

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定II (ガンマ線検出器の設計)

東大理、東大素セ^A、東大院総合文化^B、福井大遠赤セ^C

石田明、秋元銀河、Mark M. Hashimoto^A、難波俊雄^A、
浅井祥仁、小林富雄^A、斎藤晴雄^B、出原敏孝^C

日本物理学会 第63回年次大会 於 近畿大学本部キャンパス

Outline

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定

(1) 時間情報を加えた HFS の精密測定

(2) 大強度サブテラヘルツ光による直接測定

いずれの場合にも用いるガンマ線検出器 (LaBr_3 , Ge) の設計

1. 2γ 崩壊をどうやって tag するか
2. LaBr_3 Scintillator の諸特性
3. Geant4 を用いた estimation
4. 磁場中での検出器の動作((1) に関連)

2 γ 崩壊

2 γ 崩壊と 3 γ 崩壊の比から、HFS を求める

→ 2 γ を正確に tag する必要 2つの方法

(1) Geometrical



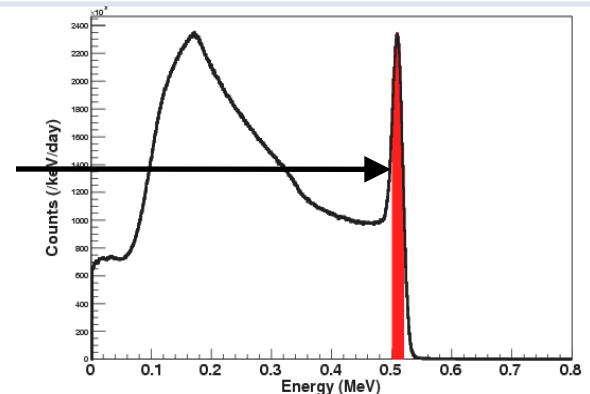
Back-to-back に検出器を置き、両方に 511 keV が入った場合を tag
(長所) S/N がよい (短所) Collection efficiency が小さい

(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

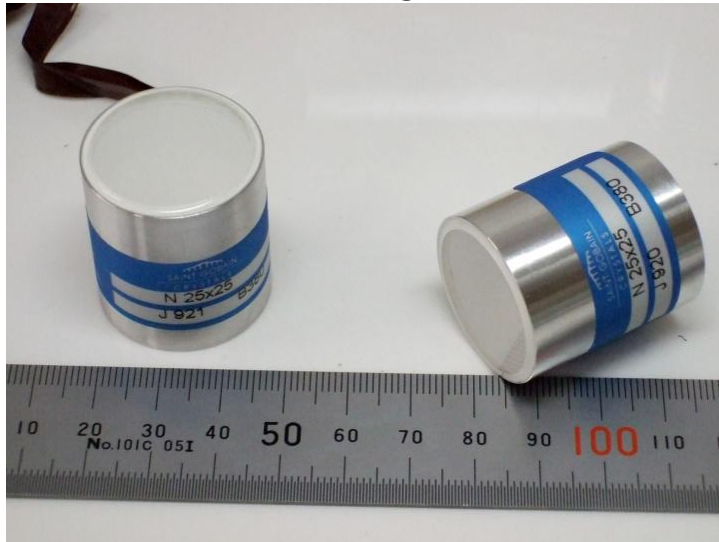


Energy でやるなら、高いエネルギー分解能が求められる

→ LaBr₃、Ge の利用

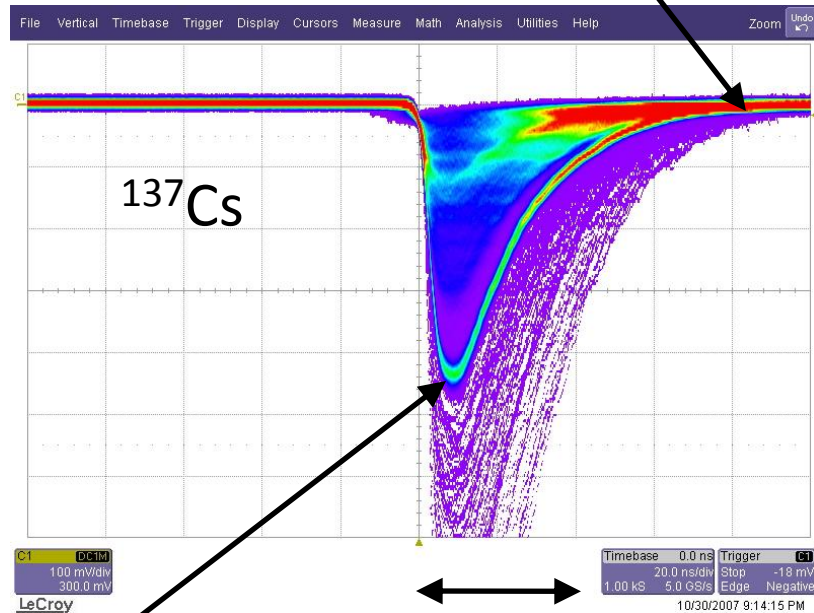
γ 線検出器 ～LaBr₃～

1インチ LaBr₃



本番では2インチの予定

遅い成分がない



40nsec 速い

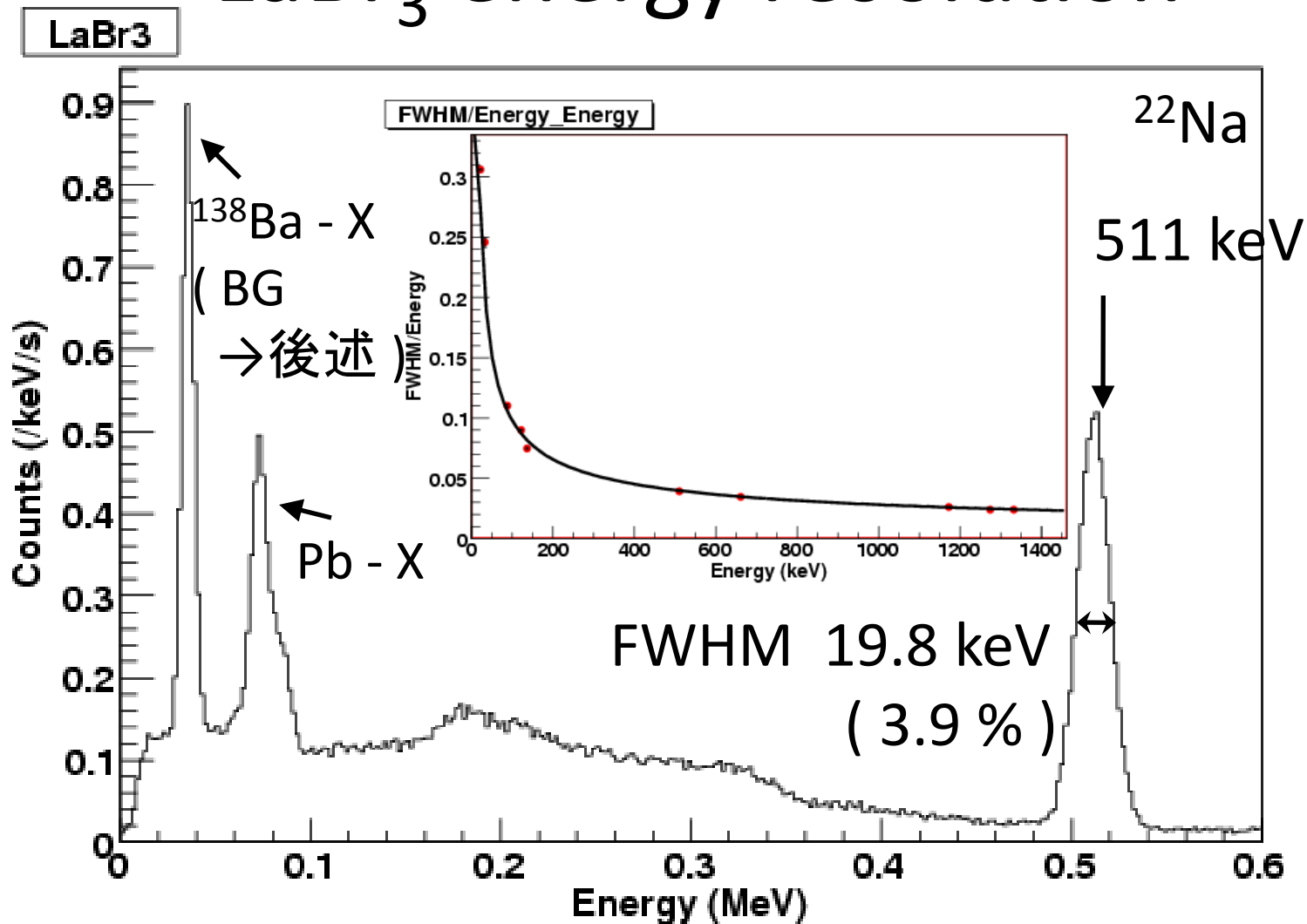
高い Energy 分解能 3.5% FWHM

速い：時間分解能が良い(熱化過程を測定)

遅い成分がない：強い線源強度可能

高いエネルギー分解能：Energy で 2 γ を tag

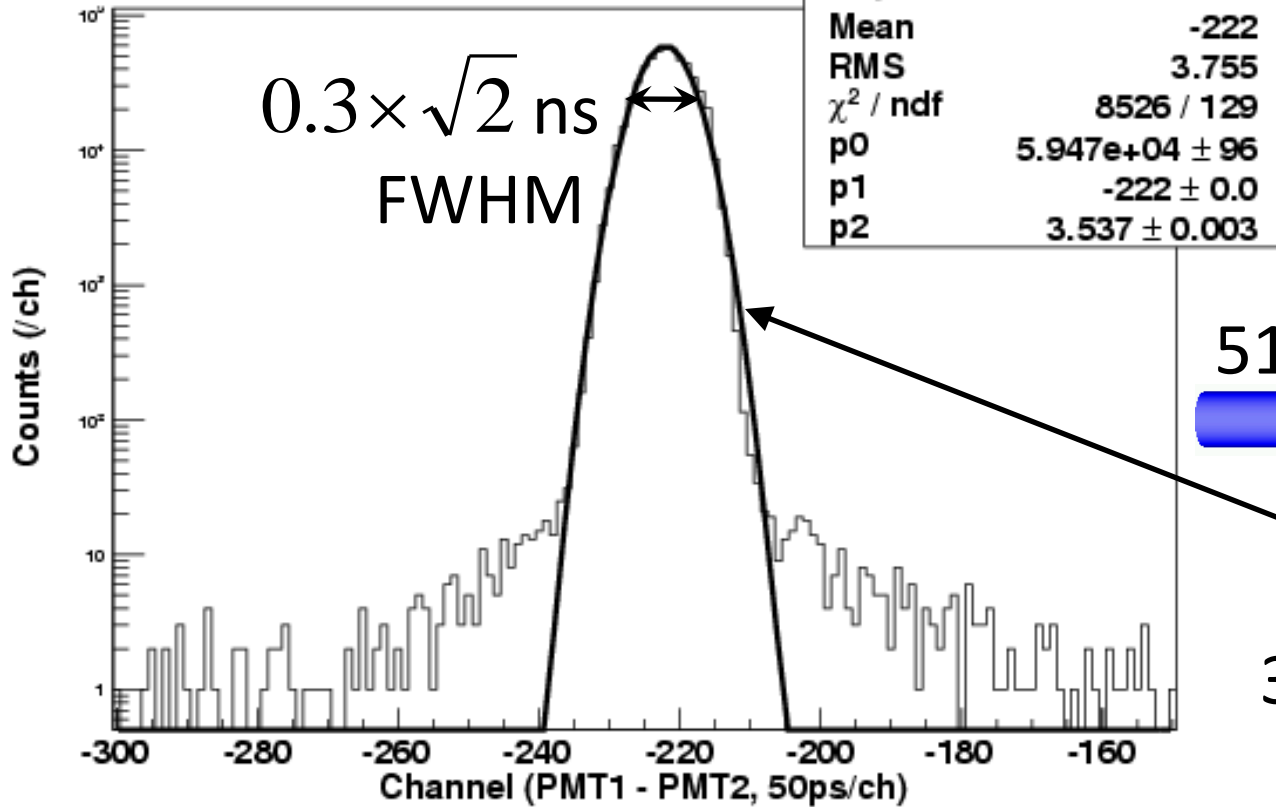
LaBr₃ energy resolution



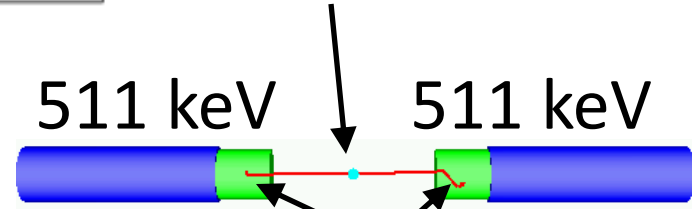
高いエネルギー分解能 → 2 γ を energy で tag できる。

LaBr₃ timing resolution

Timing Spectrum



⁶⁸Ge-⁶⁸Ga source

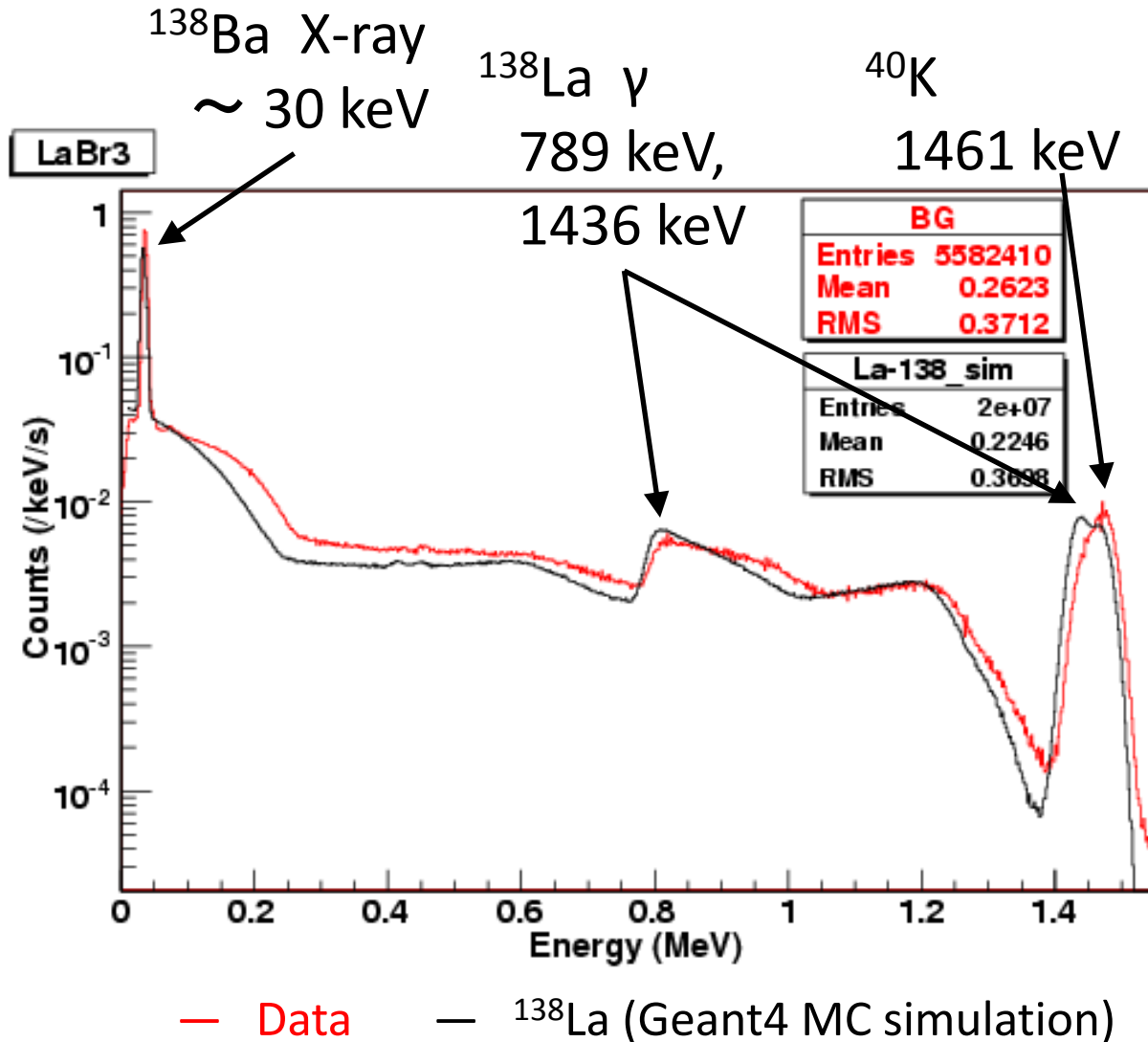


この時間差

300 ps FWHM
@ 511 keV

高い時間分解能 → 熱化過程の測定が可能

LaBr₃の Background



Backgroundを
Geant4 simulationと比較

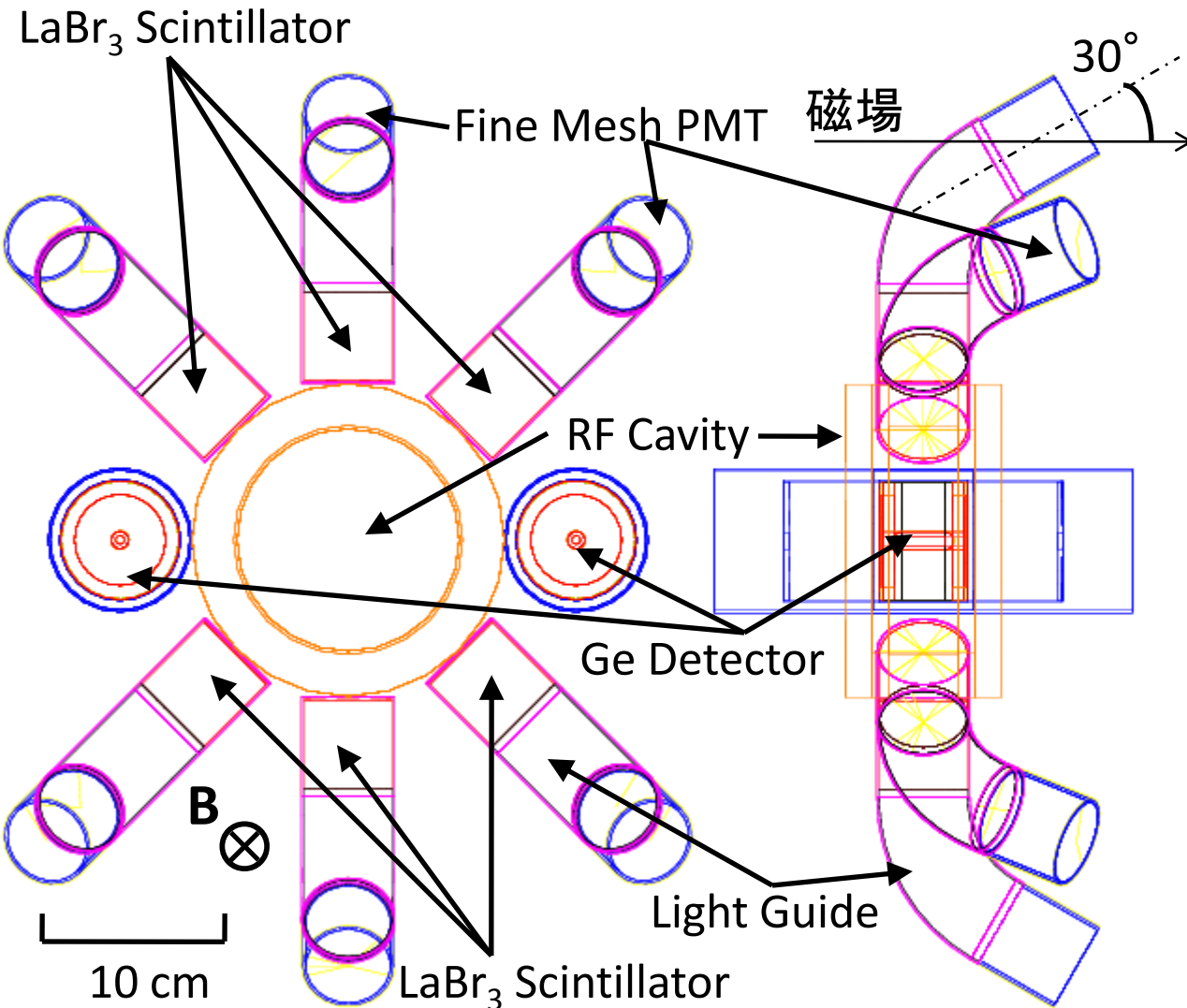
主な寄与は
 LaBr₃ 自身が含む ¹³⁸La
 (天然放射性同位体、
 天然存在比 0.0902%)

17 Hz (10 keV threshold)
 (天然存在比で
 MC 14.3 Hz (> 10keV))

0.09 Hz (511 keV FWHM)

→ Backgroundは
非常に小さい

Detector geometry



RF cavity を取り囲むように
8 個の γ 線検出器を配置。

2 個の Ge 検出器は
熱化過程を測定するの
に用いる。

6 個の LaBr₃ 検出器により、
2 γ 崩壊を捉える。
これらを Back-to-back に
配置。

LaBr₃ の読み出しには
Fine Mesh PMT を使用。
磁場との角度を 30° に
設定 → 後述

Estimation (1)

1 MBq ^{22}Na source を用いて 1 日測定した場合に得られる spectrum を simulation
Timing window をかけた LaBr_3 の spectrum

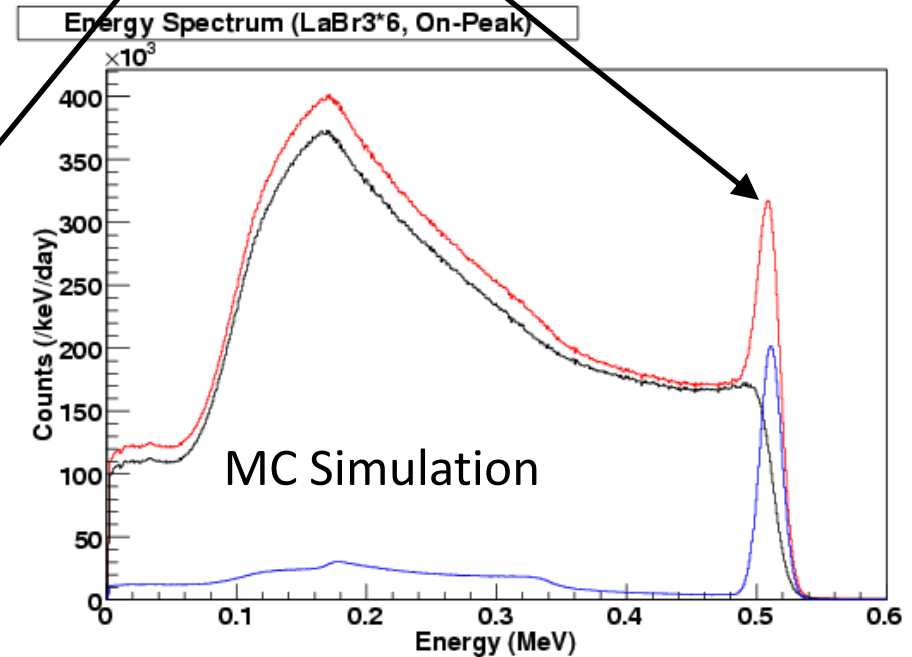
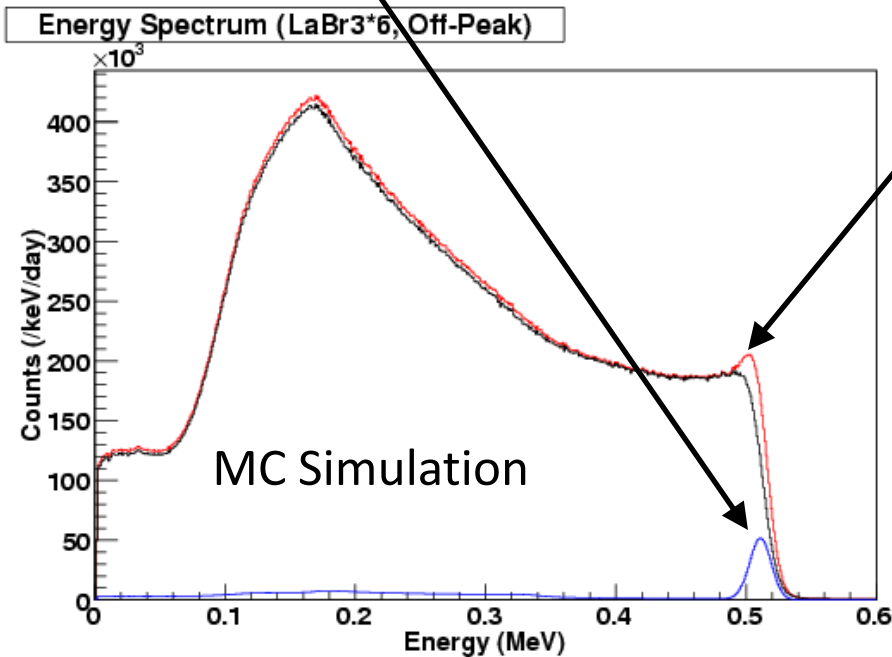
Intensity 90 %, Ps 生成率 20 %, pick-off 3 %, transition probability 10 % として
前頁の図で RF cavity 内一様 random に decay

Timing window で少ない 2 γ (pick-off)

この差を RF input freq. 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



— 全体

— 3 γ

— 2 γ

Estimation (2)

期待される 1 日当たりのカウント (前頁の仮定で)

| | Back-to-back | | Energy | |
|---------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| | 全数 | 内訳 | 全数 | 内訳 |
| Transition が 起こっていないとき | 1.9×10^4 | 2 γ 1.1×10^4 | 3.0×10^6 | 2 γ 8×10^5 |
| | | 3 γ 8×10^3 | | 3 γ 2.2×10^6 |
| Transition が 起こっているとき | 5.0×10^4 | 2 γ 4.3×10^4 | 5.2×10^6 | 2 γ 3.2×10^6 |
| | | 3 γ 7×10^3 | | 3 γ 2.0×10^6 |

(511 keV は FWHM で cut)

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

$\left\{ \begin{array}{l} 2 \gamma \text{ count は } 74 \text{ 倍} \\ 3 \gamma \text{ count は } 290 \text{ 倍} \end{array} \right. \rightarrow \text{カウントを 70 倍稼げる。}$

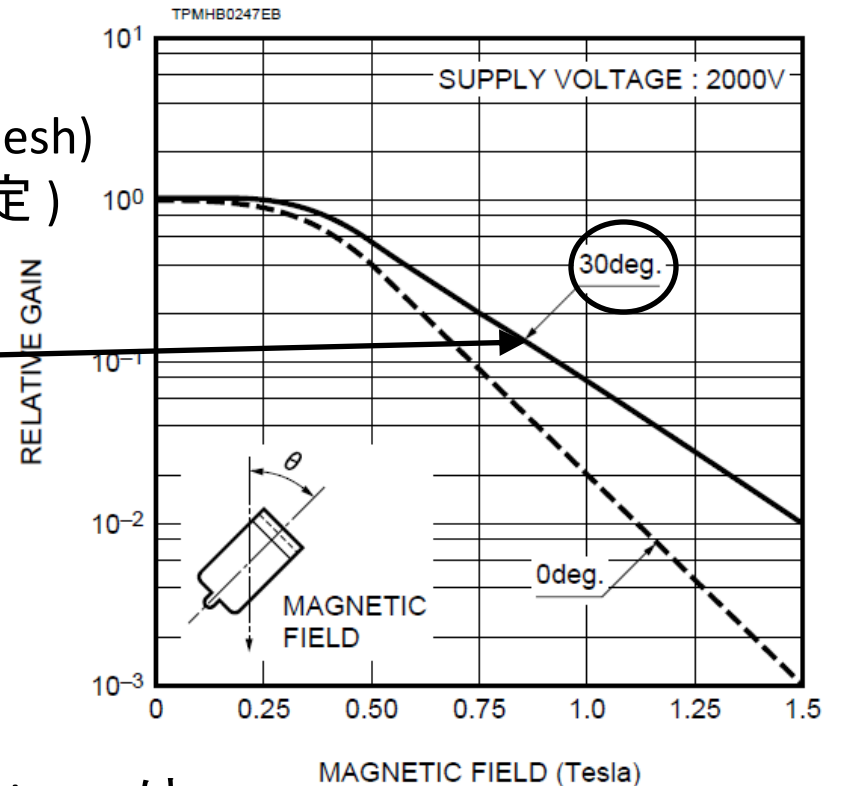
S/N 悪化は高々 4 倍 \rightarrow LaBr₃ + Energy tag は非常に良い方法
 \rightarrow この方法で測定

磁場中での動作 (1)

Figure 2: Typical Gain in Magnetic Fields

1. LaBr₃ の読み出し

高磁界用光電子増倍管 (Fine Mesh)
(HAMAMATSU R5924-70 の予定)
磁場に対して 30° で用いれば
Typical Gain at 0.8 T ~ 10⁶
(磁場なしの場合の ~ 0.1)
→ 使用可能



2. Ge detector

現在、0.12 ~ 0.25 T でテスト中

Energy resolution, detection efficiency は
測定誤差の範囲で一致。

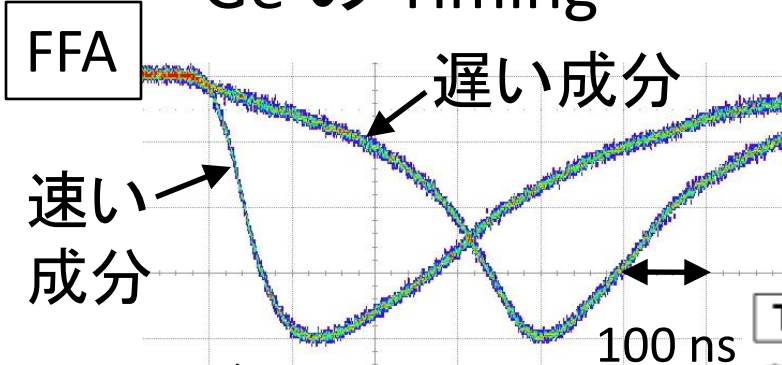
Gain も 10 ppm 程度で不変。→ より高い精度で調べる必要

Timing は次頁。 近い内に実際の磁場をかけてテスト予定

HAMAMATSU R5924-70

磁場中での動作 (2)

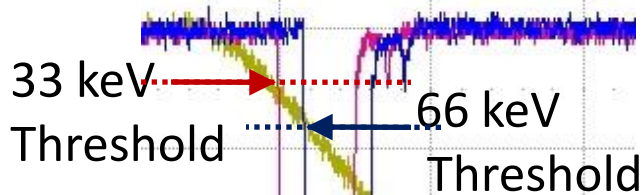
Ge の Timing



同じエネルギーでも信号の速さは違う
(電子の移動速度)

→ 磁場の影響を受ける

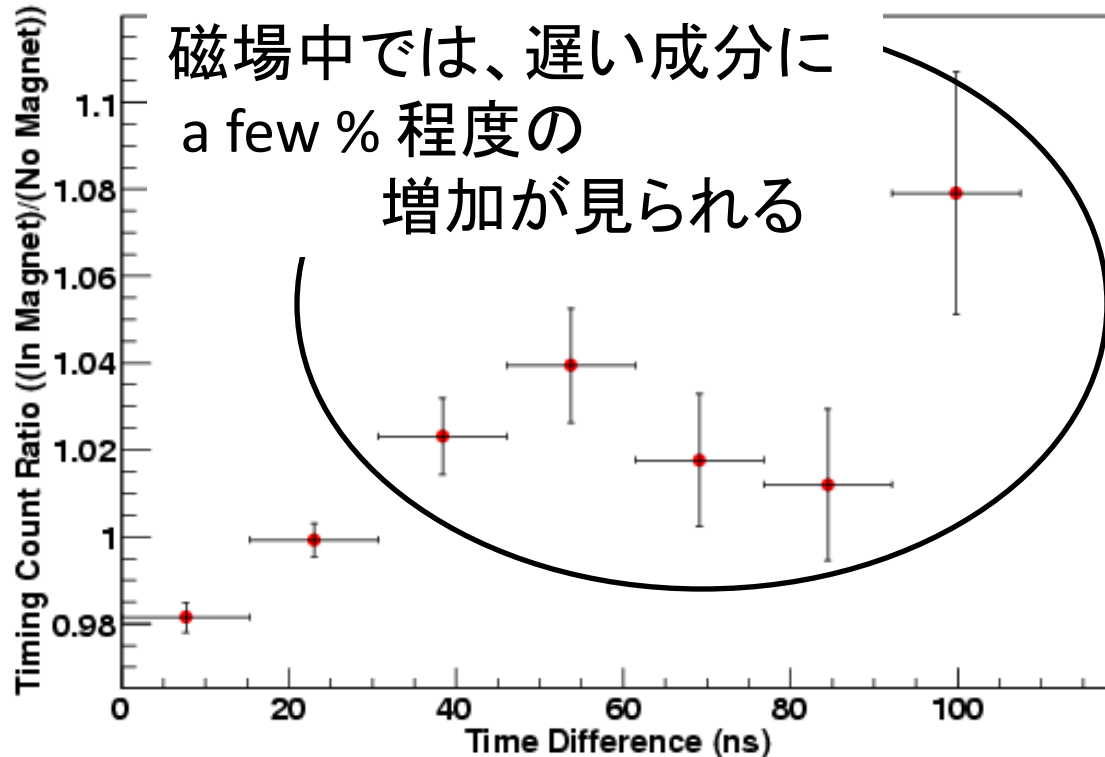
立ち上がりの
Double Threshold で、
信号の速さを測定



この差を
測定する

662 keV Signal
FWHM Cut

Timing Count Ratio



Conclusion

- Ge と LaBr_3 + Fine Mesh PMT を用いて、高速でかつ非常に高いエネルギー分解能を持つガンマ線検出器を設計。
- 2γ 崩壊を tag するには 2 通りの方法があるが、Energy Information を用いることでカウントを稼ぐ (70 倍)。
↑ Ge、 LaBr_3 の高いエネルギー分解能を最大限に活用し、高い S/N、Collection efficiency での測定を可能にした。
- 夏までに磁場中でのテスト、最終設計を終え、秋に
(1) 時間情報を加えた HFS の精密測定 を開始。

Back Up

Table of Scintillator Properties

| Scintillator | Density | Refractive index | Photons per MeV | Emission Maximum | Decay Constant | Radiation Length |
|-------------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | g / cm ³ | | | nm | ns | cm |
| NaI (TI) | 3.67 | 1.85 | 38000 | 415 | 230 | 2.59 |
| CsI (TI) | 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 | 1.77 |

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 | 5.2 % | Geant4 Simulation in N ₂ (1 atm) & 200 μ m Plastic Scintillator |
| • Generation Prob. of Ps | 20 % | Phys. Rep. <u>39</u> , 169 (1978) |
| • Spin Factor | 50 % | (2/4) |
| • Expected events / day | 4.0×10^8 | |
| • Pick off ratio | 3.4 % | Phys. Rev. A <u>18</u> , 1426 (1978) |
| • Transition probability | 10 % | Phys. Rev. A <u>2</u> , 707 (1970) |