

アバランシェフォトダイオードを用いた
2次元撮像カメラの開発

齋藤 孝男

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2004年 2月

ABSTRACT

Avalanche photodiodes (APD) are semiconductor detector which produce an internal gain of 10–100 or more. The quantum efficiency of APDs is more than 80% in the visible and near infrared.

In this work we developed X-ray and γ -ray imaging two-dimensional detector which made of APDs and scintillator. Since the principle of “anger camera” that is used for imaging is calculating the position of incident photons by signals of each imaging element, it can work out a high position resolution only a few read out systems.

First, we made 5×5 cm “anger camera” with four APDs and CsI scintillator, and checked on its position resolution using the synchrotron facility in KEK-PF. According to this experiment, this detector presented an position resolution of ~ 5 mm at the corner of the detector. Second, using same detector and plastic simtillator, we measured anisotropy of the photon which carried out Compton scattering, and then we obtained the polarimetric modulation $Q=0.23$. Finally, we conducted the single element read out test of the APD array detector “Hamamatsu S8550” to check the individuality of each element. The result showed that these element’s performance were well in agreement.

目次

第1章	放射線用撮像検出器の必要性	6
第2章	撮像用シンチレータと光検出器	8
2.1	シンチレータ	8
2.2	光検出器	9
2.2.1	光電子増倍管	9
2.2.2	半導体検出器とフォトダイオード	9
2.2.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	10
2.3	実験に用いた APD	14
第3章	シンチレータ検出器による撮像原理	15
3.1	撮像の原理	15
3.2	APDによるアンダーカメラの試作	16
第4章	APD 4素子を用いた撮像用検出器の評価	18
4.1	実験のセットアップ	18
4.1.1	治具の構成	18
4.1.2	読みだし回路系	19
4.1.3	実験施設	19
4.2	検出器の調整	20
4.3	ビーム光源によるイメージの取得	22
4.4	ビーム光源による偏光イメージの取得	23
4.4.1	偏光検出の原理	23
4.4.2	偏光実験のセットアップ	25
4.4.3	偏光の観測	27

第 5 章	32 素子アレー型 APD とその読みだし系の特性評価	30
5.1	浜松ホトニクス社製 32 素子アレー型 APD S8550	30
5.2	読みだし回路系	32
5.3	スペクトルの取得	32
5.4	今後の展望	36
第 6 章	実験結果の議論	37
6.1	APD 4 素子を用いた撮像用検出器について	37
6.1.1	ビーム光源によるイメージの位置分解能	37
6.1.2	偏光イメージ	38
6.2	32 素子 APD について	39
6.2.1	取得したスペクトルの構造	39
第 7 章	結論と今後の課題	40

目 次

2.1	APD と光電子増倍管	11
2.2	APD の増幅率と印加電圧、温度の関係の例	11
2.3	APD の構造模式図	13
2.4	用いた APD とその量子効率	14
3.1	アンダーカメラ	15
3.2	試作したアンダーカメラの概図	16
4.1	読みだし用治具	18
4.2	APD と CsI の装着時の様子	19
4.3	読みだし回路系	20
4.4	使用したビームラインの外観	21
4.5	可動ステージ	21
4.6	照射ポイント	22
4.7	イメージ再構成図	23
4.8	コンプトン散乱	25
4.9	偏光測定時の配置	26
4.10	偏光測定の概図	26
4.11	偏光イメージの方位角依存性 (1) 散乱させた場合 (上) と散乱させていない場合 (下)	28
4.12	偏光イメージの方位角依存性 (2) 135° 傾けた時	29
5.1	浜松ホトニクス社製 32 素子アレー型 APD S8550	30
5.2	S8550 の各 APD のダークカレントと端子間容量、増幅率の相対値	31
5.3	32ch プリアンプ 5027 型	32
5.4	プリアンプの各チャンネルのノイズ	33
5.5	32 素子 APD 読みだし回路系	33

5.6	32 素子 APD で取得した ^{55}Fe のスペクトル (1)	34
5.7	32 素子 APD で取得した ^{55}Fe のスペクトル (2)	35
5.8	VA/TA 読みだし用治具	36

表 目 次

2.1	代表的な固体シンチレータの特性	9
2.2	4つの APD の基礎特性	14
4.1	各象限の APD と整形アンプの対応表	20
4.2	各プロット点での位置分解能	24
4.3	各象限のカウント数 (1)	27
4.4	各象限のカウント数 (2) 135° 回転させて散乱させた場合	29

第1章 放射線用撮像検出器の必要性

宇宙に存在する天体からは、様々なエネルギーの電磁波が放出されている。このうち最もエネルギーの高いX線・ γ 線はブラックホール、パルサー、白色矮星などの強重力天体、 γ 線バースト、AGN、超新星およびその残骸、ジェット、さらに原始星、高温ガスや普通の星に至るまで、宇宙のありとあらゆる高温、高エネルギー天体現象から観測されている。このためX線・ γ 線を観測することは、そのまま高エネルギーの天体現象を解き明かす鍵になると言える。

天体を観測するとき、その天体がある程度の空間的大きさを持っていた場合、その空間構造を観測することによってさらに様々なことが分かる。可視光線での観測はもちろん、電波でも干渉を利用して、銀河中心にあるいて座Aと呼ばれる電波源の様子や、活動銀河核に付随した電波ジェット、さらに超新星残骸について、非常に位置分解能の優れた観測が行われている。X線・ γ 線についても空間構造の観測は重要で、例えば超新星残骸や活動銀河核のジェットなどを電波とともに観測することで、どの部分がどのような現象で輝いているかなど、天体物理学的に重要なことが分かる。そのため、空間分解能を備えたX線・ γ 線検出器を開発することは非常に重要である。

現在までに様々なX線天文衛星が打ち上げられて、X線の撮像観測が行われてきた。現在でもChandraやXMM-NewtonといったX線衛星が観測を行っている。だが、今までは検出器の制約から、観測されたものはほとんどが10keV以下の「軟X線」と呼ばれるものであり、10keV以上の「硬X線」については未だにほとんど観測例が無い。このためこの硬X線領域についても感度を持った検出器の開発が必要である。

天文学に限らず、医学分野でも放射線イメージングは重要である。レントゲン写真は最も基本的な放射線イメージングであり、かなり古くから行われているが、最近ではさらに他分野の治療においても放射線イメージングが行われている。例えば心臓医学においては、放射性同位体を血液中に投与し、心臓での放射性同位体の動きを追跡することによって、拍動や血液循環の様子を調べる、というような放射線を血液のトレーサーとして用いることが行われている。また、がん治療の分野では、放射性同位体でブドウ糖を合成して体内に投与し、がん細胞が正常な細胞よりも多量のブドウ糖を消費することを利用してが

んの早期発見につなげている。放射線用の撮像カメラはこれらにも応用でき、さらスペクトル情報と輝度情報を同時に用いることでX線フィルムのようなモノクロではなく、人体の「カラー写真」を得ることも可能にするなど、幅広い利用が期待される。

第2章 撮像用シンチレータと光検出器

X線・ γ 線用撮像検出器として、吸収体のシンチレータとそれを読み出す光検出器の選定を行った。

2.1 シンチレータ

シンチレータ内を通過した放射線の電離作用によって発生するシンチレーション光から放射線を検出する方法は、放射線測定の一つとして古くから行われてきた。今日でも放射線検出とスペクトル測定を行うための有用な方法として広く利用されている。

シンチレータには有機シンチレータと無機シンチレータがある。有機シンチレータは適当な溶媒に溶かして、液体シンチレータやプラスチックシンチレータとして利用されている。有機シンチレータは減衰時定数が短く、加工がしやすいが、構成物質がH,C,Oなどの軽元素なので密度、原子番号が小さく、X線・ γ 線との相互作用はコンプトン散乱が支配的になる。そのため、X線・ γ 線の測定にはあまり用いられず、 β 線や中性子線の測定に用いられている。

これに対し、無機シンチレータは密度、原子番号ともに有機シンチレータに比べて大きい。そのため、X線・ γ 線の測定に広く用いられている。無機シンチレータは結晶中に含まれる活性化物質が物質のエネルギー帯を変形させ、新しくできたエネルギーギャップ幅の狭いエネルギー状態を電子が遷移することによってシンチレーション光を発生させている。これは単一分子のエネルギー準位間の遷移によって起こる有機シンチレータの発光原理とは全く異なっている。

主な無機シンチレータとプラスチックシンチレータの特性を表 2.1 に示す。最も広く利用されている無機シンチレータはタリウム活性ヨウ化ナトリウム (NaI(Tl))、以下 NaI) である。 NaI は 1MeV 当たりの生成光子数が比較的多く、最大放出波長が光電子増倍管の感度と良く合っているので、光電子増倍管とともに良く利用されている。 NaI は吸湿性があり、結晶を密封容器内に封入しなければならず、また幾分脆い。

タリウム活性ヨウ化セシウム (CsI(Tl))、以下 CsI) は NaI よりも密度、原子番号が大き

く、 γ 線の阻止能が高い。また機械的強度も強いため、宇宙での利用を考えた場合に大きな利点となる。CsIは1MeV当たりの生成光子数が全シンチレータ中で一番多く、最大放出波長が $\lambda \sim 540\text{nm}$ でフォトダイオードのピーク感度と良く一致する。このため、我々の実験ではシンチレータとしてこのCsI結晶を用いている（図2.4参照）。

シンチ レータ	比重	屈折率	最大放出波長 [nm]	減衰時定数 [nsec]	生成光子数 [個/MeV]
NaI(Tl)	3.67	1.85	415	230	38000
CsI(Tl)	4.51	1.80	540	1000	52000
BGO	7.13	2.15	480	300	8200
YAP(Ce)	5.55	1.93	347	28	18000
NE102A ^a	1.03	1.58	423	2	10000

^a プラスチックシンチレータ

表 2.1: 代表的な固体シンチレータの特性

2.2 光検出器

2.2.1 光電子増倍管

光電子増倍管は現在最も良く使用されているシンチレーション検出器である。光電子増倍管は光電陰極で入射光子を光電子に変換し、その後ろにある電子増倍器で電子を増幅し、信号を読みだしている。増幅率は 10^6 程度あり、このために微弱な信号の読みだしも可能にしている。

光電子増倍管はその構造上、(1) 大きい、(2) 電子の移動距離が長いので、外部磁場の影響を受けやすい、(3) 構造が複雑なので検出器毎の性能差が大きい、(4) 量子効率が20～30%と低い、(5) 印加電圧が約1000Vと高い、という特徴がある。

2.2.2 半導体検出器とフォトダイオード

最近、光電子増倍管に代わる新たな光検出器として、半導体検出器であるフォトダイオードが注目されている。フォトダイオードは光電子増倍管に比べて小さく、磁場の影響

を受けない、量子効率が低い、比較的低電圧で動作する、さらに機械的衝撃に強く頑丈であるなど、光電子増倍管よりもすぐれた特徴を持っている。

p型半導体 (B,Al,Ga などの第 III 族元素を不純物として添加したもの) と n 型半導体 (P,As などの第 V 族元素を不純物として添加したもの) を接合すると、n 型半導体中のホールと p 型半導体中の電子が接合面で打ち消し合い、そこに「空乏層」と呼ばれる電荷の存在しない領域を形成する。空乏層は接合面の電位差と電荷の拡散が平衡常態になるまで広がり、p 型側の電極に負極、n 型側の電極に正極の逆バイアスを掛けると空乏層は更に広がる。半導体検出器の原理は、内部に生じたこの空乏層をさながら固体の電離箱のように使用するというものである。半導体検出器の空乏層に入射した放射線は、エネルギーを光電効果によって失い、できた光電子が放射線のエネルギーに応じた数の電子 - ホールのペア (キャリア) を生成する。生成されたキャリアは電極間に生じた電位差によって各電極へ収集され、電圧パルスとして読み出される。この電圧パルス値を測定すれば入射した放射線のエネルギーが測定できる。

半導体検出器であるフォトダイオードの平均電離エネルギー ϵ は数 eV であり、生成するキャリアの数は同じエネルギーを持った放射線が入射したときに、ガス検出器の生成するキャリアの約 10 倍のキャリア情報を生成することになる。これにより統計的ゆらぎを減らし、理論的には高いエネルギー分解能を得られるが、一方で熱励起による電荷ペアがダークカレントとしてノイズに影響し、エネルギー分解能を悪化させている。また、内部に増幅機能を持たないため、低エネルギーの信号が回路ノイズやダークカレントに埋もれてしまう。このため、ノイズに埋もれない程度大きな信号でないと読みだすことができない。

2.2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (APD) はフォトダイオードの一種である。印加電圧によって生じた内部の高い電場により、光電子によって生成された電荷キャリアがなだれ (アバランシェ) 増幅を起こして信号を増幅する。通常フォトダイオードは内部増幅を行わないために出力信号が小さく、低エネルギー側では信号がノイズに埋もれてしまうが、APD はこの増幅作用のおかげで回路由来のノイズレベルを相対的に下げることができ、低エネルギーの信号を容易に検出できる。増幅率 M は印加電圧の値 V や温度 T によって大きく変わり、それぞれ

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dV} \sim +3.4\% [1/V] \quad (M = 50) \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dT} \sim -2.6\%[/^{\circ}C] \quad (M = 50) \quad (2.2)$$

と、典型的な光電子増倍管の値（ $\sim 2\%/V$ 、 $-0.3\%/^{\circ}C$ ）よりも大きい [3] ので、使用する際には良く調整された電源と、ととのった温度環境を用いる必要がある。（図 2.2）。



図 2.1: APD（下）と光電子増倍管（上）

■ 増倍率—逆電圧

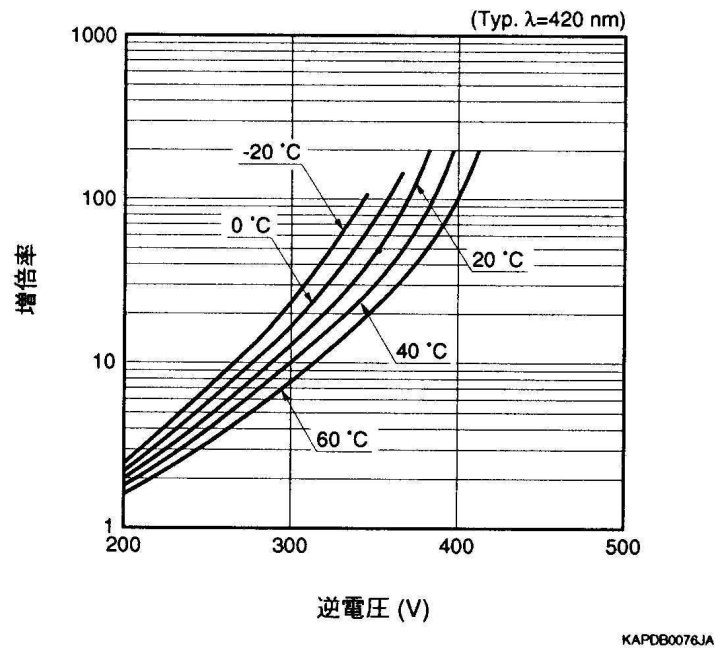


図 2.2: APD の増幅率と印加電圧、温度の関係の例（S8664-55 の場合）

APDはその構造から beveled-edge, reach-through, reverse の3つの種類に分けることができる。図 2.3 はそれぞれの構造模式図である。3つとも上側が受光面になっており、上側に GND、下側に正極のバイアスが掛かる。+の添字は不純物が多いことを、また i は真性半導体 (i 型半導体) を意味し、i 型は実際には不純物の少ない p 型、または n 型で置き換えられる。逆バイアスを掛けたとき、 p^+ 、 n^+ は高い伝導度を持っているので電場はほとんど存在せず、pn 接合部分から i 層まで広がっている空乏層に電場が掛かるが、なだれ増幅が起こるほど電場が高くなるのは pn 接合付近のみである。

(a) beveled-edge APD

この APD は n 型半導体に抵抗の大きな材質を用いて、1800~2600V という高い降伏電圧を実現している。側面にある傾斜は周囲からの降伏を防ぐために施してあり、表面の dead-layer を除去するために受光面にエッチングがしてある。このため広い空乏層が得られるが、電場が強いため増幅領域が広く、光の入射位置によって増幅率に差がでてしまう。

(b) reach-through APD

この APD は増幅領域が検出器の奥にある。X 線が入射すると、増幅領域の手前にある分厚い空乏層によって止められ、キャリアを生成する。キャリアは弱い電場により電子は正極へ、ホールは負極へとドリフトしていき、電子はやがて増幅領域に辿り着き pn 接合付近の強い電場によりなだれ増幅を起こす。有感領域となる空乏層が広いこと、X 線などの検出にも適しているが、その領域で発生した熱励起による電子も増幅されるので、ダークカレントの増加につながりノイズが増大する。

(c) reverse APD

この APD は増幅領域が検出器受光面のすぐ側 (\sim 数 μm) にあるので、透過力の高い光はほとんどが増幅領域を通過してしまう。よって X 線を読みだすのには不向きである。しかし、シンチレータが発生する可視光領域の光は受光面から $1\sim 3\mu\text{m}$ でほぼ吸収されるので完全に増幅され、量子効率も高い。よってこちらの APD は主にシンチレータと組み合わせられて用いられる。熱励起による電荷のうち増幅されるのはホールのみであり、正極から読みだす場合にはダークカレントの影響が少ない。今回の実験では最大放出波長が $\lambda = 540\text{nm}$ の CsI シンチレータの読みだしを行うため、こちらの APD を使用した。

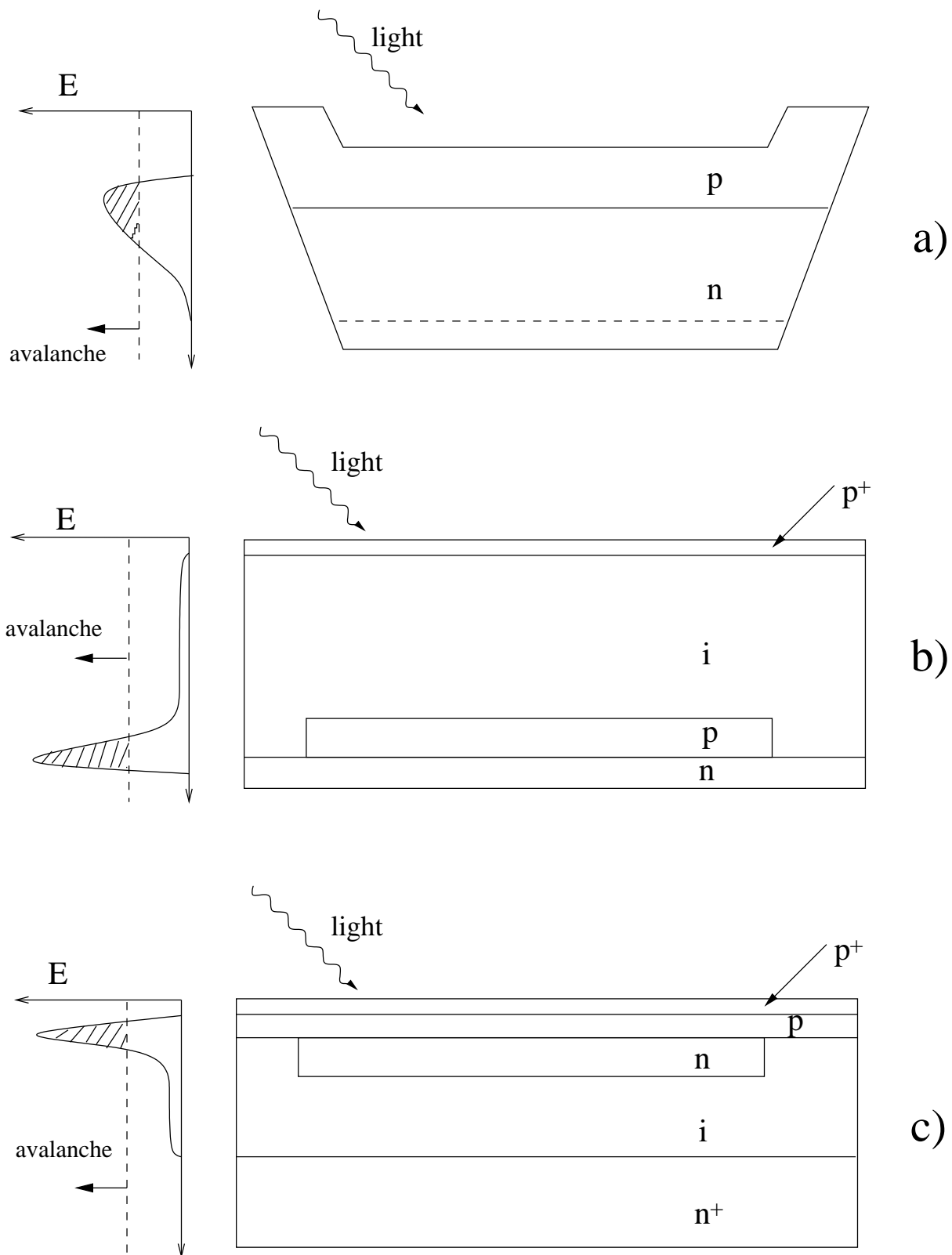


図 2.3: (a)beveled-edge、(b)reach-through と (c)reverse の構造模式図。左は内部の電場強度の変化の様子。

2.3 実験に用いた APD

本実験で我々は浜松ホトニクス社製のシリコン製 APD S8664-55 (図 2.4 左) を用いた。S8664-55 は reverse APD であり、外形寸法は $9 \times 10.6 \text{mm}$ 、受光面積は $5 \times 5 \text{mm}$ である。受光面を保護するため、表面にはエポキシ樹脂が塗装してあり、外容器はセラミック製である。図の右側は各波長の量子効率を表しており、図のように $320 \sim 1000 \text{nm}$ の範囲で感度を示し、 $480 \sim 830 \text{nm}$ では 80% 以上と、可視光の中でも緑～近赤外域で良い効率を示している。また増幅率と電圧の関係は図 2.2 に示してある。

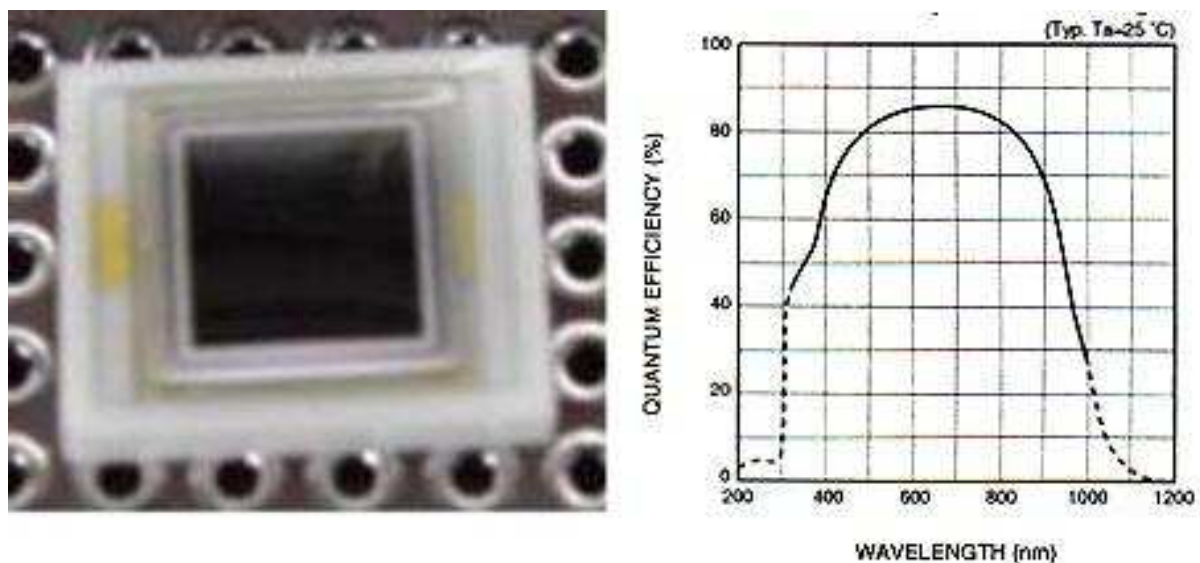


図 2.4: (左) Si APD S8664-55 (右) 各波長の量子効率

表 2.2 に、本実験で使用した 4 つの APD の I_D 、降伏電圧 (V_b)、増幅率 $M=50$ になる電圧 (V_r)、ダークカレント (I_D) を S8664-55 の一般定格値とともに示す。それぞれの値は温度 25°C 、 $\lambda=430 \text{nm}$ のときのものである。このようにダークカレントの値が小さく、かつ性能のほぼ揃ったものを用いることにより、較正をしやすくしている。

ID	$V_b[\text{V}]$	$V_r[\text{V}]$	$I_D[\text{nA}]$
1	403	362.5	1.57
2	404	363.2	1.59
6	405	365.3	1.52
8	404	364.5	1.359
typical	400		5

typ. $T_a = 25^\circ\text{C}$, $\lambda = 430 \text{nm}$

表 2.2: 4 つの APD の基礎特性

第3章 シンチレータ検出器による撮像

原理

3.1 撮像の原理

X線、 γ 線の撮像を行おうとした場合、最も単純なものは通常のX線、 γ 線検出器を2次的に配列して使用する、というものである。この場合、1つ1つの素子の読みだしは独立であるので、読みだし系が検出器全体の大きさの2乗に比例して増えてしまう。また、一つの検出器内のどこに光子が入射しても全て同じ位置として扱われるので、素子自体の大きさよりも小さな位置分解能を持たせることは不可能である。以上から、この読みだし方法では画素をあまり多くできない。

そこで我々は「アンガーカメラ」として医学分野で用いられている手法に着目した。アンガーカメラは γ 線カメラとも呼ばれ、NaIシンチレータと光電子増倍管を組み合わせることで生体内に投与された放射性同位体からの γ 線を捉えるものである。図3.1はアンガーカメラの模式図である。アンガーカメラは大きなNaIシンチレータ結晶とその後ろに敷きつ

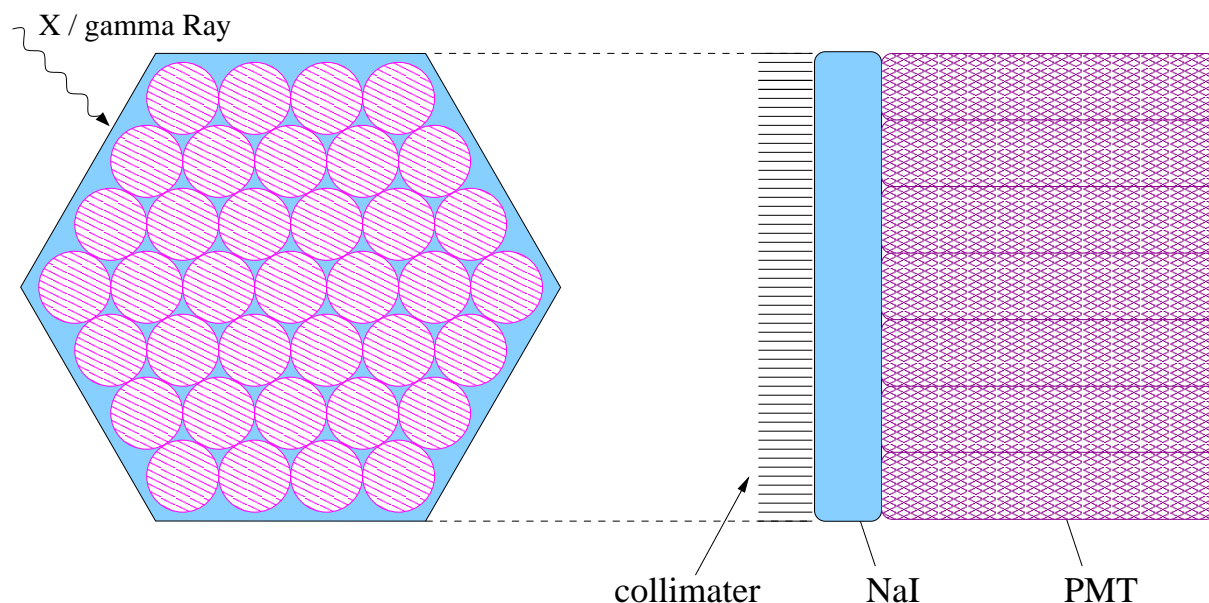


図 3.1: アンガーカメラ

められた光電子増倍管 (PMT)、そして鉛製のコリメーターからなる。 γ 線はシンチレータに入射するとシンチレーション光を発生し、光電子増倍管で読み取られる。このとき γ 線の入射位置に近い光電子増倍管ほどシンチレーション光を多く受け取り、出力される信号もそれに応じて大きくなる。この信号の大きさから加重平均で入射位置を求めている。実際にはこれほど単純ではなく、様々な回路を用いて微調整するほか、位置算出プログラムも複雑な統計処理を施している。しかしながら基本的な考え方は同じであり、この手法を用いて 37 本または 61 本の光電子増倍管から 4096 画素や 65536 画素といった高い位置分解能が得られている。

3.2 APDによるアンガーカメラの試作

前章で述べたように、APDは光電子増倍管に比べて大きさ、量子効率、磁場から受ける影響の点で優れている。よって我々はAPDを受光素子として用いたアンガーカメラを試作した。今回は簡単のためにAPD4個の利用にとどめ、それをシンチレータ結晶の四隅に配置した(図3.2)。各APDは図中のように番号によって区別され、入射位置は各象

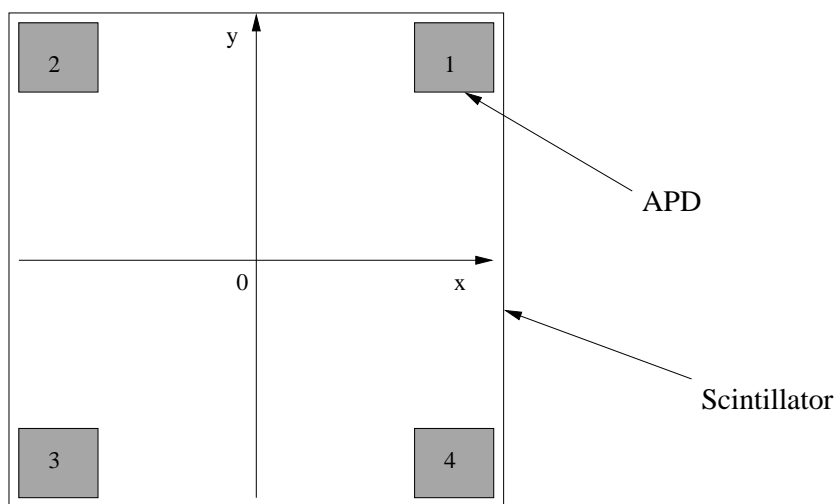


図 3.2: 試作したアンガーカメラの概図

限の APD からの信号の電圧値 (s_1, s_2, s_3, s_4) を次式

$$x = \frac{(s_1)^\alpha - (s_2)^\alpha - (s_3)^\alpha + (s_4)^\alpha}{\sum_{i=1}^4 (s_i)^\alpha} \quad (3.1)$$

$$y = \frac{(s_1)^\alpha + (s_2)^\alpha - (s_3)^\alpha - (s_4)^\alpha}{\sum_{i=1}^4 (s_i)^\alpha} \quad (3.2)$$

によって規格化された xy 座標として求めている。 α については、端面での反射を考えると、最適な値が分からないので、今回は $\alpha = 4$ とし、測定を行った。

第4章 APD 4素子を用いた撮像用検出器の評価

4.1 実験のセットアップ

4.1.1 治具の構成

APDを読みだすために、図 4.1 のような治具を製作した。図左にあるように、APDを組みこむための端子が4つ、38.1mm 間隔で正方形に配置されている。APDを動作させる高圧電源は、図右にあるような BNC コネクタによって APD の1つ1つに独立に供給されるようになっている。

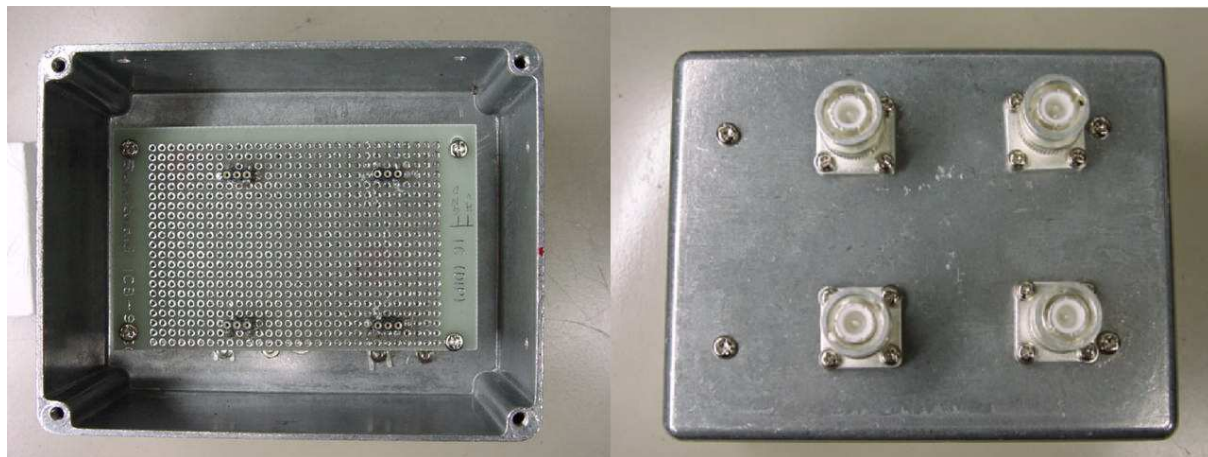


図 4.1: 読みだし用治具

図 4.2 は APD と CsI を取りつけた後の写真である。CsI の大きさは 5×5 cm、厚さは 1 cm であり、APD は図中の黒い四角のように CsI の四隅に取りつけられている。CsI は全体をテフロン製の反射材で包んであり、それにより効率的にシンチレーション光を集めるとともに APD と CsI を固定している。

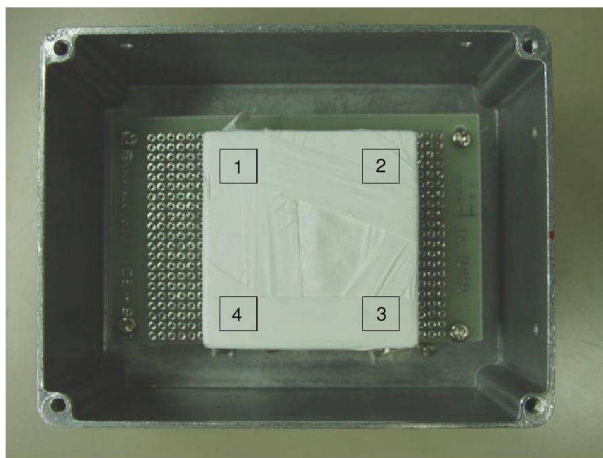


図 4.2: APD と CsI の装着時の様子。黒い四角は裏面の APD の位置を表している。数字は各象限を表す。

4.1.2 読みだし回路系

図 4.3 はデータ取得回路系の模式図である。図では省略してあるが、4 つの APD それぞれにプリアンプ、波形整形アンプ、波高弁別器がついている。読みだし回路は APD の正極側に接続していて、APD によって作られた電子の信号だけが電荷信号として読みだされる。電荷信号はプリアンプ、整形アンプによって電圧に変換・増幅された後、VME-ADC と波高弁別器に分かれる。VME-ADC に入った電圧信号はアナログデジタル変換され、12 ビットの信号として PC に読み込まれる。一方波高弁別器に入った信号はロジックパルスを生じ、同時計数回路に加えられる。この同時計数回路が 4 つの APD 全てについて信号を得た場合のみ VME-ADC にゲート信号を出すようにしてあるので、回路からのノイズ信号をほぼ完全に除去することができる。

プリアンプはすべてクリアパルス社製の 581K 型を用いたが、整形アンプは同種のものがないのでそれぞれ別種のものを使用した。各 APD に対するプリアンプ、整形アンプの対応を表 4.1 に示す。なお、整形アンプの整形時間は $3\mu\text{s}$ とした。

4.1.3 実験施設

2003 年 11 月 28 日から 12 月 1 日にかけて、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光研究施設 (PF) においてビーム照射試験を行った。使用したビームライン BL-14A (図 4.4) は垂直ウィグラーを光源とし、垂直に偏光した 5keV から 80keV までのエネルギーの X 線を取り出すことができる。また照射台は横方向と上下

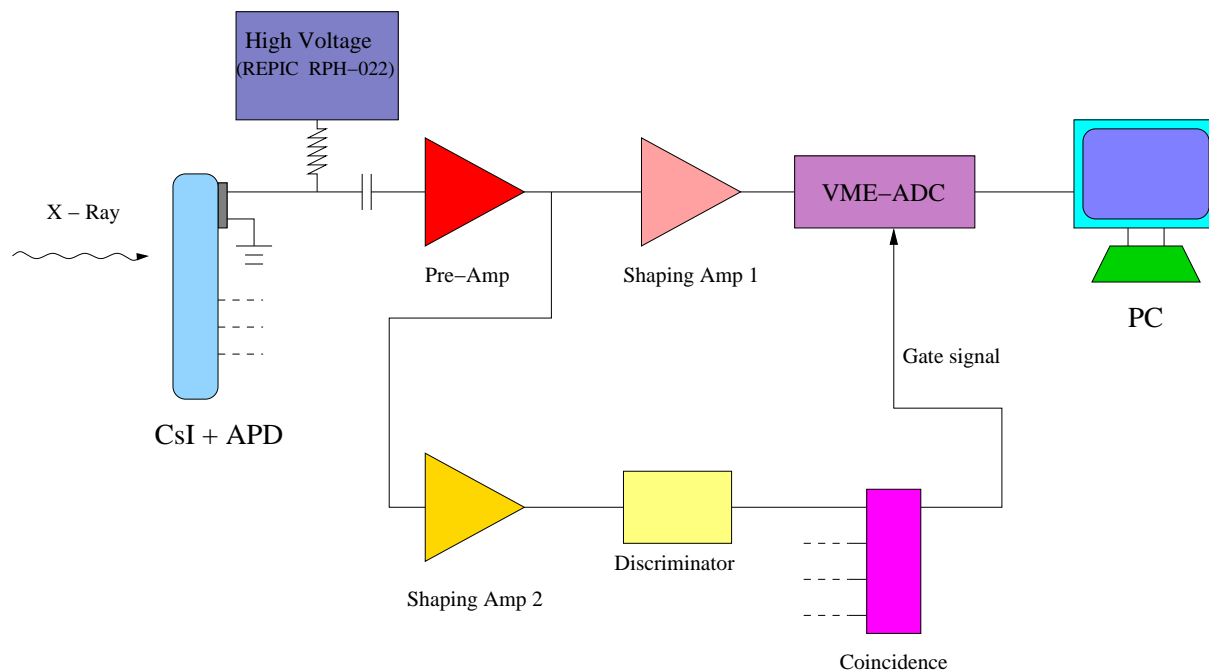


図 4.3: 読みだし回路系

象限	APD ID	プリアンプ ID	整形アンプ
1	2	S/N033135	ORTEC 社 572 型
2	6	S/N033138	クリアパルス社 4417 型
3	8	S/N033137	ORTEC 社 571 型
4	1	S/N033136	ORTEC 社 570 型

表 4.1: 各象限の APD と整形アンプの対応表

方向に移動でき、横方向は 0.02mm ピッチ、上下方向は 0.005mm ピッチで動かすことができる。今回は Si553 結晶面を用いて 70keV に単色化したビームを 0.1mm ϕ にコリメートして、製作した検出器に照射した。

4.2 検出器の調整

まず、検出器上での座標を求めるため、照射台をスライドさせ、APD の出力を調べた。ビームがシンチレータをはずれた場合、APD の出力レートは急激に落ちるので、台を少しずつ移動させてビームを照射し、高レート（シンチレータに当たっている場合）と低レート（はずれている場合）のちょうど半分の出カレートになった位置を検出器の端とした。



図 4.4: 使用したビームラインの外観

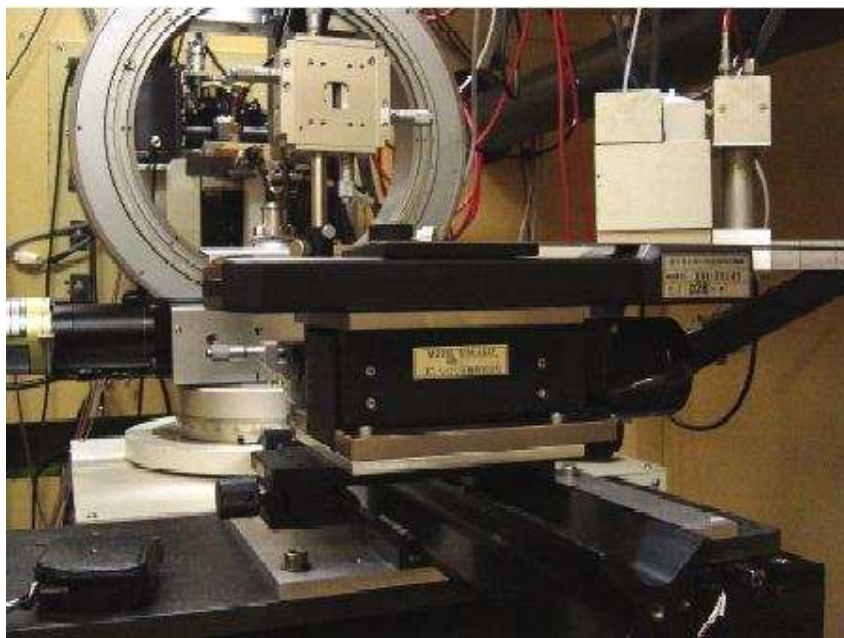


図 4.5: 可動ステージ

上下左右についてアラインメントを行い、それぞれの中心を検出器の中心 (0, 0) とした。

次に、各 APD からの出力信号の大きさを揃えるため、先程求めた検出器の中心にビームを照射し、それぞれの出力信号を比べた。出力信号の大きさは、APD の増幅率、プリアンプの増幅率、整形アンプの増幅率の合計で決まり、APD の増幅率は印加電圧によって変化する。今回は表 2.2 に示した $M=50$ になる電圧を採用したので、各 APD の出力を揃えるために整形アンプの増幅率を変えた。

4.3 ビーム光源によるイメージの取得

先程の検出器の座標をもとに、X 線ビームを 1cm 間隔、合計 25 点について図 4.6 のように照射した。入射 X 線光子のレートは時間とともに変化するので、ADC が 40000 カウント計測するまでデータを取得した。取得時の温度変化は、実験を通して 0.1°C の範囲で一定であった。こうして得られたデータから式 (3.1)、(3.2) を用いて、照射ポイントを再構成した。

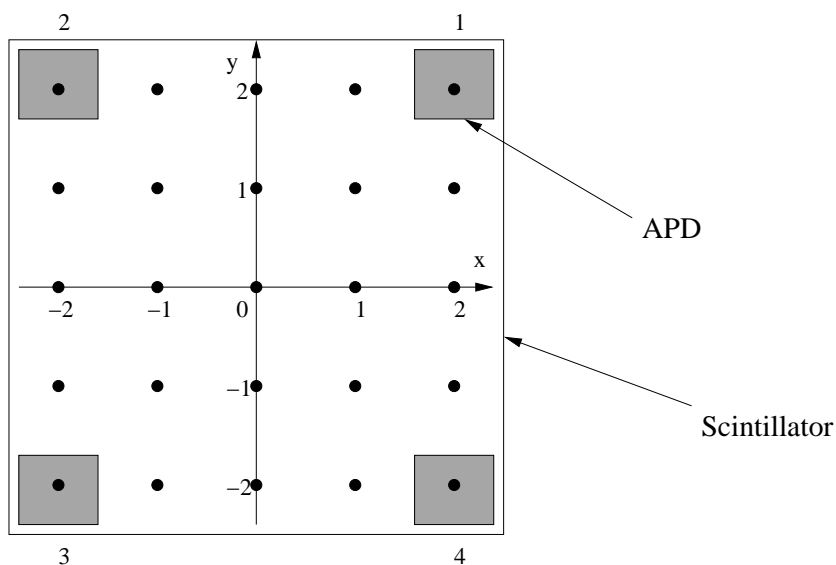


図 4.6: 照射ポイント

図 4.7 は各 (x, y) にビームを照射したときの 2 次元イメージである。x, y 軸を ± 1 に規格化してあり、図 4.6 に対応させて照射ポイントの順に並べてある。検出器の四隅 ((2, 2), (-2, 2), (-2, -2), (2, -2)) では、ばらつきは小さいが、それ以外ではプロットがほぼ全体に拡散してしまっている。このため各イメージを軸上に射影することにより、 (x, y) の最も確からしい値とその半値幅を求めた。各式を用いたときの各照射ポイントの最確値と

半値幅を表 4.2 にまとめた。

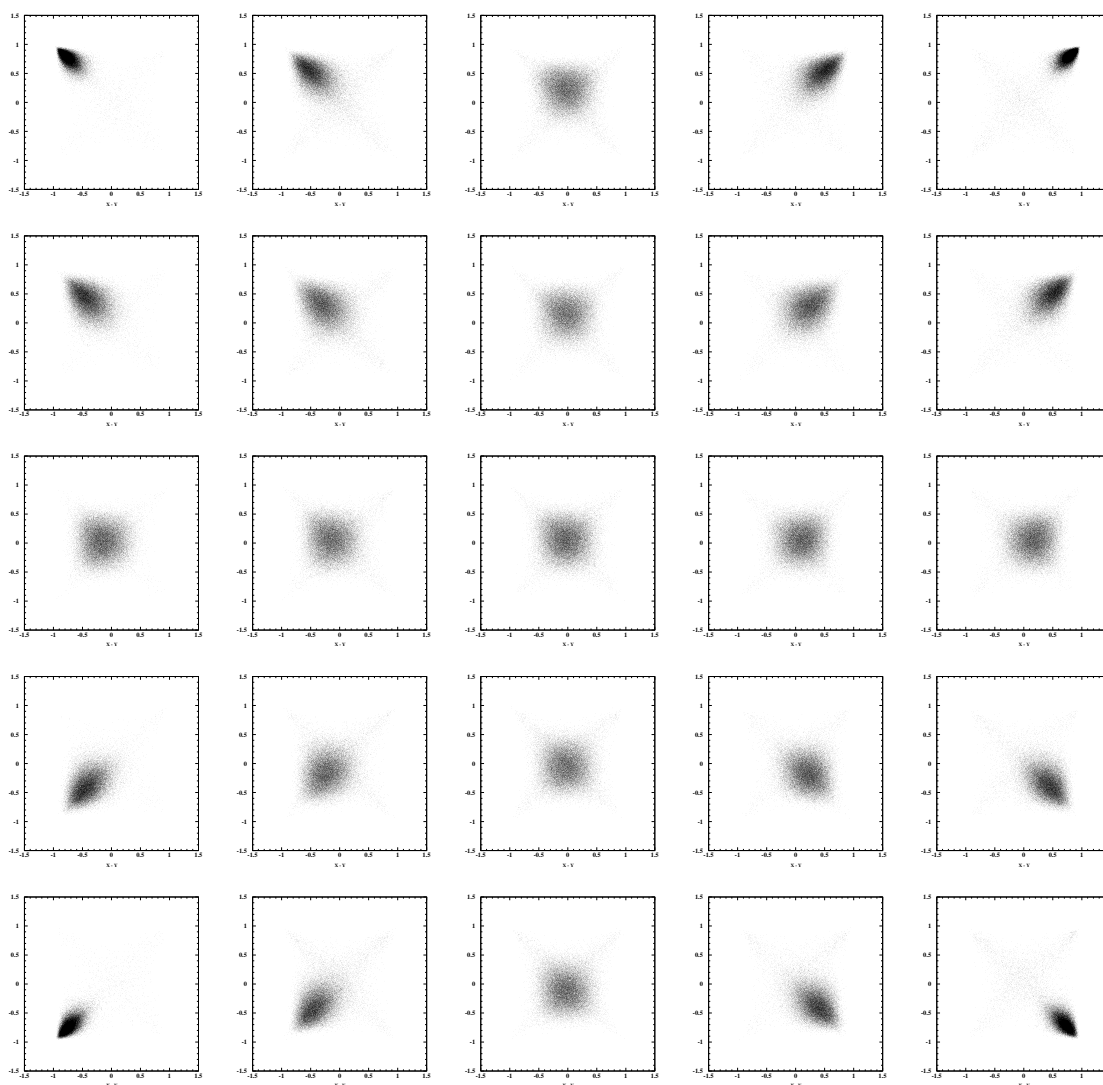


図 4.7: 式 (3.1)、(3.2) を用いた場合のイメージ再構成図。図中の x, y 軸は ± 1 が $\pm 2.5\text{cm}$ に対応している。

4.4 ビーム光源による偏光イメージの取得

4.4.1 偏光検出の原理

コンプトン散乱は入射光子が原子中の外殻電子と作用し、エネルギーの一部を電子に与えはじき出すとともに、自らもエネルギーを失いつつ散乱される現象である。無偏光 X 線・ γ 線光子が入射した場合、その微分散乱断面積は Klien-Nishina の式によって (4.1) の

点 (x, y)	再構成の結果得られた 最確値 (x, y)	射影軸上の半値幅 (cm) (x, y)
-2, 2	-1.93 , 1.96	0.59, 0.53
-1, 2	-1.20 , 1.32	1.23, 1.13
0, 2	-0.065, 0.67	1.53, 1.50
1, 2	1.14 , 1.33	1.23, 1.03
2, 2	2.09 , 2.04	0.51, 0.49
-2, 1	-1.12 , 1.13	1.25, 1.23
-1, 1	-0.76 , 0.81	1.45, 1.40
0, 1	-0.066, 0.50	1.50, 1.53
1, 1	0.59 , 0.75	1.48, 1.34
2, 1	1.24 , 1.26	1.16, 1.10
-2, 0	-0.48 , 0.079	1.50, 1.41
-1, 0	-0.43 , 0.16	1.55, 1.60
0, 0	-0.078, 0.14	1.50, 1.48
1, 0	0.31 , 0.14	1.52, 1.43
2, 0	0.45 , 0.13	1.47, 1.44
-2,-1	-1.23 , -1.06	1.19, 1.28
-1,-1	-0.67 , -0.41	1.45, 1.50
0,-1	-0.066, -0.11	1.50, 1.50
1,-1	0.60 , -0.45	1.40, 1.46
2,-1	1.06 , -0.95	1.22, 1.30
-2,-2	-1.89 , -1.90	0.60, 0.63
-1,-2	-1.09 , -1.06	1.23, 1.27
0,-2	-0.073, -0.29	1.49, 1.55
1,-2	0.99 , -1.00	1.27, 1.29
2,-2	1.86 , -1.79	0.67, 0.72

表 4.2: 各プロット点での位置分解能

ように表され、入射光子エネルギー E の値によって最も散乱されやすい角度 θ が決まる。これに対し、偏光している X 線・ γ 線光子が入射した場合、その微分散乱断面積は式 4.2 に表すような、方位角 η にも依存した形で表される。この式から、偏光光子が最も散乱されやすいのは $d\sigma/d\Omega$ が最大となる $\eta = 90^\circ$ となるときである事が分かるので、撮像検出器の前面に散乱体を置きイメージングを行い、その方位角分布を調べれば偏光を観測することができる。

$$\frac{d\sigma_{KN,non-polarized}}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_e^2\varepsilon^2(\varepsilon + \varepsilon^{-1} - \sin^2\theta) \quad (4.1)$$

$$\frac{d\sigma_{KN,polarized}}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_e^2\varepsilon^2(\varepsilon + \varepsilon^{-1} - 2\sin^2\theta\cos^2\eta) \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + (E/m_e c^2)(1 - \cos\theta)}$$

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

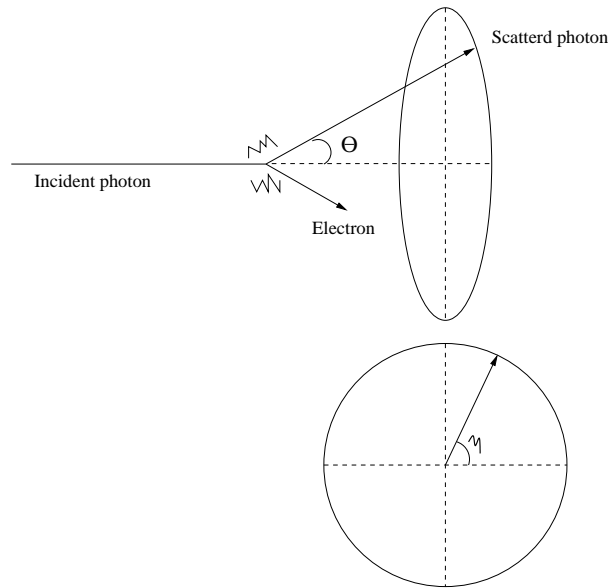


図 4.8: コンプトン散乱

4.4.2 偏光実験のセットアップ

前実験で用いた検出器の前面に 5mm 角、長さ 2cm のプラスチックシンチレータを取り付け、散乱体として用いた。プラスチックシンチレータは原子番号が小さく、コンプトン散乱しやすいため、散乱体として用いるのに適している。

前実験から分かるように、今回製作した検出器では縦、または横方向よりも対角線方向の位置分解能が優れている。しかし、ビーム自体は垂直に偏光しているので、検出器を前の実験時よりもビームライン方向から見て反時計方向に45°傾け、ビームの偏光方向と検出器の対角線を平行にして偏光の検出がしやすくなるようにセットし直した。



図 4.9: 偏光測定時の配置

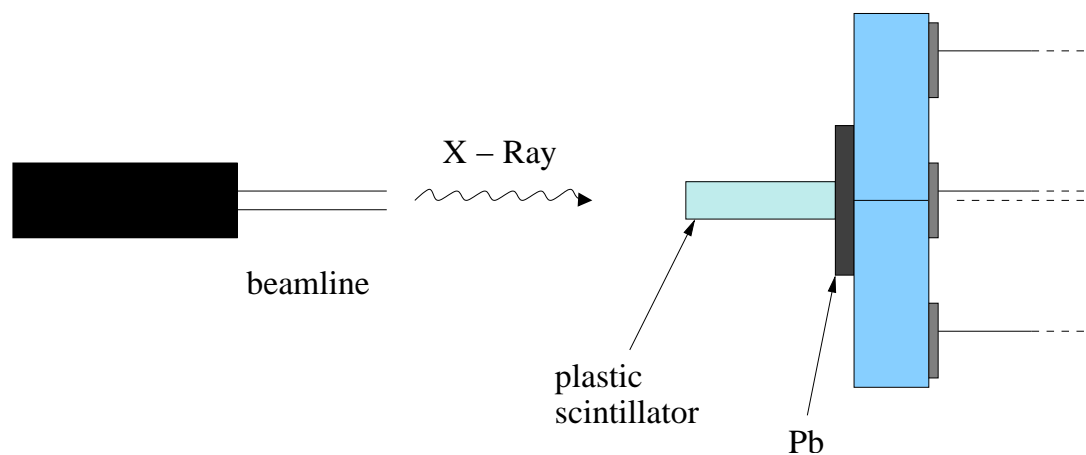


図 4.10: 偏光測定の概図

図 (4.9)(4.10) が実際の配置である。検出器には蓋がしてあり、中央部分に空いた穴からプラスチックシンチレータを出している。プラスチックシンチレータの後ろには、透過

した X 線と、小さい散乱角 θ で散乱した X 線を遮蔽するために、2cm 角、2mm 厚の鉛板を入れてある。

4.4.3 偏光の観測

前の実験と同じビームラインで 20 分間 X 線をプラスチックシンチレータに照射してコンプトン散乱を起こさせた。図 4.11 はその結果取得したデータと、それにスムージングを掛けて見やすくしたものを、散乱させないでデータを取得した場合の図と比較したものである。散乱していないものに比べて、コンプトン散乱させてイメージを取得したものは、第 1、3 象限に比べて第 2、4 象限の方向にイメージが伸びていることが分かる。これを定量的に扱うために、データのカウンタ数を各象限毎と、十字形に伸びた部分の 2 つの場合に比較した。それを表 4.3 に示す。比較のため、プラスチックシンチレータを取り除いた場合（散乱なし）も、共に示してある。

象限	カウンタ数	全体に占める割合 [%]	十字部分のカウンタ数	十字部分に占める割合 [%]
45° 傾けて散乱させた時				
1	10832	23.0	4536	21.6
2	12650	26.9	6060	28.9
3	10885	23.1	4273	20.4
4	12845	27.3	6093	29.1
散乱させなかった時				
1	1448	25.3	602	26.9
2	1396	24.4	543	24.3
3	1523	26.6	580	25.9
4	1382	24.2	514	23.0

表 4.3: 各象限のカウンタ数 (1)

表 4.3 より、偏光によって散乱されやすい象限は、されにくい象限と比べて 4%ほど多くカウンタしている。また、十字形に伸びた部分では、およそ 8~9%ほど、多いカウンタになっている。これはどちらもコンプトン散乱をさせなかった場合に比べて明らかに大きな値である。

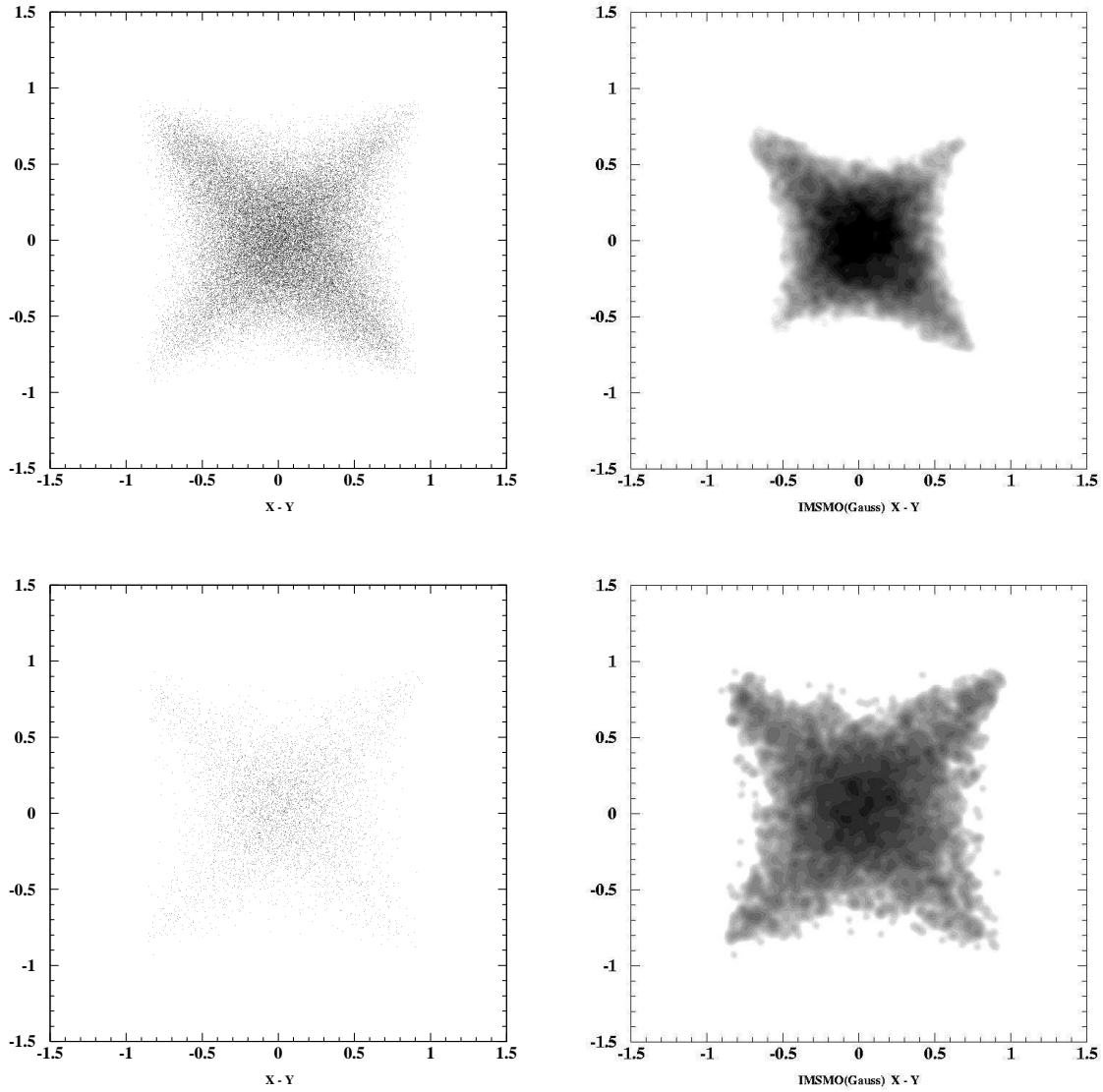


図 4.11: 偏光イメージの方位角依存性 (1) 散乱させた場合 (上) と散乱させていない場合 (下)

同様のことをもとの位置から 135° 傾けた場合についても行なった。図 4.12 は取得したデータと、それにスムージングを掛けて見やすくしたもの、そして表 4.4 が象限毎のカウント数の比較である。

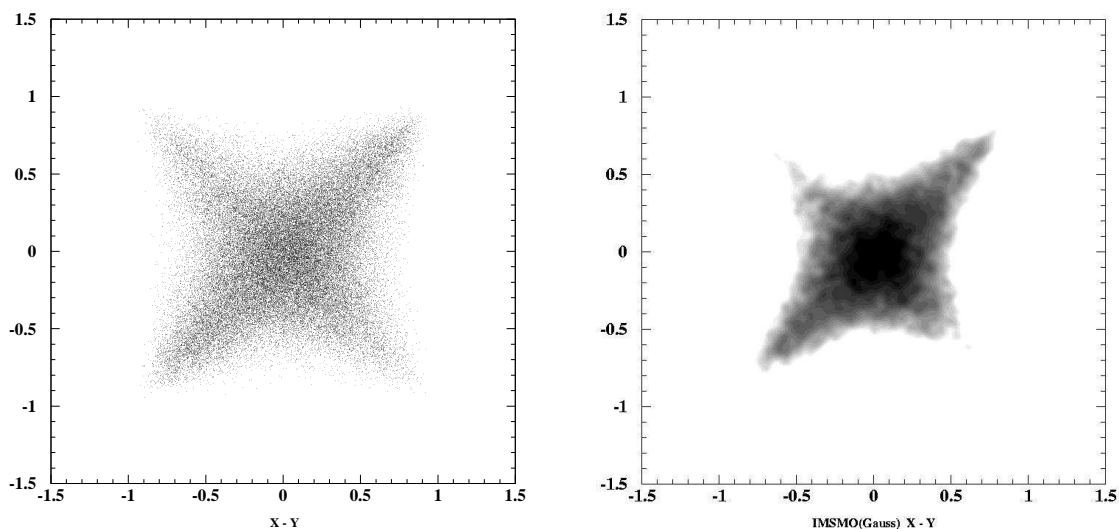


図 4.12: 偏光イメージの方位角依存性 (2) 135° 傾けた時

象限	カウント数	全体に占める割合 [%]	十字部分のカウント数	十字部分に占める割合 [%]
1	16524	28.3	8397	30.6
2	12485	21.3	5275	19.2
3	16668	28.6	8522	31.0
4	13025	22.3	5266	19.2

表 4.4: 各象限のカウント数 (2) 135° 回転させて散乱させた場合

こちらは象限によって 6~7% 違って現われ、十字形の部分では 10% 以上の差がでてい。45° 回転の時と比べて各象限での差が大きい、これは実験の間にカウントレートが上昇し、統計が良くなったためと、散乱させなかった場合を見ると分かるように APD の集光力の性能差を較正しきれなかった結果だと思われる。

第5章 32素子アレー型 APD とその読みだし系の特性評価

5.1 浜松ホトニクス社製 32素子アレー型 APD S8550

浜松ホトニクス社製 32素子アレー型 APD S8550 (図 5.1) は reverse APD であり、外形寸法は 11.2×19.5 mm、そこに受光面面積 1.6×1.6 mm の素子が縦 4 個、横に 8 個、2.3 mm ピッチで 32 個並んでいる。外容器、受光面塗装などや、量子効率、増幅率-電圧の関係などは S8664-55 と同じであるが、この APD は 16 素子ごとに共通の電圧を供給するので、読みだしを行なう際には負極側からのホールを読みだすことになる。



図 5.1: 浜松ホトニクス社製 32素子アレー型 APD S8550

図 5.2 に各素子のダークカレント (I_D)、端子間容量 (C_t)、各 APD の増幅率の相対値を示す。各 APD は左下から a1, ...a4, b1, ...h4 という順に 32 個が並んでいて、HV1 は 1, 2 に、HV2 は 3, 4 に接続されている。

今回の実験では、この APD を用いてイメージングを行なう準備段階として、各 APD に直接 X 線を入射し、その一様性を比較した。用いた線源は ^{55}Fe で、5.9 keV の K_α 線と 6.5 keV の K_β 線を放出する。

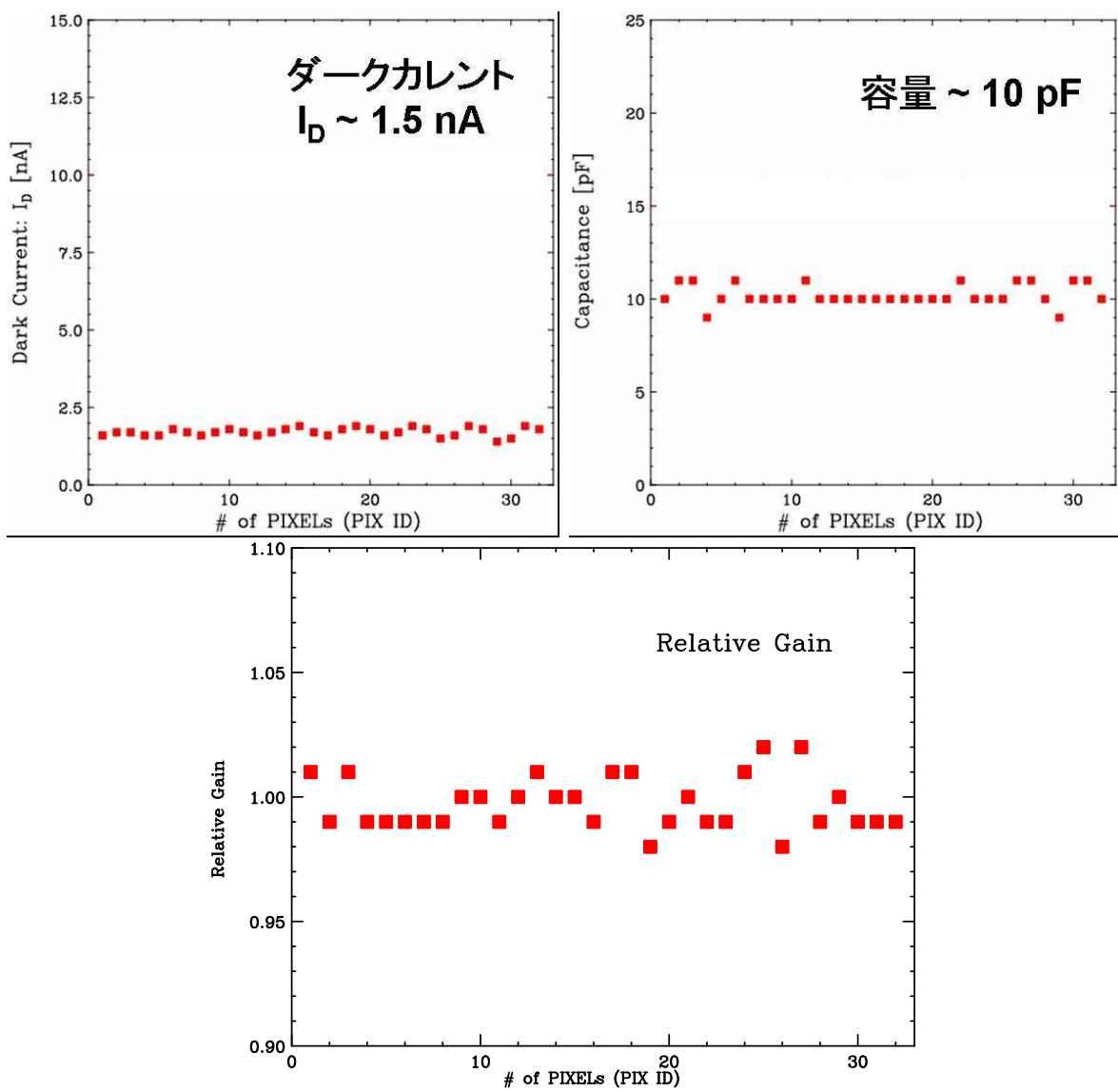


図 5.2: S8550 の各 APD のダークカレントと端子間容量、増幅率の相対値

5.2 読みだし回路系

図 5.3 が用いた Clear-Pulse 社製 32chAPD 用プリアンプ 5027 型である。これは 32 個のプリアンプが 32 個の APD それぞれと接続していて、個別に読みだしができるようになっている。図 5.4 はプリアンプの各チャンネルのノイズである。入射電荷パルスは 60keV 相当で、これは分解能の悪化させる成分のうち、回路によるものを表している。図 5.5 にデータ取得回路系の模式図を示した。この APD は負極側から信号を読み出すため、アンダーカメラ実験時の回路とは多少異なっている。なお印加電圧は V_r の値を採用し、共通に用いた整形アンプの整形時間は $2\mu\text{s}$ とした。

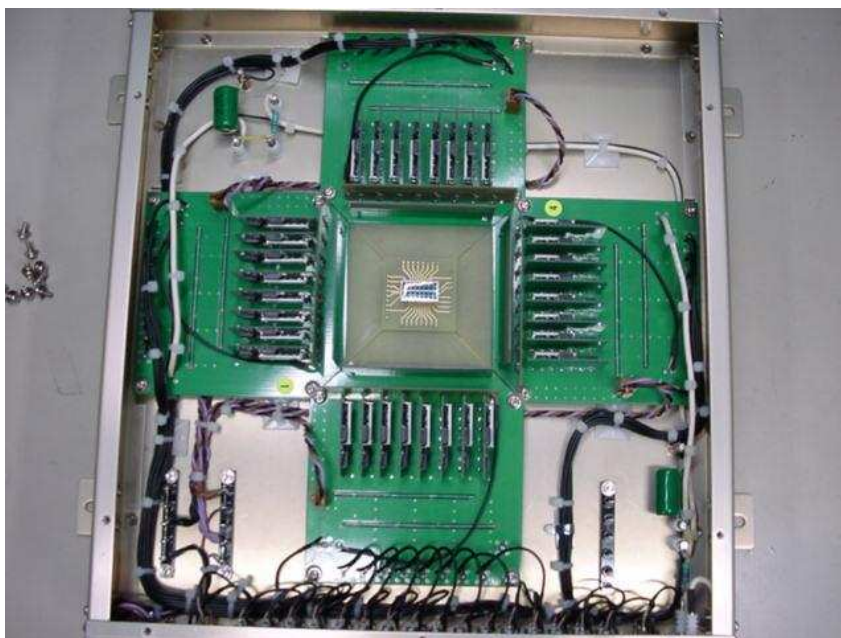


図 5.3: 32ch プリアンプ 5027 型

5.3 スペクトルの取得

各 APD に対して、温度を 20°C 一定に保ちながら X 線をイベント数が 10 万個になるまで取得した。図 (5.6)(5.7) が各 APD で取得した ^{55}Fe のスペクトルである。。各ヒストグラムの中央付近にあるものが 5.9keV の K_α 線、その右側はテストパルスのピークである。テストパルスの分解能は回路によってのみ決まり、X 線の分解能と比較することで APD が原因である分解能の悪化を知ることができる。

ヒストグラムを見ると、X 線のピークの位置はかなり良い精度で一致している事が分か

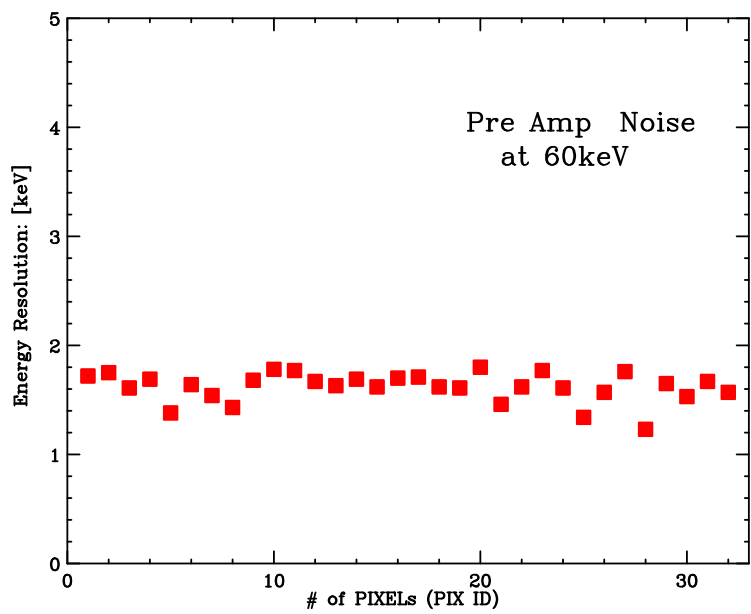


図 5.4: プリアンプの各チャンネルのノイズ

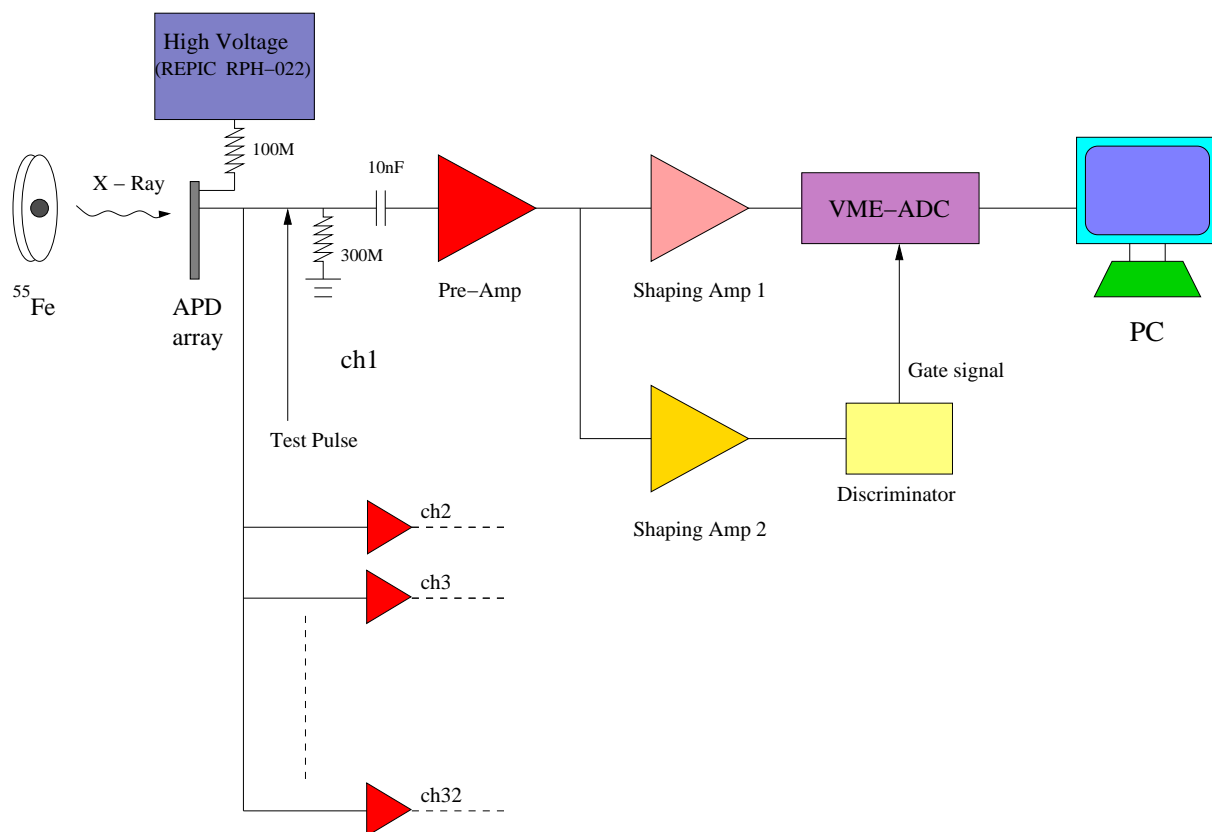


図 5.5: 32 素子 APD 読みだし回路系

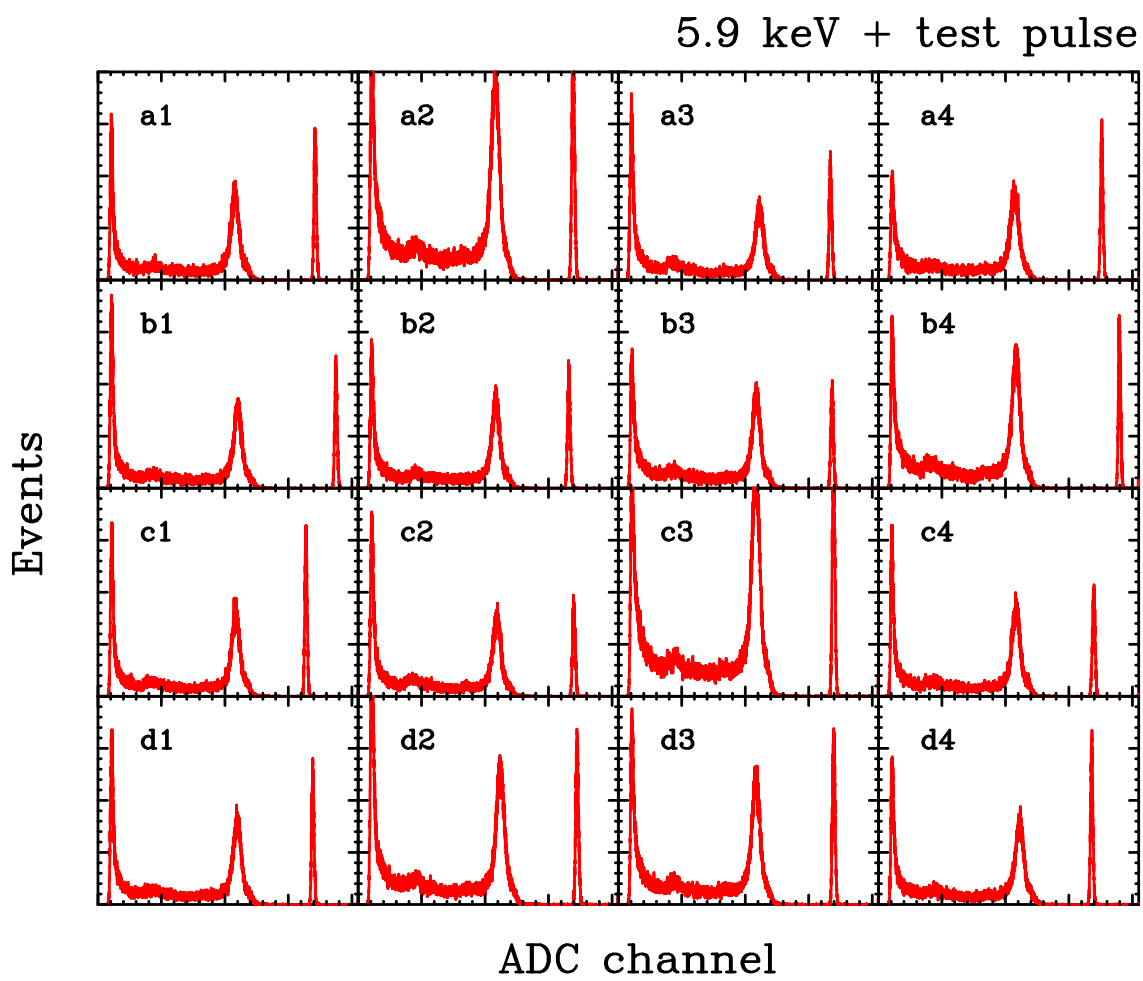


図 5.6: 32 素子 APD で取得した ^{55}Fe のスペクトル (1)

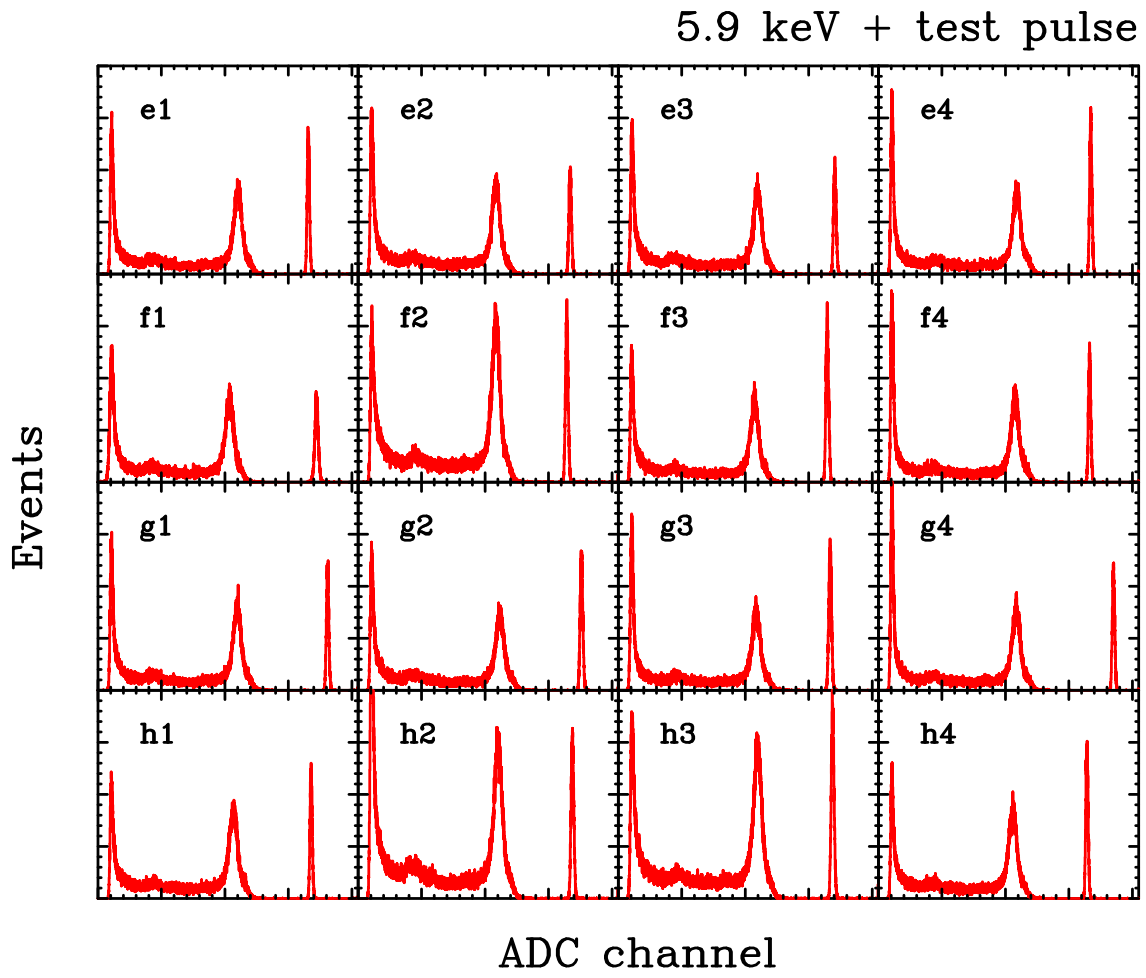


図 5.7: 32 素子 APD で取得した ^{55}Fe のスペクトル (2)

る。これはどの APD でも増幅率がほぼ一定であることを示している。

5.4 今後の展望

今回は時間の都合上行えなかったが、今後この 32 素子 APD を用いての撮像を試みるつもりである。APD の数が増えることによって加重平均による位置算出がより正確になると思われる。ただし、APD の受光面が小さいため、効率良く光を集めるためにライトガイドなどを利用する必要がある。今年 5 月に予定されている KEK での実験で行うつもりである。

また、多くの APD からの信号を効率良く読みだすために、VA/TA チップを用いた読みだし系 (図 5.8) を考えている。VA/TA はプリアンプ、整形アンプをひとつの半導体チップに集積したもので、小型、低消費電力と、衛星搭載用の読みだしシステムとして有望なものである。今後、この VA/TA と、VA/TA の電圧制御等と PC の制御をする VA-DAQ を用いた読みだしにも取り組むつもりである。



図 5.8: VA/TA 読みだし用治具

第6章 実験結果の議論

6.1 APD 4素子を用いた撮像用検出器について

6.1.1 ビーム光源によるイメージの位置分解能

ビームの照射によって得られたイメージは、検出器の四隅では5mmから7mmの半値幅を示し、位置もほぼ同じ値を返したが、少しでもずれるとかなり中心によった形になってしまい、分解能も1.5cm程度と、格段に悪くなる。この原因について考察する。

CsIにはシリコン製の反射材が巻かれており、これによって集光能力を上げているが、このことが大きく分解能を悪化させる要因となっている。CsI内部に発生したシンチレーション光子は、発生場所からあらゆる方向に向かって広がっていくが、その方向にAPDが存在しなかった場合、結晶の端面で鏡面反射を起こし、また内側へ戻ってしまう。結晶の表面積におけるAPDの占める割合は、 $5 \times 5 \times 4 \text{mm}^2 / 50 \times 50 \times 2 + 50 \times 10 \times 4 \text{mm}^2 \approx 0.0143 \dots$ となり、およそ1.5%程度にしかない。よって相対的にAPDを見込む立体角が大きくなる四隅以外では、発生したほとんどのシンチレーション光子が端面で反射を起こしていることになる。反射した光子は徐々に発生位置の情報を失っていくので、四隅以外での分解能が悪化している。

因みにCsIの70keV X線に対する質量吸収係数は $(\mu/\rho) = 4.93 \text{cm}^2/\text{g}$ であり、密度は $4.51 \text{g}/\text{cm}^3$ である。これより線吸収係数 μ は $\mu = 22.2343 [\text{cm}^{-1}]$ と求められる。強度が I_0 のX線がある線吸収係数 μ を持った物質を透過した場合、深さ $x \text{cm}$ での強度 I は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (6.1)$$

と表されるので、これをCsIに適用すると、深さ1mmで約9割のX線が吸収されてしまうことになる。よってシンチレーション光のほとんどはCsIシンチレータの表面近くで発生することになる。もし入射X線のエネルギーがもっと高い場合、例えば662keVの ^{137}Cs γ 線の場合は、もっと深い場所でシンチレーション光が発生するので、APDに近いところではさらに集光され、離れていた場合はさらに分解能が悪くなると思われる。これを防ぐためには(1)反射材をはずして境界面での反射をなくす(2)APDの数を増やして反

射成分を減らす、の2つが考えられる。(1)の場合、位置分解能は改善されるが、スペクトル取得時にエネルギー分解能を悪化させてしまい、(2)の場合は読みだし数が増えるという事が起こるのでどこかで妥協しなければならない。

6.1.2 偏光イメージ

今回の実験で用いた70keVのX線がコンプトン散乱したとき、実際にどれだけの方位角依存性があるのかを計算すると、式4.2より、 $\eta = 90^\circ$ のときの微分散乱断面積は

$$\frac{d\sigma(\eta = 90)}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_e^2\varepsilon^2(\varepsilon + \varepsilon^{-1})$$

$\eta = 0^\circ$ のとき微分散乱断面積は

$$\frac{d\sigma(\eta = 0)}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_e^2\varepsilon^2(\varepsilon + \varepsilon^{-1} - 2\sin^2\theta)$$

と表すことができる。ここで偏光の測定しやすさを表すモジュレーション係数Qというもの

$$Q = \frac{N_{\perp} - N_{\parallel}}{N_{\perp} + N_{\parallel}} \quad (6.2)$$

のように定義する。式6.2を用いると理論的なコンプトン散乱のモジュレーション係数Qは、

$$Q = \frac{d\sigma(\eta = 90) - d\sigma(\eta = 0)}{d\sigma(\eta = 90) + d\sigma(\eta = 0)} \quad (6.3)$$

$$= \frac{\sin^2\theta}{\varepsilon^{-1} + \varepsilon - \sin^2\theta} \quad (6.4)$$

となる。実験器具の配置から、 $\theta=35\sim 85^\circ$ の散乱角を持ったもののみが検出されるので、仮に $\theta=60^\circ$ で散乱されたときのモジュレーション係数Qを求めると、 $Q \cong 0.6$ となる。これは実験で得た 45° 回転の $Q=0.16$ 、 135° 回転の $Q=0.23$ よりもかなり大きい。これについてもビームのイメージングで行なった議論と同様に、APDから離れて入射した散乱X線光子の生成したシンチレーション光が反射によってモジュレーションの悪化を引き起こしていると考えられる。。

6.2 32素子 APD について

6.2.1 取得したスペクトルの構造

取得したスペクトルを見ると、X線のピークより低エネルギー側に、帯状にイベントが分散している。スペクトルの連続成分といえばコンプトン散乱成分がまず思いつくが、今回は6keVという低エネルギーなのでこれは当てはまらない。これはX線がreverse APDの増幅領域である空乏層を透過してしまい、完全に増幅されない信号として現われているためである。5.9keVのX線はreverse APDの増幅領域がある数 μm では2割程しか吸収されず、その他は増幅領域を突き抜けてしまい、接地側に読みだし口があるこのAPDでは信号は増幅されずにノイズに埋もれてしまう。増幅領域のなかで停止したものも、停止位置が空乏層の奥側であったら、増幅量が少ないまま信号として読みだされ、ピークの下側にのびる帯の一部になってしまう。なお、帯の中にあるピークはその成因はよく分からないが、おそらく内部の接合構造などを反映した結果であると思われる。

第7章 結論と今後の課題

本研究では浜松ホトニクス社製 Si APD S8664-55 と、CsI(Tl) 結晶を用いて、APD 4 素子アンガーカメラを製作した。そしてその製作した検出器を用いて、つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光研究施設 (PF) において 70keV の X 線ビーム照射実験を行い、照射ポイントのイメージを再構成した。その結果、APD の配置されている検出器の四隅では半値幅でおよそ 5~7mm の位置分解能を達成した。また、APD の存在しない中央部分でも 1.5cm 程度の位置分解能を示しており、これは APD が約 4cm 間隔で配置されていることを考えると、約 1/3 の位置分解能を得られたと言える。

また、同じ検出器の前面にプラスチックシンチレータを取り付け、X 線ビームをコンプトン散乱させることにより、散乱方向の異方性から偏光を観測した。その結果、偏光に垂直な方向と平行な方向とで、カウント数に違いがでた。そこでモジュレーション係数 Q を式 (6.2) のように定義し、実験結果から Q を求めると、 45° 回転のとき $Q=0.16$ 、 135° 回転のとき $Q=0.23$ と求まった。

いずれの実験でも中心に APD がないことと、反射成分の影響から位置分解能が下がってしまっている。この問題を改善するために、今後さらにもう一つ APD を中心に配置した 5 素子アンガーカメラを製作し、今年 5 月に予定されている KEK 実験において同様の観測を行う予定である。

また、32 素子アレー型 APD について、各 APD に対して ^{55}Fe の 5.9keV X 線を照射し、そのスペクトルを取得した。時間の都合上スペクトル解析は行えなかったが、どのスペクトルもほぼ同じチャンネルに X 線のピークが現われている。これはどの APD も増幅率がほとんど一定であることを表している。

今後は第 5.4 節 (36 ページ) にも述べたように、この APD を用いて撮像実験を行う予定である。そのために、今回取得したスペクトルデータから APD の増幅率を調べ、調整する必要がある。また、VA/TA チップ、VA-DAQ を用いた読みだしにも取り組んでいく予定である。

関連図書

- [1] R. Lecomte, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserch, A, 423,(1999), 92-102
- [2] K.Deiters, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics reserch, A, 442,(2000), 193-197
- [3] T.Ikagawa, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics reserch, A, 515,(2003), 671-679
- [4] 五十川 知子 東京工業大学卒業論文 (2003)
- [5] 谷津 陽一 東京工業大学卒業論文 (2003)
- [6] P. P. Webb, et al. RCA Review, vol.35, (1974)
- [7] F.Lei, et al. Space Science Reviews, 82, (1997), 309-388
- [8] G.F.Knoll, 「放射線計測ハンドブック 第2版」 日刊工業新聞社
- [9] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

謝辞

卒業研究を行うに当たり、たくさんの方々のお世話になりました。指導教官の河合誠之教授、片岡淳助手にまず深く感謝致します。特に片岡淳助手には卒論執筆の手助けや実験の指導など、たいへんお世話になりました。また、M1の五十川さん、芹野さん、谷津さんには、KEK 実験や普段の研究生活でも助けて頂きました。また、クリアパルス（株）の久保さん、宇宙科学研究所の三谷さんにはVA/TA、VA-DAQの使い方を丁寧に教えて頂きました。渡辺靖志教授、石野宏和助手を始め、研究室の皆さんにも大変お世話になりました。この場を借りて御礼を申し上げます。