

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定III (ガンマ線検出器)

東大理, 東大素セ^A, 東大院総合文化^B, 高工研^C, 福井大遠赤セ^D

石田明, 秋元銀河, Mark M. Hashimoto, 田川智博,
末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A, 斎藤晴雄^B,
吉田光宏^C, 小川勇^D, 小林真一郎^D, 出原敏孝^D

日本物理学会 2008年秋季大会 於 山形大学小白川キャンパス

概略

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 2つの実験計画

- (1) 磁場(Zeeman 効果) を用いた間接測定(秋元、Mark)
- (2) 大強度サブテラヘルツジャイロトロンを用いた直接測定
(次の末原が発表)

この2つで用いるガンマ線検出器の開発を行った。

・特に(1)は高磁場中なので色々な開発を行う必要がある。

1. LaBr_3 シンチレータ
2. 磁場中でのファインメッシュ PMT
3. 検出器の全体像
4. ライトガイド
5. 2γ 崩壊を tag する方法
6. Geant4 によるシミュレーション

1. LaBr₃ シンチレータ

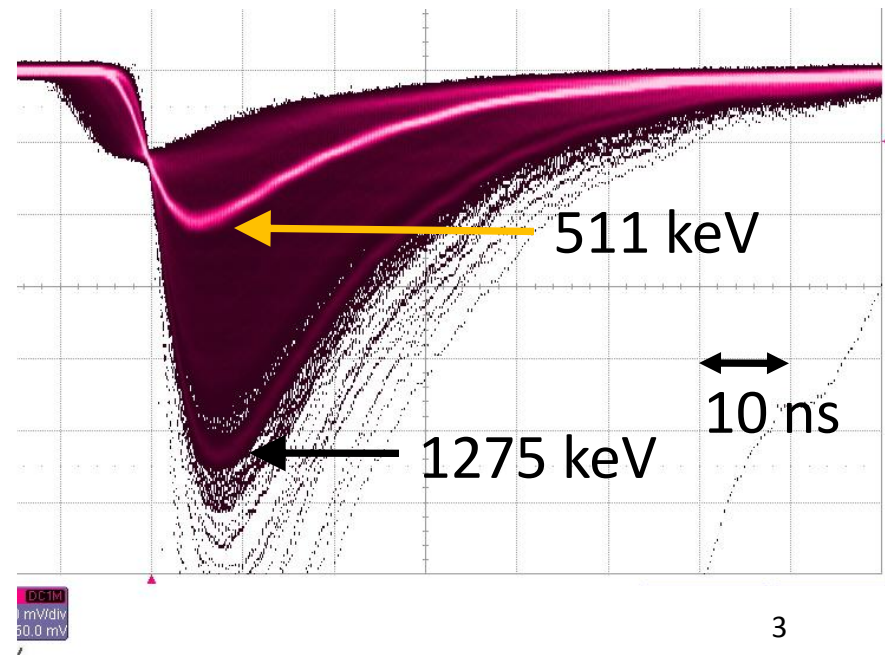
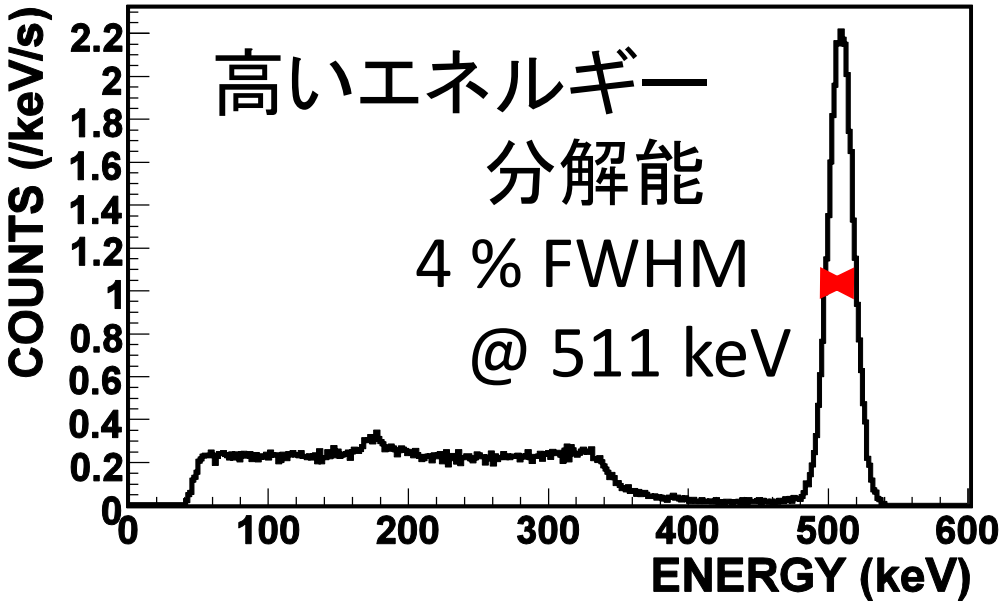


直径 1.5 インチ
長さ 2.0 インチ
LaBr₃(Ce)
× 6 個 使用

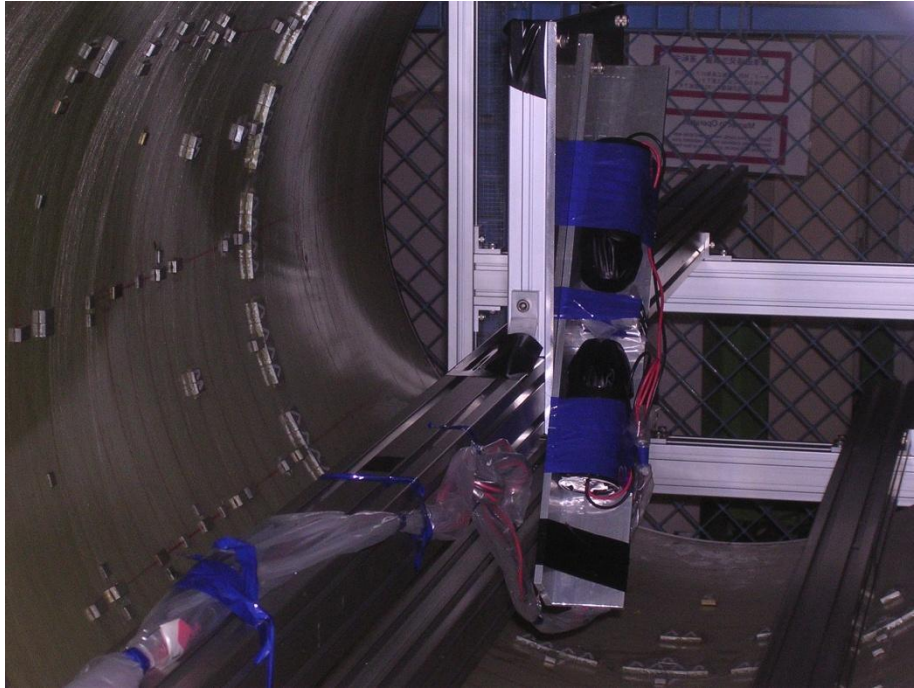
- ・ 速い立ち上がり
- ・ 遅い成分がない ²²Na

ENERGY SPECTRUM

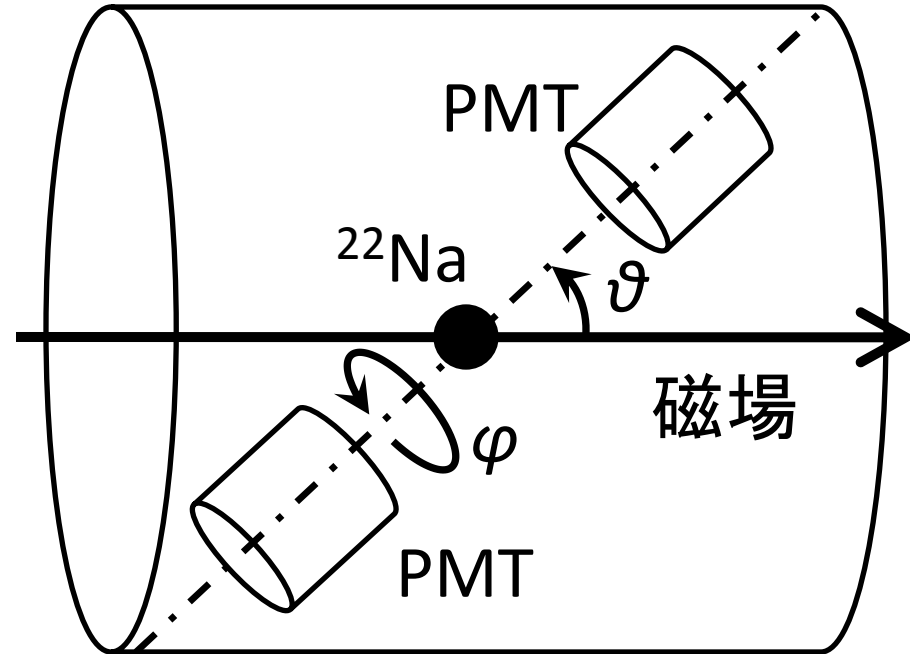
²²Na



2. 磁場中でのファインメッシュ PMT



MRI Magnet (@ KEK)



0.866 T 磁場中に
LaBr₃(Ce) シンチレータ(1 inch)
ファインメッシュ PMT

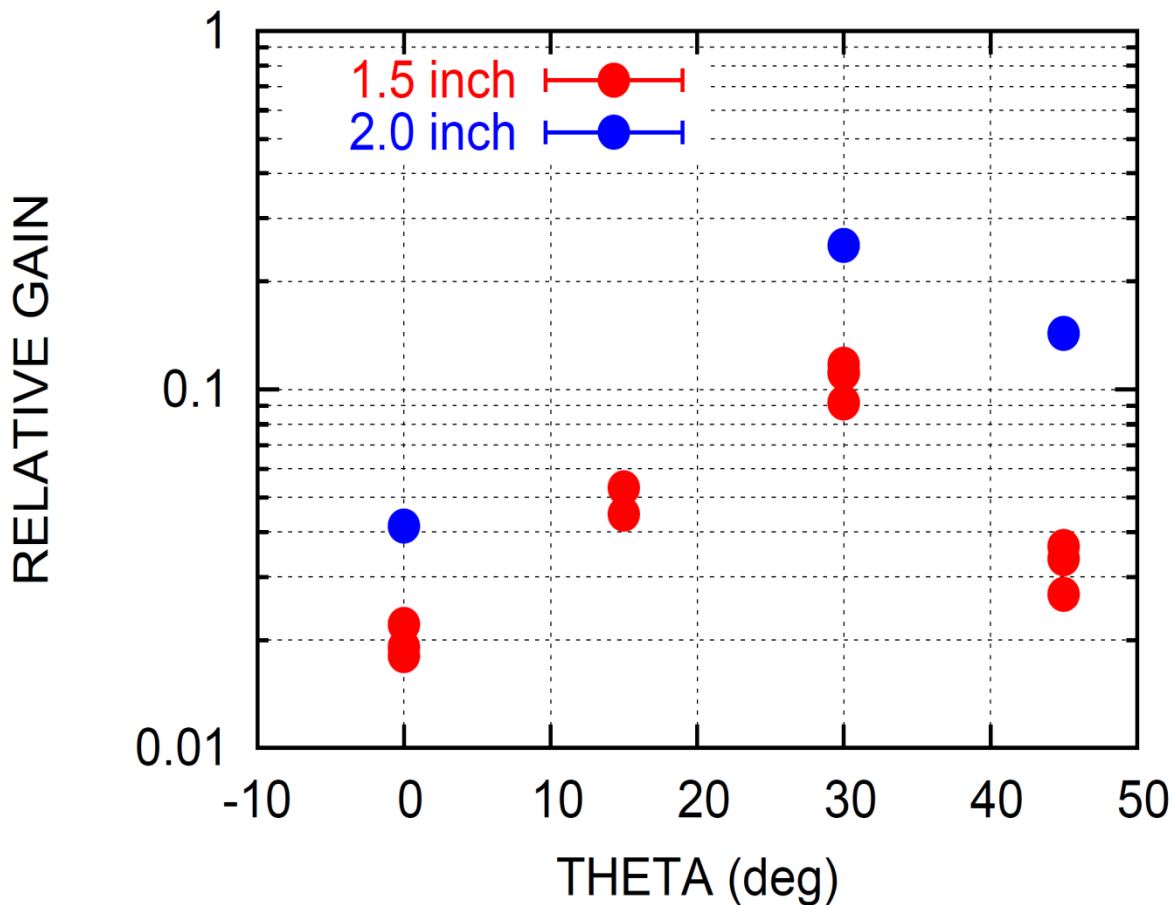
1.5 inch HAMAMATSU R7761

2.0 inch HAMAMATSU R5924

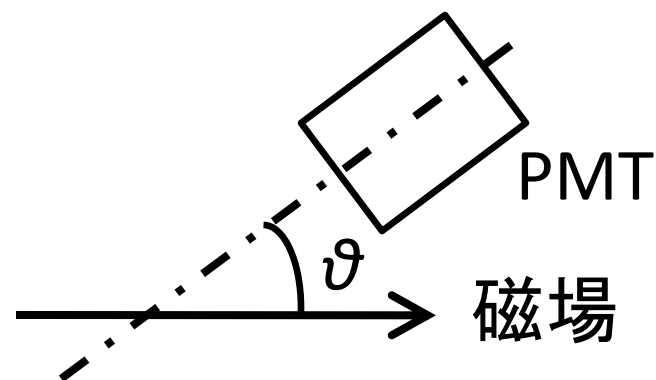
を back-to-back に配置

²²Na 線源
(511 keV 2 γ back-to-back,
1275 keV γ)
を用いて測定。

PMT ゲインの角度(θ)依存性

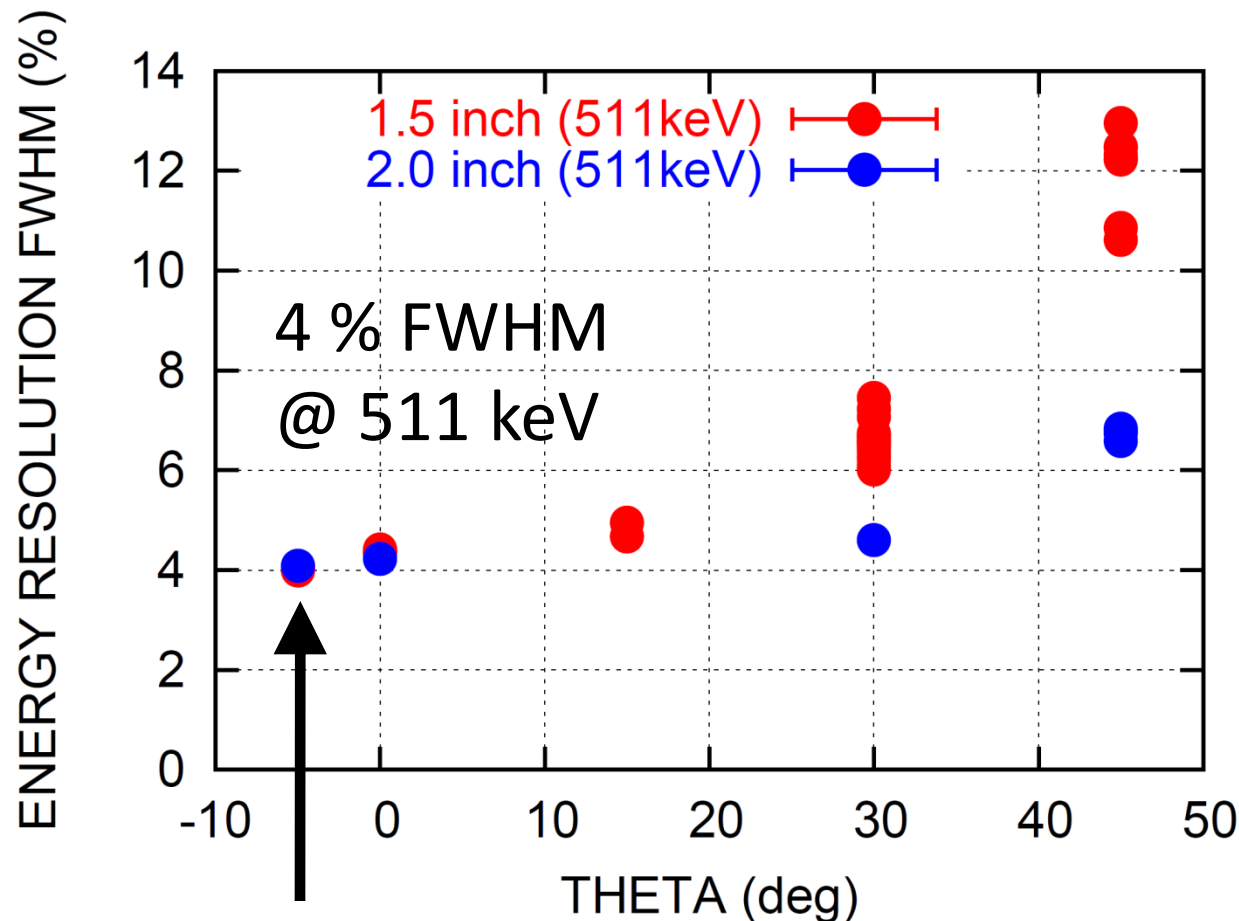


60° 以上では、 10^{-4} 以下。
(測定不可)



- 1.5 インチの方が影響が大きい。
- 30° のとき、影響が小さい。
- 2 インチ PMT では、45° でも影響は小さい。

エネルギー分解能の角度(θ)依存性

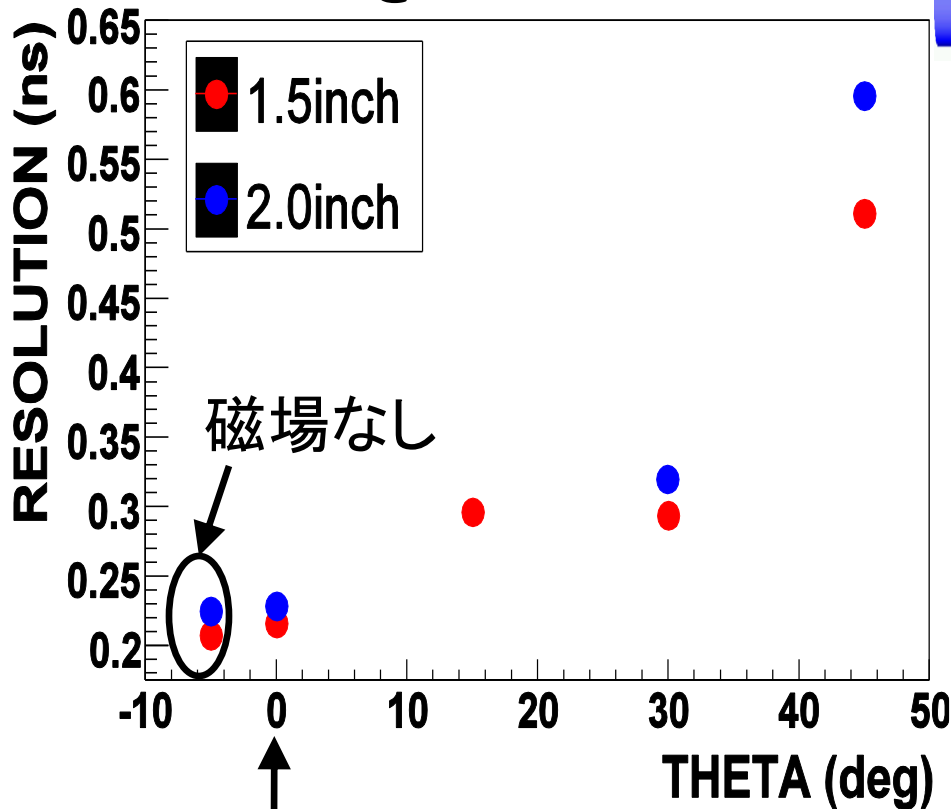


磁場なしの時の値

- ・ 0° のときは悪化していない。
- ・ 光電面から出た光電子は、磁場に巻きつきながら増幅され、陽極へ向かう。
- ・ 0° のときが最も効率よく光電子を集められる(初段)
-> 分解能がよい。

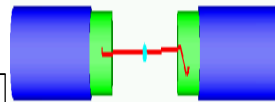
時間分解能の角度(θ)依存性

FWHM @ 511 keV



0° のとき悪化していない。

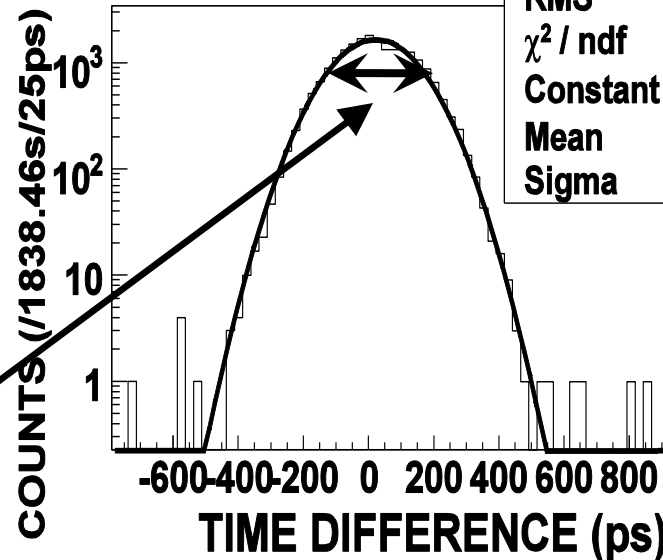
FWHM 293 ps @ 511 keV



511 keV back-to-back

↓ 磁場なしの時の時間差
スペクトル (1.5 inch +
2.0 inch coincidence)

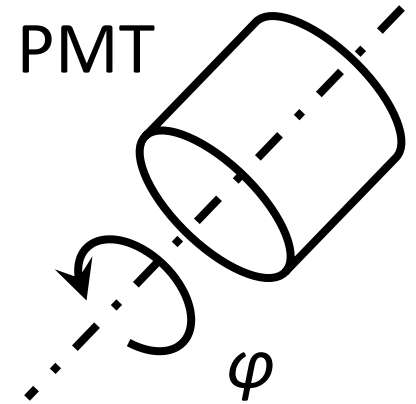
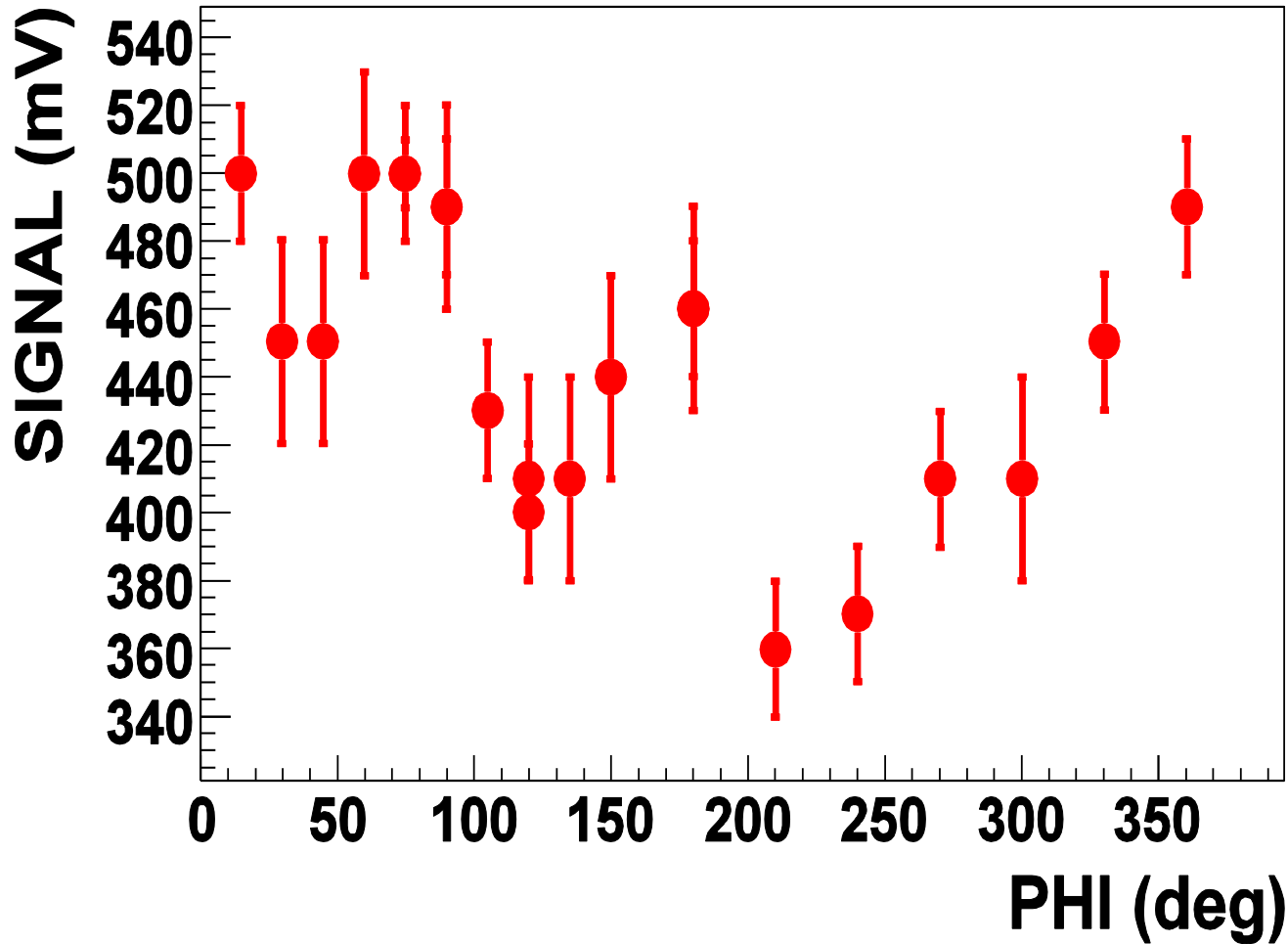
TIMING SPECTRUM



pmt1_511keV_pmt2_511keV	
Entries	21312
Mean	20.86
RMS	125.2
χ^2 / ndf	203.1 / 43
Constant	1692 ± 13.9
Mean	20.67 ± 0.86
Sigma	124.4 ± 0.6

PMT ゲインの回転角(φ)依存性

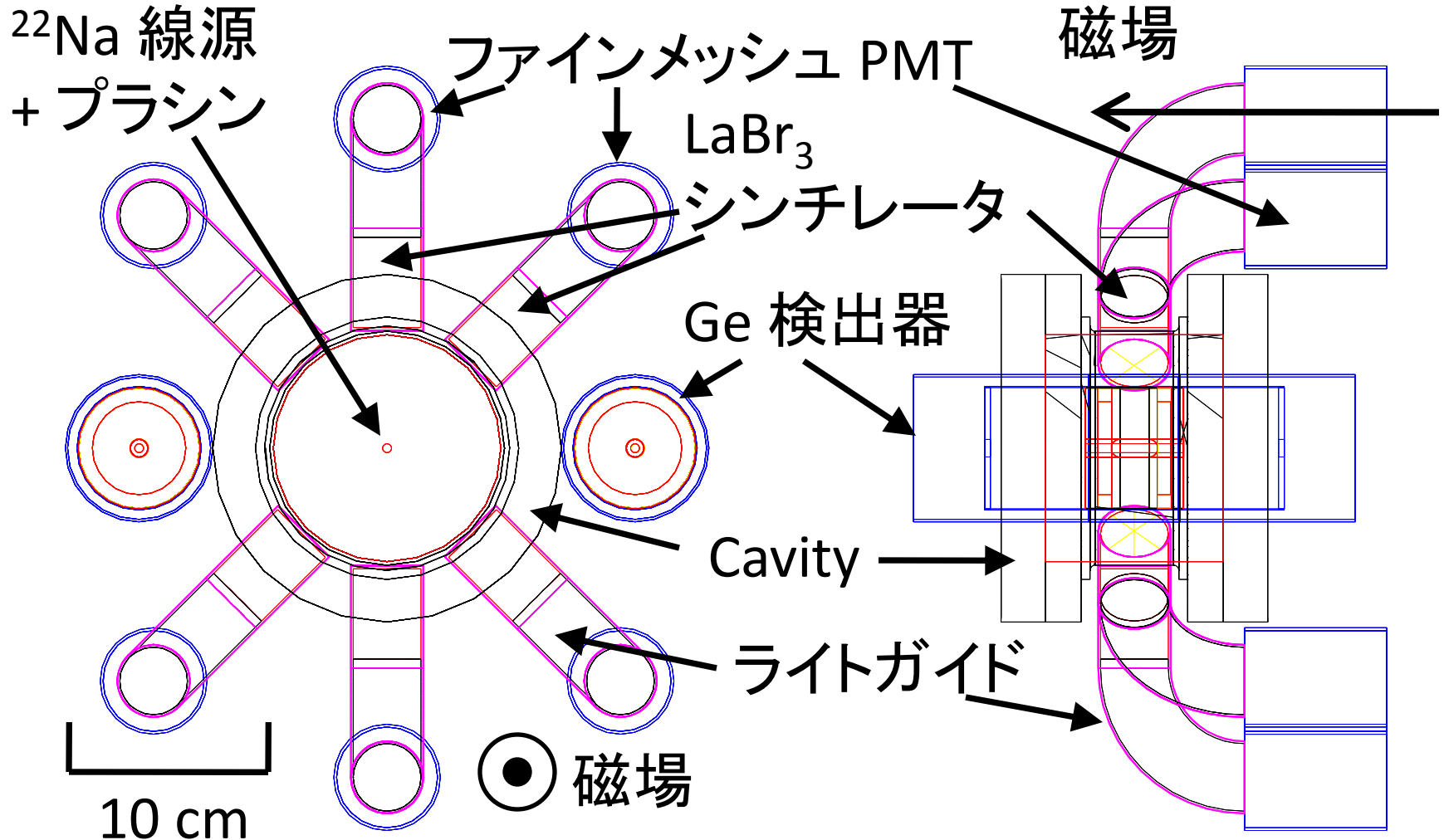
511keV $\vartheta = 45^\circ$ で測定



25% 程度の
効果

3. 検出器の全体像

$\vartheta = 0^\circ$ のとき、ゲインは低いものの、分解能が最も高い。
-> PMT の軸が磁場の向きに揃うように設計。

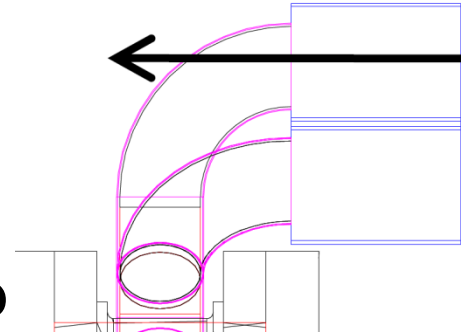


4. ライトガイド



Cavity から PMT を遠ざけるために必要。
PMT の軸と磁場の向きを揃えるため、光を 90° 曲げる

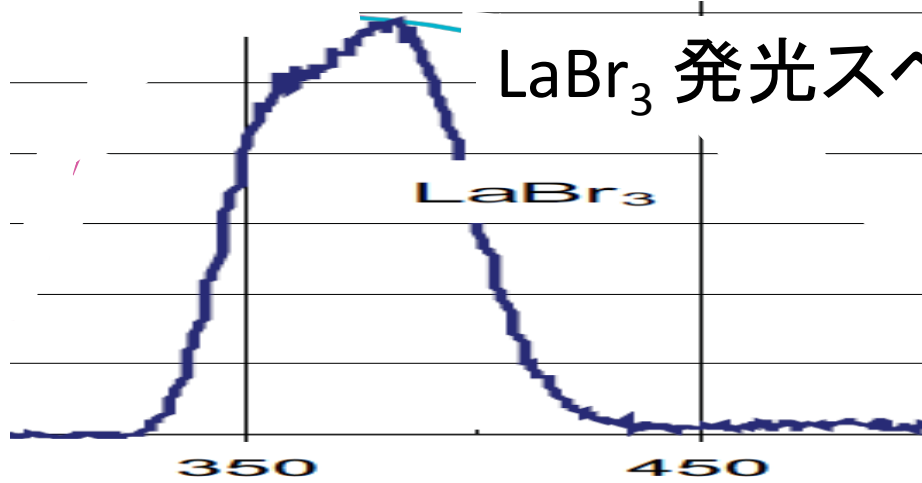
磁場



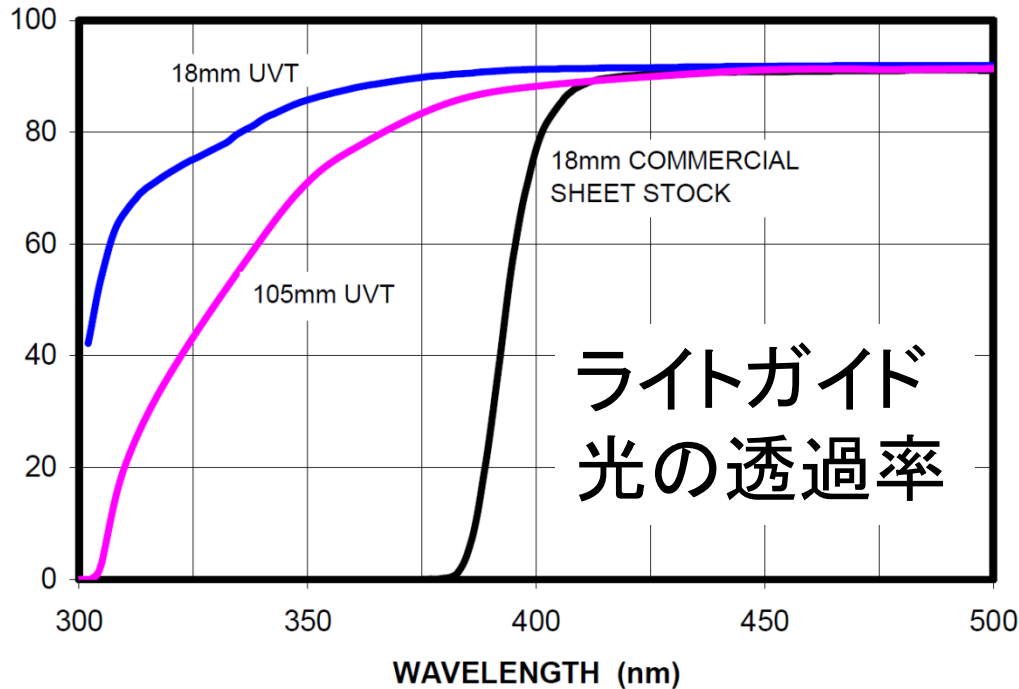
LaBr₃ シンチレータ 1 inch
ライトガイド 1.5 inch
長さ 5/10/20/40 cm
角度 45/90 deg
PMT 2 inch
ゴアテックスで巻く



UVT ライトガイド

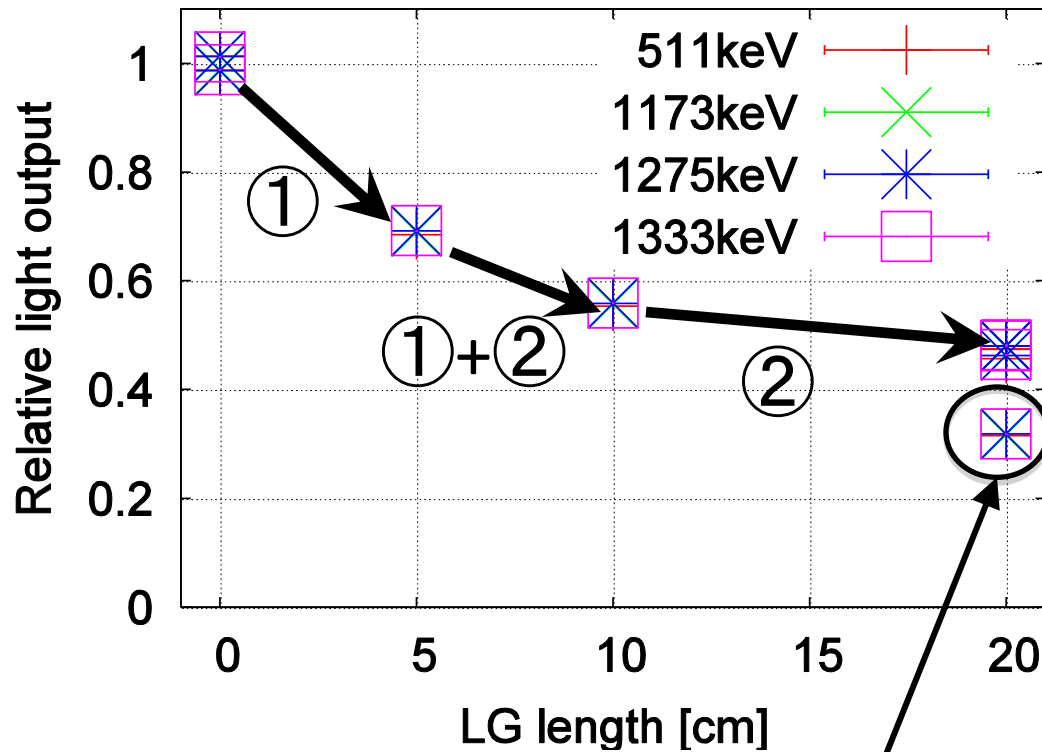


LaBr₃ は、
シンチレーション光の
波長が $\lambda=380$ nm のため

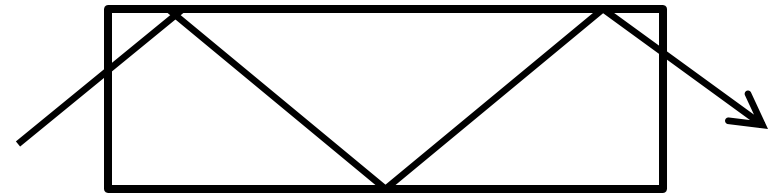


UVT
(Ultra-Violet Transmitting)
ライトガイド
を使う。

ライトガイドの長さによる光量の変化



① 全反射条件で失う。



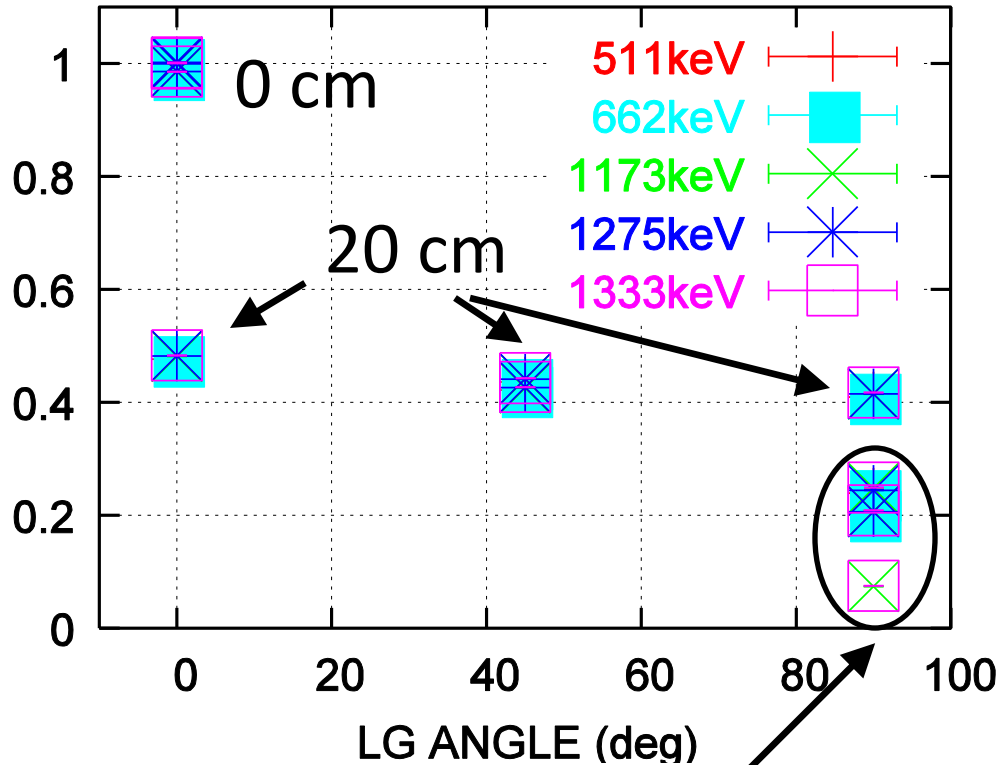
② 吸収による減少。
(影響は小さい)

20 cm で半分弱になるが、
そこで既にほぼ一定。

PMT 面から
LG はがれてた

角度(曲げ)依存性

RELATIVE LIGHT OUTPUT



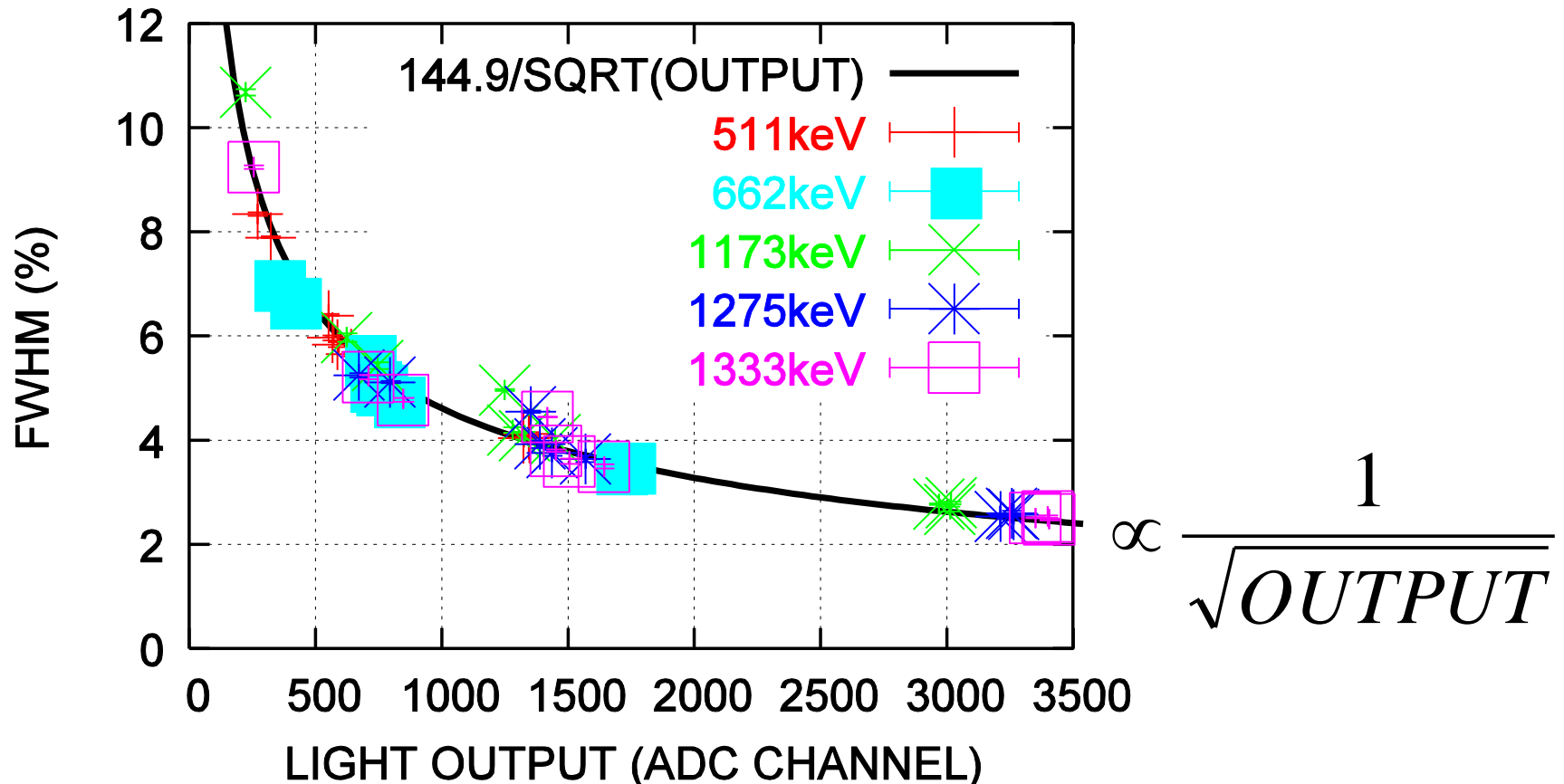
- 20 cm では、 0° も 45° も 90° もほとんど変化なし。
- 曲げによる効果はほとんどない。

設計ミス

90° で最も
よかった設計



ライトガイドを付けたときの エネルギー分解能



エネルギー分解能は、光量の統計にしか依らない。

5. 2γ 崩壊を tag する方法

2γ 崩壊と 3γ 崩壊の比から、HFS を求める

→ 2γ を正確に tag する必要 2つの方法

(1) Geometrical



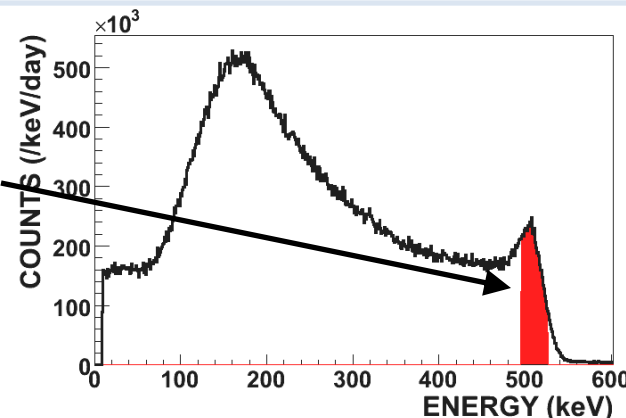
Back-to-back に検出器を置き、両方に 511 keV が入った場合を tag
(長所) S/N がよい (短所) Collection efficiency が小さい

(2) Energy

Energy information のみから 511 keV を tag

(長所) Collection efficiency が大きい
(Self-trigger で count できる)

(短所) S/N が悪い



Energy でやるなら、高いエネルギー分解能が求められる

→ LaBr_3 、Ge の利用

6. Geant4 によるシミュレーション (1)

測定の結果、 LaBr_3 システムはエネルギー、時間ともに分解能が高く、エネルギー情報のみを用いて 2γ , 3γ 崩壊を区別することができる。

Timing window で少ない 2γ (pick-off)

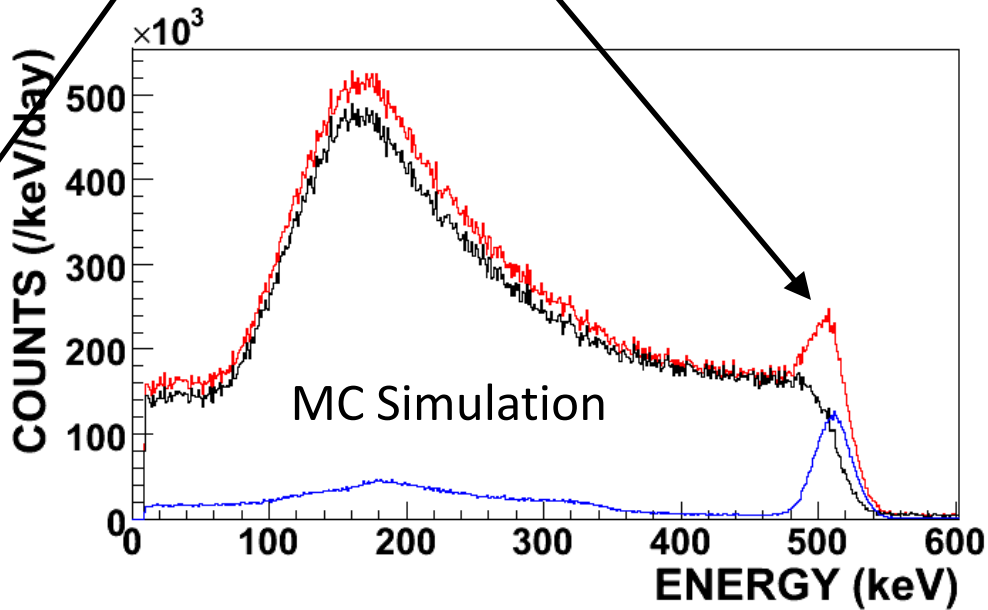
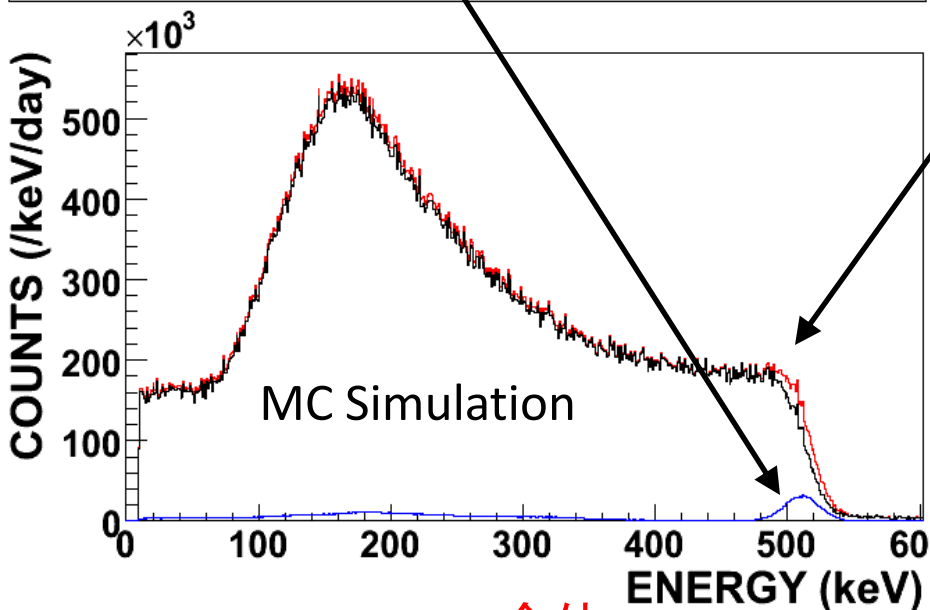
この差を、磁場強度を変えながら測定

Transition が起こっていないとき

Transition が起こっているとき

ENERGY SPECTRUM ($\text{LaBr}_3 \cdot 6$, Off-Peak)

ENERGY SPECTRUM ($\text{LaBr}_3 \cdot 6$, On-Peak)



— 全体

3 γ

— 2 γ

Geant4 によるシミュレーション (2)

1MBq ^{22}Na 線源を用いた場合に期待される 1 日当たりのカウント

	Back-to-back		Energy	
	全数	内訳	全数	内訳
Transition が 起こっていないとき	2.5×10^4	2 γ 1.4×10^4	4.0×10^6	2 γ 8×10^5
		3 γ 1.1×10^4		3 γ 3.3×10^6
Transition が 起こっているとき	6.4×10^4	2 γ 5.4×10^4	6.0×10^6	2 γ 3.1×10^6
		3 γ 1.0×10^4		3 γ 2.9×10^6

(511 keV は FWHM で cut)

Back-to-back (geometrical information) \rightarrow Energy information で

$\left\{ \begin{array}{l} 2 \gamma \text{ count は } 57 \text{ 倍} \\ 3 \gamma \text{ count は } 280 \text{ 倍} \end{array} \right. \rightarrow \text{カウントを 50 倍稼げる。}$

S/N 悪化は高々 5 倍 \rightarrow LaBr_3 + Energy tag は非常に良い方法
 \rightarrow この方法で測定

纏めと今後の展望

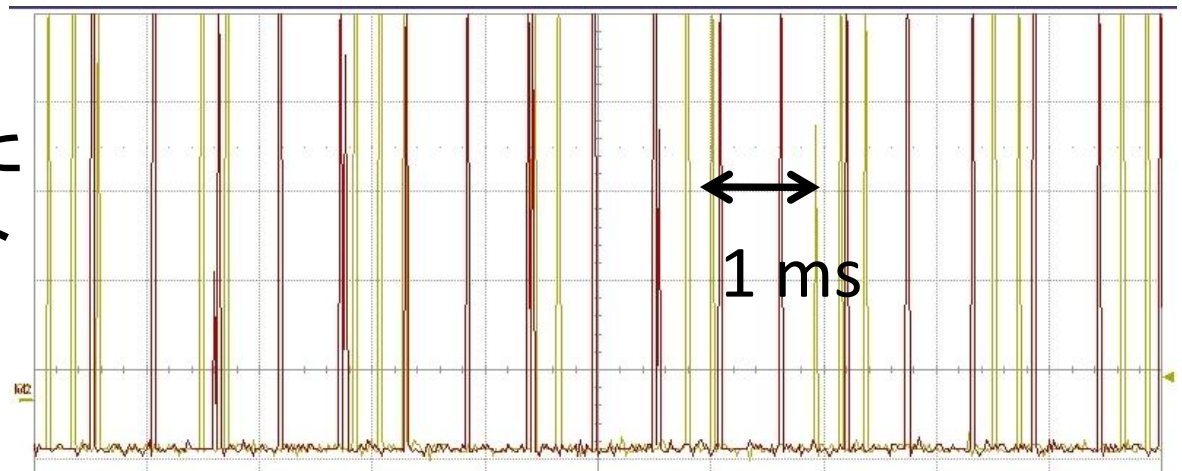
- ポジトロニウムの超微細構造を精密に測定するためのガンマ線検出器を設計した。
- ファインメッシュ PMT の動作特性を、0.866 T の磁場中で調べた。
- ライトガイドを用いたテストを行った。
- Geant4 を用いたシミュレーションに依れば、今回の設計で十分な精度が得られる。
- 最初の測定を 10 月末から行う予定。

Backup

磁場中での Ge 検出器

- Ge 検出器は高磁場 (> 500 Gauss) 中では使用不可。
- Ge 検出器を正常に用いることのできる磁場強度の限界は、Ge の軸と磁場の間の角度に大きく依存。
- ペニング放電によって暗電流が増加している。
(熱化は磁場なしで測定?)

Ge (ORTEC) の、
高磁場中で測定した
トランジスタ・リセット
(暗電流)



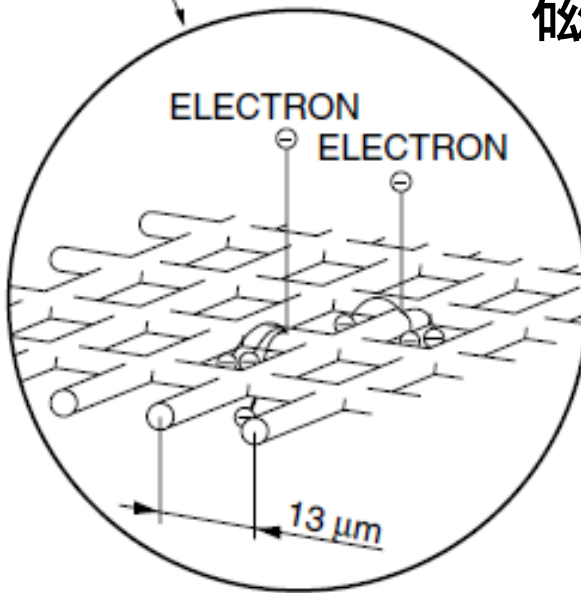
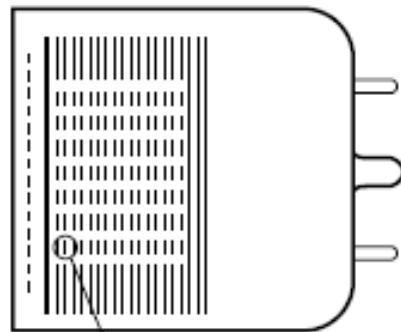
ライトガイド



全反射条件
アクリル 屈折率 1.49
-> 臨界角 42.2°

90° 曲げても明るい

ファインメッシュ PMT



FINE-MESH TYPE

コバルト
(Kovar; 合金。
主にFe, Ni, Co
磁性体)
を含むため、
磁場に影響

KEKで行った
測定では、
磁石の中心
から数cm
-> 100 ppm
10 cm
-> 10 ppm

Table of Scintillator Properties

Scintillator	Density	Refractive index	Photons per MeV	Emission Maximum	Decay Constant	Radiation Length
	g / cm ³			nm	ns	cm
NaI (Tl)	3.67	1.85	38000	415	230	2.59
CsI (Tl)	4.51	1.79	59000	565	1000	1.86
LYSO	7.25	1.81	32000	420	40	1.15
YAP (Ce)	5.55	1.93	19700	347	28	2.7
LaBr ₃	5.29	1.9	63000	380	25.6	1.88

Estimation Factors

• Source	1 MBq	(²² Na)
• β ⁺ decay Intensity	89.89 %	Geant4 data
• Run Time	86400 s	(/day)
• Plastic Scintillator Tag (>60keV) & Stop In Cavity	2.55 %	Geant4 Simulation in N ₂ (1 atm) & 200 μm Plastic Scintillator
• Generation Prob. of Ps	50 %	Mark の発表
• Spin Factor	50 %	(2/4)
• Expected events / day	5.0 × 10 ⁸	
• Pick off ratio	3.4 %	Phys. Rev. A <u>18</u> , 1426 (1978)
• Transition probability	10 %	Phys. Rev. A <u>2</u> , 707 (1970)