

2004.09.28 秋季物理学会

高阻止能シンチレータと位置検出型光電子増倍管 を用いたガンマ線イメージャーの開発

木原 邦夫、青井 敏弘、平澤 歩、森井 義道、
富永 慎弥、深沢 泰司(広大理)

研究目的

半導体検出器で検出できるのは100keV付近が限界であり、それ以上のエネルギー領域ではシンチレーターを用いる必要がある。

位置検出型光電子増倍管(PMT)と高阻止能シンチレータ(GSO・BGO)を組み合わせた検出器の性能評価を行う。

検出器の**位置決定精度**や**エネルギー分解能**の検証
ノイズレベルの評価

さらに散乱体と組み合わせることにより、コンプトン散乱の運動学を利用したガンマ線イメージャーの開発を行う。

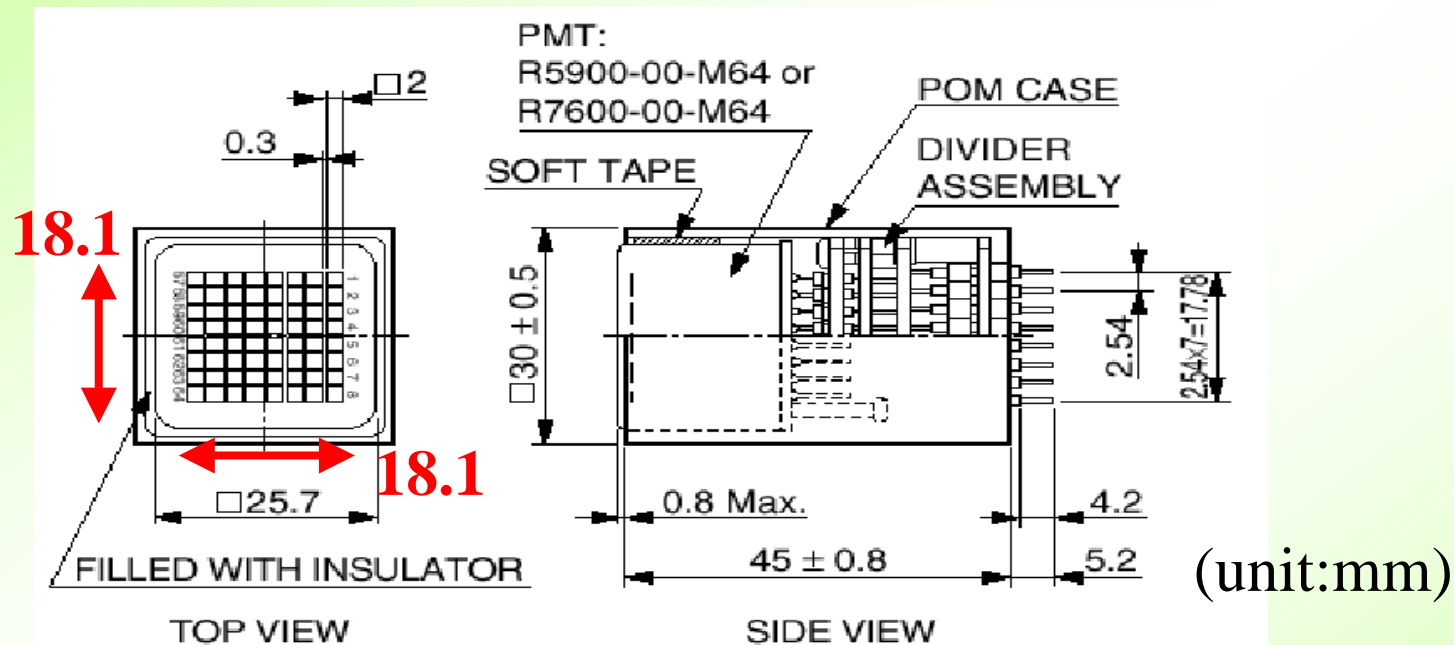
実際に散乱体と組み合わせた撮像能力の検証
散乱体にフォトダイオード(PD)を用いる。

目標: 角度分解能 MeV領域 $\sim 5^\circ$

位置検出型光電子増倍管

H7546: 64chPMT (浜松ホトニクス社製)

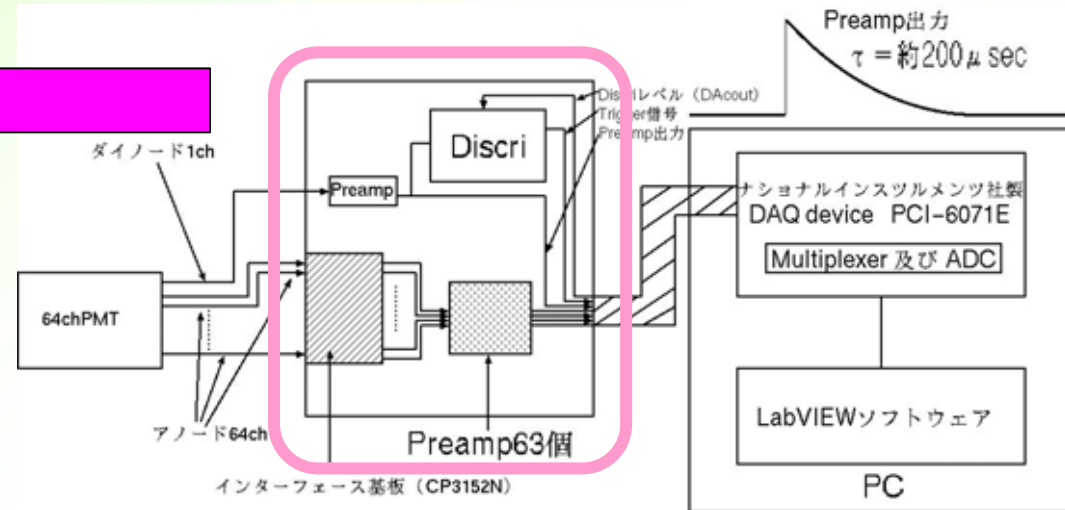
(PMT: Photomultiplier Tube = 光電子増倍管)



- メタルチャンネルダイノード型PMT
- 8 × 8計64個のアノードと1個のダイノードを持ったマルチアノードPMT
- 高速応答

64chPMT+シンチレータ検出器の性能評価

読み出し系のセットアップ シンチレータはGSO(24mm × 24mm × 5mm)を使用。



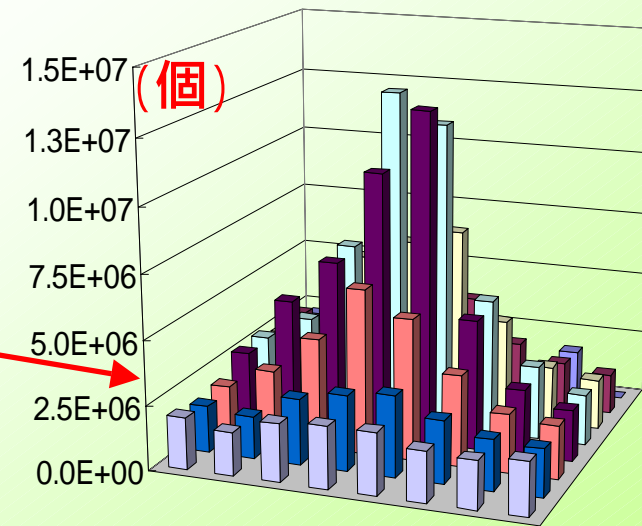
現在、Preamp後の読み出しに使用するLSIを製作中。

64chPMTのノイズレベルの評価

アノード1本に出力されるノイズに関与する電子数の測定 ~ 3.1×10^6 個

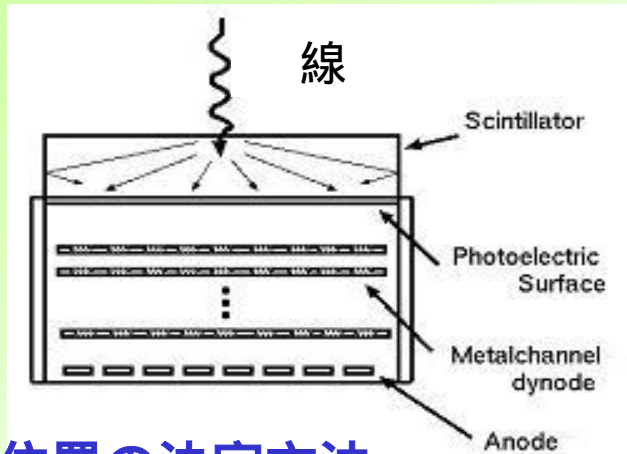


ガンマ線入射位置の信号は、ノイズ埋もれることなく検出できる。



100keVの線に対する各アノード信号の電子数の測定(GSO)

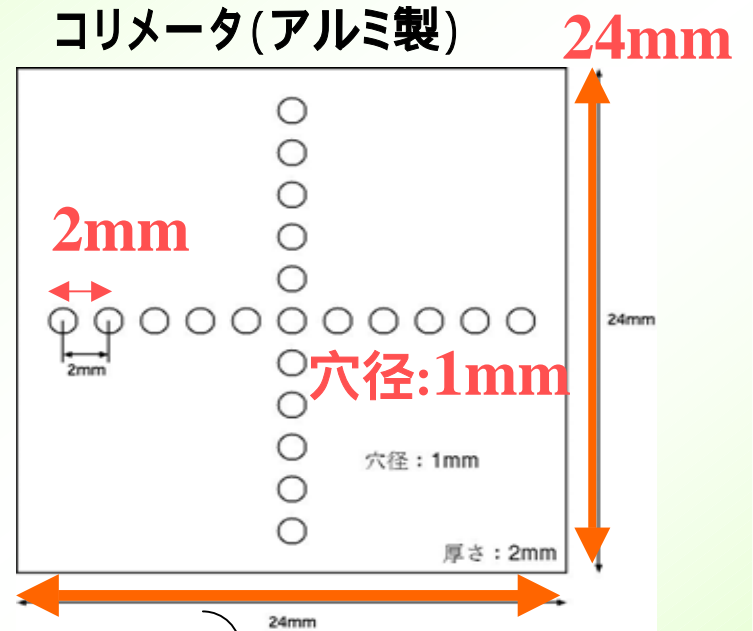
線を用いた位置分解能の測定



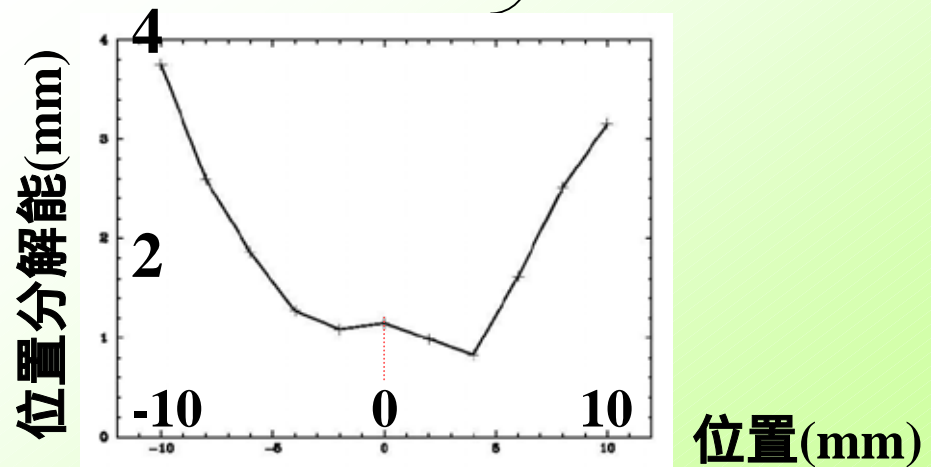
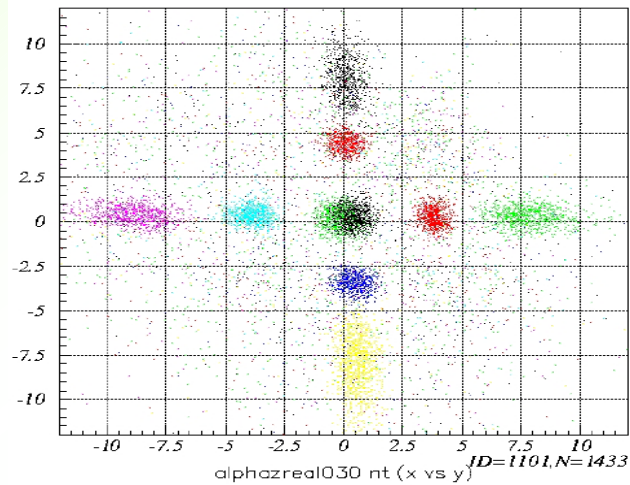
入射位置の決定方法

$$\vec{X} = \frac{\sum_i (P_i / G_i)^2 \cdot \vec{x}_i}{\sum_i (P_i / G_i)^2}$$

P_i : 各アノードのパルスハイト
 G_i : 相対ゲイン比
 x_i : 各アノードの実位置

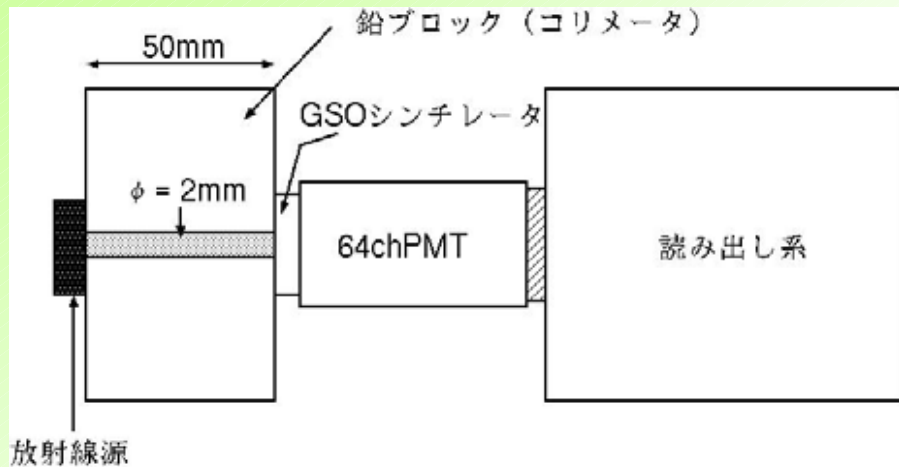


結果



位置分解能 2mm程度

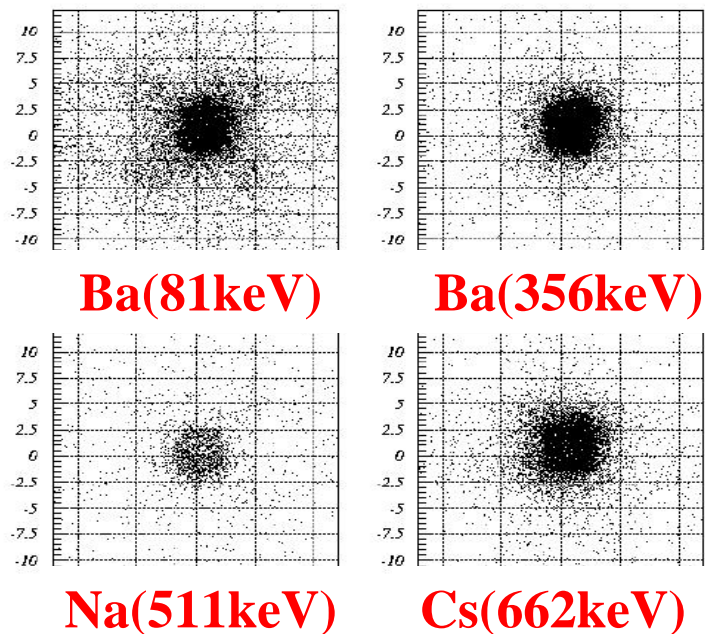
ガンマ線を用いた位置分解能の測定 セットアップ



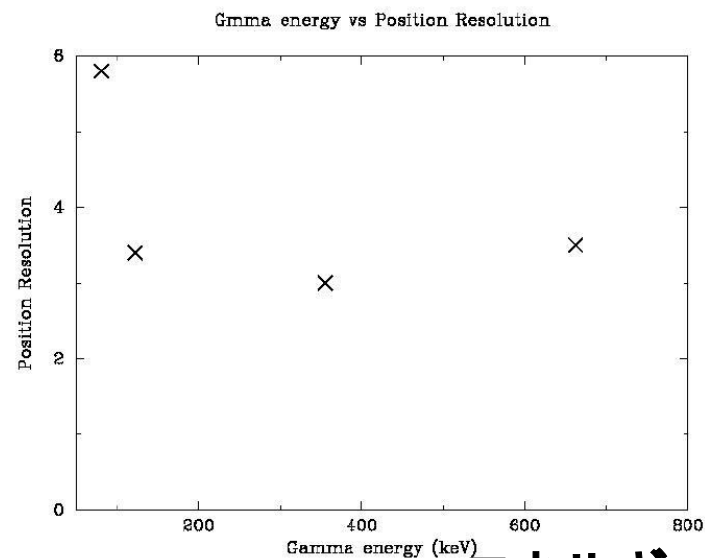
シンチレータ
GSO (24mm × 24mm × 5mm)

放射線源
 ^{133}Ba · ^{22}Na · ^{137}Cs の3種類

結果



位置分解能(mm)

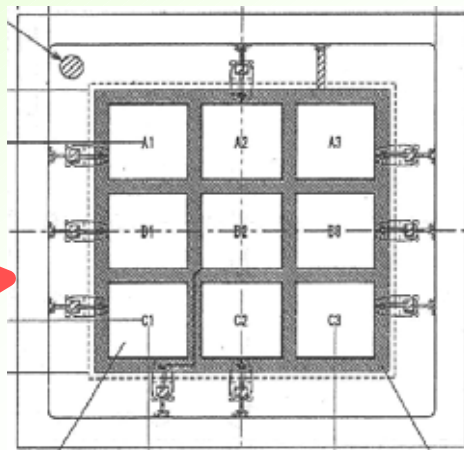
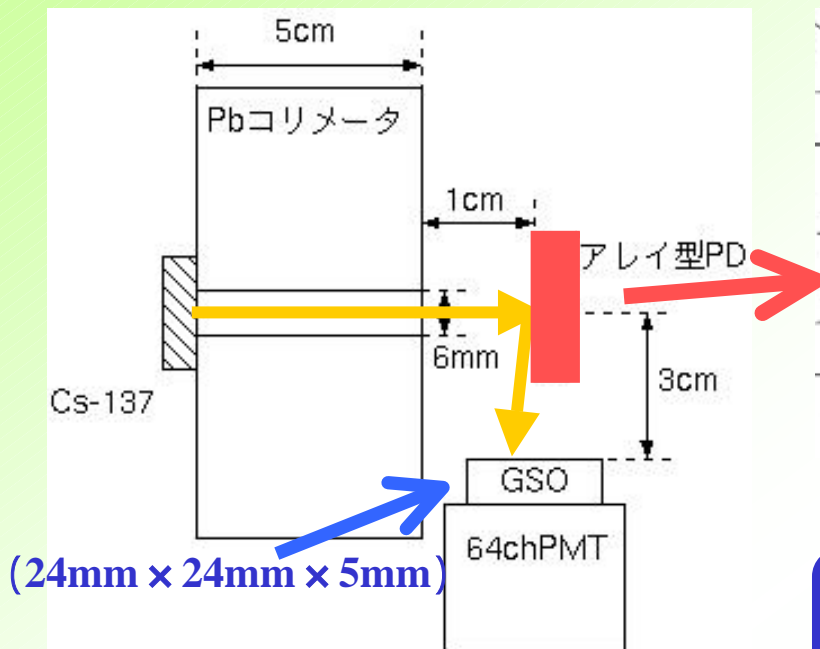


エネルギー(keV)

位置分解能 3mm程度

64chPMT+PDarrayによるガンマ線イメージング

セットアップ(コンプトンカメラ)

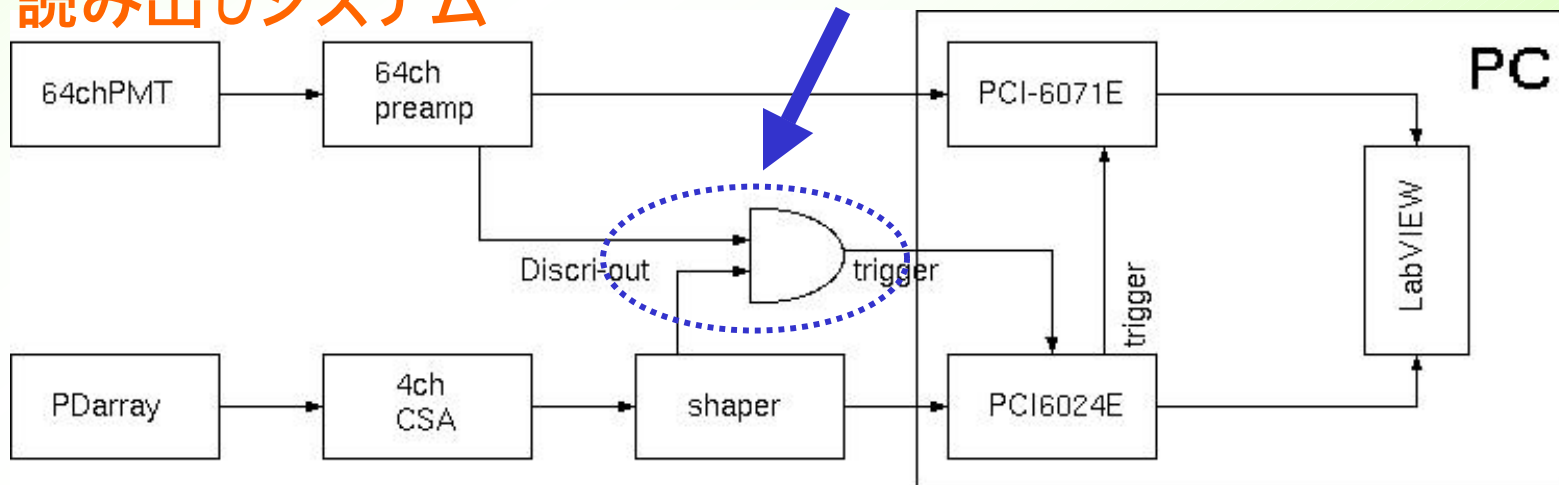


3 × 3 PIN-PD(SPL-PD type B)

散乱体としては、位置、エネルギー分解能が優れたものが良いが、今回は、9chフォトダイオード(PD)で代用。将来的にはシリコンストリップを用いる。

2つの信号のコインシデンスをとる
(トリガー信号の生成)

読み出しシステム



角分解能の見積もり

$$\theta = \theta_{geo} - \theta_{theo} \quad \leftarrow \text{理想的にはゼロ}$$

・ガンマ線イメージャーの位置決定精度

$$\Delta\theta \approx \sqrt{(\delta\theta_{theo})^2 + (\delta\theta_{geo})^2}$$

・位置による散乱角 **geo**のゆらぎ

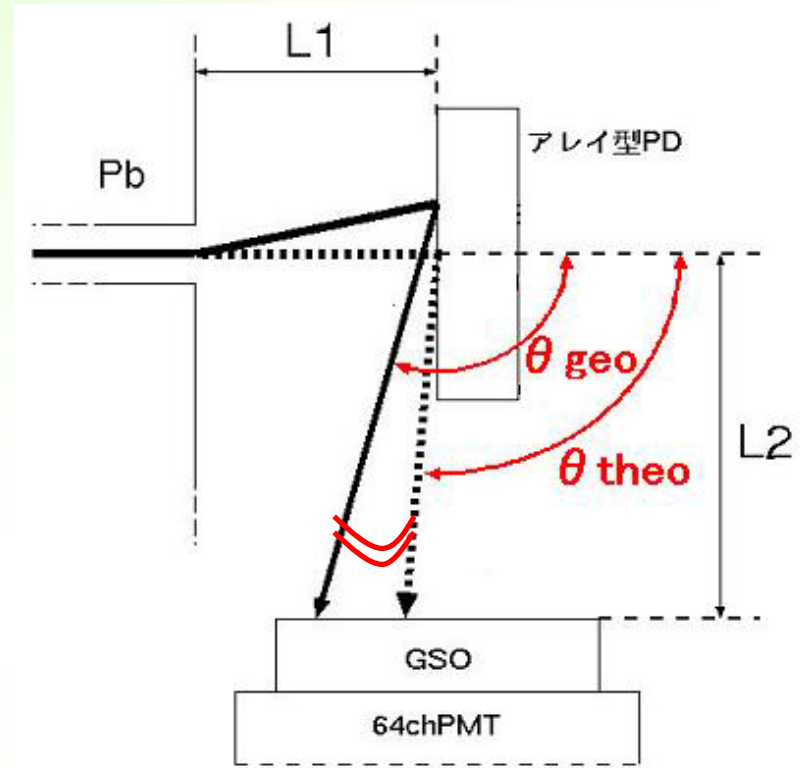
$$\delta\theta_{geo} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta X_{PD}}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X_{PMT}}{L_2}\right)^2}$$

・エネルギーによる散乱角 **theo**のゆらぎ

$$\delta\theta_{theo} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta E_1}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_2}{E_2}\right)^2}$$

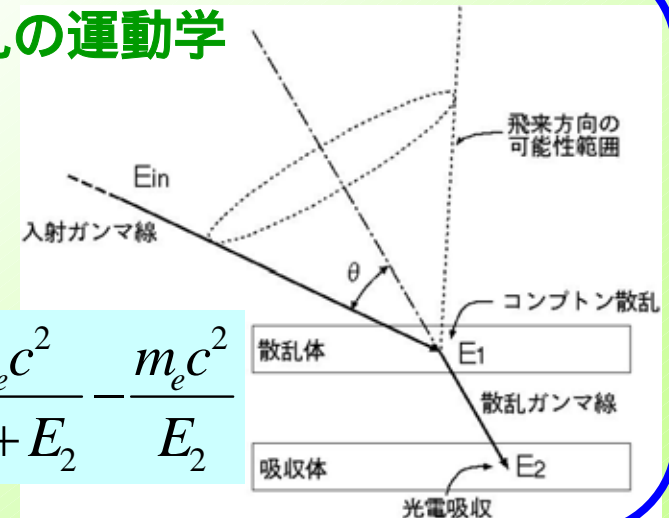
予想結果(@662keV)

	PD	PMT	
	$\frac{\Delta E_1}{E_1}$	$\frac{\Delta E_2}{E_2}$	$\delta\theta_{theo}$
θ_{theo}	0.03	<u>0.31</u>	18 °
	$\frac{\Delta X_{PD}}{L_2}$	$\frac{\Delta X_{PMT}}{L_2}$	$\delta\theta_{geo}$
θ_{geo}	0.17	<u>0.33</u>	21 °
$\Delta\theta$	-	-	<u>27 °</u>



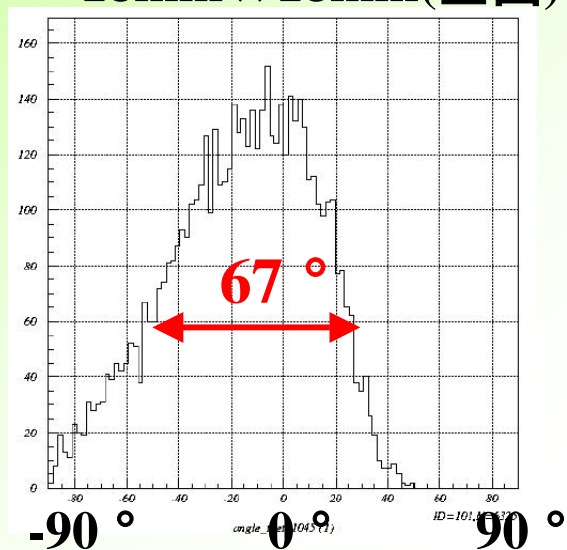
コンプトン散乱の運動学

$$\cos\theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2}$$

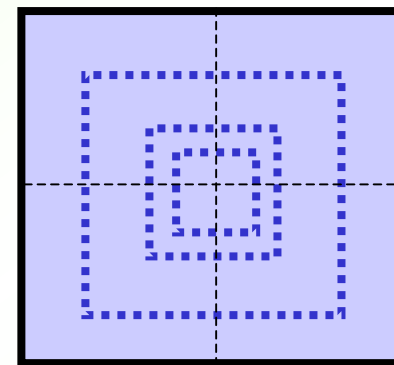


実験結果

18mm × 18mm(全面)

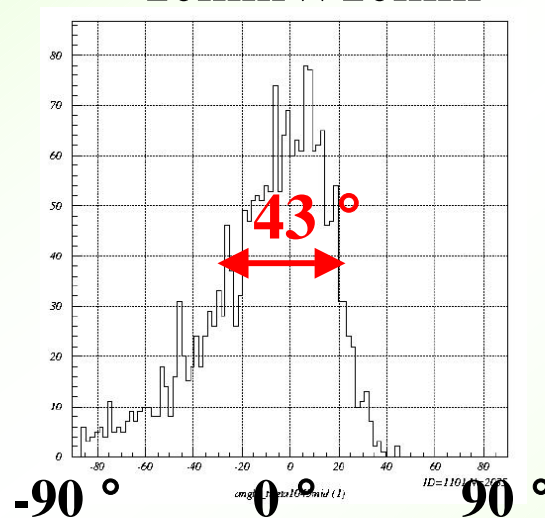


光電面

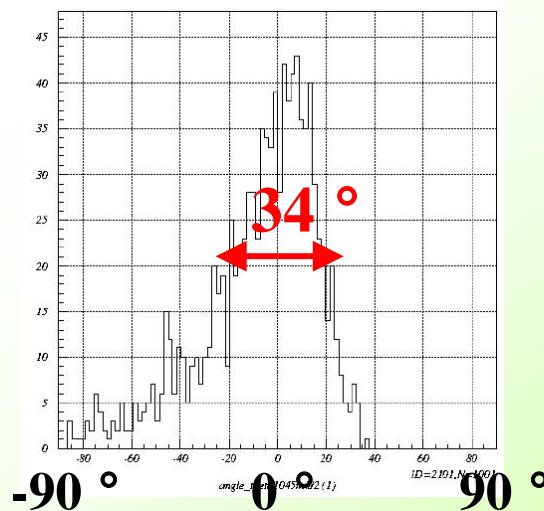


中心の方が位置分解能が良いので、中心に向かって範囲を絞る。

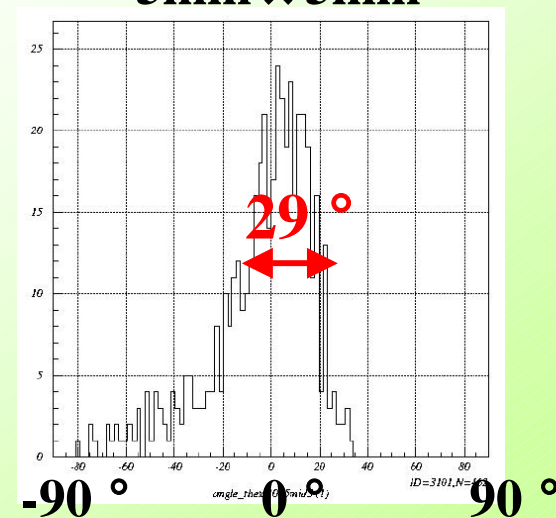
10mm × 10mm



6mm × 6mm



5mm × 5mm

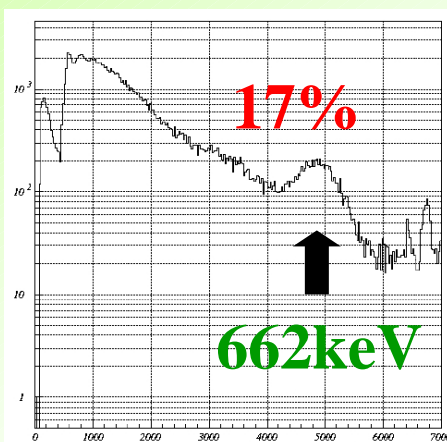


64chPMTのエネルギー分解能の改善

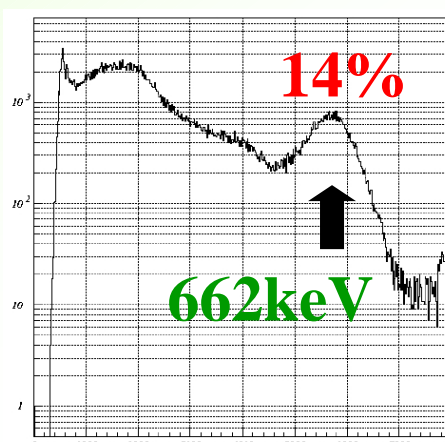
エネルギー分解能を改善することで θ_{theo} が小さくなり
角分解能 が向上する。

シンチレータの大きさを変える。

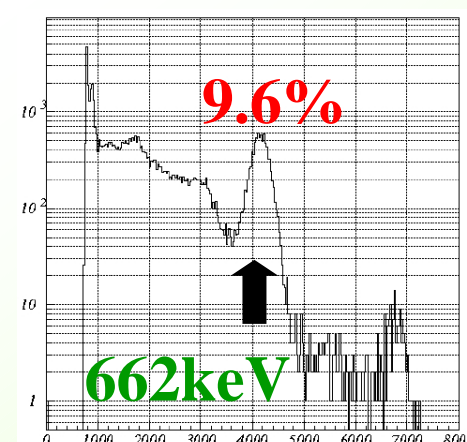
24mm × 24mm × 5mm



18mm × 18mm × 5mm



10mm × 10mm × 10mm



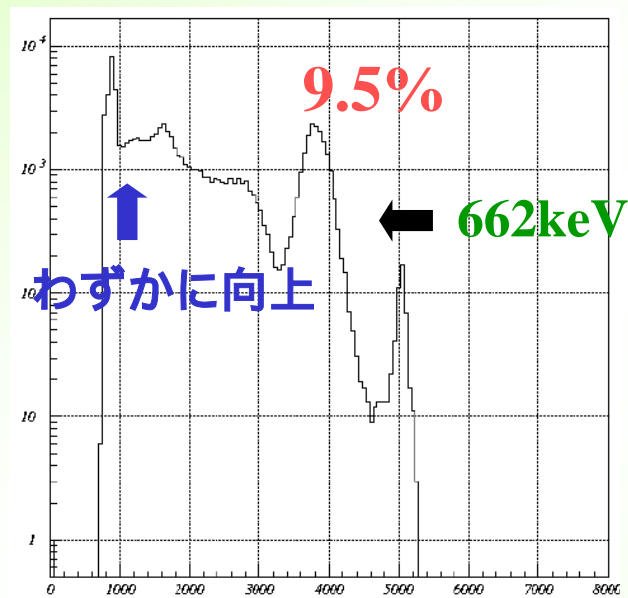
GSO本来のエネルギー分解能は7%程度。
(従来のPMTを用いて測定)

この結果から、エネルギー分解能にはシンチレーター以外の
原因が考えられる。

低温 (- 20) にて測定

温度によって分解能の変化があるか調べる。

シンチレータはGSO(10mm × 10mm × 10mm)を使用



熱ノイズ減少により低エネルギー側でエネルギー分解能が向上
しかし、662keVの分解能には影響しない。

ピークホールド回路を用いて測定

あまり変化は見られなかった。

LED光を照射して測定

局所的な分解能の揺らぎがあるかを調べる。

緑のLED光を2mm × 2mmに絞り
光電面を25分割して照射する。

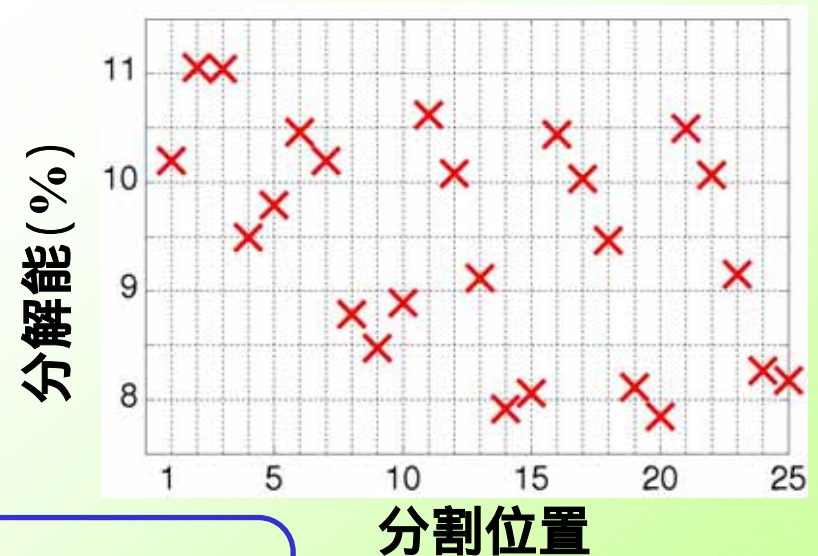
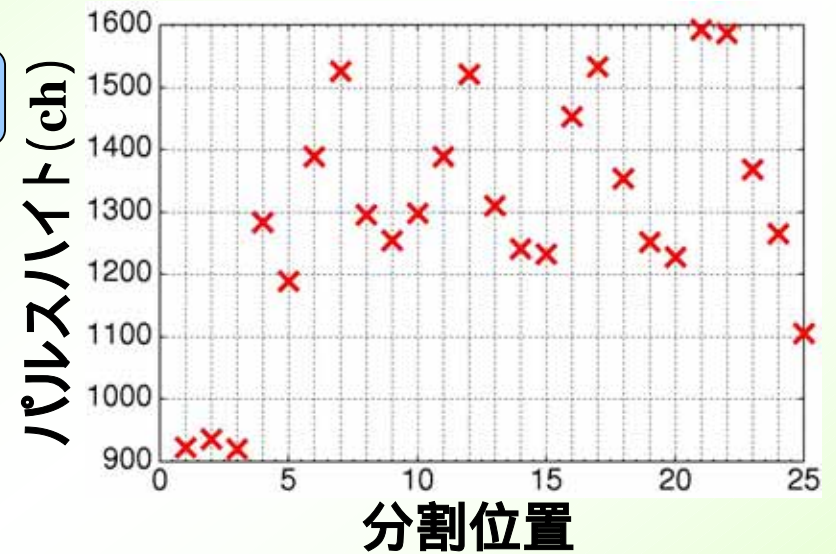
光電面分割の位置の対応

5	10	15	20	25
4	9	14	19	24
3	8	13	18	23
2	7	12	17	22
1	6	11	16	21

パルスハイト、分解能に
位置によるバラつきが見られた。

考えられる原因

- ダイノードの増幅率に揺らぎがある。
- 1つ目のダイノードの電子収集率に揺らぎがある。



まとめと今後の課題

まとめ

- シンチレーション検出器において、
1つのシンチレータを用いた位置分解能は**2mm程度**
- ガンマ線イメージャーの角分解能は**29°程度**
- 64chPMTのエネルギー分解能は**9%程度**

コンプトンカメラの性能としては不十分。

今後の課題

角分解能の目標 MeV領域で5°を目指す。
エネルギー分解能10%(1MeV)・位置分解能1mm(1MeV)

- 64chPMTのエネルギー分解能の向上させる。
- シリコンストリップを散乱体に用いる。

読み出しにLSIを用い検出器のコンパクト化