オルソポジトロニウム崩壊における ガンマ線スペクトル測定

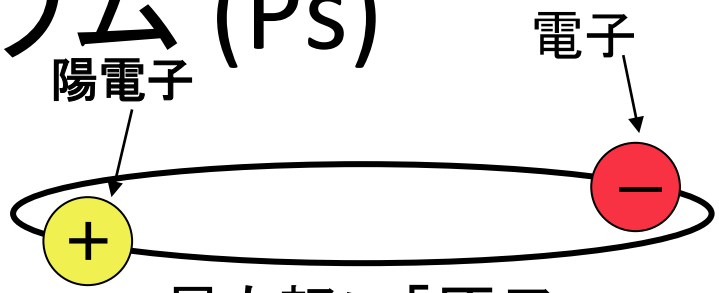
大和田健太、森永真央、難波俊雄[A]、浅井祥仁、小林富雄[A]

東京大学理学系研究科、東京大学素粒子物理国際研究センター[A]

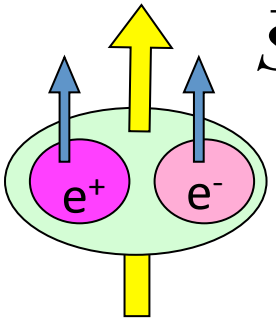
第48回　アイソトープ・放射線研究発表会
日本科学未来館

1.ポジトロニウム (Ps)

- 電子(e^-) と陽電子(e^+)の束縛系



最も軽い「原子」



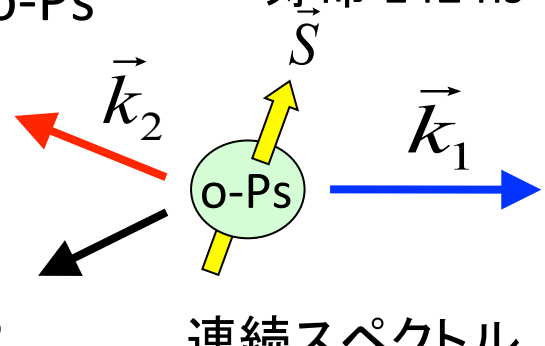
$\vec{S}$ = 1 (スピン三重項)

オルソポジトロニウム(o-Ps)

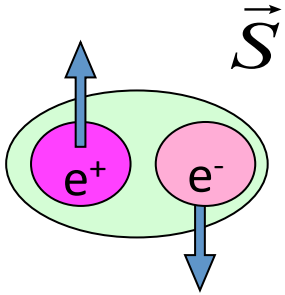
スピン=1　光子と同じ量子数

o-Ps → 3γ (, 5γ, ...)

o-Ps　寿命 142 ns



連続スペクトル



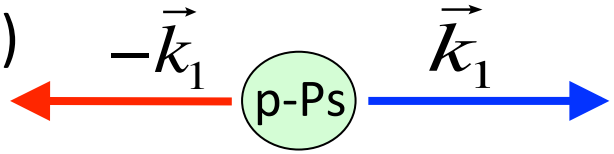
$\vec{S}$ = 0 (スピン一重項)

パラポジトロニウム (p-Ps)

スピン=0　スカラー粒子

p-Ps → 2γ (, 4γ, ...)

p-Ps　寿命 125 ps



511 keV 単色

基底状態における2つのスピン固有状態間のエネルギー差
＝超微細構造(HFS)

1.2 HFSのずれと未知粒子の可能性

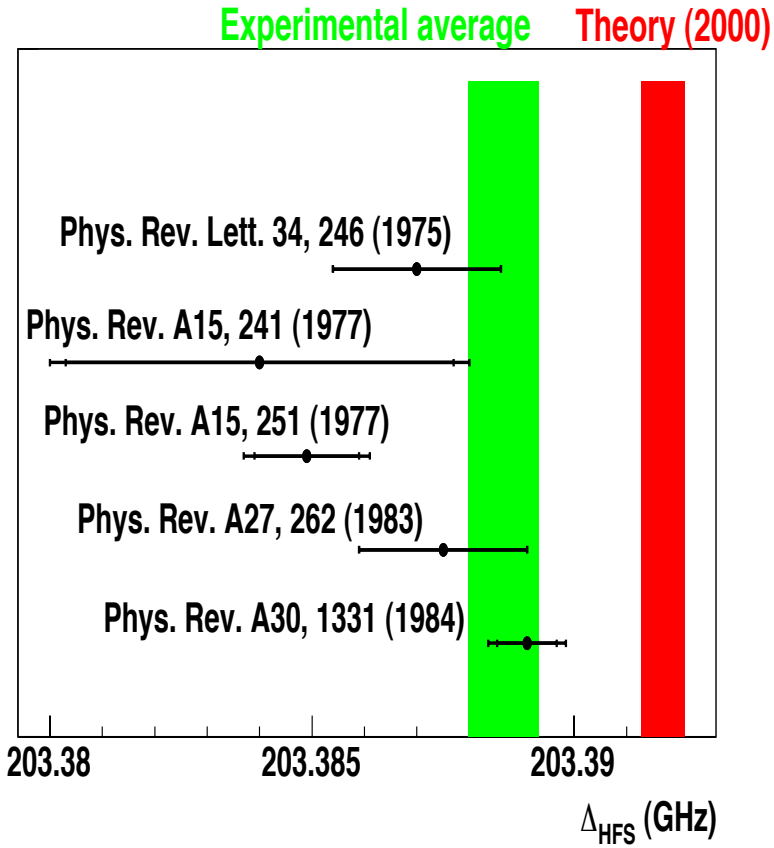
PsのHFSの値は
実験と理論で乖離している。

→未知粒子が存在する可能性

Ex) 未知粒子の質量が数MeV

→α_X~10^{-6}

未知粒子が存在した場合、
HFSに影響を与えるだけでなく、
o-Psの崩壊におけるエネルギー
スペクトルがずれてくる。

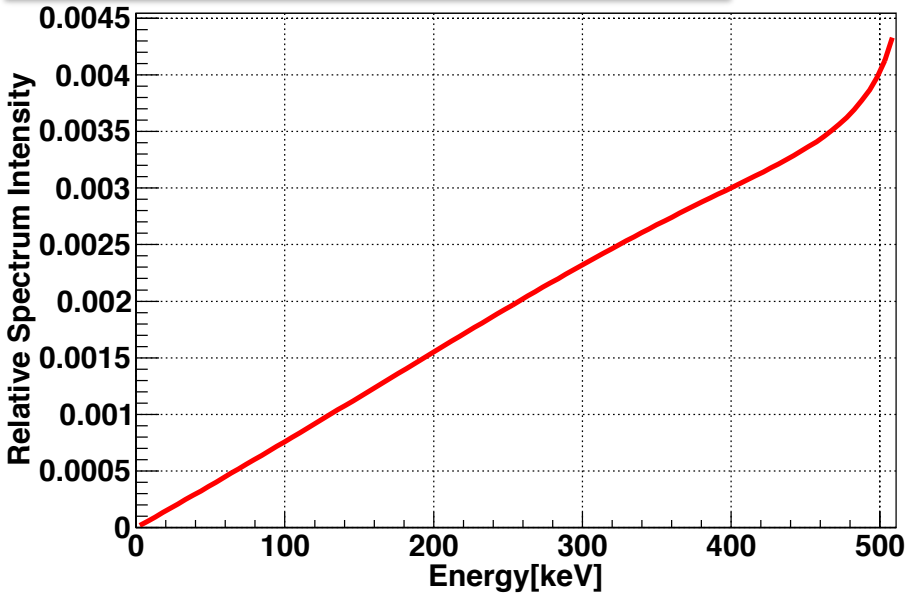


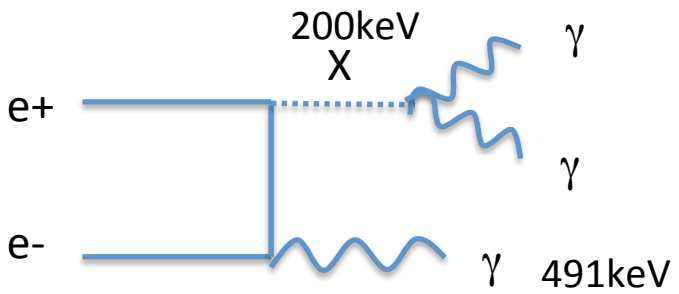
o-Ps→3γのエネルギースペクトルは未だ直接測定されていない

➡ エネルギースペクトルの精密測定によって未知粒子を探索する

2.o-Psの崩壊における未知粒子探索

o-Ps→3γのエネルギースペクトル(O(α))





短寿命の未知粒子X

弱い制限しかついていない

質量が

O(MeV)→スペクトル全体がゆがむ

O(keV)→スペクトルの一部がゆがむ

Ex.)未知粒子Xの質量~200keVだった場合、
491keV辺りがずれる。

$\Gamma(\text{o-Ps}\to X\gamma)/\Gamma(\text{o-Ps}\to 3\gamma)>10^{-5}$の場合、
491keVは0.1%程度ずれる。

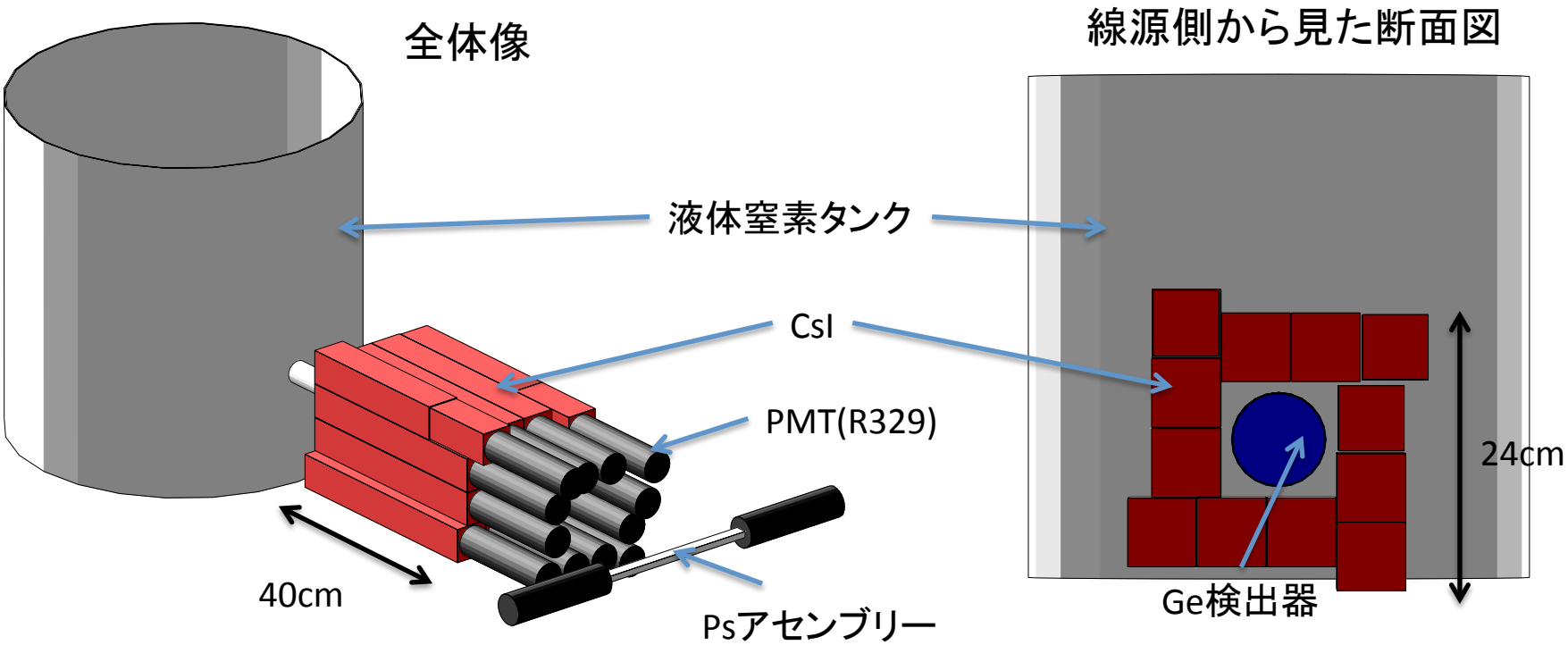
1keV当たりの統計誤差を0.1%以下におさえた精密測定をする

3.1検出器(コンセプト)

エネルギースペクトルを精密測定するために、
分解能の良い半導体Ge検出器を用いる

Geは原子番号が小さく
コンプトン散乱が多い

コンプトン散乱を抑制する為に、Ge検出器の周りをveto検出器で囲み、
veto検出器でエネルギーを落としたイベントをvetoする



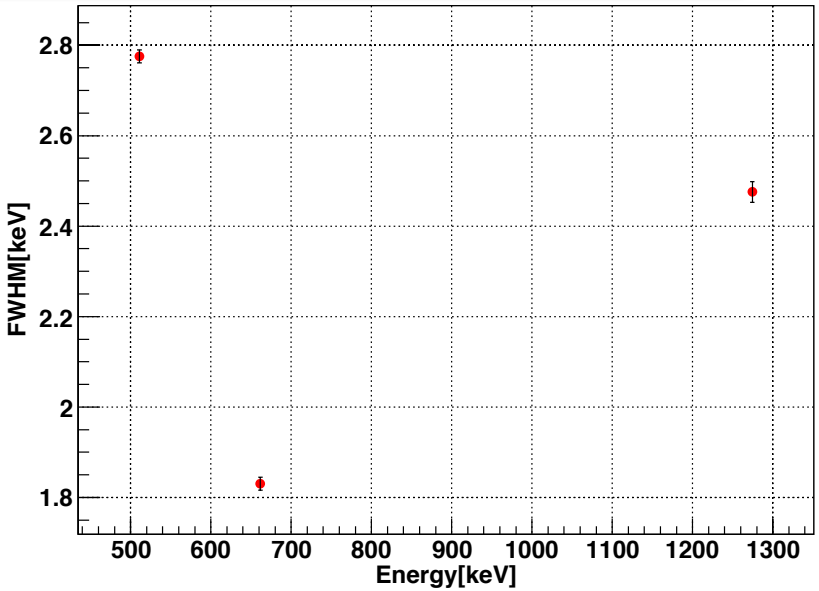
3.2γ線検出器(Ge)

液体窒素タンク

Ge検出器: ϕ60.3×67.4mm

型番: 28-TP10096

Ge検出器でのエネルギー分解能(FWHM)



エネルギー分解能

FWHM=2.78keV @ 511keV

1.83keV @ 662keV

2.47keV @ 1275keV

511keVのγ線はe^+e^-の対消滅によって生成

→e^-のfermi motionにより分解能が高くでる

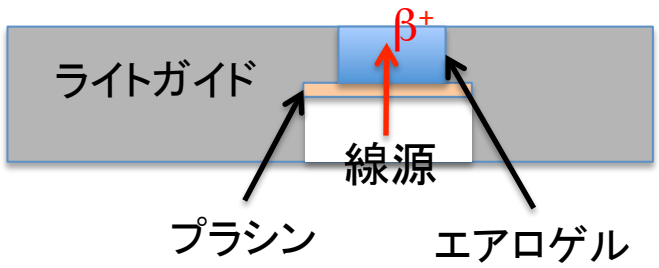
3.3 Ps アセンブリー

- ^{22}Na(380kBq)線源でβ+を生成する。
- プラスチックシンチレータでβ+をタグし、Psの生成時間を求める。

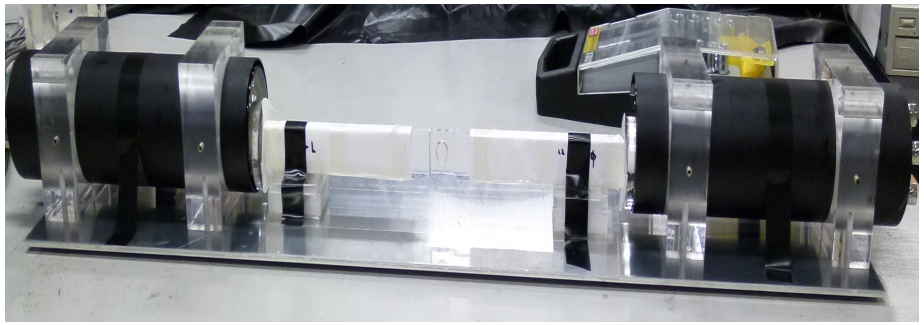
Ge検出器とdelayed coincidenceをとり、o-Psのeventを選択する

- エアロゲル中でo-Ps を生成
- 線源周りは物質を少なくして、ライトガイドで左右のPMTまでのばす
- 2つのPMTでcoincidenceをとる事により、β+を確実にタグする。

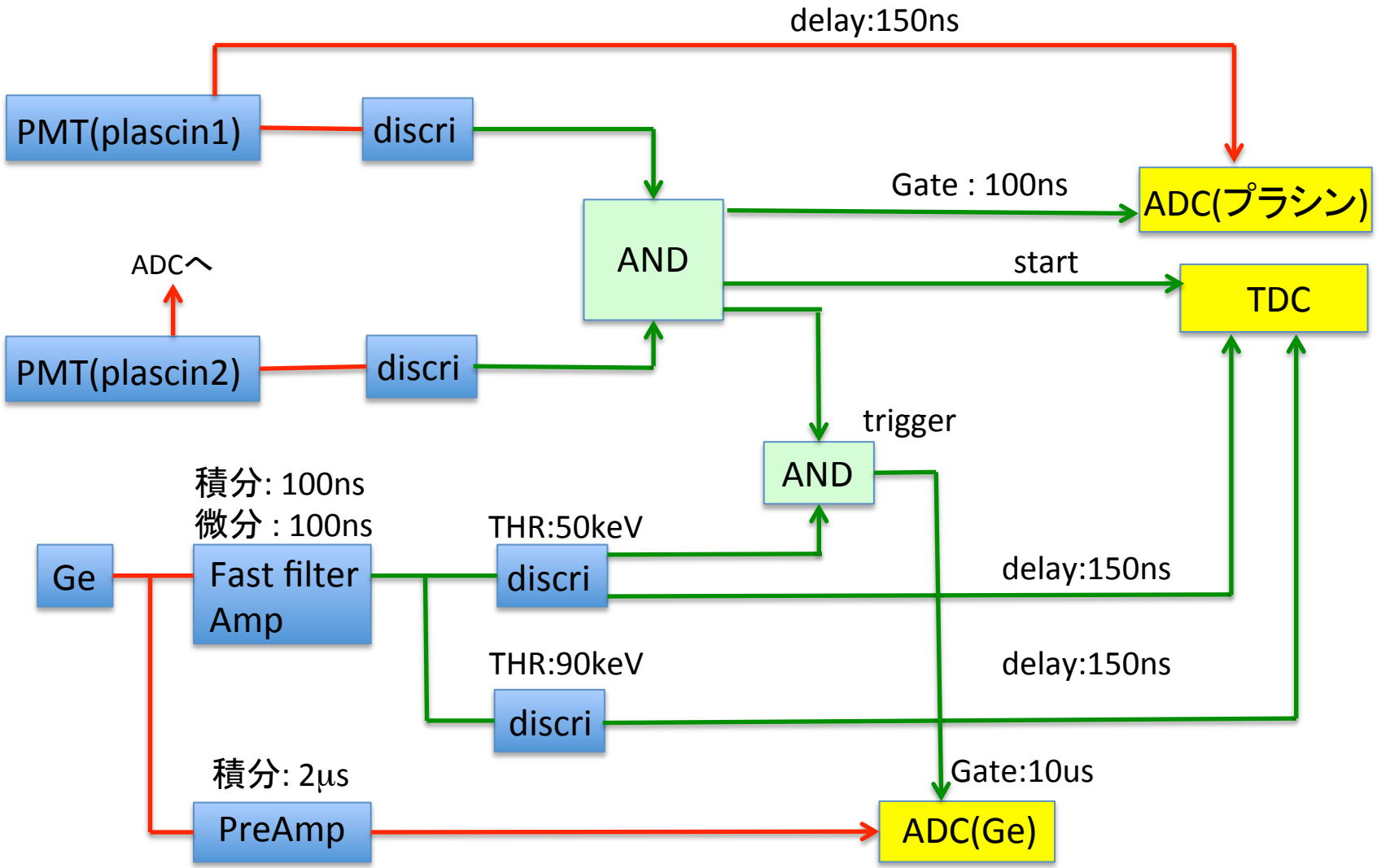
線源周りの断面図



線源周りの写真(上図を下から見た図)



3.4 エレクトロニクス

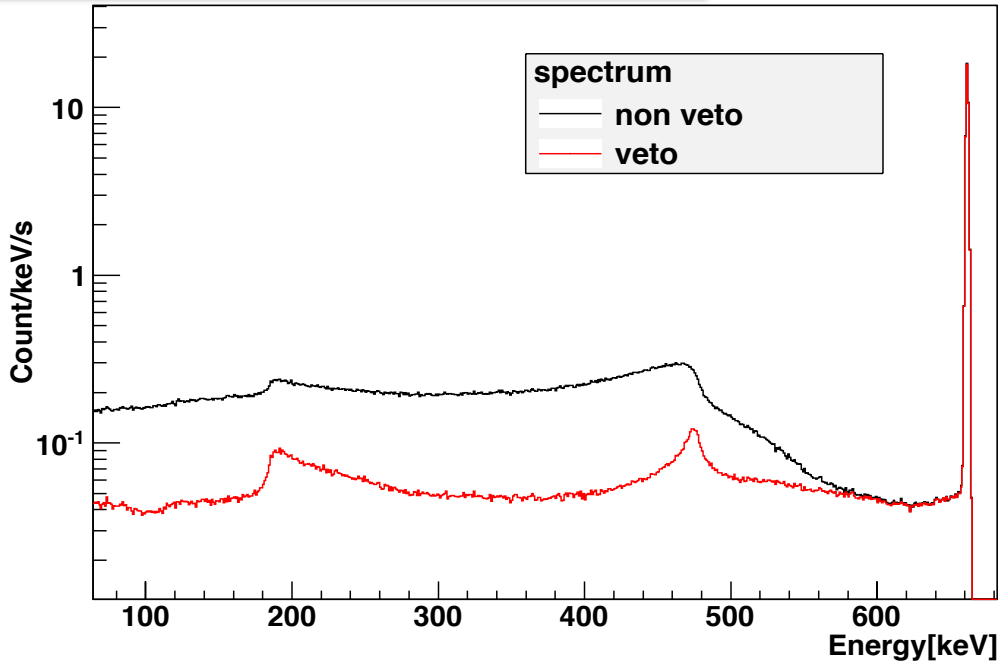

delay:150ns
PMT(plascin1)
discri
Gate : 100ns
ADC(プラシン)
AND
start
TDC
ADCへ
PMT(plascin2)
discri
trigger
AND
積分: 100ns
微分 : 100ns
THR:50keV
Ge
Fast filter Amp
discri
delay:150ns
THR:90keV
delay:150ns
discri
積分: 2μs
Gate:10us
PreAmp
ADC(Ge)

4.1 compton vetoのパフォーマンス

^{137}Csを使い、662keV単色光に対してvetoによりどれだけコンプトン散乱を抑制出来るかテストした

CsIに100keV以上エネルギーがあったらvetoをした。

Ge検出器のエネルギースペクトル



光電吸収(660keV~664keV):
コンプトン散乱(50keV~659keV)

= 1 : 2.67　vetoなし

= 1 : 0.87　vetoあり

Vetoにより、コンプトン散乱を**1/3**に抑制できる

4.2 vetoしきれないイベント

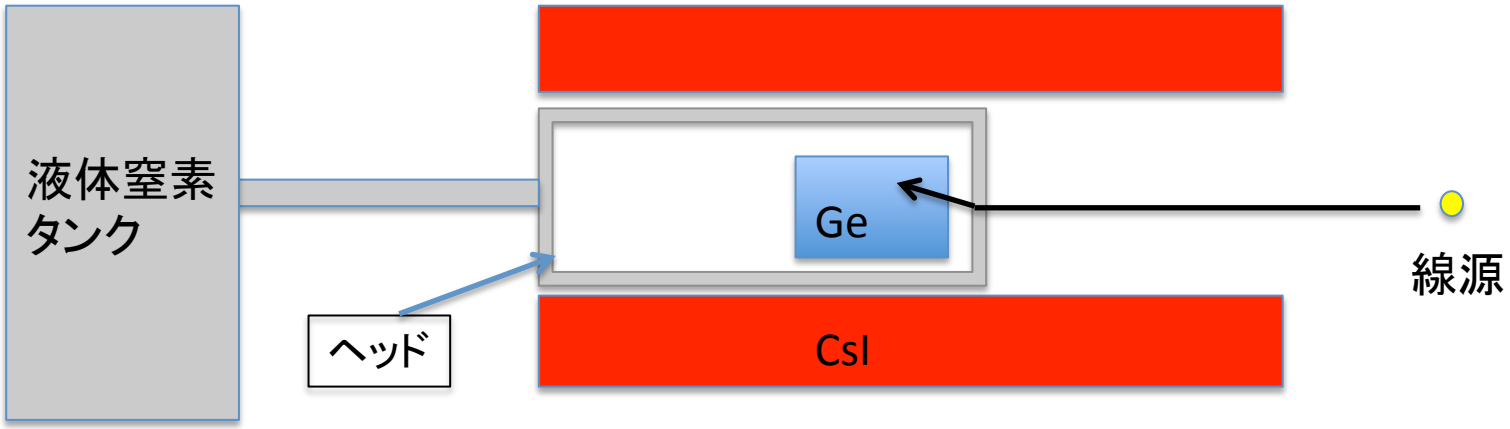
Geant4でvetoしきれないイベントを調べた

Vetoしきれなかったイベントの詳細

前方散乱	後方散乱	Ge検出器内の物質で energy deposit	CsIで100keV以下の energy deposit
6.0%	5.8%	80.6%	7.5%

多くがGe検出器内の物質によるもの。
これ以上veto性能をあげることは難しい。

- Vetoしきれないイベントの例(Ge検出器の不感層でenergy deposit)

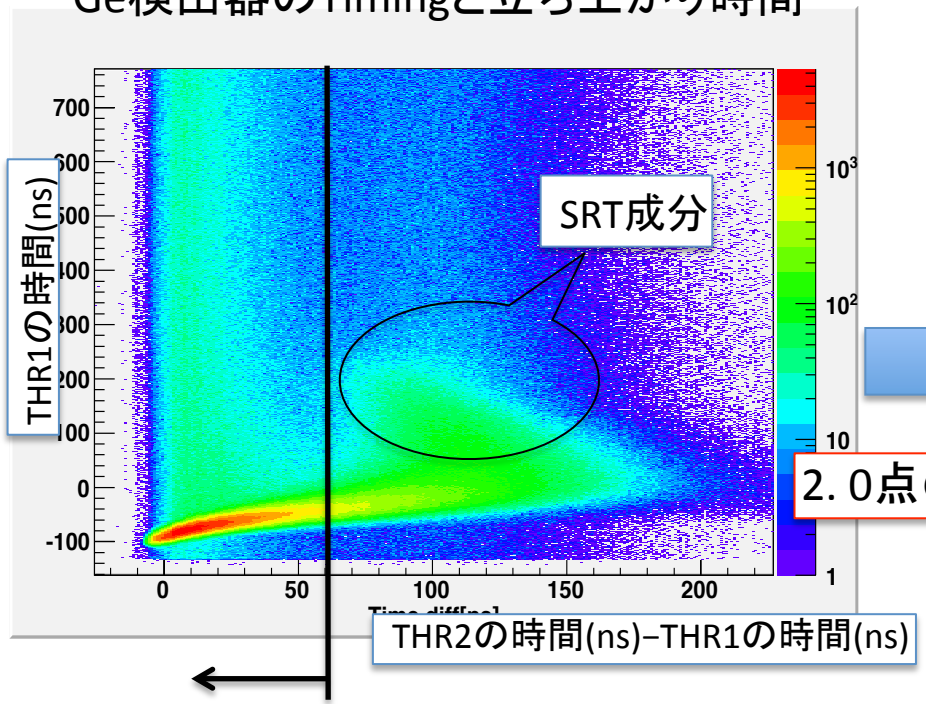


5.1予備測定(Timing)

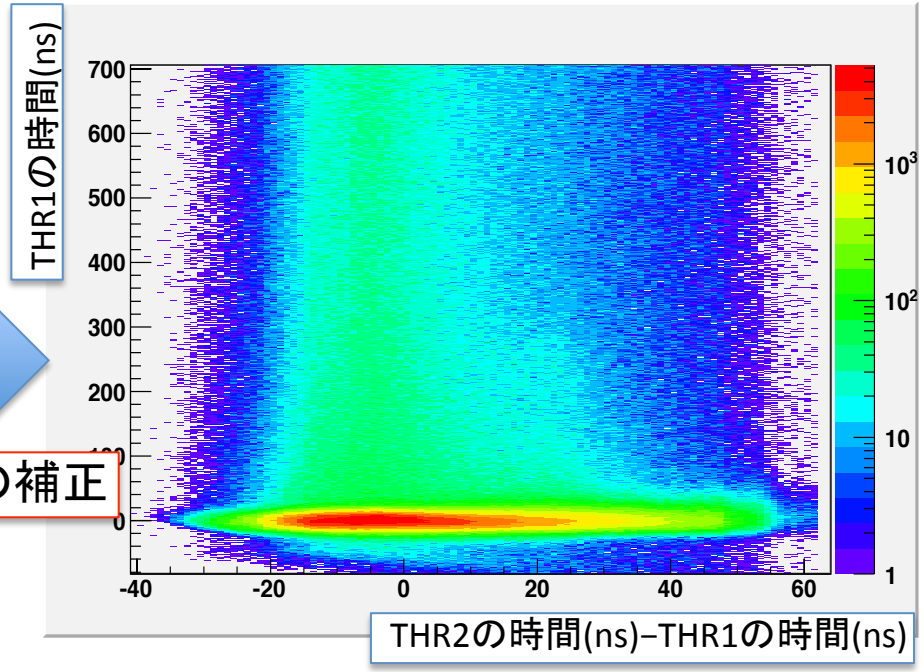
1週間ほど測定を行った

Geのtimingを求める方法

Ge検出器のTimingと立ち上がり時間



2. 0点の補正



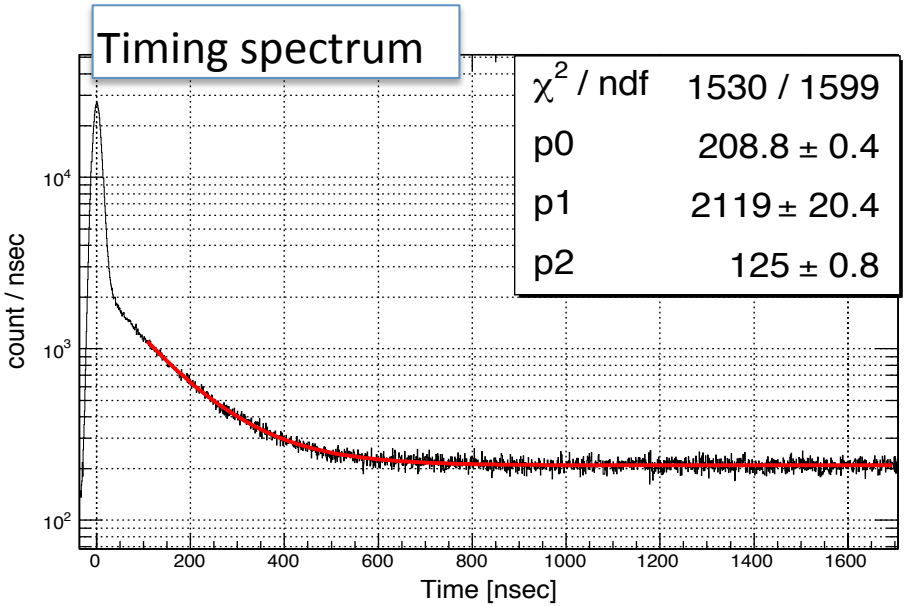
1.SRT(Slow Rise Time) cutによって、
時間差が60ns以下のイベントのみ選択

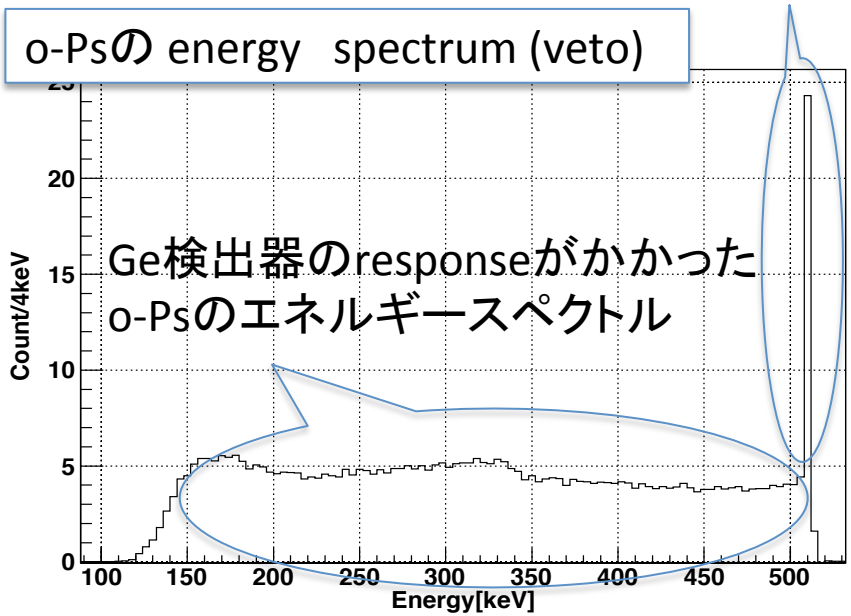
Ge検出器の電場の非一様性による
信号の立ち上がりが遅いイベントをcut

3.Time Walkの補正

5.2予備測定(energy)

- タイミングスペクトルは360keV~507keVでenergy cut
- Delayed coincidence : 100ns ~ 400ns
- エネルギースペクトルはCsIに100keV以上のエネルギーがあったイベントをveto





寿命(暫定):125+/-0.8ns

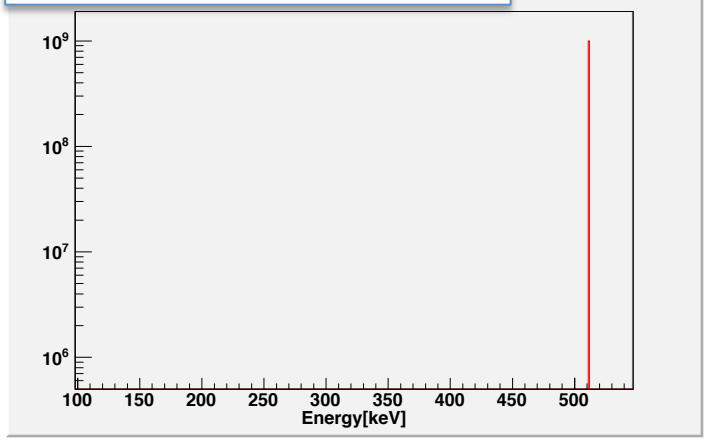
o-Psの検出rate 7Hz

→ **約1年**のrunで精密測定できる

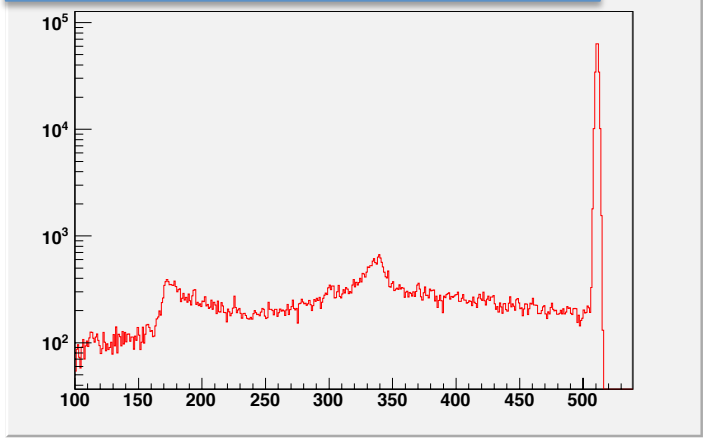
5.3 引き戻し

- 測定されるスペクトルは、検出器のresponseがかかってしまう。

γ線のエネルギー(511keV)



観測されるスペクトル(simulation)



→検出器のresponseがかかったスペクトルから、本来のスペクトルに引き戻す必要がある

→現在シミュレーションによって求めた応答関数を用いての引き戻しを開発中

まとめ

- PsのHFSのずれは未知粒子の存在によって説明することができ、エネルギースペクトルを測定することによって、$10^{-5}\Gamma_{3\gamma}$の感度で検証できる

- Ge検出器を用いて、周りのCsIでvetoをかけることによって、コンプトン散乱を通常の1/3に抑制できる。

- 予備測定のパフォーマンスなら、約1年程度のrunで測定出来る。