

# 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出しシステムの 開発

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理第二教室 宇宙線研究室  
岩城智

[iwaki@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:iwaki@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

平成 21 年 1 月 30 日

## 概要

我々は、天体観測用に、コンプトン散乱を利用した MeV ガンマ線コンプトンカメラの開発を行っている。この検出器はコンプトン散乱体であるガス検出器 (Time Projection Chamber、TPC) と吸収体であるシンチレーションカメラから構成されており、反跳電子のエネルギーと三次元飛跡をガス TPC で、散乱ガンマ線の吸収位置とエネルギーをシンチレーションカメラで測定する。従来は取得できなかった反跳電子の三次元飛跡情報を取得することで高いバックグラウンド除去能力をもち、高感度、広視野を実現している。我々は、この検出器を衛星に搭載し、sub-MeV ~ MeV ガンマ線領域の全天探査を行うことを目標にしているが、現在はその前段階として、気球実験を行っている。2006 年には  $10 \times 10 \times 15\text{cm}^3$  の TPC と、 $6 \times 6 \times 13\text{mm}^3$  GSO(Ce) 結晶シンチレータの  $8 \times 8$  pixel アレイとマルチアノード光電子増倍管 (PMT) を用いたシンチレーションカメラ 33 台からなるプロトタイプ検出器を用いた第一回気球実験 (SMILE-) を行い、宇宙背景ガンマ線と大気ガンマ線の観測に成功した。現在は第二回気球実験 (SMILE-) に向け、検出器の高感度化と撮像性能の改善などに取り組んでいる。

現在我々はガンマ線検出感度を上げるために、検出器の大型化を進めており SMILE- ではガス TPC のサイズをプロトタイプの 30 倍以上の  $40 \times 40 \times 30\text{cm}^3$  に、PMT の数も 5~6 倍の 150 台以上に増やす計画である。ここで、消費電力が気球実験での大きな問題となる。

SMILE- では、特にシンチレーションカメラの読み出しに全体の 30 %近い 70W もの大きな電力を消費していた。もし現在の読み出しシステムのまま大型化させてしまうと、それだけで気球全体の電力を使い切ってしまう。そこで今回、より省電力なシンチレーションカメラ読み出しシステムの開発を行った。当初は既製の ASIC を利用した方法を考えていたが、入力ダイナミックレンジの問題などからこれをやめ、省電力でディスクリートな回路からなる新しい PMT 読み出しモジュールの開発を行った。さらに抵抗チェーンを組み合わせることで、1 PMT あたりの読み出しにかかる消費電力を従来の 25 分の 1 以下にまで抑えることができた。この読み出しシステムでは、エネルギー分解能は従来と同等の 11 % @ 662keV (FWHM)、ダイナミックレンジは従来より広い 80keV ~ 1300keV を実現している。

またガス TPC の読み出しに関しても、読み出しチャンネル数が 2000 以上と膨大になるために、読み出しにかかる電力を減らすことが必要となる。現在、前置増幅器と波形整形増幅器、コンパレータなどを実装した CMOS プロセスの ASIC (FE2007) があり、1ch あたりの読み出し消費電力は 30mW/ch となっているが、省電力化のためにこのチップをもとに新たに設計を行った。SPICE シミュレータを用いてシミュレーションを行い、チップに改良を加えた結果、回路の電源電圧を下げることにコンパレータのデジタル出力部に変更を加えることで従来の半分近い 16mW/ch まで消費電力を抑えられることがわかった。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>MeV ガンマ線天文学</b>	<b>7</b>
1.1	宇宙の高エネルギー現象と MeV ガンマ線	7
1.2	ガンマ線全天観測	9
1.2.1	ガンマ線放射点源全天マップ	9
1.2.2	銀河面全体に広がるガンマ線放射	9
1.2.3	銀河系外からの一様に広がったガンマ線放射	12
1.3	各天体からの MeV ガンマ線	13
1.3.1	超新星残骸	13
1.3.2	パルサー	14
1.3.3	恒星質量ブラックホール	18
1.3.4	宇宙初期に形成されたブラックホール	20
1.3.5	銀河中心	20
1.3.6	活動銀河核	21
1.3.7	太陽フレア	22
1.3.8	ガンマ線バースト	22
<b>第2章</b>	<b>MeV 線イメージング</b>	<b>25</b>
2.1	ガンマ線と物質の相互作用	25
2.1.1	光電効果 (光電吸収)	25
2.1.2	コンプトン散乱	26
2.1.3	電子陽電子対生成	27
2.2	MeV ガンマ線イメージングの原理	28
2.2.1	コリメータを使ったイメージング	28
2.2.2	コーデッドマスク法	29
2.2.3	線レンズ	29
2.2.4	コンプトン-イメージング法	31
2.3	COMPTEL	34
2.4	感度比較	37
<b>第3章</b>	<b>我々の検出器</b>	<b>41</b>
3.1	散乱体	41
3.1.1	$\mu$ -PIC	41
3.1.2	GEM (Gas Electron Multiplier)	43
3.1.3	$\mu$ -TPC(micro-Time Projection Chamber)	44
3.2	吸収体	44
3.2.1	シンチレータ	46
3.2.2	気体シンチレータ	46

3.2.3	有機シンチレータ	46
3.2.4	無機シンチレータ	46
3.2.5	光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube、PMT)	47
3.3	気球実験	48
3.3.1	基本性能 (気球仕様の検出器)	48
3.3.2	フライト	49
3.3.3	大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線	51
3.3.4	SMILE- にむけて	52
<b>第 4 章</b>	<b>シンチレーションカメラとその読み出し</b>	<b>55</b>
4.1	シンチレータアレイ	55
4.2	マルチアノード PMT	55
4.3	抵抗チェーン	56
4.4	シンチレーションカメラのデータ収集系 (Data Acquisition System、DAQ)	59
4.5	30cm 角シンチレーションカメラアレイ	61
4.6	ASIC を用いた PMT 読み出しシステム	62
4.7	SMILE- におけるシンチレーションカメラへの要請	64
<b>第 5 章</b>	<b>ASIC を用いない、低消費電力なシンチレーションカメラ読み出しシステムの開発</b>	<b>66</b>
5.1	CP80190 の概要	66
5.1.1	回路図	67
5.1.2	帰還容量の選択	67
5.2	テストパルスを用いた基礎性能の測定	68
5.2.1	線形性	68
5.2.2	一様性	71
5.2.3	クロストーク	71
5.3	シングルアノード PMT を用いたヘッドアンプユニットの評価	72
5.4	CP80190 を用いたシンチレーションカメラの読み出し	75
5.4.1	解析法	75
5.4.2	性能評価	76
5.5	CP80190 と抵抗チェーンを用いた読み出し	78
5.5.1	性能評価	78
<b>第 6 章</b>	<b>フロントエンド ASIC の開発</b>	<b>82</b>
6.1	FE2007	82
6.2	FE2007 の低消費電力化	82
6.2.1	電源電圧の変更	84
6.2.2	デジタル出力の変更	85
6.3	まとめ	85
<b>第 7 章</b>	<b>まとめと今後</b>	<b>88</b>
7.1	省電力なシンチレーションカメラ読み出しシステムの開発	88
7.2	CMOS ASIC の開発	88

# 目 次

1.1	様々な波長の電磁波の大気による吸収 [2]	8
1.2	EGRET によるマップ [24]	9
1.3	上から 1~3MeV、3~10MeV、10~30MeV の energy band での COMPTEL による全天マップ [5]	10
1.4	COMPTEL による 1~30MeV の銀河面イメージ [7]	10
1.5	COMPTEL による 1.8MeV の全天観測 [10]	11
1.6	EGRET による全天イメージ ( $\geq 100\text{GeV}$ ) [8]	11
1.7	銀河面に広がったガンマ線のスペクトル [3]	11
1.8	extragalactic diffuse gamma のスペクトル [9]	12
1.9	SN1987A の光度曲線 (赤外~紫外線) [12]	14
1.10	パルサー概念図 [1]	15
1.11	様々なガンマ線パルサーの多波長スペクトル [13]	16
1.12	Crab パルサーのエネルギー毎のパルスプロファイル [14]	17
1.13	かに星雲のスペクトル (実線:シンクロトロン放射モデル・破線:逆コンプトン散乱モデル) [15]	18
1.14	Cyg X-1 の時間変動 [16]	19
1.15	Cyg X-1 の Soft state 及び Hard state のスペクトル [16]	19
1.16	Hard(Low) State の放射モデル [16]	19
1.17	Soft(High) State の放射モデル [16]	19
1.18	OSSE による銀河中心のスペクトル [22]	21
1.19	OSSE による 511keV の map [22]	21
1.20	AGN 概念図 [28]	21
1.21	電波銀河 Cen A の多波長スペクトル [17]	22
1.22	Blazar Mkn501 の多波長スペクトル [18]	22
1.23	BATSE・COMPTEL により観測された GRB の光度曲線 [23]	23
1.24	GRO 衛星によるガンマ線バースト GRB990123 のスペクトル [23]	24
1.25	BATSE により観測された GRB の分布 [25]	24
2.1	ガンマ線と物質との各相互作用	25
2.2	光とアルゴンの相互作用断面積	25
2.3	コンプトン散乱	26
2.4	コリメータを用いたガンマ線検出・撮像	29
2.5	coded mask imaging	30
2.6	線レンズ (CLAIRE)	30
2.7	Classical Compton 法の概念図	32
2.8	Multiple Compton 法の概念図	33
2.9	Electron tracking Compton 法の概念図	34

2.10	MEGA 検出器の概念図 [65]	34
2.11	COMPTEL 概観 [6]	34
2.12	CGRO/COMTEL のバックグラウンド	38
2.13	CGRO/COMTEL のバックグラウンドの内訳	39
2.14	X・ $\gamma$ 線領域の各検出器の連続成分検出感度	40
3.1	MeV ガンマ線カメラ概念図	41
3.2	$\mu$ -PIC の構造	42
3.3	10cm 角 $\mu$ -PIC の写真	43
3.4	GEM	44
3.5	GEM 中の電気力線と電場の様子	44
3.6	$\mu$ -TPC の写真	45
3.7	$\mu$ -TPC で得られる飛跡の例	45
3.8	光電子増倍管の概念図	47
3.9	SMILE 実験用の SMILE 実験用の検出器の写真	48
3.10	SMILE- 用検出器で取得したスペクトルとイメージ [78]	49
3.11	エネルギーを区切ったときの再構成図 [78]	49
3.12	エネルギー分解能とエネルギーの関係	50
3.13	ARM および SPD とエネルギーの関係	50
3.14	放球の準備と放球	50
3.15	気球の経路とシンチレータのトリガーレート	51
3.16	成長曲線の best fit	52
3.17	ガンマ線エネルギースペクトル	53
3.18	SMILE- の消費電力	54
4.1	GSO(Ce) 結晶シンチレータアレイ	55
4.2	LaBr <sub>3</sub> 結晶シンチレータアレイ	55
4.3	PMT H8500	56
4.4	抵抗チェーン	57
4.5	抵抗チェーンによるイメージ	57
4.6	三連結抵抗チェーン	58
4.7	シンチレーションカメラの DAQ	59
4.8	4ch プリアンプ	60
4.9	30cm 角シンチレーションカメラ	61
4.10	シンチレーションカメラ再構成図	63
4.11	CP80168 の外観と内部	63
4.12	CP80168 の DAQ	63
4.13	CP80168 で読み出した再構成図とスペクトル	65
5.1	CP80190	66
5.2	CP80190 の回路図	67
5.3	テストパルス入力回路	68
5.4	前置増幅器の出力波形	68
5.5	波形整形増幅器の出力波形	68
5.6	CP80190 のテストパルスに対する線形性	69

5.7	CP80190 の Gain Uniformity	71
5.8	CP80190 のクロストーク	72
5.9	10 × 10 × 30mm <sup>3</sup> GSO 結晶	73
5.10	R6231 を用いて取得した各線源のスペクトル	73
5.11	線のエネルギーと ADC との線形性	74
5.12	R6231 によるエネルギーと分解能	74
5.13	シンチレーションカメラをマウントした CP80190	75
5.14	H8500 による Cs のスペクトルなど	76
5.15	CP80190 用いて取得したスペクトル	77
5.16	H8500 によるエネルギーと分解能	79
5.17	抵抗チェーンとヘッドアンプユニットを組み合わせた読み出しシステムの概念図	79
5.18	H8500 + 抵抗チェーンによる Cs のスペクトルなど	80
5.19	抵抗チェーンと CP80190 を用いて取得したスペクトル	80
5.20	H8500 と抵抗チェーンを用いたエネルギーと分解能	81
6.1	FE2007 の回路図	82
6.2	FE2007 を実装した $\mu$ -PIC 読み出しボード	83
6.3	アナログシミュレーション回路図	84
6.4	アナログシミュレーション波形	85
6.5	アナログ波形のリニアリティ	86
6.6	デジタル出力テスト回路	86
6.7	デジタル出力波形	87
6.8	設計した ASIC のレイアウト	87

# 表 目 次

1.1	MeV 領域における主な核ガンマ線 [11]	13
1.2	ガンマ線パルサー [4]	14
1.3	太陽フレアに伴う核ガンマ線 [21]	22
2.1	COMPTEL の性能 [6],[29]	34
2.2	COMPTEL により検出された天体 [4]	35
3.1	GEM の種類	43
3.2	SMILE 実験の構成	48
4.1	プリアンプの諸性能	59
4.2	波形整形増幅器の諸性能	60
4.3	Peak Hold ADC の諸性能	60
4.4	30cm シンチレーションカメラアレイの諸性能	61
4.5	CP80168 の諸性能	62
4.6	CP80057 の諸性能	62
4.7	30cm シンチレーションカメラアレイの諸性能	64
4.8	気球実験におけるシンチレーションカメラへの要請	65
5.1	CP80190 の諸性能	67
6.1	FE2007 の諸性能	83

# 第1章 MeVガンマ線天文学

## 1.1 宇宙の高エネルギー現象と MeV ガンマ線

夜空に瞬く星々を地上から可視光で観測するのがかつての天文学であった。しかし、現在では電波・赤外線・X線と様々な波長の電磁波が観測され、さらに陽子を主とする宇宙線やニュートリノといった電磁波以外のものも観測されている。これら新しい“窓”により、宇宙について様々な情報が得られている。

このような“窓”の1つとしてガンマ線がある。1950年代初めに早川らにより、宇宙線と星間物質との相互作用により生成される $\pi^0$ 中間子が崩壊する際に放出する微弱なガンマ線の放射が预言された後、1967年にOSO-3( $\geq 50\text{MeV}$ )、1972年にSAS-2( $20\text{MeV} \sim 1\text{GeV}$ )、1975年にCOS-B( $2\text{keV} \sim 5\text{GeV}$ )と、線観測衛星が次々に打ち上げられ、多くの線天体が発見された。さらにその後、地球大気の外においては、1989年にはロシア・フランスのGranat衛星が、1991年にはアメリカのGRO衛星が打ち上げられ様々な観測結果を残し、地上においてはWhipple・CANGAROOなどのCherenkov望遠鏡により、 $\sim 10^{13}\text{eV}$ というようなエネルギーのガンマ線が観測されている。

しかし、ひとくちにガンマ線といっても、一般的に数百keVから上のエネルギーを持つ電磁波の事をまとめてガンマ線と呼んでおり、どのエネルギー帯域のガンマ線を観測するかにより得られる情報は異なる。MeV領域のガンマ線では、元素合成の現場や宇宙線と星間物質との相互作用といったような情報が得られる。

但し、この領域のガンマ線は天体から大気の外までは吸収をほとんど受けずに到達できるが、図1.1で示されるように地球大気を通過することはできない。このため、観測するには大気の外へ出る必要がある。また、X線や可視光に比べ光子数は少なく、逆に透過力が強い上、銀河面全体に広がったガンマ線放射や宇宙線と衛星本体との相互作用などによるバックグラウンドが存在するために観測が非常に困難な領域でもある。

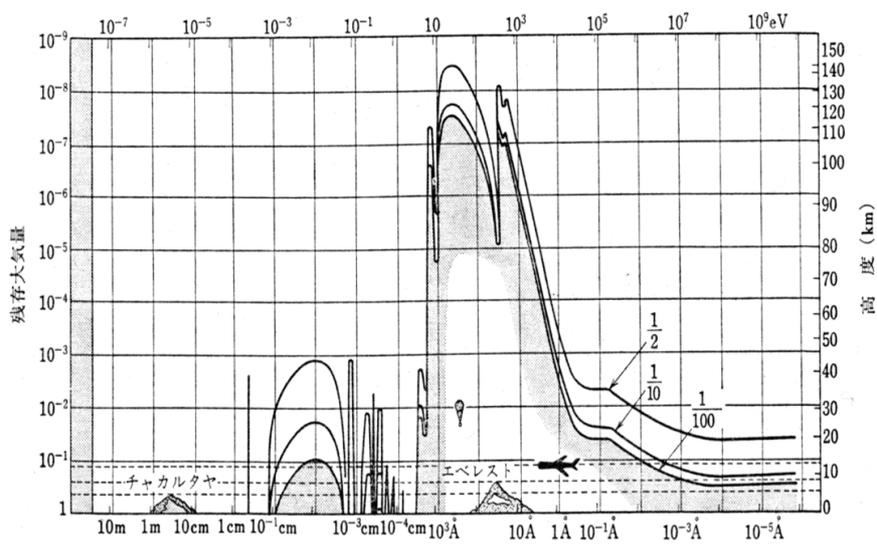


図 1.1: 様々な波長の電磁波の大気による吸収 [2]

## 1.2 ガンマ線全天観測

### 1.2.1 ガンマ線放射点源全天マップ

GRO 衛星によって観測されたガンマ線放射天体は、COMPTEL により約 30 個 [4]、EGRET では約 270 個 [24] 存在する。EGRET により観測された点源の分布を図 1.2 に、COMPTEL により観測された点源の分布を図??に示す。これらから示されるように、ガンマ線を放射する天体には、コンパクト星や AGN といったものだけでなく、太陽のような身近なものも含まれていることが分かる。さらに、図 1.2 に示されるように、他波長では観測されていない未同定天体が数多くあり、EGRET による観測では 170 個にも及ぶ。

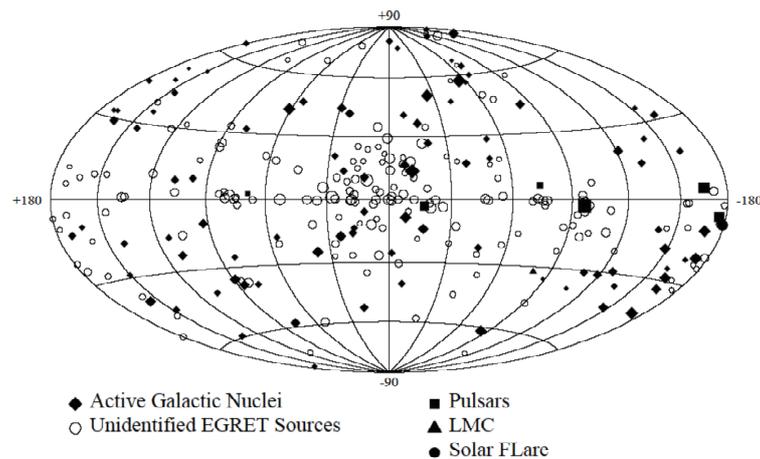


図 1.2: EGRET によるマップ [24]

### 1.2.2 銀河面全体に広がるガンマ線放射

ガンマ線を放射する点源が多数観測される一方で、銀河面全体からのガンマ線放射も観測されている。COMPTEL や EGRET により、図 1.4・図 1.5 や図 1.6 のようなイメージが得られており、銀河面に広くガンマ線の放射が存在する。

この広く分布したガンマ線放射のスペクトルを図 1.7 に示す。sub MeV ~ MeV の領域においては、電子による制動放射と逆コンプトン散乱により、その放射が成り立つとされ、そのスペクトルが良く説明されている。

また、銀河面に広がる放射は連続的なスペクトルを持つものだけではなく、図 1.5 のように 1.8MeV のガンマ線が広く分布していることが観測された。これは、超新星爆発の際に元素合成により生じた  $^{26}\text{Al}$  (半減期 ~  $10^6$  年) によるものと考えられている。この 1.8MeV の強い領域の中には Cygnus のような星生成の活発な領域も含まれており、超新星爆発と星生成との関係を知る手がかりの一つとされている。

一方で、銀河面全体に広がりを持つガンマ線放射は、銀河面に近い天体の MeV 領域のガンマ線観測においてはバックグラウンドとなってしまふ。

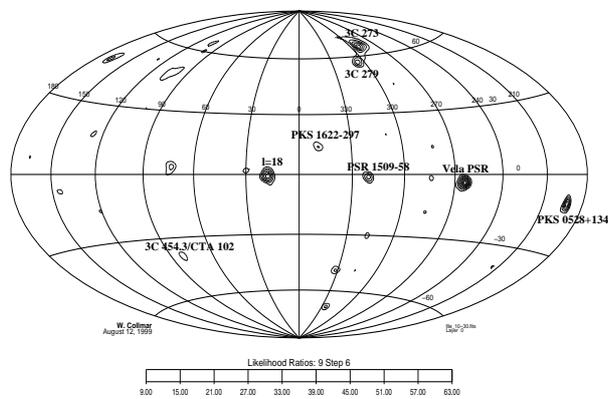
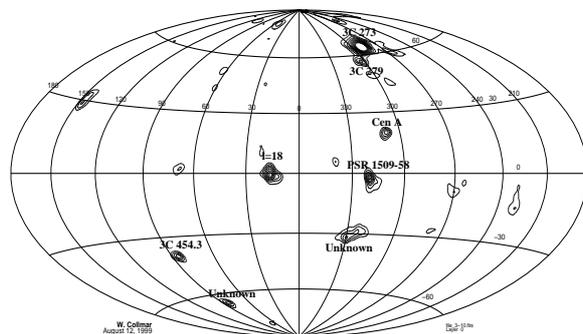
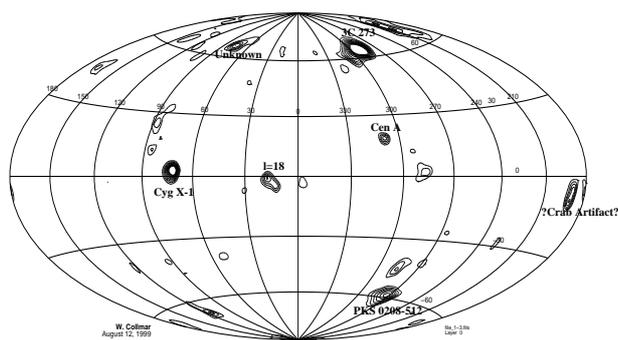


図 1.3: 上から 1~3MeV、3~10MeV、10~30MeV の energy band での COMPTEL による全天マップ [5]

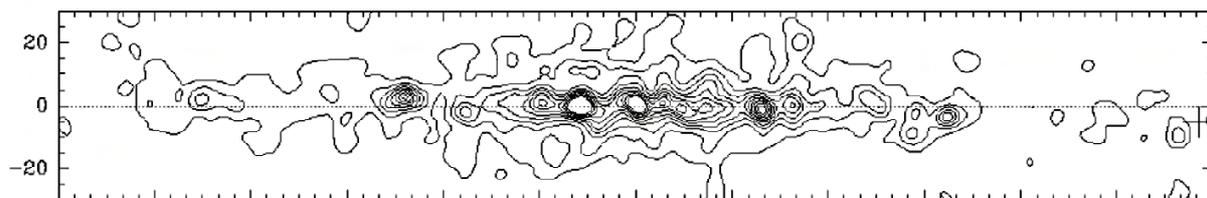


図 1.4: COMPTEL による 1~30MeV の銀河面イメージ [7]

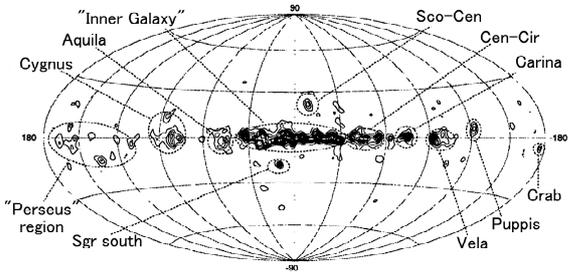


図 1.5: COMPTEL による 1.8MeV の全天観測 [10]

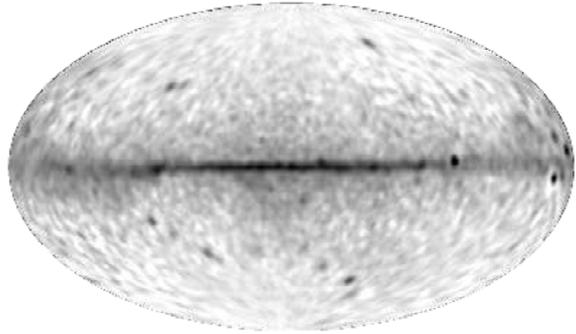


図 1.6: EGRET による全天イメージ ( $\geq 100\text{GeV}$ )[8]

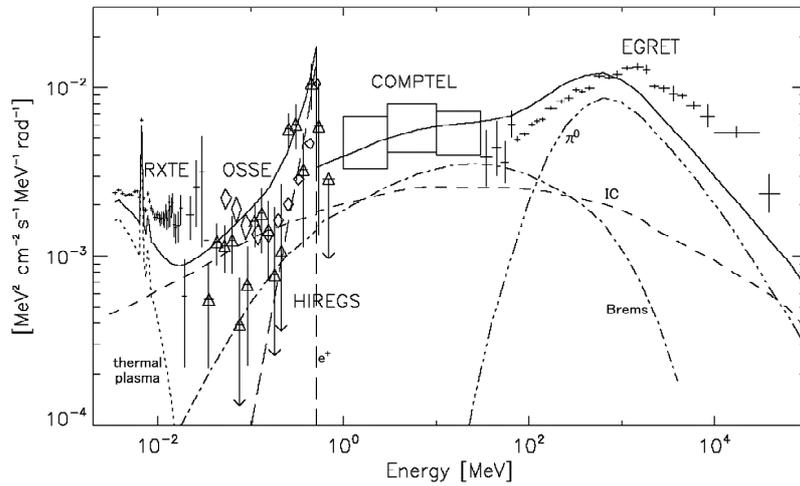


図 1.7: 銀河面に広がったガンマ線のスペクトル [3]

### 1.2.3 銀河系外からの一様に広がったガンマ線放射

ガンマ線は銀河系内だけでなく、銀河系外からも到来する。銀河系外から一様な分布で到来するガンマ線のスペクトルを図 1.8 に示す。このスペクトルは、非常に遠くの AGN と Ia 型超新星爆発によるものとされ、特に MeV 領域においては Ia 型超新星爆発由来のガンマ線が卓越しているとされる。

この銀河系外からのガンマ線背景放射も、MeV ガンマ線観測におけるバックグラウンドとなる。

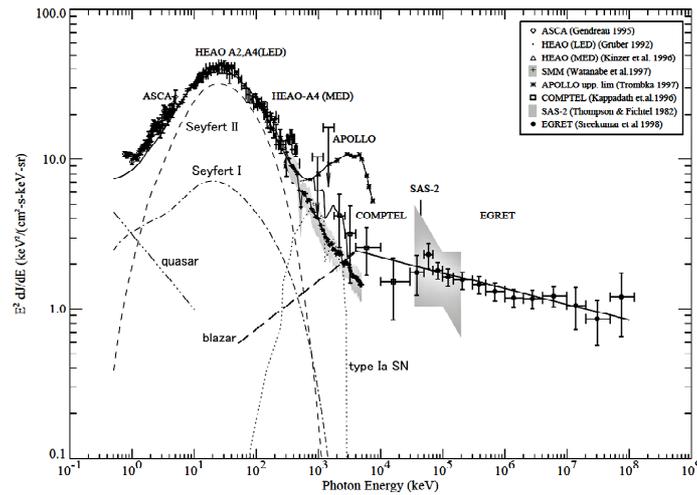


図 1.8: extragalactic diffuse gamma のスペクトル [9]

## 1.3 各天体からの MeV ガンマ線

### 1.3.1 超新星残骸

超新星爆発時では、普通の星では作られない Fe よりも重い元素が作られると考えられ、重要な元素合成の現場とされている。この元素合成の際に放射性同位体も作られるため、大量に生産された放射性同位体からの核ガンマ線が観測される。

白色矮星が恒星と連星系を成していると、恒星から白色矮星へと物質が流れ込み、白色矮星に物質が降り積もる。このとき、白色矮星の内部では次第に圧力が高くなっていき、あるとき熱核反応が起こり爆発する (Ia 型超新星爆発)。この Ia 型超新星爆発が起こると、 $\sim 0.6M_{\odot}$  の  $^{56}\text{Ni}$  が生成される [20]。この  $^{56}\text{Ni}$  は、



という崩壊をすることが知られており、Ia 型超新星の光度曲線はこの反応により説明されている。一方、非常に重い星の中心にある Fe のコアが重力崩壊することにより起きる II 型超新星爆発においても、Ia 型ほど多くはないが  $^{56}\text{Ni}$  が作られる。事実、II 型超新星と考えられている SN1987A の光度曲線は図 1.9 のように  $^{56}\text{Co}$  によって説明され、また、表 1.1 にあるように、SN1987A から  $^{56}\text{Co}$  の崩壊に伴う核ガンマ線が観測されている。

ところで、超新星爆発が起こると、星の中心部から大量の中性子が放出されるため、星の外縁部の原子は崩壊する間もなく、次々と中性子を吸収し、中性子過多の原子核となる。このような原子核は不安定であるため、 $\beta$  崩壊を繰り返し安定な原子核になろうとする。このような過程は反応が急激に進むことから r 過程と呼ばれ、Fe よりも重い元素はこの過程により生成される [20]。

これまでの核ガンマ線の観測から、超新星残骸に表 1.1 のような放射性同位体が存在することが確認されている。特に  $^{26}\text{Al}$  は図 1.5 のような銀河面全体に広がった分布も観測されており、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。

表 1.1: MeV 領域における主な核ガンマ線 [11]

Source	エネルギー [keV]	半減期	detected source
$^{56}\text{Ni}$	158,270,480,759,812	6.10day	
$^{56}\text{Co}$	847, 1238, 2598	77.2day	SN1987A, SN1991T
$^{57}\text{Co}$	122, 136	271.7day	SN1987A
$^{44}\text{Ti}$	1157	63year	Cas A SNR
$^{26}\text{Al}$	1809	$7.4 \times 10^5$ year	galactic plane, Vela SNR

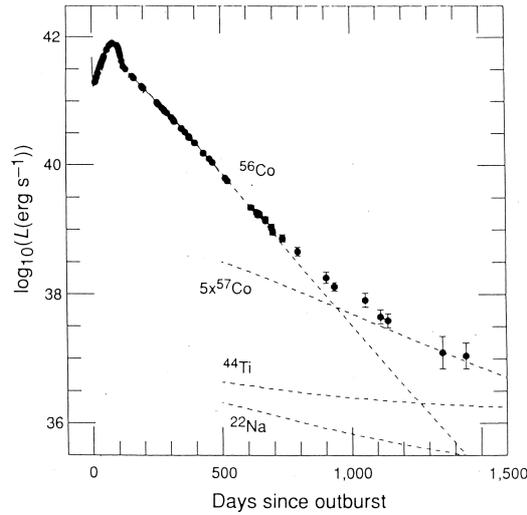


図 1.9: SN1987A の光度曲線 (赤外 ~ 紫外線)[12]

### 1.3.2 パルサー

#### パルサー

パルサーは電波や可視光で非常に短い周期のパルスを出している天体であり、高速で自転する質量  $\sim 1.4M_{\odot}$  ・半径  $\sim 10\text{km}$  の中性子星と考えられている。中性子星は強い磁場 ( $\sim 10^{12}\text{G}$ ) を持っており、磁極付近での放射が自転により見え隠れすることでパルスになる。このようなパルサーのうち、ガンマ線を放射しているものが幾つか見つかっている (表 1.2)。

表 1.2: ガンマ線パルサー [4]

パルサー	周期 $P[\text{msec}]$	周期減衰率 $\dot{P}[10^{-15}]$	距離 $d[\text{kpc}]$
Crab	33.34	421.2	2.0
PSR B1509-58	150.65	1537	4.4
Vela	89.29	124.3	0.5
PSR B1706-44	102.4	93.0	1.8
PSR B1951+32	39.53	5.849	2.5
Geminga	237.1	10.98	0.16
PSR B1055-32	197.1	5.8	1.5

なかでも Crab パルサーは電波から GeV ガンマ線まであらゆる波長の電磁波で観測されており、最もよく調べられている天体である。Crab パルサーの X 線 ~ ガンマ線のパルスプロファイルを図 1.12 に示す。この絵から、sub MeV ~ MeV の領域で、2つのピークの大小が反転している、1つ目と2つ目のピークの間には ‘Bridge’ と呼ばれる一定の強度で放射している位相が存在する、といった前後のエネルギー大域には見られない特徴があることがわかる。パルサーの放射機構の理解はまだ完全ではなく、sub MeV から MeV の領域にあらわれるこの特徴は説明されていない。

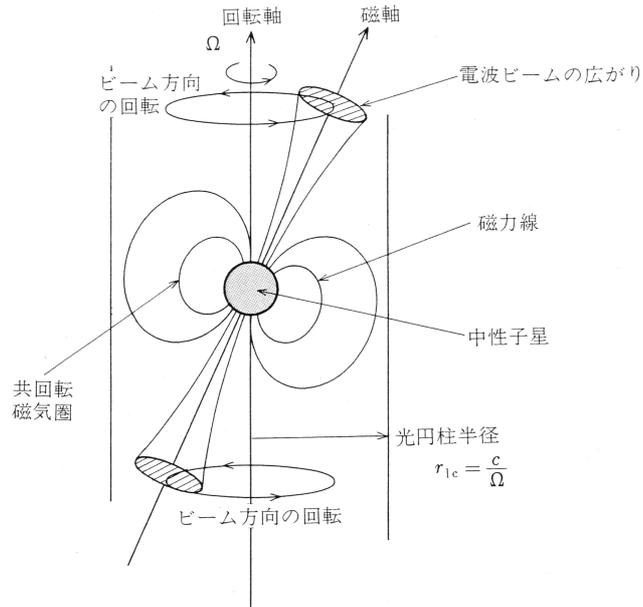
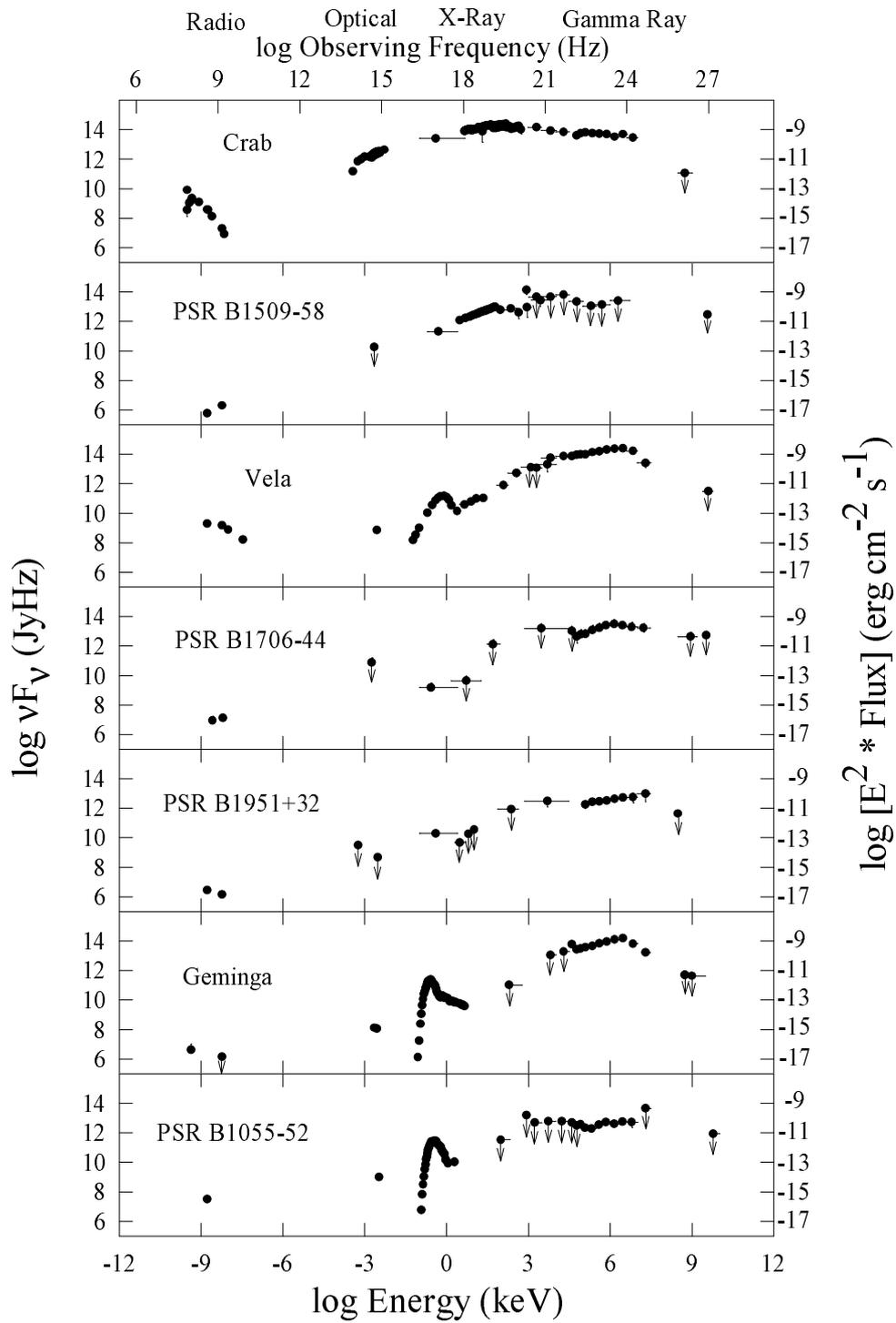


図 1.10: パルサー概念図 [1]

## パルサー周囲の星雲

Crab パルサーの周囲には星雲が存在している。このかに星雲は、電波から TeV ガンマ線まで広く観測されており、そのスペクトルは中性子星の強い磁場に起因する、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱によるものと説明されている (図 1.13)。MeV ガンマ線においても、COMPTEL によりシンクロトロン放射によるものと思われるスペクトルが得られている。



DJT, May, 1998

図 1.11: 様々なガンマ線パルサーの多波長スペクトル [13]

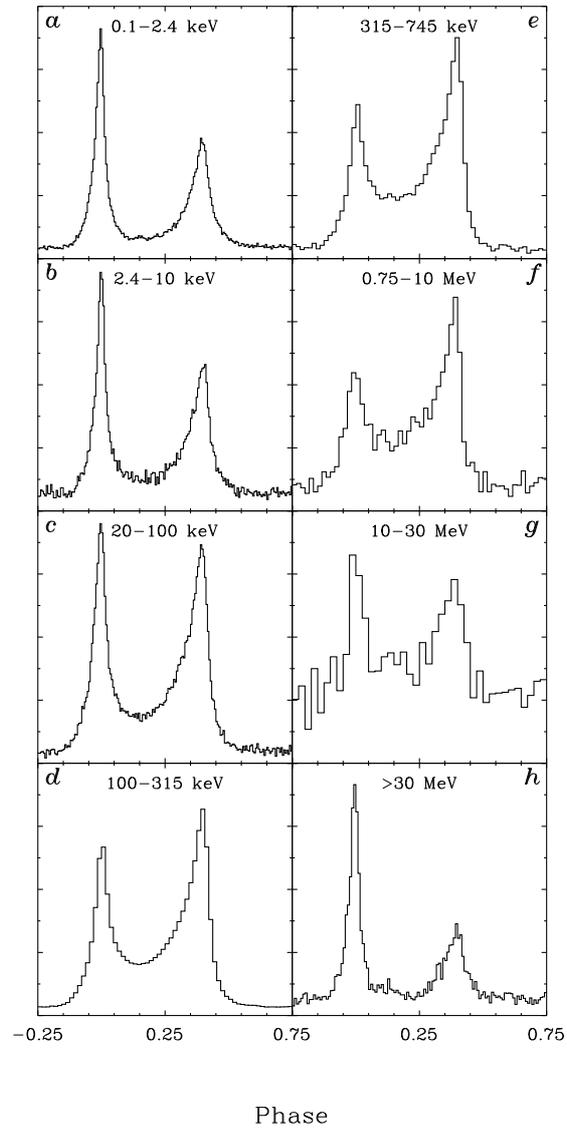


図 1.12: Crab パルサーのエネルギー毎のパルスプロファイル [14]

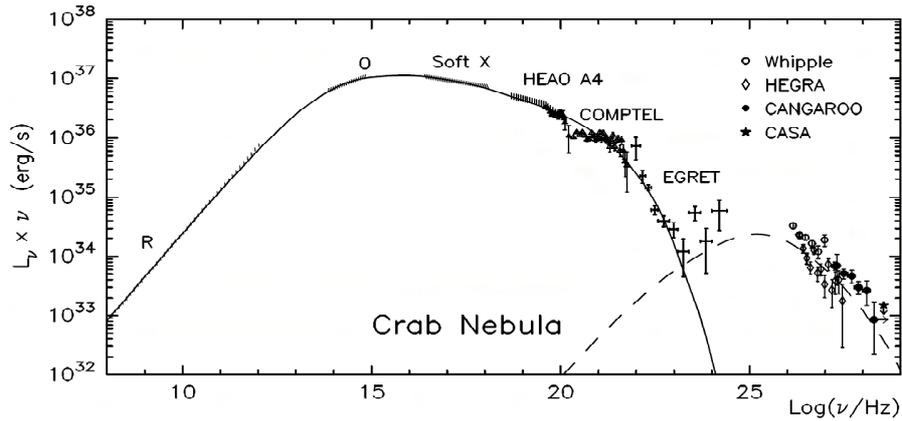


図 1.13: かに星雲のスペクトル (実線:シンクロトロン放射モデル・破線:逆コンプトン散乱モデル) [15]

### 1.3.3 恒星質量ブラックホール

太陽の 30 倍以上の質量を持つような非常に重い星は、II 型超新星爆発の後、ブラックホールになると考えられている。ブラックホールには‘事象の地平線’という境界線があり、その内側に入ってしまうと電磁波さえも外には出られない。従って、ブラックホール自身を観測することはできない。しかし、ブラックホールが恒星と連星系を成している、恒星から物質がブラックホールの方へと流れ込み降着円盤が形成され、この降着円盤により X 線やガンマ線が放射される。

現在のところ、ブラックホール特有の決定的な証拠が存在しないため、‘ブラックホール’と同定された天体はないが、その質量と大まかな大きさから‘ブラックホール候補天体’と呼ばれる天体が幾つか存在し、中でも Cyg X-1 は恒星質量のものとしては最も知られている。

Cyg X-1 をはじめ、ブラックホール候補天体は図 1.14 のような激しい時間変動をすることが知られている。また、時間変動に伴いスペクトルも大きく変化し、数 keV の X 線で明るくなる Soft State と数百 keV にピークを持つ Hard State の 2 状態 (図 1.15) の間を行き来する。Hard State では、熱的な電子とのコンプトン散乱による成分が卓越し (図 1.16)、Soft State のスペクトルでは、降着円盤からの黒体放射と、非熱的な電子によるコンプトン散乱が卓越する (図 1.17)。また、どちらの状態においても、X/ガンマ線が冷たいディスクでコンプトン散乱 (Compton reflection) する成分が存在するとされる。[16]

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  $\pi^0$  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。 $\pi^0$  による放射はブラックホール近傍の強い重力場を必要とするため、ブラックホールであることの強い証拠になりうる。

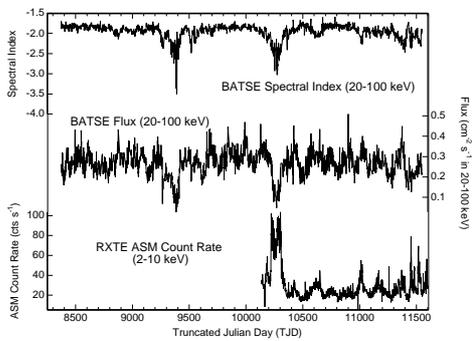


図 1.14: Cyg X-1 の時間変動 [16]

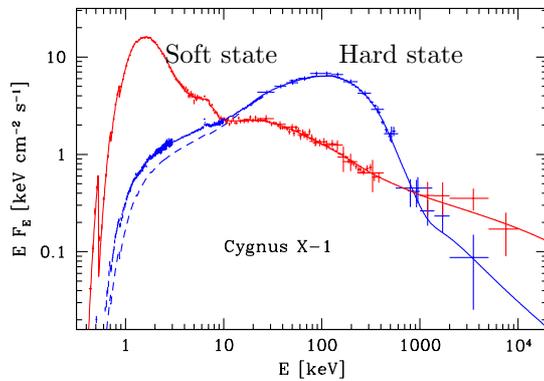


図 1.15: Cyg X-1 の Soft state 及び Hard state のスペクトル [16]

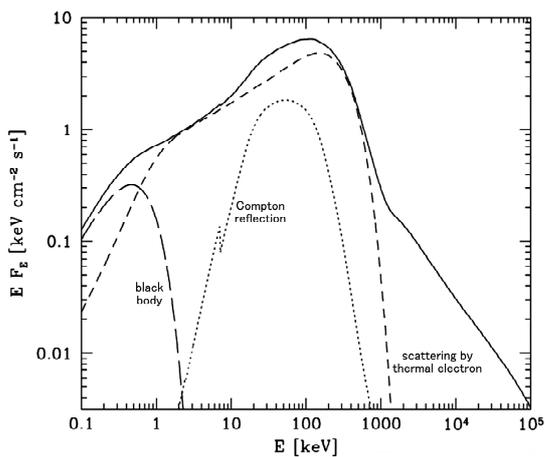


図 1.16: Hard(Low) State の放射モデル [16]

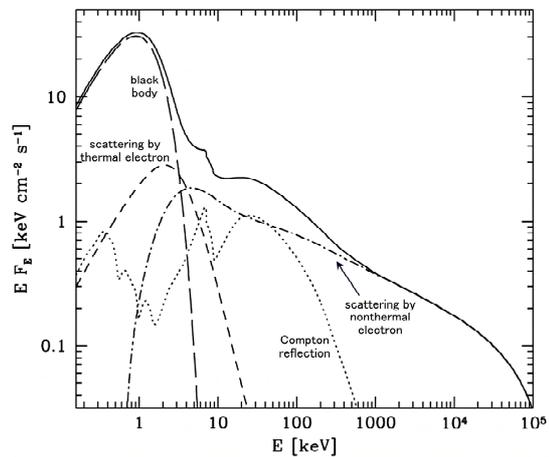


図 1.17: Soft(High) State の放射モデル [16]

### 1.3.4 宇宙初期に形成されたブラックホール

ブラックホールは重力のみを考えると、物質を吸い込むばかりで何も出さない。しかし量子論を考えに入れると、ブラックホールから輻射があっても良いということが S.Hawking により提唱された (Hawking 輻射)。この Hawking 輻射は

$$kT = \frac{c^3 \hbar}{8\pi GM} \quad (1.2)$$

という温度でブラックホールが熱放射しその質量を減らす、というものである [26]。しかし、星の進化によってできたようなブラックホールでは温度が低く、観測は困難である。

一方で、宇宙の初期には物質密度の揺らぎにより、非常に小さなブラックホールができたと考えられている (primordial black hole)。Hawking 輻射によるブラックホールの寿命は

$$\tau \sim \frac{G^2 M^3}{\hbar c^4} \sim 10^{10} \text{yr} \left( \frac{M}{10^{15} \text{g}} \right) \quad (1.3)$$

となる [26] が、宇宙年齢が  $\sim 10^{10} \text{yr}$  なので  $10^{15} \text{g}$  以下の質量のものは既に消滅していることになる。従って、現在残っている宇宙初期に生成されたブラックホールで最も軽いものは  $10^{15} \text{g}$  ということになり、この質量のブラックホールの Hawking 輻射は  $\sim 100 \text{MeV}$  程度の熱放射になる。よって、MeV-ガンマの領域にピークを持つ熱的なスペクトルを示し、他波長においては特徴のない点源が存在すれば、現在のところ発見されていない宇宙初期のブラックホールの候補となる。

### 1.3.5 銀河中心

電子とその反物質である陽電子とが会すると、ガンマ線を放出して消滅する。このときガンマ線を2つ放出することが多く、そのエネルギーは電子の静止質量  $511 \text{keV}$  である。OSSE などによる銀河中心方向の観測から、図 1.18 のようなスペクトルが得られており、電子・陽電子対消滅が起きていることは明らかである。

この  $511 \text{keV}$  ガンマ線は図 1.19 のように銀河面に広く分布し、銀河中心が特に強く放射している。 $511 \text{keV}$  の放射はすなわち陽電子の存在を示すが、この陽電子は、超新星爆発や重い星での核融合などにより生じた  $\beta^+$  崩壊をする放射性同位体によるものと考えられている。

また、銀河中心には  $\sim 3 \times 10^6 M_{\odot}$  の大質量ブラックホールがあるとされている。従って、質量降着があれば、降着円盤による放射も期待できる。

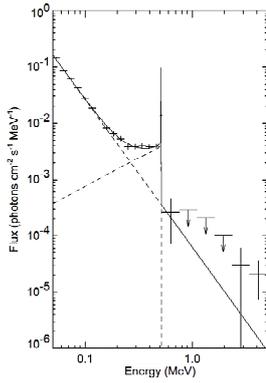


図 1.18: OSSE による銀河中心のスペクトル [22]

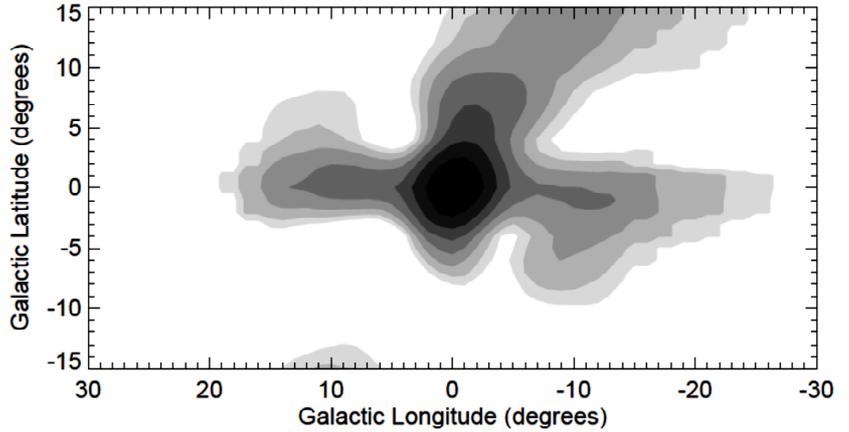


図 1.19: OSSE による 511keV の map [22]

### 1.3.6 活動銀河核

銀河の中には、中心が異様に明るく輝いているものがある。これらは活動銀河と呼ばれ、その中心 (Active Galactic Nuclei) には  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$  という大きな質量を持った巨大なブラックホールが存在しているとされている (図 1.20)。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。このジェットからの放射が強く、降着円盤やその周りの熱放射を凌駕するような AGN からは、図 1.21 や図 1.22 のように、シンクロトロン放射 (周波数の低いほうのピーク) と逆コンプトン散乱 (周波数の高いほうのピーク) で説明できるような非熱的なスペクトルが得られている。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、sub MeV ~ MeV 領域 ( $1\text{MeV} \approx 10^{20}\text{Hz}$ ) 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。

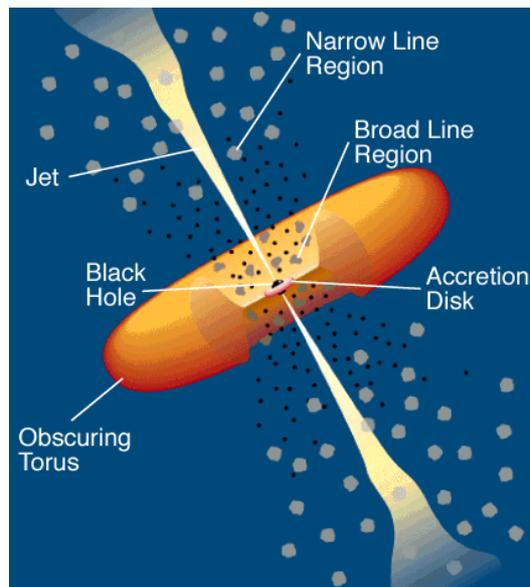


図 1.20: AGN 概念図 [28]

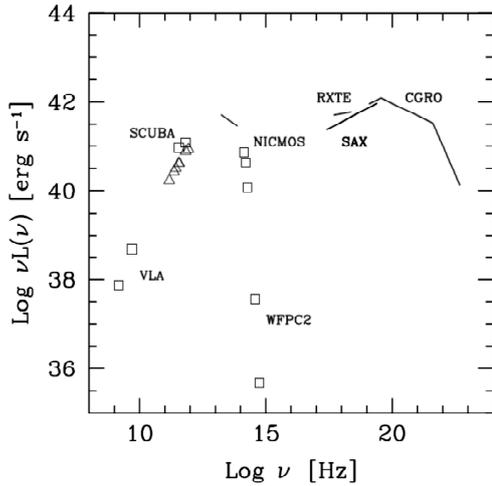


図 1.21: 電波銀河 Cen A の多波長スペクトル [17]

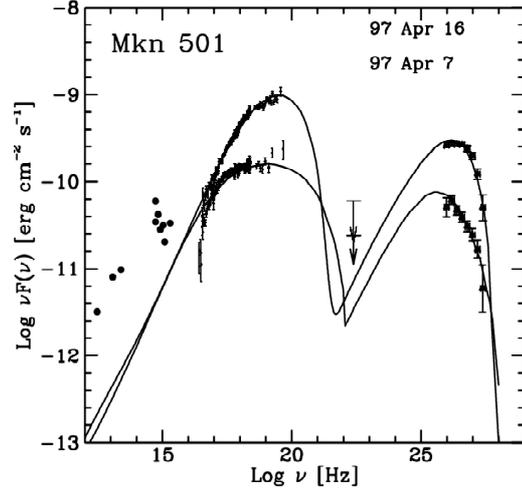


図 1.22: Blazar Mkn501 の多波長スペクトル [18]

### 1.3.7 太陽フレア

最も身近な天体の一つである太陽からも MeV ガンマ線は放射される。1970 年代から既に、太陽フレアに伴い核ガンマ線がときおり放射されることが知られており、これまでに表 1.3 のようなものが観測されている。これらの観測から、フレアの起きる領域では中性子や陽電子が大量に生成されると考えられている。また、太陽フレアに伴いコロナ中のプラズマ粒子の加速・加熱も起こり、高いエネルギーまで加速された電子からは制動放射により X 線やガンマ線を放射する。この X 線やガンマ線を観測することにより、電子が磁力線に沿ってどのように伝播するかということも調べられている。太陽は宇宙で最も近い恒星であるため、最も詳しく調べるとこのできる、非常に重要な天体である。

表 1.3: 太陽フレアに伴う核ガンマ線 [21]

process		Energy [MeV]
陽子の中性子捕獲	${}^1\text{H} + \text{n} \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$	2.223
電子・陽電子対消滅	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$	0.511
$\pi^0$ の崩壊	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	平均 $\sim 70$
励起された原子核からの放射	${}^{12}\text{C}$	4.43
	${}^{14}\text{N}$	1.63, 2.31
	${}^{16}\text{O}$	7.12
	${}^{20}\text{Ne}$	1.63

### 1.3.8 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは、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、ある方向から突然ガンマ線が爆発的に放射される現象であり、ミリ秒程度の短く激しい時間変動を示し、バーストの継続時間も図 1.23 のように数十秒と短い。

これまでのガンマ線の観測や X 線・赤外線等による残光の観測から、宇宙論的な距離の遠方で起こる非常に大きな爆発である、所属する銀河があるらしい、といったことが判明している。また、非常に強く偏光していたという RHESSI の観測結果 [27] も報告されており、sub MeV ~ MeV の領域においては図 1.24 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。GRO 衛星の BATSE では 2700 個もの GRB が発見され、その分布は非常に等方的である (図 1.25)。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。

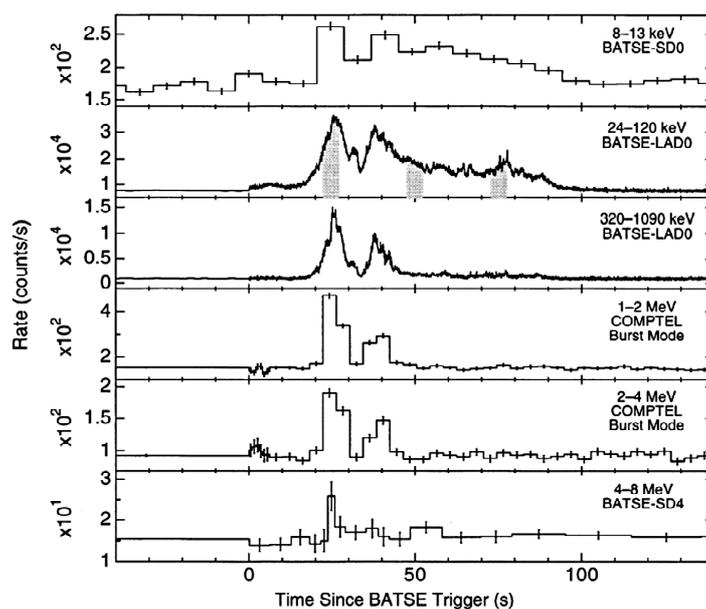


図 1.23: BATSE・COMPTEL により観測された GRB の光度曲線 [23]

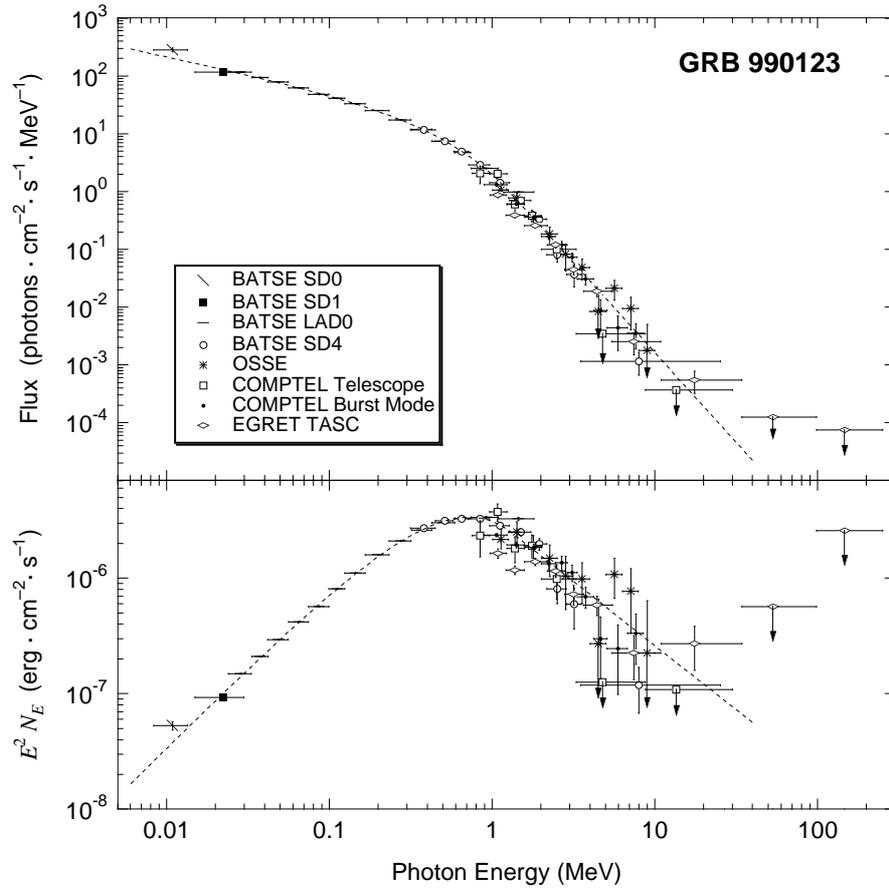


図 1.24: GRO 衛星によるガンマ線バースト GRB990123 のスペクトル [23]

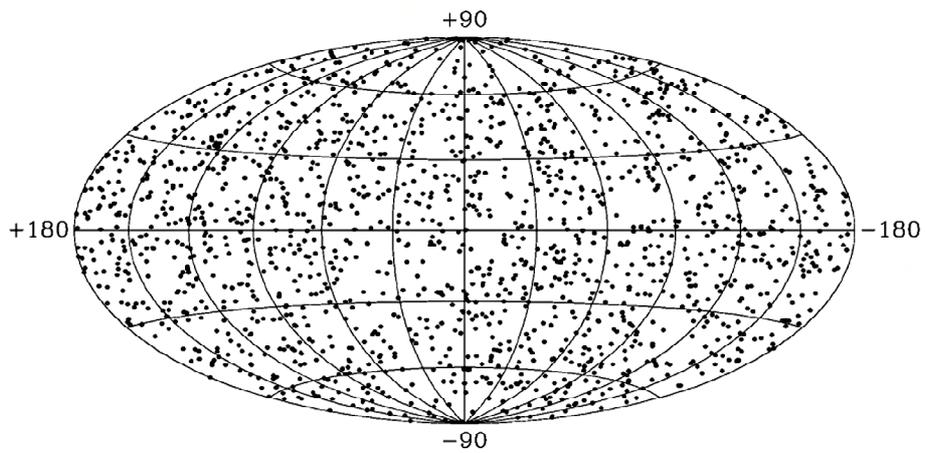


図 1.25: BATSE により観測された GRB の分布 [25]

## 第2章 MeV 線イメージング

### 2.1 ガンマ線と物質の相互作用

X線やγ線は電荷を持たないため、荷電粒子のように物質を直接電離したりはしない。しかしX線やγ線は、検出器を構成する物質と相互作用することにより電子や陽電子を放出する。我々は、これらの粒子が周囲の物質を電離するのを利用して、間接的にX線やγ線を検出することができる。

線と物質の主な相互作用として、光電効果、コンプトン散乱、対生成の三つが挙げられる。これらの相互作用が起こる確率は線のエネルギーや物質の原子番号Zに依存する。図2.1は、線のエネルギーと物質のZの値によって決まる優位な相互作用を表している。また図2.2には、Arに1keV~1GeVの線が入射したときの各相互作用の割合を一例として示した。

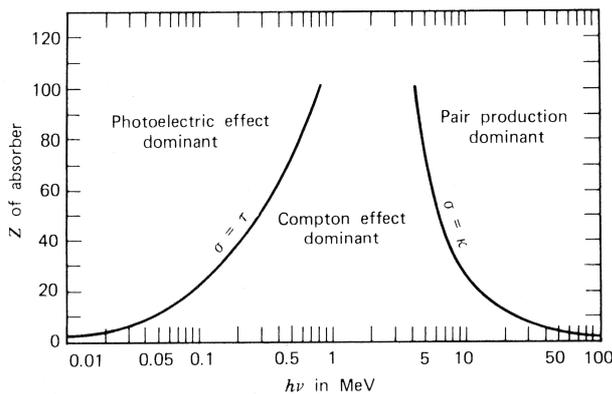


図 2.1: ガンマ線と物質との各相互作用 [49]

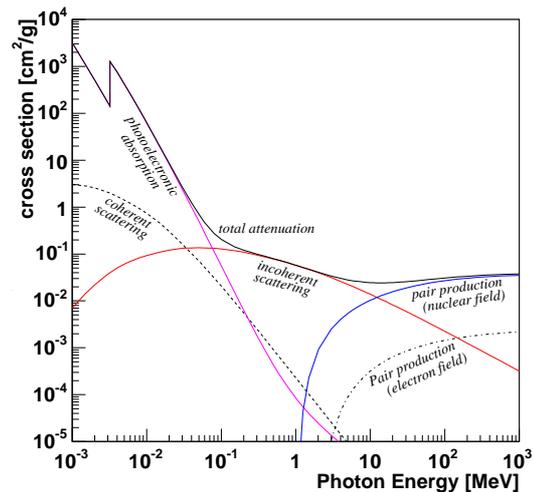


図 2.2: 光とアルゴンの相互作用断面積 [50]

#### 2.1.1 光電効果 (光電吸収)

光子のエネルギーが100keV以下の領域では、X・線と物質の主な相互作用は光電効果(あるいは光電吸収)である。光電効果は入射した光子が物質中の電子にその全てのエネルギーを与えて電離させる現象であり、電離された電子の持つエネルギー  $K_e$  は、

$$K_e = E_\gamma - E_{bind} \quad (2.1)$$

となる。ここで、 $E_\gamma$  は入射光子のエネルギー、 $E_{bind}$  は電子の束縛エネルギーである。

X・線に対する光電効果の反応断面積  $\sigma_{ph}$  は、一般的に

$$\sigma_{ph} \propto Z^n E_\gamma^{-7/2} \quad (2.2)$$

と表される。n は入射線のエネルギーによって 4 と 5 の間で変化する値である。

$E_\gamma$  が K 殻の束縛エネルギーよりも大きいときは、光電吸収は K 殻にある電子と起こる確率が最も高くなる。 $E_\gamma$  が K 殻の束縛エネルギーよりもわずかに小さいときは、K 殻にある電子とは相互作用せず L 殻の電子と相互作用することになる。図の 30keV 付近にある不連続なエッジはこのために現れ、K 殻吸収端といわれる。さらにエネルギーの低いところには、同様に L 殻吸収端、M 殻吸収端も存在する。

### 2.1.2 コンプトン散乱

光子のエネルギーが数 100keV ~ 数 MeV 程度では、光子と電子の非弾性散乱であるコンプトン散乱が主な相互作用となる。通常電子は原子中に束縛された状態にあるが、ガンマ線のエネルギー  $E_\gamma$  が十分大きいため以下では無視してよい。また散乱前の電子は静止していると考え、散乱線のエネルギーを  $E'_\gamma$ 、散乱角を  $\phi$  とすると、

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \phi)} \quad (2.3)$$

が成り立つ。 $m_e$  は電子質量、 $c$  は光速である。散乱線の角度分布は微分散乱断面積  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  を用いて

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z r_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2 \phi}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + \alpha(1 - \cos \theta))} \right) \quad (2.4)$$

と表される。(クライン・仁科の公式 Klein-Nishina formula) ただし、 $\alpha = E_\gamma/m_e c^2$  とする。この式より散乱断面積  $\sigma$  が  $Z$  に比例することがわかる。また、散乱断面積の角度分布は図 2.3 のようになり、 $E_\gamma$  が大きいほど前方に散乱されることがわかる。

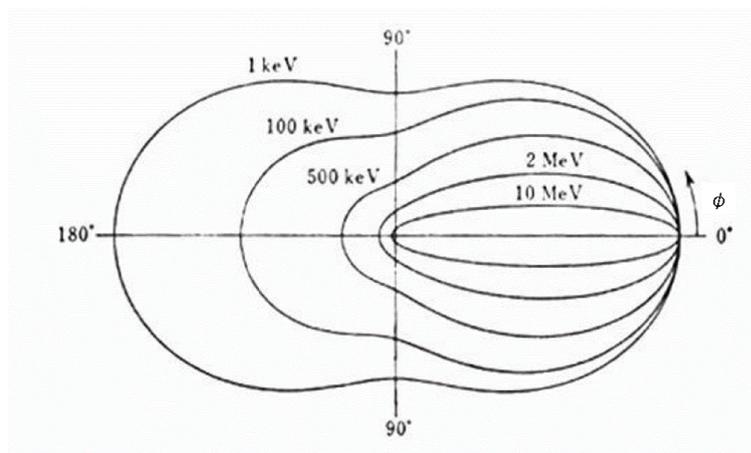


図 2.3: 散乱角  $\theta$  の単位立体角内へコンプトン散乱される光子数の極座標表示 [49]

### 2.1.3 電子陽電子対生成

線のエネルギーが電子の静止質量 (511keV) の2倍以上になると電子陽電子対生成が可能となり、10MeV以上では線と物質との主な相互作用となる。電子陽電子対生成は、線光子が原子内のクーロン場と相互作用して消滅し電子と陽電子に置き換えられる反応である。入射線のエネルギー  $E_\gamma$  と生成された電子・陽電子のエネルギー ( $E_-$ 、 $E_+$ ) には以下のような関係がある。

$$E_\gamma = E_- + E_+ + 2m_e c^2 \quad (2.5)$$

また、この反応の断面積  $\sigma_{pair}$  は、 $E_\gamma \ll \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$  のときは

$$\sigma_{pair} Z^2 (\ln E_\gamma - const) \quad (2.6)$$

$E_\gamma \gg \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$  のときは

$$\sigma_{pair} Z^2 \left( \ln \frac{1}{Z^{1/3}} \right) \quad (2.7)$$

のように表され、基本的には  $Z$  の2乗に比例するが  $E_\gamma$  が大きくなると複雑になってくる。

## 2.2 MeV ガンマ線イメージングの原理

数百 keV ~ 数 MeV のガンマ線の撮像観測は非常に難しい。一つには、このような波長の短い領域では光子の粒子性が強いいため、X 線のように望遠鏡で集光してイメージを得るという手法が使えないことが挙げられる。また前節で見たように、この領域での 線と物質との主な相互作用はコンプトン散乱である。そのため、入射してきた 線の到来方向を知るためには散乱ガンマ線と反跳電子両方の情報を用いなければならない。さらに、検出器の周りの物質でコンプトン散乱して検出器に入ってきたガンマ線がバックグラウンドとなるため、その対策も重要である。

これらを踏まえた上で、MeV ガンマ線のイメージング法として過去に用いられたり、現在研究されたりしているものを以下に挙げる。

### 2.2.1 コリメータを使ったイメージング

コリメータを使ったイメージングの原理は単純で、シンチレータなどの検出器の上にコリメータを置き、特定の方向以外からの 線をコリメータで光電吸収させて遮蔽することにより、特定方向からの光子のみを検出するようにして 線の到来方向を測定するというものである (図 2.4)。この方法は CGRO/OSSE など で用いられていた。

コリメータにはパッシブコリメータとアクティブコリメータの二種類がある。パッシブコリメータは、タングステンや鉛など  $Z$  が大きく阻止能の大きな物質で作られており、単純に光子を光電吸収して遮蔽する。一方アクティブコリメータはコリメータ自体が検出器となっており、荷電粒子を検出することにより荷電粒子によるバックグラウンドを除去することができる。またコリメータ内でコンプトン散乱したイベントも取り除くことができる。

しかし、コリメータで光電吸収できる 線のエネルギー帯域はコリメータの厚さによって決まってしまう。そのため、高いエネルギーの 線をコリメータしようとするとは必然的に厚いコリメータが必要となる。たとえば 500keV の 線に対しては、5cm 厚の鉛を用いても半分程度しか遮蔽することができず、高エネルギーの 線をコリメータするのは非常に難しい。MeV 領域以上のエネルギーでは、コンプトン散乱の断面積が光電吸収の断面積を上回り、コリメータやその他の検出器等でコンプトン散乱した散乱 線が検出器に入って、コリメータ自体が一種のバックグラウンド源となってしまう。さらに荷電粒子との相互作用によって生じる 線もバックグラウンドとなるので、特に数百 keV 以上の高い領域の 線に対する感度は悪くなってしまう。

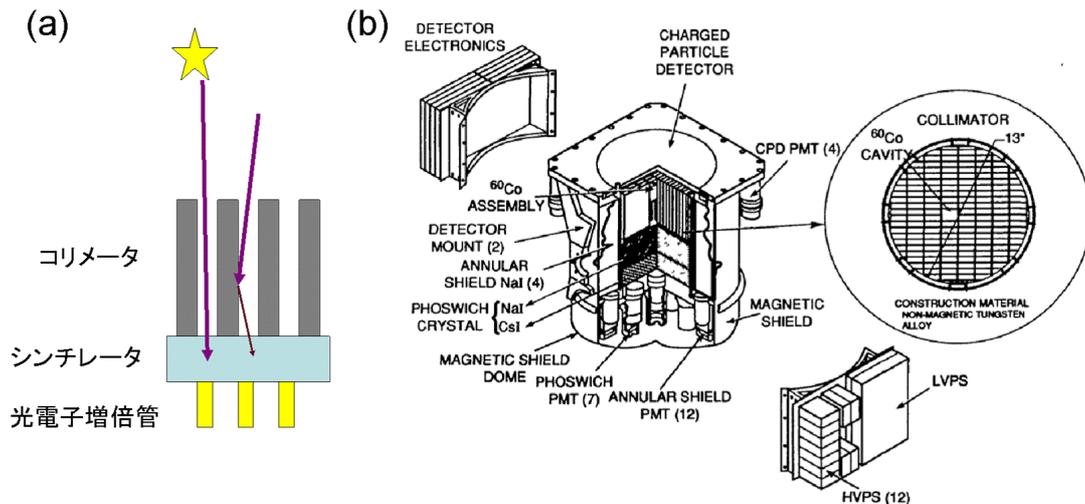


図 2.4: コリメータを用いたガンマ線検出・撮像 (a) 概念図 (b)CGRO/OSSE の概観 [51]

### 2.2.2 コーデッドマスク法

コーデッドマスク法は、単純なコリメータを置く方法の発展として、統計的に線の到来方向を推定する方法である。この方法では、二次元位置検出感度を持つ検出器の前に Coded Mask と呼ばれるマスクを置く。マスクには線の到来方向とその影の形が 1:1 で対応するようなパターンで穴が明けられ、その影の形を位置検出器で検出する。この影の形の情報を集めて解析的に解くことにより、元の線がどの方向からどれだけ来たのかを推定する。

この方法では、角度分解能と観測視野はマスクパターンの大きさとマスクと検出器の距離によって決定されるため、これらを適当に決めてやることで高い位置分解能と広視野を達成できる。

この手法を用いた検出器として、INTEGRAL 衛星に搭載された IBIS(観測エネルギー 20keV ~ 10MeV) や SPI(3keV ~ 8MeV) などが挙げられる。IBIS では 9度 × 9度の視野と、0.2 度 (FWHM) の高い角度分解能が実現されている。

ただし、この方法でも結局コリメータを用いているのと同じで高いエネルギーに対して遮蔽をしようとする厚いマスクが必要となり、マスク自体がバックグラウンド源になってしまう。また、影の形から解析的にもとの到来方向を決定するにはそれなりの統計を集めなければならない。

### 2.2.3 線レンズ

線は X 線と違い全反射によって集光するのは困難である。しかし、Bragg 反射を利用すれば線を集光することができる。Bragg 反射の式は、光の波長を  $\lambda$ 、レンズに用いられる結晶の周期構造の大きさを  $d$ 、光子と結晶面の角度を  $\theta$  として、

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.8)$$

と表される。

このような方法を線レンズと呼んでいる。線レンズを用いれば、可視光や他の波長と同じような位置分解能で線を検出することが可能になると期待されるが、Bragg 反射を利用しているために、特定の狭い領域の波長の線しか集光することができず、広い範囲のスペクトルは取得できない。さらに線の場合は式 2.8 より  $\theta$  が極端に小さくなり、焦点距離が非常に長くなる。また

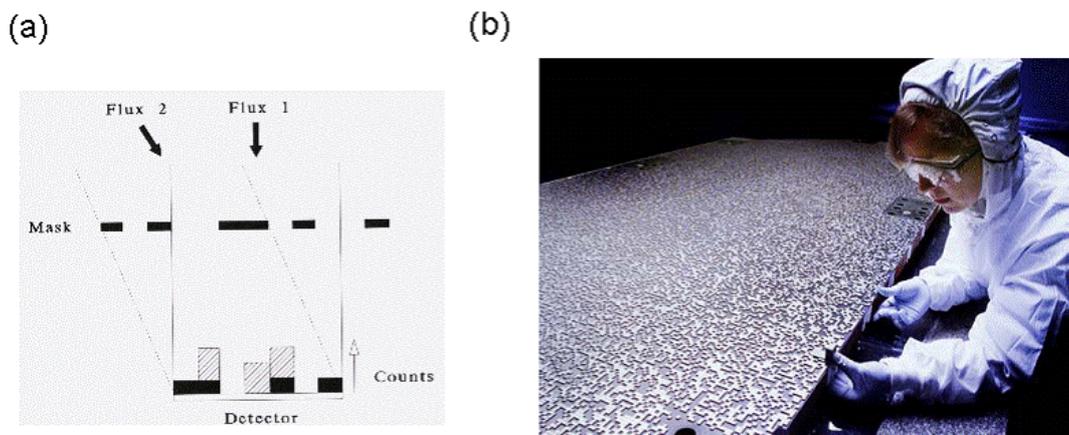


図 2.5: coded mask imaging (a) ガンマ線到来方向のコード化 ([52] を改変) (b) Swift/BAT の Coded Mask[53]

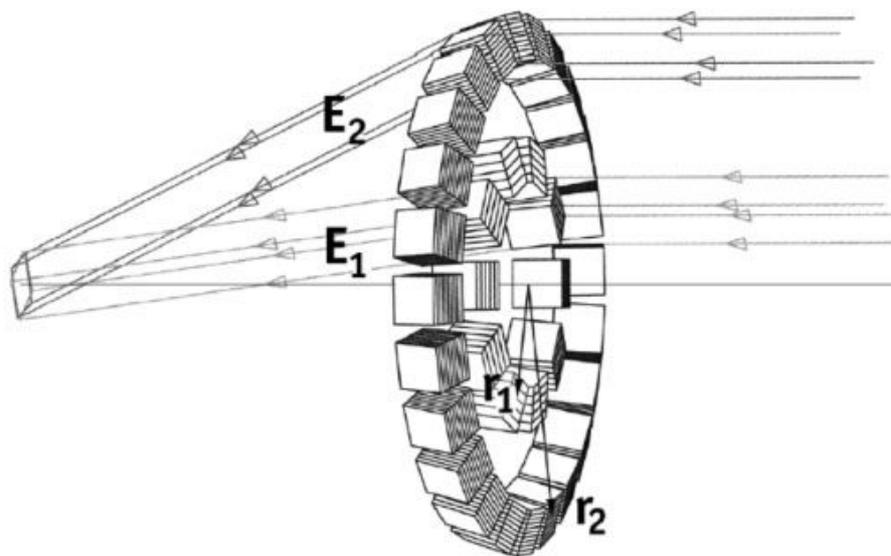


図 2.6: 線レンズ (CLAIRE)

視野が極端に狭くなってしまうという欠点もある。2001年に世界で初めて行われたガンマ線レンズを搭載した気球実験 CLAIR(図 2.6) では焦点距離が約 2.8 m、エネルギー帯域が 169 ~ 171keV (エネルギー分解能が 170keV で 2keV(FWHM))、視野が 45 °であった [26]。

#### 2.2.4 コンプトン-イメージング法

これまで述べて来たとおり、sub-MeV ~ MeV の領域での主な相互作用はコンプトン散乱である。しかし、ここまで挙げてきた方法は、線の検出方法として光電効果を元に考えられており、コンプトン散乱は歓迎されない。コンプトン散乱では散乱線によりエネルギーが持ち去られ、入射線のエネルギーを決定できないからである。一方、コンプトン散乱を積極的に利用して線の到来方向を決定しようというのがコンプトン-イメージング法である。コンプトン-イメージング法は、反跳電子のエネルギーと散乱線のエネルギー及び吸収位置の情報を用いてコンプトン散乱を再構成し、一光子ごとにエネルギーと到来方向を決定するという方法である。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 衛星に搭載された COMPTEL がある。

この方法では、一光子ごとに線の到来方向に制限がつけられるために他の方法に比べて S/N 比がよく、またコリメータを必要としないために広い視野を実現できる。そのため、現在開発が進められている MeV 線イメージング検出器の殆どがコンプトン散乱を利用した方法を用いている。以下では、いくつかあるコンプトン-イメージング法について紹介する。

##### Classical Compton 法

この手法では、検出器は散乱体と吸収体の二つの部分から構成される (図 2.7)。散乱体では、入射してきた線をコンプトン散乱させ、そのコンプトン点と反跳電子のエネルギー  $E_1$  を測定する。吸収体では、散乱線を光電効果させ、吸収位置とエネルギー  $E_2$  を測定する。このため、散乱体にはコンプトン散乱確率が大きくなるよう Z の小さい物質を、吸収体には光電効果の確率が大きくなるよう Z の大きい物質を選択する。以上の情報から、入射線のエネルギー  $E_\gamma$  及びコンプトン散乱の散乱角  $\phi$  は、以下のように求められる。

$$E_0 = E_1 + E_2 \quad (2.9)$$

$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (2.10)$$

そして、コンプトン点と散乱線の吸収点、散乱角  $\phi$  より、元の線がどの方向から入射してきたかがわかる。ただし、Classical Compton 法では電子の反跳方向の情報を取得することができないために、コンプトン散乱の起こった平面を決定することはできず、したがって 1event から得られる入射線の到来方向の情報は円形に制限が付けられるだけである。

Classical Compton 法を用いた代表的な検出器として、CGRO 衛星に搭載された COMPTEL(後述) が挙げられる。

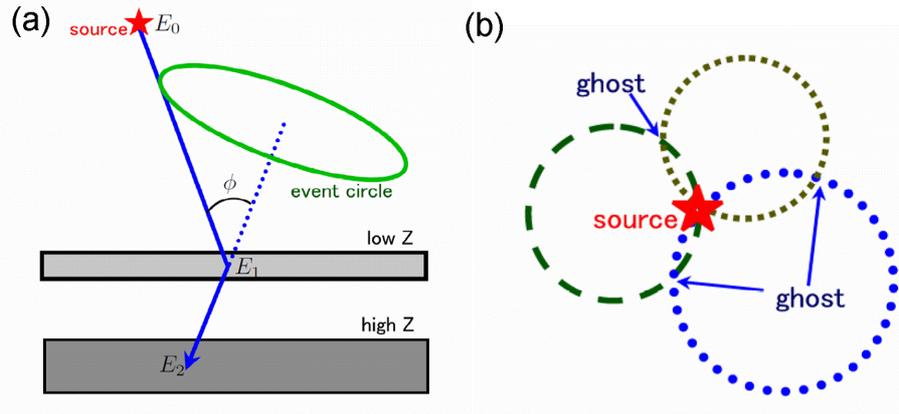


図 2.7: Classical Compton 法 の概念図

### Multiple Compton 法

Classical Compton 法では散乱体でコンプトン散乱が、吸収体で光電吸収が起こることを前提にしている。しかし実際は散乱線が吸収体でさらにコンプトン散乱され、全エネルギーをとめきれずに抜けていくことも起こる。このようなイベントは、吸収体でちゃんと光電吸収されたイベントと見分けることはできず、結果としてバックグラウンドとなってしまう。そこで、コンプトン散乱が複数回起こることを前提に考えられたのが Multiple Compton 法である。検出器は図 2.8 のような構成をしており、基本的には散乱体や吸収体といった明確な区別はない。CdTe や Si, Ge の Strip といいた薄く位置分解能、エネルギー分解能に優れた半導体検出器を多層に重ねた構造をしており、その各層でコンプトン散乱をさせてその反跳電子のエネルギーと散乱位置を測定する。例えば 3 つの層での Hit を観測し、それぞれのエネルギーが  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  だとすると、

$$E_0 = E_1 + \frac{E_2 + \sqrt{E_2^2 + \frac{4m_e c^2 E_2}{1 - \cos^2 \phi_2}}}{2} \quad (2.11)$$

$$\cos \phi_1 = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2 + E_3} - \frac{1}{E_1 + E_2 + E_3} \right) \quad (2.12)$$

$$\cos \phi_2 = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_2 + E_3} \right) \quad (2.13)$$

の 3 式が成り立ち、仮に入射線が検出器内で全てのエネルギーを落としきらずに抜けてしまったとしても 2.11 より入射線のエネルギーを、2.12 よりその到来方向を推定することができる。また、幾何学的な  $\phi_1$  と 2.13 より得られる  $\phi_2$  を比較することにより、ある程度のバックグラウンド除去ができる。

ただし、Classical Compton 法と同様 1 回目のコンプトン散乱が起こった平面は特定できないため、線の到来方向を一意に特定するにはやはり 3event 以上が必要となる。また、多数の Hit 点に対して、どの順番で線が散乱していったのかを推定しなければならない困難もある。

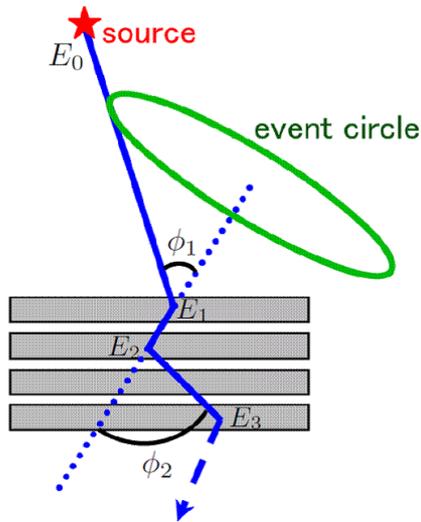


図 2.8: Multiple Compton 法 の概念図

### Electron tracking Compton 法

Electron tracking Compton 法は、他の方法では取得してこなかった反跳電子の反跳方向を取得することにより、1 イベント毎にコンプトン散乱を完全に再構成し、線の到来方向を円形ではなく一意に決定しようという方法である。検出器は、反跳電子のエネルギーと飛跡を測定する飛跡検出器と、散乱線のエネルギーと吸収点を測定する吸収体から構成されている (図 2.9)。

この方法では、1 光子毎に線到来方向を決定できるのでそれだけでバックグラウンド除去の点で有利である。また、散乱線と反跳電子のなす角  $\alpha$  は、散乱線の方角と反跳電子の飛跡という幾何学的な情報とは独立に、それぞれのエネルギー情報からも独立に求めることができる。この二つの  $\alpha$  を比較することによって、そのイベントがコンプトン散乱イベントなのかバックグラウンドなのかを判別できるため、非常に強力なバックグラウンド除去能力を実現できる。

この方法の一例である MEGA (the Medium Energy Gamma-ray Astronomy) (計画は休止中) は Si strip を重ねた散乱体 (電子飛跡検出器) と周りを CsI(Tl) シンチレーション検出器 (吸収体) で囲んだ構造になって、2~8MeV の範囲で Advanced 法を用いた撮像を行っていた [65]。なお 2MeV 以下では、Classical 法を用いていた。ただし、Si は固体であるので、電子は多重散乱を起こしやすく  $\alpha$  の決定精度が低かった。

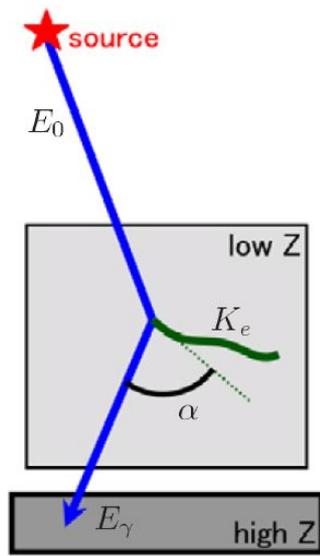


図 2.9: Electron tracking Compton 法 の概念図

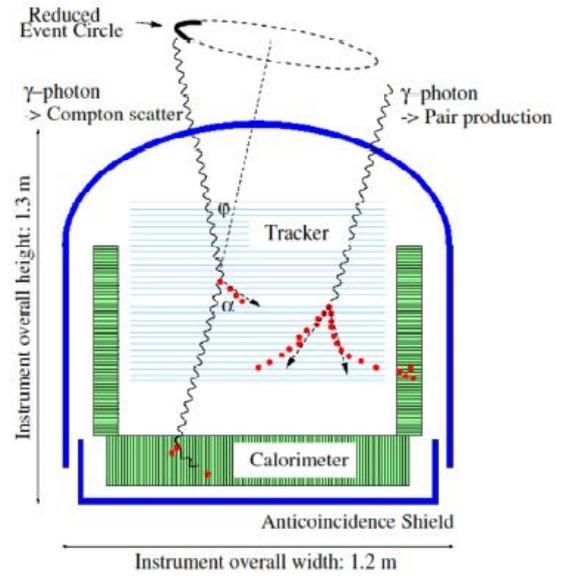


図 2.10: MEGA 検出器 の概念図 [65]

## 2.3 COMPTEL

COMPTEL は現在のところ、天体からの MeV 線観測ではもっとも大きな成果を挙げている検出器である。COMPTEL は 1 ~ 30 MeV までの領域をターゲットに作られた Classical Compton 法を利用した検出器で、これまでに MeV 線線による広視野な天体観測を行った唯一の検出器でもある。OSSE、EGRET、BATSE とともに CGRO 衛星に搭載され、1991 年から 2000 年までの間観測を行った。COMPTEL の主なパラメータを表 2.1 に示す。

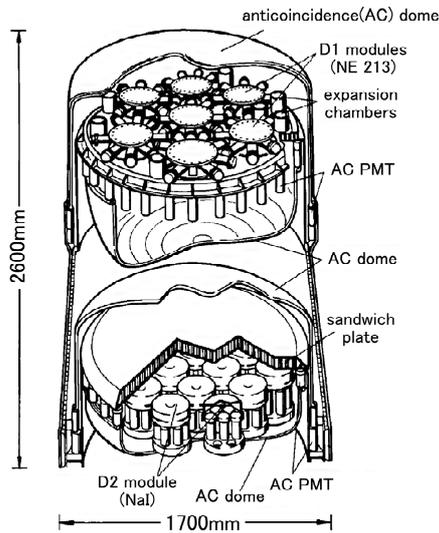


図 2.11: COMPTEL 概観 [6]

表 2.1: COMPTEL の性能 [6],[29]

上段の検出器	NE213A (有機液体 Scintillator)
	4188cm <sup>2</sup> , 50keV ~ 20MeV
下段の検出器	NaI
	8744cm <sup>2</sup> , 500keV ~ 30MeV
energy band	0.7 ~ 30MeV
energy resolution	5 ~ 10 % (FWHM)
separable angle	≥ 3 ~ 5°
angular resolution (ARM)	1.2 ~ 3° (σ)
effective detection area	20 ~ 50cm <sup>2</sup>
FOV	1str

表 2.2: COMPTEL により検出された天体 [4]

Type of source	Number	sources
Spin-Down Pulsars	3	Crab, Vela, PSR B1509-58
Stellar Black Hole Candidates	2	Cyg X-1, GRO J0422+32
Supernova Remnants	1	Crab nebula
Active Galactic Nuclei	10	CTA 102, 3C 454.3, PSK 0528+134, GRO J0516-609, PKS 0208-512, 3C 273, PKS 1222+216, 3C 279, Cen A, PKS 1622-297
<b>Gamma-Ray Line Source</b>		
$^{26}\text{Al}$ (1809keV)	3	Cygnus region, Vela region, Carina region
$^{44}\text{Ti}$ (1157keV)	2	Cas A, RX J0852-4621
$^{56}\text{Co}$ (847keV, 1238keV)	1	SN1991T
$n$ -capture (2223keV)	1	GRO J0317-853
Undentified Sources	9	
Gamma-Ray Burst	31	

COMPTEL では、次のようなバックグラウンドがあったと考えられる図 2.12。

- A : 検出器内部からのガンマ線 COMPTEL 内部に存在する  $^{40}\text{K}$  といったアイソトープによるガンマ線や陽子の中性子捕獲に伴い放出された 線が散乱体でコンプトン散乱され、吸収体でもエネルギーを落とすような事象
- B : 外部からのガンマ線 CGRO 衛星に搭載されたのほかの検出器や衛星本体でコンプトン散乱したガンマ線やアイソトープによるガンマ線が散乱体でコンプトン散乱され、吸収体でもエネルギーを落とすような事象
- C : 2 ガンマ崩壊 (内部) 検出器内部で  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  といった 2 つ以上のガンマ線を同時に放出する反応がおこり、それらのガンマ線がそれぞれ散乱、吸収体に入射して 2 つの検出器を鳴らす事象。
- D : 外部からのガンマ線 ほかの検出器や衛星本体で C と同じく 2 ガンマが出て、同様に検出器を鳴らす事象
- E : random coincidence 偶然、散乱および吸収体が鳴ってしまう事象
- F : 宇宙線による放射 宇宙線 (主に陽子) が検出器内外に入射して、物質との相互作用で生じたガンマ線が散乱および吸収体に入射する事象

これら衛星内で生成されるものに加えて、地球大気からの 線もバックグラウンドとなってしまう。

このような多くのバックグラウンド環境の中で、COMPTEL のバックグラウンド除去は散乱体と吸収体との間の Hit の時間差 (Time Of Flight、TOF) のみに頼ったものであった。TOF の分布とその内訳を図 2.13 に示す。この TOF の分布で、前方のピークのみを取り出すことにより、最初に D2(吸収体) で散乱してから D1(散乱体) でも相互作用したようなバックグラウンドイベント

は取り除くことができる。しかし、C、D、E、FのようなイベントではTOFは広く連続的な分布となり、前方ピーク部だけを取り出しても1/3程度は残ってしまう。さらに、AやBは、散乱体で散乱、吸収体で吸収という本来期待される相互作用を起こしているので、原理的に全く取り除くことはできない。したがって、図2.13で示してあるとおり、前方ピークだけを取り出してもその殆どはバックグラウンドイベントであり、よほど明るい天体でない限り観測は難しかったことが伺える。

## 2.4 感度比較

これまでに観測がなされている検出器の連続成分に対する感度をエネルギーごとにみると 図 2.14 のようになる。100keV 程度より 100MeV 程度までの領域の感度がほかのエネルギー領域に比べて桁違いに悪いことが分かる。その原因としては、この領域では前述の通りコンプトン散乱が光と物質の主な相互作用であり、そのため検出器以外の場所 (衛星の筐体やその他の検出器など) でコンプトン散乱した  $\gamma$  線がバックグラウンドとなり、いままでの光検出器では到来方向の精度が低いためこれを除去できないことが原因である。

感度が低いために、今までに検出されている天体数は、ほかのエネルギー帯域比べて桁違いに少ない。たとえば、ほかの帯域でもっとも観測天体数が少ない GeV 領域でも既に 300 天体程度が発見されており、今後さらに GLAST 衛星によって新たな天体の発見が期待されている。それに対して、MeV 領域では未だ 30 個程度の天体しか発見されておらず [74, 38]、また具体的に新たな衛星計画が進んでいるわけでもない。ただしこの MeV 領域には先述のように、解明されていない興味深い現象が多く存在する。

そこでわれわれはこの sub-MeV・MeV 領域を観測するために、Advanced Compton 法を用いて、バックグラウンド除去に優れ、感度の良い検出器、具体的には現在のところ最高感度を実現した CGRO/COMPTEL よりも一桁以上感度の良い検出器を目指して開発に取り組んでいる。

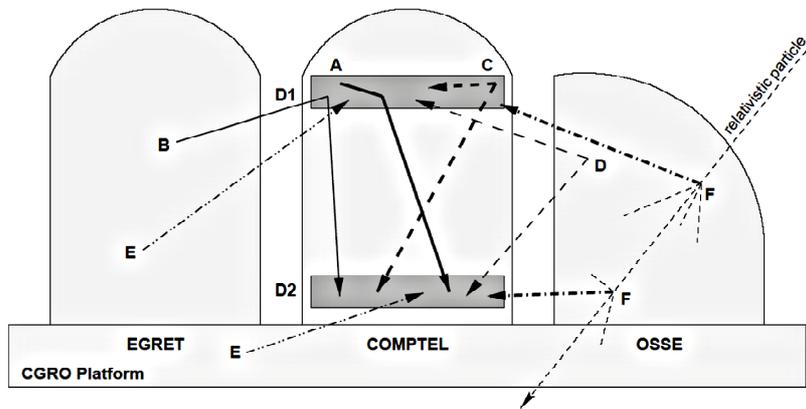


図 2.12: CGRO/COMPTEL のバックグラウンド (D1 は散乱体、D2 は吸収体)

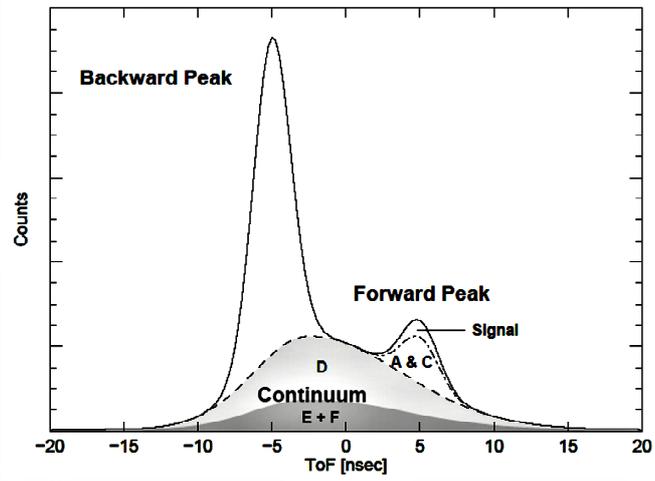


図 2.13: CGRO/COMTEL のバックグラウンドの内訳  
 バックグラウンドの種類 A ~ F は図 2.12 および文中を参照 [63]

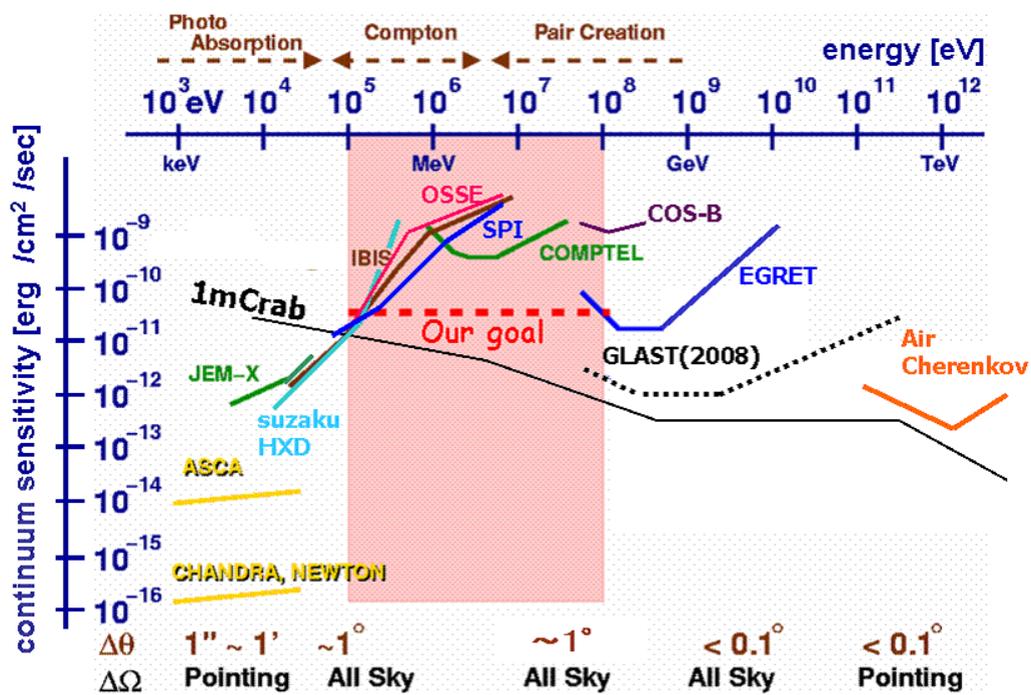


図 2.14: X・ $\gamma$  線領域の各検出器の連続成分検出感度 赤点線はわれわれの目標感度

## 第3章 我々の検出器

われわれは、コンプトン散乱において反跳電子の飛跡情報を取得する Electron tracking Compton 法を用いた MeV 線コンプトンカメラを開発している(図 3.2)。反跳電子の飛跡検出器には、独自に開発した  $\mu$ -PIC を用いた Micro Time Projection Chamber( $\mu$ -TPC) を、散乱線の吸収体には無機シンチレータ結晶を用いている。

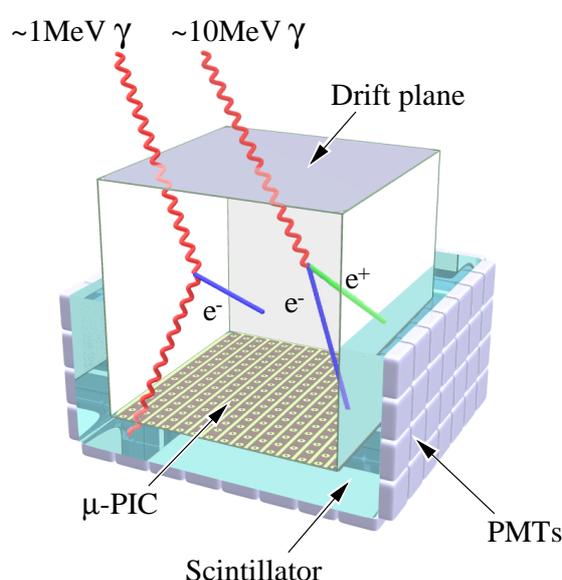


図 3.1: MeV ガンマ線カメラ概念図

### 3.1 散乱体

散乱体では、入射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できることが要求される。

#### 3.1.1 $\mu$ -PIC

$\mu$ -PIC は、図 3.2 のように、輪切りにした比例計数管を並べたような形状をもったガス検出器である。基板はポリイミド、カソード及びアノード電極は銅をニッケルでメッキしたものを使用している。各 Pixel は  $400\mu\text{m}$  ピッチで並んでおり、アノードとカソードで互いに直交する方向に

strip 構造を持っている。これにより、アノードストリップとカソードストリップのコインシデンスを取ることで、高い2次元位置分解能を実現できる。

また、ガス検出器では、放電がしばしば問題になる。 $\mu$ -PIC 以前に二次元の位置分解能を持ったガス検出器として開発されていた MSGC(Micro Strip Gas Chamber) では、Gain を高くすると放電がおき、電極破壊がおこっていた。 $\mu$ -PIC では、Pixel 型の電極構造を採用したことにより、放電による電極破壊は起こらなくなり、MSGC に比べて高いガス増幅率で長時間安定に動作させることができるようになった。

$\mu$ -PIC はプリント技術を用いて製造されており、安価で大規模なものを製造しやすいというメリットもある。現在、10cm 角 (strip 数: アノード 256 本、カソード 256 本) のものと 30cm 角 (strip 数: アノード 768 本、カソード 768 本) のものが稼動している。

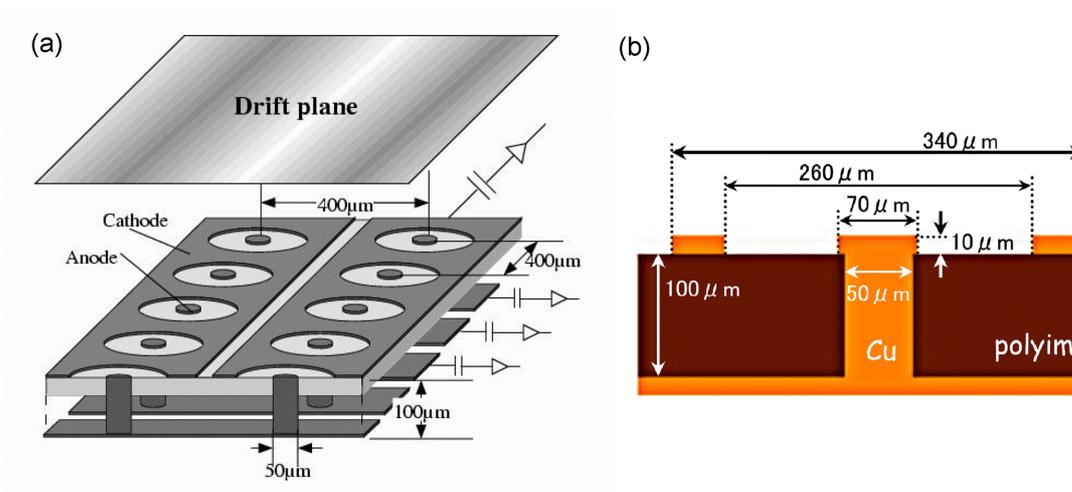


図 3.2:  $\mu$ -PIC の構造 (a) 概観図 [66] (b) 断面図 [62]

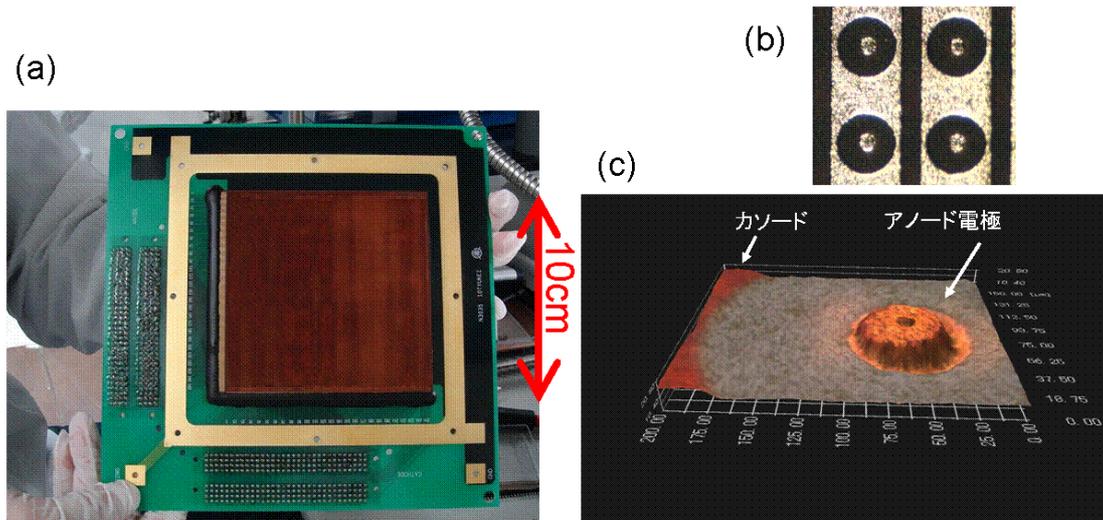


図 3.3: 10cm 角  $\mu$ -PIC の写真

(a) 検出部の写真 (b) 顕微鏡写真 (c) ピクセルの形状 (三次元顕微鏡)

### 3.1.2 GEM (Gas Electron Multiplier)

GEM とは、カプトンフィルムなどの両面に銅を蒸着したシートに、直径  $70\mu\text{m}$  の穴が  $140\mu\text{m}$  Pitch で並んだような構造をしている (図 3.4)。上下の銅の電極間に 300V 程度の電圧をかけると、GEM の穴に電気力線が集中し、強い電場が生成される (図 3.5)。この穴に電子が入ると、電子雪崩を生じ、電子の数が数倍～数十倍になって穴の下から出てくる。

我々は GEM を、 $\mu$ -PIC に対する補助増幅装置として用いている。 $\mu$ -PIC のみで必要なガス増幅率を得ようとする、Anode にかける印加電圧を上げていかななくてはならない。しかし、印加電圧を大きくしすぎると、Anode - Cathode 間で放電がおきやすくなってしまい、長期間安定動作をさせるのが困難になってくる。そこで、 $\mu$ -PIC の前に GEM を挟み、あらかじめ電子の数を増やしておくことで、 $\mu$ -PIC の印加電圧を抑えながら十分なガス増幅率を得ることができる。最終的な Gain は、

$$\text{Total Gain} = \text{GEM の Gain} \times \mu\text{-PIC の Gain} \quad (3.1)$$

となる。

現在 GEM は、厚さや素材、穴の Pitch など異なるいくつかの種類のもが開発されている。

図 3.1

厚さ ( $\mu\text{m}$ )	素材	穴径	Pitch
50	a	70	140
100	液晶ポリマー	70	140
400	G10	300	700

表 3.1: GEM の種類

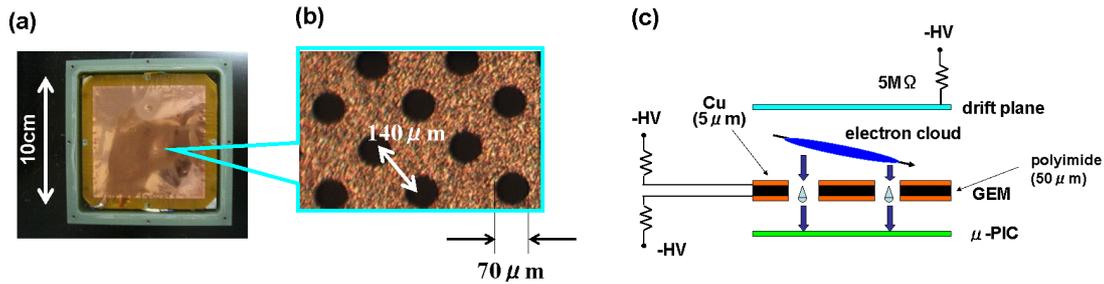


図 3.4: GEM の全体図 (左) とその顕微鏡写真 (右)

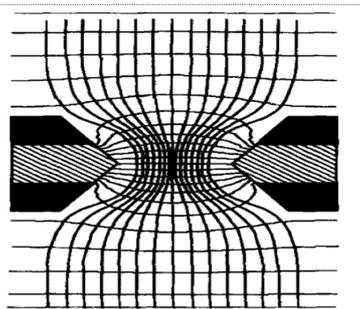


図 3.5: GEM 中の電気力線と電場の様子

### 3.1.3 $\mu$ -TPC(micro-Time Projection Chamber)

荷電粒子が物質の中を通過するとき、その飛跡に沿って電子が電離され、電子雲を形成する。この電子雲に対して Z 方向に数 100keV/cm 程度のドリフト電場をかけると、電子雲はドリフト電場に沿って移動する。Z 方向の基準点に検出器を置いておくと、電子雲の Z 方向の位置によって検出器の信号到達時間に差が生じる。このように信号の到達時間差によって Z 方向の位置を検出し、荷電粒子の 3 次元の飛跡を得る手法を Time Projection Chamber(TPC) という。

我々の MeV 線コンプトンカメラでは、検出部に高い二次元位置分解能を持つ  $\mu$ -PIC を用いている。これにより、荷電粒子の 3 次元飛跡を高い位置分解能で取得することができる。

このような  $\mu$ -PIC を用いた TPC を  $\mu$ -TPC(micro-Time Projection Chamber) と呼んでいる。 $\mu$ -TPC を用いて得られた荷電粒子 (陽子、電子) の飛跡を図 3.7 に示す。

## 3.2 吸収体

吸収体では、散乱体でコンプトン散乱してきた散乱線を吸収し、そのエネルギーと吸収位置を検出する。このような目的から、吸収体には、以下のような性能が求められる。  
 ・ 100keV ~ 数 MeV のガンマ線に対して光電吸収確率が高いこと  
 ・ 散乱体の周りを広く覆えるような大面積が実現可能なこと  
 ・ 高いエネルギー分解能と位置分解能  
 ・ 耐放射線強度

これらの要請から、我々の MeV 線コンプトンカメラでは、吸収体として無機シンチレータ結晶と光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube、PMT) を組み合わせたシンチレーションカメラを用いている。シンチレーションカメラはエネルギー分解能の面では半導体検出器には劣るが、半導

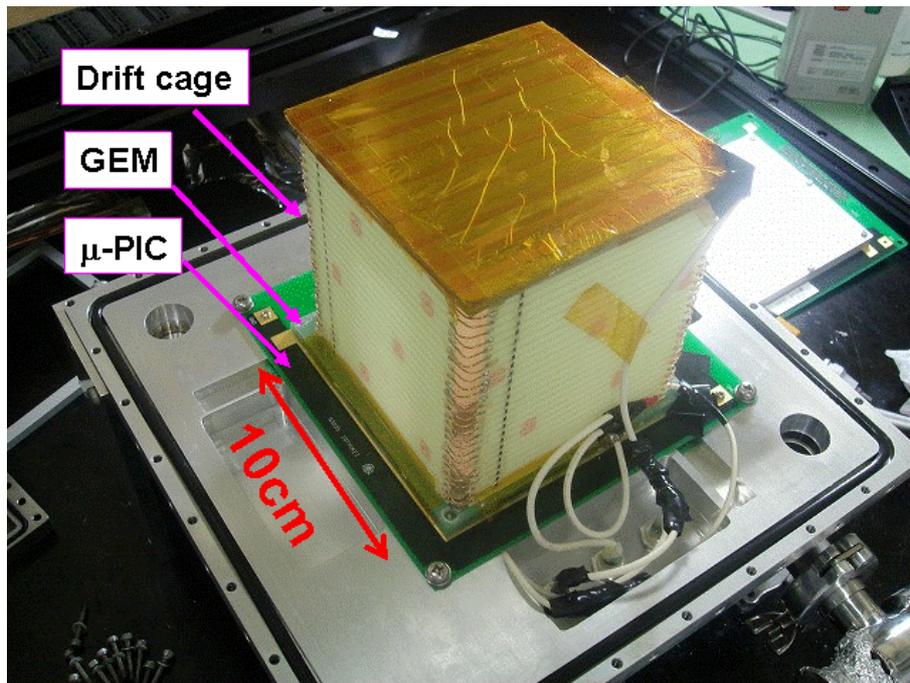


図 3.6:  $\mu$ -TPC の写真

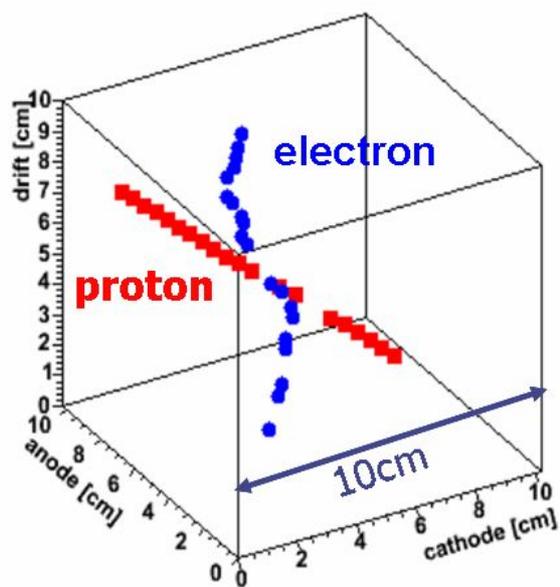


図 3.7:  $\mu$ -TPC で得られる飛跡の例

体検出器よりも安価なために大面積を覆うことができ、厚みのあるものも作成できるのでより効率よく 線を収集することができる。

### 3.2.1 シンチレータ

放射線を吸収したときにに伴う発光過程をシンチレーションと呼び、このような発光過程を用いて放射線を検出できる物質をシンチレータという。シンチレータは気体、有機および無機シンチレータの3つに大別される。

### 3.2.2 気体シンチレータ [79]

気体シンチレータの発光は主に希ガスの原子の放射線による遷移過程で生じる。発光波長領域は紫外領域でシンチレーション光の減衰時間は0.1~10nsec程度で他のシンチレータに比べて短い。ただし気体の密度は固体や液体に比べて小さいことからガンマ線の検出効率は低い。発光量が入射粒子の電荷と質量にほとんど依存しないことから、気体シンチレータは $\alpha$ 粒子や重イオンなどの荷電重粒子のエネルギー測定に用いられている。なお、希ガスは冷却することで、液体シンチレータとして使用する場合もある。

### 3.2.3 有機シンチレータ

有機シンチレータは、検出効率が高い芳香族などが使われており、放射線による分子の遷移過程で発光する。最大発光波長はおおよそ350~450nmの範囲で減衰時間は約30nsec以下である。一般に有機シンチレータは $\alpha$ 粒子や $\beta$ 粒子および高速中性子などを直接検出するのに向いている。一方、炭素や水素など、原子番号が低い物質で構成されているので、ガンマ線に対する光電吸収はほとんど起こらない。よってコンプトン散乱によって生じる連続スペクトルが観測される。有機シンチレータはアントラセンなどを用いた結晶シンチレータ、ひとつないしは複数の溶質に発光剤を混合した液体シンチレータ、ポリスチレンなどの溶質にP-ターフェニールなどの発光剤を混ぜたプラスチックシンチレータ(固体)などの種類がある。他にも水を主成分とした液体シンチレータ[80]やガンマ線の光電吸収を起こすために鉛などを入れたシンチレータもある。

### 3.2.4 無機シンチレータ

無機シンチレータは原子番号が有機レータで使用されていた水素や炭素に比べて大きく、ガンマ線エネルギーに対する光電効果の断面積が十分にあり、ガンマ線測定に有効である。なお無機シンチレータには結晶シンチレータとガラスシンチレータの二つに分けることができる。発光機構は両者とも同じである。しかし結晶シンチレータの出力するシンチレーション光ガラスが10,000光子/MeVのオーダーに対してガラスは最大でも3,500光子/MeVしかない。そのため結晶タイプが使えないような条件下を除き、ガラスタイプは中性子検出器として使用される程度である。

#### NaI(Tl) [93, 94]

NaI(Tl)は1948年にHofstadterによって発見されたシンチレータである。エネルギー分解能がよく、また安価であるために現在でも需要があり、COMPTELでも吸収体として用いられた。[長所] 高エネルギー分解能 [短所] 潮解性あり、へきかい性あり、低阻止能、長い減衰時間、低温で光量が低下

## GSO(Ce)

GSO(Ce) はエネルギー分解能が悪くはなく、下記のような長所があるために、医療用 PET やすざく衛星の Hard X-ray Detector (HXD) にも搭載されている。添加する Ce の量を増やすと減衰時間が短くなり、発光量も変化するが、量が多くなると黄色に変色し、透過率が低下してしまう。そこで Ce の添加量は発光量が最大になる 0.5-1.0 mol % のものが一般的であるが、Zr を 200ppm 程度 GSO(Ce) に添加すると、減衰時間や発光効率を大きく変化させることなく着色を防ぐことが知られている。ただし、120keV 以下では入射線のエネルギーと発行量のリニアリティがやや崩れてくることがわかっている。[長所] 高阻止能、短い減衰時間、強い放射耐性 [短所] へきかい性あり

## LaBr<sub>3</sub>(Ce)

LaBr は発光量が GSO の約 8 倍と非常に大きく、非常にエネルギー分解能のよいシンチレータである。2008 年 1 月現在の光電子増倍管 (PMT) で読み出したときの最高エネルギー分解能は 2.6 % (@662keV, FWHM) で、ほかの結晶と比べても最高の値である [101]。ただし、潮解性が非常に強いために、加工が難しい。また、現在は非常に高価である。[長所] 高エネルギー分解能、良い線形性 [短所] 強い潮解性あり、へきかい性あり

### 3.2.5 光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT)

シンチレータからの信号は光による信号である。これを測定するには光の信号を電気信号にして読み出す必要がある。我々は光検出器として、光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT) を用いている。

PMT の概念図を図 3.8 に示す。PMT に入射してきた光子はまず光電陰極で光電効果を起こし、光電子を放出する。放出された光電子は、電場によって加速され、第一ダイノードに衝突、第一ダイノードからは二次電子が放出される。二次電子は、再び電場によって加速され、第二ダイノードに衝突、同様に電子が放出される。このような過程を繰り返すことによって、電子数が段階的に増幅され、最終的に  $10^4 \sim 10^7$  程度の増幅率を得ることができる。

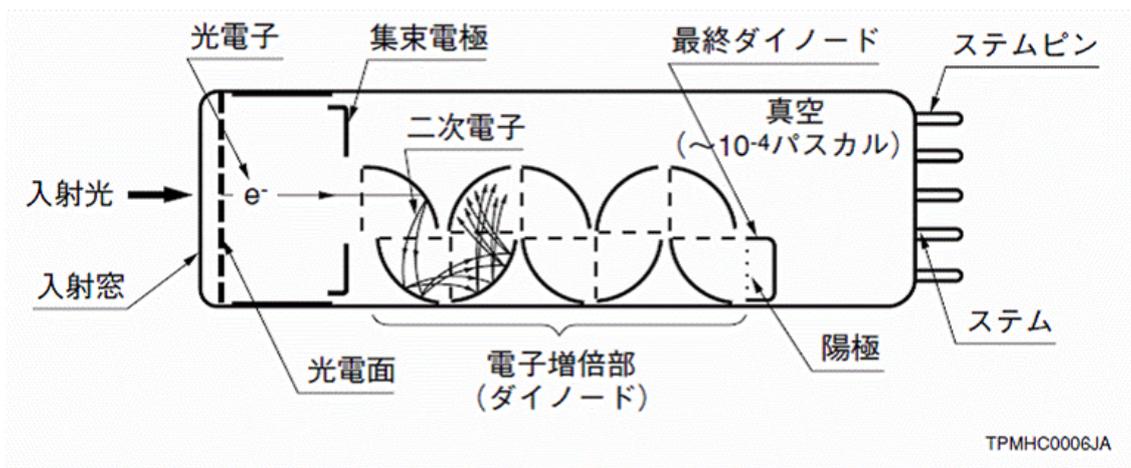


図 3.8: 光電子増倍管の概念図 [knoll]

表 3.2: SMILE 実験の構成

項目	数量など
TPC サイズ	10 × 10 × 15cm <sup>3</sup>
TPC 充填ガス	Xe(80 %) + Ar(18 %) + C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (2 %) 1atm
シンチレータ	GSO アレイ
シンチレータ配置	3 × 3PMTs ( TPC の底部 )、3 × 2PMTs ( TPC の各側面あたり )
システム消費電力	220W

### 3.3 気球実験

我々は、最終的には MeV 線コンプトンカメラを人工衛星に搭載し、sub-MeV から MeV 領域での全天探査を目標としている。現在はその前段階として、気球実験計画 SMILE (Sub-MeV  $\gamma$ -ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) を行っている。2006 年には、プロトタイプ検出器を用いて第一回気球実験 (SMILE- ) を行った。

#### 3.3.1 基本性能 (気球仕様の検出器)

今回打ち上げた検出器の基本性能について述べる。気球実験用に組んだ検出器の概要は表 3.2 および図 3.9 のとおりである。

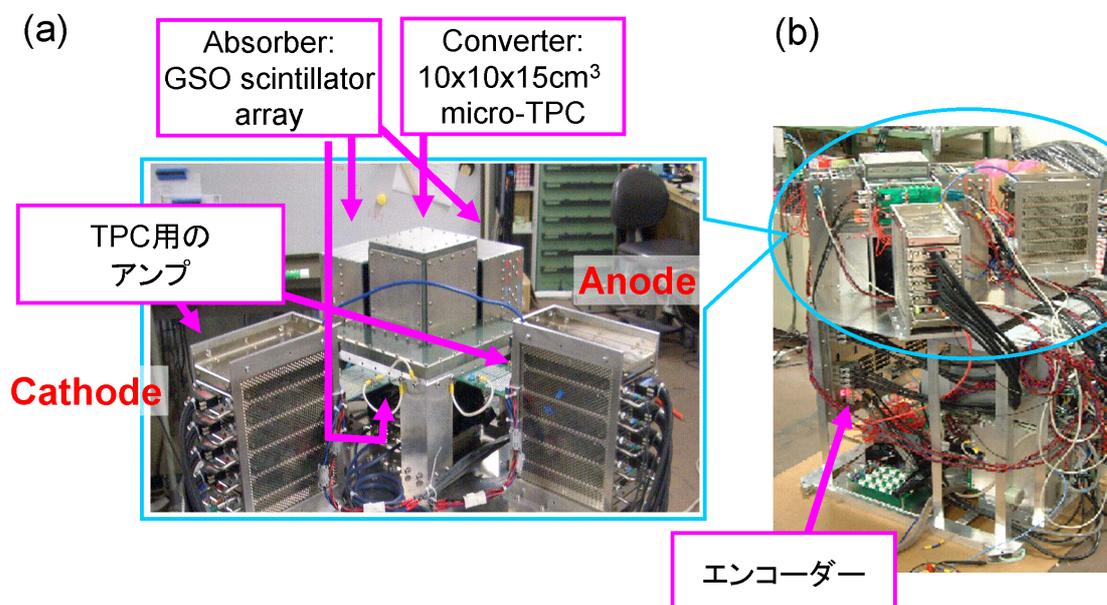


図 3.9: SMILE 実験用の SMILE 実験用の検出器の写真 (a) 拡大図 (b) 全景 ただし (a) では見やすくするためにシンチレータを TPC 全側面を覆わせていない

この検出器に <sup>137</sup>Cs と <sup>54</sup>Mn の二つの線源を、位置をずらして同時に照射した時に得られたスペクトルと再構成図を図 3.10 に示す。また、図 3.11 は、エネルギーレンジを区切った時の再構成図である。

この検出器の角度分解能 ( ARM および SPD ) の FWHM 値とエネルギーの関係は図 3.12 のようになっており、662keV で 14.3 % (FWHM) だった。なお図中にはシミュレーション ( Geant4 )

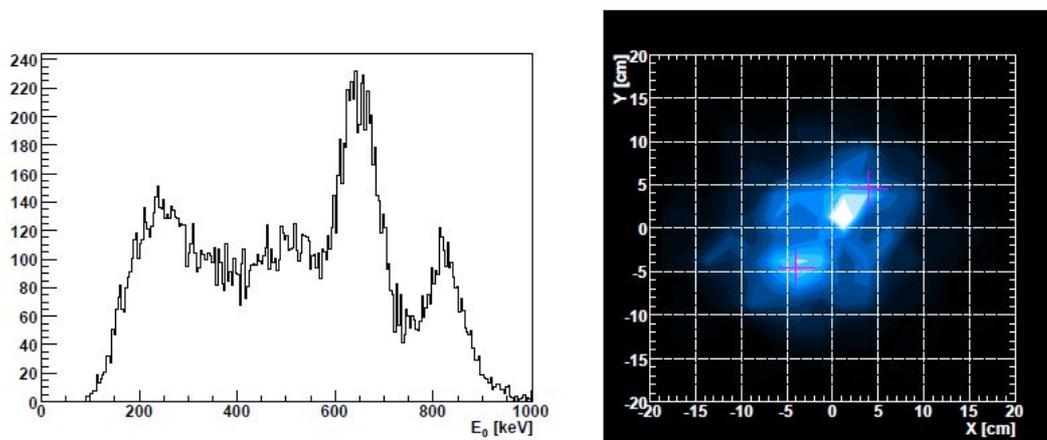


図 3.10: SMILE- 用検出器で取得したスペクトルと再構成図 [78]  
 線源の位置は  $^{137}\text{Cs}$  が (4cm, 4.5cm)、 $^{54}\text{Mn}$  が (-4cm, -4.5cm)

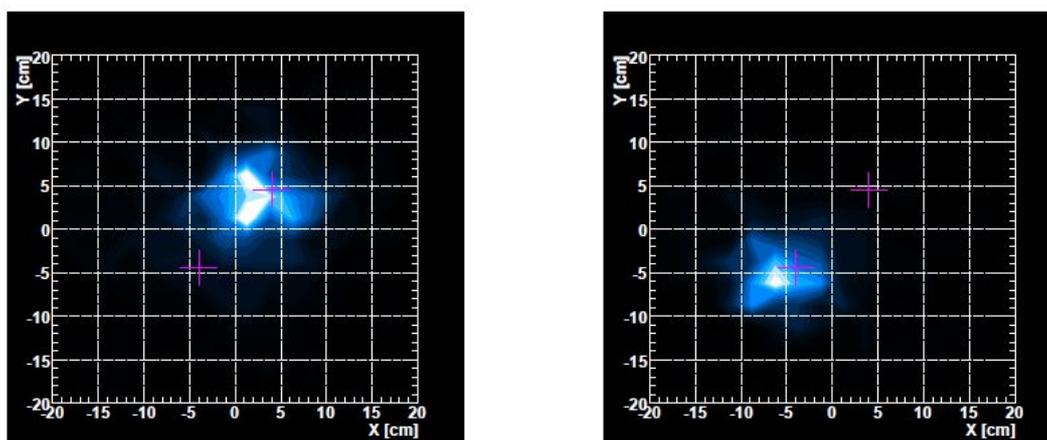


図 3.11: SMILE- 用検出器で取得した再構成図 [78]  
 左: 613-711keV のエネルギーレンジのイメージ 右: 785-885keV のエネルギーレンジでのイメージ

の結果、シンチレータ単体および TPC 単体でのエネルギー分解能 (FWHM) も図示してある。角度分解能、ARM および SPD (HWHM) は図 3.13 のとおりで、662keV でそれぞれ 8.9 ° および 77.8 ° であった。また、視野は約 3str、 $\gamma$  線検出効率は  $\sim 10^{-4}$  であった。

### 3.3.2 フライト

これらの機器を用いて、2006 年 9 月 1 日に、岩手県大船渡市の三陸大気球観測所 (宇宙航空研究開発機構、JAXA) より気球実験を行った (図 3.14)。

なお気球自体は藤倉航装製の FB100-13 (1000,00m<sup>3</sup>) を用いた。また気球と検出器を合わせた総重量は 816kg だった。

気球は 6 時 11 分 (日本標準時) に放球され、高度約 35km (密度約 4 g cm<sup>-1</sup>) でのレベルフライトを 3 時間行った後に、14 時 32 分太平洋に着水し、その後船で回収した (図 3.15)。

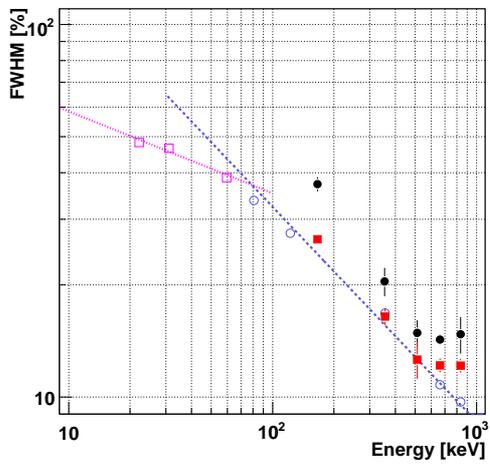


図 3.12: エネルギー分解能とエネルギーの関係  
 黒点: 実測値 (コンプトンカメラ) 赤点: Geant4 (コンプトンカメラ) 青線・点: シンチレータ単体、桃色線・点: TPC 単体

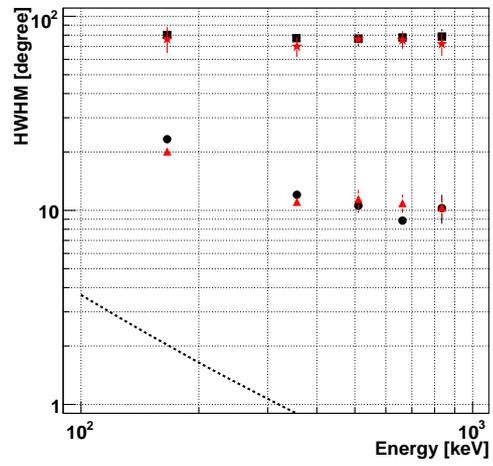


図 3.13: ARM および SPD とエネルギーの関係  
 黒丸印: ARM (実測値) 黒四角印: SPD (実測値) 赤三角印: ARM (Geant4) 赤星印: SPD (Geant4) 黒点線: Doppler broadening

(a)



(b)



図 3.14: 放球の準備と放球 (a) 放球台に乗った観測機器 (b) 放球時の写真

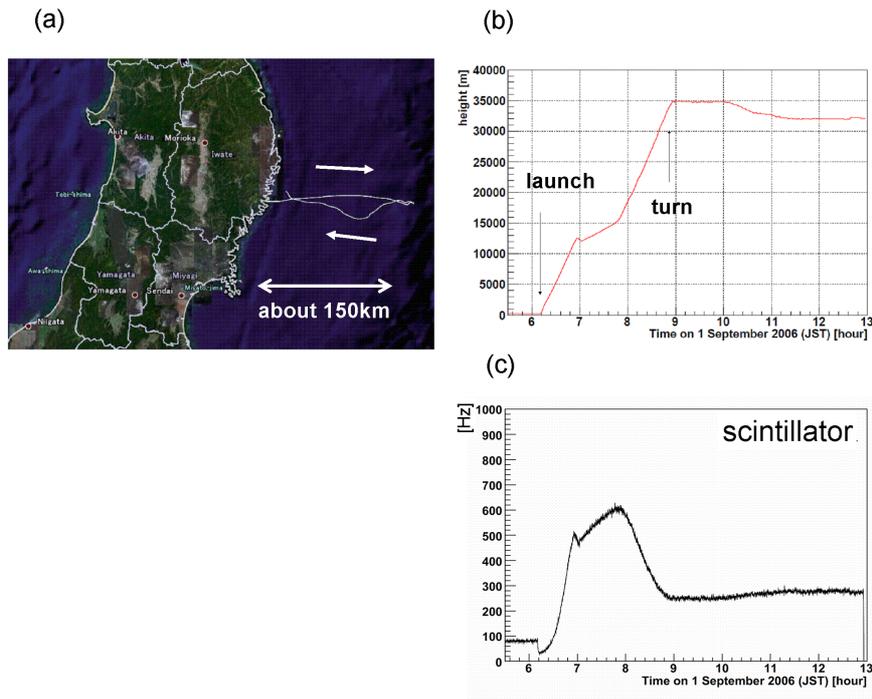


図 3.15: 気球の経路とシンチレータのトリガーレート (a) 航路図 (b) 飛行高度 (c) シンチレータのトリガーレート

図 3.15 c は飛行中のシンチレータのトリガーレートを示している。放球直後に一旦レートが下がっているのは、 $^{40}\text{K}$  からのガンマ線など、地上からの放射線バックグラウンドが少なくなるからである。また、その後高度とともに増加に転じ高度 18km 付近で最大になっているのは 2 次宇宙線のシャワーが高度 15 ~ 20km で一番発達するからである (Pfozter Maximum)。このように、シンチレータは期待通りの振る舞いをした。

またコンプトンカメラとしても、正常に動作することが確認でき、線の再構成に成功し、予想通り 3 時間の観測で約 200 個のガンマ線を検出できた。

### 3.3.3 大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線

今回得られたガンマ線は宇宙からの拡散ガンマ線と宇宙線が地球大気と相互作用することによって生成される大気ガンマ線からなる。

宇宙拡散ガンマ線のフラックス  $f_{cosm}$  は式 (3.2) のように観測高度  $z$  のべきに比例する。

$$f_{cosm} = \mu(1 + p) \exp(-z/\tau) \quad (3.2)$$

ただし、 $\tau$  は平均自由行程、 $p$  はガンマ線が大気中で散乱されたことによるフラックスの減少を考慮した項である。 $p$  はガンマ線のエネルギーに依存しており、たとえば 1MeV で大気の柱密度が  $10 \text{ g cm}^{-2}$  のとき  $p \sim 0.25$  である。そして、 $\mu$  はフリーパラメータである。

一方、大気ガンマ線のフラックスは高度に比例しており

$$f_{atmo} = \nu(1 + k) z \quad (3.3)$$

と書ける。ただし  $k$  は荷電粒子と検出器周りの筐体との相互作用によって生じるガンマ線の割合で、 $\nu$  はフリーパラメータである。

大気の厚みによるガンマ線レートの変化をあらわした曲線を成長曲線と呼び、この曲線は上記の2つフラックスの重ねあわせた関数にて表される。よって上記の関数で best fit させて、そこから2つのフリーパラメータを求めることで、宇宙拡散と大気ガンマ線のフラックスを分けることができる。ただし過去の観測結果から  $f_{cosm} \propto E^{-2.0}$  および  $f_{atmo} \propto E^{-1.7}$  を想定してフリーパラメータを求めた。また求めた宇宙拡散と大気ガンマ線を過去のデータを比べると図 3.17 のようになり、今回われわれの結果が今までの結果と矛盾がないことが分かった。

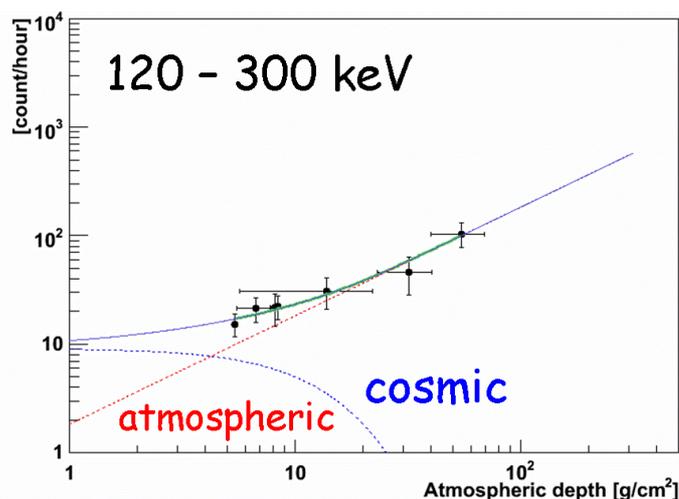


図 3.16: 成長曲線の best fit

黒点：測定値（120～300keVでのガンマ線）、赤点線：宇宙拡散由来、青点線：大気ガンマ線由来、実線：合計

### 3.3.4 SMILE- にむけて

SMILE- において、我々の検出器が上空でも正常に動作することが実証でき、また宇宙拡散線や大気線を予想されたとおりに観測することができた。次期気球実験 (SMILE-) では、かに星雲 (Crab) や Cygnus X-1 といった明るい線天体を観測することが目的となる。そのために、現在我々は以下のような開発を行っている。

#### 感度の向上

SMILE- で用いたプロトタイプ検出器では、そもそも天体からの線の観測を目的とした訳ではなかったこともあり、COMPTEL と比べて有効面積が約 4 桁、感度が約 2 桁小さかった。SMILE- では、Crab や Cygnus X-1 などからの線を観測を目的としており、高度 30km で 3 時間の観測を行った場合にこれらの天体からの線を有意に観測するためには、検出器の感度をプロトタイプよりも 20 倍以上にしなければならない。そのために現在、検出器全体の大型化及び  $\mu$ -TPC に用いるガスの高圧化を進めている。検出器の大型化に関しては、現在  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  の  $\mu$ -TPC と  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  のシンチレーションカメラ (36PMT) を用いた MeV 線コンプトンカメラが稼動中である。実際の SMILE- 実験では、さらに大型化を進めて  $40 \times 40 \times 30 \text{ cm}^3$  の  $\mu$ -TPC と 100 個以上の PMT を用いたシンチレーションカメラからなる検出器を用いる予定である。

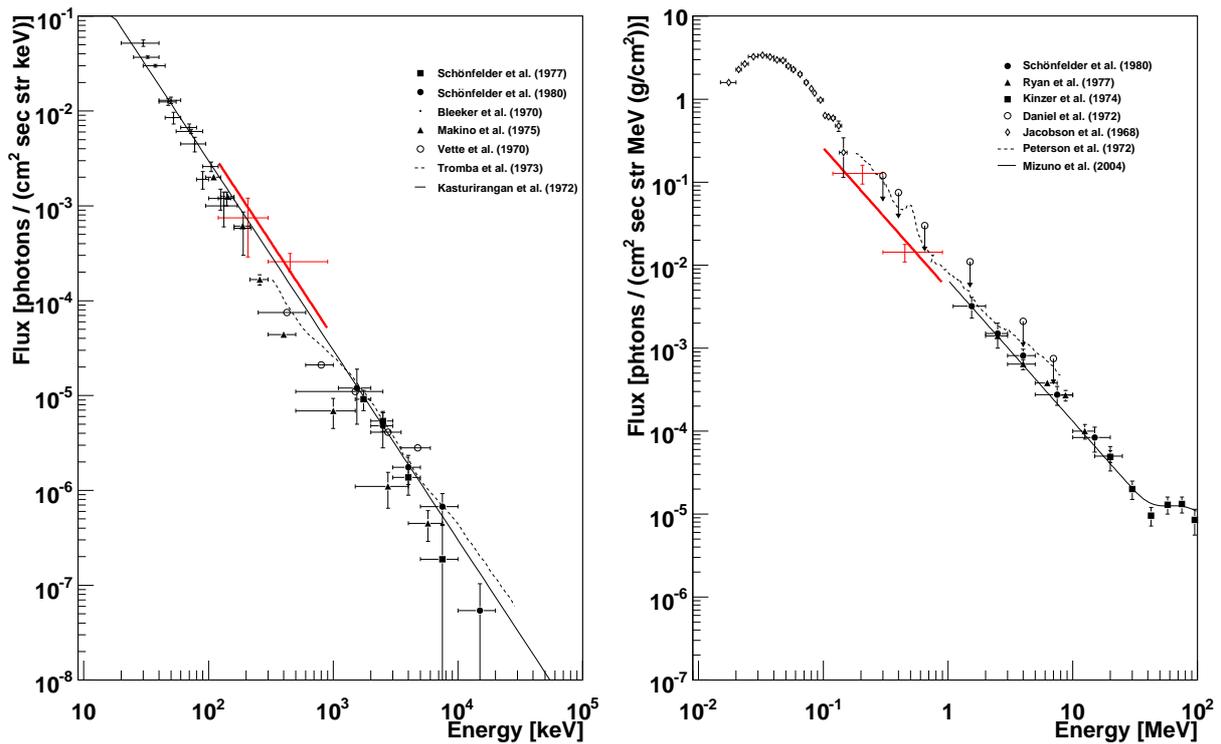


図 3.17: ガンマ線エネルギースペクトル (左図) 宇宙拡散ガンマ線 (右図) 大気ガンマ線 [78]

### 撮像性能の改善

SMILE- 実験では、広がった線のみを観測していたので、撮像性能は必要とされていない。SMILE- では天体を観測するために、撮像性能を高め線の到来方向を正確に決定できなければならない。撮像性能の改善に向けては、エネルギー分解能の優れたシンチレータの開発や  $\mu$ -TPC 内での反跳電子の飛跡をより正確に取るためのシステムの開発を行っている。

### 低消費電力化

検出器の大型化に伴い問題になってくるのが消費電力である。気球実験では電力を電池から供給しているために、使用できる電力量に大きな制限がつく。SMILE1 では、全体で 243W の電力がかかっていた。その内訳は表 3.18 のようになっている。この表より、個々のモジュールでは ASD や CPU、エンコーダなどが大きな電力を消費していることがわかる。全体で見ると、シンチレーションカメラの読み出しモジュール (プリアンプ、Shaper、ADC) が合わせて約 75W の電力を消費しており、気球全体の 30% 近くを占めている。

前述の通り SMILE- では検出器の大型化に伴い、シンチレーションカメラの数が SMILE- の 5 倍から 6 倍になる予定である。また、 $\mu$ -TPC の大型化に伴い、 $\mu$ -PIC 読み出しモジュールは現在の 4 倍の 8 台が必要となる。もしも現在のシステムのままそのまま大型化すると、それだけで消費電力が SMILE- 全体の 240W を大きく超えてしまい、当然気球に搭載することはできなくなってしまう。実際に SMILE- では気球全体でどれだけの電力を使用できるのかは未定であるが、単純に SMILE- と同じだけの電力でまかなうとすると、シンチレーションカメラ 1 台あたりの読み出しにかかる消費電力を 5 分の 1 から 6 分の 1 まで落とさなければならない。

図 3.18: SMILE- で用いられた各モジュール類の消費電力

物	電圧 [V]	電流 [A]	電力 (個 or モジュール) [W]	個数	電力 (合計) [W]
DAC	6	1.82	10.920	1	10.92
	12	0.02	0.240	1	0.24
	-12	0.02	0.240	1	0.24
シンチプリアンプ	6	0.043	0.258	11	2.838
	-6	0.043	0.258	11	2.838
シンチ Shaper	12	0.59	7.080	3	21.24
	-12	0.59	7.080	3	21.24
シンチ ADC	5	0.2	1.000	3	3
	12	0.3	3.600	3	10.8
	-12	0.4	4.800	3	14.4
$\mu$ -PICHV(Anode)	12	0.0925	1.110	1	1.11
$\mu$ -PICHV(D r i f t)	12	0.245	2.940	1	2.94
ASD(80ns)	3	10	30.000	1	30
	-3	3.9	11.700	1	11.7
$\mu$ -PIC メモリ	5	0.4	2.000	1	2
$\mu$ -PIC エンコーダー	3.3	4.25	14.025	1	14.025
FADC	5	1.7	8.500	1	8.5
VME CPU	5	3.5	17.500	1	17.5
パラレルポート	5	0.55	2.750	1	2.75
	12	0.072	0.864	1	0.864
	-12	0.096	1.152	1	1.152
lvds I/O	5	0.5	2.500	1	2.5
scaler	5	2	10.000	1	10
monitor ADC	5	1.5	7.500	2	15
	12	0.048	0.576	2	1.152
discriminator	-12	0.033	0.396	2	0.792
	5	0.6	3.000	1	3
	12	0.02	0.240	1	0.24
	-12	0.3	3.600	1	3.6
LVDS $\rightarrow$ TTLNIM	6	0.5	3.000	1	3
	-6	0.3	1.800	1	1.8
気圧計	12	0.05	0.600	1	0.6
	24	0.01	0.240	1	0.24
傾斜計	12	0.004	0.048	2	0.096
	-12	0.004	0.048	2	0.096
G A	5	0.03	0.150	2	0.3
GPS	5	0.09	0.450	1	0.45
温度センサ	5	0.01	0.050	20	1
ファン	12	0.37	4.440	4	17.76
				合計	243.123

## 第4章 シンチレーションカメラとその読み出し

既に述べたように、我々の MeV 線コンプトンカメラでは散乱線の吸収体にシンチレータと光電子増倍管からなるシンチレーションカメラを用いている。この章では現在のシンチレーションカメラとその読み出しについて紹介する。

### 4.1 シンチレータアレイ

無機シンチレータ結晶を組み上げてアレイ化し、二次元の位置情報を得られるようにしたものをシンチレータアレイという。我々は、現在 MeV 線カメラの吸収体として、GSO(Ce) と  $\text{LaBr}_3$  のシンチレータアレイを用いている (図 4.1、4.2)。気球実験では、大面積を覆う必要があること、また、実際の宇宙環境での利用も考慮したうえで、比較的安価で放射線耐性の高い GSO(Ce) シンチレータアレイを用いている。

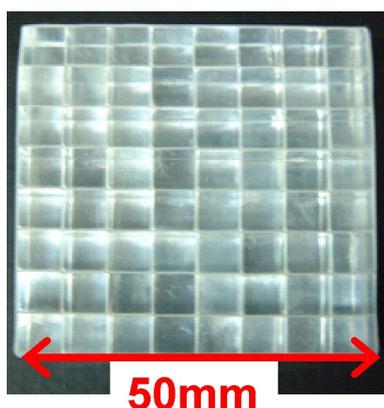


図 4.1: GSO(Ce) 結晶シンチレータアレイ

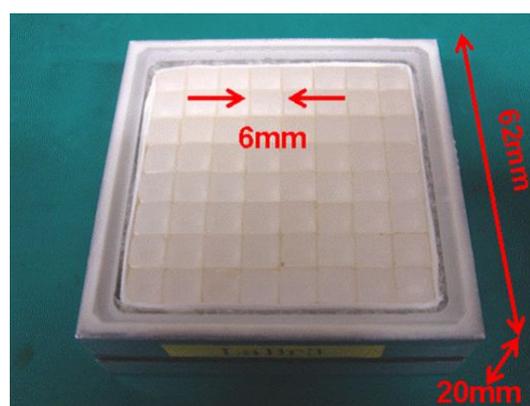


図 4.2:  $\text{LaBr}_3$  結晶シンチレータアレイ

### 4.2 マルチアノード PMT

シンチレーション光の読み出しには、浜松ホトニクス社製フラットパネルマルチアノード PMT H8500 を用いている。この PMT は  $49\text{mm} \times 49\text{mm}$  の正方形の光電陰極に、12 段のメタルチャンネルダイオードと 64ch のアノードから構成されている。有感領域が 89% と非常に広く、H8500 の典型的なゲインは、900V の HV に対して  $10^6$  倍程度であるが、同じ PMT の中でも 64ch のアノード間には 2 倍から 4 倍程度のゲインのバラつきがある。

われわれは、この H8500 にシンチレータアレイをマウントしてシンチレーションカメラとして用いている。

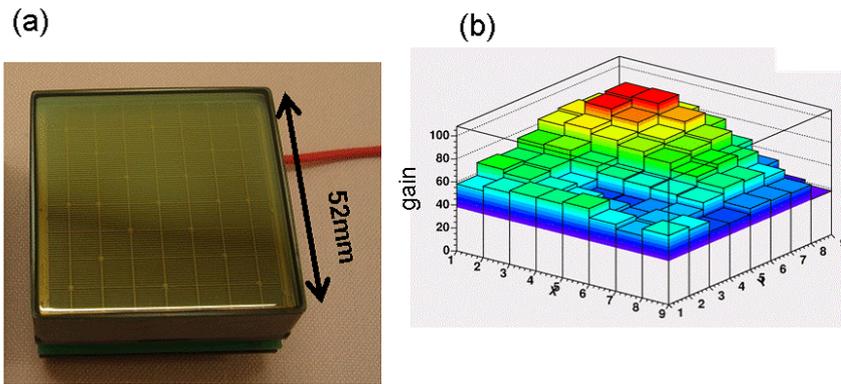


図 4.3: PMT H8500

(a)H8500 の写真 (b) アノードゲインのばらつきの 3 次元図 (最大値を 100 で規格化)

### 4.3 抵抗チェーン

抵抗チェーンは H8500 による 64ch 分の信号を少ない ch 数で読み出すための回路である。

H8500 の 64 個のアノードを抵抗でつなぎ、抵抗分割によって電荷を配分し、4 隅から読み出す。この方法を 4 端読み出しと呼んでいる。

4 隅から読み出された電荷情報を、 $E_i$  ( $i = 1 \sim 4$ ) とすると、PMT からの信号の電荷情報  $E_{total}$  は、

$$E_{total} = \sum_{i=1}^4 E_i \quad (4.1)$$

のように得られる。また、線の 2 次元の吸収位置 ( $x$ 、 $y$ ) は、

$$x = \frac{(E_1 + E_2) - (E_3 + E_4)}{E_{total}} \quad (4.2)$$

$$y = \frac{(E_1 + E_3) - (E_2 + E_4)}{E_{total}} \quad (4.3)$$

のように計算できる。

以上のようにして得られた線吸収位置の再構成図は、図 4.5 の左のようになる。

この図より、 $8 \times 8$  の全 64pixel が綺麗に分離されていることがわかる。しかし、このままではイメージが中央に引っ張られるような形をしており、シンチレーションカメラの各 pixel でエネルギー構成を行うことは容易ではない。そこで、実際の解析では、以下のような処理を行ってイメージの補正を行い、その上でエネルギー構成などを行っている。

まず、元のイメージから各 pixel に対応する 64 個のピーク点 ( $X_i, Y_i$ ) を抽出する。次に各ピーク位置に対して補正後のピーク位置 ( $X'_i, Y'_i$ ) を用意し、( $X_i, Y_i$ ) から ( $X'_i, Y'_i$ ) へ座標変換する変換写像を  $f$ 、 $g$  として、この  $f$  と  $g$  を求める。

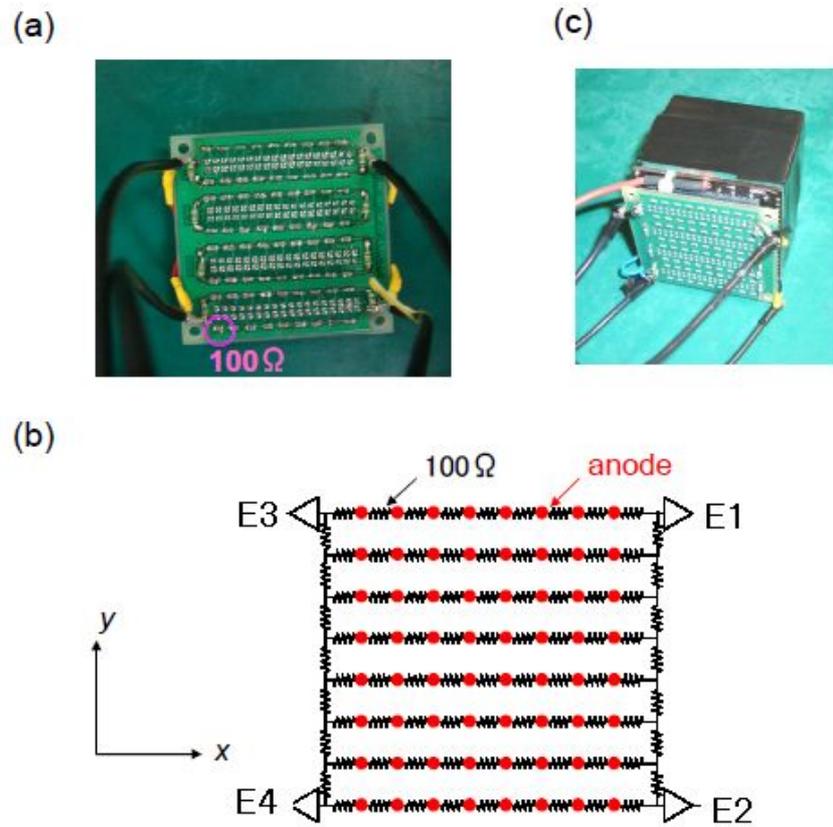


図 4.4: 抵抗チェーンの写真、回路図、PMT と接合した写真

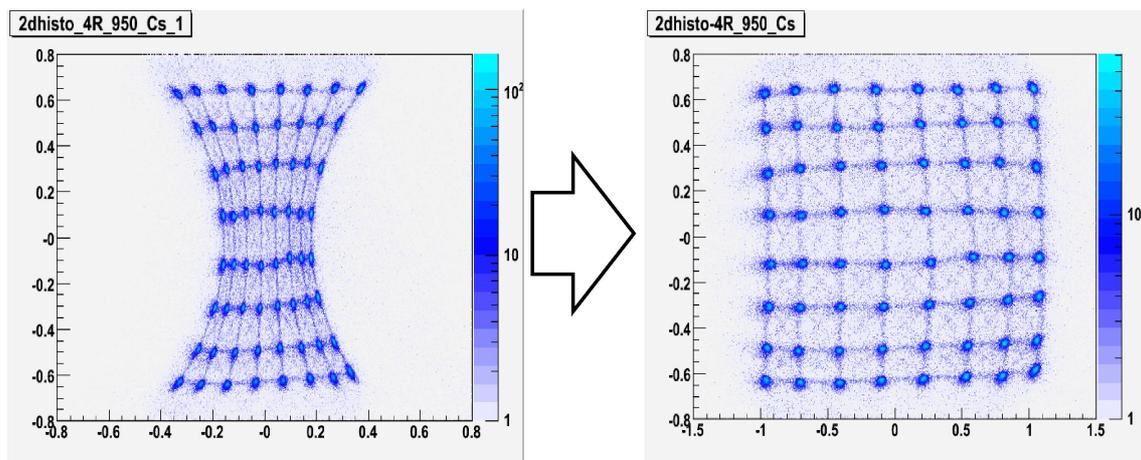


図 4.5: 抵抗チェーンによるイメージ

実際には  $f$ 、 $g$  に 12 次の多項式

$$f = \sum_{i=0}^n a_i X_i + b_i Y_i \quad (4.4)$$

$$g = \sum_{i=0}^n c_i X_i + d_i Y_i \quad (4.5)$$

を仮定して、元のイメージのピークの位置に対してフィットさせることで  $f$  と  $g$  を求めている。このようにして得られた  $f$ 、 $g$  を元のイメージに作用させて得られた補正後のイメージが図 4.5 の右図である。

SMILE- 実験や後述の 30 cm シンチレーションカメラでは、さらなる省電力化やモジュールの数を減らすために、H8500 3 台の 192 アノードを同様に抵抗でつなげ、4 端で読み出す 3 連結抵抗チェーン (図 4.6) を用いている。

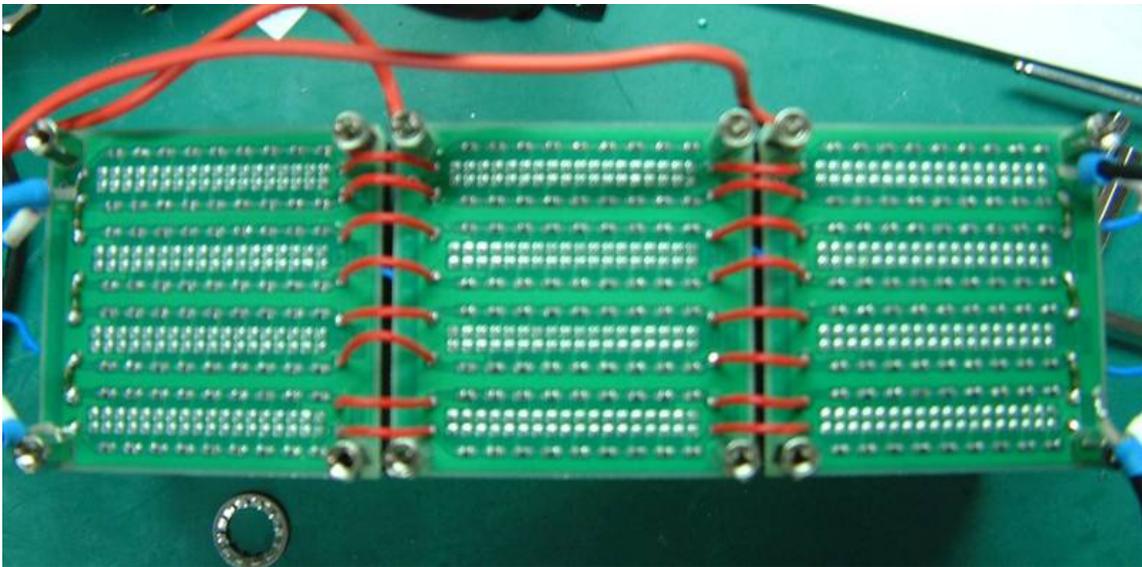


図 4.6: 三連結抵抗チェーン

#### 4.4 シンチレーションカメラのデータ収集系 (Data Acquisition System, DAQ)

シンチレーションカメラは、図 4.7 のような DAQ を用いて読み出される。抵抗チェーンの 4ch 分の信号は、まず前置増幅器で増幅される。さらに、波形整形増幅器で整形され、ピークホールド ADC(PHADC) に入力される。前置増幅器では、同時に 4ch 分の和を出力する。この和は波形弁別器に入り、スレッシュホールドを超えたものに対してはトリガー信号を出力される。トリガー信号は適当に整形された上で PHADC に入力され、ゲート信号となる。最終的に PHADC でアナログ/デジタル変換された信号を、CPU で処理している。

これらのモジュールの消費電力より計算すると、3 連結抵抗チェーンを用いて読み出しを行ったときの、トリガー信号を除いたアナログ部の読み出しにかかる消費電力は、1 PMT あたり 2.1 W となる。

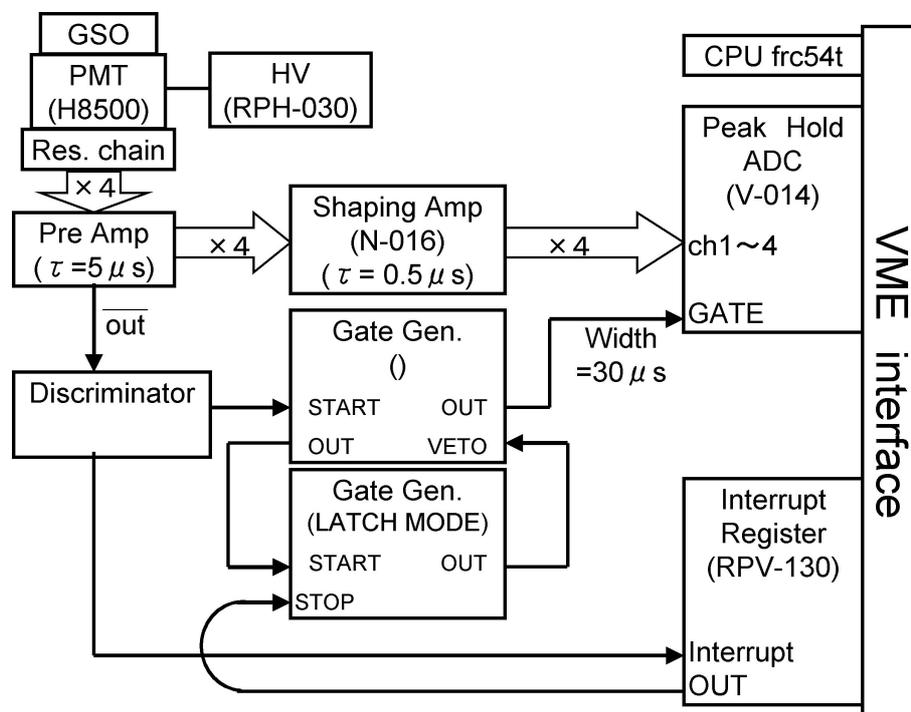


図 4.7: シンチレーションカメラの DAQ

規格	NIM モジュール (1 U)
ch 数	16ch
時定数	$0.5 \mu s / \text{event}$
消費電力	14W

表 4.2: 波形整形増幅器の諸性能

## 4.5 30cm角シンチレーションカメラアレイ

抵抗チェーンにより3連結されたPMT12セットを用いた、30cm角(PMT6 × 6台)の大型シンチレーションカメラアレイが稼動している(図4.9)。このシンチレーションカメラアレイに $^{137}\text{Cs}$ を全面照射して得られた再構成図を、図4.10に示す。この図より、シンチレーションカメラアレイ全面で各ピクセルが分離されていることがわかる。このシンチレーションカメラアレイの性能を表4.4に示す。

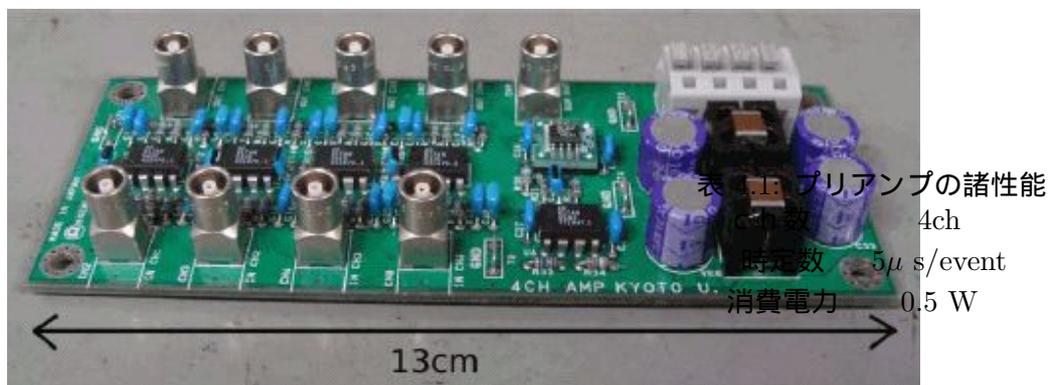


図 4.8: 4ch プリアンプ

規格	VME モジュール (6U)
ch 数	16ch
消費電力	9.4 W
ADC	14bit
処理時間	$\mu$ s/event

表 4.3: Peak Hold ADC の諸性能



図 4.9: 30cm 角シンチレーションカメラ

## 4.6 ASIC を用いた PMT 読み出しシステム

低消費電力な回路を製作する方法の一つとして、ASIC(Application Specific Integrated Circuit)を用いるという方法がある。ASIC は、その名前の通り特定の用途のための機能を持たせた集積回路のことである。そのため本来は目的に応じて設計、開発されるものであるが、実際に ASIC を開発するには多大なコストと時間がかかってしまう。そこで我々は、既存の ASIC を利用した PMT 読み出しモジュールを使用することにした。

CP80168 は、32ch の CMOS ASIC である IDEAS 社製 VA/TA を 2 つ実装した H8500 専用読み出しモジュールであり、H8500 の 64 個のアノード全ての信号を 1ch ずつ読み出すことができる。また、寸法も H8500 にあわせて作られており、非常にコンパクトである。CP80168 で得られたデジタルデータは RJ45 コネクタを通して LVDS 信号として出力され、専用のデータプロセッサ CP80057(VME モジュール) を使って読み出す。CP80168 の DAQ を図 4.12 に示す。

CP80168 の基本性能は表 4.5 のようになっている。

ただし、CP80168 は入力ダイナミックレンジが 35pC と狭く、PMT のゲインを大きくしすぎると信号の大きさがダイナミックレンジを超えてしまう。そこで、PMT の各 ch のゲインに合わせて信号を減衰させる減衰基板を作成し PMT を通常のゲイン ( $\sim 10^6$  倍) で動作させてもダイナミックレンジを超えないようにした。

この CP80168 と減衰基板を用いた読み出しシステムにシンチレーションカメラを取り付け、性能評価を行った。 $^{137}\text{Cs}$  を全面照射したときの再構成図とスライスイメージ、及びスペクトルを図 5.14 に示す。二次元再構成図およびスライスイメージより、 $8 \times 8$  の各ピクセルがきれいに分離できていることがわかる。

CP80168 を用いて読み出したときの性能を表 4.7 に示す。

面積	30cm × 30cm
PMT 数	36 台
エネルギー分解能	11%@662keV(FWHM)
ダイナミックレンジ	80-800keV
消費電力	97W(1PMT あたり 2.7W)

表 4.4: 30cm シンチレーションカメラアレイの諸性能

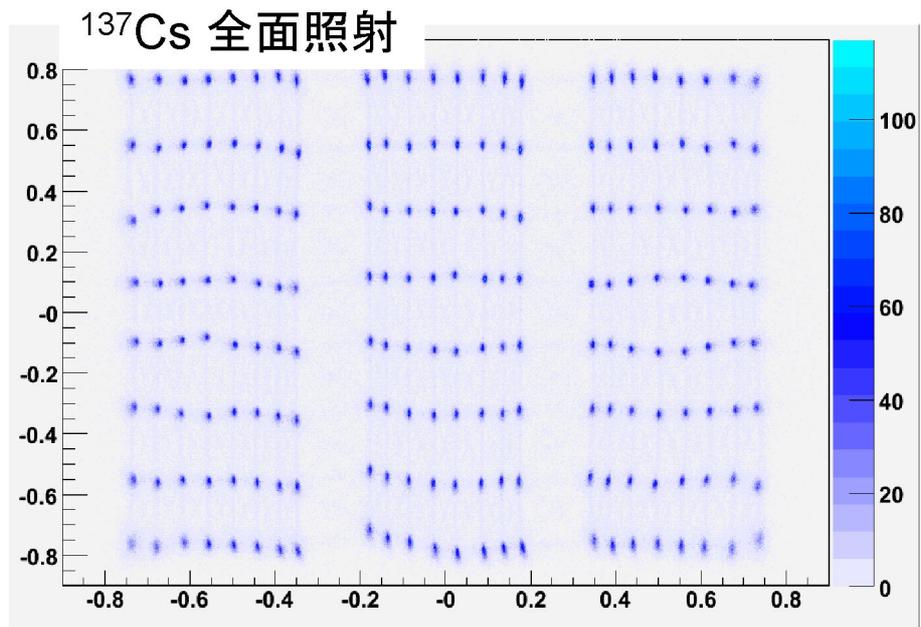


図 4.10: シンチレーションカメラ再構成図 ( $^{137}\text{Cs}$  全面照射)

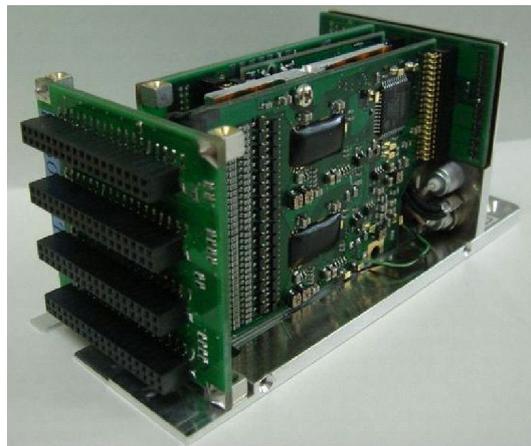


図 4.11: CP80168 の外観と内部

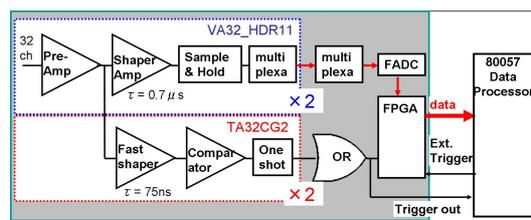


図 4.12: CP80168 の DAQ

回路数	64ch
ADC	Sample and Hold 12bit
ダイナミックレンジ	35pC
処理時間	約 80 $\mu$ s/event
サイズ	52mm × 52mm × 115.4mm
質量	210g
電源電圧	± 4V
消費電力	1.18W

表 4.5: CP80168 の諸性能

形状	VME6U, 1 幅
VME バス	A24D32
電源	+5V (VME バスより供給)
入力ポート	4 ポート
消費電力	約 1.5W

表 4.6: CP80057 の諸性能

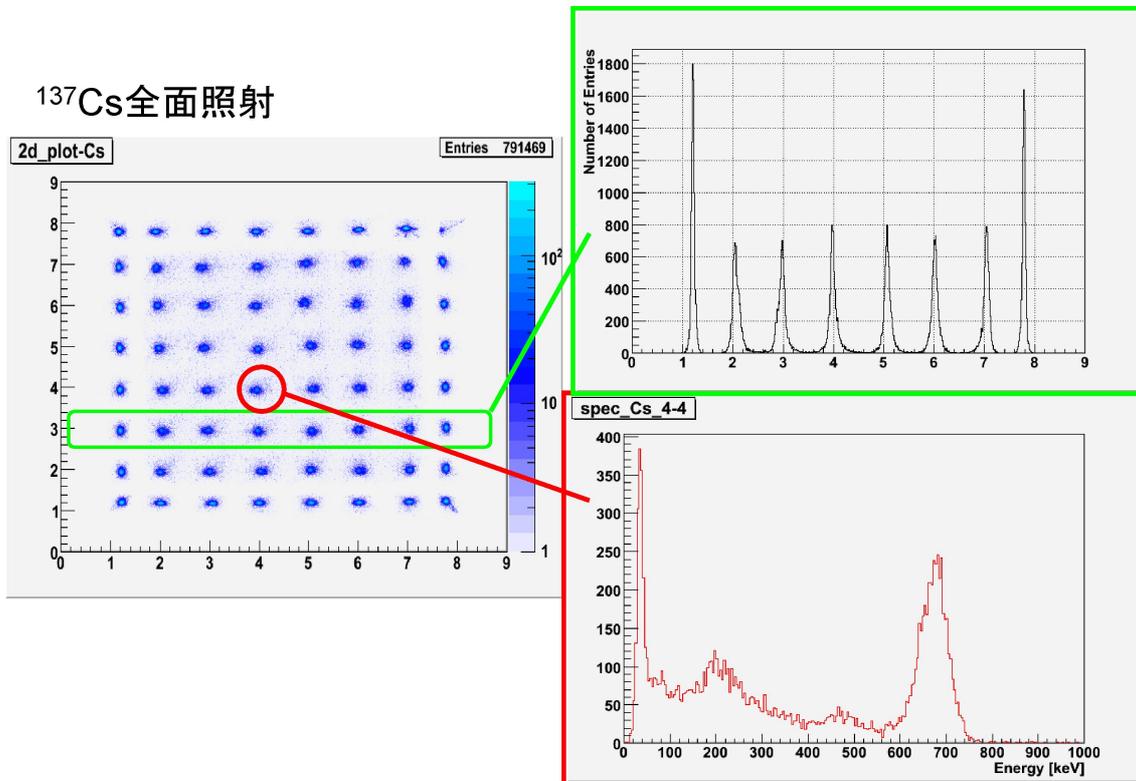


図 4.13: CP80168 で読み出した再構成図とスペクトル ( $^{137}\text{Cs}$  全面照射)

## 4.7 SMILE- におけるシンチレーションカメラへの要請

既に述べたとおり、時期気球実験 SMILE- では、検出器の大型化に伴い搭載されるシンチレーションカメラの台数も大きく増える予定であるため、シンチレーションカメラ 1 台あたりの読み出しにかかる消費電力の削減が必要になっている。また、 $\mu$ -TPC の大型化に伴い、よりエネルギーの大きい電子の飛跡が得られるため、シンチレーションカメラの方でもより高エネルギーの線まで測定できることが望ましい。

表 4.8 に、現状のシンチレーションカメラの性能と、SMILE- におけるシンチレーションカメラへの要請をまとめる。

エネルギー分解能	11.5%@662keV(FWHM)
ダイナミックレンジ	80-800keV
消費電力	1.3W/PMT

表 4.7: 30cm シンチレーションカメラアレイの諸性能

表 4.8: SMILE- におけるシンチレーションカメラと SMILE- での要請

	搭載 PMT 数 (個)	エネルギー分解能 @662keV(FWHM)	ダイナミックレンジ	消費電力 [/PMT]
SMILE-	33	~ 11%	80-800keV	2.7W
SMILE-	100-200	11% 以下	80-1000keV 以上	400mW 以下

## 第5章 ASICを用いない、低消費電力なシンチレーションカメラ読み出しシステムの開発

CP80168 を用いた読み出しでは、これまでのシステムと同等の性能を達成することができた。しかし、CP80168 では電荷の入力範囲が狭く、PMT ごとに適した減衰基盤を作らなければならない。またベースラインの揺らぎが大きいため、使いにくいシステムになってしまった。

一方ここ数年で、大幅に省電力化、小型化されたオペアンプや ADC などが市場に出回るようになってきている。そこで我々はクリアパルス社と共同で、ASIC を用いずに、これら低消費電力なディスクリートな回路要素からなるヘッドアンプモジュール CP80190 を開発し、その性能評価を行った。

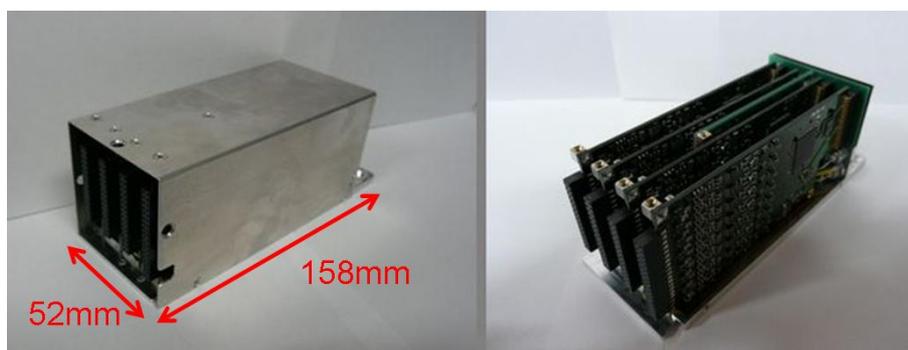


図 5.1: CP80190 の外観 (左) と内部 (右)

### 5.1 CP80190 の概要

CP80190 は、CP80168 と異なり CMOS-ASIC を使わずに、ディスクリートな回路要素で構成された H8500 専用読み出し用モジュールである。4 枚のボードの表裏各面に、8ch 分の回路が実装されており、64ch での読み出しを行う。一つ一つの素子に省電力なものを選択し、さらにその動作電圧の一番低い領域で使用することで、全体としての消費電力を低く抑えている。ディスクリートな回路でできているため検出器に合わせてダイナミックレンジや時定数を調節することができ、またベースラインの揺らぎも小さい。

CP80190 の諸性能を表 5.1 に記す。

ch数	64ch
サイズ	52mm × 52mm × 136mm
電源電圧	± 4V
消費電力	1.18W
ADC	Sample and Hold 12bit
処理時間	20 $\mu$ s/event

表 5.1: CP80190 の諸性能

### 5.1.1 回路図

CP80190 の内部の回路図を図 5.2 に示す。

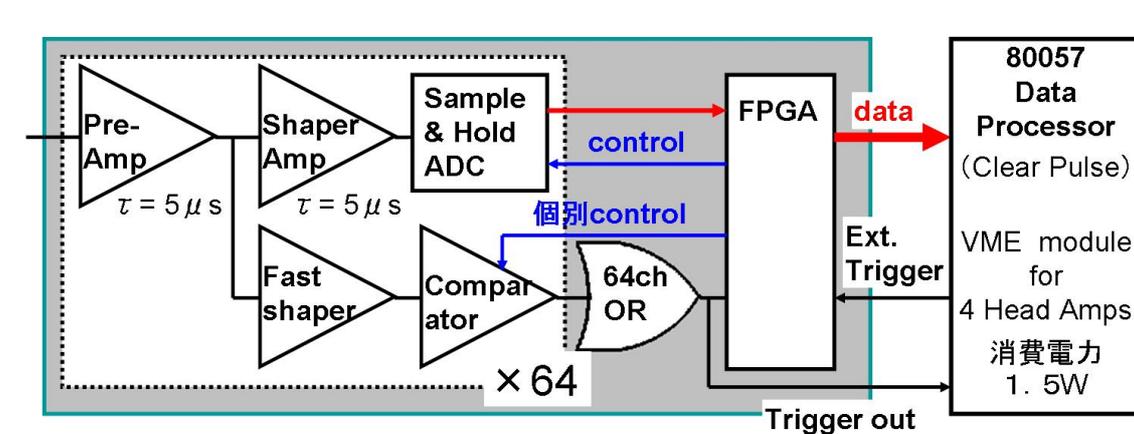


図 5.2: CP80190 の回路図

入力電荷は、最初にプリアンプで電荷積分される。ここで、プリアンプにつける帰還容量の値を変えることで、入力電荷に対するダイナミックレンジを調整できる。プリアンプからの信号は二つに分けられ、一方は早い波形整形増幅器に入力され、波形弁別器を通してトリガー信号を生成する。トリガー信号は 64ch 分をまとめた上で後段の FPGA に送られる。プリアンプからのもう片方の信号は、遅い波形整形増幅器を通してからサンプル アンド ホールド ADC に入力される。この ADC は、FPGA から送られてくるトリガー信号を元に波形を取り込んで AD 変換し、そのデータを FPGA に送る。こうして得られた 64ch 分のデジタルデータは、CP80190 の背面にあるポートから出力され、CP80168 と同じように DP ボード CP80057 で処理される。

### 5.1.2 帰還容量の選択

CP80190 は、プリアンプの帰還容量を変更することで入力電荷のダイナミックレンジを比較的簡単に調整、変更することができる。そこで、シンチレーションカメラに 1MeV の線が入射したときに PMT のアノードから出力される信号の電荷量を以下の式より見積もった。

$$\text{charge} = L \times \Xi \times \eta \times \sigma \times e \quad (5.1)$$

ただし、LはGSOの発光量(14000[photon/MeV])、 $\Xi$ は結晶から光電面までの伝達効率(～90%)、 $\eta$ はPMTの光電面における量子効率(～30%)、 $\sigma$ はPMTでの増幅率(～ $10^6$ ) $e$ は素電荷( $1.6 \times 10^{-19}C$ )である。これらの値を代入すると、1 MeVのガンマ線に対するH8500のアノードからの信号の電荷量は約700pCであると見積もれる。

今回の回路構成では、プリアンプの帰還容量あたりのダイナミックレンジは2.38pC/pFである。したがって帰還容量を350pFとすれば1MeVまでのガンマ線を測定できるはずである。コンデンサの容量の選択の制限より、今回は余裕を持って帰還容量を390pFとした。

## 5.2 テストパルスを用いた基礎性能の測定

CP80190にテストパルスを入力し、このモジュールの回路系に関する種々の性能を測定した。テストパルスは矩形波を図5.3のような回路に矩形波を入力することによって生成した。GSOシンチレータからの信号は、減衰時定数が約60nsなので、これに近くなるように $R=50\Omega$ 、 $C=1000pF$ とし、減衰時定数 $\tau=CR=50ns$ のテストパルスを用いて測定を行った。100pCのテストパルスに対する前置増幅器及び波形整形増幅器の出力を図5.4、5.5に示す。

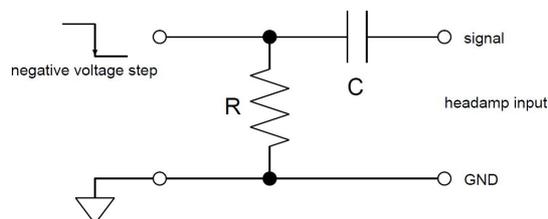


図 5.3: テストパルス入力回路

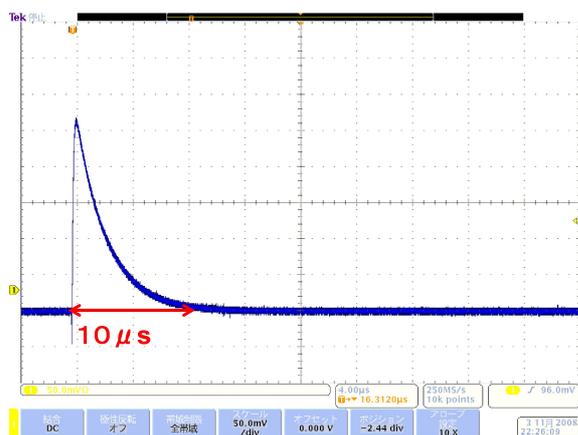


図 5.4: 前置増幅器の出力波形

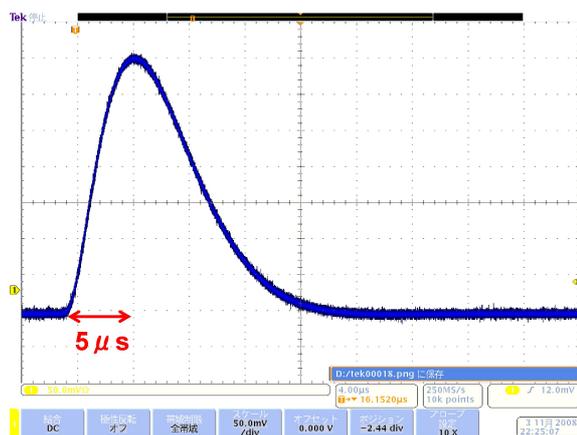


図 5.5: 波形整形増幅器の出力波形

### 5.2.1 線形性

最初に回路の線形性を測定した。CP80190の全64chに10pCから650pCのテストパルスを入力し、線形性を評価した。ch1にテストパルスを入れたときの入力電荷と出力されたADC値の結果を図5.6に示す。

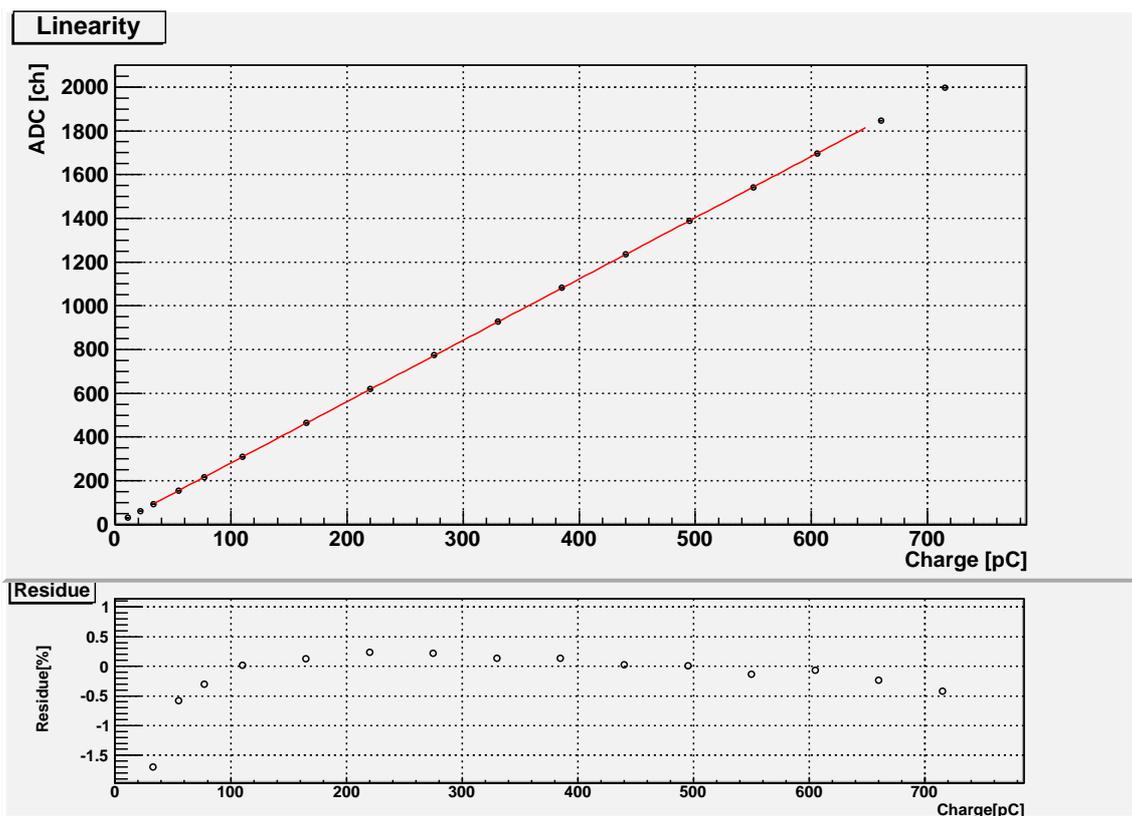


図 5.6: CP80190 のテストパルスに対する線形性  
 上：横軸入力電荷、縦軸 ADC 値 下：横軸入力電荷、縦軸線形性からの誤差

この結果より、入力電荷 50pC ~ 600pC の間では、全ての ch で  $\pm 1\%$  以内の線形性を保持していることがわかった。線形性からのずれの原因としては、省電力化のために各素子、特にプリアンプの動作電圧の一番低いところで使用しているためだと思われる。

## 5.2.2 一様性

次に、64ch 各チャンネルでの回路の応答の一様性を評価した。上で求めた 64ch 分の直線の傾きから各チャンネルでのゲインを求めた。結果を図 5.7 に示す。

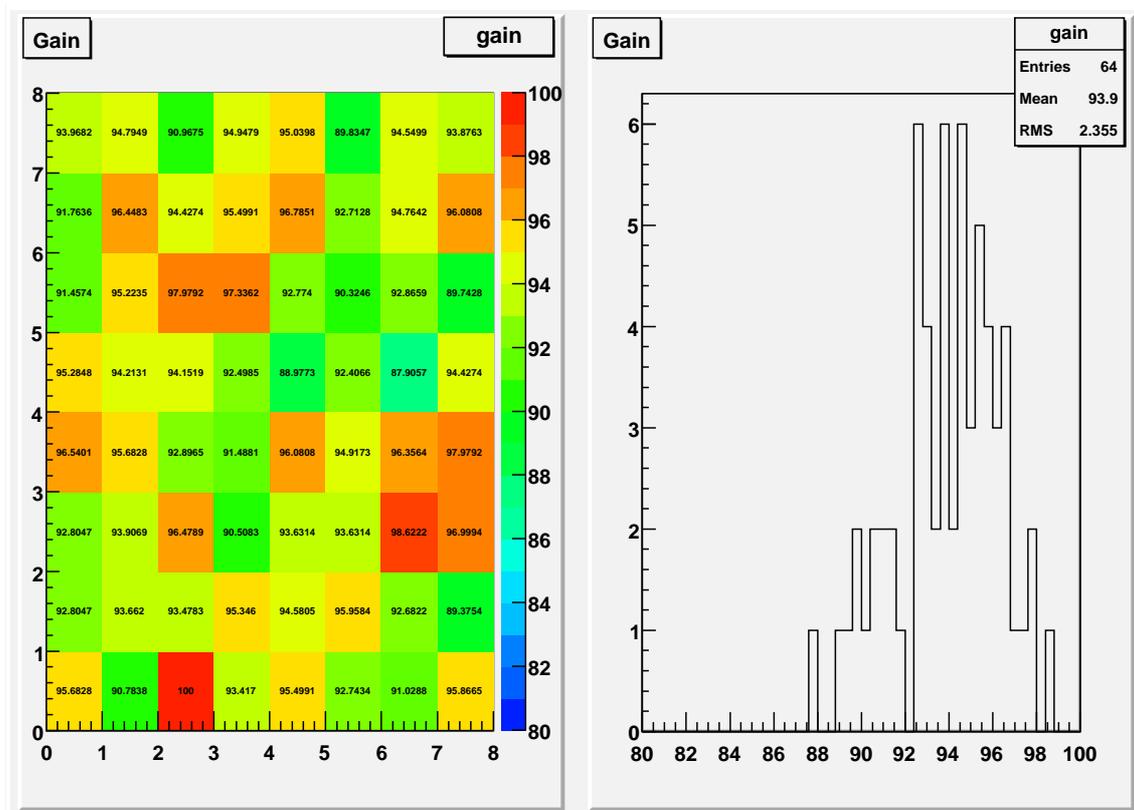


図 5.7: CP80190 の回路応答の一様性Gain 最大の ch を 100 で規格化

この図より、CP80190 の各 ch には、 $\pm 5\%$  程度の応答のバラつきがあること、またそのバラつきは 64ch で一様にバラついていることがわかる。回路のゲインを決める要素としてプリアンプについている帰還容量の値があるが、このコンデンサの製造バラつきが  $\pm 5\%$  程度あるので、今回得られた各 ch での Gain のバラつきはこれに由来するものと考えられる。

## 5.2.3 クロストーク

次に、回路のクロストークについて評価を行った。ここでいうクロストークとは、回路のある ch に信号を入力したときに、その影響で他の ch にまで信号が観測されてしまったりノイズが出てしまったりすることである。

ch 28 に 600pC のテストパルスを入れたときの、全 64ch の ADC 値を図 5.8 に示す。

テストパルスを入れた ch28 は ADC 値で 1789 を示しているが、他の ch は全て 1 付近を示しており、ch28 に入力した信号の影響は全く受けていないことがわかる。また、誤差は全ての ch で 1 以下であるので、ノイズも乗っていないことがわかる。

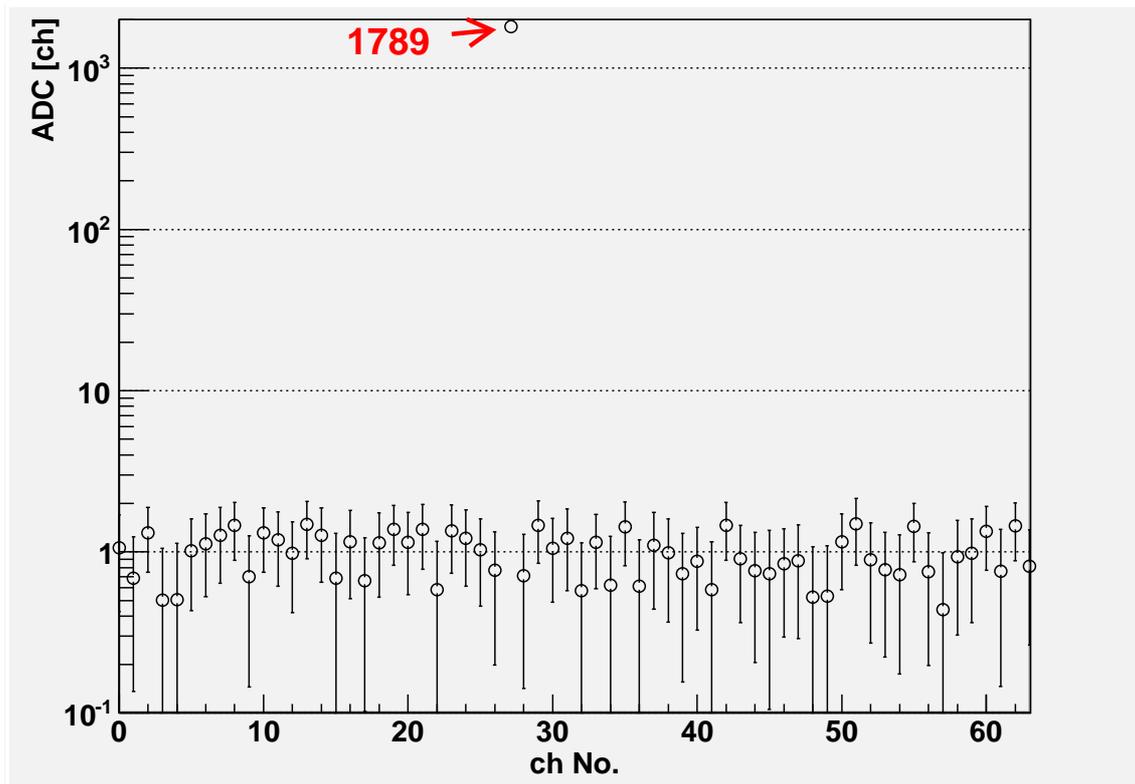


図 5.8: CP80190 のクロストーク

### 5.3 シングルアノードPMTを用いたヘッドアンプユニットの評価

CP80190のテストパルスに対するリニアリティを確認できたので、実際に、シンチレータ結晶及びPMTを用いて線源からのスペクトルを取得した。シンチレータには、10mm、高さ30mmのGSO結晶(図5.9を用い、PMTにはSingle Anode PMT R6231を使用した。放射線源としては、 $^{133}\text{Ba}$ (主な線エネルギー31.8、81、276、303、356、384keV)、 $^{57}\text{Co}$ (122keV)、 $^{139}\text{Ce}$ (166keV)、 $^{22}\text{Na}$ (511、1275keV)、 $^{137}\text{Cs}$ (32、662keV)、 $^{54}\text{Mn}$ (835keV)、 $^{60}\text{Co}$ (1173、1333keV)の7種を用いた。

各線源に対するスペクトルを図5.10に示す。

このスペクトルより、 $^{133}\text{Ba}$ の31.8keVのピークから、 $^{60}\text{Co}$ の1333keVのピークまでが確認できる。また、各線源からの線のエネルギーに対して、ピークとなるADC値をグラフにすると、図5.11のようになる。

この結果より、シンチレータからの信号に対して、80keV~1300keVの範囲で線形性を保持していることがわかった。80keV以下の領域では線形性が崩れているが、これは前述したGSO結晶の性質によるものであると考えられる。

各線源からの線に対するエネルギー分解能(FWHM)をグラフにすると、図5.12のようになる。図5.12中の線は各データ点を式5.2でフィットした線である。

$$\text{Energy Resolution}(\Delta E/E) = \Lambda \left( \frac{\text{Energy}}{662\text{keV}} \right)^{-\Gamma} \quad (5.2)$$

ここで、 $\Lambda$ は662keVの線に対するエネルギー分解能、 $\Gamma$ は線のエネルギーに対する分解能のべきを示している。今回の結果から $\Delta = 7.65 \pm 0.32$ 、 $\Gamma = 0.497 \pm 0.018$ 、という値が得られた。

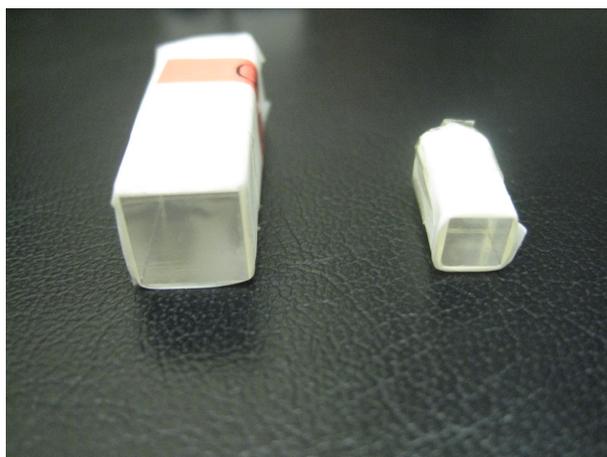


図 5.9: 10 × 10 × 30mm<sup>3</sup>GSO 結晶 (左)、右は GSO シンチレータアレイに使われる 6mm 角のもの

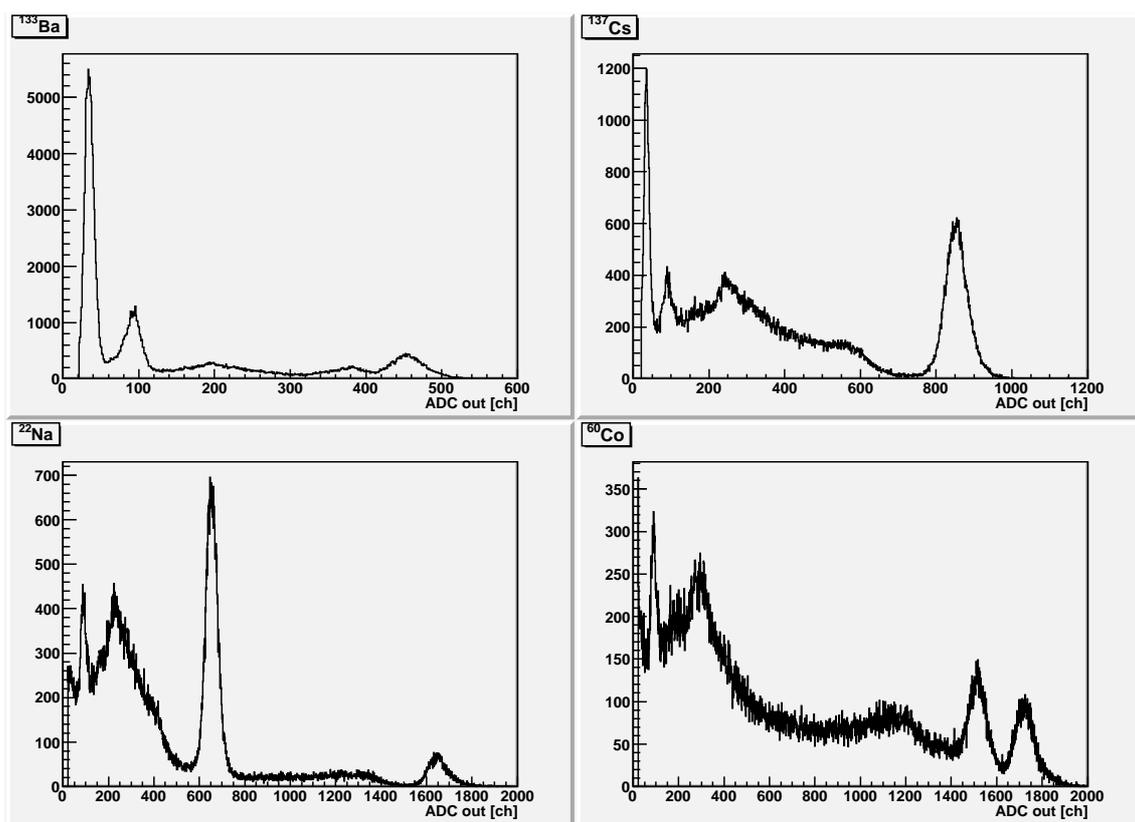


図 5.10: R6231 を用いて取得した各線源のスペクトル 左上:  $^{133}\text{Ba}$ 、右上:  $^{137}\text{Cs}$ 、左下:  $^{22}\text{Na}$ 、右下:  $^{60}\text{Co}$

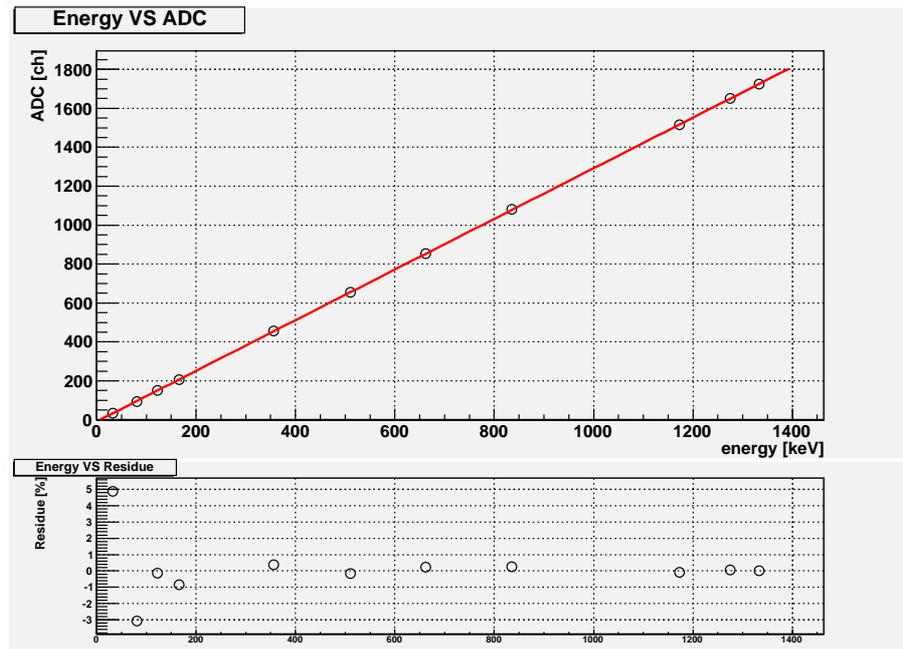


図 5.11: 線のエネルギーと ADC との線形性

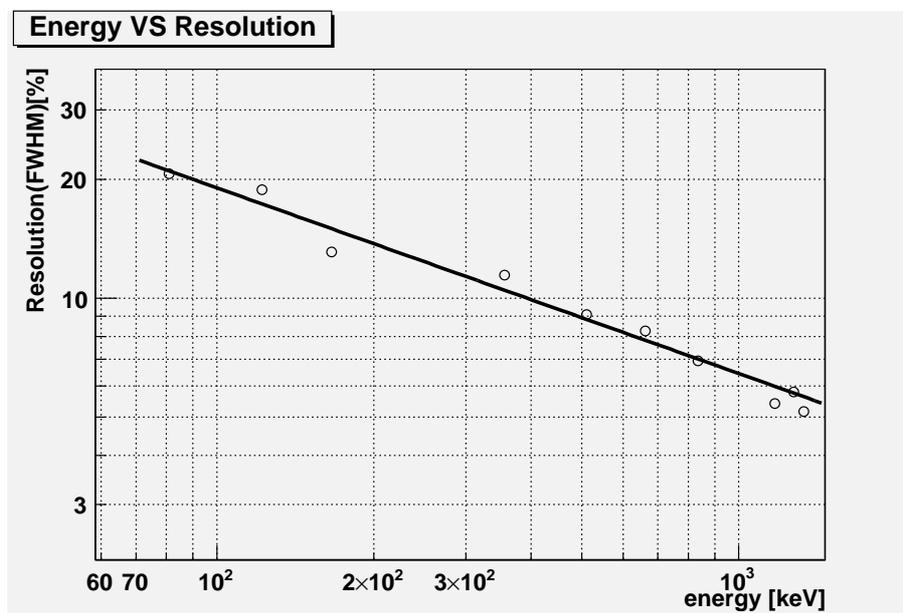


図 5.12: R6231 によるエネルギーとエネルギー分解能の関係  
 横軸:エネルギー [keV]、縦軸:エネルギー分解能 (FWHM) [%]

## 5.4 CP80190 を用いたシンチレーションカメラの読み出し

CP80190 が PMT から信号に対してもよいリニアリティを持っていることが確認できた。そこで、5cm 角 GSO(Ce) シンチレータアレイとフラットパネルマルチアノード PMT H8500 からなるシンチレーションカメラを CP80190 にマウントし、線源からの線を照射し、性能評価を行った。



図 5.13: CP80190 にシンチレーションカメラをマウントした様子

### 5.4.1 解析法

解析は以下のように行った。まず、CP80190 から得られる 64ch 分の信号に、ゲイン補正をかける。既に述べたように、H8500 の 64ch のアノードにはゲインのバラつきがある。今回使った固体ではゲインが最大のところと最小のところで 1 : のゲインのバラつきがあった。また、前節で見た通り CP80190 の各 ch にも 1 割程度のゲインのバラつきがある。そこで、各 ch からの信号  $E_i (1 \leq i \leq 64)$  に対して、それぞれの H8500 の相対ゲインを  $G1_i$ 、CP80190 の相対ゲインを  $G2_i$  として、

$$E'_i = \frac{G1_{\max} \times G2_{\max2}}{G1_i \times G2_i} \times E_i \quad (5.3)$$

のように補正をかけた。ただし PMT の一番ゲインの大きい ch を max、CP80190 のゲインが一番大きい ch を max2 としている。その上で、線のエネルギー  $E_\gamma$  を

$$E_\gamma = \sum_{i=1}^{64} E'_i \quad (5.4)$$

とした。さらに、線の吸収位置 (x,y) は重心法を用いて、

$$x = \sum_{i=1}^{64} E'_i \bmod 8 \quad (5.5)$$

$$y = \sum_{i=1}^{64} E'_i / 8 \quad (5.6)$$

のように再構成した。

## 5.4.2 性能評価

### 位置分解能

$^{137}\text{Cs}$  を全面照射したときの再構成図とスライスイメージ、及びスペクトルを図 5.14 に示す。二次元再構成図およびスライスイメージより、 $8 \times 8$  の各ピクセルがきれいに分離できてい

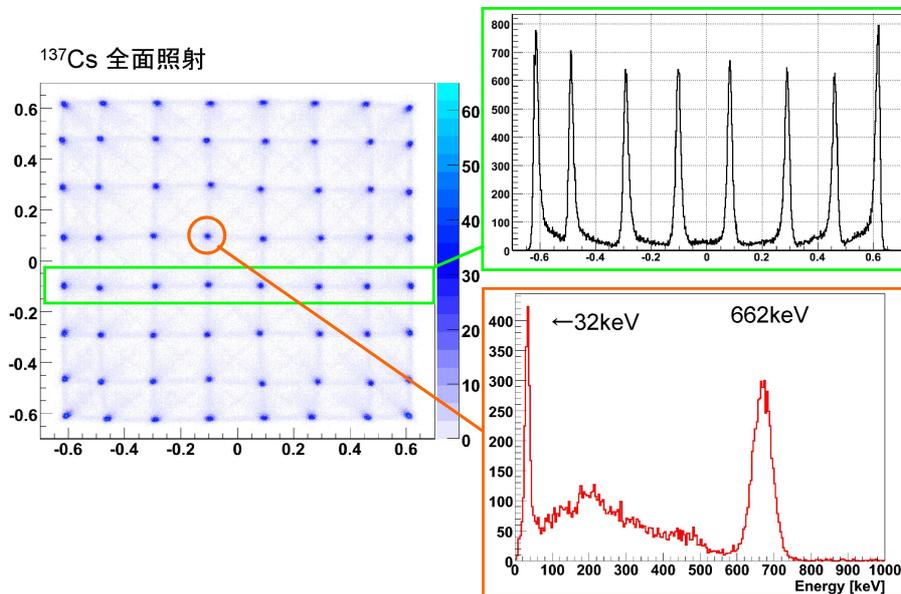


図 5.14: H8500 による Cs のスペクトルなど

ることがわかる。各線源からの 線に対してシンチレーションカメラで得られたスペクトルを図 5.15 に示す。

### エネルギー分解能

各線源からの 線に対するエネルギー分解能 (FWHM) をグラフにすると、図 5.16 のようになる。このグラフより、式 5.2 に対して  $\Delta = 10.59 \pm 0.4$ 、 $\Gamma = 0.497 \pm 0.024$ 、という値が得られた。

### 消費電力

消費電力の観点からこの読み出し方法を評価する。CP80190 は、1 台あたり 1.2W の電力を必要とする。また、DP ボード CP80190 は 1.5W の電力を必要とし、4 台の CP80190 のデータを処理することができる。したがって、MAPMT H8500 1 台からの信号を読み出すのにかかる消費電力は、約 1.5W となる。これは、SMILE- 実験で要請されている 500mW/1PMT の約 3 倍となってしまふ。

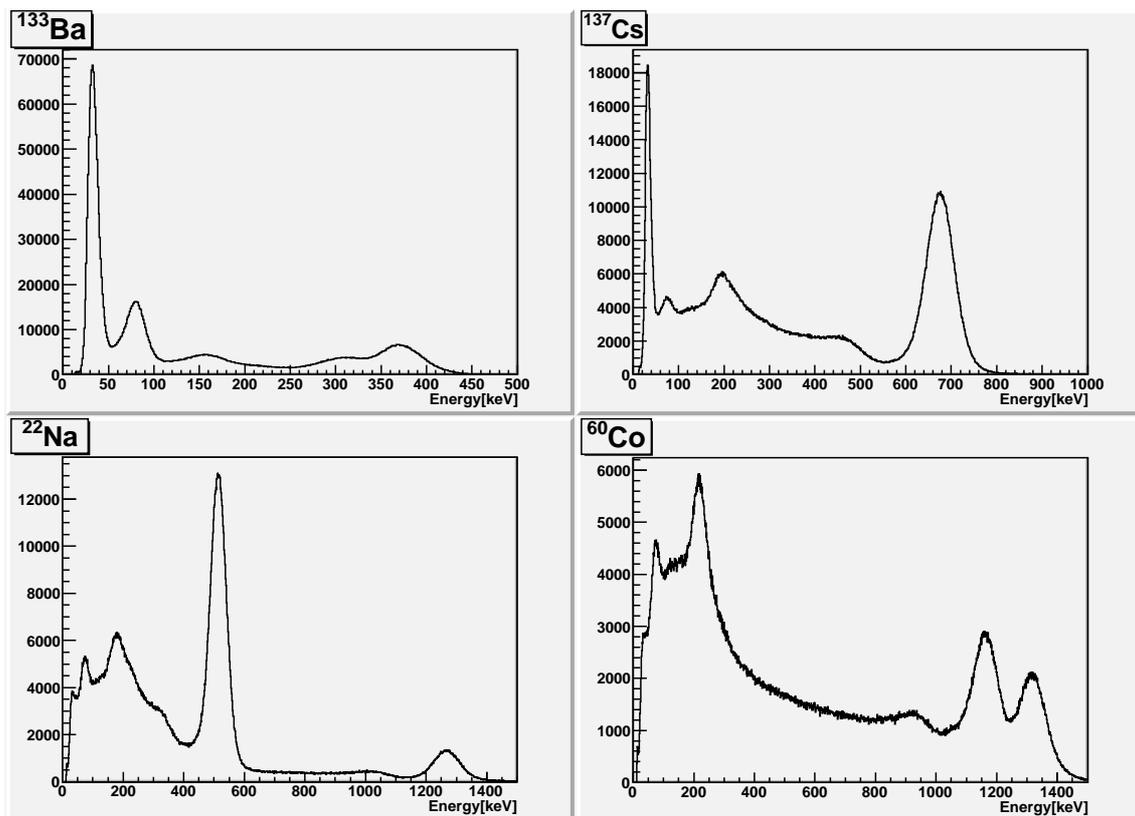


図 5.15: CP80190 用いて取得したスペクトル 左上:  $^{133}\text{Ba}$ 、右上:  $^{137}\text{Cs}$ 、左下:  $^{22}\text{Na}$ 、右下:  $^{60}\text{Co}$

## 5.5 CP80190 と抵抗チェーンを用いた読み出し

前節で見たように、一台の MAPMT を一台の CP80190 で読み出すと、読み出しにかかる消費電力が要請される値を越えてしまう。そこで、現在用いている抵抗チェーンを使った読み出し方法を導入することにした。抵抗チェーンを用いれば、MAPMT1 台を 4 つの出力で読み出せるため、1 台の CP80190 で 16 台の MAPMT を読み出すことができ、1 PMT あたりの読み出し消費電力を、1/16 にすることができる。

解析は通常の 4 端読み出しの時と同じように行い、2 次元の座標変換を用いて再構成したときのゆがみの補正をしている。

### 5.5.1 性能評価

#### 再構成図とスペクトル

$^{137}\text{Cs}$  を全面照射したときの再構成図とスライスイメージ、及びスペクトルを図 5.18 に示す。二次元再構成図およびスライスイメージより、各ピクセルがきれいに分離できていることがわかる。各線源からの線に対してシンチレーションカメラで得られたスペクトルを図 5.19 に示す。

#### ダイナミックレンジ

各線源からの線に対するエネルギー分解能 (FWHM) をグラフにすると、図 5.20 のようになる。この結果として、ダイナミックレンジとして、80keV ~ 1300keV までの範囲を持っていることが確認された。このグラフより、式 5.2 に対して  $\Delta = 10.5 \pm 0.4$ 、 $\Gamma = 0.472 \pm 2.44$  という値が得られた。

#### 電力

前述の通り、1 台の CP80190 で 16 台の PMT を読み出せるので、1PMT あたりの読み出し消費電力は 100mW/PMT となる。これは、SMILE- 実験での要請である 400mW/PMT 以下という値を充分満たす数値である。

以上の性能より、CP80190 と抵抗チェーンを組み合わせた読み出しを用いることで、SMILE でシンチレーションカメラに求められる要請を全て満足することができた。

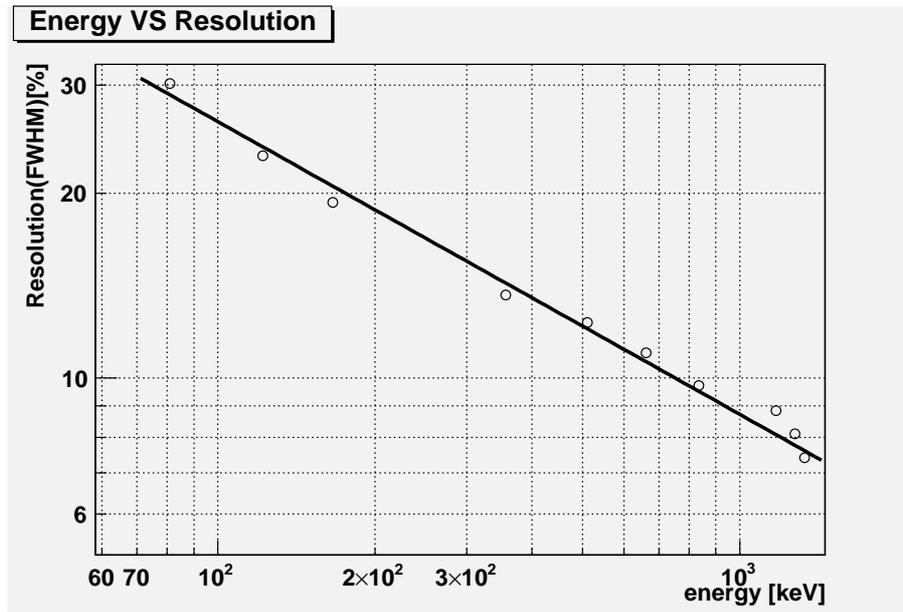


図 5.16: H8500 によるエネルギーとエネルギー分解能の関係  
 横軸:エネルギー [keV]、縦軸:エネルギー分解能 (FWHM)[%]

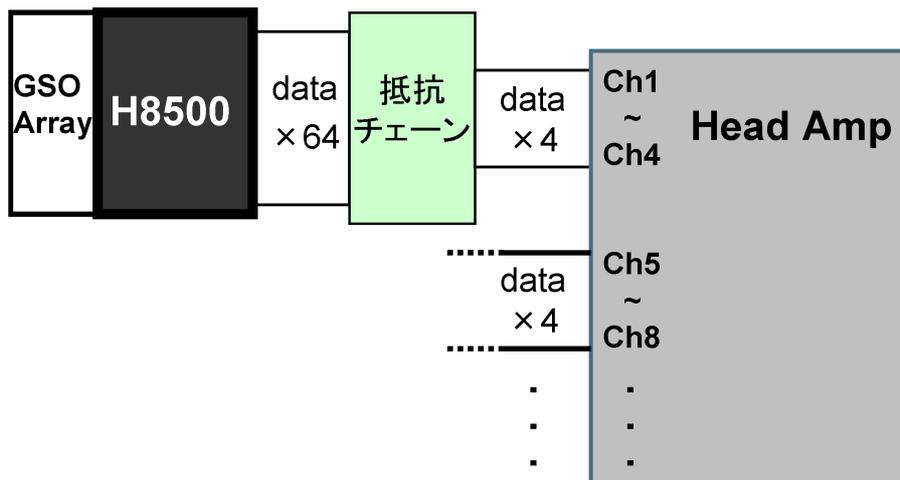


図 5.17: 抵抗チェーンとヘッドアンプユニットを組み合わせた読み出しシステムの概念図

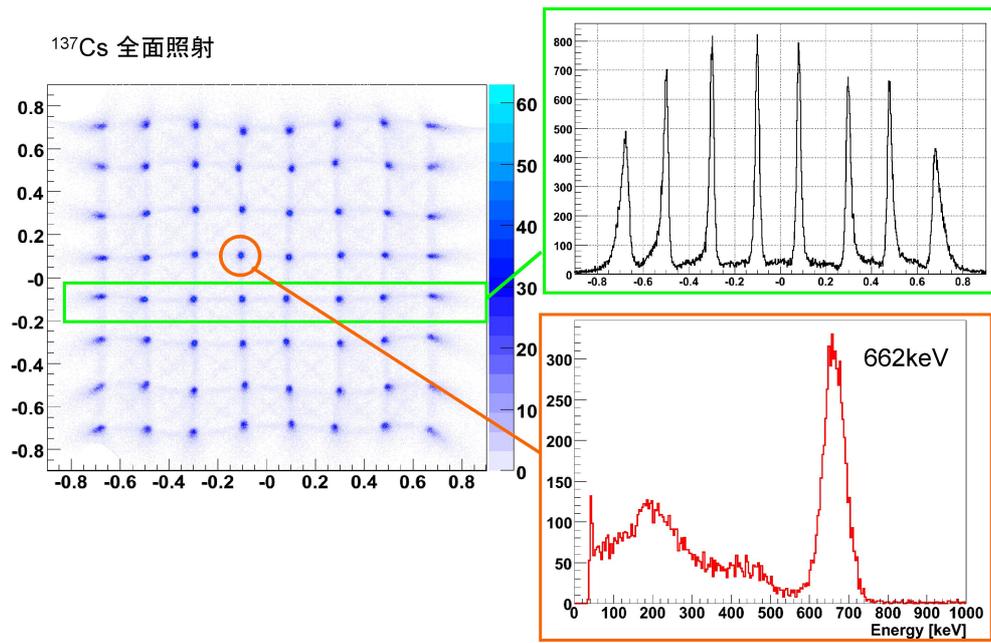


図 5.18: 抵抗チェーンによる再構成イメージとスライス図、及び $^{137}\text{Cs}$ のスペクトル

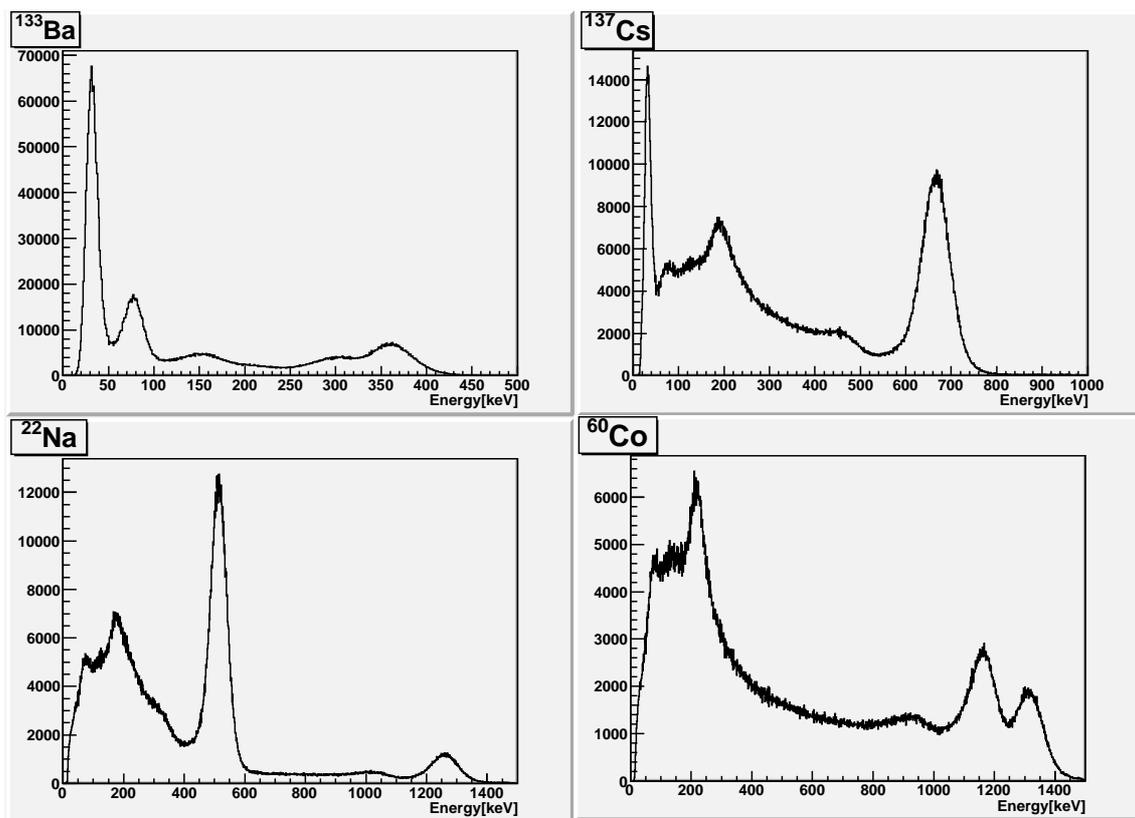


図 5.19: 抵抗チェーンと CP80190 を用いて取得したスペクトル  
 左上： $^{133}\text{Ba}$ 、右上： $^{137}\text{Cs}$ 、左下： $^{22}\text{Na}$ 、右下： $^{60}\text{Co}$

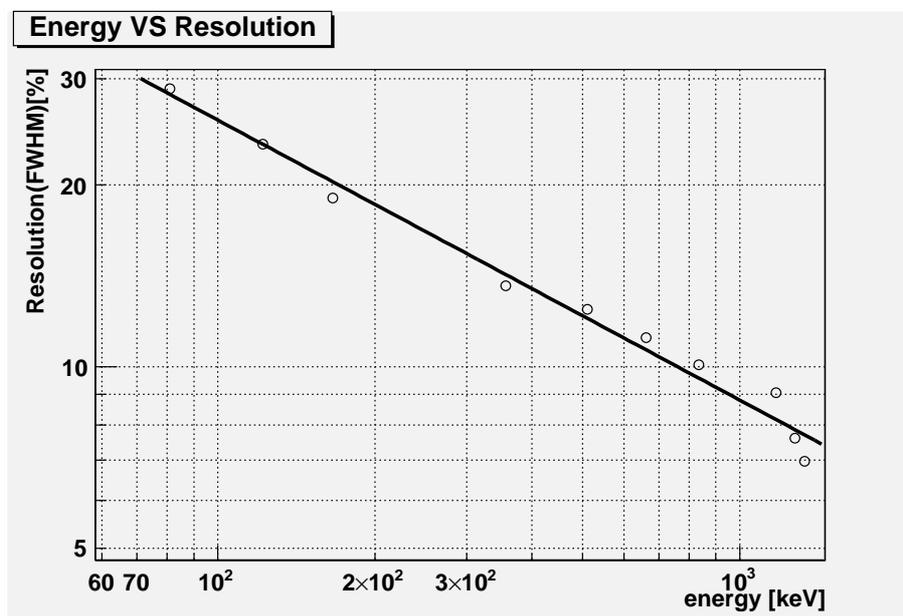


図 5.20: H8500 と抵抗チェーンを用いたエネルギーとエネルギー分解能の関係  
 横軸:エネルギー [keV]、縦軸:エネルギー分解能 (FWHM)[%]

## 第6章 フロントエンドASICの開発

現在われわれは、ガス検出器  $\mu$ -PIC の読み出しに、CERN LHC ATLAS 実験の Thin Gap Chamber 用に開発された時定数 16ns の ASD (Amplifier Shaper Discriminator) チップや、これを元に開発した時定数 80ns の ASD チップを使用している。

SMILE-2 に向けた省電力化の一つとして、我々はこれまでに高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と協力して、 $0.5\mu\text{s}$  CMOS プロセスの ASIC を用いた  $\mu$ -PIC の読み出しチップの開発を進めてきた。

### 6.1 FE2007

FE2007 は FE シリーズ第 3 世代目のチップである。1 つのチップには 8ch 分の回路がレイアウトされており、各チャンネルのヒット情報をデジタル信号で出力し、同時に 8ch 分が足しあわされたエネルギーの情報をアナログ出力する。FE2007 の回路図を図 6.1 に示す。

FE2007 は既に基本的な動作チェックなどが終わって量産されており、我々の研究室でも性能評価を行っている。FE2007 8 チップを実装した  $\mu$ -PIC 読み出し用ボードを図 6.2 に示す。

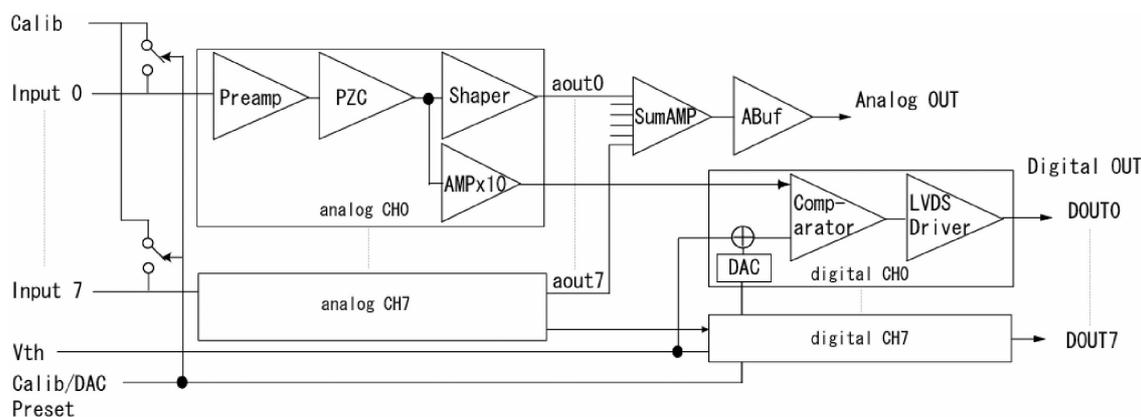


図 6.1: FE2007 の回路図

表 6.1 に現在の FE2007 の性能と我々の要請を示す。FE2007 では、いくつかの性能で目標を達成できていない。特に、ノイズの問題はまた、気球実験で使用することを考えた時には、消費電力が大きいのは大きな問題となりうる。そこで今回は、消費電力の改善に絞って FE2007 に改良を加えることにした。

### 6.2 FE2007 の低消費電力化

前節で見たとおり、FE2007 では消費電力の面で目標値を達成することができなかった。そこで、更なる低消費電力化を計るために FE2007 に改良を加えることにした。低消費電力化に向けては、

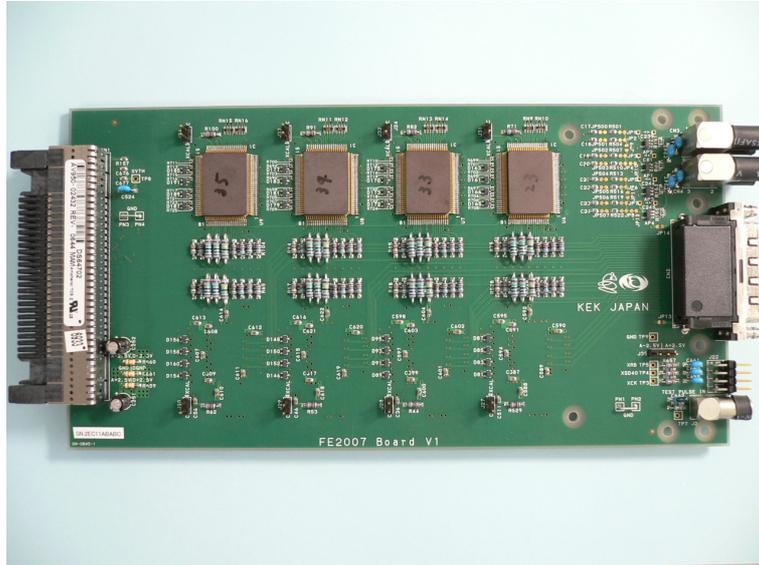


図 6.2: FE2007 を実装した  $\mu$ -PIC 読み出しボード

	FE2007	目標値
ピーキングタイム	20ns	30ns
ゲインのチャンネルバラつき	8% 以下	3% 以下
ノイズ @Cd=100pF	6000e	5000e
消費電力	30mW/ch	20mW/ch
クロストーク	0.6%	1% 以下
ダイナミックレンジ	$\pm 2.5\text{pC}$	$\pm 2.5\text{pC}$
処理時間	$\leq 6\text{ns}$	$\leq 10\text{ns}$

表 6.1: FE2007 の諸性能

主に次の2つの方針で設計を行った。

- ・電源電圧の低下
- ・デジタル出力の変更

設計に当たっては、回路シミュレータ SPICE を使ってシミュレーションをおこなった。

### 6.2.1 電源電圧の変更

消費電力を削減するのにもっとも単純な方法は、回路の電源電圧を低くすることである。現在の FE2007 は、電源電圧として  $\pm 2.5V$  を使用しているが、これを例えば 8 割の  $2.0V$  にすると、電圧が 20% 小さくなるだけでなく回路に流れる電流も 20% 減少するため、電力としては 36% の削減につながる。

そこで、電源電圧を下げても回路が正常に動作するか調べるために、まず FE2007 の 1ch 分のアナログ部分を抜き出してシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた回路図を図 6.3 に示す。

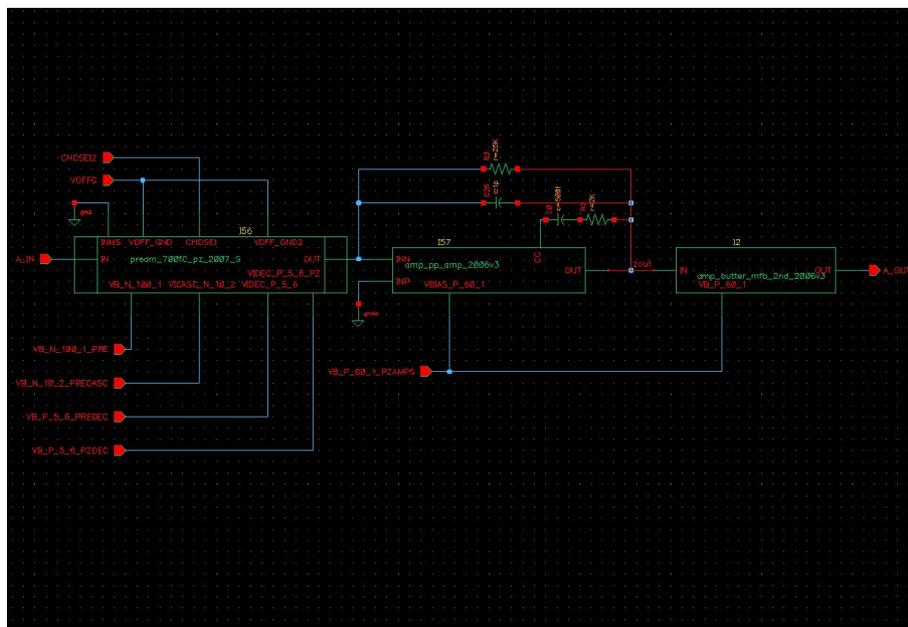


図 6.3: アナログシミュレーション回路図

電源電圧が  $\pm 2.5V$  の場合と  $\pm 2.0V$  の場合で、アナログ波形がどのように変化するかを、プリアンプ、ポールゼロキャンセラー、シェイピングアンプの各出力 (図 6.3 中の赤、青、緑の丸) において確かめた。入力として  $1.0pC$  の信号を入力したときに得られた波形を図 6.5 に示す。電源電圧を低くするとピーキングタイムが  $5ns$  程度遅くなり、波高も 10% 程度小さくなるが、波形の乱れは見られない。この程度の変化ならば、この結果より、電源電圧を落としても、波形としては特に問題にならないことがわかった。

次に、ダイナミックレンジの評価を行った。電源が  $2.5V$  の時と  $2.0V$  の時それぞれで  $-4.0pC$  から  $4.0pC$  の信号を入力し、シェイピングアンプの出力波高の最大値を取得し、プロットした。図 6.5 中の緑の線が電源  $2.5V$  のとき、青が  $2.0V$  の時である。電源電圧を  $2V$  にすると、 $+2pC$  あたりでサチレーションを起こしてしまっている。そこで、今までは GND に落としていた  $VOF\_GND$

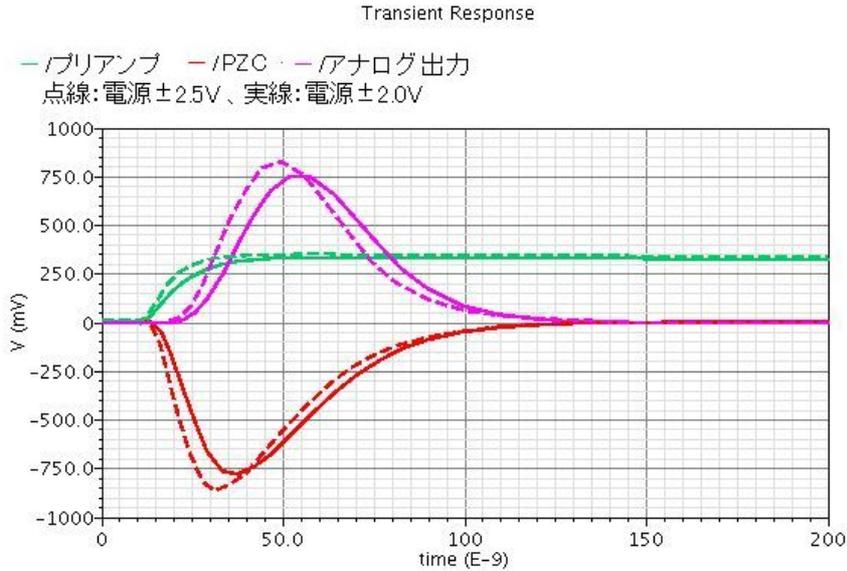


図 6.4: アナログシミュレーション波形

端子 (図 6.3 中の赤丸) に 100mV の電圧をかけることで、線形領域を拡大することができた。また、このときアナログ波形には特に変化は見られなかった。

### 6.2.2 デジタル出力の変更

$\mu$ -TPC では、反跳電子の飛跡を正確に取得するために、デジタル信号の時間情報を 100MHz で読み出している。そのため、デジタル出力部には 10ns 以下の早い時間分解能が必要とされる。FE2007 のデジタル部は、コンパレータと LVDS ドライバから構成され、1ch あたりの消費電力は 12mW である。このうち LVDS ドライバは差動出力であり鋭い立ち上がりをもっているが、常に電流を流すために大きな電力を消費し 1ch あたり 10mW の電力を消費している。そこで、今回 LVDS ドライバをなくし、2V の TTL 出力にすることで、消費電力を下げることにした。

なお、前節で電源電圧を 2.0V に落としたので、このデジタル部についても電圧を 2.0V に落としている。シミュレーションに用いた回路を図 6.6 に、この回路のデジタル出力信号を図 6.7 に示す。この波形の立ち上がり、立下りの時間はともに 5ns 程度であるので、このデジタル出力に関しては十分な時間分解能が得られているといえる。この変更により、デジタル部にかかる消費電力を 1ch あたり約 8mW 削減することができた。

## 6.3 まとめ

今回のシミュレーションにより、アナログ部で約 5mW/ch、デジタル部で約 9mW/ch の電力の削減ができることがわかった。ただし実際には、今回シミュレーションを行った回路以外にも、8ch サムアンプや DAC 回路などがあるのでチップ全体として単純にこれだけ消費電力を落とせるわけではない。

今回設計を行った回路は昨年 12 月にサブミットされ、2 月に完成の予定である。完成後は、基本的な動作チェック、性能チェックを行う。

Expressions

— /電源2.5V — /電源2.0V — /電源2.0V(改)

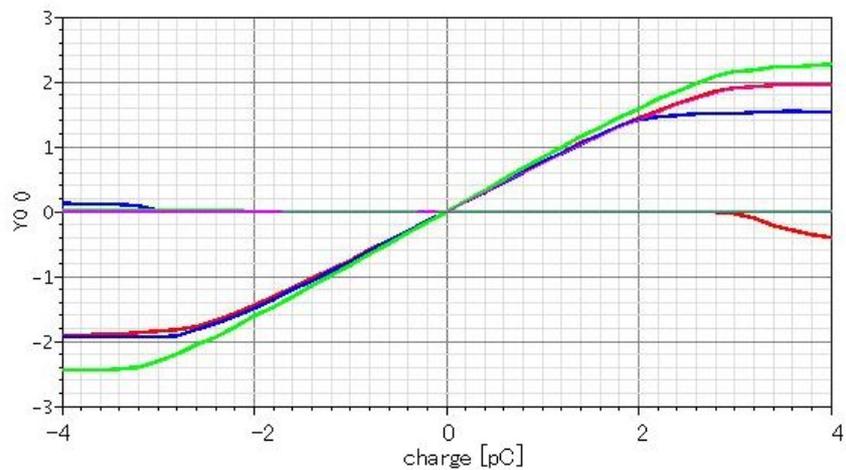


図 6.5: アナログ波形のリニアリティ

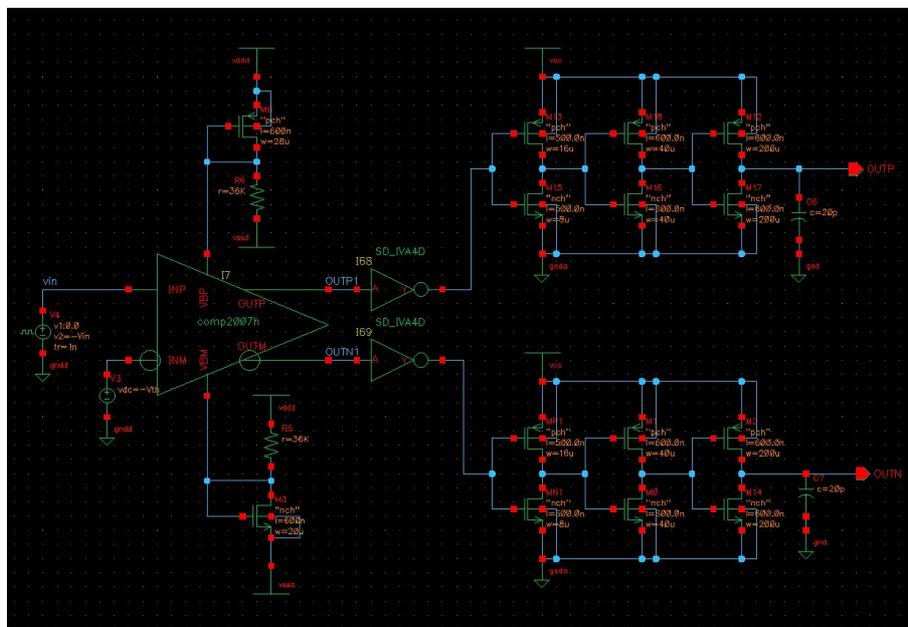


図 6.6: デジタル出力テスト回路

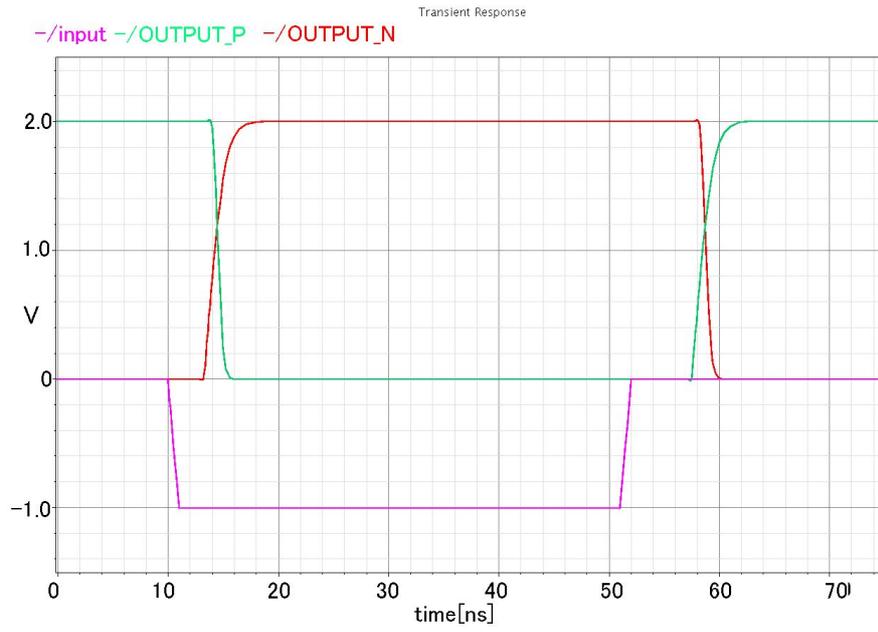


図 6.7: デジタル出力波形

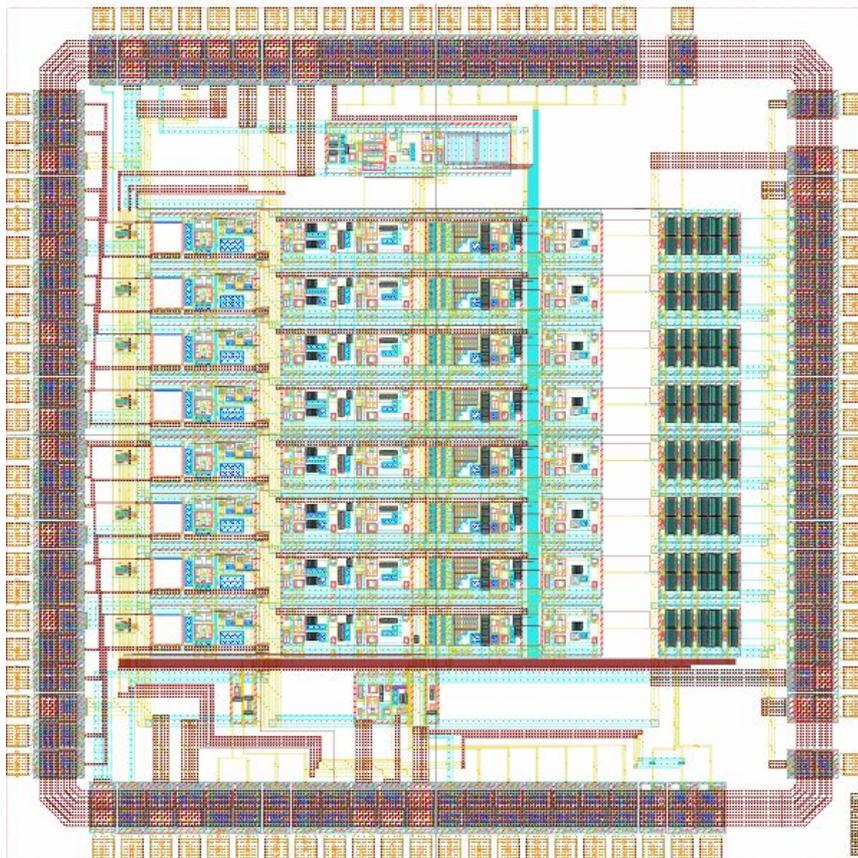


図 6.8: 設計した ASIC のレイアウト (4mm × 4mm)

## 第7章 まとめと今後

我々は、サブ MeV ~ MeV 領域の 線全天探査を目標に、シンチレーションカメラとガス検出器から成る広視野 MeV 線コンプトンカメラの開発を行っている。現在はその前段階として気球実験を行っており、次期気球実験 SMILE- では明るい 線天体からのサブ MeV 線の観測を計画している。そのために SMILE- では  $40 \times 40 \times 40\text{cm}^3$  のガス検出器 (読み出しチャンネル数 2000ch 以上) と、150 台以上のシンチレーションカメラを用いる予定である。

### 7.1 省電力なシンチレーションカメラ読み出しシステムの開発

SMILE- に向けて、新たに省電力なシンチレーションカメラの読み出しシステムの開発を行った。ディスクリートな回路からなる PMT 読み出し専用モジュール CP80190 を開発し、さらに抵抗チェーンと組み合わせることで、従来の読み出しシステムの 25 分の 1、SMILE- における要請値の 4 分の 1 以下である 100 mW というわずかな電力で 1 台のシンチレーションカメラの信号を読み出すことができた。この読み出しシステムでは、これまでと同等のエネルギー分解能  $10.5\% @ 662\text{keV}$  (FWHM) が得られ、80keV ~ 1300keV という従来以上の広いダイナミックレンジを実現している。今後はこの読み出しシステムを MeV 線カメラの DAQ へと組み込んでいく。

また、CP80190 では MAPMT の 64ch 読み出しをできるという点に注目すると、よりエネルギー分解能のよい LaBr<sub>3</sub> 結晶シンチレータアレイを CP80190 を使って読み出すことで、今まで 4 端読み出しでは出せなかったエネルギー分解能を達成できる可能性がある。これが達成できた場合、MeV 線カメラの撮像性能の改善が期待できる。

### 7.2 CMOS ASIC の開発

気球実験やその他の実験における  $\mu$ -PIC の読み出し用に、現在我々が用いている CMOS プロセス ASIC (FE2007) を改良し、より低消費電力なチップの開発を行った。SPICE シミュレータを用いてシミュレーションを行った結果、電源電圧の削減とデジタル出力部の見直しにより、現在の性能をほぼ維持したままこれまでの 30mW/ch から 16mW/ch へと電力を削減できることがわかった。

今回設計したチップは、2 月に完成する予定である。完成後は動作チェックののち、今回のチップの性能評価をしていく。その結果を踏まえて、今後さらに電力を削減できるように開発を続け、最終的には 10mW/ch を切ることを目標としていく。

また FE2007 のもう一つの課題であるノイズへの対策も必要である。この点に関しては今回は全く改良を加えていないが、今後、レイアウトの見直しなどを行い、より低ノイズなチップを開発していく必要がある。

これら二つの改良は当面は独立に進めていき、最終的にその結果を合わせて省電力かつ低ノイズなチップを開発していく。

## 参考文献

- [1] 桜井邦明 編: “高エネルギー宇宙物理学” 朝倉書店 (1990).
- [2] M.Oda and K.Matsuoka: *Progress in Elementary Particles and Cosmic-Ray Physics* **10** (1971) 305.
- [3] S.E.Boggs, et.al.: *ApJ* **544** (2000) 320.
- [4] V.Schönfelder, et al.: *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143** (2000) 145.
- [5] W.Collmar, et al.: “Proc. of the 5th Compton Symposium” *AIP Conf. Proc.* **510** (2000) 591.
- [6] V.Schönfelder, et al.: *ApJS* **86** (1993) 657.
- [7] J.M.Ryan: *Proc. of Astronomy with Radioactivities IV and MeV Gamma-Ray Telescopes* (<http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/workshops/seeon03/ryan.1.pdf>).
- [8] M.Pohl, A.W.Strong: astro-ph/9706152.
- [9] P.Sreekumar, et.al.: *ApJ* **494** (1998) 523.
- [10] U.Oberlack, et.al.: *ApJS* **120** (1996) 311.
- [11] P.v.Ballmoos: *Experimental Astronomy* **6** (1995) 85.
- [12] R.A.Chevalier: *Nature* **355** (1992) 691.
- [13] D.J.Thompson, et al.: *ApJ* **516** (1999) 297.
- [14] L.Kuiper, et al.: *A&A* **378** (2001) 918.
- [15] F.A.Aharonian, A.M.Atoyan: astro-ph/9803091.
- [16] M.L.McConnell, et al.: *ApJ* **572** (2002) 984.
- [17] M.Chiaberge, et al.: *MNRAS* **324** (2001) 33.
- [18] L.Maraschi, F.Tavecchio: astro-ph/0102295.
- [19] 高原文郎: “天体高エネルギー現象” 岩波講座 物理の世界 岩波書店 (2002).
- [20] 高原文郎: “宇宙物理学” 朝倉書店 (1999).
- [21] 小田稔 他: “宇宙線物理学” 朝倉書店 (1983).
- [22] W.R.Purcell, et al.: *ApJ* **491** (1997) 725.

- [23] M.S.Briggs, et.al.: *ApJ* **524** (1999) 82.
- [24] R.C.Hartman, et.al.: *ApJS* **123** (1999) 79.
- [25] W.S.Paciesas, et.al.: *ApJS* **122** (1999) 465.
- [26] private communication with H.Yamaguchi.
- [27] W.Coburn, S.E.Boggs: *Nature* **423** (2003) 415.
- [28] C.M.Urry, P.Padovani: ([http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn\\_model.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn_model.html))
- [29] V.Schönfelder, et al.: *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **97** (1993) 27.
- [30] S. Hayakawa, *Prog. Theo. Phys.* **8**, 571, (1952).
- [31] P. Morrison, *Nuovo Cimento* **7**, 858, (1958).
- [32] W. Kraushaar *et al.**ApJ* **177**, 341, 1972.
- [33] G. Badhwar *et al.**Astrophysics and Space Science*, **27**, 147, (1974).
- [34] C. E. Fichtel *et al.**ApJ* **186**, 99, (1973).
- [35] G. Bignami *et al.**Space Sci. Instrum* **1**, 245, (1975).
- [36] M. J. Harris *et al.**A & A* **461**, 723, (2007).
- [37] R. Diehl and F. X. Timmes, *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **110**, 637, (1998).
- [38] V. Schönfelder *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 145, (2000).
- [39] U. Oberlack *et al.* *A & AS*, **120**, 311, (1996).
- [40] C. Dupraz *et al.* *A & A*, **324**, 683, (1997).
- [41] L. Maraschi *et al.**ASPC*, **227**,.40, (2001).
- [42] Mahadevan, R. *et al.* *ApJ* **486**, 268, (1997)
- [43] Purcell, W. R. *et al.* *ApJ* **491**, 725, (1997).
- [44] J. Knodlseder *et al.* *A & A* **441**, 513, (2005).
- [45] F. Ferrer and T. Vachaspati *Phys. Rev. Lett.* **95**, 261302, (2005). 511 keV Photons from Superconducting Cosmic Strings
- [46] P. A. Milne, *New Astronomy Reviews* **48**, 93, (2004).
- [47] R. Diehl *et al.*, *Proc. of the Inter. Conf. Suzaku2006, Progress of Theoretical Physics Supplement* **169** 299, (2007).
- [48] G. Ghirlanda *et al.*, *ApJ*, **613**, 13, (2004).

- [49] G.F.Knoll 著『放射線計測ハンドブック 第3版』 日刊工業新聞社 2001年
- [50] XCOM:Photon Cross Section Database  
(<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>).
- [51] W. N. Johnson *et al.* ApJS **86**, 693, (2001).
- [52] Jean in't Zand "Coded Aperture Imaging in High-Energy Astronomy"  
(<http://lheawww.gsfc.nasa.gov/docs/cai/coded.html>).
- [53] S. D. Barthelmy *et al.*, SSR **120**, 143, (2005).
- [54] C. Winkler *et al.* A & A **411**, 1, (2003)
- [55] Peter Von Ballmoos, New Astronomy Reviews **48**, 243, (2004).
- [56] "Le fonctionnement d'une lentille gamma "  
([http://www.cesr.fr/~pvb/lentille\\_gamma/L\\_fon\\_e.html](http://www.cesr.fr/~pvb/lentille_gamma/L_fon_e.html))
- [57] P. von Ballmoos *et al.* Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe, 747, (2004).
- [58] Steven E. Boggs, New Astronomy Reviews **50**, 604, (2006).
- [59] V. Schönfelder *et al.*, ApJS **.86**, 657 (1993).
- [60] V. Schönfelder *et al.*, A telescope for soft gamma ray astronomy Nuclear Instruments and Methods **107**, 385, (1973).
- [61] Schoenfelder, V. *et al.*, ApJ **192**, 1, (1974).
- [62] 修士論文『 $\mu$ -PICを用いた MeV ガンマ線イメージングカメラの開発』高田淳史 京都大学 2004年.
- [63] G. Weidenspointner *et al.*, A & A **.368**, 347, (2001).
- [64] T. Kamae *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **260**, 254, (1987).
- [65] Bloser, P. F. *et al.* New Astronomy Reviews, **46**, 611, (2002).
- [66] A. Ochi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **471**, 264, (2001).
- [67] T. Nagayoshi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **517**, 219, (2004).
- [68] F. Sauli, Nucl. Instr. Meth. A **386**, 531, (1997).
- [69] H. Toyokawa *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **467-468**, 1144, (2001).
- [70] M. Inuzuka *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **525**, 529, (2004).
- [71] 修士論文『 $\mu$ -PICを用いた MeV 線カメラの高感度化』服部 香里 京都大学 2006年2月

- [72] 修士論文 『シンチレータを用いた位置敏感型 線スペクトロメータの開発』 西村 広展 京都大学 2006 年.
- [73] H. Nishimura *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **537**, 115, (2007).
- [74] Hartman R. C. *et al.*, ApJS **123**, 79, (1999).
- [75] A. Zoglauer and G. Kanbach, Proceeding of SPIE **4851**, 1302, (2003).
- [76] Gerald R. Lynch and Orin I. Dahl, Nucl. Instr. and Meth. A **58**, 6, (1991).
- [77] 修士論文 『サブ MeV ガンマ線コンプトンカメラを用いた気球観測装置の開発』 上野 一樹 京都大学 2007 年.
- [78] 博士論文 『Development of Advanced Compton Imaging Camera with Gaseous Electron Tracker and First Flight of Sub-MeV Gamma-Ray Imaging Loaded-on-Balloon Experiment』 高田 淳史 京都大学 2007 年.
- [79] V. S. Vartanov and B. G. Zemskov, Measurement Techniques **31**, 188, (1988).
- [80] 修士論文 『水を主成分とする液体シンチレータの開発』 大和田憲太郎 東北大学 2003 年.
- [81] T. Yanagida, Nucl. Instr. and Meth. A **579**, 23, (2007)
- [82] C. W. Lan, Chemical Engineering Science **59**, 1437, (2004).
- [83] D.H. Yoon *et al.*, J. Cryst. Growth **142**, 339, (1994).
- [84] M. Kobayashi, "Introduction to scintillators" Proceedings of KEK-RCNP International School and Mini-workshop for Scintillating Crystals and thier Application in Particle and Nuclear Physics.
- [85] Bedi, S. *et al.*, Hyperfine Interactions **136**, 161, (2001).
- [86] T. Bhattacharjee *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **484**, 364, (2002).
- [87] K. Kamada *et al.*, "Scintillation properties of 2-inch-diameter Pr:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (LuAG) single crystal" IEEE NSS-MIC 2007 (oral) unpublished..
- [88] "Scintillation Products Whitepaper Performance Summary BrillanCe<sup>®</sup> Scintillators LaCl<sub>3</sub>:Ce and LaBr<sub>3</sub>:Ce" (Saint-Gobain Crystals, Scintillation Products) C. M. Rozsa *et al.*,
- [89] S. Normand *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **572**, 754, (2007).
- [90] W.M. Higgins *et al.*, Journal of Crystal Growth **287**, 239, (2006).
- [91] M. J. Weber, Journal of Luminescence, **100**, 35, (2002).
- [92] P. Dorenbos, Nucl. Instr. and Meth. A **486**, 208, (2002).
- [93] R. Hofstadter, Phys. Rev. **74**, 100, (1948).
- [94] R. Hofstadter, Phys. Rev. **74**, 628, (1948).

- [95] K. Takagi and T. Fukazava, Appl. Phys. Lett. **42**, 43, (1983).
- [96] H. Ishibashi *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **45**, 518, (1998).
- [97] N. Shimura *et al.*, 2004 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record **5**, 2720, (2004).
- [98] E. V. D. van Loef *et al.*, Appl. Phys. Lett. **77**, 1467, (2000).
- [99] E. V. D. van Loef *et al.*, Appl. Phys. Lett. **79**, 1573, (2001).
- [100] E. V. D. van Loef *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A. **486**, 254, (2002).
- [101] A. Iltisnext *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A. **563**, 359, (2006).
- [102] H. Ogino *et al.*, Journal of Crystal Growth **287**, 335, (2006).
- [103] A. Lempicki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A. **333**, 304, (1993). Fundamental limits of scintillator performance
- [104] R. Pan *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A. **504**, 262, (2003).
- [105] A. Kuhn *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **51**, 2550, (2004).
- [106] Y. Heng *et al.*, SNIC Symposium, (2006)
- [107] 日本国特許 公開特許広報 (A) 特許出願公開番号 特開平 9-110600 公開日平成 9 年 (1997 年)4 月 28 日 『希土類珪酸塩単結晶の加工法及びシンチレータ』
- [108] 日立化成テクニカルレポート No.44 (2005-1) 『PET 装置用 Zr 添加 GSO:Ce 単結晶 Zr doped GSO:Ce Single Crystal for Positron Emission Tomography』 鎌田充志ら
- [109] 『光電子増倍管と関連製品』 (カタログ) 浜松ホトニクス株式会社
- [110] 『UBA(Ultra Bialkali) SBA (Super Bialkali) PMT Series』 (カタログ) 浜松ホトニクス株式会社
- [111] H. O. Anger, Rev. Sci. Instr. **29**, 27, (1958).
- [112] W.-H. Wong, IEEE Trans. Nucl. Sci., **40**, 962, (1993).
- [113] H. Ishibashi *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Scie. **36**, 170, (1989). Cerium doped GSO scintillators and its application to positionsensitive detectors
- [114] F. Quarati *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A. **574**, 115, (2007).
- [115] B.D. Milbrath *et al.*, 2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record **1**, 283, (2005).
- [116] 修士論文 『ピクセルシンチレータとアクティブマスクを用いたガンマ線検出器の開発』 平栗 慎也 東京大学 2004 年
- [117] M. Kokubun *et al.*, "Development of an Active Gamma-ray Imaging Spectrometer with Pixelated Scintillators", IEEE NSS-MIC 2006 (poster), unpublished.

[118] R. Pani *et al.*, Nucl. Instr. and Meth A. **569**, 296, (2006).

[119] P. R. Menge *et al.*, Nucl. Instr. and Meth A. **579**, 6, (2007).

# 謝辞

本論文の作成にあたり、谷森達京都大学大学院（以下京大）教授に丁寧で有意義なご指導をしていただきましたことを深く感謝申し上げます。また実験から研究者たるものの姿勢を教えてくださいました窪秀利京大助教、身内京大助教にも御礼申し上げます。

実験にあたりましては、クリアパルス株式会社の久保様には大変お世話になりました。また、高エネルギー加速器研究所の藤田様、田中様には ASIC の設計で様々なアドバイスをいただきました。本当にありがとうございました。

そして京大宇宙線研究室の皆様には本当にお世話になりました。秘書の井上理恵様には多くのサポートをしていただきました。そしてなによりも私と同じグループの株木博士、高田博士をはじめとし、西村さん、服部さん、上野さん、黒澤さん、高橋さんにも、さまざまな場面で助言を頂き、私をここまで成長させていただきました。また同期の井田、澤田、信川の三氏には公私共にお世話になり、あなた方なしではこの論文も書けなかったことでしょう。

最後に敬愛なる、私の家族に感謝。

平成 21 年 1 月 29 日