# 平成 20 年度 修士論文

# μ-PICを用いた紫外線光子検出器および読み出しシステムの開発

井田知宏

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室 宇宙線研究室 概 要

われわれは µ-PIC を用いた紫外線光子検出器の開発を行っている。

# 目 次

第1章	序論	3
第2章	光と物質の相互作用	4
2.1	光電効果	4
2.2	コンプトン散乱	5
2.3	雷子・陽雷子対牛成	5
2.0		0
第3章	ガス増幅検出器	7
3.1	動作原理....................................	7
	3.1.1 電離過程	7
	3.1.2 電離された電子の振る舞い	7
	3.1.3 ガス増幅	8
3.2	Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)	10
3.3	MPGD(Micro Pattern Gas Detector)	12
	3.3.1 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)	13
	3.3.2 MDOT(Micro Dot chamber)	13
	3.3.3 GEM(Gas Electron Multiplier)	14
	3.3.4 MICROMEGAS(MICRO MEsh GAseous Structure)	15
第4章	シンチレーション検出器	16
4.1	各種シンチレータ....................................	16
	4.1.1 気体シンチレータ	16
	4.1.2 有機シンチレータ	16
	4.1.3 無機シンチレータ	16
4.2	光輸送	19
	4.2.1 反射材·光学グリス	19
43	光雷子増倍管 (PMT)	20
110	431 光雷子增倍管 (PMT) 概説	20
		20
	4.0.2 元电面:	20 91
	4.9.7 月之初家	21 91
		21 91
		21
第5章	ガス増幅型紫外線光子検出器	<b>26</b>
5.1	ガス増幅型光検出器・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
5.2		~-
	使用シンチレータ....................................	27
	使用シンチレータ	$\frac{27}{27}$

5.3	<b>これまでのガス</b> PMT を用いた紫外線光子検出器開発28
第6章	紫外線光子検出器の構成 32
6.1	$\mu$ -PIC
	6.1.1 $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)
	6.1.2 読み出しシステム 33
	6.1.3 μ-PIC <b>の性能</b>
6.2	$\mu$ -PIC を用いた光検出器
6.3	透過型光電面を用いたガス PMT 43
	6.3.1         窓の取り付け作業         43
第7章	紫外線光子検出器評価 45
7.1	LaF <sub>3</sub> (Nd) 結晶の性能評価
7.2	透過型光電面を用いた紫外線光子検出器の評価50
	7.2.1 長期安定性
7.3	紫外光イメージング 52
筆 8 音	Thick GEM を用いた性能評価 56
81	Thick GEM 56
0.1	811 400µm @ GEM 56
	81.2 100µm @ GEM 58
	$81.3  125 \mu m \not \in GEM $
	8.1.4         比較         60
穷口辛	미디 昔고비니 2.7 프 / の明務 64
<b>第9早</b> 01	$\mu$ -FIC 読み山 U システムの開光 04 トランパスタ 64
9.1	$0.11  \text{PIT}(\text{Pipelar Junction Transistor}) \qquad 64$
	9.1.1 DJ1(Dipolal Junction Hansistor)
	9.1.2 MOS FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 00
0.2	$\infty回閉発された CMOS ASIC 71$
9.2	ク回開光C10C CMOS ASIC 71 0.9.1 FF2006 71
	9.2.1 FE2000
0.2	9.2.2 FE2007
9.5	DAO による VIII 補正
9.4	CMOS ASIC $ $
	9.4.1 <i>µ</i> -FIC の信号
第 10 章	まとめと今後 78
10.1	紫外線光子検出器開発
	10.1.1 <i>µ</i> -PIC <b>読み出しシステム開発</b>

# 第1章 序論

放射線画像検出器は宇宙物理、素粒子実験などの学術的分野はもちろんのこと、医療や非破壊検 査などの多方面に利用されている。また現在でも検出器開発は盛んに行われており、発展の目覚ま しい分野であると言える。放射線画像検出器と一言で言ってもガス増幅検出器、シンチレーション 検出器、半導体検出器に代表されるように様々な種類が存在し、使用用途もそれらの特性に応じた ものとなっている。

ガス増幅検出器の場合は、主に粒子飛跡検出など広い面積と高い位置分解能が要求される分野で 使用されてきた。

# 第2章 光と物質の相互作用

X線・ガンマ線は電荷を持たないため物質を直接電離することはない。そこで X線・ガンマ線 を検出するためには、検出器を構成する物質と相互作用することにより放出される電子・陽電子を 検出しなければならない。主に X線・ガンマ線と物質との相互作用は光電効果・コンプトン散乱・ 電子陽電子対生成の3つがある。これらの相互作用の起こる確率は X線・ガンマ線のエネルギー や物質の原子番号 Z に依存する。本章ではこれら3つの相互作用について概説する。



図 2.1: ガンマ線と物質の相互作用 [1]

図 2.2: 光とアルゴンの相互作用断面積のエネル ギー依存性 [2]

# 2.1 光電効果

100keV 以下のエネルギーでの物質との相互作用は光電効果が支配的である。光電効果とは光子が物質中の電子に全エネルギーを与えることで、原子に束縛されていた電子が放出される現象である。このとき放出される電子のエネルギー *K*<sub>e</sub> は、

$$K_e = E_\gamma - E_b \tag{2.1}$$

と表わされる。ここで  $E_{\gamma}$  は入射光子のエネルギー、 $E_b$  は光電子がはじめ存在した原子殻の束縛 エネルギーである。この相互作用が起こる反応断面積  $\sigma_{ph}$  は一般的に

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^n}{E_{\gamma}^{3.5}} \tag{2.2}$$

と表わされる。ここで n は入射光子のエネルギーによって  $4\sim5$  の間の値を取る。 $E_{\gamma}$  が K 殻の 束縛エネルギーよりも大きいとき、K 殻電子との相互作用する確率が最も高くなり、その反応断面 積は

$$\sigma_K = 4\sqrt{2}Z^5 \left(\frac{8\pi}{3}r_e^2\right) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}\right)^4 \left(\frac{m_e c^2}{E_0}\right)^{7/2}$$
(2.3)

と表わされる。ここで $r_e$  は古典電子半径で $r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}$ である。式 (2.3) から $\sigma_K$  が $Z^5$  と $E_0^{-7/2}$  に比例していることがわかる。 $E_\gamma$  が K 殻の束縛エネルギーよりも小さいときは L 殻電子との相互 作用する確率が最も高くなるため、図 2.2 の様に K 殻の束縛エネルギー付近では反応断面積が不 連続になりエッジができる。

光電効果により電子が放出されると高い準位から空いている準位へと電子が遷移し、その準位差に 相当するエネルギーのX線を放射する。またこの蛍光X線を自己吸収することによって、同程度 のエネルギーの電子が放出されることがあり(Auger効果)、この電子をAuger電子と呼ぶ。

# 2.2 コンプトン散乱

数百 keV~10MeV の領域ではコンプトン散乱が優位になる。コンプトン散乱が起きるとガンマ 線は持っていたエネルギーの一部を電子に与えて弾き飛ばし、ガンマ線は与えた分のエネルギーを 失い、方向を変える。ガンマ線のエネルギーは電子の束縛エネルギーよりも十分大きいので、原子 に束縛されている電子は静止しているとみなせる。このときエネルギー  $E_{\gamma}$ を持ったガンマ線がコ ンプトン散乱すると、散乱後のエネルギー  $E'_{\gamma}$ は、

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \phi)}$$
(2.4)

ただし  $\phi$  は散乱角である。散乱ガンマ線の角度分布は  $\sigma$  を散乱断面積、 $\Omega$  を立体角として微分散 乱断面積により与えられ、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1+k(1-\cos\phi)}\right)^2 \left(\frac{1+\cos^2\phi}{2}\right) \left(1+\frac{k^2(1-\cos\phi)^2}{(1+\cos^2\phi)[1+k(1-\cos\phi)]}\right)$$
(2.5)

ただし、

$$k = \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} \tag{2.6}$$

となる。式 (2.5) より散乱断面積は Z に比例する。この角度分布は図 2.3 の様になり、 $E_{\gamma}$  が大き いほど前方散乱が支配的になる。

# 2.3 電子·陽電子対生成

ガンマ線のエネルギーが 1.02MeV 以上になると電子・陽電子対生成が起こるようになる。10MeV 以上の領域では電子・陽電子対生成が優位となる。入射ガンマ線のエネルギー $E_{\gamma}$ と電子・陽電子 のエネルギー $E_{-}$ 、 $E_{+}$  は

$$E_{\gamma} = E_{-} + E_{+} + 2m_e c^2 \tag{2.7}$$



図 2.3: 散乱角  $\phi$ の単位立体角内へのコンプトン散乱される光子数の極座標表示 [1]

の関係が成立している。 また反応断面積  $\sigma_{pair}$  は、 $E_\gamma \ll rac{1}{lpha Z^{1/3}}$ のとき

$$\sigma_{pair} \propto Z^2 (\ln E_\gamma - const) \tag{2.8}$$

 $E_\gamma \gg rac{1}{lpha Z^{1/3}}$ のとき

$$\sigma_{pair} \propto Z^2 \left( \ln \frac{1}{Z^{1/3}} \right) \tag{2.9}$$

となる。ただし、

$$\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hc} \tag{2.10}$$

である。従って反応断面積は基本的に  $Z^2$  に比例し、 $E_{\gamma}$  が高くなるとより複雑になる。

# 第3章 ガス増幅検出器

われわれが開発した紫外線光子検出器では、光電子の増幅にガス増幅検出器 µ-PIC を用いている。本章ではこの検出器の基本となるガス増幅検出器一般の動作原理といくつかの代表的なガス検出器について述べる。

# 3.1 動作原理

# 3.1.1 電離過程

ガス検出器は通常、入射粒子によってガスを電離させ、そのとき生じた電子を電極に集めること によって粒子を検出する。多くの場合はガス中に生じた電子の数を増やすことによって、電気的な ノイズと信号の分離を容易にしている。電離過程を起こすために必要なエネルギーは気体の種類に よって異なり、その平均エネルギーをW値と呼ぶ。入射粒子のエネルギーが *E*<sub>i</sub> とすると、電離作 用により生じる一次電子の個数 *n*<sub>i</sub> は W 値を用いて

$$n_i = \frac{E_i}{W \,\underline{\acute{a}}} \tag{3.1}$$

となる。例えば電離箱の場合は、このようにして生じた電子を全て読み出すことにより信号を検出 する。

ガス検出器によく用いられる気体の特性を表 3.1 に示す。

Gas	原子番号	原子量	密度 $[g/cm^3]$	$I_0[eV]$	W 值 [eV]
He	2	4.003	$0.165 \times 10^{-3}$	24.59	42.3
Ne	10	20.18	$0.838 \times 10^{-3}$	21.56	36.4
Ar	18	39.95	$1.662 \times 10^{-3}$	15.76	26.3
Kr	36	83.8	$3.478 \times 10^{-3}$	14.00	24.05
Xe	54	131.3	$5.485 \times 10^{3}$	12.13	21.9
$C_2H_6$	18	30.07	$1.250 \times 10^{-3}$	11.50	24.38
$CO_2$	22	44.011	$1.829 \times 10^{-3}$	13.79	32.8

*I*<sub>0</sub>:第一イオン化エネルギー

表 3.1: ガス検出器に用いられるガスの特性

#### 3.1.2 電離された電子の振る舞い

電子のドリフト

荷電粒子によりガス中に電離された電子・イオン対に緩やかな電場をかけると、一定の速度 v で ドリフトする。イオンのドリフト速度  $v_+$  は電場 E、ガス圧 P を用いて  $v_+ = \mu_+ \frac{E}{P}$  と表せる。た だし  $\mu_+$  はイオンの移動度 (mobility) で、ガスにより決まる定数である。一方、電子の場合ははイ オンのように移動度が一定ではなく複雑になる。電場 E、ガス分子との衝突平均時間  $\tau$  とすると、 電子のドリフト速度  $v_-$  は、

$$v_{-} = \frac{eE}{m_e}\tau\tag{3.2}$$

となる。 $\tau$  は E/P に依存するので  $v_-$  も E/P に依存することになるが、図 3.1 のようにガスの種類や混合比によって  $v_-$  は大きく変化する。



図 3.1: 電場に対する電子のドリフト速度(シミュレーション)[3]

#### 電子の拡散

時刻 t = 0 において原点に局在する電子はガス分子との多重散乱により拡散する。時刻 t、位置 xにおいて幅 dx中に存在する電子数 dNは全電子数を Nとして

$$dN = \frac{N}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp{-\frac{x^2}{4Dt}} dx \tag{3.3}$$

と表される。ただし D は拡散係数であり、電子の場合だとガスの種類や混合比に依存するほか、 電場にも依存する。したがって式 (3.3) から 1 次元拡散の標準偏差は  $\sigma_x = \sqrt{2Dt}$ 、2 次元では  $\sigma_x y = 2\sqrt{Dt}$  となる。電子の拡散係数は検出器の位置分解能を決める重要な量であり、拡散が小さ い条件ほど位置分解能が良くなる。図 3.2 は横方向の電子の拡散を表したものである。

#### 3.1.3 ガス増幅

ガス増幅を利用した検出器のうち、代表的なものとして比例計数管がある。ここでは比例計数 管を例にとって、ガス増幅の物理過程について述べる。比例計数管は図 3.4 の様に筒状の陰極(カ ソード)の中心に直径数十 ~ 数百  $\mu$ m の陽極(アノード)線を張ってあり、比例計数管の中には Ar や Ne などの希ガスで満たされている。陽極線の半径を  $r_a$ 、陰極管内側の半径を  $r_c$ 、陽極への 印加電圧  $V_0$  とし、陰極を接地 (V = 0)したときを考えると、計数管の中心から距離 r における電 場の強さ E(r) および電圧 V(r) はそれぞれ



図 3.2: 電場の拡散 (シミュレーション) [3]

$$E(r) = \frac{V_0}{\ln r_c/r_a} \frac{1}{r}$$
(3.4)

$$V(r) = \frac{V_0}{\ln(r_c/r_a)} \ln \frac{r}{r_c}$$
(3.5)





図 3.3: 比例計数管の概念図

ー次電離により生じた電子はこの強電場で加速され、エネルギーを得る。このエネルギーがガス のイオン化ポテンシャルより大きいと二次電離が起き、さらにその電子が他の原子をイオン化して いく。このようにして連鎖的に電子が増幅される過程を雪崩増幅と呼び、電子が陽極線に達するま で続く。二次電離するまでの電子の平均自由行程を $\lambda$ とすると、電子が単位長さあたりにイオン 化する個数は  $\alpha = 1/\lambda$  と置ける。この  $\alpha$  は第一タウンゼント係数もしくは第一イオン化係数と呼 ぶ。距離 x を通過した結果、増幅されてできた電子の個数 n は

$$n = n_0 \exp\left(\alpha x\right) \tag{3.6}$$

と表せる。ただし  $n_0$  は雪崩増幅する種となる最初の電子の個数である。 $\alpha$  は電子の通過距離に依存するためガス増幅率 M は第一タウンゼント係数を距離 x で積分した値となり、

$$M = \frac{n}{n_0} = \exp\left(\int \alpha dx\right) \tag{3.7}$$

と表すことができる。陽極・陰極間に適切な印加電圧を与えた場合は、この増幅率は n<sub>0</sub> の値に関係なく一定となる。また n<sub>0</sub> は入射粒子のエネルギーに比例するので、得られる信号の波高もエネルギーに比例することになる。このような電圧領域を比例領域と呼ぶ。

比例領域からさらに印加電圧を上げると、充填されている気体が不活性ガスのみの場合、増幅率は  $10^3 \sim 10^4$  程度である。これはイオン化されたガスが電子捕獲して定常状態に戻るときに紫外領域 の光子を放出する (Ar の場合 11.59eV や 15.76eV) ためである。この光子が陰極管面などに当た ると光電効果により電子を放出し、この電子が再び強電場によって加速されることによって電子雪崩が生じてしまう。このような過程により出力信号が一次電子の個数に比例しなくなり、増幅率が 制限される。この領域をガイガー・ミュラー領域と呼び、GM 計数管 (ガイガー・ミュラー計数管) はこの領域で用いられる。二次的な光電子による電子雪崩を抑制するにはメタンやエタンなどの有 機ガスが有効である。これらのガスは紫外領域の光子 (メタンの場合 7.9~14.5eV)を吸収し、分子の振動や回転のエネルギーとなる。このような有機ガスを消滅ガス (quench gas) と呼び、消滅 ガスの導入により  $10^6$  もの高いガス増幅率を得ることが可能になる。



図 3.4: ガス検出器で収集されるイオン対と印加電圧の関係(入射粒子は β 線と α 線) [5] I:再結合領域 II:電離箱領域 III:比例領域 IV:ガイガー・ミュラー領域

# **3.2** Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)

比例計数管の様な検出器を平行に多数配置すると、粒子が入射してきた時間とその粒子が検出 器内で落としたエネルギーが測定できる他に入射位置も測定できる。Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)[6] はこの原理に基づき 1967 年から 1968 年にかけて開発され、多くの位置検出 型ガス検出器はこの MWPC を基礎としている。MWPC は図 3.5 の様に 2 枚のカソード板を平行 に配置し、その間に多数のアノードワイヤーを平行に張った構造になっており、それぞれのアノー ドは独立した比例計数管として動作する。構造が単純なため大面積なものが作りやすく、高エネル ギー実験や原子核実験に広く用いられている。入射粒子によって電離された電子は図 3.6 に示され



図 3.5: MWPC の概念図 [7]

るような電場に沿ってドリフトし、アノード付近の強電場によって増幅される。アノードワイヤー に到達した電子による信号から粒子の入射位置を1次元的に求めることができる。一方電子が増幅 される際に生じたイオンはカソードプレートに集められる。そこでカソードプレートの代わりにア ノードと垂直なストリップ上の電極を配置し、それぞれのカソードストリップに誘起された電荷を 読み出して重心演算すれば2次元的に粒子の入射位置情報を得ることができる(図 3.7)。



図 3.6: MWPC の電場構造 [5]

MWPC の位置分解能はアノードワイヤーの間隔 s によって決まり、粒子がワイヤーに垂直に入



図 3.7: MWPC による 2 次元イメージングのためのカソードストリップ配置方法 [8]

射した場合だと位置分解能  $\sigma_x$  は  $\sigma_x = \frac{s}{\sqrt{12}}$  となる。したがってこの間隔を狭くできれば位置分解 能が上がるが、狭くした場合だとワイヤー同士の静電気力による反発力が強くなり、力学的に不安 定となって図 3.6 中央で見られるように電場構造の歪みが生じる。この問題を解決するには静電気 力に耐えうる張力で張る必要がある。この張力 T は、

$$T > \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{CVl}{s}\right)^2 \tag{3.8}$$

と表される。

ただし *C* はワイヤーの単位長さあたりの静電容量、*V* は印加電圧、*l* はワイヤーの長さ である。ワ イヤーを太くすればその分、強い張力でワイヤーを張れるが、径が太すぎるとガス増幅に必要な高 電場領域が作りにくくなってしまう。そのため適切なワイヤーの径と間隔を決定しなければならな い。一般的にはワイヤーの直径が間隔の1%程度となるように選ぶ。またワイヤーの間隔は 500µm が限度である。

アノードで電子雪崩が起こった直後は陽イオンが集まっているため、陽イオンがカソードまでド リフトされるまでは粒子が入射してきてもガス増幅が起こらない。従って MWPC の場合は単位時 間・単位面積あたりの入射許容量は 10<sup>4</sup> count/(sec·mm<sup>2</sup>) である。

# **3.3** MPGD(Micro Pattern Gas Detector)

MWPC は前節で述べたように大面積かつ増幅率の高い画像検出器であったが、大強度入射に対 する検出感度や2次元イメージングの位置分解能に限界があり、それ以上の改善が困難であった。 しかし近年では高計数率かつ高位置分解能な検出器が求められ、MWPC の性能を上回るものが必 要となっていた。そこでワイヤーを使わずにIC やプリント基板を製造する際の微細加工技術を用い て製造する MPGD(Micro Pattern Gas Detector)が開発された。これにより MWPC では実現で きなかった性能を持った検出器が開発され、現在では様々な MPGD(Micro Pattern Gas Detector) が多方面に渡って活躍しており、μ-PIC もそのひとつである。ここでは各種 MPGD について述 べる。

#### 3.3.1 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)

MSGC は 1988 年に Oed らが考案した検出器である [9]。2 次元読み出しができる MSGC の場 合、図 3.8 のように厚さ 20µm のポリイミド基板上に厚さ 1µm、幅 10µm のアノードストリップ、 100µm のカソードストリップを 200µm 間隔で配線し、基板の裏にはバックストリップを配置する。 アノードストリップからの電荷とアノード付近の雪崩増幅に伴って発生したイオンにより誘起され たバックストリップの電荷を読み出すことにより 2 次元イメージングが可能となる。アノード近傍 で発生した陽イオンは、MWPC のときと異なり、近くのカソードストリップに直ちに集められる のでイオンによって電場構造が影響を受けることがなく、10<sup>7</sup> count/(sec·mm<sup>2</sup>) もの入射粒子許容 量を持つ。MWPC よりも電極を近づけることができたため位置分解能は向上したが、ストリップ が非常に細いのでアノード-カソード間の放電により非常に破壊されやすく、ガス増幅率は 1000 程 度が限界である。



図 3.8: 2 次元 MSGC の概念図 [10]

#### **3.3.2** MDOT(Micro Dot chamber)

MDOT はピクセル構造を持った初めての MPGD である [11]。ピクセル構造を持った電極の方 がストリップ構造の電極よりも電場が密になるので、ストリップ型の検出器よりも高いガス増幅率 を得ることができる。MDOT は図 3.9 のような構造をしており、集積回路の技術を使ってシリコ ンウェハの上に 5µm 厚の SiO<sub>2</sub> 層が形成されており、アノード電極がその絶縁層内に埋め込まれ ている。またアノード電極の直径は 20µm、セルサイズが 225µm のものが 200µm ピッチで配置さ れている。これによりガス増幅率は MDOT 単体で 10<sup>4</sup> 程度を達成しているが、IC の技術を用い て製作されているため大面積のものを作ることが困難である。



図 3.9: MDOT の概念図 [12]

## 3.3.3 GEM(Gas Electron Multiplier)

GEM[13] は 1997 年に Sauli によって開発されたもので、MPGD の中でも広く用いられ、様々 な研究機関において開発も進められている。ここでは CERN によって開発された GEM (図 3.10) について紹介する。GEM の構造は 50µm 厚のポリイミドの両側にそれぞれ 5µm 厚の銅電極を蒸 着させてあり、140µm ピッチで直径 70µm の穴が空けられている。この上下の電極に電位差を与 えることによって、図 3.11 の様に穴の中を電気力線が通り強電場が作られるため、穴の中を通る 電子が雪崩増幅される機構となっている。



図 3.10: CERN GEM の顕微鏡写真 [14]



図 3.11: GEM を通る電気力線の様子 [14]

GEM は複数枚 (主に 2 枚か 3 枚) 重ねて使用することにより  $10^5$  もの高いガス増幅率を得られることが特徴である。また  $10^5$  count/(sec·mm<sup>2</sup>) もの高レートでも動作し、図 3.12 のように読み出し部分は独立に設計することができる。



図 3.12: GEM を用いた検出器の例(2次元ストリップ読み出し)[14]

#### 3.3.4 MICROMEGAS(MICRO MEsh GAseous Structure)

MICROMEGAS は 1996 年に開発され、図 3.13 のようなカソードドリフト電極、メッシュ、ア ノードプレートからなる 2 段平行板型増幅器である。アノードプレートから 100µm もの短い距離 に金属のメッシュを張り、メッシュ-アノード間に 30kV/cm~100kV/cm もの高電場をかけること によって図の様な電場構造ができ、電子を雪崩増幅させる原理になっている。MICROMEGAS も 各研究機関において開発されており、アノード-メッシュ間の距離やメッシュのピッチなどの研究 が進められている。典型的なメッシュとして厚さ 3µm、ピッチが 50µm のものがある。GEM と同 様に読み出し部分は独立に設計でき、単体で数万程度の増幅率を達成している。



CONVERSION GAP (3mm) E<sub>drift</sub> 1-5KV/cm Mesh Pitch 50µm Mesh Thickness 3ym AMPLIFICATION GAP (100µm) E<sub>amplification</sub> 30-50KV/cm Strips 0V

図 3.13: MICROMEGAS の概念図 [15]

図 3.14: MICROMEGAS の電場構造 [16]

# 第4章 シンチレーション検出器

放射線が物質中に入射したときにおよそ 100µs 以下で減衰する光を放出する現象をシンチレー ションと呼び、そのような物質をシンチレータと呼んでいる。特にシンチレーション光の波長が紫 外領域から可視光領域の場合、光電子増倍管などの光検出器を使うことによってシンチレーション 光を検出することが可能となる。シンチレータは素粒子・宇宙物理、核医学、資源探査といった多 岐に渡る分野で用いられており、本論文で述べている紫外線光子検出器もシンチレータを利用して いる。本章では各種シンチレータおよびシンチレーション検出器の概要を述べる。

### 4.1 各種シンチレータ

シンチレータは大きく分けて気体、有機、無機シンチレータに分類される。本節では各種シンチ レータ、特に本実験で用いた無機シンチレータを中心に概説を行う。

#### 4.1.1 気体シンチレータ

気体シンチレータは主に希ガスから成り、原子の遷移の際に発光する。発光波長は紫外領域で、 減衰時間がおよそ 1ns と他のシンチレータに比べて極めて短いことが特徴である。その一方でシ ンチレーション効率が数% 程度しかなく、密度も小さいためガンマ線の検出効率は極めて小さい。 1MeV 当たりの発光量が検出粒子の電荷と質量にほとんど依存しないため、α粒子や重イオンなど の荷電重粒子のエネルギー測定に適している。

#### 4.1.2 有機シンチレータ

有機シンチレータは分子の遷移により発光し、減衰時間がおよそ 30ns 以内であることが特徴で ある。有機シンチレータにはアントラセンやスチルベンを用いた結晶シンチレータ、キシレンやト ルエンといった有機溶媒に有機物質を混合させた液体シンチレータやそれらを重合化し、固化させ たプラスチックシンチレータがある。一般的に有機シンチレータは減衰時間が短いため計数レート が高い実験に利用でき、異なる荷電粒子に対して波形が異なるため波形弁別により粒子を分けるこ とが可能である。また液体シンチレータやプラスチックシンチレータは大型化が容易なため、X 線 検出器や大型宇宙素粒子検出器などに広く用いられている。

#### 4.1.3 無機シンチレータ

無機シンチレータは NaI(Tl)、CsI(Tl) などに代表されるように原子番号が大きい物質を用いる ため、光電吸収断面積が大きく、硬 X 線・ガンマ線検出に適している。無機シンチレータの発光 は材料の結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する。電子の原子中におけるエネルギー状態は、 図 4.1 のように電子が格子上の位置に束縛された状態にある価電子帯と結晶内を自由に移動できる ほど十分なエネルギーを持った伝導帯とに分けられ、純粋な結晶中ではこの間の状態(禁止帯)を 取ることはない。もし価電子帯にある電子が伝導帯に移動できるほどのエネルギーを得た場合、電 子は伝導帯に移動し、価電子帯には正孔が残る。そしてその電子が価電子帯へ戻るときに光子が放 出されるのだが、この過程は効率が悪く、放出される光子のエネルギーも禁止帯に相当するエネル ギーである 8eV 程度で可視光領域ではない。そこで可視光の発光効率を上げるために活性化物質 と呼ばれる少量の不純物を添加する。活性化物質の代表的なものに Ce<sup>3+</sup> や Tl<sup>+</sup> がある。これによ り純粋な結晶格子のエネルギー帯の構造を変形させ、禁止帯の中に新たなエネルギー帯を形成する ことで価電子帯への遷移が容易になる。



図 4.1: 無機シンチレータの発光原理

無機シンチレータの発光機構は様々あり、その発光波長は励起された電子がどのような過程で基 底状態に戻るかに依存する。この過程は大きく分けて"Exciton(dopant) luminescence"、"Chargetransfer luminiscence"、"Core-valence luminescence"の3つがある。Exciton(dopant) luminescence は図 4.2(a) のように活性化物質の励起状態から基底状態への遷移により発光する過程であ る。Charge-transfer luminiscence は Exciton luminescence の一種に分類され、活性化物質が異な る価数を持ったときに作る準位間の遷移によって発光する。例えば図 4.2(b) のように活性化物質 Yb<sup>2+</sup> の励起状態から Yb<sup>3+</sup> の基底状態への遷移により発光する。Core-valence luminescence は図 4.2(c) のように励起によって価電子帯に生じたホールとある価電子帯中の電子とが結合することに より発光する。例えば BaF<sub>2</sub> の場合、0.6ns と減衰時間が非常に短い成分があり、紫外領域に発光 することが特徴である。

無機シンチレータの種類は数多くあり、現在でもその使用用途ごとにエネルギー分解能や減衰時間などの性能向上に向けた材料開発が行われている。ここで代表的な無機シンチレータの性能を表 4.1 に示す。また以下にそのいくつかを紹介する。

NaI(Tl) [18, 19]

1948年にHofstadterにより発表されたシンチレータで、エネルギー分解能が6~7%(FWHM@662keV) と優れていることが特徴である。そのため様々なシンチレータ開発がなされている現在でも良く使 われている。その一方で減衰時間が230nsと長いため高計数率の測定には向いていない。また潮解 性があるため結晶を気密容器内に密閉する必要がある。低温の場合だと光量が落ちてしまうという 短所もあり、例えば0°Cのとき室温で使用するよりも光量は10%程度落ちる。

 $BaF_{2}$  [20]



(a)





図 4.2: 発光機構概念図 (a)GSO(Ce) の発光機構 Exciton(dopant) luminescence (b)YAG の発 光機構 Charge-transfer luminescence (c)BaF<sub>2</sub> の発光機構 Core-valence luminescence

exciton luminescence に由来する遅い成分の発光と Core-valence luminescence に由来する速い成分の発光がある。遅い成分は減衰時間が 620ns、発光波長 310nm であるのに対して、速い成分が 減衰時間 0.6ns、発光波長 220ns と非常に速い減衰時間で、紫外領域に発光することが特徴である。

**GSO(Ce)** [21]

Ce がドープされた Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(GSO) は高い阻止能を持っており、減衰時間が 30~60ns と短く、エ ネルギー分解能も 662keV のガンマ線に対しておよそ 7%と比較的良い。そのため PET(Positron emission computed tomography) といった医療機器に利用されているほか、放射線耐性が優れてい るため宇宙環境でも利用されており、X 線天文衛星「すざく」の HXD(Hard X-ray Detector) に も搭載されている。[22] 潮解性はない一方、へきかい性があるため加工には注意を要する。

 $LaBr_3(Ce)$  [23]

2001 年に発見され、強い潮解性があるものの減衰時間が 30ns 程度と短く、光量も NaI より 1.5 倍 程度大きいためエネルギー分解能が 662keV のガンマ線に対して 2.8%(FWHM) と非常に優れてい

結晶名	密度	energy	減衰	発光	光量 **	屈折率	潮解性	放射耐性
	$[g/cm^3]$	分解能	時間	波長				[gray]
		*[%]	[ns]	[nm]				
NaI(Tl)	3.67	6-7	230	415	100	1.85	有	10
CsI(Tl)	4.53	6-7	1050	550	85	1.8	僅か	10
$\operatorname{BaF}_2$	4.89	9	0.6,620	220,310	5,16	2.2	無	$10^{3-4}$
BGO	7.13	10-12	300	480	7-10	2.15	無	$10^{2-3}$
GSO(Ce)	6.71	8-9	30-60	440	20	1.85	無	$10^{6}$
$LaBr_3(Ce)$	5.29	3	16	380	160	$\sim 1.9$	有	$>3.4 \times 10^3$

\* FWHM@662keV

\*\* NaI(Tl) の光量を 100 としたときの相対値

#### 表 4.1: 各種無機シンチレータの性能

る。天然 La に含まれる <sup>138</sup>La は  $1.02 \times 10^{11}$ 年の半減期を持っており、 $\beta$  崩壊もしくは軌道電子 捕獲によりそれぞれ 739keV と 1436keV のガンマ線を放出しているため検出器の自己バックグラ ウンドとなる。

# 4.2 光輸送

シンチレーション光は結晶内で一様等方に発光するため、シンチレーション光を効率良く読み出 すためには検出器までの光の経路を考えなくてはならない。結晶自身の自己吸収も存在するが、通 常は結晶の周囲に反射材を用いたり、結晶と光学窓の接触面にグリスなどを付けることによって検 出器までの光輸送効率を上げている。ここではこのような光輸送について述べる。

#### 4.2.1 反射材 光学グリス

反射材としてよく使われるものとして、金属系反射材(剤)、フッ化樹脂系反射材、多層膜系反 射材がある。金属系反射材(剤)は樹脂でできた板に金属を蒸着させて反射シートにしたり、金属 粉を適切な溶媒に溶かし込み結晶に塗布するといった形で使用される。用いられる金属としては 銀、チタン、アルミニウムなどが反射率が高く良く利用される。

フッ化樹脂系反射材の代表的なものとしては Dupont 社が開発したテフロン<sup>®</sup> やジャパンゴアテックス社のハイパーシートガスケット<sup>®</sup> があり、軟らかく伸縮性を持っている。100~200µm の厚みで、結晶表面に巻いて使用する。特にハイパーシートガスケット<sup>®</sup> の反射率は紫外線から赤外線までの広い波長領域で 100%に近い値を出している。

多層膜系反射材とはポリエステル系樹脂の多層膜構造を持ったもので、代表的なものとして 3M 社 の ESR(Enhanced Specular Reflector) <sup>®</sup> がある。ESR は  $65\mu$ m という薄さだが、硬質で曲げに 強いため加工するにはレーザーなどを用いる必要がある。

また結晶と検出器の光学窓の屈折率をなるべく同じにすることで、屈折率の違いから生じる反射 や散乱を防ぐことができ、シンチレーション光の収集効率を上げることができる。しかし結晶を光 学窓に単に取り付けるだけではその間に空気の層ができてしまうため、間に光学グリスを付ける必要がある。例えば応用光研社のOKEN6262はガラスとほぼ同じ屈折率を持っている。

# 4.3 光電子増倍管 (PMT)

#### 4.3.1 光電子增倍管 (PMT) 概説

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) は微弱な光を検出するための検出器であり、図 4.3 の様に入射した光が光電面内の電子を励起し、それにより放出された光電子をダイノードで増幅す る構造となっている。一般的に用いられている PMT の中身は真空に保つ必要があるため、その構 造は真空に耐え得るような形に限定される。また磁場が存在すると電子が曲げられてしまうため、 あるダイノードから次のダイノードに到達する電子数が減り増幅率が減少する。このことから強い 磁場中では PMT を使うことができない。



図 4.3: PMT (ヘッドオン型)の構造 [24]

#### 4.3.2 光電面

光電面の多くは仕事関数が低いアルカリ金属を主成分とした化合物半導体でできている。以下に 代表的な光電面の種類をいくつか紹介する [24]。真空紫外・紫外領域に感度を持っているものとし て代表的な光電面物質は CsI である。ただし波長 200nm 以上の光に対しては急激に感度が落ち、 やや潮解性があるため扱いには注意を要する。紫外から可視光領域で良く用いられるものとしてバ イアルカリがある。バイアルカリは (Sb-Rb-Cs、Sb-K-Cs)2 種類のアルカリ金属を用いている。紫 外から可視光領域に感度を持ち、高感度かつ低暗電流である。

また光電面の設置方法は大きく分けて反射型光電面と透過型光電面の2種類あり、それぞれ異なった特徴を持つ。反射型光電面はサイドオン型PMTに用いられ、光電面は通常金属板上に取り付けられている。透過型に比べて光電面から放出される電子が光電面に再吸収されにくいため、光電面を厚く取り付けることができる。そのため透過型よりも量子効率を出しやすいという特徴がある。透過型光電面は光電面が入射窓の内側に直接付けられており、ヘッドオン型PMTに用いられている。反射型に比べ一様性が高く、受光面積の選択肢が多いことが特徴である。

#### 4.3.3 入射窓材

PMT の長波長限界が光電面に依存する一方、短波長限界は入射窓材により決定される。代表的 な入射窓材を以下に挙げる [24]。MgF<sub>2</sub> 結晶は潮解性がほとんど無く、波長 115nm 以上の真空紫 外線を透過する。合成石英は 160nm までの紫外線を透過する。ただし石英はヘリウムを透過しや すいため、ヘリウムガス雰囲気中では使用できないことに注意しなければならない。硼硅酸ガラス は波長 300nm 以上の紫外線を透過する。これらの波長に対する透過率を図 4.4 に示す。



図 4.4: PMT に用いれる光学窓透過率 [24]

#### 4.3.4 量子効率

光電面から放出される電子数を入射する光子数で割った値を量子効率 (QE) と呼び、光電面に使われる物質の電子親和エネルギーやその厚さ、構造により決まる。代表的な光電面の分光感度特性および量子効率を図 4.5、図 4.6、図 4.7、図 4.8 に示す。

一般的な PMT の量子効率は上述した図からわかるように 20%~30%程度であるが、近年では ~ 35% の SBA、~ 43% の UBA が浜松ホトニクス社において製品化されている。(図 4.9)

#### 4.3.5 位置検出型光電子増倍管

入射してきたガンマ線の位置情報を得るために、位置分解能が1cm以下で受光面積の広い位置 検出型 PMT が開発されている。そのひとつにメタルチャンネル型ダイノードマルチアノード光電 子増倍管があり、図 4.10の様な構造をしている。メタルチャンネル型ダイノードによって2次電 子のクロストークが他の電極に比べて非常に少ないことが特徴で、マルチアノード構造により個別 に読み出しが可能となっている。ただしアノードごとの増幅率のばらつきが数倍程度存在する。例 えば浜松ホトニクス社の H8500<sup>®</sup>の場合、受光面積がおよそ50 × 50mm<sup>2</sup> で約6 × 6mm<sup>2</sup>のア ノードが8 × 8 個並んでおり、アノード間の増幅率のばらつきはおよそ2 倍から4 倍程度である。

					分光感度特性	
	分光カーブ	光電面	入射窓	波長範囲	最高感度波長	
	(3) 2/1 /			(nm)	放射感度(nm)	量子効率(nm)
0	150M	Cs-I	MgF <sub>2</sub>	115~195	120	120
0	250S	Cs-Te	合成石英	160~320	200	200
0	250M	Cs-Te	MgF <sub>2</sub>	115~320	200	190
0	350K(S-4)	Sb-Cs	硼硅酸	300~650	400	350
0	350K(S-5)	Sb-Cs	UV	185~650	340	270
0	350S(S-19)	Sb-Cs	合成石英	160~650	340	210
0	351U(Extd S-5)	Sb-Cs	UV	185~700	450	235
_	451U	バイアルカリ	UV	185~730	340	320
_	452U	バイアルカリ	UV	185~750	350	315
	453K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	400	360
-	453U	バイアルカリ	UV	185~650	400	330
3 <del></del> 8	454K	バイアルカリ	硼硅酸	300~680	450	430
-	455U	バイアルカリ	UV	185~680	420	400
-	456U	低暗電流バイアルカリ	UV	185~680	375	320
-	457U	バイアルカリ	硼硅酸	300~680	450	450
_	550U	マルチアルカリ	UV	185~850	530	250
1	550S	マルチアルカリ	合成石英	160~850	530	250
0	551U	マルチアルカリ	UV	185~870	330	280
0	551S	マルチアルカリ	合成石英	160~870	330	280
0	552U	マルチアルカリ	UV	185~900	400	260
0	552S	マルチアルカリ	合成石英	160~900	400	215
_	554U	マルチアルカリ	UV	185~900	450	370
1	555U	マルチアルカリ	UV	185~850	400	320
	556U	マルチアルカリ	UV	185~930	420	320
-	557U	マルチアルカリ	UV	185~900	420	400
	558K	マルチアルカリ	硼硅酸	300~800	530	510
0	650U	GaAs(Cs)	UV	185~930	300~800	300
0	650S	GaAs(Cs)	合成石英	160~930	300~800	280
-	651U	GaAs(Cs)	UV	185~910	350	270
0	750K	Ag-O-Cs	硼硅酸	300~1100	730	730
	850U	InGaAs(Cs)	UV	185~1010	400	330
0		InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	300~1400		
0	·	InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	300~1700		1 <u>5 1</u> 5

#### 反射型光電面

図 4.5: 反射型光電面の分光感度特性 [24]

迈迪至儿里囬	透過	型	光	雷	面
--------	----	---	---	---	---

				分光感度特性			
	分光カーブ (Sナンバー)	光電面	入射窓	波長範囲	高感度波長		
	(0) 21. 1			(nm)	放射感度(nm)	量子効率(nm)	
0	100M	Cs-I	MgF <sub>2</sub>	115~200	140	130	
0	200S	Cs-Te	合成石英	160~320	210	200	
0	200M	Cs-Te	MgF <sub>2</sub>	115~320	210	200	
-	201S	Cs-Te	合成石英	160~320	240	220	
-	201A	Cs-Te	サファイア	150~320	250	220	
0	300K(S-11)	Sb-Cs	硼硅酸	300~650	440	410	
0	400K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	420	390	
0	400U	バイアルカリ	UV	185~650	420	390	
0	400S	バイアルカリ	合成石英	160~650	420	390	
0	401K	高温用バイアルカリ	砌石圭香发	300~650	375	360	
$\rightarrow$	402K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	375	360	
0	500K(S-20)	マルチアルカリ	<b>福朋</b> 在圭 酉 夋	300~850	420	360	
0	500U	マルチアルカリ	UV	185~850	420	290	
0	500S	マルチアルカリ	合成石英	160~850	420	280	
0	501K(S-25)	マルチアルカリ	硼硅酸	300~900	650	600	
0	700K(S-1)	Ag-O-Cs	硼硅酸	300~1200	800	780	

図 4.6: 透過型光電面の分光感度特性 [24]



図 4.7: 反射型光電面の量子効率 [24]



図 4.8: 透過型光電面の量子効率 [24]



図 4.9: SBA、UBA の量子効率 [25]



図 4.10: メタルチャンネル型ダイノード構造 [24]

# 第5章 ガス増幅型紫外線光子検出器

光源に真空紫外線(波長 200nm 以下)を発光するシンチレータ LaF<sub>3</sub>(Nd)、光電面物質に CsI と増幅部にガス検出器から構成された紫外線光子検出器の開発は他の研究機関でも行われてきた。本章ではこの検出器の基本概念となるガス増幅型光検出器の概要および現状について述べる。

# 5.1 ガス増幅型光検出器

ガス増幅型光検出器は主に光電面とガス検出器から構成されている。ガス検出器の特性をそのま ま生かすことができるため、一般的な PMT と比較して以下のような利点が挙げられる。

- 大面積なものが安価に作りやすい
- 真空に保つ必要がないので検出器形状に対する制限が緩和される
- Sub mm レベルの位置分解能
- 磁場中でも使用可能

従来の PMT にはない利点が多くある一方で、一方で以下のような欠点がある。

#### 光電面の安定性

一般の PMT とは異なり真空に保つ必要がない一方で、光電面を選択する時には光電面物質とガス PMT 内の気体との反応性に注意しなければならない。特にバイアルカリ光電面は酸素との反応性 が高いため扱いが難しくなるが、CsI などをコーティングすることによって酸素に対して耐性を強 化したバイアルカリも開発されている。(図 5.2、図 5.1)しかしこれらの対酸素強化バイアルカリ は通常のバイアルカリと比較すると量子効率が格段に下がってしまうため、まだ実用レベルには達 しておらずこれからの開発が期待される。

高計数率環境下での光子フィードバックおよびイオンフィードバック

光子フィードバックはガス増幅率が高くなることによって、比例計数管でも起こるようなガイガー 放電が生じ安定に動作させることができない。またイオンフィードバックは電子のなだれ増幅に伴 い生じたイオンにより、電場構造が乱れガス増幅率が低下する現象である。

これらの欠点があるものの従来の PMT にはない利点が多くあるため、特に大面積を必要とする ニュートリノや暗黒物質探索などの大型宇宙素粒子検出器への応用に向けて様々な研究機関でガス PMT 開発が行われている。



図 5.1: 様々なバイアルカリ光電面の量子効率 [32]

図 5.2: 酸素圧力に対するバイアルカリ光電面の 量子効率 [32]

## 5.2 使用シンチレータ

今回使用したシンチレータは LaF<sub>3</sub> に Nd<sup>3+</sup> をドープさせた単結晶で(図7.1) 真空紫外線を発 光することが特徴である。真空紫外線は多くの材料に吸収される性質を持っているため、たとえ真 空紫外線を発光したとしてもシンチレータ自身が真空紫外線を吸収してしまうという問題点があ る。しかしフッ化物結晶は例外的に真空紫外線を吸収しにくい特性を持っているため、LaF<sub>3</sub>(Nd) は真空紫外線源として適した材料となっている。本節では LaF<sub>3</sub>(Nd) の特性について述べる。

5.2.1 発光原理

LaF<sub>3</sub>(Nd) 結晶の発光原理は基本的には Nd<sup>3+</sup> の電子軌道 5d から 4f への遷移により生じる。こ の遷移は電子双極子の遷移に関して許容である。図 5.3 および図 5.4 は Nd<sup>3+</sup> のドープ量が 1mol% の LaF<sub>3</sub>(Nd) に、波長 157nm の F<sub>2</sub> レーザーを照射したときの発光スペクトルと電子軌道遷移図 である。図 5.3 から発光波長分布は 157nm および 168~172nm の部分に来ており、特に 172nm の 放射が強いことがわかる。またこれらの 5d-4f の遷移によるシンチレーション光は減衰時間が 1~ 20ns と非常に短いため [27]、シンチレータとして適した特性を持っている。

どの波長にどれくらいの強度で発光するかについては Nd<sup>3+</sup> のドープ量によって決まり、図 5.5 の様にドープ量が多くなれば波長 173nm の発光強度は強くなる傾向にある。また結晶に Nd 以外の 不純物が入ると真空紫外線の透過率が下がるため、結果として光量が下がってしまう特性がある。 このような結晶中の真空紫外線の損失を考慮すると、最大光量は Nd のドープ量を 10mol%程度に したときで 500~1000photons/MeV であることが予想されている [?]。しかし技術的に損失率を 0



図 5.4: LaF<sub>3</sub> における Nd<sup>3+</sup> の電子軌道遷移の例 [26]

にすることは難しく、今まで報告されている中で最も光量が大きいものとしては270photons/MeV である[30]。



図 5.5: Nd<sup>3+</sup>のドープ量 [mol%] による波長 173nm の発光強度 [28]

# 5.3 これまでのガス PMT を用いた紫外線光子検出器開発

LaF<sub>3</sub>(Nd) と光電面に CsI を用いたガス PMT による紫外線画像検出器開発は、PET などの医療用画像検出器への応用を視野に入れて、これまでにいくつかの研究機関で行われている。

#### MGC(Microgap Chamber) による開発

MGC(Microgap Chamber)[33] とは位置情報を取得できるガス検出器で、MSGC に改良を加えた ものである。その構造は図 5.6 の様に 1cm 角サイズの 400 $\mu$ m 厚シリコンウェ八上に 0.7 $\mu$ m 厚の SiO<sub>2</sub> の酸化膜を引き、その上に Al のカソードストリップ電極、そしてカソード電極上に 3 $\mu$ m 厚の SiO<sub>2</sub> 層と Al のアノードストリップ電極が配置されている。アノードおよびカソードストリップは 200 $\mu$ m ピッチで、アノード・カソードによる 2 次元読み出しができるようになっており、LaF<sub>3</sub>(Nd) からの紫外線のイメージングを目標としている。



図 5.6: MGC の概念図 [34]

ガスには Ne 60%、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O(ジメチルエーテル)40% を用いており、動作時にはアノードに440V、 ドリフト電場は 2.5kV/cm または 5kV/cm を与え、ガス増幅率 2500 または 3000 で動作させてい る。またシンチレータと光電面の設置の仕方は図 5.3 の様になっており、透過型光電面を使って いる。LaF<sub>3</sub>(Nd) に照射する放射線源としては <sup>22</sup>Na の 511keV のガンマ線を用いており、それに よる LaF<sub>3</sub>(Nd) からの紫外光の信号を得ることに成功している(図 5.3)。しかし図 5.3 で見られ るピークはノイズによるものであり、信号とノイズの比 (S/N 比)が悪かったためイメージング をするには至っていない。他にも LaF<sub>3</sub>(Nd) を用いた紫外線光子検出器では MWPC(Multi Wire Proportional Counter)を用いた開発 [35] や PPAC(Parallel-Plate Avalanche Chamber)を用いた 開発 [36] に関する報告があり、いずれも同じような検出器の構成をしている。これらも紫外光の信 号を得ることには成功しているが、イメージングまでは到達できていない。

#### 多段 GEM を用いた開発

最近では多段 GEM を用いた検出器による紫外線イメージングの報告がある [37]。この検出器で は図のように 2.8cm 角の 50 $\mu$ m 厚 GEM (絶縁層は Kapton)を 4 枚重ねて、初段 GEM の上面に CsI を蒸着させた反射型光電面を採用している。ガスは Ar95%、CH<sub>4</sub>5%を用いており、この検出 器では 1atm 環境下でガスを流し続けるタイプ (ガスフロー)である。GEM を 4 枚使うことによ り全体のガス増幅率は 10<sup>6</sup> 以上を達成しており、フォトンおよびイオンフィードバックを抑制する 役割も果たしている。窓にはクォーツ製のものを用いており、紫外線光源としては Hg(Ar) ランプ をちょうど光電面から 1 光電子が出るような条件の強度にして使用している。この検出器を動作さ せ、1 光電子数が取得できているとしてガス増幅率を逆算したものが図 5.10 である。ただし横軸 がガス増幅率、縦軸がカウントである。この結果から増幅率のばらつきを考慮すると平均ガス増幅 率は  $\sim 5 \times 10^5$  となっている。スリットを用いての位置分解能測定によれば、スリットに垂直な方向



図 5.7: シンチレータと光電面の配置概念図 [34]

図 5.8: <sup>22</sup>Na+LaF<sub>3</sub>(Nd) によるスペクトル [34]



図 5.9: 多段 GEM による紫外線光子検出器概念図 [37]

に関して ~150µm(FWHM)、スリットに平行な方向に関して ~250µm(FWHM) と sub mm レベ ルの位置分解能を達成している。また紫外光のイメージングを試みており、図のような金属ででき たマスクを使用して図に示した画像を得ることに成功している。



図 5.10: 1 光電子から得られたガス増幅率分布 [37]



図 5.11: 金属でできたマスクによる画像 (a) 実際のマスクの写真 (b) 多段 GEM で得られた 2 次元画像(動作増幅率は平均 ~5×10<sup>5</sup>[37]

# 第6章 紫外線光子検出器の構成

われわれが開発している紫外線光子検出器の増幅部には μ-PIC と GEM を用いており、光電面物質として CsI を用いている。本章では μ-PIC の基本性能や紫外線光子検出器の具体的な構成に ついて述べる。

#### 6.1 $\mu$ -PIC

#### 6.1.1 $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)

μ-PIC[38] は図 6.1 のように比例計数管を輪切りにしてアレイ状に並べた構造を持ったガス検出 器である。基板はポリイミド、電極は銅にニッケルがメッキされている。各ピクセルは 400μm 間 隔で配置されており、アノードとカソードは直交する方向にストリップ構造を成している。これに より高い位置分解能で 2 次元読み出しが可能となっている。



図 6.1: µ-PIC の構造 (a) 概観図 (b) 断面図

また  $\mu$ -PIC はピクセル状の電極構造となっているため、電場はピクセルの中心であるアノード 付近で非常に強くなり、カソードへ向かうに従って急速に弱くなる。したがって放電の原因のひと つと考えられている強電場によるカソードからの電子放出が起きにくくなり、放電の危険性が少な くなることが考えられる。また放電した場合もひとつのピクセルが使用できなくなるだけで、他の ピクセルへの影響がない。つまり MSGC において問題となっていた放電による電極破壊 [31] が起 きなくなり、 $\mu$ -PIC 単体で高いガス増幅率を長時間安定に得ることができる。さらになだれ増幅 がアノードのごく近傍でのみ起きるため、~ 10<sup>7</sup> count/(sec·mm<sup>2</sup>) もの大強度入射にも耐え得る。 製造に関してはプリント技術を用いているので、安価で大型化しやすいという利点があり、現在は 10×10 cm<sup>2</sup> (図 6.2) および 30×30 cm<sup>2</sup> (図 6.3) のものが稼働中である。



図 6.2: 10cm 角 µ-PIC の写真



図 6.3: 30cm 角 *µ*-PIC の写真

## 6.1.2 読み出しシステム

 $\mu$ -PIC の読み出し回路にはプリアンプとして、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)[39] chip を用いている。ま たこれを元に時定数 80ns の chip[40] も開発されている。ASD の構成は図 6.4 に示すように、プリ アンプ出力からアナログ信号を取り出し、プリアンプ、メインアンプ、コンパレータからデジタル 信号を取り出している。プリアンプの増幅率は時定数 16ns、80ns ともに 0.8V/pC であり、メイン アンプでは増幅率がおよそ 7 倍のものを使用している。また 1chip 当り 4 チャンネルの入力ライン を持っており、図 6.5 のように基板に表裏合計 16 個実装されている。





図 6.5: ATLAS TGC ASD 64 チャンネルボード

図 6.4: ASD の構成概念図 (P はプリアンプ、M はメインアンプ、C はコンパレータを表す。)

デジタル信号はわれわれが独自に開発したエンコーダー(図 6.6)に送られる。エンコーダーは 100MHz の内部クロックを持った 8 つの FPGA(Field Programmable Gate Arrays) から構成され ており、 $\mu$ -PICのアノードおよびカソードからの信号を6つのFPGAで受け取り、残りのFPGA で座標情報(X,Y)へと変換する。座標変換の仕方は1クロック(10ns)内に入ってきたX座標お よびY座標の最大値と最小値の平均値をヒット座標(X,Y)としている。この情報はヒットした時 間情報と共にVME上のメモリーボードに送られる。一方アナログ信号はVME上のFADCにて サンプリングされる。図 6.7 のようなシステムで $\mu$ -PICのヒット位置情報およびアナログ信号の 情報を得ることができる。



図 6.6: エンコーダー



図 6.7: µ-PIC 読み出しシステムの概念図 [41]

#### 6.1.3 *µ*-PIC の性能

μ-PIC は比例計数管のようにガス増幅を利用して信号を得る検出器である。従ってガス増幅率 の大きさは信号とノイズの比(S/N比)に直接関わるので、検出器の性能を示す重要な指標であ る。しかし MPGD の様に微細電極構造を持った検出器は、アノードとカソードの距離が数百 μm と非常に近いため放電現象がガス増幅率が制限される。特にガスと電極と絶縁物が集まっている点 (三重点)は放電を起こしやすく、MPGD の構造上避けられない。これにより例えば MSGC の場
合、ガス増幅率は~1000程度が限界であった。

ー方 μ-PIC は図 6.8 の様に最大 ~20000 のガス増幅率を達成している。またガス増幅率 ~6000 に 保ったまま 1000 時間以上もの安定動作を実現している。このように μ-PIC は安定に高いガス増幅 率を得ることができる検出器である。



図 6.8: µ-PIC のアノード電圧に対するガス増幅率



図 6.9: 10cm 角 µ-PIC のガス増幅率場所依存性

μ-PIC に薄いガスパッケージを取り付けることにより、高い位置分解能で X 線イメージングが でき、スペクトルも同時に取得することができる検出器として動作させることができる。図 6.10 に<sup>55</sup>Feを照射し、検出器全面で得られたスペクトルを示す。ガス増幅率の場所依存性が小さいため、検出器全面で得られたスペクトルでもエネルギー分解能は5.9keVで30%(FWHM)となり、一般のガス検出器と同等の分解能を示している。



図 6.10: <sup>55</sup>Fe のスペクトル(検出器全面で取得)[42]

X 線ジェネレータで得られたテストチャートの X 線イメージを図 6.11 に示す。 $\mu$ -PIC のピクセ ルピッチは  $400\mu$ m なので理論的位置分解能は  $\frac{400\mu m}{\sqrt{12}} \simeq 115\mu m$  となるが、このテストチャートの 端の部分のプロジェクションを取ると図 6.12 の様になり、位置分解能は  $120\mu$ m と理論値に近い値 が得られている。



図 6.11: 10cm 角 µ-PIC で得られたテストチャートの X 線イメージ [42]

このような特徴を生かして、理化学研究所播磨研と共同して大強度放射光施設 SPring-8の BL45-XUにおいて X 線小角散乱実験が行われている。X 線小角散乱実験は簡単に述べると、周期的な構 造を持っていないような生物試料や産業用材料を溶媒に溶かして、X 線を試料に当てたときの散 乱を調べることによってその構造を解析するものである。この実験により MPGD としては世界最 高となる 5×10<sup>6</sup> もの高計数率での安定動作を実証し、試料としてコラーゲンを用いたときの回折



図 6.12: テストチャートイメージの端部分のプロジェクション [42]

パターンも確認された [43]。X 線小角散乱実験や X 線結晶構造解析については [43][44] を参照されたい。



図 6.13: (左) コラーゲンによる回折パターン 2 次元イメージ (X 線の波長 0.9Å)(右) 左図の対 角線部分 (実線)における回折パターン強度 [43]

## **6.2** *μ*-PIC を用いた光検出器

ー般の PMT の増幅率は  $10^6 \sim 10^7$  の範囲であり、ガス増幅型光検出器においても同程の増幅率 が求められる。先の章でも触れたように  $\mu$ -PIC の安定動作できるガス増幅率はおよそ 6000 程度で あるため、 $\mu$ -PIC 単体だけではまかなうことができない。そこで  $\mu$ -PIC の前置増幅器として Gas Electron Multiplier(GEM) を入れることにより、目標のガス増幅率を得ることができると思われ る。また GEM を入れることによりガス PMT の欠点である photon feedback および ion feedback を抑制することができるという特徴もあるため、この点でも GEM を入れることが適していると考 えられる。(図 6.14)



図 6.14: ion feedback する割合  $\mu$ -PIC の anode 電流  $I_A$  と drift plane の電流  $I_D$  の比  $I_D/I_A$  を プロット [48]

その中でもわれわれは東京大学 CNS で開発されたもの [45] を用いている。この構造は 50 $\mu$  m の カプトンフォイルの両側に 5 $\mu$  m の銅を蒸着させ、70 $\mu$  m の円柱状の穴を六角状に 140 $\mu$  m ピッチ で空けたものとなっており、cern が開発したものとは穴の形状が異なる (図 6.15)。10cm 角  $\mu$ -PIC と 50 $\mu$ m 厚 GEM を 1 枚組み合わせたときのガス増幅率を図 6.16 に示す。ただしこれ以降のガス 増幅率の測定では線源に <sup>55</sup>Fe、ガスは Ar 90% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10%を 1atm 封じ切りで行った。また  $\mu$ -PIC の増幅率は ~4900 で一定にし、GEM への印加電圧を変化させた。この結果から  $\mu$ -PIC と Single GEM によりガス増幅率は最大で 2 × 10<sup>5</sup> を達成した。しかし目標の 10<sup>6</sup> ~ 10<sup>7</sup> オーダーのガス増 幅率には達成していない。そこで次に GEM を 2 枚 (Double GEM) 入れることによってより高い ガス増幅率を得ることを試みた。

ここでは µ-PIC と GEM 間の領域を Induction 領域、GEM と GEM の間の領域を Transfer 領 域と呼ぶこととする。まず図 6.17 のようにセットアップを組み、インダクション領域およびトラ ンスファー領域電場の最適化を行うための実験を行った。µ-PIC および GEM の増幅率は一定にし たまま、それぞれの領域の電場を変化させたときの増幅率を図 6.18 および図 6.19 に示す。

これらの領域の電場が強くなると増幅率が上昇するのは、GEM で増幅された電子が電気力線に



図 6.15: 50µm 厚 GEM の顕微鏡写真



図 6.16: GEM および µ-PIC+GEM のガス増幅率

沿って移動し、μ-PIC へ到達しやすくなるためである。したがってある電場以上になると増幅率 が一定値に達することになるのだが、インダクション領域の電場に関しては一定値に達する前に μ-PIC が放電してしまい、これ以上の電場をかけることができなかった。この結果からインダク ション領域の電場 3kV/cm、Transfer 領域の電場 2.5kV/cm にして以降の測定を行うこととする。

次に μ-PIC の増幅率は ~ 4900 で一定にし、2 枚の GEM への印加電圧を変化させて増幅率の測 定を行った。この結果から図 6.20 に示すように最大ガス増幅率は 6.7 × 10<sup>5</sup> である。 この増幅率の値は他ガス検出器と比較しても非常に高いものとなっている。

ガス増幅型光検出器を構成する光電面として、安定性と使用シンチレータが紫外領域に発光す ることを考慮して CsI を用いることにした。第章で述べたように CsI は紫外線に感度のある光電 面であるため、それに対応した入射窓を選択する必要がある。そこで今回は入射窓に $\phi$ 70、厚さ 5mm の MgF<sub>2</sub> を用いており、透過型光電面のセットアップのために MgF<sub>2</sub> の片面に CsI とドリフ ト電場を与えるための Al 電極を浜松ホトニクス社に依頼して蒸着した (図 6.21)。この窓の有効径 は 50mm であり、より全体的に電場を与えるために Al 電極を図 6.22 のようなジオメトリで蒸着 させた。



図 6.17: µ-PIC+Double GEM の増幅率評価時のセットアップ概略図

ドリフト領域の電場を与えたときの構造を Maxwell 3D を用いて調べたのが図 6.23 である。ただ し今回作成したジオメトリは計算を簡単にするため、Al 電極全体から 1/4 の部分を切り取った形 状にし、電極から 2.5mm 離したところに銅板を配置した。また Al 電極と銅板の印加電圧の差を 125V にしている。



図 6.18: インダクション領域電場に対する増幅率図 6.19: トランスファー領域電場に対する増幅率



図 6.20: µ-PIC+Double GEM のガス増幅率





図 6.21: CsI と Al 電極が蒸着された MgF<sub>2</sub>

図 6.22: MgF<sub>2</sub> に蒸着された Al 電極の概念図



図 6.23: ドリフト領域の電場構造

# 6.3 透過型光電面を用いたガスPMT

第章で述べたように PMT の光電面には大きく分けて透過型と反射型の2種類がある。まずセットアップの簡易性と検出器の安定性を考えて透過型光電面を採用した。この検出器の概念図を図 6.24 に示す。



図 6.24: 透過型光電面を用いた紫外線光子検出器の概念図

## 6.3.1 窓の取り付け作業

CsI は潮解性を持っているため、窓の取り付け作業は空気に触れないような環境で作業する必要 がある。そこで真空グローブボックス(図 6.25)に真空を引いた後、乾燥した窒素を 1atm で封入 し、真空グローブボックス内で取り付け作業を行った。この真空グローブボックスは横 827mm、 奥行き 640mm、高さ 645mm のサイズである。図 6.26 が  $MgF_2$  を容器の内側に取り付けた様子である。



図 6.25: 真空グローブボックス



図 6.26: MgF<sub>2</sub> 窓を取り付けた様子

# 第7章 紫外線光子検出器評価

シンチレータ LaF<sub>3</sub>(Nd) は真空紫外線領域に発光する特徴を持ち、文献によると発光量は最大 で 270photons/MeV である。代表的なシンチレータとして NaI(Tl) があるが、この発光量がおよ そ 40000photons/MeV であることを考慮すると、LaF<sub>3</sub>(Nd) の発光量は少ない部類に入る。そこ でなるべく多くの光量を得るためにシンチレータに照射する放射線源として 5.5MeV の  $\alpha$  線を出 す <sup>241</sup>Am を用いることにした。この紫外線源と紫外線光子検出器と組み合わせることで、紫外光 を検出し、その 2 次元画像を取得することにも成功した。本章ではシンチレータ LaF<sub>3</sub>(Nd) の光量 評価および紫外光子検出検出器を全体のガス増幅率  $6.7 \times 10^5$  で動作させたときの量子効率の評価 を行う。

## **7.1** LaF<sub>3</sub>(Nd) 結晶の性能評価

ガス PMT と LaF<sub>3</sub>(Nd) 結晶を組み合わせたときの量子効率評価を行う前に、<sup>241</sup>Am から放射 される 5.5MeV の  $\alpha$  線を LaF<sub>3</sub> 結晶に照射したときの絶対光量を測定しておく必要がある。今回測 定に用いた結晶は 20mm<sup>3</sup> サイズ (図 7.1) のものである。絶対光量評価用の PMT として浜松ホ



図 7.1: LaF<sub>3</sub>(Nd) 結晶の写真

トニクス社製の R8778ASSY (図 7.2)を用いた。R8778 は真空紫外領域に特化して量子効率を高 めた PMT であり、図 7.3 のように波長 173nm に対して量子効率 33% を示す。

結晶の絶対光量を測定するためには PMT の絶対増幅率を測定する必要がある。絶対増幅率を測定 するためには、1 光電子が PMT によって増幅されたときの電荷量を測定すれば増幅率=<sup>増幅後の電荷量</sup> 素<sup>電荷</sup> により求めることができる。そこで以下のような考えに基づき 1 光電子を測定した。 PMT に全く 光が入らない状態にしたときでも PMT の光電面やダイノードからの熱電子により信号を検出でき るが、特に光電面からの熱電子が最も増幅度が大きく、これが 1 光電子に対応すると考えられる。 PMT の印加電圧は-1500V にし、PMT を完全に遮光した状態で図 7.4 のように林栄精器社製の電 荷積分型 ADC(Analog Digital Converter)「RPV-171」によって PMT からの出力電荷を測定し た。このとき Gate 信号は PMT からの出力信号を Discriminator へ分岐させ、2mV の threshold をかけた後、Gate generator によって 800ns の幅を持った信号を用いた。また PMT からの信号は Delay generator によって GATE 信号内に入るように 10ns 程度遅らせた。

横軸に pC、縦軸にカウントと取ったときの1光電子スペクトルは図の赤で示したヒストグラム

100



図 7.2: R8778 の写真



図 7.3: R8778 ASSY の量子効率(浜松ホトニクスによる 評価)



図 7.4: PMT の絶対増幅率の測定セットアップ概念図

のようになった。ただし青のヒストグラムはペデスタルを表している。この1光電子のスペクト ルをガウス関数でフィットするとピークが 2.4pC に来ているため、このときの PMT の増幅率は  $\frac{2.4[pC]}{1.6 \times 10^{-7}[pC]} = 1.5 \times 10^{7}$ となる。



図 7.5: 1 photoelectron のスペクトル

次に結晶の絶対光量を測定した。結晶を PMT に取り付ける際には真空紫外線を通すグリスとし てデュポン社製の Krytox 16350 を使用し、 $\alpha$ 線源として <sup>241</sup>Am を結晶に密着させた状態で反射材 としてジャパンゴアテックス社のハイパーシートガスケット <sup>®</sup> を 2 回巻いた。(図 7.6)



図 7.6: LaF3結晶 と<sup>241</sup>Am をテフロンで巻いた様子

光量を測定するためのシステムは1光電子を測定する際とほぼ同様で、図7.7のように配置した。また PMT から ADC へ入力する信号をオシロスコープで見た様子を図7.8 に示す。この波形の幅が 20ns であることから文献値と矛盾せず、LaF<sub>3</sub>(Nd)の減衰時間は非常に短く、高計数率測定に向いていることが確認できた。

図 7.9 が<sup>241</sup>Am を LaF<sub>3</sub>(Nd) に照射したときの発光スペクトルである。ただし横軸は CsI から放 出された増幅される前の光電子数に換算した値になっている。このスペクトルからおよそ 33 光電



図 7.7: LaF<sub>3</sub>(Nd) の光量測定時のセットアップ概念図



図 7.8: charge ADC に入力する PMT からの信号

子にピークがあると評価でき、LaF<sub>3</sub>(Nd)の発光波長 173nm における PMT の量子効率が 33%で あることから、このシンチレータは 5.5MeV の  $\alpha$  線に対して ~100photons の紫外線を発光するこ とがわかった。実際には 5.5MeV の  $\alpha$  線が全てのエネルギーを結晶中の電子の遷移に使うことはな く、一部は原子核などにエネルギーを落とす。この現象を消光(クエンチング)と呼び、電子にエ ネルギーを与える割合は結晶の物質や入射粒子のエネルギーによって変わってくるが、LaF<sub>3</sub>(Nd) に対して  $\alpha$  線がどの程度の割合で電子にエネルギーを与えるかは今までに測定された報告がない。しかし [46] では同じ Nd ドープ量の LaF<sub>3</sub>(Nd) 結晶を用いて光量を測定しており、その結果とほぼ 同じになったので今回の測定結果は妥当性があるものと思われる。

様々なエネルギーのガンマ線を照射したときにどの程度光量を得られるかを知るために、<sup>137</sup>Cs(662keV)、 <sup>57</sup>Co(122keV)、<sup>139</sup>Ce(166keV)を用いて測定を行った。横軸に光電子数、縦軸にカウントを取ったものを図 7.10 に示す。各ガンマ線源のエネルギーとスペクトルの光電子数ピークから絶対光量に換算した値の関係は図 7.11 のようになる。この結果から 662keV のガンマ線に対しておよそ100photons で発光し、100keV 以下ではほとんど発光しないことがわかる。すなわち <sup>241</sup>Am からは5.5MeV の  $\alpha$ 線以外に 13.9keV や 53.9KeV の X 線を出しているが、これらの X 線では LaF<sub>3</sub>(Nd)



図 7.9: <sup>241</sup>Am + LaF<sub>3</sub>(Nd) の発光スペクトル(右図は左図の縦軸を拡大したもの)

はほとんど発光しないという結果になった。 $\alpha$ 線照射時とガンマ線照射時の発光量を比較すると  $\alpha$ 線のエネルギー 5.5MeV とガンマ線のエネルギー 662keV の発光量がおよそ同程度という結果に なった。これは一般的に  $\alpha$ 線よりもガンマ線の方が電子の遷移にエネルギーを使いやすいためで ある。



図 7.10: LaF<sub>3</sub>(Nd) に各ガンマ線を照射したときのスペクトル (a)<sup>137</sup>Cs (b)<sup>57</sup>Co (c)<sup>139</sup>Ce



図 7.11: ガンマ線のエネルギーに対する LaF<sub>3</sub>(Nd) の発光量

# 7.2 透過型光電面を用いた紫外線光子検出器の評価

透過型光電面を用いたガス増幅型紫外線光子検出器、シンチレータ LaF<sub>3</sub>(Nd) と  $\alpha$  線源<sup>241</sup>Am を用いて動作させ、検出器全体の評価を行った。また PMT R8778の測定時と同様に結晶と窓には Krytox 16350 を用いて取り付けた。(図 7.12)  $\mu$ -PIC と double GEM を合わせたガス増幅率は 6.7 × 10<sup>5</sup> で操作し、光源以外の紫外光を遮断するために図 7.13 のようにブラックシートを線源と窓 を覆うようにして被せた。



図 7.12: 窓に結晶を取り付けた様子

図 7.13: 結晶からの紫外光を検出したときの様子



図 7.14: アノード 64ch sum 信号

また  $\mu$ -PIC の読み出しには時定数 80ns の ASD を用いており、このときオシロスコープによっ て得られたアノードおよびカソードの 64 チャンネルサムの信号を図 7.14 に示す。ただしこの信号 は時定数 80ns のプリアンプからの 64 チャンネル信号をサムアンプによって足し合わせたものであ り、サムアンプの時定数により信号の幅が広がったものとなっている。検出器の増幅率とアンプの 増幅率から逆算すると、この信号は 2.4 光電子数に相当する。<sup>241</sup>Am は~5.5MeV の  $\alpha$  線を出す 以外にも 26.3keV および 59.5keV の X 線も出すため、図 7.14 で得られた信号は X 線が直接入っ てきたことによることが心配される。そこで結晶と入射窓とが接する部分にブラックシートを入れ ることによって紫外線を遮断した状態で信号を確認した。その結果上述したような信号は得られな かったので、正しく紫外光を検出できていることがわかった。

この信号を FADC で波形データを取得しスペクトラムを描くと、出力された電荷分布を決定でき るので、ガス増幅率および ASD の増幅率から増幅される前の光電子数を決定することができる。 横軸に増幅される前の光電子数に変換したスペクトラムを図 7.15 に示す。このスペクトルからお よそ2光電子数のピークを検出し、結晶の発光量が 100photons であることからこの検出器の量子 効率は波長 173nm に対して ~2%と評価できた。通常 PMT に CsI を透過型光電面として用いた場 合は、図 4.8 の曲線 100M から波長 173nm に対して量子効率がおよそ 2%となっている。したがっ て光電子はほぼ収集できていると言え、適切な量子効率が得られた。

### 7.2.1 長期安定性

紫外線光子検出器は潮解性のある光電面 CsI を用いているガス検出器であるため、長期間安定に 動作させることができるかどうかも検出器として重要な要素である。そこで LaF<sub>3</sub>(Nd) と  $^{241}$ Am を組み合わせた光源と  $\mu$ -PIC を用いて得られる波高が時間の経過と共にどれだけ変化するかを調 べた。



図 7.15: µ-PIC を用いたガス PMT による LaF<sub>3</sub>(Nd) の発光スペクトラム

# 7.3 紫外光イメージング

 $\mu$ -PIC は 2 次元画像が取得できるガス検出器であるため、十分な S/N 比があれば LaF<sub>3</sub>(Nd) の 様な光量の小さい光源を用いてもイメージングは可能である。結晶を図 7.16 のように配置してイ メージングを行った。そのとき得られた画像を図 7.17 に示す。また図 7.17 の座標値 75  $\leq y \leq$  200、 75  $\leq x \leq$  200 の範囲内のプロジェクションを X 軸に射影したものを図 7.18 に示す。



図 7.16: イメージング時の結晶の配置

また図 7.19 の様に結晶の配置を変えてイメージングを行った結果が図 7.20 である。これらの結果を見てわかるように結晶の置き方が取得できたイメージから判別できる。

図 7.17 および図 7.20 の結果が紫外光によるイメージであることを確認するために、HV や Vth などの条件を変えずに結晶と窓が接する部分にブラックシートを挟み込んだ場合と結晶を除いたと きの場合も加えてイメージングを行った。その結果は図 7.21 および図 7.22 のようになり、両者を



図 7.17: µ-PIC による紫外光イメージング



図 7.18: 紫外光イメージのプロジェクション

比べてもほぼ同じような画像が得られた。このように線源を付けない状態でもまばらな画像が取得 できるのは環境ガンマ線などのバックグラウンドがイメージとして取得できたものと思われる。ま た図 7.17 および図 7.18 で示したように、元々の結晶のサイズ部分に高いカウント数が集中してい るが、その周辺部分にもカウント数の分布が広がっている。これはシンチレーション光が結晶内の 発光点から一様等方に広がっていくためである。したがってこれらの結果から<sup>241</sup>Am から出てい る X 線は結晶内で止まっていることがわかり、紫外領域のシンチレーション光のイメージングに



図 7.19: 配置を変えたときの結晶の向き



図 7.20: 結晶の向きを変えたときの µ-PIC による紫外光イメージング



図 7.21: 紫外光を遮光して取得した画像

図 7.22: 結晶を取り除いたときに取得した画像

# 第8章 Thick GEM を用いた性能評価

紫外線光子検出器には 1 光電子を検出するために  $10^5 \sim 10^6$  もの高い増幅率が必要である。われ われが開発した検出器ではこの要請を満たすために  $\mu$ -PIC とその前段に  $50\mu$ m 厚 GEM を 2 枚用 いた。しかし増幅部分が多段になると、それだけ多くの部分に高電圧を供給する必要があるため扱 いが複雑になり、検出器の故障の原因にもなり得る。もし 1 枚の GEM でも大面積かつ 100 以上の 増幅率で安定動作可能であれば紫外線光子検出器の安定性と操作簡易性が高まる。本章では従来の GEM よりも高い増幅率を得るために絶縁層を厚くした Thick GEM に着目し、 $\mu$ -PIC と組み合わ せることでガス増幅率がどの程度得られるかを評価した。

# 8.1 Thick GEM

GEM の増幅機構は GEM の上下の電極に電位差を与えることによって穴の中に強電場が作られ、 そこを電子が通ることで雪崩増幅が起こるというものであった。絶縁層を厚くすれば強電場領域が 大きくなり、単純に式 3.7 中の積分する距離が増えるためガス増幅率が向上することになる。本節 では以下の 2 種類の Thick GEM に関して 10cm 角  $\mu$ -PIC と組み合わせたときの評価について述 べる。

#### 8.1.1 $400\mu m 厚 GEM$

林栄精器社製で絶縁層の材質は G10、電極に銅が用いられており、厚さがそれぞれ 400µm、18µm となっている。G10 とはガラス布エポキシ樹脂の一種で、プリント基板材料として良く用いられる ものである。この GEM のジオメトリーは図 8.1 のように G10 の穴径が 300µm、逃げ径として銅 電極の穴径が 500µm となっており、ドリルによって穴が開けられている。





図 8.1: 10cm 角 400µm 厚 GEM の外観および顕微鏡写真

逃げ径の有無による電場構造を電場計算ソフト MAXWELL 3D で計算したのが図 8.2 である。 ただしこのとき GEM に与えている電位差はともに 1100V である。図 8.2 は 0~31kV/cm までの 電場強度を色別にプロットしたものであり、31kV/cm以上の電場強度は赤で示されている。この 結果から 31kV/cm以上の強電場が逃げ径がない場合だと穴の中に形成されているが、逃げ径があ る場合では穴の中には 31kV/cm以上の強電場は形成されていない。すなわち逃げ径がないときは 強電場領域で増幅が繰り返されることにより放電現象が起きやすくなると思われる。



図 8.2: 400µm 厚 GEM の電場構造 (a) 穴径 300µm、逃げ径なし (b) 穴径 300µm、逃げ径 500µm

また Maxwell 3D とガス検出器に関するシミュレーションソフト Garfield を組み合わせて、400µm 厚 GEM で期待されるガス増幅率のシミュレーションを行った。その結果を図に示す。

本節でのガス増幅率の測定は Ar90%、 $C_2H_610$ %を 1atm 封じ切りにし、線源は <sup>55</sup>Fe を用いた。ま た  $\mu$ -PIC および GEM のセットアップは図の様にしている。このとき Drift 領域の電場は 0.5kV/cm、 Induction 領域の電場は 2.5kV/cm である。増幅率の測定は  $\mu$ -PIC と GEM を合わせた増幅率に関 しては  $\mu$ -PIC が放電するまで行い、それ以降の印加電圧のときには  $\mu$ -PIC の増幅率を下げて GEM が放電するまで測定を行った。

図 8.4 に 10cm 角 µ-PIC と 400µm 厚 GEM を組み合わせたときのガス増幅率を示す。これによ り 400µm 厚 GEM の最大増幅率は 162 であることがわかった。

μ-PIC の増幅率を 2000、400μm 厚 GEM の増幅率を 20 にして、<sup>55</sup>Fe のスペクトルを描いたも のが図 8.5 である。この測定では検出器の 2.5×2.5cm<sup>2</sup> の部分を読み出してスペクトルを描いた。 横軸はパルスの高さ [mV]、縦軸はカウントとなっている。このスペクトルからわかるように、ピー ク構造は持つがかなり広がった分布となった。μ-PIC 単体で取得したスペクトルはすでに述べたよ うに、全面読み出しでも 30%程度のエネルギー分解能を持っている。したがって 400μm 厚 GEM の増幅率が他の GEM と比べてばらつきが大きいことが原因で広がったスペクトルになったと考え



図 8.3: ガス増幅率測定時のセットアップ概念図



図 8.4: µ-PIC と 400µm 厚 GEM を組み合わせたときのガス増幅率

られる。

長時間動作させたときの  $400\mu$ m 厚 GEM の増幅率の変動を測定した結果が図 8.6 である。測 定はおよそ 60 時間程度行い、 $^{55}$ Fe を照射し続けて増幅率の変化を測定した。この結果 30 時間で  $\sim 10\%$ 増幅率が上昇した。この時間に伴う増幅率の変動は  $50\mu$  厚 GEM で報告されている値よりも 小さくなっている。

## 8.1.2 $100\mu m 厚 GEM$

サイエナジー社製で絶縁層の材質は LCP(Liquid Crystal Polymer)、電極には銅が用いられている。絶縁層の厚さは 100µm、電極の厚さは 8µm である。また穴径およびピッチは従来の 50µm 厚



図 8.5: µ-PIC と 400µm 厚 GEM を組み合わせたときのスペクトル



図 8.6: 400µm 厚 GEM の長時間安定性(縦軸は増幅率の相対値)

GEM と同じである(図 8.7)

LCP はポリイミドと同等な電気特性を持っており、吸湿環境下においてはポリイミドよりも寸法安定性、絶縁性に優れているため次期基板材料として注目されている(図 8.8)。

#### 増幅率

100μ 厚 GEM と μ-PIC と組み合わせて増幅率の評価を行ったものが図 8.9 である。また増幅率の 測定方法は 400μm 厚のときと同様である。この結果から 100μm 厚 GEM の最大増幅率は 445 で ある。



図 8.7: 10cm 角 100µm 厚 GEM の外観および顕微鏡写真

## **8.1.3** 125µm厚GEM

 $100\mu m$  厚 GEM と同様にサイエナジー社製で、材質は  $125\mu m$  厚の LCP、電極には  $12\mu m$  厚の 銅が用いられている。また穴径およびピッチは  $100\mu m$  厚、 $50\mu m$  厚と同じである。

#### 増幅率

この GEM と 10cm 角 µ-PIC と組み合わせて増幅率を測定した結果を図 8.10 に示す。この結果から 125µm 厚 GEM の最大増幅率は 544 である。

## スペクトル

 $\mu$ -PIC の増幅率 ~1200、GEM の増幅率 ~22 で動作させたときに取得したスペクトルを図 8.11 に 示す。5.9keV のピークを gausian fit するとエネルギー分解能は 42.1%(FWHM) となった。

#### 長期安定性

125μm 厚 GEM に関して長時間動作させたときの増幅率の変動を測定した結果を図 8.12 に示す。 この結果から長期変動は小さくばらつきは 6.9%(FWHM) となった。

## 8.1.4 比較

電気特性		LCP	Kapton
	体積抵抗率(Ω·cm)	>10 <sup>15</sup>	>10 <sup>15</sup>
	表面抵抗(Ω)	>1014	>1014
	絶縁破壊強度(kv/mm)	150	150
機械特性	引張強度(MPa)	120	400
	引張弾性率(GPa)	6	9
	伸び率(%)	7	80
	密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.4	1.45
熱特性	液晶転移温度(°C)	335	なし
	ガラス転移温度(℃)	なし	>500
	比熱(cal/°C)	0.24	0.27
	熱伝導度(W/m⋅K)	0.41	0.2
吸水特性	23°C,24hrs	0.1%	<mark>1.5%</mark>
	水中浸漬		
	85°C,85%RH	0.1%	1.2%
	96hrs		
	PCT 96hrs	0.2%	2.0%
	(121°C,2atm)		
	吸水膨張係数(ppm/%)	1.5	14
	50°C,80%RH		
周波数特性	誘電正接(3GHz)	0.0034	0.0082
	温度50℃,湿度0%		
	- 訪電正接(3GHz)	0.0036	0.015
	温度50°C,湿度80%		

図 8.8: LCP とポリイミドの特性比較 [49]



図 8.9: µ-PIC と 100µm 厚 GEM を組み合わせたときの増幅率



図 8.10: *µ*-PIC と 125µm 厚 GEM を組み合わせたときの増幅率



図 8.11: µ-PIC と 125µm 厚 GEM を組み合わせたときのスペクトル



図 8.12: 125µm 厚 GEM の長時間安定性(縦軸は増幅率の相対値)

# 第9章 $\mu$ -PIC 読み出しシステムの開発

画像検出器として求められていることを挙げると位置分解能や検出効率といった検出器自体の性 能はもちろんのことではあるが、検出器のシステム全体がどれくらい小型化できるかも重要な要素 である。それは検出器を設置する際にその大きさから生じる設備投資が少なくて済むといった利点 や、持ち運びしやすくなり扱いやすさが増すといった利点があるためである。

われわれはこれまでバイポーラプロセスを用いた ASD を  $\mu$ -PIC の読み出しに使ってきたが、 ASD ボードのサイズは 10cm×20cm であり、10cm 角  $\mu$ -PIC の場合だと検出器全体としては cm に もなり小型化が必要である。またわれわれは MeV ガンマ線天体観測用に散乱体として  $\mu$ -PIC を 用いた TPC(Time Projection Chamber)、吸収体としてシンチレータから構成されたコンプトン カメラを独自に開発しており、1 回目の気球実験 [3][47] をもとに次期気球実験に向けた性能向上 を行っている。その開発に伴い検出器が大型化するため、読み出しシステムの小型化だけでなく 低消費電力化も求められている。そこでバイポーラプロセスよりも高集積化と低消費電力化に長 けた CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを用いた ASIC(Application Specific Integrated Circuit) を KEK (高エネルギー加速器研究機構)と共同して開発している。本 章ではバイポーラ、CMOS の特性についてそれぞれ述べ、CMOS ASIC を  $\mu$ -PIC の読み出しとし て使ったときの評価を行う。

# 9.1 トランジスタ

バイポーラプロセス ASIC と CMOS ASIC を比較すると製造プロセスが異なったトランジス タで構成されているため全く特性が異なる。本節では検出器の読み出し ASIC の基礎を構成して いるトランジスタとして代表的な BJT(Bipolar Junction Transistor) と MOS FET(Metal Oxides Semiconductor Field Effect Transistor)の基本特性を概説する。また「消費電力」に主眼を置くと デジタル動作において最も BJT と CMOS の差が出てくる。ここではその例としてスイッチとし て使ったときの特性も述べる。

#### 9.1.1 BJT(Bipolar Junction Transistor)

BJT はバイポーラプロセスを用いて製造されたトランジスタで図 9.1 のような構造をしており、 p型半導体とn型半導体を組み合わせている。各端子はエミッタ、ベース、コレクタと呼ばれてお り、pnp型または npn型の 2 つがある。基本動作原理は np 接合面に生じた空乏層とそれにより生 じた空間電荷の電位障壁を利用して、流れる電流を制御するものである(図 9.2)。

ベース・エミッタ間にベースを正として電圧 V<sub>BE</sub> を加えると、ベースからエミッタへ電流 I<sub>B</sub> (ベース電流)が流れる。この関係は図 9.3の様になり、ベース・エミッタ電圧がある値以上になる とベース電流は急に流れるようになる。この電圧はベース立ち上がり電圧といい、シリコンでは実 用上 0.7V で一定である。一方、コレクタ・ベース間にコレクタを正として電圧 V<sub>CB</sub> を加えると、



図 9.2: BJT(npn 型)の動作原理

コレクタからベースへはほとんど電流が流れない。(図9.4)この電流はトランジスタの種類によって異なるが、通常 1µA であるが、温度依存性があることが特徴である。

BJT の動作特性を以下の式で表す。ただし *I<sub>S</sub>* は電流スケーリングの定数、*g<sub>m</sub>* はトランスコン ダクタンスと呼び、デバイスの感度を表す指標となっている。

$$I_C \sim I_S \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \tag{9.1}$$

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}} \sim \frac{d}{dV_{BE}} (I_S \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)) = \frac{qI_C}{kT}$$
(9.2)

したがって BJT の動作特性は電流に比例し、トランジスタの構造には依存しないといことが言える。

また  $I_E = I_B + I_C$  より、 $\alpha = I_C/I_E$ 、 $\beta = I_C/I_B$  とおくと

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{9.3}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \tag{9.4}$$

となる。通常のトランジスタの場合、 $\alpha \ge 0.98$  なので  $\beta \ge 49$  となる。つまりベース電流  $I_B$  の  $\beta$  倍の電流  $I_C$  がコレクタ-エミッタ間を流れることになるので、BJT は電流によって電流を制御す る電流制御素子と言える。



図 9.4: BJT(npn 型) のコレクタ・ベース特性

図 9.3: BJT(npn 型) のベース・エミッタ特性

BJT をスイッチとして用いたときの回路の例を図 9.5 に示す。電源電圧  $V_{cc} = 5$ V、コレクタ抵抗  $R_c = 240\Omega$ 、負荷抵抗  $R_L = 1$ k $\Omega$  とすれば、トランジスタがオフになっているときの出力電圧  $E_0$  は

$$E_0 = \frac{R_L}{R_C + R_L} V_{CC} \sim 4V \tag{9.5}$$

となる。また  $R_L$  に流れる電流  $I_L$  は

$$I_L = \frac{E_0}{R_L} \sim 4\text{mA} \tag{9.6}$$

であり、 $R_C$  にも同じ電流が流れる。トランジスタがオンになるとコレクタ・エミッタ間が導通し、コレクタ・エミッタ間電圧は飽和電圧  $V_{CE(sat)}$  となって  $R_C$  にはコレクタ電流  $I_C$  が流れる。  $V_{CE(sat)}$  が通常 0.2V 程度なので  $R_L$  に流れる電流を無視すれば

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = 20 \text{mA}$$
(9.7)

となる。BJT が電流制御素子であることは前述したが、BJT スイッチがスイッチとして動作する ためにもどこかに電流が流れている必要があることがわかる。

### 9.1.2 MOS FET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

FET(Field Effect Transistor)の動作原理は1つのn型あるいはp型半導体に流れる電流を、np 接合面に生じる空乏層や電界を加えることで制御するものである。各端子はソース(S)、ドレイン (D)、ゲート(G)と呼び、MOS FET はゲートとチャネル(電子の通路)の間に非常に薄い絶縁層 (通常はSiO<sub>2</sub>)を挟んだ構造になっている(図??)。ただしLはチャネル長、Wはゲート長と呼 んでいる。絶縁層は静電気などの高電圧で容易に破壊されてしまうため取り扱いには注意が必要で ある。またp型基板にn型不純物でソースとドレイン領域を作ったものをNMOS、NMOSのp型 とn型を逆に使ったものをPMOS と呼んでいる。



図 9.5: BJT スイッチ回路図

NMOS の場合、ゲートに正電圧  $V_G$  をかけると p 基板の表面に空乏層が形成されるが、このままではキャリアが存在しないので電流が流れない。さらに  $V_G$  を高くすると空乏層の幅は広がり、酸化膜とシリコンの界面電位が上昇するため電子がソースからドレインに流れ出す。このように電子が流れ出すときの電圧を閾値電圧と呼び、 $V_T$  で表す。NMOS の場合の動作特性は以下の式に表わされる。ただし  $\mu_n$  は電子の移動度、 $C_{ox}$  は単位面積あたりのゲート容量、 $V_{GS}$  はゲート-ソース間電圧である。

$$I_{DS} \sim A \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$
 (9.8)

$$A = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \tag{9.9}$$

$$g_m \sim A \frac{W}{L} \sqrt{I_{DS}} = \frac{2I_{DS}}{V_{GS} - V_T}$$
(9.10)

PMOS の場合は特性が NMOS と逆になり、 $V_{GS} - V_T < 0$ のときにドレインからソースへとホールが流れる。このときはホールの動きにより電流が流れることになり、ホールの移動度が電子の移動度の 1/2 から 1/4 であるため PMOS デバイスの電流駆動力は NMOS デバイスよりも低くなる。

上記の式から MOS トランジスタの特性は電流の ½ 乗に比例し、トランジスタサイズおよびプロセスに依存することがわかる。

また MOS FET はゲートが SiO<sub>2</sub> で絶縁されているため、ゲートの入力インピーダンスが高く、 ゲート-ソース間の電圧  $V_{GS}$  でドレイン電流  $I_D$  を制御する。そのため MOS FET は電圧制御素子 と言うことができる。



(b)

(a)



(c)



図 9.6: MOS デバイス (NMOS) 概念図 (a) 立体図 (b) 側面図 (c) 上面図

### 9.1.3 CMOS(Complementary MOS)

NMOS と PMOS は正反対の性質を持っているので、それらを相補的に配置することによって BJT にはない優れた特性を持つトランジスタを作ることができる。通常は図 9.7 のように PMOS と NMOS は同じ基板上に作られ、PMOS は n ウェル中に作られる。このような構成をしたデバイ スを CMOS デバイスと呼ぶ。



図 9.7: CMOS デバイス概念図

CMOS の特性を理解するためにスイッチ動作の中でも最も単純な論理インバータ回路を取り上 げることにする。論理インバータ回路とは出力電圧のレベルによって"1"もしくは"0"と認識させ るデジタル回路である。ここでは図 9.8 のようなインバータ回路を考え、論理"0"のときは Low と して 0V 付近の電圧、論理"1"のときは High として V<sub>DD</sub> 付近の電圧と定義する。



図 9.8: CMOS インバータ回路図

 $v_I = V_{DD}$ のとき NMOS がオンになり、PMOS はオフの状態になっている。このときの動作点 は図 9.9(b) 中の  $i_{DN}$  と  $i_{DP}$  の曲線の交点となるためほとんど電流が流れない状態である。また  $v_I = 0V$ のときは逆に NMOS がオフ、PMOS がオンになるため、 $i_{DN}$  および  $i_{DP}$  の特性曲線と 動作点は図 9.10 のようになる。したがってこのときも流れる電流 *i* はほとんど 0 とみなせる。

このように CMOS コンバータは電圧が定常状態のときは電流がほぼ流れない状態になり、 $v_I$  が  $0 \sim V_{DD}$  に変化するとき、すなわちスイッチが切り替わるときのみ電流が流れることになる。した がってデジタル回路においては常に電流を流し続ける必要がある BJT に比べて、CMOS ロジック



図 9.9:  $v_I = V_{DD}$ のときの (a) 回路 (b) $i_{DN}$ 、 $i_{DP}$ の特性曲線および動作点 (c) 等価回路



図 9.10:  $v_I=0$ のときの (a) 回路 (b) $i_{DN}$ 、 $i_{DP}$ の特性曲線および動作点 (c) 等価回路

を用いた回路の方が消費電力を低く抑えることができると言える。また MOS デバイスは BJT に 比べて同一面積内に多くの素子を配置することができるため、高集積化をしやすいという利点も 持っている。これらの利点を利用して現在では様々なエレクトロニクスに MOS デバイスや CMOS デバイスが用いられている。表 9.1 に BJT と CMOS の電気的性能を比較してまとめる。

	BJT	CMOS
動作タイプ	電流増幅型	電圧制御型
物理量	サイズに依存しない	サイズ ( W/L ) に依存
集積化	不利	有利
電源電圧	$V_{CE}>V_{BE}$ のため ${ m MOS}$ に比べて高い	低電圧動作が可能
動作点	$V_{BE}>\!0.7\mathrm{V}$ と近似できるので設計しやすい	$V_T$ がばらつくため設計は複雑

表 9.1: BJT と CMOS の電気的性能比較
### 9.2 今回開発された CMOS ASIC

前節でトランジスタのプロセスごとの特性を述べたが、低消費電力なアナログ・デジタル混在の ASIC を開発するには電流制御型のバイポーラプロセスよりも電圧制御型の CMOS プロセスを 使った方が有利である。また CMOS はバイポーラよりも素子を多く配置できるという点で高集積 化に向いている。本節では今回開発された CMOS ASIC の諸特性について述べる。

#### 9.2.1 FE2006

FE2006 チップは最小線幅 0.5 $\mu$ m の CMOS プロセスを用いて製造された。1 チップの構成は図 9.11 のように、アナログ信号を処理する部分としてプリアンプ →Pole Zero Canceler(PZC)→Band Pass Filter(BPF)→ サムアンプ →Analog Buffer amp のステージとデジタル信号を処理する部分 として、プリアンプ →PZC→ コンパレータ →LVDS ドライバのステージから成り立っている。ま た 1 チップにつき 8 チャンネルの信号を増幅かつ弁別することができる。電源電圧は ASD のとき には ±3V であったのに対して、CMOS では ±2.5V となっている。また ASD では 1 チャンネルあ たりの消費電力は 59mW であったが、CMOS では 1 チャンネルあたり 29mW となっており低消 費電力化に成功している。チップ内の各ステージの増幅率と時間特性を表 9.2 に示す。



図 9.11: FE2006 1 チップのブロック図

	増幅率 [V/pC]	時間特性
プリアンプ	0.49	時定数 8µs
PZC	1.3	ピーキングタイム 10ns
BPF	1	ピーキングタイム 20ns
サムアンプ	0.44	

表 9.2: FE2006 チップの各ステージ特性

MOS トランジスタの特性がトランジスタのサイズに依存するので、コンパレータに与える電圧の閾値(以後は $V_{th}$ と表記)が検出器の読み出しチャンネルごとにばらついてしまう。FE2006 チップの場合は1チップ内で見るとおよそ 20mV 程度  $V_{th}$  のばらつきがある。もし  $V_{th}$  がばらついたままだと  $\mu$ -PIC による 2 次元情報の元となるデジタル信号の出力に大きく影響が出る。例えば出

るべきデジタル LVDS 信号が  $V_{th}$  のずれにより出力されなかったり、LVDS の幅がばらつくので (図 9.12) 正確な 2 次元情報を取得できなくなってしまう。



図 9.12: Vth のばらつきによるデジタル信号出力の違い(概念図)

そのばらつきを補償するための DAC (図 9.13) がチャンネルごとに実装されていることが、このチップの特徴である。1 チャンネルあたり 5bit に対応したスイッチングができるようになっており、これにより V<sub>th</sub>を-1mV 刻みで 0~-31mV まで調整することが可能となっている。



図 9.13: V<sub>th</sub> 補償用 DAC 概略図

また  $\mu$ -PIC の信号を読み出すために FE2006 チップを 8 個基板に実装し、64 チャンネルボード を 8 枚作製した。(図 9.14) このボードは ASD の 64 チャンネルボードと同じサイズであるため互 換性があり、既存のシステムで容易に試験することができる。







図 9.14: FE2006 64 チャンネルボード

#### 9.2.2 FE2007

FE2006 チップでは問題として Vth が ASD のときと比較して低くすることができないという問題点があった。そこで FE2006 のコンパレータ前段部分に 10 倍 Amp を入れることによって S/N 比の改善を図った。これにより FE2006 では V<sub>th</sub> 補正が 0~-31mV まで-1mV ずつ調整可能だったが、FE2007 では 0~-310mV まで-10mV ずつ調整できるように変更した。また V<sub>th</sub> ばらつきを補償する作業を簡略化するために、DAC と同じロジックを用いてチップ内に切り替えスイッチを設けてある。プリアンプや消費電力などの特性は FE2006 と変わっていない。図 9.15 が FE2007 の 1 チップブロック図を表わしたものである。また FE2007 の 1 チップにおける V<sub>th</sub> ばらつきを図 9.16 に示す。この結果から V<sub>th</sub> の 1 チップ内でのばらつきは最大で 200mV 程度なので、DAC での V<sub>th</sub> 補正範囲内に収まっていることがわかる。したがって 10cm 角  $\mu$ -PIC の全 256 チャンネルで、図 9.16 のような V<sub>th</sub> ばらつきであれば DAC での V<sub>th</sub> 補正が可能であると考えられる。

また FE2006 と同様に μ-PIC 読み出し用に 64 チャンネルボードが製作された (図 9.17)。以下 では FE2007 チップを用いた場合について述べる。

## 9.3 DAC による Vth 補正

1 チップの DAC へのデータの書き込み方は、図 9.18 の様に 1MHz のクロック信号 (CK) を入 れ、Reset 信号の立ち下がりとともに DAC に DATA 信号を入力する。DATA 信号は先頭の 8bit によってテストパルスの入力チャンネルを決定し、後ろの 5bit × 8 チャンネル分で調整したい電 圧を決定する構成になっている。DAC への DATA 書き込みが終了するとチップから Carry out 信 号が出力される仕組みになっている。







図 9.16: FE2007 1 チップ内の V<sub>th</sub> ばらつき



図 9.17: FE2007 64 チャンネルボード



図 9.18: DAC の設定信号の入力タイミング図 (テストパルス入力 ch が 0ch のとき)

8 チップが乗った 64 チャンネルボードのときには、Carry out 信号が次のチップの Reset 信号と して使われることによって DAC の DATE 入力を行う。10cm 角  $\mu$ -PIC のアノードおよびカソー ド全 256ch × 2 の Vth 補正をする際には、図 9.19 の様なセットアップを組み、1MHz の CK 信号 と Reset 信号および DATE 信号は林栄精器社のパルスパターンジェネレータ「RPV-072」を用い て生成した。また補正は以下の手順に従って行った。

- 1. 補正したいチップにテストパルスを入力する
- 2. TDC(AMSC 社 ATM) で LVDS の幅を読む
- 3. 全てのチャンネルで LVDS の幅を揃えるように DAC の bit 数を調整する

このように LVDS の幅をそろえることによって Vth のばらつきを補正したとみなす。

便宜上 FE2007 64 チャンネルボード計 8 枚に No.1~No.8 と番号を付け、アノードには No.1、3、 4、8 の 4 枚、カソードには No.2、5、6、7 の 4 枚を使用した。μ-PIC 動作時にはアノードに負電 荷、カソードに正電荷が来るので、Vth 補正の際に使用するテストパルスの電荷もそれに合わせ た。表 9.3 が今回補正をしたときの各パラメータである。Vth の値は μ-PIC に HV を供給し、何 も線源を当てなかったときに Comparator が動作しないところを基準にして決定した。

テストパルス電荷 [pC]	$\pm 0.6$
アノード Vth[mV]	-139
カソード Vth[mV]	+365

表 9.3: Vth 補正時のテスト電荷量と Vth の値



図 9.19: Vth 補正セットアップ概念図

Vth の補正をした結果、 $V_{th}$ のばらつきは図 9.20 のようになった。ただし図 9.20 の横軸は DAC bit で指定された数で横軸の値 ×10 が補正した  $V_{th}[mV]$ の値である。縦軸はその DAC 値を指定されたチャンネルの合計である。この結果からアノード、カソードそれぞれ 256 チャンネルの  $V_{th}$ を DAC bit の範囲内で補正することができた。



図 9.20:  $V_{th}$  ばらつき分布 ( 横軸は DAC で指定された値、縦軸はカウント数 (a) アノード (b) カソード

## 9.4 CMOS ASIC と µ-PIC の接続試験

実際に CMOS ASIC と  $10 \text{cm} \hat{\mu}$ -PIC を接続したときの性能評価を行った。このときのセット アップは  $10 \text{cm} \hat{\mu}$ -PIC とその前段に  $50 \mu \text{m}$  厚 GEM を配置した。

#### 9.4.1 *µ*-PIC の信号

FE2007 チップが 8 枚乗った 64 チャンネルボード 8 枚を 10cm 角  $\mu$ -PIC と接続して、Sumamp の出力信号 (8ch sum)をオシロスコープで取得したものが図 9.21 である。このとき線源は <sup>55</sup>Fe、 ガスは Ar90%、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>10%を 1atm フローにて使用し、 $\mu$ -PIC の増幅率 ~3000、50 $\mu$ m 厚 GEM の 増幅率 ~18 で動作させた。



図 9.21: FE2007 で読み出したときの µ-PIC の 8ch sum 信号

FE2007 を接続したときの注意点として、デジタル出力部分は常に 100Ω 抵抗で終端して電流を 流し続けておく必要がある。これはデジタル出力が解放された状態だとコンパレータの動作由来の クロストークがアナログ出力に影響し、アフターパルスのリンギングとして表れるためである。

9.4.2 イメージング

図のようにはさみを窓の上に置いて<sup>55</sup>Feを真上から照射すると、図のような画像が得られた。

# 第10章 まとめと今後

### 10.1 紫外線光子検出器開発

まとめ

われわれが開発したガス増幅型紫外線光子検出器は光電面物質に CsI、増幅部に 10cm 角  $\mu$ -PIC と 50 $\mu$ m 厚 GEM を 2 枚使用している。これによりガス増幅率 6.7×10<sup>5</sup> を達成し、紫外光を検出す るために必要な増幅率を得た。また紫外線光源には 5.5MeV の  $\alpha$  線に対して波長 173nm でおよそ 100photons 発光するシンチレータを用いており、透過型光電面を用いた紫外線光子検出器と組み 合わせることにより量子効率がおよそ 2%となった。ガス増幅型の光検出器を用いて紫外光の信号 を得ることはこれまで他研究機関において実現されていたが、2次元画像を取得することは S/N 比 が悪かったために非常に難しかった。しかしわれわれは十分に高いガス増幅率と電気ノイズの低さ から 2 次元画像を取得することに成功した。

今後

今回の透過型光電面を用いた検出器では量子効率はおよそ 2%に留まったが、一般的な PMT と比較すると 1 桁低い。そこで反射型光電面を用いることによって量子効率を上げることは可能である。反射型光電面セットアップのために図のように 2 枚の GEM のうち一段目の GEM には金メッキされたものを用い、その上面に光電面物質 CsI を蒸着させることにした。また CsI が蒸着された GEM は安定性の問題からあまり増幅率を高くすることができないため、なるべく高い増幅率を得るために 100µm 厚 GEM を用いることにした。



図 10.1: 反射型光電面を用いた紫外線光子検出器の概念図

**10.1.1** *µ*-PIC 読み出しシステム開発

まとめ

今後

# 関連図書

- [1] G.F.Knoll 「放射線計測ハンドブック 第3版」 日刊工業新聞社 (2001)
- [2] http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html
- [3] A.Takada, Doctoral Thesis Kyoto University(2007)
- [4] A.V.Zarubin, NIM A283(1989)409
- [5] F.Sauli "Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers" CERN Report 77-09(1977)
- [6] G.Charpak et al., NIM 62(1968)262
- [7] 永吉勉 修士論文 東京工業大学 (2001)
- [8] G.Charpak et al., NIM 148(1978)471
- [9] A.Oed, NIM A263(1988)351
- [10] T.Nagayoshi Doctoral Thesis Kyoto University(2004)
- [11] S.F.Biagi, T.J.Jones, NIM A361(1995)72
- [12] S.F.Biagi et al., NIM A366(1995)76
- [13] F.Sauli, NIM A386(1997)531
- [14] http://gdd.web.cern.ch/GDD/
- [15] Y.Giomataris et al., NIM A376(1996)29
- [16] Y.Giomataris NIM A419(1998)239
- [17] M.Kobayashi "Introduciton to scintillators" Proceedings of KEK-RCNP International School and Mini-workshop for Scintillating Crystals and their Application in Particle and Nuclear Physics
- [18] H.Hofstadter, Phys. Rev. 74(1948)100
- [19] H.Hofstadter, Phys. Rev. 74(1948)628
- [20] E.Dafni, NIM A254(1987)54
- [21] Y.Kurata et al., IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record 3(1994)1367

- [22] M.Tashiro et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 49(2002)1893
- [23] E.V.D. van Loef et al., NIM A486(2002)254
- [24] http://jp.hamamatsu.com
- [25] 「UBA(Ultra Bialkali) SBA(Super Bialkali) PMT Series」浜松ホトニクス株式会社
- [26] E.Sarantopoulou et al., Microelectronic Engineering 57-58(2001)93
- [27] P.Dorenbos et al., IEEE Tran. Nucl. Sci. 37(1990)119
- [28] P.Schotanus et al., NIM A284(1989)531
- [29] R.Visser et al., J.Phys.:Condens. Matter 5(1993)8437
- [30] P.Dorenbos et al., Journal of Luminescence **69**(1996)229
- [31] V.Peskov et al., NIM A392(1997)89
- [32] E.Shefer et al., NIM **A419**(1998)423
- [33] F.Angelini et al., NIM A335(1993)69
- [34] J.van der Marel et al., NIM A410(1998)229
- [35] M.Gruwé & S.Tavernier NIM A311(1992)301
- [36] W.Kononenko et al., NIM A396(1997)172
- [37] J.M.Maia et al., NIM A580(2007)373
- [38] A.Ochi, NIM A471(2001)264
- [39] O.Sasaki, M.Yoshida, IEEE Trans. Nucl. Sci. 46(1999)1871
- [40] R.Orito et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 51(2004)1337
- [41] H.Kubo, NIM A513(2003)94
- [42] A.Takeda et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 51(2004)2140
- [43] K.Hattori et al., Journal of Synchroton Radiation 16(2009)
- [44] K.Hattori, Doctoral Thesis Kyoto University(2009)
- [45] M.Inuzuka et al., NIM A525(2004)2140
- [46] H.Sekiya Proceedings of 34th International Conference on High Energy Physics 2008
- [47] 上野一樹 修士論文 京都大学 (2007)
- [48] 服部香里 修士論文 京都大学 (2006)
- [49] 小出直之 「液晶ポリマーの新展開」 シー・エム・シー出版 (2004)
- [50] 池田哲夫 「トランジスタの基礎」 森北出版 (1998)

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、丁寧なご指導をして頂いた谷森達京都大学大学院教授に深く感謝致 します。また実験に対する姿勢や知識などを教えて下さった窪秀利京大助教、身内賢太朗京大助教 にも感謝致します。

この研究を進めるにあたり、紫外線光子検出器開発に関しては東京大学宇宙線研究所の関谷助教には様々な助言を頂き、大変お世話になりました。

また CMOS ASIC の開発に当たっては、チップの設計を担当して下さり、検出器との接続試験の際にも助言を下さった高エネルギー加速器研究機構の藤田様、田中様に感謝いたします。

普段の研究生活においては宇宙線研究室の皆様には大変お世話になりました。特に同じグループで ある、株木博士、西村さん、服部さん、上野さん、黒澤さん、岩城君、高橋君、ISAS 気球グルー プの高田博士には、私の初歩的な質問でも丁寧に助言を下さいました。私が楽しく修士の2年間を 過ごせたのもひとえに皆様のおかげだと思っております。

最後になりましたがここまで育ててくれた私の両親に感謝します。