット (48ch.-63ch.)

関連図書

- [1] <http://chandra.harvard.edu>
- [2] 「気球搭載宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の主検出部の地上試験による性能実証」
- [3] EPR-Overview
- [4] EPR-science
- [5] Urry and Padovani
- [6] ASTRO-H 事前評価資料
- [7] R.D. Evans. The Atomic Nucleus, Copyright 1955, McGraw-Hill Book Company
- [8] Takeda PhD.
- [9] HAMAMATSU Photonics 技術資料