

修士学位論文

SOI 半導体を用いたガンマ線天文用電子飛跡検出型コンプトンカ
メラの開発

2018 年度
(平成 30 年度)

茨城大学大学院理工学研究科
理学専攻

学籍番号 17NM155G

東城 直美

概要

天文学において MeV ガンマ線の領域は、超新星爆発による元素合成、銀河中心で観測された 511keV による陽電子の生成過程の起源など、現在未解決な問題を探るプローブとして非常に有力視されている。元素合成や銀河中心における 511keV の観測では、特定の輝線をもつため、分光観測が最適である。MeV 領域の観測で現在主流となっている検出器として、CGRO 衛星搭載の COMPTEL などのコンプトンカメラが挙げられる。コンプトンカメラは、1 層目で生じるコンプトン散乱と 2 層目で生じる光電吸収の反応位置と散乱角を用いてガンマ線の到来方向を円環で推定することができる。しかし円環の重なりによるバックグラウンドが多くなってしまうため、検出感度が低いという現状となっている。

このバックグラウンドの問題を解決する検出器として、コンプトンカメラに電子飛跡の情報を加えた、電子飛跡型コンプトンカメラが挙げられる。このコンプトンカメラではコンプトン散乱による反跳電子の飛跡を捉えることで、ガンマ線の到来方向を円環ではなく一意に推定するため、円環の重なりによるバックグラウンドがなく、コンプトンカメラよりも到来方向の決定精度の向上が期待できる。

よって、本研究では、天文学における MeV ガンマ線の分光観測のための電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を行う。1 層目には高いエネルギー分解能を有する SOI 半導体検出器を用い、分光性能の向上を目指す。SOI 半導体検出器には京都大学、KEK で開発された XRPIX2b 検出素子を用いる。XRPIX2b は、検出部・読み出し回路一体化型の素子であり、データの高速読み出しが可能である。また 30 μ m ピッチのピクセルセンサーによって飛跡のイメージングを達成できる。開発における問題点として、まず XRPIX2b の使用方法や、性能の確認を行う必要があった。また、1 層目での飛跡検出のための読み出し方法の改良や、2 層間のデータをイベントとして一致させるための同期が必要となっていた。本研究は仙台高専と茨城大学の共同研究体制で行っており、私が行ったこととしては主に、①XRPIX2b の性能評価、②1 層目のデータ読み出し方法の改良、③ 電子飛跡のための測定試験と解析の 3 つを行った。XRPIX2b の性能評価としては、検出部であるセンサー層が完全空乏化する時のバックバイアス電圧の決定とエネルギー分解能の確認を行った。先行研究の結果と比較して正常に動作していることを確認した。(①)。

1 層目での電子飛跡の検出には、イベント駆動読み出しを使用する。イベント駆動読み出しとは、入射した光子をリアルタイムでイベントかどうかを判定し、データ読み出しを行う方法である。京都大学の仕様では X 線イベント用の読み出しとなっており、最初にヒットした 1 ピクセルのみのデータ読み出しを行う。しかしコンプトン散乱で生じる反跳電子の飛跡は、飛跡の長さに比例して複数のピクセルにヒットするため、全ピクセルの読み出しに変更した(②)。2 層間の同期システムでは、各層に同時に入ったイベントの判定を行い、イベント情報を記録する。このシステムによって、各層でそれぞれ測定したばらばらなデータ情報を 1 つのコンプトン散乱イベントとして判別することができ、バックグラウンドや偶発的なイベントを排除できる利点がある。

2 層目には 1cm 角の CsI シンチレーション検出器を用い、全ピクセル読み出しのイベント駆動と同期システムを組み合わせプロトタイプを作成し、測定試験を行った。銀河中心の 511keV のラインガンマ線の観測を想定して、 ^{22}Na から放射される 511keV の測定を行った。511keV のエネルギーカット等の解析によって、電子飛跡は 27 個検出された(③)。この値は理論計算とも概ね一致していることが確認できた。また、セットアップより推定した反跳方向と同様らしい方向へ反跳しているイメージは 6 割ほどの精度で検出されており、プロトタイプによる 511keV のコンプトンイベントとそのイベントによる電子飛跡の検出は成功していると期待できる。

Abstract

In the field of astronomy, MeV gamma rays are highly promising as probes to explore currently unsolved problems such as element synthesis by supernova explosion and suggestion of dark matter by 511 keV gamma ray from galactic center.

In this study, we developed a prototype of an advanced Compton camera for detecting recoil electron tracks. Also we evaluated its performance for detecting the recoil electron tracks of 511 keV gamma rays. The Compton camera measures the energy of the first recoil electron and the energy of the second photoelectric absorption. Similarly, it is possible to estimate the direction of arrival of gamma rays using a circular ring by using the reaction position and the scattering angle in each layer. However, the problem is the increase in background due to the overlapping of multiple circles.

Compton camera detecting recoil electron tracks uniquely estimates the arrival direction of gamma rays by capturing the trajectory of recoil electrons due to Compton scattering. Therefore, it is possible to determine the arrival direction of gamma rays more accurately than the Compton camera. The XRPIX2b detecting element is used for a semiconductor detector used in the first layer of the Compton camera detecting recoil electron tracks. The XRPIX2b was developed using SOI laminated wafer technology. The XRPIX2b is an SOI semiconductor device in which the detection unit and the reading circuit are integrated. With the method of reading the electronic trajectory as a method, event driven reading is used. Event driven readout is a method of judging whether or not an incident photon is an event in real time and reading data.

For the second layer, a 1 cm square CsI scintillation detector is used. Measurement of 511 keV was performed from ^{22}Na by combining event driven driving over the entire surface and a synchronous system.

By analysis, 27 tracks were detected. It was confirmed that this value roughly agrees with theoretical calculation. Therefore, it was confirmed that the event driven reading on the whole surface and the synchronous system were working properly and were able to measure.

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	MeV ガンマ線天文学	3
2.1	MeV ガンマ線天文学の意義	3
2.2	天体からの MeV ガンマ線	3
2.2.1	超新星爆発	7
2.2.2	銀河中心	9
2.2.3	活動銀河核	10
2.2.4	ガンマ線バースト	11
第 3 章	MeV ガンマ線検出器	15
3.1	ガンマ線と物質の相互作用	15
3.1.1	光電吸収 (光電効果)	15
3.1.2	コンプトン散乱	16
3.1.3	電子-陽電子対生成	17
3.2	MeV ガンマ線観測	17
3.2.1	コーデットマスク法	18
3.2.2	コンプトン-イメージング法	19
3.2.3	電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ法	21
第 4 章	SOI 半導体検出器	25
4.1	電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける SOI 半導体検出器	25
4.2	SOI 半導体	25
4.2.1	空乏層	25
4.2.2	MOSFET	27
4.2.3	BPW によるバックゲート効果の抑制	28
4.2.4	エネルギー分解能と読み出しノイズ	28
4.3	XRPIX2b の概要	29
4.3.1	ピクセル回路	29
4.3.2	読み出しボード	30
	各ボードの動作	32
第 5 章	XRPIX2b の基礎特性	35
5.1	実験セットアップ	35

5.1.1	データ取得システム	35
5.2	解析	35
5.2.1	全面読み出しによる解析手順	35
	(1) オフセット成分の推定	36
	(2) バッドフレームの判定	36
	(3) X 線イベントの判定	36
5.2.2	チャージシェアリングイベントの判定	37
5.3	結果	38
5.3.1	完全空乏化の確認	38
5.3.2	素子のゲインとエネルギー分解能	39
5.3.3	寄生容量の算出	41
第 6 章	電子飛跡の検出	43
6.1	イベント駆動によるデータ読み出し	43
6.1.1	読み出しの制御	43
	データの読み出し	44
6.1.2	エネルギースペクトル	45
6.2	144×144 ピクセルイベント駆動読み出しシステム	46
6.3	二層間のデータの同期システム	47
6.4	電子飛跡のイベント選別解析	49
6.4.1	実験セットアップ	49
6.4.2	解析	50
	イベント検出タイミングによるエネルギーの再構成	50
	クラスタを用いたデータ選択	51
	エネルギーによるデータ選択	52
6.4.3	解析結果と議論	53
第 7 章	まとめと今後	61
謝辞	63

図目次

2.1	COMPTEL による 1-30MeV のガンマ線の全天マップ	4
2.2	COMPTEL による 1-30MeV のガンマ線の全天イメージ	5
2.3	COMPTEL による観測天体	6
2.4	銀河面に広がったガンマ線スペクトル	7
2.5	INTEGRAL 衛星による SN2014J のスペクトル	8
2.6	COMPTEL による 1.8MeV ガンマ線の全天観測	8
2.7	INTEGRAL 衛星の SPI 検出器による銀河中心のガンマ線スペクトル	9
2.8	INTEGRAL による 511keV の分布	10
2.9	活動銀河核模式図	11
2.10	BATSE、COMPTEL の観測による GRB の光度曲線	12
2.11	GRO 衛星によるガンマ線バースト GRB990123 のスペクトル	12
2.12	BASTE がとらえた 2704 例のガンマ線バースト到来方向分布	13
3.1	ガンマ線と物質の相互作用	15
3.2	コンプトン散乱の微分断面積	17
3.3	コーデットマスク法概略図	18
3.4	INTEGRAL 衛星概略図	19
3.5	コンプトン-イメージ原理の概念図	20
3.6	COMPTEL 概観	20
3.7	左:変数の定義 右:ARM と SPD の概略図	22
3.8	電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ原理の概念図	22
3.9	μ PIC を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ	23
3.10	Si-CMOS を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ	23
4.1	SOIPX 構造模式図	26
4.2	pn 接合による空乏層形成図	26
4.3	NMOS 模式図	27
4.4	BPW の有無による MOSFET の特性変化	28
4.5	XRPIX2b の写真と簡易ブロック図	29
4.6	XRPIX2b ピクセル回路図	31
4.7	データ取得システム概略図	31
4.8	SEABAS ボード概略	32
4.9	Sub ボード概略	33

5.1	恒温槽内実験セットアップ	35
5.2	ヒストグラム	36
5.3	イベントセレクション関係図	37
5.4	^{241}Am のフォトンカウントとバックバイアス電圧の関係	38
5.5	空乏層厚とバックバイアス電圧依存性の理論値	39
5.6	^{241}Am ヒストグラム	39
5.7	^{241}Am エネルギー較正曲線	40
6.1	FPGA による読み出しの制御	44
6.2	サンプリングによるデータばらつきの比較	45
6.3	^{241}Am のエネルギースペクトル	45
6.4	^{241}Am の較正曲線	45
6.5	^{241}Am のエネルギースペクトル	46
6.6	^{241}Am の較正曲線	46
6.7	同期システムの概要	48
6.8	同期システムのダイアグラム	48
6.9	実験セットアップ	49
6.10	511keV のときの散乱角 θ に対する散乱ガンマ線のエネルギー (青)、反跳電子のエネルギー (赤)	50
6.11	1 層目と 2 層目の検出タイミングの時間差	51
6.12	トリガーピクセルからクラスター重心までの距離	51
6.13	2 層目のエネルギースペクトル	52
6.14	1 層目と 2 層目で測定したエネルギーによる入射ガンマ線のエネルギースペクトル	52
6.15	解析によって得られた電子飛跡イメージ	53
6.16	解析によって得られた電子飛跡イメージ	54
6.17	1 層目から 2 層目までの立体角	55
6.18	1 層の素子へ線源が入射する方向	56
6.19	左:データ読み出し方向と線源入射位置の概略図 左:イメージ画像におけるデータのつめ方と線源入射位置の概略図	57
6.20	解析によって得られた電子飛跡イメージ	58
6.21	解析によって得られた電子飛跡イメージ	59
6.22	27 個の飛跡の角度を目視で判定した時の角度分布	60

表目次

2.1	MeV 領域における主な放射性同位元素 [23][1]	7
4.1	XRPIX2b の仕様	30
5.1	^{241}Am のフィット結果	40
6.1	イベント駆動読み出しによる ^{241}Am のフィット結果	46
6.2	144×144 イベント駆動読み出しによる ^{241}Am のフィット結果	47

第 1 章

序論

本研究では、MeV 領域のガンマ線観測に着目して、電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を行う。MeV 領域のガンマ線では、超新星残骸による宇宙の元素合成の様子や、銀河中心からの 511keV ガンマ線の起源、活動銀河核からのジェット形成機構など天文学においてまだ未知の現象が多く存在する。しかし、この領域ではバックグラウンドによる観測の難しさから感度の良い観測は行われておらず、未開拓の領域となってしまう。1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星搭載のコンプトンカメラである COMPTEL や、2002 年に打ち上げられた INTEGRAL 衛星などでは MeV 領域における観測に貢献し、MeV ガンマ線の全天マップや銀河中心における 511keV の観測などが行われてきた。しかしガンマ線の他の領域である GeV 領域や、TeV 領域に比べ、バックグラウンドによる影響で感度は低い。INTEGRAL 衛星では、コーデットマスク内に入射できる X 線（ガンマ線）の角度と位置が限られてしまうことで視野が限られてしまい、実効的な観測時間が短い。また、MeV 領域で卓越するコンプトン散乱を利用したコンプトンカメラの COMPTEL でもバックグラウンドの除去が困難であり、明るい天体の観測に限られていた。

コンプトンカメラは、散乱部と吸収部の 2 層で構成された検出器である。入射ガンマ線は散乱部でコンプトン散乱され、散乱されたガンマ線は吸収部で光電吸収される。コンプトン散乱と光電吸収の反応位置と散乱角を用いてガンマ線の到来方向を円環で推定し、さらに複数の円環を重ね合わせることで線源の位置を特定できる。しかし問題点としては、複数の線源がある場合、円環の重なりによるバックグラウンドが多くなってしまうことが挙げられる。そこで、電子飛跡型コンプトンカメラでは、コンプトン散乱による反跳電子の飛跡を捉えることで、ガンマ線の到来方向を円環ではなく一意に推定できるため、バックグラウンドとなる円環の重なりを減らすことができる。

そこで本研究では、電子飛跡検出型のコンプトンカメラの開発を目的とする。このコンプトンカメラでは、超新星残骸による元素合成や、銀河中心の 511keV ガンマ線等のラインガンマ線の分光観測に特化した観測を目指す。分光観測のためには高いエネルギー分解能が必要となる。よって我々は、1 層目に高いエネルギー分解能を有する SOI 半導体検出器を用い、分光精度の向上を目指す。

SOI 半導体検出器の素子には京都大学と KEK で開発された XRPIX2b を用いる。XRPIX2b は高いエネルギー分解能と、位置分解能を持つこの性能をコンプトンカメラの広い視野での検出特性と組み合わせることで、ガンマ線の到来方向を感知し、広い視野での観測が可能である。

2 章からは MeV ガンマ線の天文学における天文現象と観測の現状についてを紹介する。3 章では現在までの MeV ガンマ線の観測方法と、代表的な観測機器について紹介する。4 章からは本研究で使用する SOI 半導体検出器の概要と、XRPIX2b 素子の基礎特性についての結果をまとめた。6 章では XRPIX2b の測定システムの改良、1 層目と 2 層目を合わせた電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発のためのシステムの開発についての説明する。

今回改良、開発したシステムを用いて銀河中心からの 511keV ガンマ線の観測を想定し、 ^{22}Na 線源を用いて 511keV の観測を行った。解析の結果より、27 個の電子飛跡を検出し、飛跡のイメージを取得した。設定したセットアップでの 1 層目から 2 層目までに到達するコンプトン散乱イベントは、理論値では約 26 個となり、結果のイ

ベント数と概ね一致することが確認できた。

第 2 章

MeV ガンマ線天文学

2.1 MeV ガンマ線天文学の意義

ガンマ線のエネルギー領域は 10keV から数 TeV までの高範囲に及ぶ。宇宙からのガンマ線は地球大気によって吸収されるため、地上での観測は難しい。よってガンマ線の観測は高度 40km 以上での気球上観測や衛星による観測がなされる。[23]

ガンマ線はエネルギーごとの物質との相互作用により、観測の手法も異なる。数百 keV から数百 MeV の MeV ガンマ線では、物質へと入射する時、物質中の電子にエネルギーを与えて別の方向へ散乱する（コンプトン散乱）作用を起こす。MeV 領域では、超新星爆発による元素合成や、宇宙線起源などの解明が期待される。しかし GeV 領域、TeV 領域に比べ、MeV 領域のガンマ線では観測が遅れている。これは、MeV 以下の紫外線や X と比べてガンマ線のフォトカウントが少ないことや、透過性の強さからバックグラウンドの除去が難しいことが挙げられる。また複雑な相互作用によりバックグラウンドの除去が難しいため、目標天体からのガンマ線のイメージングが困難となる。これらの問題点を克服し MeV 領域の観測精度を上げていくことが今だ解明されていない宇宙の現象の手掛かりになることが期待される。本研究では、元素合成などの MeV 領域において特定の輝線を出すガンマ線について主に注目する。

2.2 天体からの MeV ガンマ線

今までの MeV ガンマ線は、INTGRAL 衛星、CGO 衛星による COMPTEL などによって観測がなされてきた。COMPTEL による全天のイメージ分布を図 2.2 に、全天マップを図 2.1 に示す。COMPTEL での観測により、MeV ガンマ線の定常天体は 32 個、GRB は 31 個観測されている（図 2.3）。図 2.2 よりガンマ線は銀河面にも広がっていることがわかる。銀河面の放射スペクトルを図 2.4 に示す。図 2.4 より、MeV ガンマ線の放射は、制動放射と逆コンプトン散乱による放射が優勢であることがわかる。

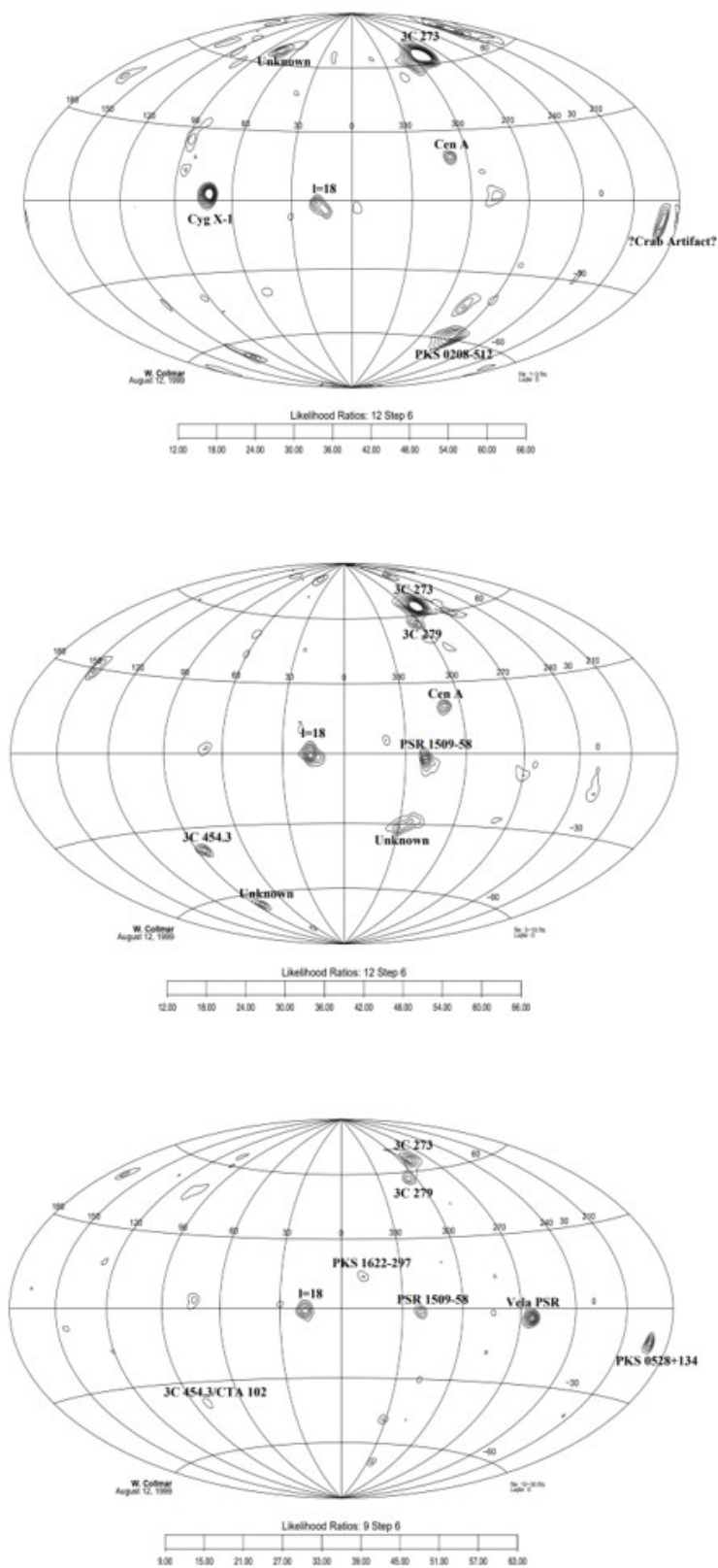


図 2.1 COMPTEL による 1-30MeV のガンマ線の全天マップ

[25][5]

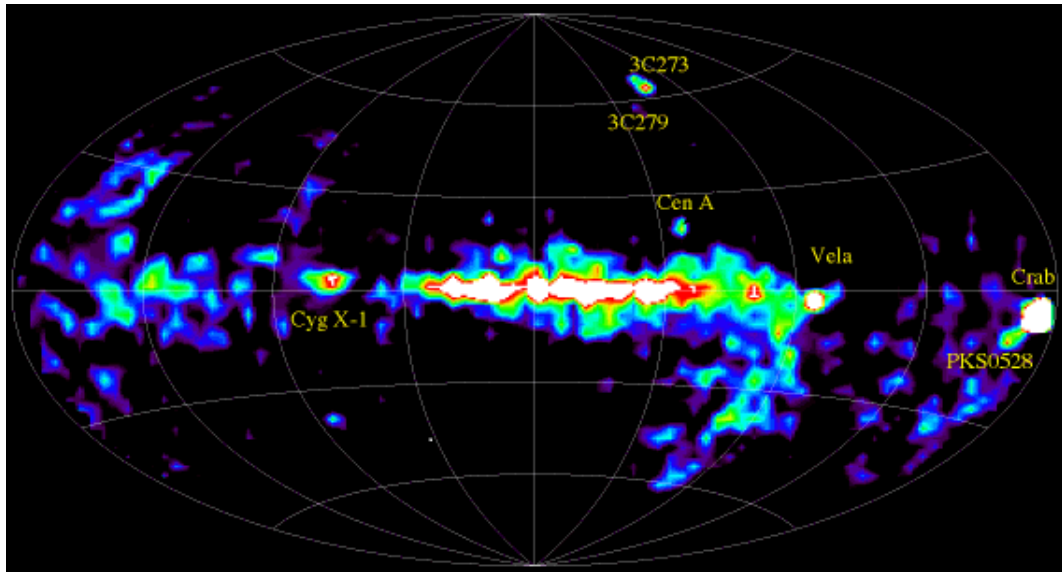


図 2.2 COMPTEL による 1-30MeV のガンマ線の全天イメージ [6]

Type of Source	No. of Sources	Comments
Spin-Down Pulsars:	3	Crab, Vela, PSR B1509-58.
Stellar Black-Hole Candidates:	2	Cyg X-1, Nova Persei 1992 (GRO J0422+32).
Supernova Remnants: (Continuum Emission)	1	Crab nebula.
Active Galactic Nuclei:	10	CTA 102, 3C 454.3, PKS 0528+135, GRO J0516-609, PKS 0208-512, 3C 273, PKS 1222+216, 3C 279, Cen A, PKS 1622-297.
Unidentified Sources:		
• $ b < 10^\circ$	4	GRO J1823-12, GRO J2228+61 (2CG 106+1.5), GRO J0241+6119 (2CG 135+01), Carina/Vela region (extended).
• $ b > 10^\circ$	5	GRO J1753+57 (extended), GRO J1040+48, GRO J1214+06, HVC complexes M and A area (extended), HVC complex C (extended).
Gamma-Ray Line Sources:		
• 1.809 MeV (^{26}Al)	3	Cygnus region (extended), Vela region (extended, may include RX J0852-4621), Carina region.
• 1.157 MeV (^{44}Ti)	2	Cas A, RX J0852-4621 (GRO J0852-4642).
• 0847 and 1.238 MeV (^{56}Co)	1	SN 1991T.
• 2.223 MeV (n-capture)	1	GRO J0317-853.
Gamma-Ray Burst Sources: (within COMPTEL field-of-view up to Phase IV/Cycle-5)	31	Location error radii vary from 0.34° to 2.79° (mean error radius: view 1.13°).

図 2.3 COMPTEL による観測天体 [15]

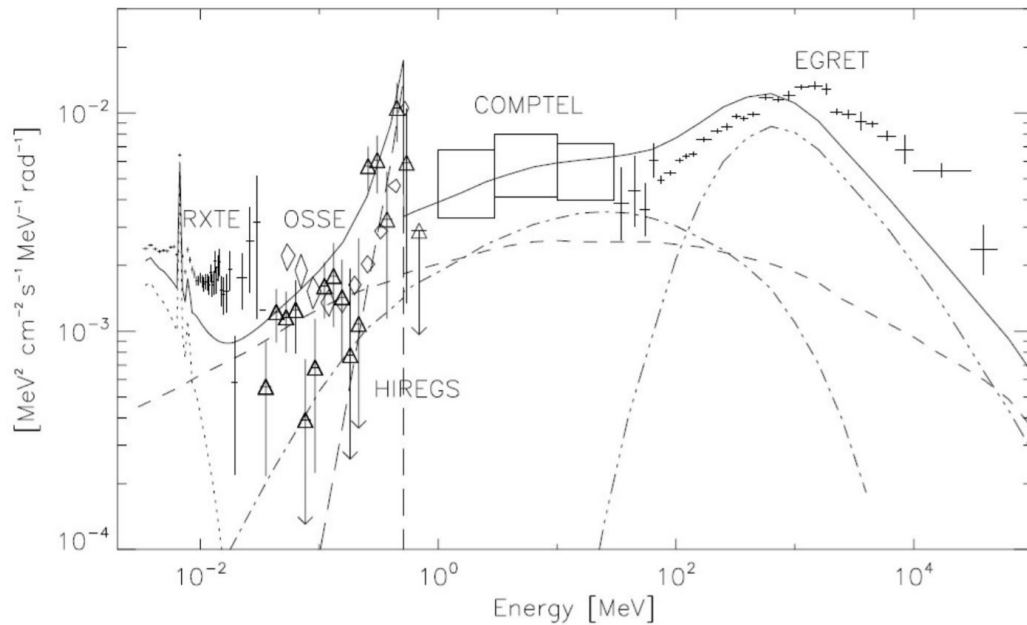


図 2.4 銀河面に広がったガンマ線スペクトル [2]

2.2.1 超新星爆発

超新星爆発は太陽の 8 倍以上の大質量星の進化の最後に起こる大爆発である。恒星の内部では核融合反応が起こっていて、水素原子から重い原子の重元素へと変換されていく。星の質量によって核融合反応の過程は異なる。大質量星では最終的に重元素まで生成され、重力崩壊を起こして周りのガスを吹き飛ばしながら爆発する。その後星爆発によって周りの星間物質を掃き集めながら広がり超新星残骸（SuperNova Remnant : SNR）を形成する。この時、鉄よりも重い元素やガンマ線を放出する放射性同位元素がつくられる [23]。放射同位元素の崩壊に伴うラインガンマ線の測定をすることで、生成された同位元素の量の想定が可能である。超新星爆発によって生成される放射同位元素と放出される主なガンマ線を表 2.1 に示す。INTEGRAL 衛星では超新星爆発の際に生成されたとされるラインガンマ線の観測に成功している（図 2.5） [4]。

表 2.1 MeV 領域における主な放射性同位元素 [23][1]

放射性同位元素	半減期	ガンマ線エネルギー [keV]
^{56}Ni	6.10 日	158,812
^{56}Co	77.2 日	847,1238
^{57}Co	271.7 日	122,136
^{22}Na	2.6 年	1275
^{44}Ti	63 年	1157
^{26}Al	7.4×10^5 年	1809
^{90}Fe	2.0×10^6 年	1173,1332

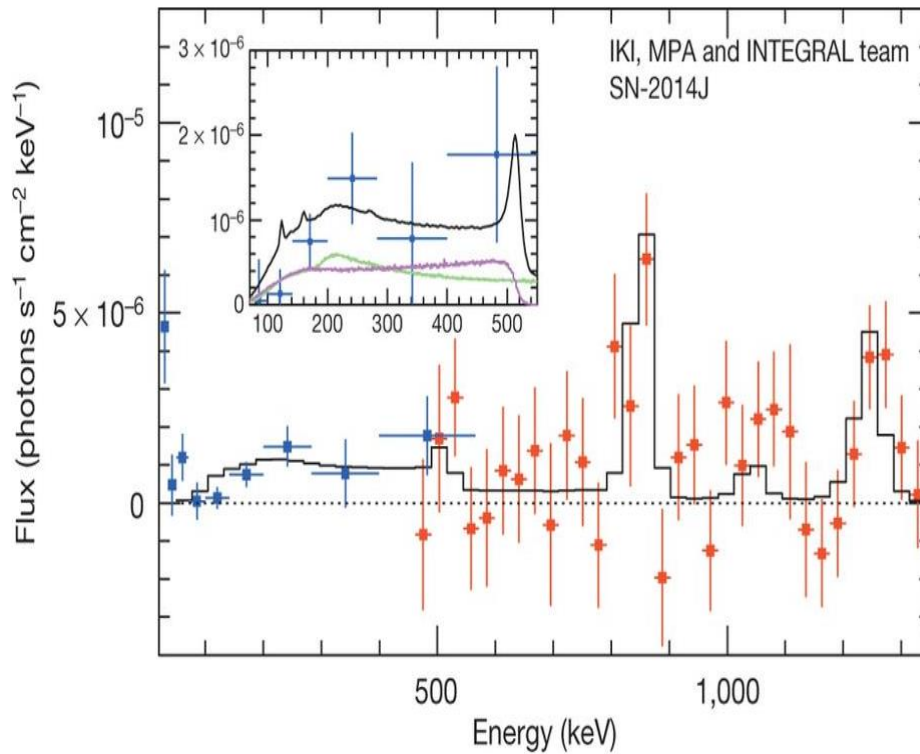


図 2.5 INTEGRAL 衛星による SN2014J のスペクトル [4]

COMPTEL は、銀河面に 1.8MeV ガンマ線が分布していることを観測した（図 2.6）。これは 1.8MeV のラインガンマ線を放射する ^{26}Al によるものと考えられている。この強度分布から、どのような元素合成が起きているかの推定も試みられている。また、大マゼラン星雲で発見された超新星 1987A から ^{56}Co が鉄元素へと崩壊する時に放出されたラインガンマ線のエネルギーが検出されている。超新星残骸からの放射性同位元素のラインガンマ線の分布を観測することができれば、銀河系内の元素合成の様子や銀河系の成り立ちを知ることができる。

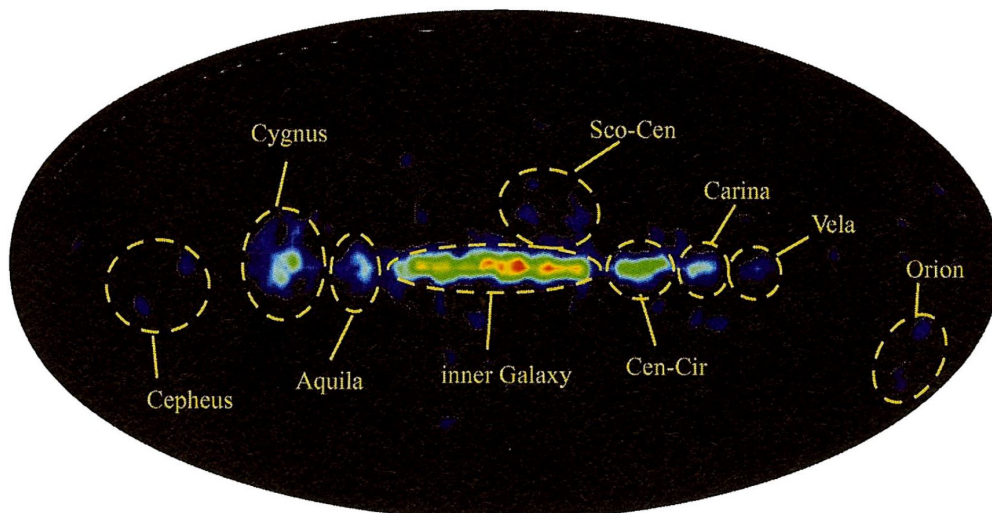


図 2.6 COMPTEL による 1.8MeV ガンマ線の全天観測

2.2.2 銀河中心

電子と陽子が衝突すると対消滅を起こしガンマ線を放出する。2つのガンマ線を放出する場合、電子（陽電子）の静止質量と同等の 511keV ガンマ線を放出する。INTEGRAL 衛星による SPI 検出器では、銀河中心のガンマ線スペクトルを観測しており 511keV の輝線が確認できる（図 2.7）。銀河中の陽電子は、超新星爆発の際の原子核の崩壊過程において生成されていると考えられている。

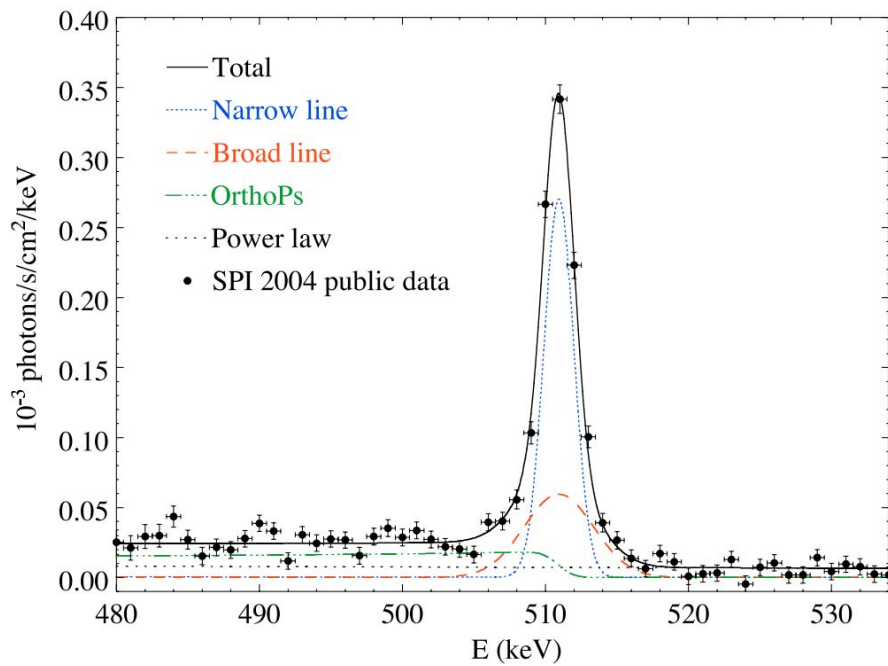


図 2.7 INTEGRAL 衛星の SPI 検出器による銀河中心のガンマ線スペクトル [8]

電子と陽電子が対消滅するまでの時間は、周りの環境によって異なる。銀河中心に存在するとされるブラックホールによる高密度の降着円盤中では、対消滅は瞬時に起こるため、511keV は銀河中心付近に集中していると示唆される。INTEGRAL では銀河中心で図 2.8 のような 511keV の分布が得られており、銀河中心に向かって特に強く放射していることが分かる。

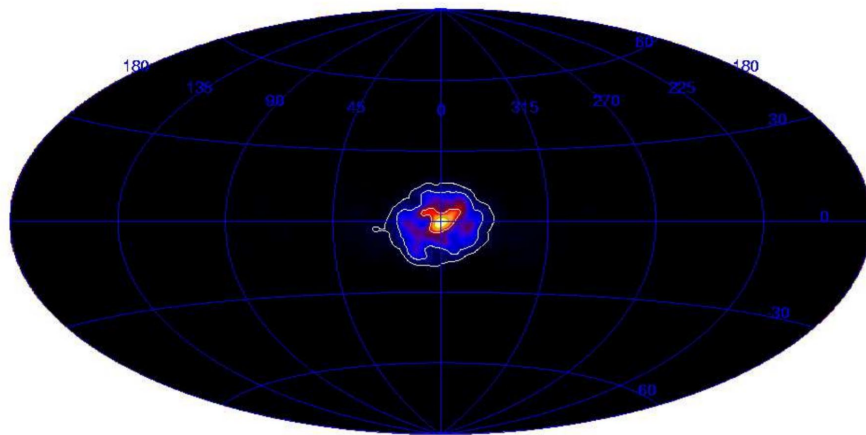


図 2.8 INTEGRAL による 511keV の分布 [9]

その他、銀河中心では暗黒物質の密度が高いとされており、暗黒物質同士の対消滅によって陽電子を生成する。この生成された陽電子と電子の対消滅による暗黒物質由来の 511keV ガンマ線の放射も考えられている。

INTEGRAL 衛星では天の川銀河の矮小銀河からも 511keV ガンマ線が放射していると仮定して、天の川銀河から 500kpc 以内の矮小銀河を調査した。観測結果から 3.1σ の有意性をもつ ReticulumII が発見されたが暗黒物質由来ではなく超新星由来であることが示唆された。また、解析では一般的な暗黒物質の質量スケールを仮定して 511keV のフラックスについて上限を与えた [18]。

2.2.3 活動銀河核

宇宙には、銀河の中心の狭い領域で極めて明るく輝く天体が多く存在している。これを活動銀河核と呼ぶ。活動銀河核は電波からガンマ線まで広い領域の波長域をもつ。活動銀河核の中心部では $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$ の質量を持つ巨大なブラックホールが存在するとされる。周りのガスがブラックホールへ降着することによる重力エネルギーの開放によって中心部の膨大なエネルギーを生み出すと考えられている。

多くの AGN では、中心核から細く絞られたジェットが放出されていることが電波により観測されている。しかし、ジェットはその形成機構などわかっていない事も多い。AGN は、COMPTEL で 10 個、EGRET では 94 個が同定されており、MeV 領域のガンマ線においても重要な観測可能な天体の一つである。

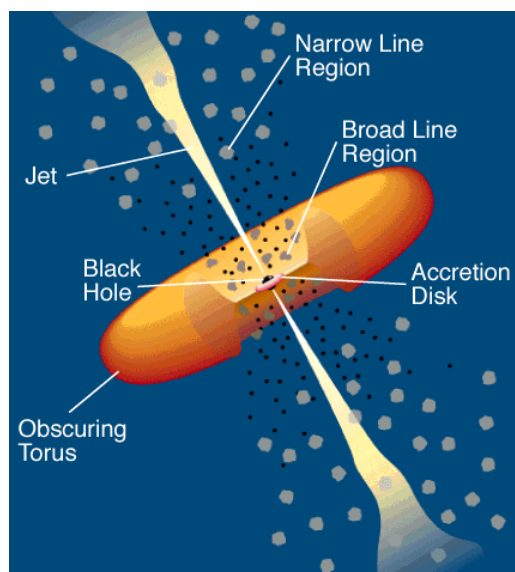


図 2.9 活動銀河核模式図 [19]

ブラックホールの周辺の降着円盤では X 線やガンマ線が放射する。降着円盤の内側では 100MeV 程度のエネルギーを獲得した陽子同士が衝突し、生成された π^0 の崩壊により、70MeV 付近にピークを持つような熱的なガンマ線の放射があるとされる。

2.2.4 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは数秒から数十秒の間に突発的にガンマ線を放射する現象である。1970 年代初めに大気圏核実験監視衛星 Vela により発見された。X 線観測、可視光分光観測によってガンマ線バーストの対応天体を発見することができるようになり、この結果数十億光年以上遠方で発生する爆発であると明らかになった。ガンマ線バーストの継続時間、光度曲線はそれぞれであり、継続時間が $\sim 10\text{ms}$ の短いバーストから、1000s 以上になるものまでさまざまである。CGRO 衛星の BATSE、COMPTEL で観測されたガンマ線バーストのガンマ線光度曲線を図 2.10 に表す。

ガンマ線バーストの放射機構はシンクロトロン放射による電磁放射が生成される考えが有力とされている。subMeV \sim MeV の領域においては図 2.11 のようなシンクロトロン放射と考えられているスペクトルも観測されている。また、GRO 衛星の BATSE では 2700 個もの GRB が発見され、図 2.12 よりその分布は非常に等方的であると示された。しかし、現在でもその正体や放射機構がわかっていない未知の現象であり、観測・研究が進められている。

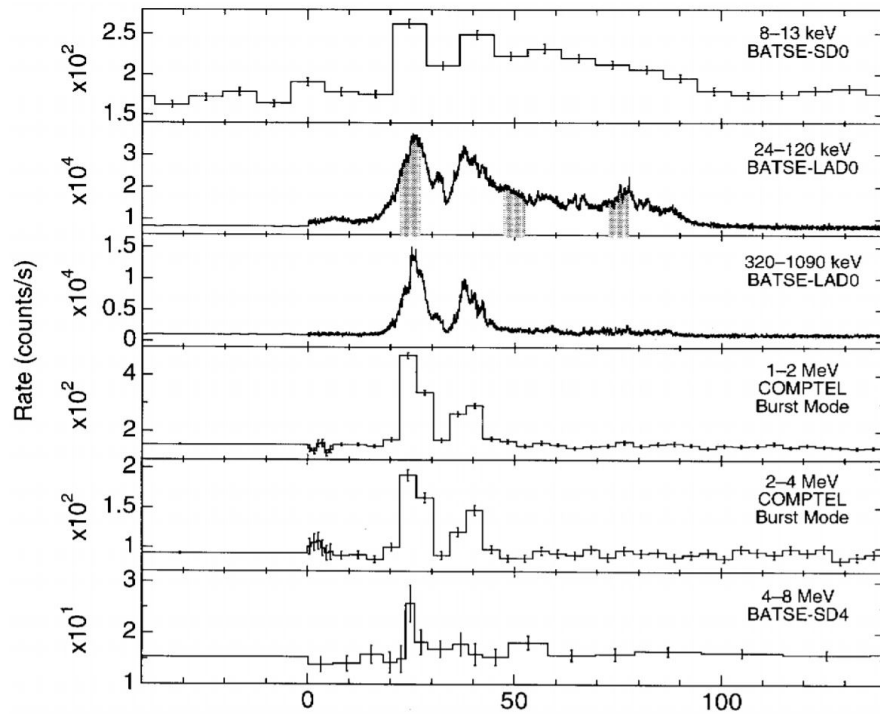


図 2.10 BATSE、COMPTEL の観測による GRB の光度曲線 [3]

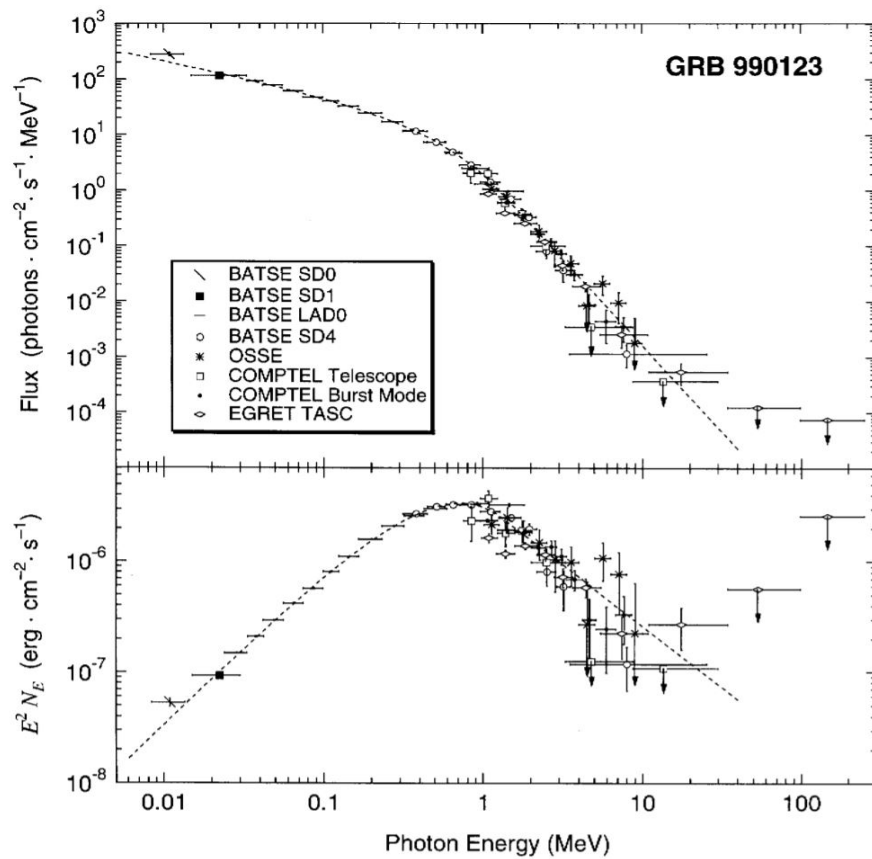


図 2.11 GRO 衛星によるガンマ線バースト GRB990123 のスペクトル [3]

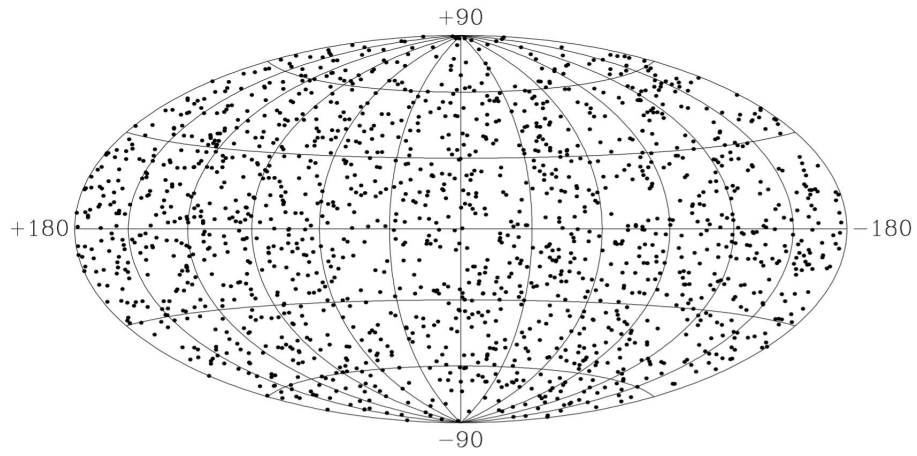


図 2.12 BASTE がとらえた 2704 例のガンマ線バースト到来方向分布 [12]

第 3 章

MeV ガンマ線検出器

3.1 ガンマ線と物質の相互作用

ガンマ線は、物質を通過する際、物質を電離したり、励起することはない。X 線やガンマ線は物質と相互作用すると電子や陽電子を放出する。そのため、相互作用により発生する電子を利用し、検出効率の高い検出器をつくる必要がある。

ガンマ線と物質の主な相互作用として、光電吸収（光電効果）、コンプトン散乱、電子-陽電子対生成の三つが挙げられる。これらの相互作用は、ガンマ線のエネルギーや物質の原子番号に依存する。図 3.1 にガンマ線のエネルギーと物質の原子番号依存性を示す。 σ は光電吸収の反応断面積、 τ はコンプトン散乱の反応断面積、 κ は対生成の反応断面積を表す。

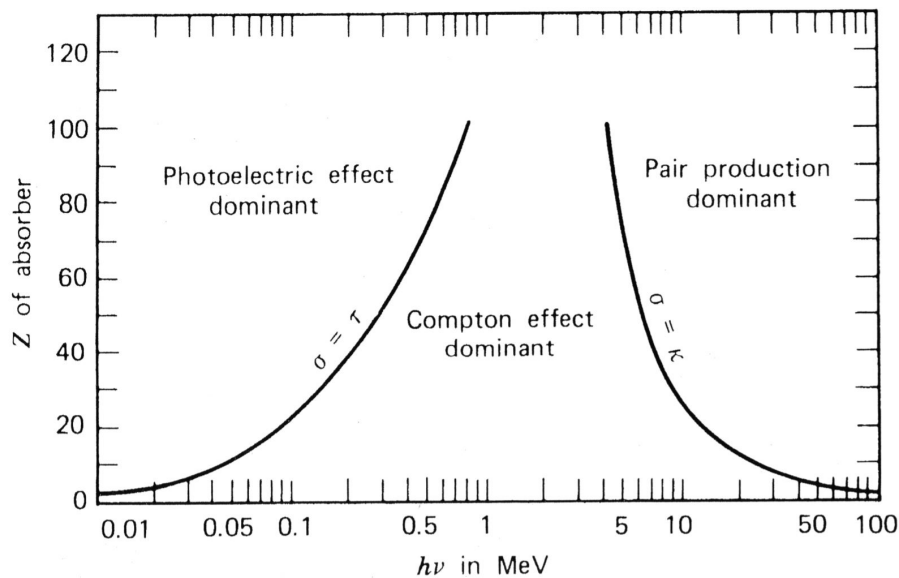


図 3.1 ガンマ線と物質との相互作用 [7]

3.1.1 光電吸収（光電効果）

光電吸収はガンマ線と原子に束縛された電子との相互作用である。電子に衝突した入射光子のエネルギーは電子の束縛エネルギーと運動エネルギーに転化し吸収される。電離された電子のエネルギー K_e を、入射光子のエネルギー E_γ と束縛された電子のエネルギー E_{bind} を用いて表すと、

$$K_e = E_\gamma - E_{bind} \quad (3.1)$$

となる。 E_{bind} は入射光子が作用する電子があった殻の束縛エネルギーを表す。相互作用を起こす殻は k 殻である確率が高い。 L 殻、 M 殻との相互作用はより低いエネルギーで起こる [10]。 $E_{bind} > K$ 殻の束縛エネルギーの時、 K 殻の電子が放出される。この反応はガンマ線が数 10 から数 100keV のエネルギーの時に卓越する。反応断面積とエネルギー、原子番号の依存性は式 3.2 で表せる。

$$\sigma \propto Z^n E_\gamma^{-7/2} \quad (3.2)$$

Z を原子番号とする。反応断面積はガンマ線のエネルギーが増大すると減少し、原子番号の n 乗に比例して大きくなる。 n は入射光子のエネルギーによって 4 と 5 の間で変化する [17]。検出器として用いる場合、原子番号が大きい物質を使うと検出効率が上がる。

3.1.2 コンプトン散乱

電子結合エネルギーよりも十分大きなエネルギーをもつ数 100keV～数 MeV のガンマ線では、コンプトン散乱が支配的になる。コンプトン散乱では、入射ガンマ線が電子と非弾性衝突を起こすと、ガンマ線が電子に一部のエネルギーを与え、電子を弾き飛ばす。同時に入射ガンマ線も散乱される。散乱前の電子が静止しているとみなすと、運動エネルギー保存則と運動量保存則より、散乱ガンマ線のエネルギー E'_γ は [10]、

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (3.3)$$

となる。 m_e は電子の静止質量、 c は真空中の光速、 θ は散乱角である。散乱ガンマ線の角度分布は微分断面積 $d\sigma/d\Omega$ を用いたクライン・仁科 (Klein Nishina formula) の式で与えられる [10]。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Zr_0^2}{2} \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - \sin^2\theta \right) \quad (3.4)$$

r_0 は古典電子半径 ($r_0 = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$) である。式 3.4 より散乱断面積は Z に比例する。図 3.2 は式 3.4 を用いて、エネルギーごとにプロットしたものである。ガンマ線のエネルギーが 500keV 以上では前方散乱が支配的である。

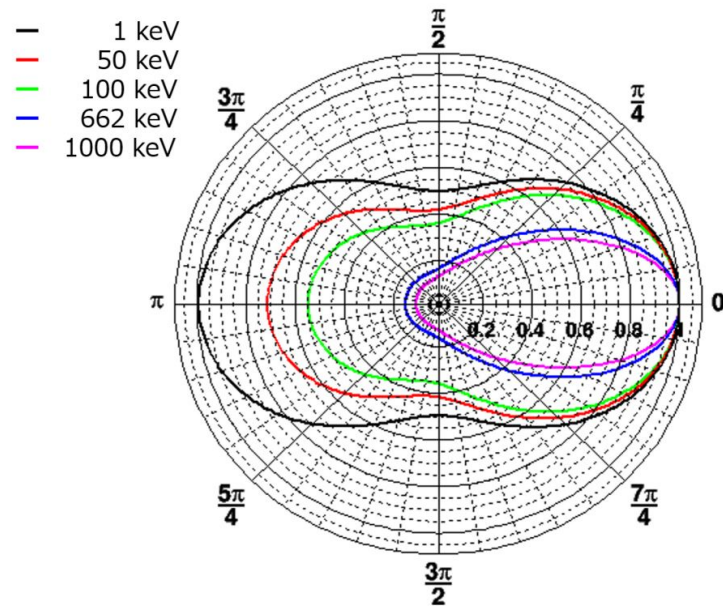


図 3.2 コンプトン散乱の微分断面積。 $r_0 = 1$ に規格化。左側から光子が入射した場合。[24]

3.1.3 電子-陽電子対生成

ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量の 511keV の 2 倍を超えると電子-陽電子対生成が支配的になる。ガンマ線と原子核のクーロン場中での光子との相互作用でガンマ線は電子と陽電子を生成し消滅する。入射ガンマ線 E_γ と生成された電子のエネルギー E_- と陽電子のエネルギー E_+ の関係は、以下となる。

$$E_\gamma = E_- + E_+ + 2m_e c^2 \quad (3.5)$$

反応断面積 σ と原子番号 Z との依存性は近似的に表すと、

$$\sigma \propto Z^2 \quad (3.6)$$

となり、反応断面積は、 Z の 2 乗に比例する。 1MeV 以上のエネルギーに従って急激に増加していく。

3.2 MeV ガンマ線観測

ガンマ線は波長が短いため、X 線のように集光鏡用いた望遠鏡の利用は難しい。しかしこれまでに様々な検出器によって MeV ガンマ線のイメージングが行われてきた。符号化マスク（コーデットマスク）と位置検出器を組み合わせる像を取得する方法や、前述した、MeV 領域で卓越するコンプトン散乱を利用する方法などがある。各々の検出器では、他のガンマ線源からのバックグラウンドや検出器由来のバックグラウンドなど、イメージングするにあたっての問題点も多くあり、MeV ガンマ線観測の課題でもある。これまでの MeV ガンマ線のイメージング方法について以下で示す。

3.2.1 コーデットマスク法

コーデットマスクによるイメージング観測では、コーデットマスク（符号化マスク）と位置を検出するための撮像検出器を組み合わせることでガンマ線のイメージングを行う。コーデットマスクはガンマ線を通す部分と遮る部分を半分の割合で配置したマスクである。検出器上部にコーデットマスクを設置して、コーデットマスクを通過してきたガンマ線の投影パターンを検出器にうつす。検出器上の写されたマスク影とマスクパターンとの相互関係をとることでガンマ線の到来方向を決定する。2001年に打ち上げられたESAにINTEGRAL衛星などでもコーデットマスク法によるイメージングを行っている。

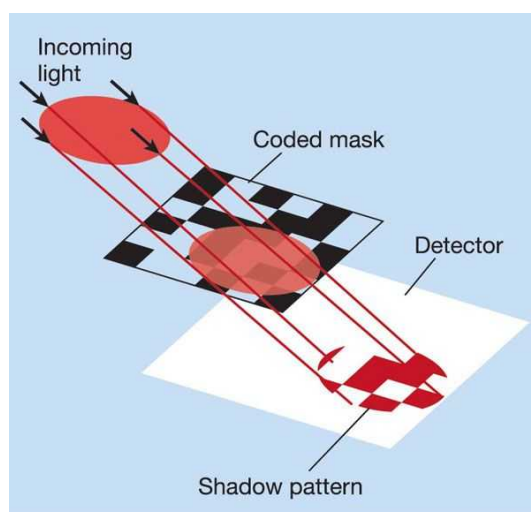


図 3.3 コーデットマスク法概略図 [20]

マスクのガンマ線を遮る部分では、ガンマ線を透過させないようにすることが必要である。そのため基本的には透過力の高いエネルギーのイメージングには適用が難しい。高エネルギーの光子に対してはマスクを厚くしなければならず、INTEGRAL/SPI 検出器では 3cm 厚 IBIS では 1.6cm 厚のタングステンをマスクに用いている。

SPI 検出器では 19 個の Ge 半導体検出器を装備し検出面積は 500cm^2 、IBIS では 16384 個の CdTe 素子が装備され検出面積 2600cm^2 である。取得される画像の分解能は、マスクの大きさ、マスクから検出器までの距離、検出器の位置分解能により決定する。SPI では 2 度角、IBIS では 12 分角の位置分解能を持つ。INTEGRAL 衛星の概略を図 3.4 に示す。それぞれの検出器の観測エネルギー範囲は SPI で $18\text{keV}\sim 8\text{MeV}$ 、IBIS で $15\text{keV}\sim 10\text{MeV}$ 、JEM-X では $4\text{keV}\sim 35\text{keV}$ である。

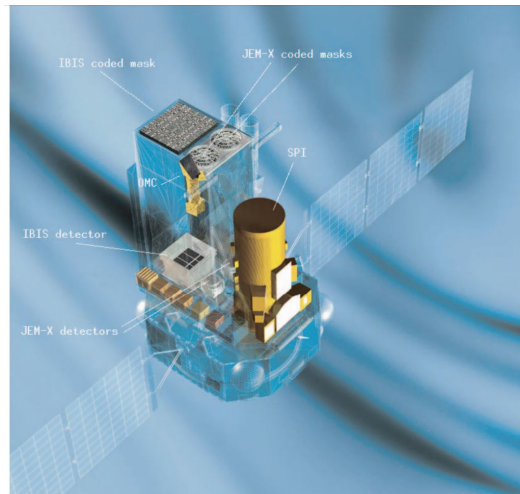


図 3.4 INTEGRAL 衛星概略図 [20]

コーデットマスクによる検出器では、同じ視野で長時間の観測を行うことで感度が良くなり、一度の観測で多くのガンマ線源からの信号を取得し検出効率を上げることができる。一方、マスクでコンプトン散乱を起こした散乱ガンマ線や、明るい点源からのガンマ線が目標天体からのガンマ線の雑音になってしまうという問題点がある。

3.2.2 コンプトン-イメージング法

MeV 領域で卓越するコンプトン散乱では、ガンマ線が物質と相互作用する確率が小さく、入射ガンマ線が電子に一部のエネルギーを渡し別の方向へ散乱してしまうため、イメージングが難しい。しかし、このコンプトン散乱の現象を利用して、散乱ガンマ線をとらえることで、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を求めることができる。また、コンプトンカメラでは検出面すべてが有効面積となるため広視野を確保できる。コンプトン-イメージング法を用いた代表的な検出器として CGRO 衛星搭載の COMPTEL 検出器がある。コンプトン-イメージング法について以下で紹介する。

イメージング原理

コンプトン散乱を用いたイメージングでは、通常 1 層目を吸収部、2 層目を散乱部として 2 つの異なる検出器を用いる。1 層目では入射ガンマ線をコンプトン散乱させ、2 層目では散乱ガンマ線を光電吸収させる。それぞれの層では以下の情報を得て、コンプトン運動学から入射ガンマ線の散乱角を求める。

- 1 層目：コンプトン散乱の反跳電子エネルギー E_1 、コンプトン散乱位置
- 2 層目：散乱ガンマ線のエネルギー E_2 、散乱ガンマ線吸収位置

入射ガンマ線のエネルギー E_γ と、散乱角 θ は、

$$E_\gamma = E_1 + E_2 \quad (3.7)$$

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (3.8)$$

式 3.9 で求めた θ とコンプトン散乱位置、散乱ガンマ線吸収位置を用から、入射ガンマ線位置を通る円環を投影することができる。同一天体からのガンマ線を複数検出できれば、それらの円環を重ねて交点を求めることにより

ガンマ線の到来位置を推定できる。位置を一意にとらえるためには、同一の線源から3イベント以上の交点を重ねて特定する。

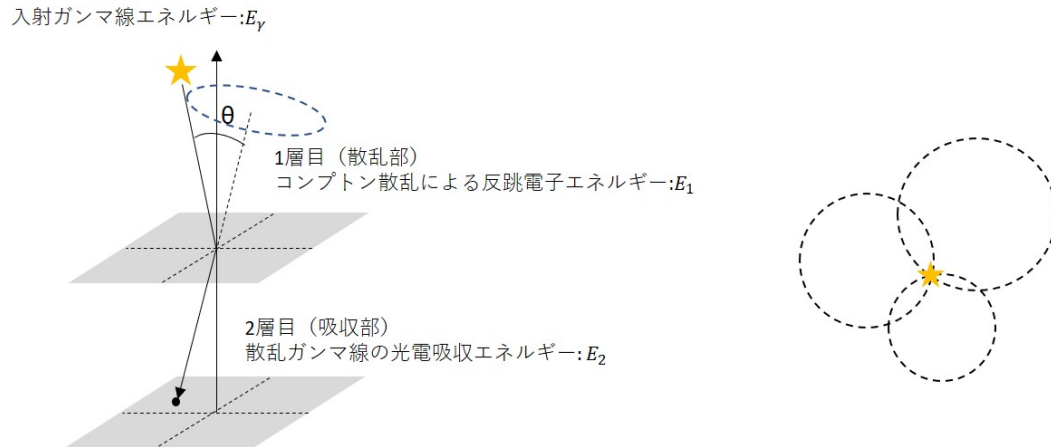


図 3.5 コンプトン-イメージ原理の概念図

COMPTEL では、1 層目の散乱部にはコンプトン散乱が卓越する原子番号の小さい液体シンチレータ、2 層目では光電吸収が卓越する原子番号の大きいヨウ化ナトリウム結晶シンチレータを用いている。それぞれの検出器には光電子増倍管が装備されており、ガンマ線の反応位置の検出とエネルギーの測定をする役割を持つ (図 3.6)。

コンプトン-イメージ法では、複数のガンマ線源 (天体) からの円環が重なる場合、その重なりは目標天体の真の線源の重なりに対してのバックグラウンドとなってしまふ。また、CGRO 衛星で生成されるバックグラウンドも存在する [21]。COMPTEL は MeV ガンマ線の領域において成果を上げるようになったが、バックグラウンドの多さから明るい天体の観測に限られることとなった。

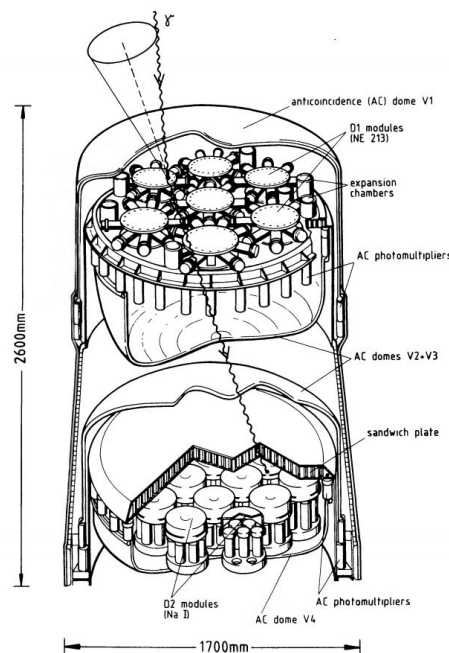


図 3.6 COMPTEL 概観 [14]

3.2.3 電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ法

電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ法は、コンプトン-イメージ法では扱わなかった反跳電子の情報を用いて、さらにガンマ線到来方向の決定精度を上げる方法である。反跳電子の反跳方向とエネルギーの情報を新たにコンプトン-イメージ法に加えることで、ガンマ線の到来方向を円環ではなく、理論的には一意に決定できる。電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ法では円環の重なりによる推定をする必要がなくなり、1 イベント毎に再構成することができる。

イメージング原理

コンプトン-イメージ法によるエネルギー E_1 、 E_2 と、さらに反跳電子の反跳方向の単位ベクトル \vec{e} と散乱ガンマ線の散乱方向の単位ベクトル \vec{g} を用いる。各層では以下の情報を得る。

- 1 層目：コンプトン散乱の反跳電子エネルギー E_1 、コンプトン散乱位置、反跳電子の反跳方向 \vec{e}
- 2 層目：散乱ガンマ線のエネルギー E_2 、散乱ガンマ線吸収位置、散乱ガンマ線の散乱方向 \vec{g}

入射ガンマ線の到来方向 \vec{s} は、以下の式 3.9 で求めることができる。

$$\vec{s} = \frac{E_2}{E_2 + E_1} \vec{g} + \frac{\sqrt{E_1(E_1 + 2m_e c^2)}}{E_2 + E_1} \vec{e} \quad (3.9)$$

\vec{g} と \vec{e} の離角 α は、幾何学的に

$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \vec{e} \cdot \vec{g} \quad (3.10)$$

となる。一方 E_1 と E_2 を用いて運動学的には、

$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_1} \right) \sqrt{\frac{E_2}{E_2 + 2m_e c^2}} \quad (3.11)$$

と表せる。式 3.10、式 3.11 は独立に求まる値であるため、 $\cos \alpha_{\text{geo}} \cong \cos \alpha_{\text{kin}}$ となる場合、コンプトン散乱によるイベントを得ることができ、バックグラウンドによるイベントや、偶発的なイベントを落とすことができる。また、イメージングの決定精度となる角度分解能は、ARM (Angular Resolution Measure) と SPD (Scatter Plane Deviation) によって定義される (図 3.7)。

ARM は散乱角 θ に対しての決定精度で、

$$ARM = \theta_{\text{geo}} - \theta_{\text{kin}} \quad (3.12)$$

と表され、 $\cos \theta_{\text{kin}} = \vec{s} \cdot \vec{g}$ 、 $\cos \theta_{\text{geo}}$ は式 3.9 の値である。

SPD は \vec{e} と \vec{g} による散乱平面の決定精度で

$$SPD = \sin \left(\vec{g} \cdot \left(\left(\frac{\vec{g} \times \vec{s}_{\text{rcs}}}{|\vec{g} \times \vec{s}_{\text{rcs}}|} \right) \times \left(\frac{\vec{g} \times \vec{e}}{|\vec{g} \times \vec{e}|} \right) \right) \right) \cos^{-1} \left(\left(\frac{\vec{g} \times \vec{e}}{|\vec{g} \times \vec{e}|} \right) \cdot \left(\frac{\vec{g} \times \vec{s}_{\text{rcs}}}{|\vec{g} \times \vec{s}_{\text{rcs}}|} \right) \right) \quad (3.13)$$

と定義される。

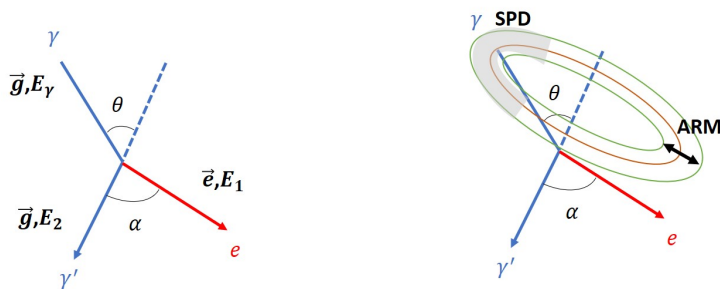


図 3.7 左:変数の定義 右:ARM と SPD の概略図

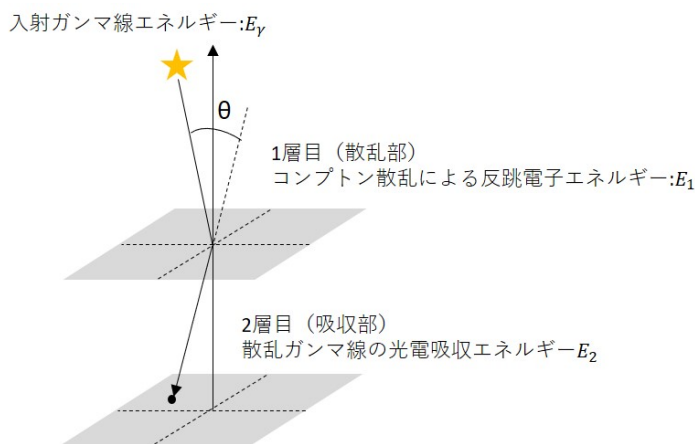


図 3.8 電子飛跡を用いたコンプトン-イメージ原理の概念図

電子飛跡を用いたイメージ法を用いた検出器として、SMILE プロジェクト [25] による検出器が挙げられる (図 3.9)。SMILE では、1 層目の飛跡検出部に μ PIC(micro Pixel Chamber)[11] を用いたガス検出器、2 層目にはシンチレータと光電子増倍管 (PMT) がアレイ化して並べられている。ガス検出器では反跳電子のエネルギーと三次元の飛跡情報を取得するように工夫されており、現在は気球に実際に搭載して観測実験が行われている。

その他、電子飛跡検出のための ASIC と Si-CMOS 検出器を用いたコンプトンカメラ (図 3.10) では ASIC で電子飛跡のエネルギーと検出のタイミング、Si-CMOS では飛跡の二次元イメージなどを得ることができる。2 つの情報を合わせることで電子飛跡の検出を可能にしている [25]。これらのように、電子飛跡を利用したコンプトンカメラは MeV 領域の観測において近年では主流となっており、電子飛跡検出型のコンプトンカメラは様々に開発されている。

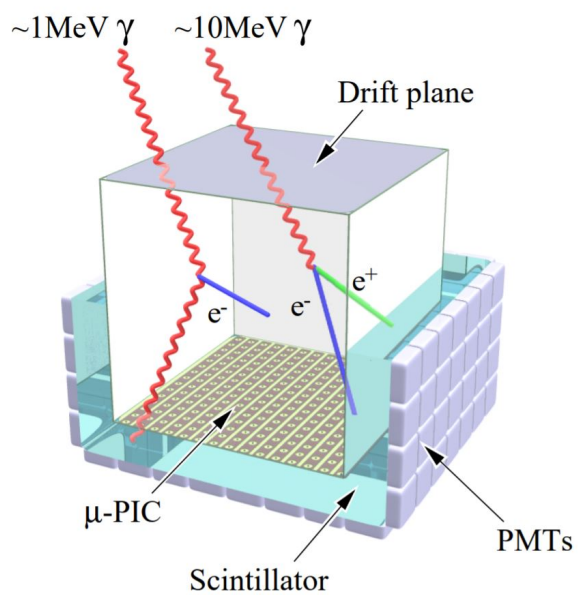
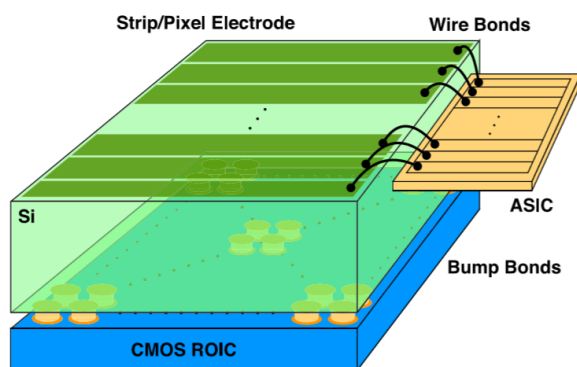
図 3.9 μ PIC を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ [25]

図 3.10 Si-CMOS を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ [22]

第 4 章

SOI 半導体検出器

4.1 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける SOI 半導体検出器

電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 1 層目の散乱体では、入射ガンマ線をコンプトン散乱させ、散乱点と反跳電子の飛跡とエネルギーを検出する。入射ガンマ線の到来方向をより正確に特定するためには、反跳電子の飛跡を正確に取得できなければならない。このような目的から、散乱体には、コンプトン散乱する確率が高いことと多重散乱が少なく、反跳電子の飛跡を正確に取得するための位置分解能やエネルギー分解能が要求される。SOI 半導体検出器の素子には京都大学、KEK で開発された XRPIX2b を用いる。本章では、SOI 半導体検出器に検出原理と、XRPIX2b の基礎特性について紹介する。

4.2 SOI 半導体

SOI (Silicon on Insulator) は、半導体基板のシリコン層の内部に絶縁層を形成し、さらにその上部に薄いシリコン層をのせた 3 層構造を示す。この積層技術は SOI 技術と呼ばれ、SOI 技術を用いてつくられた検出器が SOI 半導体検出器である。SOI 半導体検出器では、薄いシリコン層に CMOS 回路を搭載し、回路層として形成している。基板のシリコン層はバックバイアス電圧を加えることで、X 線・ガンマ線をとらえるセンサー層としての役割を持つ。SOI 半導体検出器の特徴は、イベントをとらえるセンサー層とそのイベント信号の処理をする回路層による、検出部と読み出し部一体型の検出器であることである。

本論文では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) らが開発した SOIPIX と呼ばれる SOI 半導体検出器を用いる (図 4.1)。素子の性能については 5 章で述べる。

4.2 章では SOI 半導体に用いる空乏層の原理と SOIPIX で使われる Buried p well (BPW) と呼ばれる BPW の技術を示す。

4.2.1 空乏層

半導体には、電子を与える不純物であるドナーを多く含む N 型半導体と、正孔を与える不純物であるアクセプタを多く含む P 型半導体がある。この二つを接合し P 型半導体と N 型半導体の接触面を pn 接合と呼ぶ。pn 接合した半導体では、接合境界面でそれぞれのキャリアである電子と正孔が引き寄せられて再結合し消滅する。そのため境界面の領域ではキャリアが存在しない領域が生じる。これを空乏層と呼ぶ。

pn 接合による空乏層の形成を図 4.2 に示す。接合面で正孔と電子が拡散し空乏層が形成された時、P 型半導体側は正孔が不足し負に帯電し、N 型半導体側では電子が不足し正に帯電するため空乏層内では P 型から N 型の方向へ電界が生じる。この電界によって生じる電位を拡散電圧と呼ぶ。シリコンの場合の拡散電圧 V_i は $\sim 0.6V$ である。

最終的に拡散と拡散電圧によるキャリアの移動 (ドリフト) が平衡状態になったとき、外部より P 型側を負極、

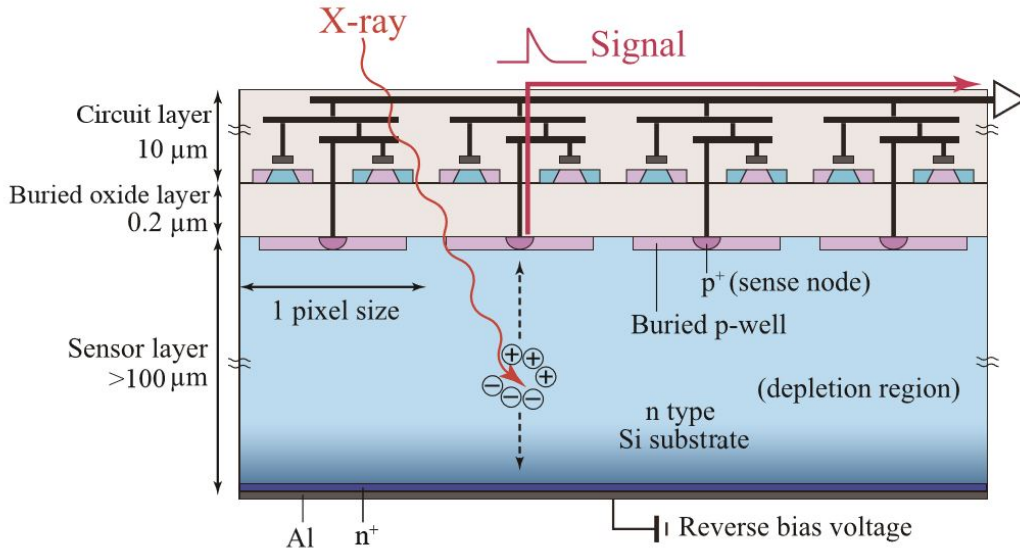


図 4.1 SOIPIX 構造模式図 [26]

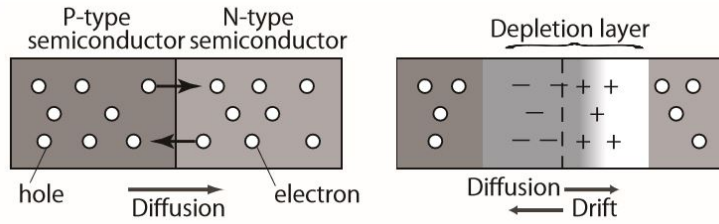


図 4.2 pn 接合による空乏層形成図 [26]

N 型側を正極とした逆方向電圧（バックバイアス電圧）をかける。P 型側の正孔は電極からの電子に引き付けられ、また N 型側では反発する。よってそれぞれのキャリアが少なくなり空乏層はさらに厚くなる。

バックバイアス電圧をかけたときの空乏層の広がりを示す。バックバイアス電圧を V_b 、ドナー濃度を N_D 、アクセプタ濃度を N_A とする。 ϵ は半導体の誘電率である（シリコンの場合 1.04×10^{-12} F/cm）。P 型、N 型の空乏層厚 x_p 、 x_n は [26]

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_b - V_i)}{eN_A(1 + N_A/N_D)}}, x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_b - V_i)}{eN_D(1 + N_D/N_A)}} \quad (4.1)$$

P 型、N 型の空乏層厚の合計である全空乏層厚 W_{dep} は [26]、

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_b + V_i)}{e} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)} \quad (4.2)$$

ここで、図 4.1 の SOIPIX は、N 型シリコン基板のセンサー層と高濃度の P 型不純物であるセンスノードによる PN 接合半導体である。ドナー濃度とアクセプタ濃度が大きく異なるとき $N_D \ll N_A$ では、

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_b - V_i)}{eN_A^2}}, x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_b - V_i)}{eN_D}} \quad (4.3)$$

よって、 $N_D \ll N_A$ のとき、 $x_p \ll x_n$ なので、 $x_n \simeq W_{dep}$ となり空乏層は N 型へ広がる。

N 型半導体の抵抗率式 4.4 を用いて式 4.3 の x_n を変形する。 μ は電子の移動度でシリコンでは $1.5 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}/\text{V}$ である。

$$\rho = \frac{1}{e\mu N_D} \quad (4.4)$$

$$W_{dep} = \sqrt{2\epsilon\mu\rho(V_b + V_i)} \quad (4.5)$$

変形式 4.5 より空乏層厚はバックバイアス電圧と抵抗率の平方根に比例する。

空乏層に X 線（あるいはガンマ線）が入射するときを考える。数 keV～数百 keV の範囲のエネルギーでは光電吸収をおこし、空乏層内では入射 X 線のエネルギーに比例して電子正孔対が発生する。よって生成された電子正孔対を測定することで入射 X 線の特徴が可能である。入射 X 線エネルギー E_γ と平均電離エネルギー w （シリコンでは 3.65eV）を用いて生成される電子正孔対の個数は E_γ/w となる（ex: 511keV が 90° 散乱した時の反跳電子のエネルギー約 255keV によって生成される電子正孔対の個数は約 7 万個）。

4.2.2 MOSFET

SOIPIX の回路層は前述したように CMOS 回路を搭載している。CMOS 回路は MOSFET（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor）と呼ばれる集積回路の 1 つである。MOSFET[13] は電界効果トランジスタ（FET）の一種で N 型半導体の NMOS と P 型半導体の PMOS が存在する。CMOS は NMOS と PMOS が複合したものである。

MOSFET の動作を示すために N 型の NMOS で説明する。NMOS の構造を図 4.3 に示す。

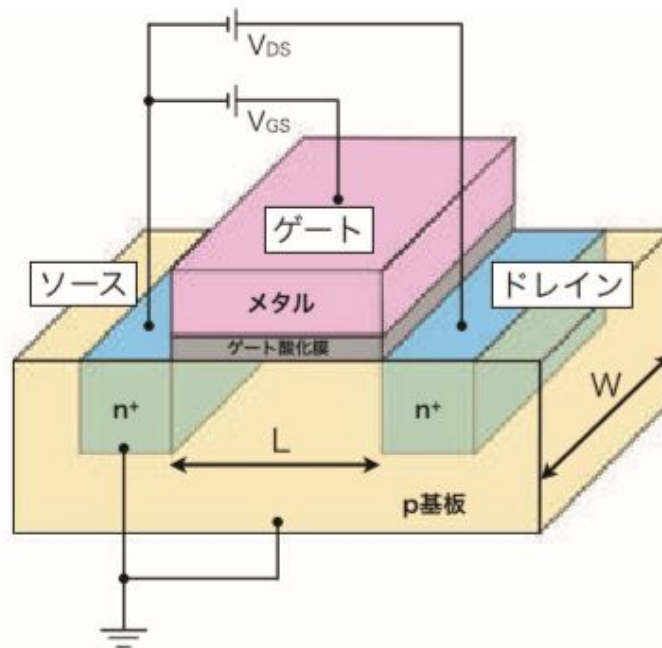


図 4.3 NMOS 模式図 [26]

NMOS は p 基板の上に高濃度の N 型不純物でソースとドレイン領域を形成している。p 型基板上に薄いシリコン酸化膜（ SiO_2 ）を堆積して、その上に高濃度のポリシリコンのゲートを載せている。ソースからドレイン方向の

ゲートの寸法をチャンネル長 (L) と呼ぶ。チャンネル長と直行方向のゲート寸法をチャンネル幅と呼ぶ。MOSFET はゲート、ソース、ドレインの3端子電極が主であり、ゲートに電圧を印可することにより、ソース-ドレイン間を導通するためのスイッチとしての役割をする。

ゲートにかかる電圧 V_G を $0V$ から上げていくと、ゲート直下の p 基板では正孔がゲートから遠ざかる方向に移動し空乏層が生じる。この状態でさらにゲート電圧を印可するとソース内の電子がドレインに向かって流れだす。このときの状態を反転と言ひ、反転がおこるときの電圧を閾値電圧と呼ぶ。電子がドレイン側まで到達するとソース-ドレイン間で電子の移動ができるようになるため導通する。よって MOSFET は閾値電圧によって電流の制御ができるスイッチとしての役割を持ち、NMOS、PMOS を合わせた CMOS でも同様である。

4.2.3 BPW によるバックゲート効果の抑制

SOIPIX では、センサー層上部の P 型不純物 p^+ を囲むように Buried p well(BPW) と呼ばれる薄い p 層が設置されている (図 4.1)。

センサー層を空乏化させるためには高いバックバイアスを印加する必要がある。しかし基板に高電圧が加わると電圧値によって MOSFET の閾値電圧が変化してしまう。これをバックゲート効果と呼ぶ。CMOS 回路の直下に BPW を形成しその電位を一定に固定することでバックゲート効果を抑制している。BPW の有無による MOSFET の電圧-電流特性の変化を図 4.4 に示す。BPW があることで特性のばらつきがなくなったことがわかる。

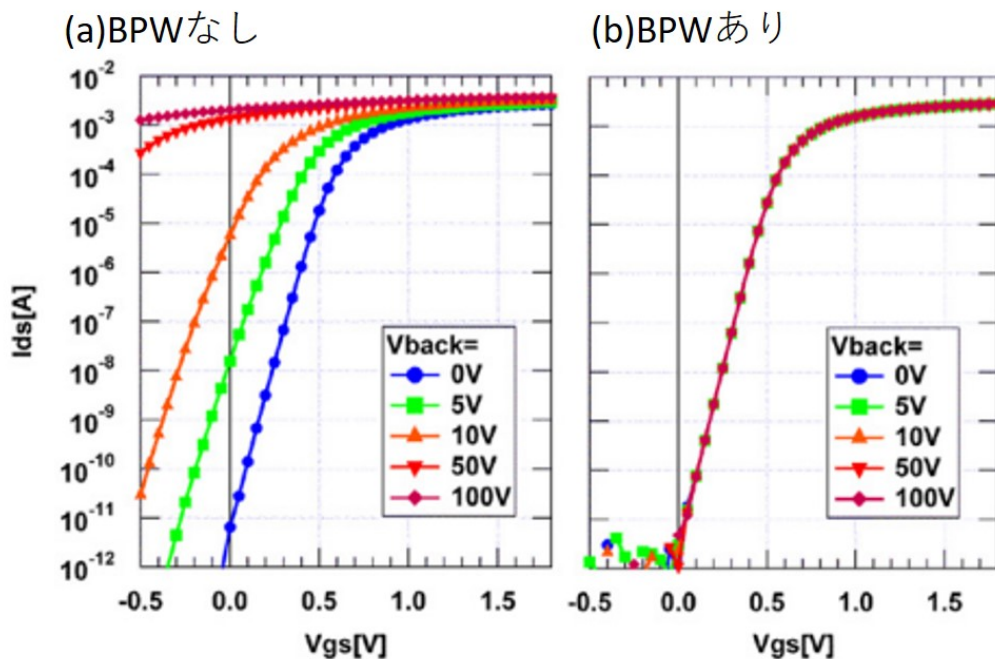


図 4.4 BPW の有無による MOSFET の特性変化。縦軸はゲート・ソース間の電圧。縦軸はドレイン・ソース間電流。(a)BPW がないとき (b) BPW があるとき [26]

4.2.4 エネルギー分解能と読み出しノイズ

電子・正孔対は入射 X 線のエネルギーに比例した個数を生成する。X 線の輝線の分解能の広がり、生成されるキャリアの統計的な揺らぎと、読み出し回路からの電子透過ノイズ $\sigma_R[e^-]$ によって生じる。標準偏差 σ は、

$$\sigma = \sqrt{F \frac{E}{w} + \sigma_R^2} \quad (4.6)$$

と表せる。F は Poisson 統計からのずれを表すファノ因子で、シリコンではファノ因子は 0.1 程度である。w はシリコンの平均電離エネルギー (eV) である。半値全幅でのエネルギー分解能は、

$$\Delta E = 2\sqrt{2\ln 2} \sqrt{F \frac{E}{w} + \sigma_R^2} \quad (4.7)$$

となる。冷却環境や読み出し回路を工夫することより σ_R は抑えられ、エネルギー分解能は良くなる。

4.3 XRPIX2b の概要

XRPIX2b (図 4.5) は京都大学と KEK が共同開発した XRPIX の 4 番目の素子である。基本動作として、イベント検出のタイミングと位置情報を出力する。読み出し方法にはこの出力をリアルタイムで行うイベント駆動読み出しモードと、一定の露光時間蓄積した電荷を読み出すフレーム読み出しモードがある。XRPIX2b は前作の XRPIX1b から面積を拡大し、イベント駆動読み出しのデモンストレーションとして有効である。

XRPIX2b は 1 ピクセルサイズ $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ で 152×152 ピクセル実装されている。そのうちの 144×144 ピクセルを有効ピクセルとして使用する。素子の主な仕様を表 4.1 に示す。

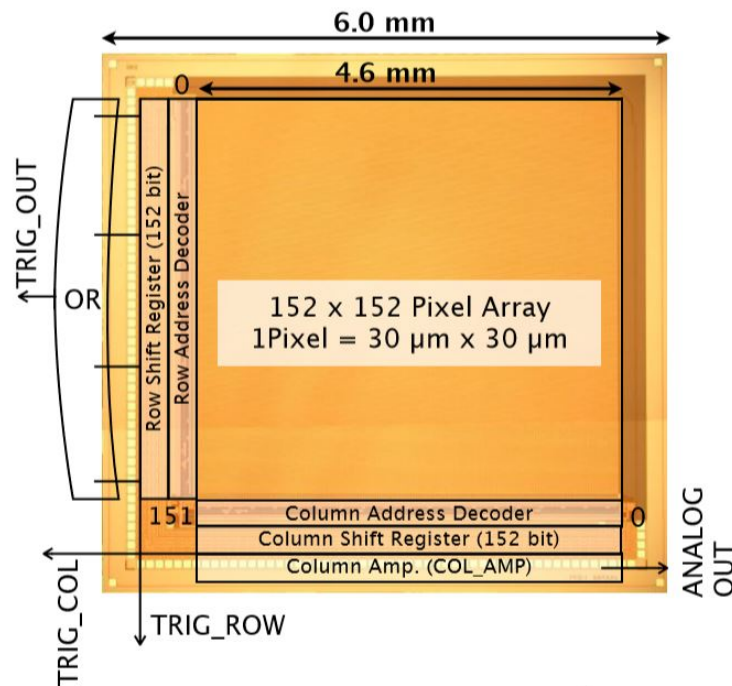


図 4.5 XRPIX2b の写真と簡易ブロック図 [27]

4.3.1 ピクセル回路

XRPIX2b のピクセル回路を図 4.6 を示す。ピクセル回路は低ノイズ化のために Correlated Double Sampling (CDS) 機能を搭載した読み出し部と、X 線の入射判定をするトリガー部の二つに分けられる。

表 4.1 XRPIX2b の仕様

チップサイズ	6.0 mm 角
ピクセルサイズ	30 μm
BPW サイズ	12 μm
ピクセル数	152 \times 152
有効ピクセル	144 \times 144
有効面積	4.3mm \times 4.3mm
センサー層厚	300 μm

CDS 機能とは、露光時に蓄積した電荷をリセットする際に検出部に発生するリセット (kT/C) ノイズを減少させるための機能である。リセットノイズは、CMOS を抵抗とみなして電圧のオン・オフが行われるとき、電子のランダムな熱運動による熱雑音によって電圧の変動が誘起されるノイズである。その時発生するノイズのパワーは $k_B T/C$ と表され、温度 T と電気容量 C に依存する (k_B :ボルツマン定数)。リセットノイズを低減させるために検出部の容量よりも十分大きな容量の CDS キャパシタ (図 4.6 の赤線で囲まれた部分) を用いることで信号への影響を抑えることが可能である。よって CDS 機能では検出部の容量は大きいままゲインを下げることなくリセットノイズを低減する。

トリガー部では、X 線入射時のヒットピクセルの位置情報を出力する。トリガー回路を図 4.6 の黄点線の領域に示す。トリガー信号はヒットタイミング信号とヒットパターン信号からなる。ヒットタイミング信号は、各ピクセルで基準電圧を超えているものを判定し、1 ピクセルでもヒットすればすべてを OR で外部に出力する。基準電圧はユーザー側 (FPGA) で設定することができる。ヒットパターン信号はヒットピクセルの行・列の位置を出力するものである。

各ピクセルの読み出しを行った信号は、アンプで増幅されアウトプットバッファーを通過したのち、アナログ信号として読み出される。

4.3.2 読み出しボード

素子の動作制御、データの出力を行うための 2 種類の読み出しボードを使用している。1 つ目は SoI Evaluation Board with Sitcp (SEABAS) で、素子制御用の User FPGA とネットワークでのデータ転送用の SiTCP FPGA を搭載している。User FPGA では素子のバージョンに合わせてデジタル回路を書き換えることができる。SiTCP FPGA では、User FPGA からの信号をイーサネットで転送する形式に変換する。

素子は 2 つ目の Sub ボード上に装着する。FPGA からの制御信号を素子に伝え、素子からのアナログ信号を SEABAS ボードへ転送する役割を持つ。Sub ボードは素子の種類によって異なる。

SEABAS ボードは Analog-to-digital converter (ADC) と Digital Analog Converter (DAC) を実装し、ADC ではピクセル回路からのアナログ信号をデジタル信号に変換する。ADC の分解能は $1V/12\text{bit}$ であり、1ADU (Analog-to-Digital Unit) の幅は $244\mu V$ である。DAC の分解能は $3.3V/12\text{bit}$ である。

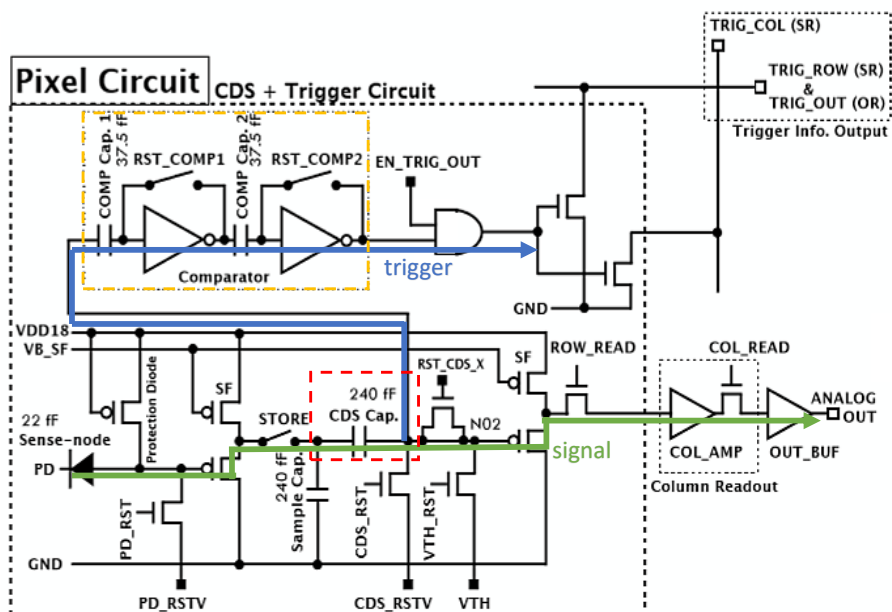


図 4.6 XRPIX2b ピクセル回路図 [27]

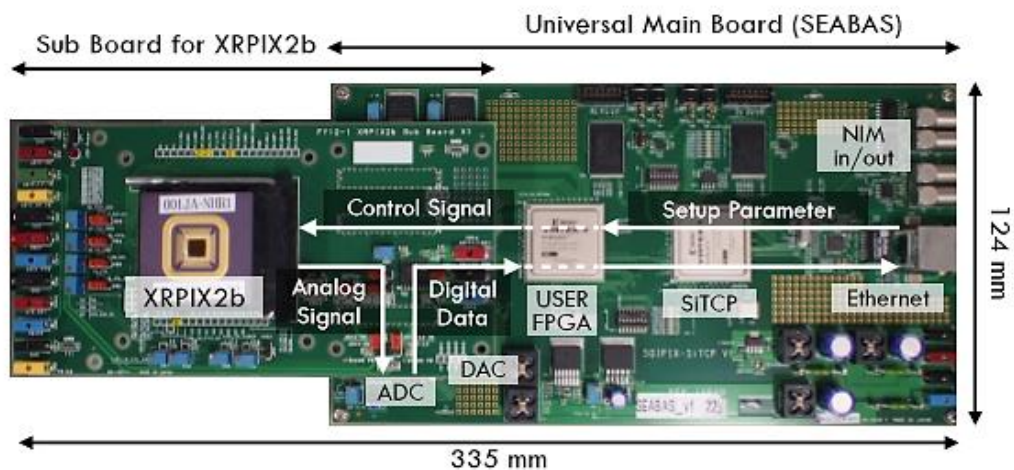


図 4.7 データ取得システム概略図

各ボードの動作

• SEABAS

SEABAS ボードの概要を図 4.8 に示す。SEABAS ボードの供給電圧は $\pm 5V$ で設定する。赤: +5V、青: -5V、黒: GND(+5V)、GND(-5V) で対応している。電源は直流電源を用いる。その横の Ethernet コネクタに LAN をつなげて PC とのやり取りを行う。供給電圧 $\pm 5V$ の他に可変抵抗により内部的に 1.8V と 3.3V を生成して ASIC、同じく 2.5V 生成して FPGA へ供給している。初期出荷時は ASIC LV、ASIC HV、FPGA の 3 つの可変抵抗を設定値へ調節する。設定後、電源再投入後の電流値は +5V で 730mA \sim 810mA 程度となる。SEABAS ボードには NIM 規格のモジュールが 2 つ搭載されている。

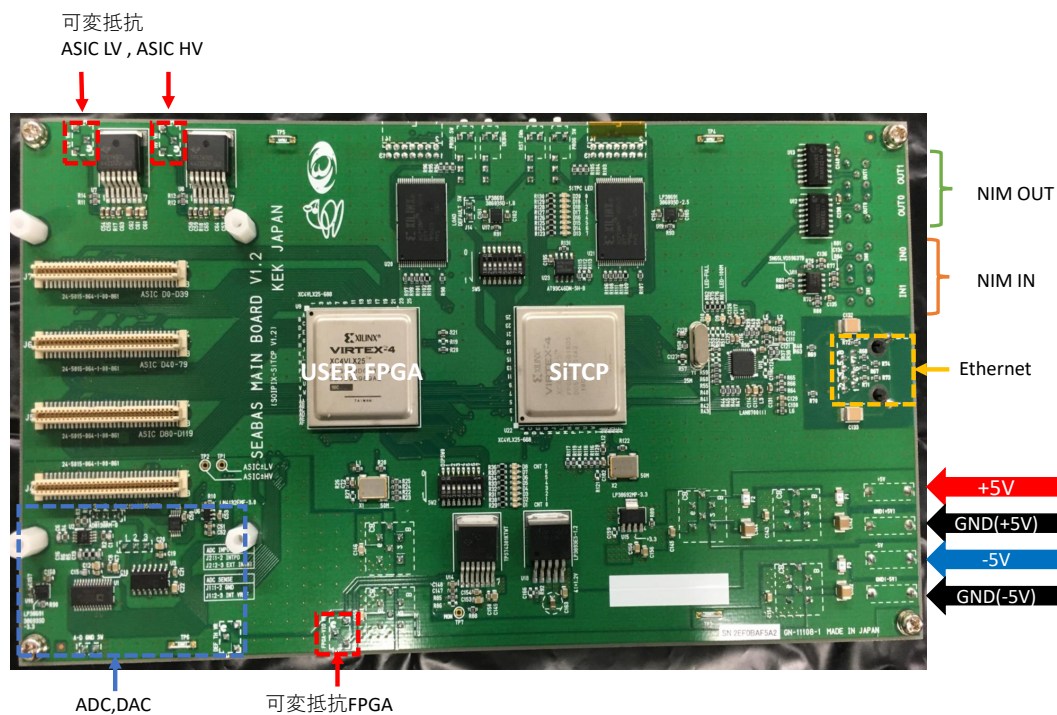


図 4.8 SEABAS ボード概略

• Sub

Sub ボードの概要を図 4.9 に示す。素子を設置する台があり [1,A] が素子の丸い小さな穴と対応するように設置する。Sub ボードには VDET(+) と VBIAS(-) または GND (-) 間で電圧を印可する。電源は高圧電源を用いる。Sub ボードに印可する電圧は素子の空乏化のためのバックバイアス電圧である。電圧を印可する際には SEABAS ボードと接続した状態で行い徐々に電圧値を上げるようにする。

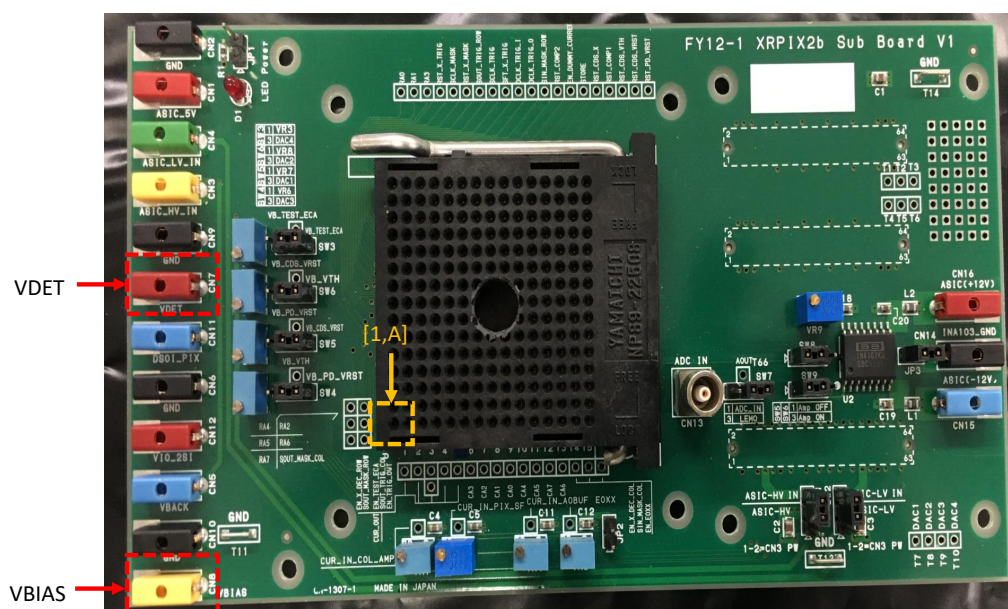


図 4.9 Sub ボード概略

第 5 章

XRPIX2b の基礎特性

5.1 実験セットアップ

XRPIX2b の性能評価を行った。X 線源には ^{241}Am を使用した。実験のセットアップを図 5.1 に示す。subboard 側には高圧電源よりバックバイアス電圧、SEABAS 側には直流電源より $\pm 5\text{V}$ 電圧を印可している。恒温槽内の温度は -60°C で設定し、素子の上部に線源を設置しテープで固定している。

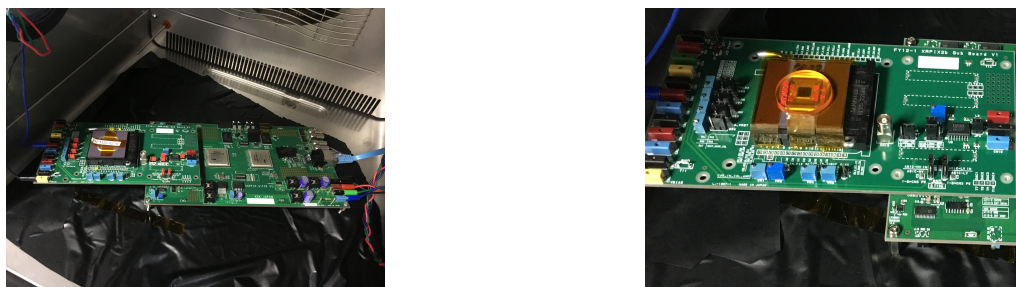


図 5.1 恒温槽内実験セットアップ (右:素子の設置図 左:全体のセットアップ)

5.1.1 データ取得システム

読み出しボードには、SEABAS ボードと XRPIX2b 専用 Sub ボードを使用する。データの取得には DAQ (Data Acquisition system) ソフトウェアを使用する。DAQ ソフトウェアは C++ を用いて開発されたもので、素子の露光時間、取得フレーム数などの制御信号を計算機上から読み出しボードに送ると同時に転送されてくるデータをファイルに保存する役割を担う。

5.2 解析

5.2.1 全面読み出しによる解析手順

XRPIX2b の読み出し方法の一つである全面読み出しモードによる解析手順について示す。全面読み出しモードとは、X 線などの信号が入射したかに関わらず一定時間露光をし、全ピクセルを読み出す方法である。

(1) オフセット成分の推定

XRPIX2b には一定のペDESTALが存在する。ペDESTALはリーク電流や、リセット電圧等に起因し、X 線が入射していないときでも出力される。よってペDESTALの変動の補正のために、各フレーム毎にペDESTALの推定を行い、差し引きを行う。

ペDESTALは固有のオフセット成分とノイズ成分をもつ。オフセット成分を $PH_{off_{ij}}(f)$ 、ノイズ成分を $\Delta PH_{ij}(f)$ とする。 i, j はそれぞれ列、行アドレスを f はフレームを表す。あるピクセルのあるフレームにおけるペDESTAL $PH_{ij}(f)$ は、

$$PH_{ij}(f) = PH_{off_{ij}}(f) + \Delta PH_{ij}(f) \quad (5.1)$$

となる。着目するピクセルとフレームにおいて、自身とその前後 50 フレームの波高値の平均をとりそれを各ピクセル、各フレームの生出力から差し引く。この値を各ピクセルのペDESTALとし、オフセット成分に相当する。

$$PH_{off_{ij}}(f) \simeq \frac{1}{101} \sum_{f'=f-50}^{f+50} PH_{ij}(f') \quad (5.2)$$

生の波高値からペDESTAL値を差し引いた波高値のヒストグラムは、平均が 0 となるガウシアンとなる。このガウシアンをゼロピークと呼び、ゼロピークの幅はノイズ成分に相当すると考えられ、これを読み出しノイズと定義する。

(2) バッドフレームの判定

フレーム毎の出力の変動（ライトカーブ）と、オフセット成分を引いた波高値のヒストグラムを図 5.2 に表す。ライトカーブを見ると、一部出力がとび出ているフレームが存在する（赤枠）。これをバッドフレームとする。ヒストグラムより標準偏差 σ と平均値を求める。平均値 $\pm 3\sigma$ 以上のものをバッドフレームとし以後の解析には使用しない。



図 5.2 左: 1 フレームごとの全ピクセル波高値平均のライトカーブ 右: オフセット成分補正後のヒストグラム

(3) X 線イベントの判定

X 線のイベント判定では、X 線の検出とチャージシェアリングイベントについての補正を行う。チャージシェアリングイベントについては以下で述べる。

5.2.2 チャージシェアリングイベントの判定

X 線が空乏層内に深く入射すると電子正孔対の電荷がセンスノードに感知されるまでに電子雲として広がってしまう現象が起こる。この電子雲が複数のピクセルにまたがってしまう場合、複数ピクセルで収集される電荷を足し合わせ、足し合わせの電荷を 1 イベントとして処理する必要がある。これをチャージシェアリングイベント（マルチピクセルイベント）と呼ぶ。ヒットしたピクセルと周囲 8 ピクセルで閾値を用いて、マルチピクセルイベントの判別を行う。

(i) X 線イベントの判定

ピクセルで感知された電荷がイベント閾値よりも大きい、また周囲 8 ピクセルのオフセット成分よりも大きい場合をイベントとして判定する。イベント閾値は読み出しノイズの 15 倍とする。

(ii) シングルイベントの判定

イベントに隣り合う上下左右のピクセルの出力値が全て、設定したスプリット閾値よりも小さいとき、「シングルピクセルイベント」とする。これは X 線による電荷が一つのピクセルに収まったイベントだと判定する。中心のピクセルの出力をシングルピクセルイベントの電荷とする。

(iii) チャージシェアリングイベント

イベントの上下左右のピクセルの出力値のうちひとつのみが、設定したスプリット閾値を超えるようなイベントを「ダブルピクセルイベント」とする。これは電荷が 2 つ以上のピクセルにまたがったチャージシェアリングイベントと判定する。ダブルピクセルイベントの出力は、中心のピクセルと、スプリット閾値を超えたピクセルの出力を足し合わせたものとする。XRPIX2b ではスプリット閾値を超えるピクセルが 5 つの場合までをイベントとして解析している。

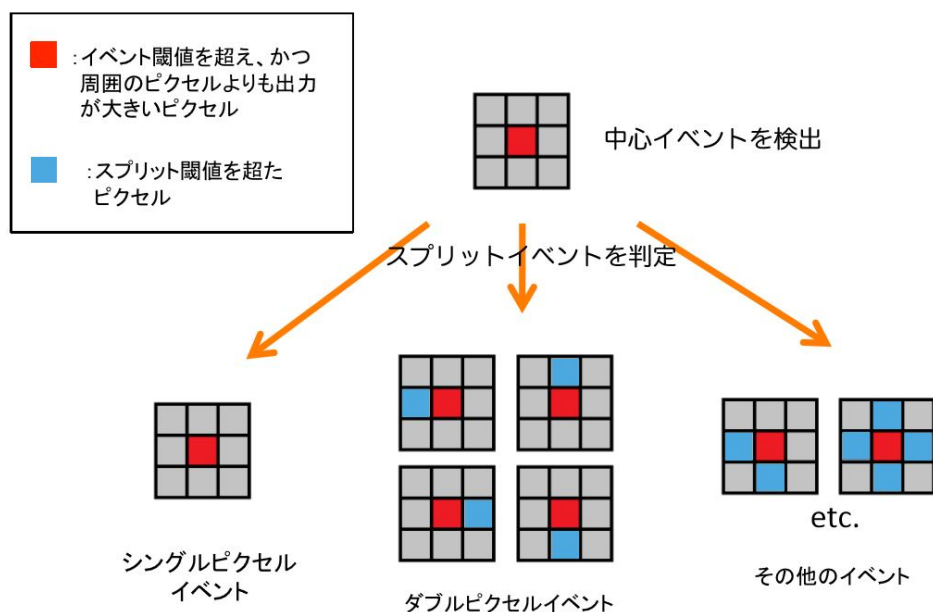


図 5.3 イベントセレクション関係図

5.3 結果

5.3.1 完全空乏化の確認

XRPIX2b の完全空乏化の試験を行った。空乏層厚 W_{dep} と、バックバイアス電圧 V_{back} は式 4.5 により比例関係がある。よって十分なバックバイアス電圧を印可すると空乏層はセンサー層 ($300\mu\text{m}$) に到達する。

X 線の空乏層内での減衰長は X 線のエネルギーに関する。X 線エネルギーによる減衰長が空乏層厚よりも長い場合、バックバイアス電圧を上げていくと、ある電圧値で X 線源 ^{241}Am のフォトンカウント数が飽和する。よってバックバイアス電圧を上げててもカウント数が伸びなくなる。これを完全空乏化とし、この時のバックバイアス電圧を求める。X 線源 ^{241}Am から 13.6keV のエネルギー (減衰長約 $367\mu\text{m}$) のフォトンカウントとバックバイアス電圧の関係を調べた。恒温槽内の温度は -60°C 、露光時間 1m sec で 10 万フレームのデータを解析した。結果は図 5.4 に示す。

図 5.4 から約 50V でフォトンカウントが飽和しているため、センサー層 $300\mu\text{m}$ の XRPIX2b では $\sim 50\text{V}$ で完全空乏化していることが分かった。

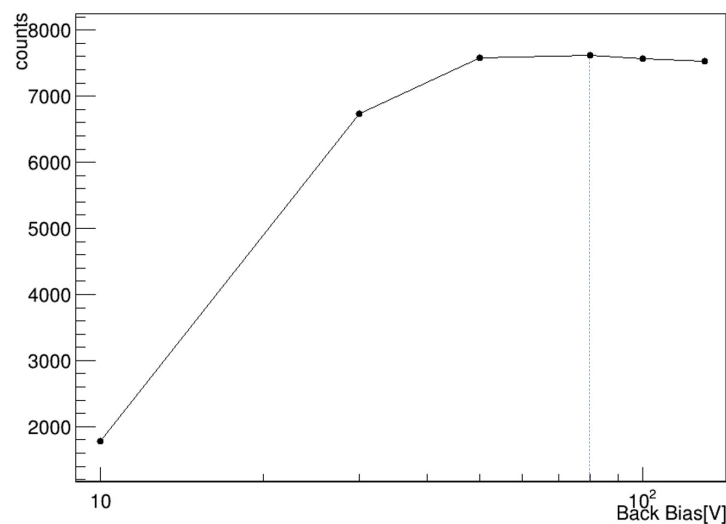


図 5.4 ^{241}Am のフォトンカウントとバックバイアス電圧の関係

製造時の設定では、本研究で使用している XRPIX2b の抵抗率 ρ は $5.2\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ である。この値を式 4.5 に用いて理論計算し、 0V から 100V までの空乏層の厚さをプロットした (図 5.5)。図 5.5 より約 50V で $300\mu\text{m}$ に到達していることが分かる。

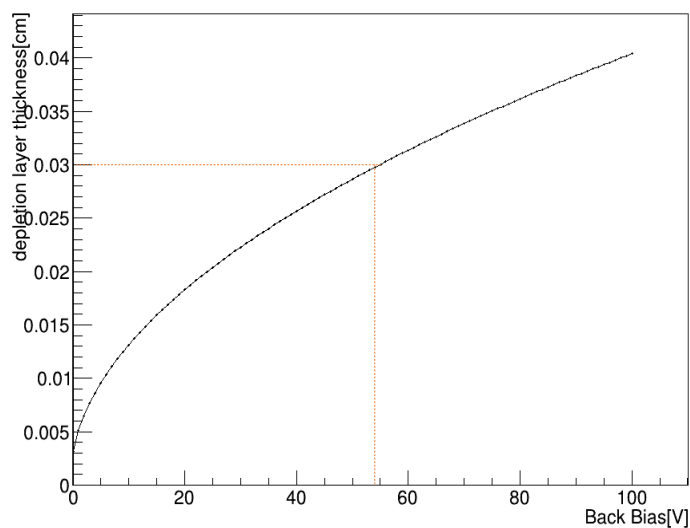
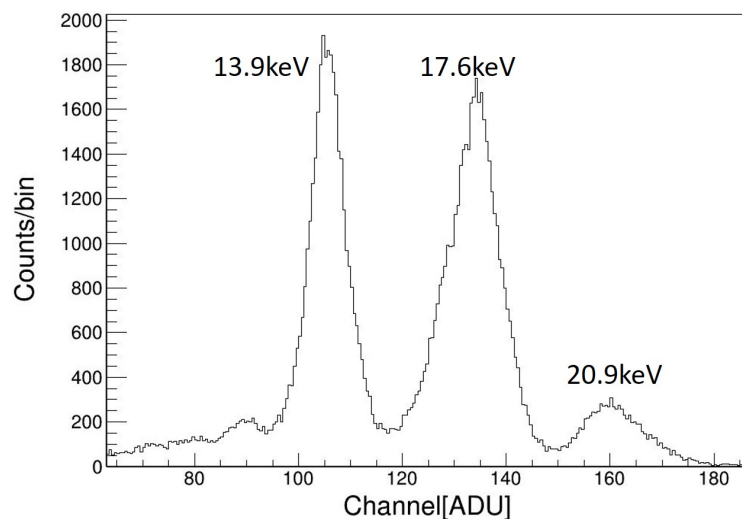


図 5.5 空乏層厚とバックバイアス電圧依存性の理論値

5.3.2 素子のゲインとエネルギー分解能

5.3.1 章と同様の条件で、完全空乏化した 80V で測定した ^{241}Am のエネルギースペクトルとエネルギー分解能を示す。

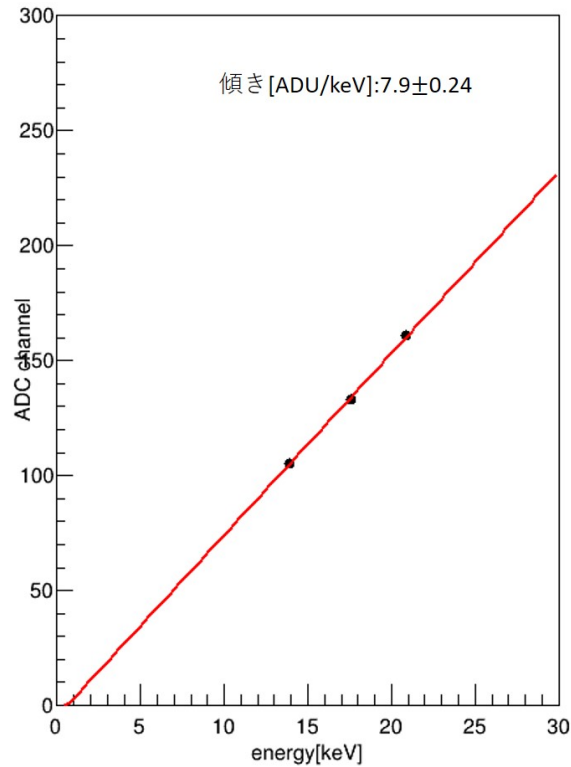
^{241}Am では、13.9 keV、17.7 keV、20.8 keV の 3 つのエネルギーを確認した。このエネルギースペクトルをガウシアンでフィットし、それぞれのスペクトルの中心値とエネルギーの関係を表すエネルギー較正を行った。結果を図 5.6 に示す。

図 5.6 ^{241}Am ヒストグラム

エネルギー較正曲線の傾きとガウシアンのフィットから求めた標準偏差を用いて、以下の式よりエネルギー分解能を求めた。

表 5.1 ^{241}Am のフィット結果

エネルギー [keV]	平均値 [ADU]	標準偏差 [ADU]
13.9	105.5	4.7
17.6	133.3	5.8
20.9	160.8	6.8

図 5.7 ^{241}Am エネルギー較正曲線

$$\Delta E_{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \div (\text{フィットの傾き [ADU/keV]}) \quad (5.3)$$

式 5.3 より 13.9 keV@8.9%、17.7 keV@9.5%、20.8 keV@8.6% である。次に素子のゲインについて述べる。素子のゲインとは X 線が作った電子一個が最終的にどのぐらいの電圧に変換されるかを示す値である。ゲインを求める式は以下である。1ADU が $244\mu\text{V}$ で S_i の平均電離エネルギーは $3.65 \times 10^{-3} \text{ keV/e}^-$ である。

$$(\text{素子のゲイン } [\mu\text{V/e}^-]) = (\text{フィットの傾き [ADU/keV]}) \times 244[\mu\text{m}] \times (3.65 \times 10^{-3}) \quad (5.4)$$

式 5.4 よりゲインは $7.04[\mu\text{V/e}^-]$ ともとめられた。先行研究 [27] の値 ($7.0[\mu\text{V/e}^-]$) とほぼ同様の結果が得られた。

5.3.3 寄生容量の算出

素子のゲインより検出部の寄生容量 C_{senc} を算出する。回路のゲインを $A_{\text{cir}} (= 0.95)$ 、電荷素量 $e (= 1.6 \times 10^{-19} \text{C})$ より、

$$C_{\text{senc}} = \left(\frac{G}{A_{\text{cir}}} \right)^{-1} \quad (5.5)$$

となり、 $C_{\text{senc}} = 21.59 \text{fF}$ と算出された。これも先行研究 [27] の結果 (22fF) とほぼ同様の結果が得られた。

第 6 章

電子飛跡の検出

電子飛跡型コンプトンカメラ開発において、1 層目での電子飛跡の検出と、各層で異なる情報をもつデータを 1 つのイベントと認識させるための同期、の 2 つが重要である。本章では、①1 層目でのデータ読み出し方法の改良、②2 層間の検出器の同期システムの開発について述べる。これらのシステムを用いて電子飛跡検出型コンプトンカメラのプロトタイプ作成を行った。プロトタイプより 511keV の実測をし、電子飛跡検出の試験を行った。

1 層目の SEABAS ボードと、2 層目の ADC- SiTCP ボードには、データ読み出しロジックの書き換え可能な FPGA を実装しており、この FPGA のロジックを書き換えることで同期システムを開発する。同期のシステムに関しては共同研究による開発部分のため概要を説明する。私が行ったこととしては①のデータ読み出し方法の改良と、プロトタイプ作成後に電子飛跡の実測、解析を行った。

1 層目では、電子飛跡の検出を行う。XRPIX2b ではリアルタイムにイベントを検出し、ヒットピクセルのデータの読み出しを行う方法がある（イベント駆動読み出し）。イベント駆動読み出しはイベント毎にヒットした最初の 1 ピクセルのみのデータを読み出す。そのため電子飛跡のような複数のピクセルにまたがってヒットするイベントに対して有効ではない。よって電子飛跡のデータを読み出すための読み出し制御の書き換えを行った。以下では、1 層目のデータ読み出しについてと同期のシステムについての概要を述べる。

6.1 イベント駆動によるデータ読み出し

イベント駆動は、リアルタイムでイベントを判定し、判定されたイベントのデータを出力していく読み出し方法である。素子のピクセル回路は FPGA によって制御されており、読み出しの制御を行っている。イベント駆動の読み出し制御、データの読み出しについて説明する。

6.1.1 読み出しの制御

FPGA による読み出しの制御の概略を図 6.1 に示す。

- (i) あるピクセルに X 線（あるいはガンマ線）がヒットする。
- (ii) ヒットピクセルの行・列の方向がシフトレジスタへ射影される。
- (iii) 全ラインの OR がタイミング信号として出力される。
- (iv) FPGA がトリガー信号を受けたのち、行・列方向のヒットパターンを順番に読み出す。
- (v) FPGA で X 線イベントと判定された場合、ヒットしたアドレスを指定し、そのピクセルの信号を読み出す。
- (vi) ピクセルから出力されたアナログ信号は外部の ADC でデジタル信号に変換される。
- (vii) 変換されたデジタル値は Ethernet 経由で PC ヘデータとして送信され保存される。

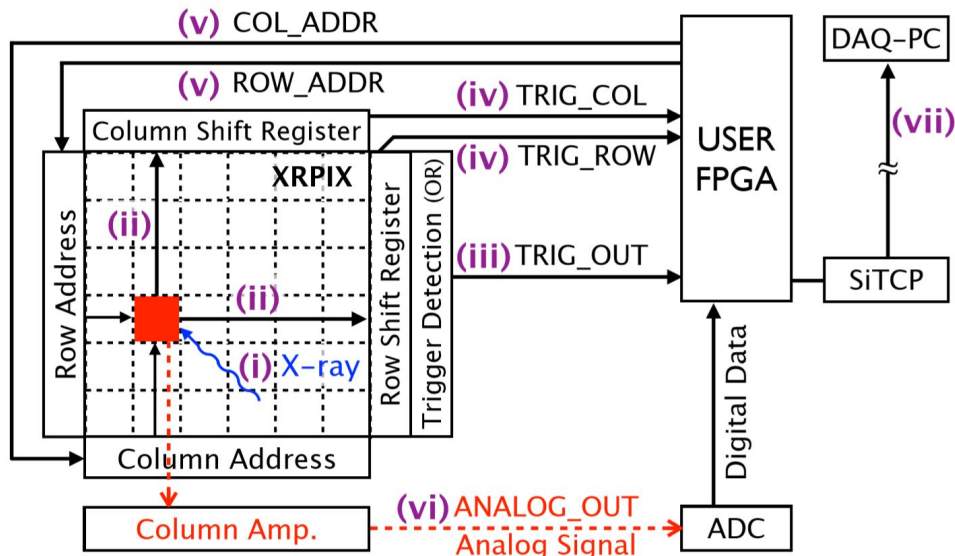


図 6.1 FPGA による読み出しの制御 [?]

データの読み出し

XRPIX2b の X 線用のイベント駆動読み出しでは、ヒットと判定された最初の 1 ピクセルの波高値とベデスタル値を読み出す。波高値を精度よく読み出すために、波高値とベデスタル値の読み出しの際に 50 回のサンプリングを行っている。ベデスタル値は、波高値の露光時間（露光開始からトリガー信号の出力までの時間）と同じ時間分積分したときの値を用いる。

イベントの波高値 PH、波高値 PH_d、ベデスタル値 PH_p とすると、イベントの波高値 PH は、

$$PH = PH_d - PH_p \quad (6.1)$$

となる。波高値とベデスタル値は各々 50 回ずつサンプリングしたデータを出し保存している。1 回のサンプリングと 50 回のサンプリングでどの程度データの決定精度に違いがあるかを調べた。50 サンプリングの時の標準偏差と、1 サンプリングの標準偏差に相当する標準誤差を比べる。波高値の分散を σ_{data}^2 、ベデスタルの分散を σ_{ped}^2 と表すと、イベントの波高値の分散は σ_{ivent}^2 、

$$\sigma_{ivent}^2 = \sigma_{data}^2 + \sigma_{ped}^2 \quad (6.2)$$

となり、50 サンプリングした時のイベントの波高値の標準偏差は、

$$\sqrt{\sigma_{data}^2 + \sigma_{ped}^2} \quad (6.3)$$

と表せる。標準誤差は、

$$\sqrt{\sigma_{data}^2 + \sigma_{ped}^2} \quad (6.4)$$

となり、ここで、 $\sigma_{data}^2 = (\frac{\sigma_{data}}{\sqrt{n}})^2$ 、 $\sigma_{ped}^2 = (\frac{\sigma_{ped}}{\sqrt{n}})^2$ である。n は 50 を代入する。

100 イベント分の 50 サンプリングの標準偏差と標準誤差をプロットし比較した結果を図 6.2 に示す。横軸は 50 サンプリングの平均をとったイベントの波高値である。図 6.2 より、50 回のサンプリングと 1 回のサンプリングでは 15% ほどのばらつきの違いがあることが分かった。

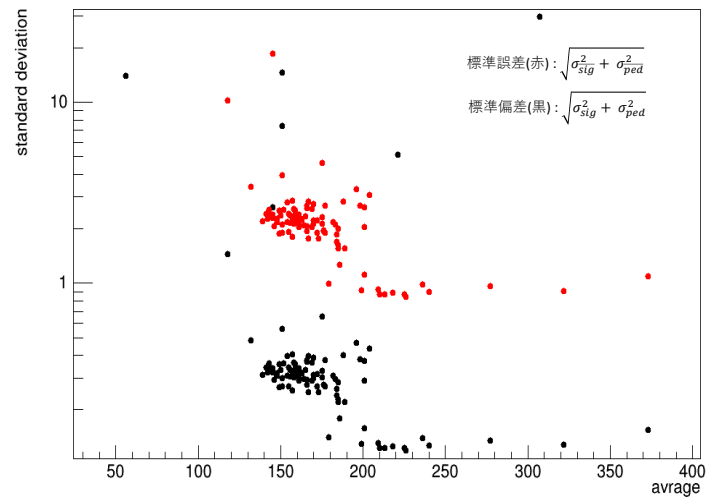


図 6.2 サンプルングによるデータばらつきの比較

6.1.2 エネルギースペクトル

イベント駆動読み出しで取得した恒温槽内の温度 -60°C 、完全空乏化後のバックバイアス電圧 80V の時の ^{241}Am のエネルギースペクトル図 6.3 を示す。縦軸はイベントのカウント数、横軸は波高値 (Pulse Height)[ADU] である。前述した波高値と、ペデスタル値は、50 回のサンプルングから波高値の変動が落ちついた後ろ 30 回分の平均をとり、1 データとしている。また、複数ピクセルにまたがってヒットしてしまうチャージシェアリングイベントの場合は電荷収集効率を下げ、エネルギー分解能に影響するため、リアルタイムでイベントを判別しヒストグラムにつめるイベント駆動読み出しでは、イベントとしてヒストグラムにはつめていない。

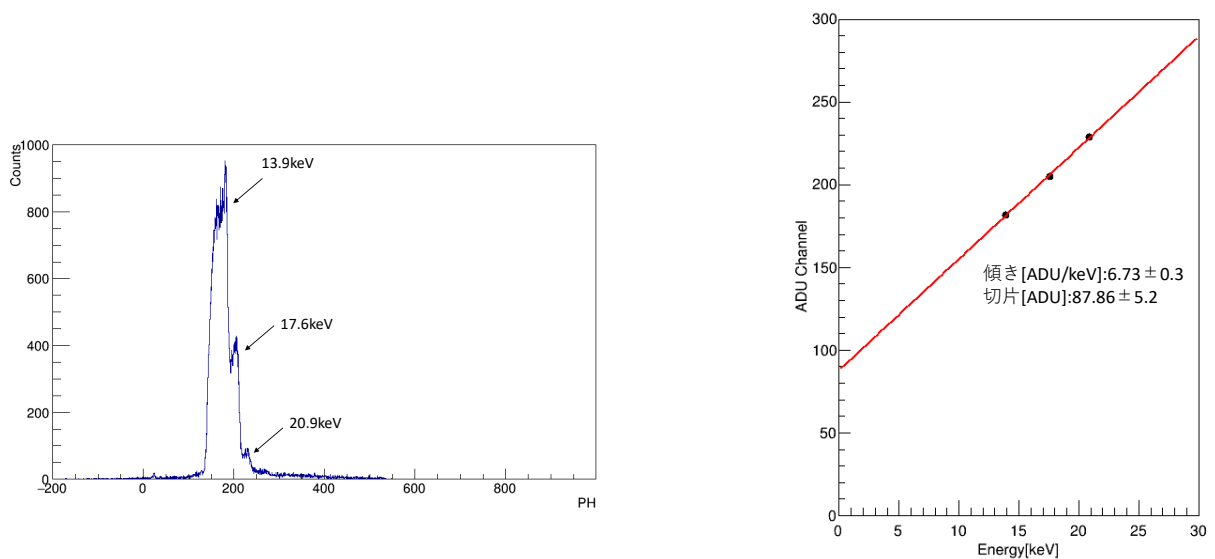
図 6.3 ^{241}Am のエネルギースペクトル図 6.4 ^{241}Am の校正曲線

表 6.1 イベント駆動読み出しによる ^{241}Am のフィット結果

エネルギー [keV]	平均値 [ADU]	標準偏差 [ADU]
13.9	181.9	3.1
17.6	205.0	5.7
20.9	229.0	6.2

フィット結果（表 6.1）と較正曲線（図 6.3）を示す。フレーム読み出しと比べるとエネルギー分解能が悪い。また、較正曲線では切片が 80ADU ほどになっており、これはオフセット成分と呼ばれる。

6.2 144×144 ピクセルイベント駆動読み出しシステム

コンプトン散乱イベントによる反跳電子はエネルギーによって電子飛跡の飛程が変化するため、電子飛跡は複数のピクセルにまたがる。一方、複数のピクセルにまたがることで電子飛跡をとらえることが可能となり、ヒットピクセルごとのエネルギーを合計することで反跳電子のエネルギーを推定することができる。しかし X 線イベント用の XRPIX2b のイベント駆動では、ヒットした 1 ピクセルのみをイベントデータとして出力している。そこで本研究では XRPIX2b の有効ピクセル 144×144 ピクセルの全面を読み出す方法で電子飛跡の取得を試みた。

FPGA の回路を書き換えることで読み出しの制御を変更を行った。基本的には、通常のイベント駆動と同様にヒットピクセルの情報を FPGA で処理して読み出しを行う。144×144 ピクセル読み出しではさらに、ヒットピクセル以外の全ピクセルのデータ信号の読み出しも行う。この制御によって反跳電子の最初のヒットピクセルと反跳した周りのピクセルのデータを取得することができ、飛跡をイメージ上でとらえられる。144×144 ピクセル読み出しでは、1 ピクセルずつ 50 サンプルングを行ってしまうと読み出しに時間がかかってしまうため 1 サンプルングのみのデータ取得をしている。

図 6.5、図 6.6 に 144×144 ピクセル読み出しでの ^{241}Am のエネルギースペクトルと、ガウシアンフィットより較正曲線を示す。恒温槽内 -20°C 、100V で測定したものである。表 6.2 にフィット結果を示す。較正曲線の傾きより、エネルギー換算係数は $7.89[\text{ADU}/\text{keV}]$ となった。

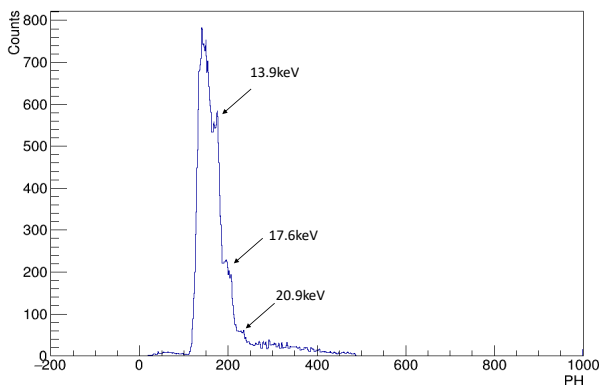
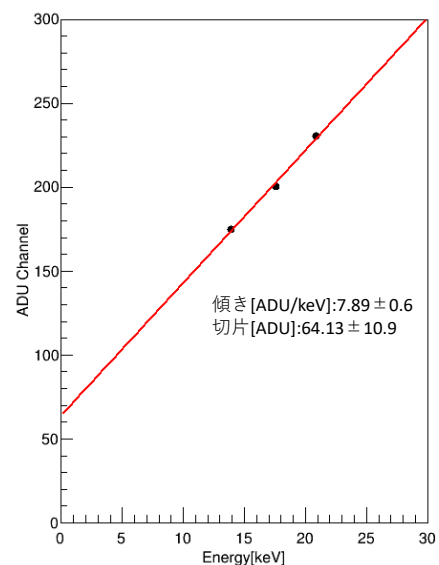
図 6.5 ^{241}Am のエネルギースペクトル図 6.6 ^{241}Am の較正曲線

表 6.2 144×144 イベント駆動読み出しによる ^{241}Am のフィット結果

エネルギー [keV]	平均値 [ADU]	標準偏差 [ADU]
13.9	175.0	5.6
17.6	200.6	9.5
20.9	230.4	7.9

6.3 二層間のデータの同期システム

図 6.7 より、システムの概要を示す。システムの流れについて以下で簡単に説明する。

1. 1 層目に入ってきたイベント信号がユーザー側 (FPGA) で設定した閾値を超えているピクセルがある場合、イベントの認識の信号が立ち上がる (6.8①)。その後 X 線かどうかのイベント判定を行う。イベント判定時間 $\sim 40\mu\text{s}$ 後に 1 層目からの信号 (トリガー信号 1) を 2 層目に送る。コンプトン散乱イベントのデータ (イベントデータ 1) は PC に送信せずに待機する。また、閾値を超えていないときは次のイベントを待つ。
2. 2 層目では 1 層目と同時に入ってきたイベントのアナログ信号を認識する (6.8②)。アナログ信号をデジタル信号に変換し、2 層目のデータ処理のために $\sim 40\mu\text{s}$ 待機する (6.8③)。待機後に信号を立ち上げる (イベント信号 1)。
2 層目はイベント信号 1 と 1 層目からのトリガー信号 1 を調査する。トリガー信号 1 の立ち上がりが同時である認識したら 2 層目はイベントのデータ (イベントデータ 2) を PC に送信し、同時に 1 層目にトリガー信号 2 を送り返す。そうでないときは、次のイベントを待つ。
トリガー信号 2 (図 6.8⑤) はデータ処理のために $\sim 15\mu\text{s}$ 後に信号を立ち上げる。図 6.8④のトリガー信号 1 の立ち上がりから $20\mu\text{s}$ の間にトリガー信号 2 の立ち上がりと重なるときのみイベントデータ 2 を PC に送信する。
3. 1 層目は 2 層目からのトリガー信号 2 を受け取ったときのみ、保持していたイベントデータ 1 を PC に送信し、そうでないときはリセットして次のイベントを待つ。

同時計数システムの導入により、各層にイベント信号が同時に入ったときのみデータを取得することが可能である。

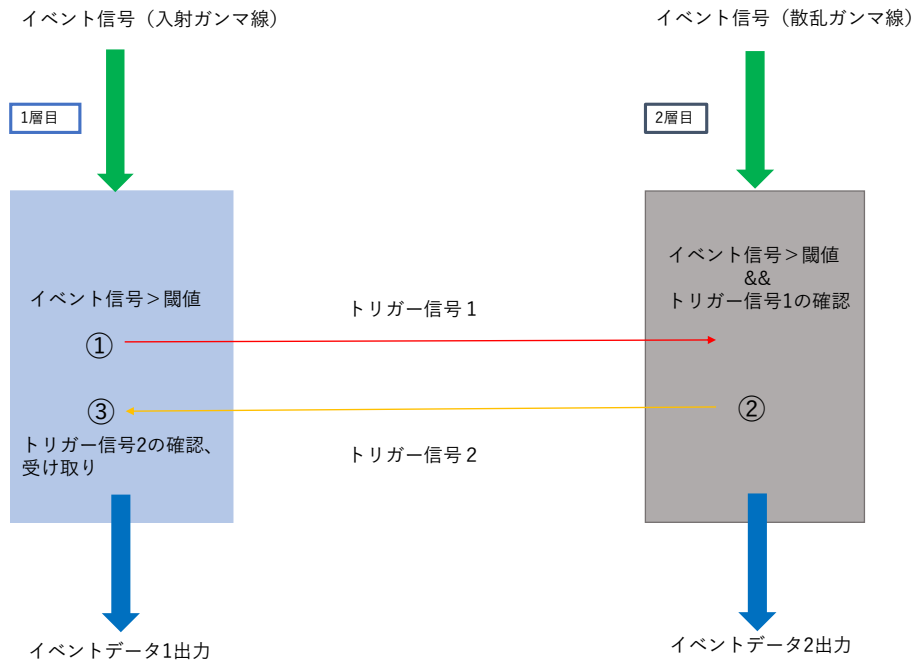


図 6.7 同期システムの概要

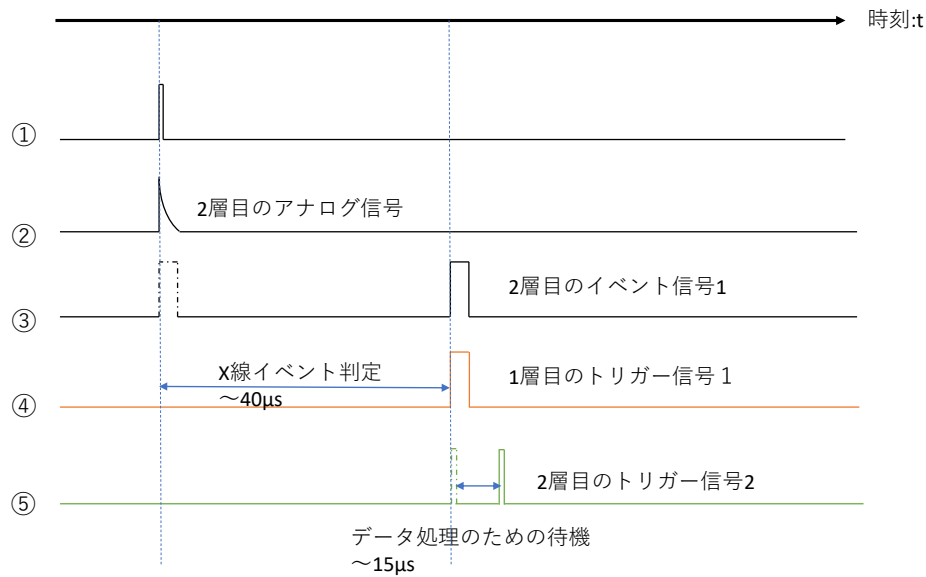


図 6.8 同期システムのダイアグラム

6.4 電子飛跡のイベント選別解析

144×144 ピクセル読み出しと同期システムを用いて、電子飛跡の検出を行う。 ^{22}Na より 511keV の測定を行った。各層で検出した情報を用いて、測定データの解析を行った。

6.4.1 実験セットアップ

^{22}Na を用いて、511keV の観測を行う。コンプトンイベントとしては 1200keV も測定されているが、今回は 511keV に着目するため、解析ではカットを行う。使用線源の放射強度は $2.1 \times 10^5 \text{Bq}$ である。

散乱ガンマ線が 90° に散乱するときのセットアップを図 6.9 に示す。大散乱角により反跳電子の飛跡を長くとらえることが可能である。散乱ガンマ線が 90° に散乱する時の反跳電子の飛跡の長さは約 $300\mu\text{m}$ となる。セットアップでは反跳電子が 1 層目の検出器にたいして平行に反跳するようにセットしている。

恒温槽内の温度 -20°C 、バックバイアス電圧 100V で測定を行った。

図 6.10 に 511keV のときの散乱角に対する散乱ガンマ線のエネルギー、反跳電子のエネルギーの関係を示す。

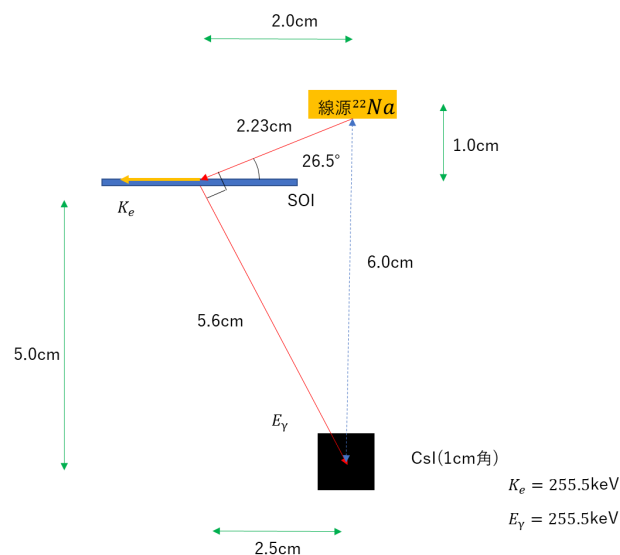


図 6.9 実験セットアップ

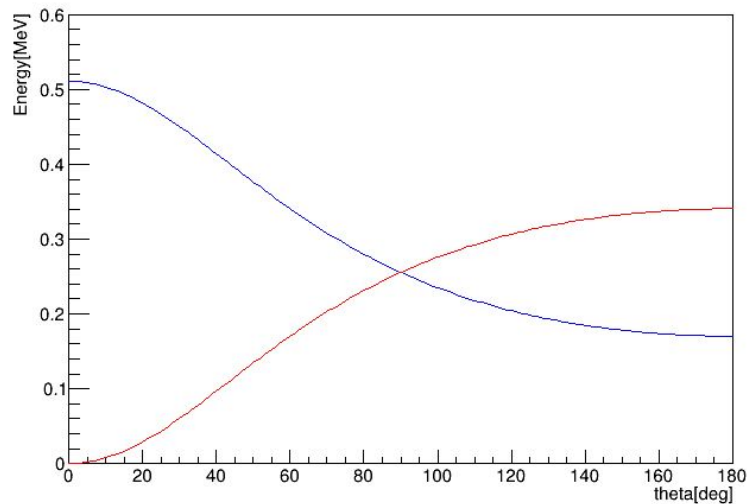


図 6.10 511keV のときの散乱角 θ に対する散乱ガンマ線のエネルギー (青)、反跳電子のエネルギー (赤)

2 層目には、1cm 角の CsI 結晶のシンチレーション検出器を用いている。シンチレーション検出器では、散乱ガンマ線を光電吸収させたのち光電子増倍管で信号を増幅させて、散乱ガンマ線のエネルギーと反応位置を特定する。2 層目に入射する散乱ガンマ線の反応位置は検出器の有効面積全体となるため、結晶は可能なかぎり小さい方が反応位置の不定性を抑えることができる。

6.4.2 解析

以下解析では、同期システムの選別により、同時計数を満たしたコンプトン散乱イベントのデータを用いている。解析手順は主に、3 つである。

1. 同期システムによるイベントの検出タイミングを利用したデータ選別
2. ヒットピクセルと閾値を超えたピクセルのまとまりを利用したデータ選別
3. 511keV のエネルギーカット

イベント検出タイミングによるエネルギーの再構成

同期システムによるイベントの選別では、トリガー信号の送信時間によるイベントの判定の遅延を考慮し、ある時間幅を持ったデータを同期イベントとして認識している。そのため 1 層と 2 層の間で検出タイミングにずれが生じている。解析では、この 2 層間でのイベント検出のタイミングのずれを利用して、時間差の分布を求めた (図 6.11)。図 6.11 より 6~8 クロックのピークは同期イベントの検出タイミングのずれによるものとする。データ選択には、1 クロックサイクル時間が 40ns の 6~8 クロックサイクル時間の範囲の時間差内でイベントを選択した。

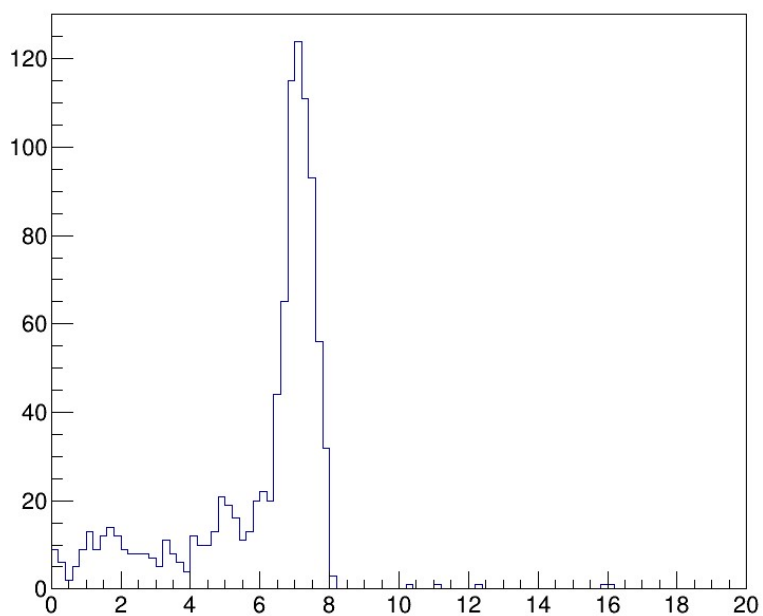


図 6.11 1 層目と 2 層目の検出タイミングの時間差

クラスタを用いたデータ選択

1 層目でセンサーが反跳電子の最初のヒットをとらえたとき、その周囲のピクセルに飛跡は広がる。設定閾値を超えたピクセルが 2 つ以上隣り合っているひとまとまりをクラスターとする。トリガーがかかったピクセルとクラスターの重心までの距離を図 6.12 に示す。距離が離れている場合はバッドピクセルやノイズによる偶発的なイベントであると仮定して除外する。電子飛跡によるクラスターは図 6.12 より、10 ピクセル ($300\mu\text{m}$) 以下の距離内にあるものとして制限をかけた。

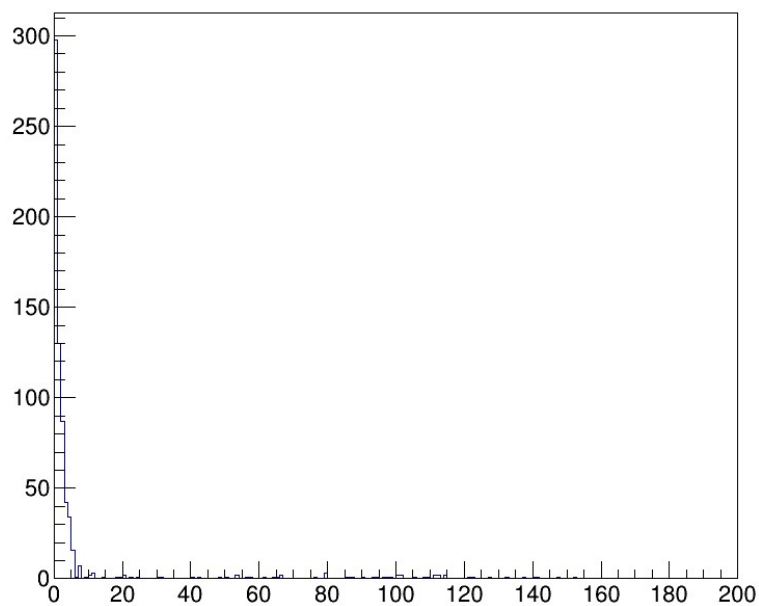


図 6.12 トリガーピクセルからクラスター重心までの距離

エネルギーによるデータ選択

図 6.14 は 1 層目と 2 層目で測定した散乱ガンマ線と反跳電子のエネルギーの合算をした、入射ガンマ線のエネルギースペクトルである。これまでの解析による制限からさらにエネルギーのカットを行う。反跳電子のエネルギーは、入射ガンマ線の散乱角から 255.5keV と推定された。したがって、吸収エネルギーが $255.5 \pm 40\text{keV}$ 以内 (図 6.13) で、総エネルギー ($E = E_1 + E_2$) が $511\text{keV} \pm 40\text{keV}$ 以内のイベントを選択する。 E_1 と E_2 は、それぞれ散乱体と吸収体によって検出されたエネルギーである。 $\pm 40\text{keV}$ という値は、シンチレーション検出器のエネルギー分解能 ($\sigma = 22\text{keV}$) で、 $\pm 40\text{keV} = 2\sigma$ のイベントを選択した。

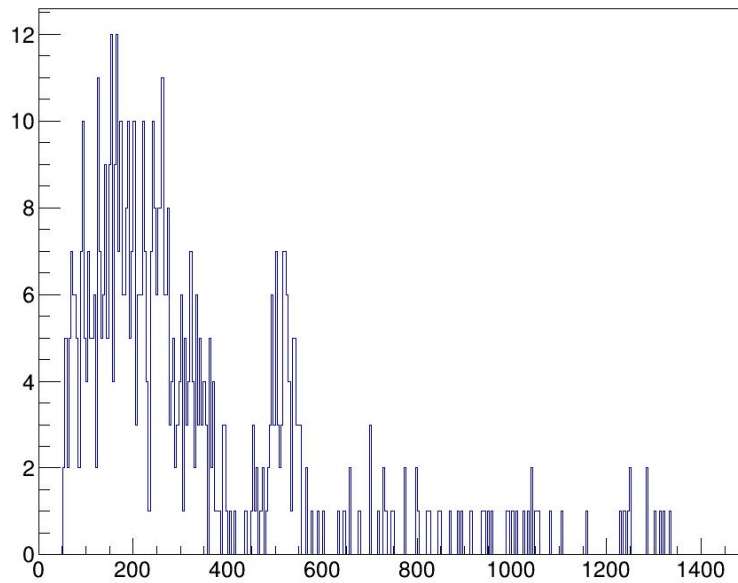


図 6.13 2 層目のエネルギースペクトル

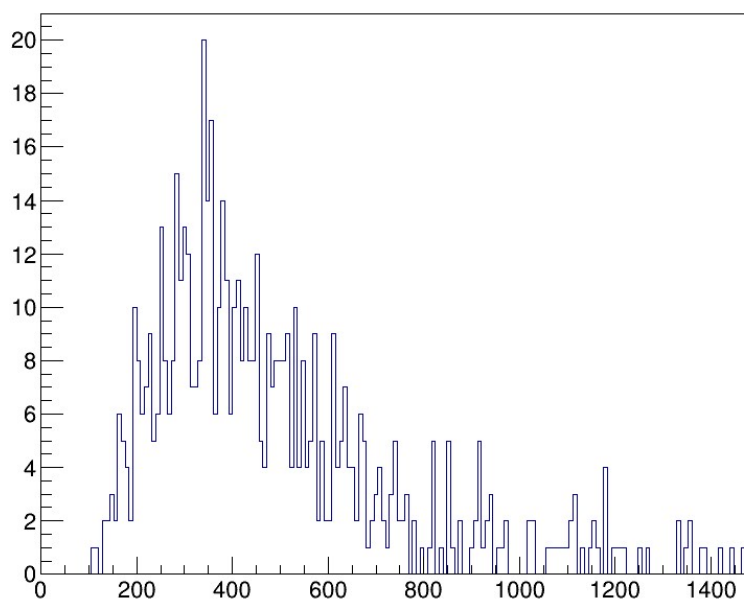


図 6.14 1 層目と 2 層目で測定したエネルギーによる入射ガンマ線のエネルギースペクトル

6.4.3 解析結果と議論

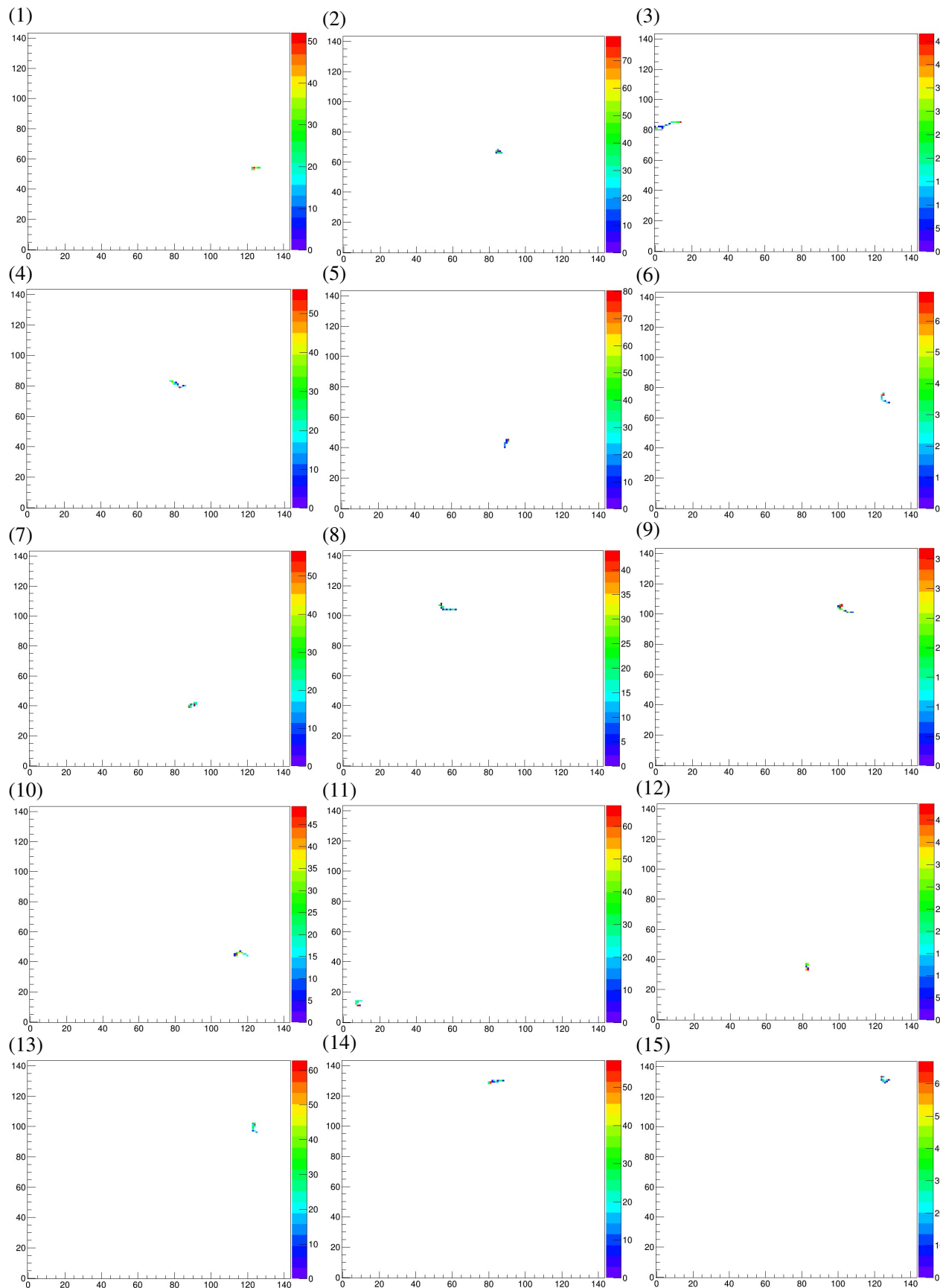


図 6.15 解析によって得られた電子飛跡イメージ (1)~(15)

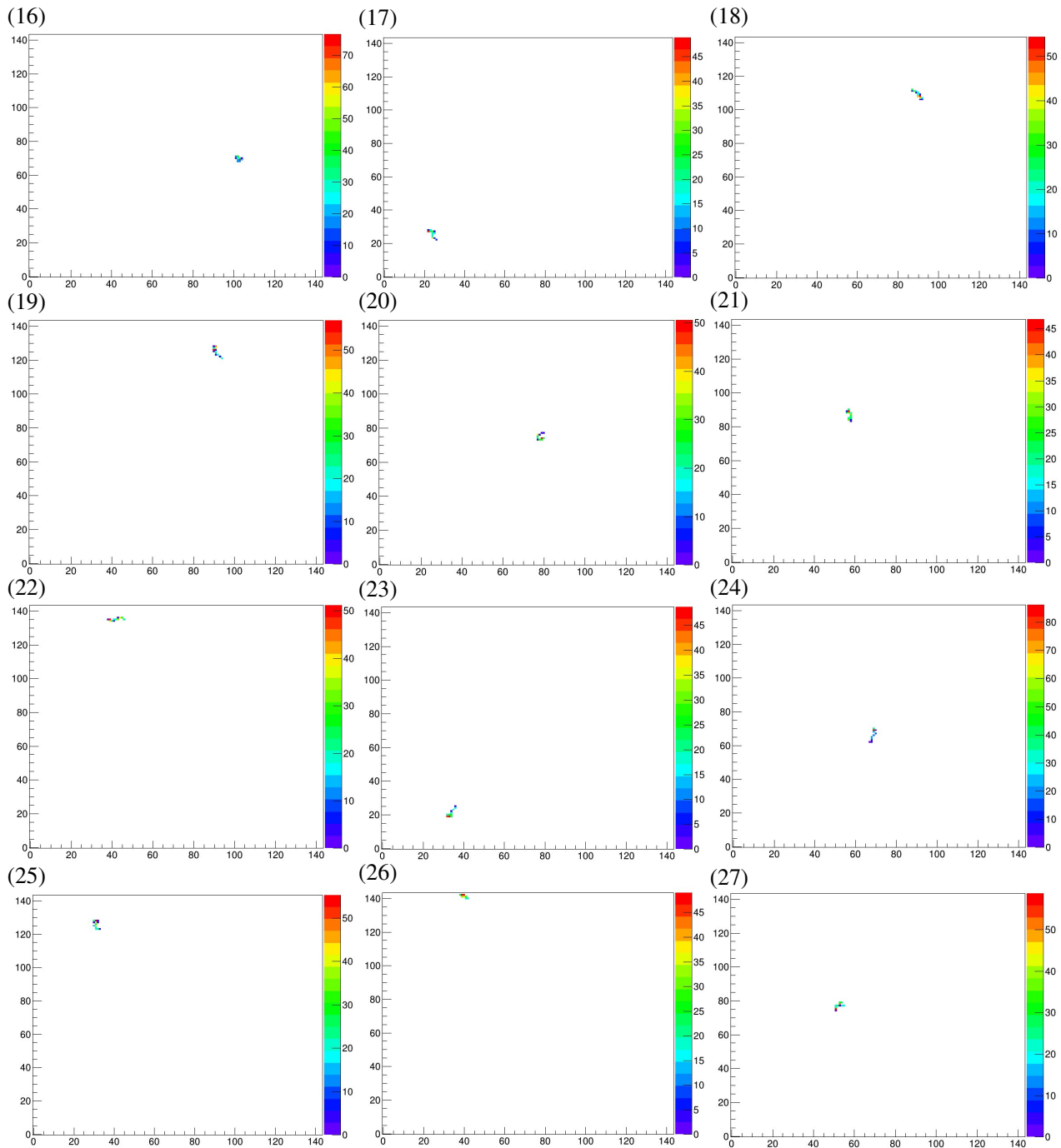


図 6.16 解析によって得られた電子飛跡イメージ (16)~(27)

解析の結果、23 個の飛跡イメージが検出された。結果を図 6.15、6.16 に示す。縦軸と横軸はピクセル数で最大値は 144 である。

解析の結果と理論的なコンプトン散乱イベントの比較を行った。ここで、1 層目から 2 層目で反応するコンプトン散乱イベント数を理論的に算出する。

まず、1 層目のシリコン中で反応するコンプトン散乱イベントを考える。使用線源の放射能 $2.1 \times 10^5 \text{Bq}$ を用いて、セットアップ (図 6.9) 距離 $d=2.23\text{cm}$ 時の、1 層目に入射する単位面積当たりのガンマ線の個数 I_0 は、

$$I_0 = \frac{S}{4\pi d^2} \times \text{放射能} [\text{個/s}] \quad (6.5)$$

となる。1 層目 XRPIX2b の検出面積は $0.43\text{cm} \times 0.43\text{cm}$ である。検出面積 S は入射角度 ϕ からの有効面積を考慮して $S \times \cos\phi$ とする。

放射線量 [Bq] は 1 秒間に 1 つの原子が崩壊して放射線を放つ量なので、[Bq] は [個/s] と変換できる。

I_0 が 1 層目のシリコン中でコンプトン散乱する確率を求める。ある物質の厚み $x[\text{g}/\text{cm}^2] = d \times \rho$ (d : センサー層の厚さ $= 300 \times 10^{-4}\text{cm}$ 、 ρ : シリコンの密度 $= 2.33\text{g}/\text{cm}^3$) と I_0 が 1 層目へ入射した時の吸収の度合いである質量吸収係数 μ を用いる。 I_0 の入射に対し吸収後の反応確率は I 、

$$I = I_0 \times (1 - \exp(-\mu_{\text{comp}} x')) \quad (6.6)$$

と表せる。厚み x' は入射角度 ϕ を考慮して $x' = x / \cos\alpha$ とする。ここで、511keV の時のシリコンと反応するコンプトン散乱の質量吸収係数は $\mu_{\text{comp}} = 8.5910^{-2}[\text{cm}^2/\text{g}][28]$ である。

ここまでで、1 層目までのコンプトン散乱の反応確率が求まったので、1 層目から 2 層目へコンプトン散乱する時の散乱断面積を考える。クライン-仁科の公式 [29] より散乱断面積は

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Zr_0^2}{2} \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(1 + \cos^2\theta + \frac{\alpha^2(1\cos\theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \quad (6.7)$$

と求められる。コンプトン散乱の微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ と、式 6.7 を立体角について積分した全コンプトン断面積 σ_c 、

$$\sigma_c = 2\pi Zr_0^2 \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left(\frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{\log(1 + 2\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{\log(1 + 2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right] \quad (6.8)$$

より、コンプトン散乱する時の散乱確率を求めることができる。さらに 1 層目から 2 層目までの距離による減衰を考慮するために、1 層目から 2 層目までに散乱ガンマ線が到達するまでの立体角を考える。

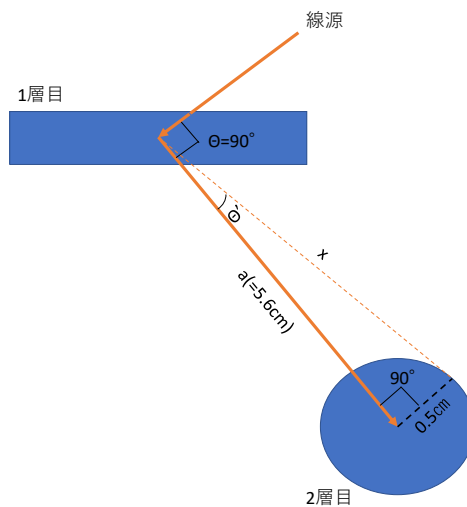


図 6.17 1 層目から 2 層目までの立体角についての概略図

1cm 角シンチレーション検出器を円形と近似して、図 6.17 より

$$\cos\theta' = \frac{a}{x} \quad (6.9)$$

となり、 $\cos\theta'$ が求まる。よって立体角 $d\Omega$ は、

$$d\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta') \quad (6.10)$$

となる。よって、1 層目で反応して 2 層目までにコンプトン散乱し到達する確率 I_{comp} は、

$$I_{comp} = I \times \frac{d\sigma}{\sigma_c} d\Omega \quad (6.11)$$

となる。最後に散乱ガンマ線が 2 層目で光電吸収する反応確率を考える。90° 散乱した時の散乱ガンマ線のエネルギーは 255keV なので、255keV が CsI 結晶中で光電吸収する時の質量吸収係数 $\mu_{ph} = 1.27[\text{cm}^2/\text{g}][28]$ を用いて、式 6.6 と同様に求めると、光電吸収後の反応確率 I_{ph} は、

$$I_{ph} = I_{comp} \times (1 - \exp(-\mu_{ph}x)) \quad (6.12)$$

となる。 $x = d\rho$ であり、 ρ は CsI の密度 ($4.51\text{g}/\text{cm}^3$)、 d は CsI の厚さ (1cm) である。

よって、設定したセットアップ (図 6.9) の場合で、511keV が 90° でコンプトン散乱した時のイベントの確率は 4.73×10^{-4} 個/s となった。実験の測定時間は約 55000s なので、取得したイベントは約 26 個となる。解析で求めた数は 27 個なので、理論値と概ね一致しており、このセットアップによる測定と解析によってイベントを取得できていると考えられる。

飛跡の方向について考える。線源は図 6.18 の矢印方向に入射するようにセットアップされている。ここで、ピクセルの読みだし方向は (RA,CA)=(143,143)、(142,143) と降順にデータの読み出しを行っている。(図 6.19 (左図))。イメージ画像におけるピクセルの配置は左下から右方向へ (RA,CA)=(143,143)、(142,143) となっているため線源入射方向は図 6.19 (右図) の方向になる。よってイメージ画像上では、右側から左側の方向へ飛跡ができると考えられる。

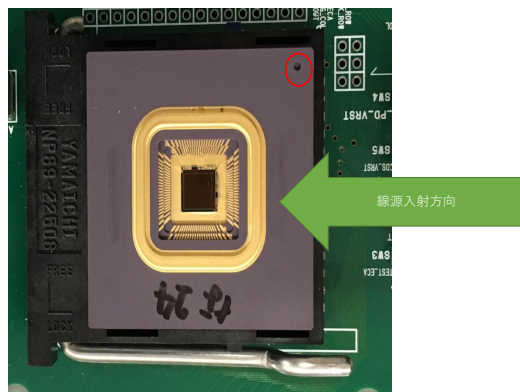


図 6.18 1 層の素子へ線源が入射する方向。赤丸は素子の基準位置とする

飛跡の正確な方向は、アルゴリズムによる解析によって特定する方法が用いられているが [?]、今回はイメージ上のピクセルのエネルギーを用いて想定した。

物質内を進む荷電粒子は、停止する直前にエネルギー損失が最大になり急激にゼロにまで低下する。これをブラックピークと呼ぶ。よってエネルギーが最大のピクセルはブラックピークによるものと仮定すると、そのピク

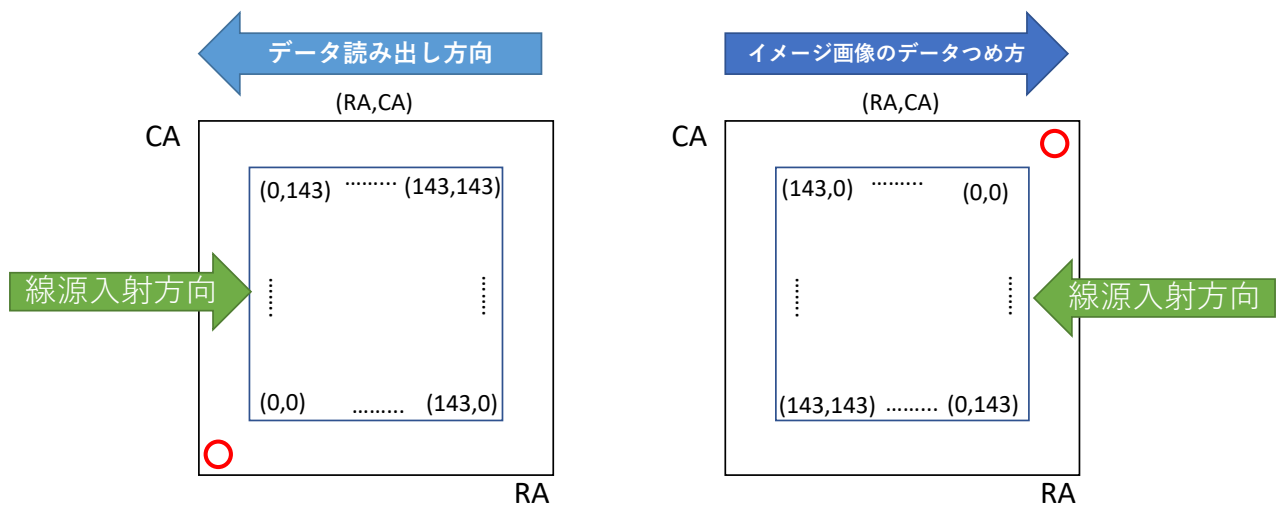


図 6.19 左:データ読み出し方向と線源入射位置の概略 右:イメージ画像におけるデータの詰め方と線源入射位置の概略図

セルが終端だと考えられる。この仮定より、27 イメージ画像中、 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ の範囲の反跳方向の電子飛跡は 16 個目視で確認できた。飛跡の長さに関してはピクセル数 $\times 30\mu m$ として概算するとおおよそ $360\mu m$ となった。セットアップより、1 層目に反跳する飛跡の長さは約 $300\mu m$ であるので実測値と大きな違いはない。図 6.22 に検出した 27 個の飛跡の反跳方向を目視で確認した時の反跳方向の分布を表す。始点の判別が困難なものは 4 個あり図 6.22 には含まない。左側から右側へ反跳しているとみられるものは 0° としている。分布を見ると $90^\circ \sim 180^\circ$ の間の方向で反跳しているものが多いことが分かった。6 割程度の精度でセットアップより予想した方向と一致しており、プロトタイプによる電子飛跡の検出は成功していると期待できる。

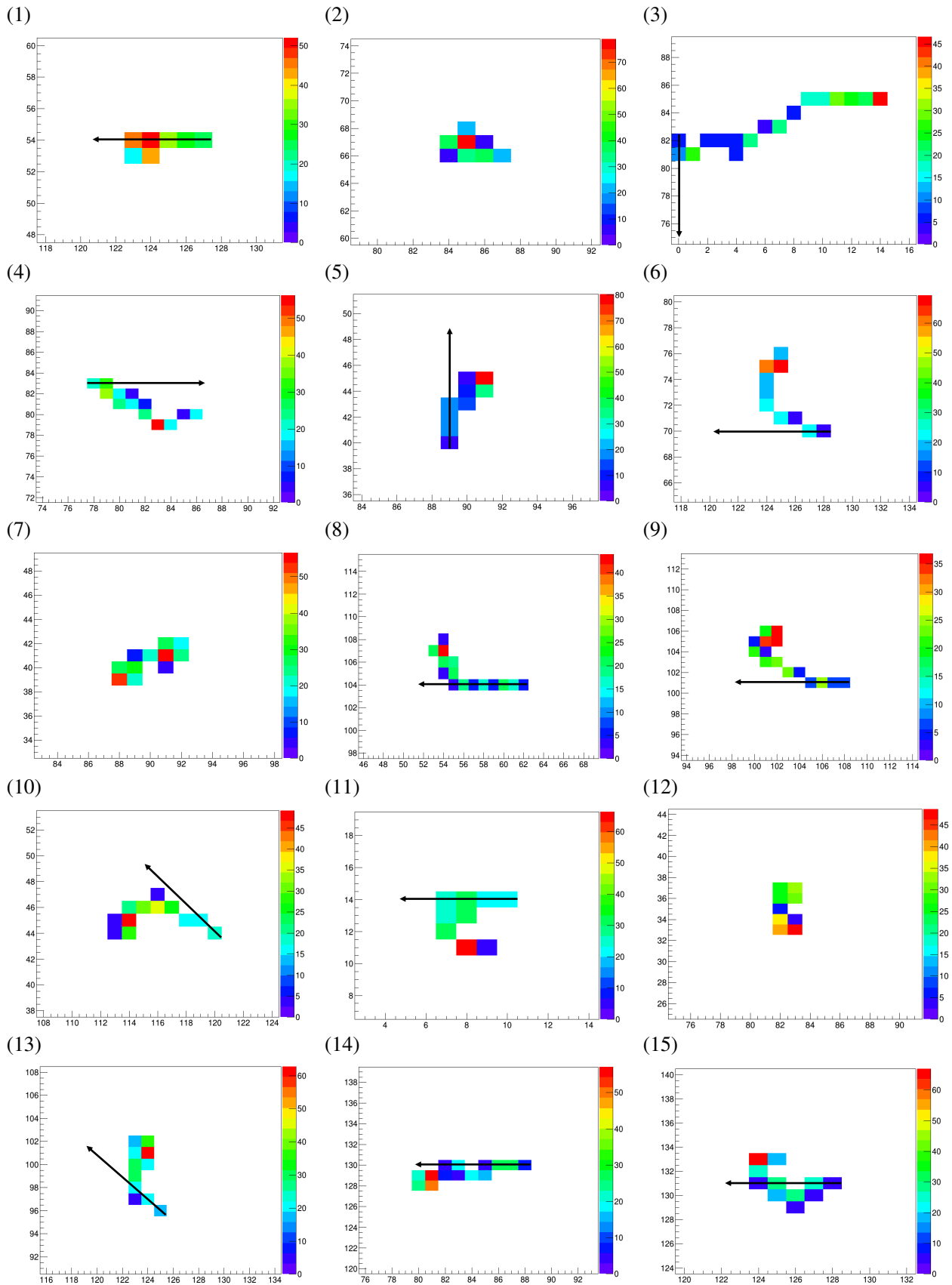


図 6.20 解析によって得られた電子飛跡イメージの拡大図。左上の番号は図 6.15 と図 6.16 に対応する。矢印は目視の角度。 α に対応

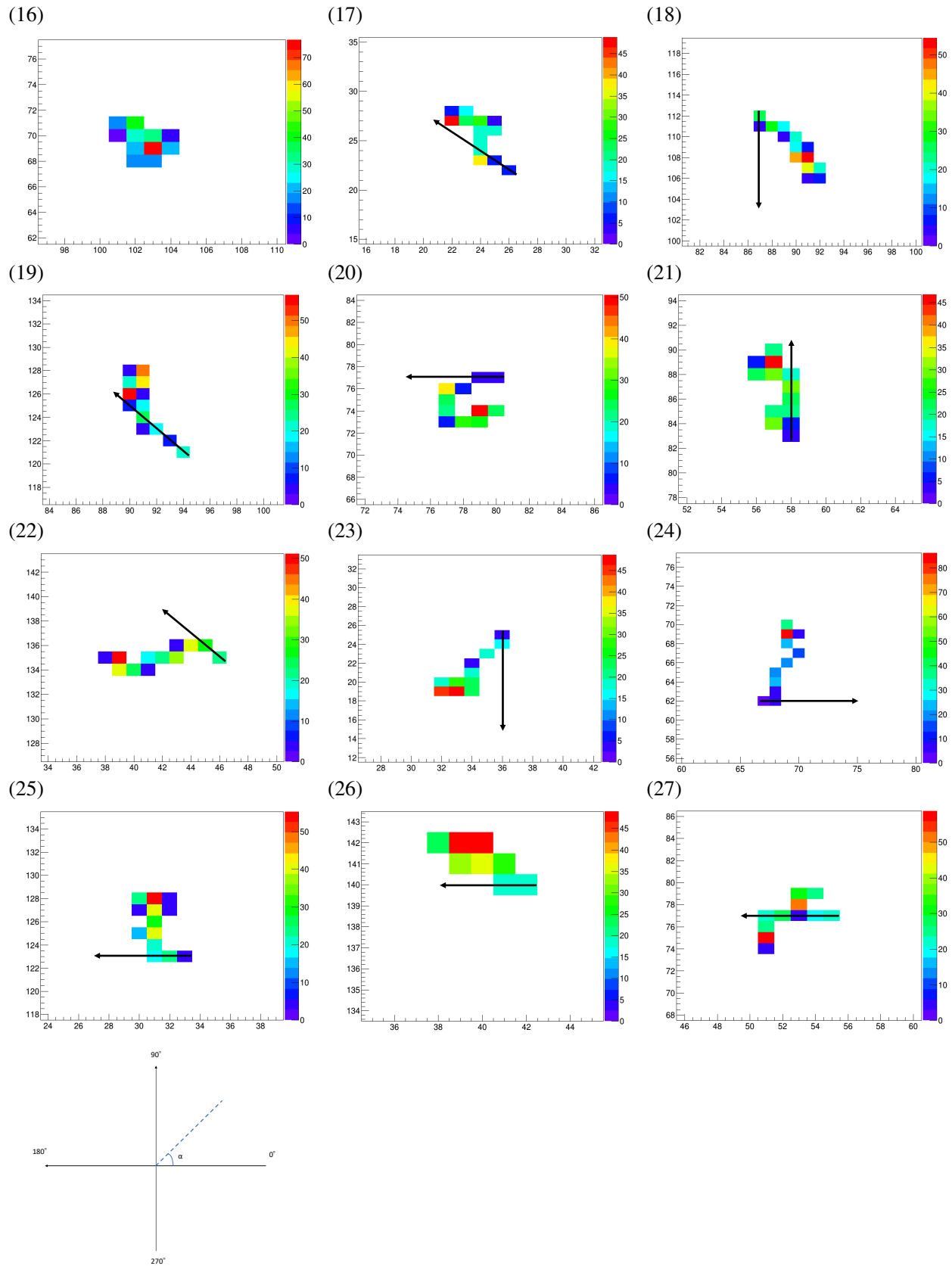


図 6.21 解析によって得られた電子飛跡イメージの拡大図。左上の番号は図 6.15 と図 6.16 に対応する。矢印は目視の角度。 α に対応

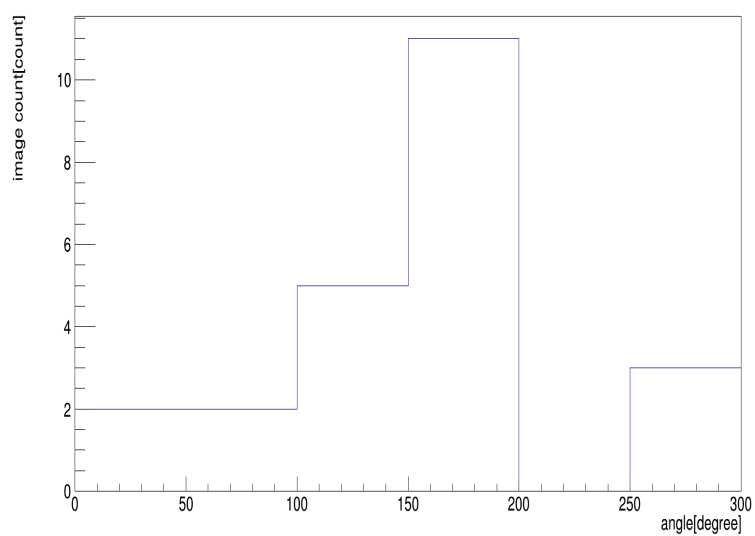


図 6.22 27 個の飛跡の角度を目視で判定した時の角度分布

第 7 章

まとめと今後

数百 keV～数 MeV のエネルギー領域は、元素合成など未解明の問題が多いエネルギー領域となっている。元素合成の過程では特定のエネルギーの輝線を出すことがわかっており、分光観測が適用できると考えられる。そこで、本研究で開発しているのは、MeV 領域で卓越するコンプトン散乱の相互作用を用いた分光精度の良い電子飛跡検出型のコンプトンカメラである。これまでの MeV 領域の観測では、検出器や天体由来のバックグラウンドが多く検出感度が低かった。電子飛跡検出型のコンプトンカメラでは低バックグラウンドが可能となり、さらに反跳電子の飛跡を精度良くとらえることで、イメージングの精度を上げることができる。本研究で開発する電子飛跡検出型コンプトンカメラは、1 層目に読み出し回路と検出部を一体化させた SOI 半導体検出器を用いる。SOI 半導体検出器に用いる素子は京都大学と KEK で開発された XRPIX2b を用いた。

私が行ったこととしては主に、①XRPIX2b の性能評価、②1 層目のデータ読み出し方法の改良、③電子飛跡のための測定試験と解析の 3 つを行った。まず 1 層目に使用する XRPIX2b の性能評価を行った。XRPIX2b のセンサー層 $300\mu\text{m}$ が完全空乏化する時のバックバイアス電圧値を調べた。 ^{241}Am のラインガンマ線 13.9keV のフォトカウント数を用いた実験では、約 50V でカウントが一定になり完全空乏化したことを確認した。これは理論値とも一致している。 -60°C 、 80V の時の ^{241}Am のエネルギー分解能は $13.9\text{keV}@8.9\%$ 、 $17.7\text{keV}@9.5\%$ 、 $20.8\text{keV}@8.6\%$ となった。

電子飛跡検出型コンプトンカメラでは、1 層目と 2 層目で異なる情報をもつデータを 1 つのイベントとして認識させるための同期が重要である。同期については本研究の共同研究者によって開発された同期システムを用いた。また、データの読み出しに関しては、コンプトン散乱で生じる反跳電子の飛跡による複数のピクセルのヒットのための、全ピクセルの読み出しに変更した。(②) 実際に同期システムと改良した読み出し方法を用いて ^{22}Na による 511keV の測定を行った。結果、理論計算で求められるコンプトン散乱イベント数と、解析によって出されたイベント数の数は概ね一致した。よって設定したセットアップと解析によってコンプトン散乱イベントが取得できていると考えられる。さらに飛跡の方向をブラックピークによって確認した。ブラックピークによってエネルギーが大きくなっているピクセルを終端方向だと仮定すると、セットアップによる線源の入射方とブラックピークにより仮定した方向を照らし合わせて飛跡方向がだいたい一致しているイベントは解析で求めた全イベントの 6 割程度であることを確認した。(③)

今後は、飛跡の方向や、長さ、エネルギーを解析で求める必要がある。飛跡の形が複雑である場合の解析も求められる。また、本研究では 1 層目での飛跡の検出システムと同期システムまでを改良、開発したがガンマ線到来方向のイメージングまでには至っていない。現在はシミュレーションによる検出器の検証を行う段階である。今後は電子飛跡検出型コンプトンカメラとしてのイメージングに取り組んでいく。

謝辞

本論文の作成にあたり、指導教員の片桐秀明准教授、吉田龍生教授並びに共同研究者の仙台高専助教授の加賀谷さん、茨城大学 M1 加藤さんにはたくさんのご指導、ご支援を頂き感謝申し上げます。片桐先生には、研究の進め方や理論的な考察など様々にご指導頂きました。吉田先生には打ち合わせで助言を頂いたり、宇宙や物理に関する理論をご教授頂きました。加賀谷さんには入学する前から実験の仕方やプログラムの使い方などを教えて頂き、本研究においても困ったことがあったときは度々助けて頂きました。加藤さんにはハードウェアの面で援助して頂きとてもお世話になりました。

Open It の内田様、KEK の新井様、三好様には、本研究の開発の立ち上げにおいて助力頂いたこと感謝申し上げます。KEK では実験施設の援助やボードの提供、助言などを頂き大変お世話になりました。宮崎大学の武田様、京都大学の鶴様、学生の林さん、原田さんには、ボードやチップの初期の立ち上げ方法や使いかたについて快く教えて頂き大変お世話になりました。度々のチップの提供についてもありがとうございました。

同研究室、同期の友人には、修士から入学してきた私を温かくメンバーに迎え入れて頂いたこと心から感謝申し上げます。皆さんのおかげで、研究に追われる忙しい日々の中でも、楽しい2年間を過ごすことができました。最後に、大学院まで進学することを快諾し、支援してくれた家族に感謝します。

研究のことから大学院での日々のことまで様々な方々に支えられて本論文を作成することができました。本当にありがとうございました。

引用文献

- [1] Ballmoos, P. 1995 *Experimental Astronomy* 6 85.
- [2] Boggs, S. E. et al. 2000 *ApJ* 544 320.
- [3] Briggs, M. S. et al. 1999 *ApJ* 524 82.
- [4] Churazov, E. et al. 2014 *Nature volume 512, pages 406–408*.
- [5] Collmar, W. et al. 1999 “Proc. of the 5th Compton Symposium,” *AIP Conf. Proc.* 510.
- [6] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/epo/news/catalog.html>, GODDART SPACE FLIGHT CENTER COMPTEL Gamma-Ray Source Catalog.
- [7] Evans, R. D. 1982 “The Atomic Nucleus,” Krieger, New York.
- [8] Jean, P. et al. 2006 “Spectral analysis of the Galactic e+e- annihilation emission,” *Astronomy and Astrophysics* 445, 579.
- [9] Knodlseder, J. et al. 2005 “The all-sky distribution of 511 keV electron-positron annihilation emission,” *Astronomy and Astrophysics arXiv:astroph/0506026*.
- [10] Knoll, G. F. 2013 『放射線計測ハンドブック（第4版）』, 株式会社オーム社.
- [11] Ochi, A. et al. 2001 *NIM* 264 A471.
- [12] Paciesas, W. S. et al. 1999 *ApJS* 122 465.
- [13] Razavi, B. 2003 『アナログ CMOS 集積回路の設計』, 丸善株式会社.
- [14] Schonfelder, V. et al. 1993 *ApJS*, 86, 657.
- [15] ——— 2000 *Astron. Astrophys. Suppl Series, submitted for publication.* 143 145.
- [16] ——— 2001 “The Universe in Gamma Rays,” *Springer*.
- [17] Shockley, W. 1938 *ApJS*, 9, 635.
- [18] Siebert, T. et al. 2016 “Search for 511 keV emission in satellite galaxies of the Milky Way with INTEGRAL/SPI,” *Astronomy and Astrophysics* 595, A25.
- [19] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn_model.html, C.M.Urry, P.Padovani.
- [20] White, N. 2004 *Nature* VOL428.
- [21]
- [22] Yoneda, H. et al. 2017 “Development of Si-CMOS hybrid detectors towards electron tracking based Compton imaging in semiconductor detectors,” *NuclearInst.and Methodsin Physics Research,A:Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 912, 269 - 273.
- [23] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 2008 『宇宙の観測 III 高エネルギー天文学』, 日本評論社.
- [24] 加賀谷美佳 2015 「Development of a Scintillator-Based Gamma-Ray Imaging Compton Camera γ I」, 博士論文, 茨城大学大学院.
- [25] 岩城智 2009 「MeV ガンマ線コンプトンカメラ用シンチレーションカメラ読み出しシステムの開発」, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科.

- [26] 松村英晃 2015 「宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における電荷収集効率の改善」, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科.
- [27] 武田彩輝 他 2012 「XRPIX2b Technical Description」, 第三回 XRPIX 講習会.
- [28] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, NIST XCOM.
- [29] 矢澤友貴孝 2016 「コンプトン散乱とクライン-仁科の公式」, 学位論文 東京工業大学 理学部.