

# ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (全体と本測定の準備)

東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大院総合文化<sup>B</sup>, KEK<sup>C</sup>, 福井大遠赤セ<sup>D</sup>

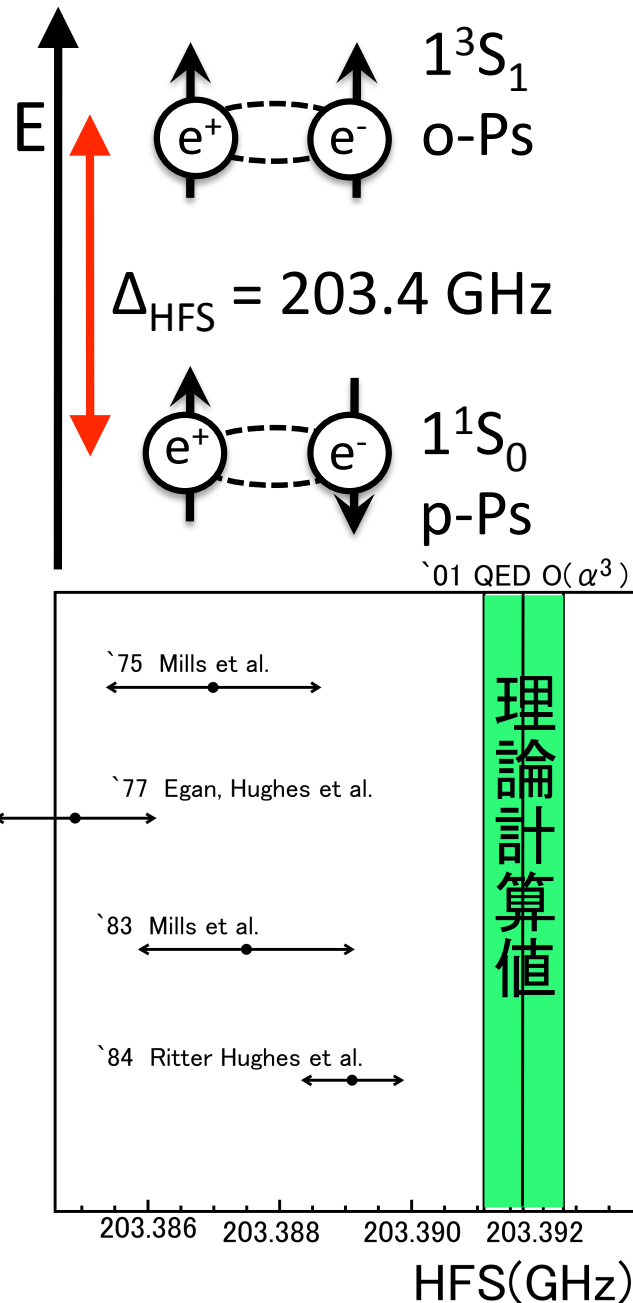
石田明, 秋元銀河, 加藤康作,  
末原大幹<sup>A</sup>, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 小林富雄<sup>A</sup>,  
斎藤晴雄<sup>B</sup>, 吉田光宏<sup>C</sup>, 田中賢一<sup>C</sup>, 山本明<sup>C</sup>,  
小川勇<sup>D</sup>, 小林真一郎<sup>D</sup>, 出原敏孝<sup>D</sup>

2009年3月27日 日本物理学会第64回年次大会 於立教大学

# 概略

- ポジトロニウムの超微細構造
- Zeeman効果を用いた間接測定の方法
- 過去の実験と問題点
- 我々の新しい実験
- 検出器
- テスト実験とその解析
- 本測定へ向けて
- まとめ

# ポジトロニウムの超微細構造(HFS)



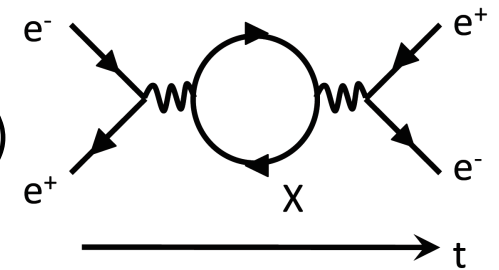
ポジトロニウムの基底状態

スピン平行( $S=1$ )な o-Ps と スピン反平行( $S=0$ )な p-Ps のエネルギー準位差( $\Delta_{\text{HFS}}=203 \text{ GHz} = 0.84 \text{ meV}$  (ミリ波))。

H (21cm = 1.4 GHz) より遙かに大きい(質量、量子振動)。

なぜ重要か？

1. 束縛系 QED の精密検証 (レプトンのみのクリーンな系)
2. 未知の物理現象にsensitive (s-channel が有効)



実験的には、1970-80s を中心に測定され、

**3.6 ppm の精度**で求まっている

(203.38910(74) GHz)。

近年、 $O(\alpha^3)$ のQED計算が可能になり、

**測定値と計算値が一様にずれている ( $3.5\sigma$ )**

ことを確認。

-> 実験も計算も正しいなら、

**標準理論を超えた新しい物理**を示唆。

-> 新しい実験でより精密に測定して検証する。

# Zeeman効果を用いた間接測定の方法

$\Delta_{HFS}$  (203.4 GHz) で直接遷移させるのは昔は難しかった。

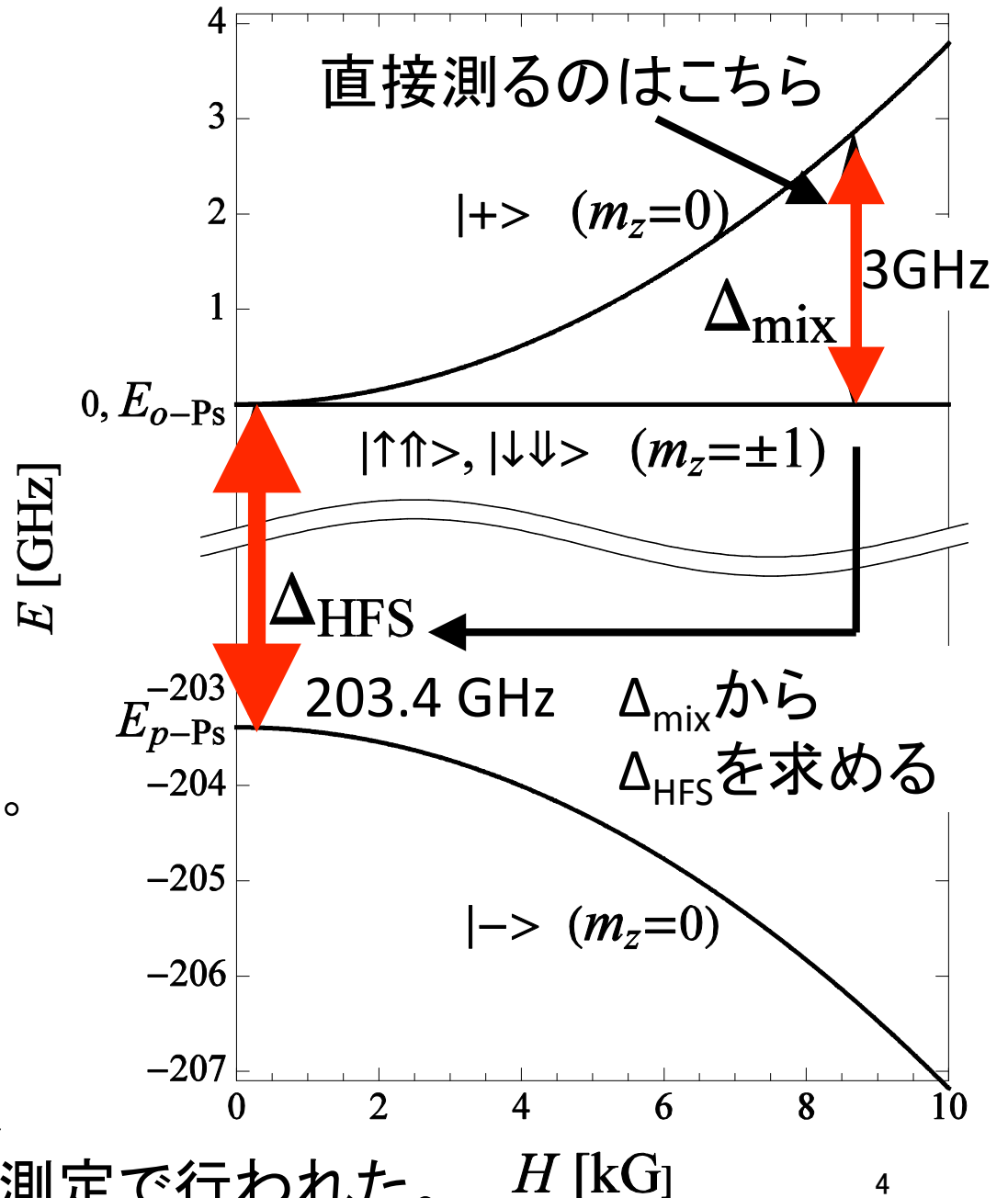
磁場をかけると、  
o-Psの( $S=1, m_z=0$ )と  
p-Ps( $S=0, m_z=0$ )が混合し  
エネルギー準位が分裂  
(Zeeman 効果)

$\Delta_{mix}$  は、9 kG 程の磁場中で  
約 3 GHz  $\rightarrow$  マイクロ波なので  
大強度での利用が十分可能。  
 $\rightarrow$  この遷移を起こさせると $2\gamma$ 崩壊の  
確率が高くなることを利用して測定。

$$\Delta_{mix} = \frac{1}{2} \Delta_{HFS} \left( \sqrt{1 + x^2} - 1 \right)$$

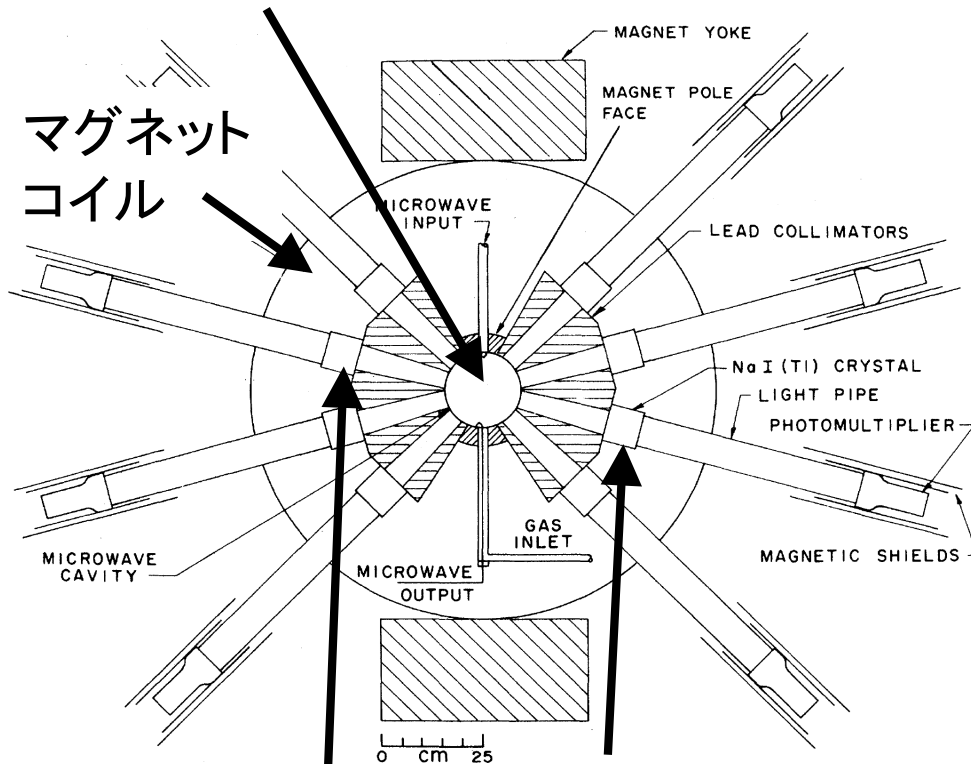
$$x = \frac{2g'\mu_B H}{\Delta_{HFS}}$$

から $\Delta_{HFS}$ を求める。  
 $\rightarrow$  過去の実験は  
すべてこの間接測定で行われた。



# 過去の実験と問題点

RF Cavityにガスを入れて  
 $\beta^+$ 線からポジトロニウムを生成



NaI(Tl)シンチレータで  
Back-to-backに測定

「磁石の神様」V. ヒューズらの  
実験セットアップ(70年代)

## 問題点1. 磁場の非一様性

磁場の不定性がそのまま  
測定結果の主な系統誤差に。

一方、ポジトロニウムの  
生成領域は数cmに及ぶ。

-> 大きなサイズでppm精度での  
磁場制御は非常に困難。

## 問題点2. 物質の効果

過去の実験では、物質の効果  
(Psの熱化過程)を正しく評価せず。

90年代、「オルソポジトロニウムの  
寿命問題」で、この効果が  
深刻な系統誤差を生むことを  
我々が示した。

# 我々の新しい実験 1 (実験2は難波がお話します。)

## Zeeman効果を用いた間接測定

過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。

### ・大型超伝導磁石

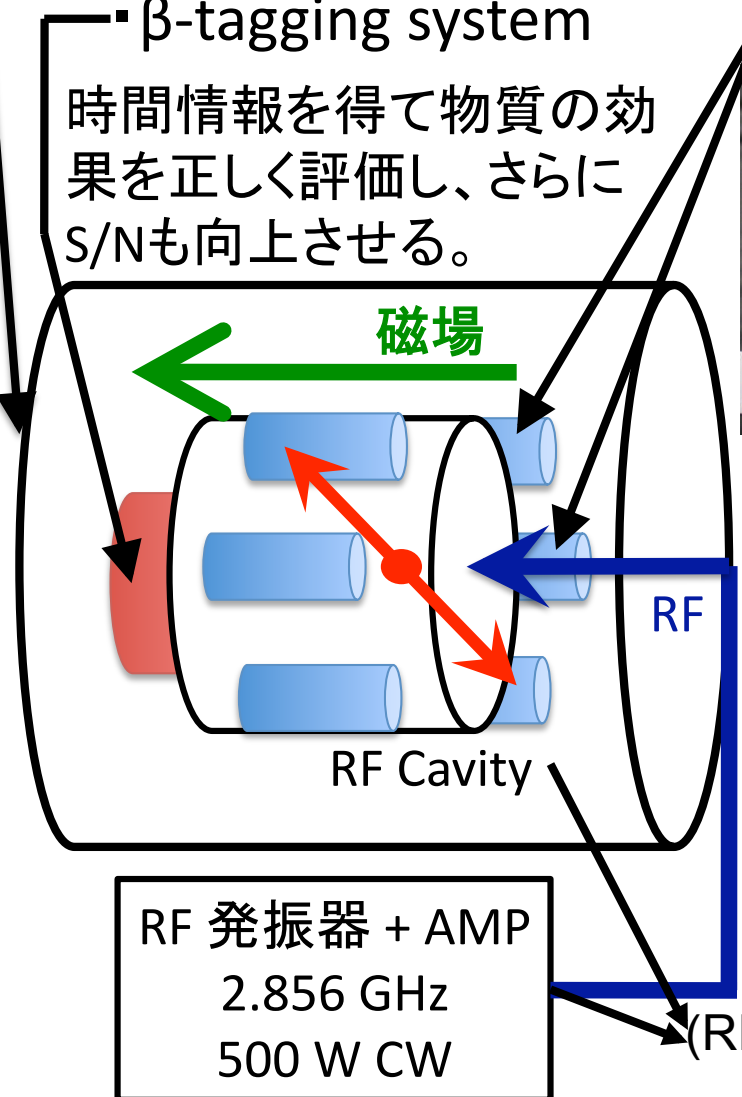
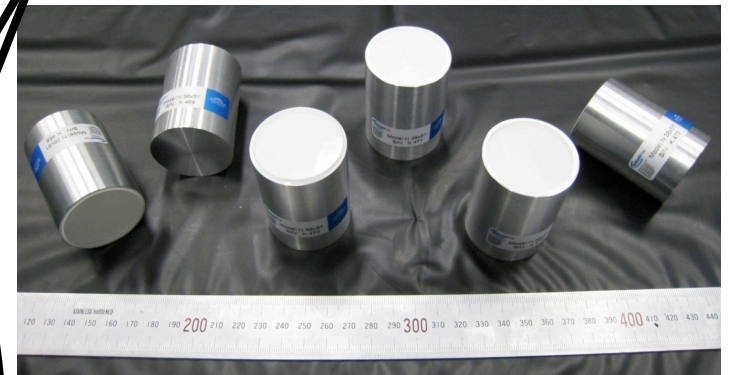


KEK低温センターにあるボア径800mmの大型超伝導磁石で、広い領域でO(ppm)の一様性を得る。

### ・ $\beta$ -tagging system

時間情報を得て物質の効果を正しく評価し、さらにS/Nも向上させる。

### ・ガンマ線検出器

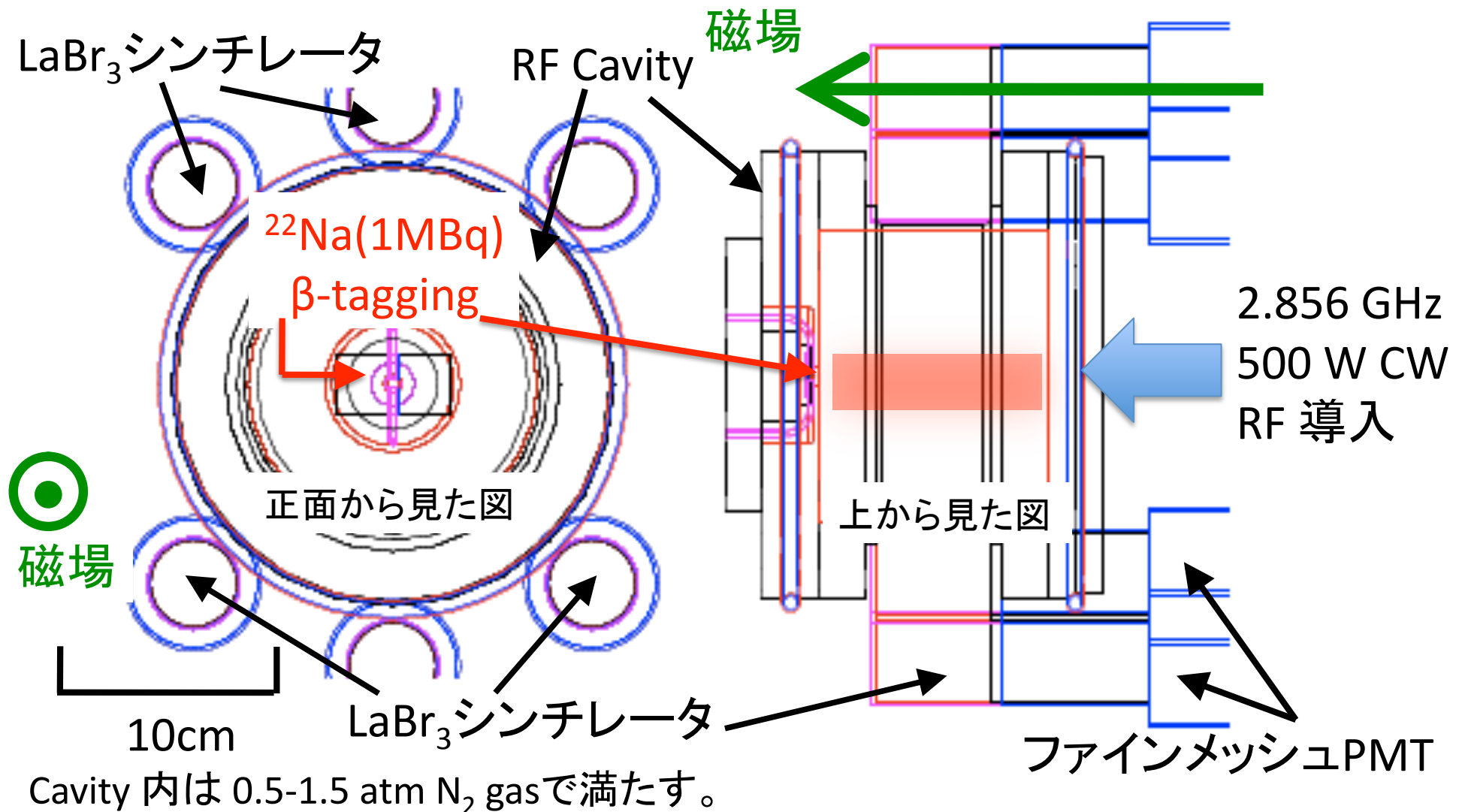


4 % FWHM @ 511 keV の高いエネルギー分解能、  
200 ps FWHM @ 511 keV の高い時間分解能、  
20 ns の速い時定数をもつ LaBr<sub>3</sub>(Ce) シンチレータを使い、新しい2 $\gamma$ -taggingで高統計の実験を行う。

(RF関係は秋元がお話します。)

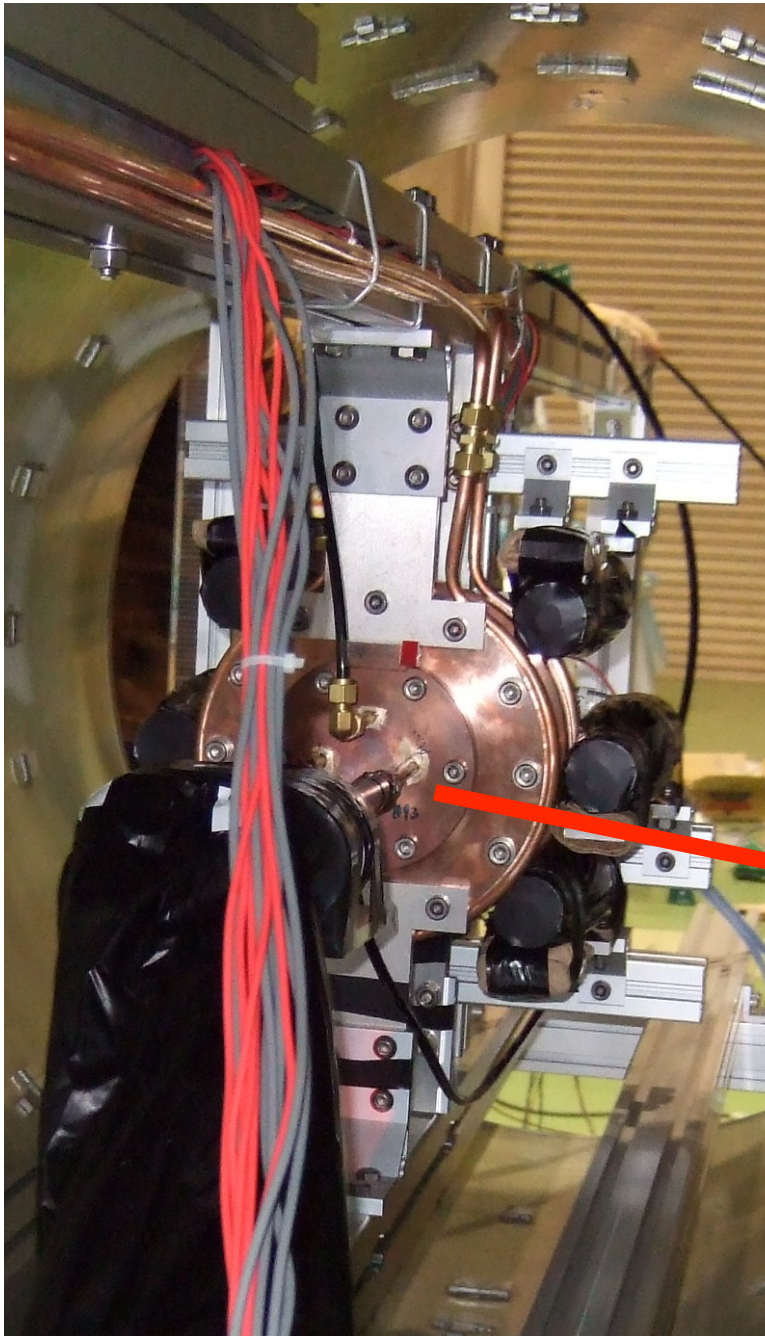
# 検出器 (中心部分)

ファインメッシュPMTを用いて、高磁場中での実験を可能にする。分解能(エネルギー、時間)への磁場の影響を最小限に抑えるため、PMTは磁場と平行に設置。





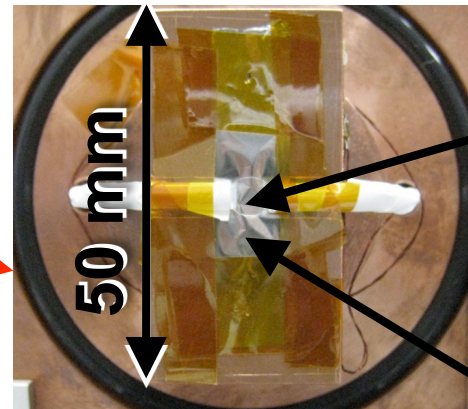
# テスト実験



昨年11月半ばから約1ヶ月間、  
KEK低温センターにてテスト実験を実施。

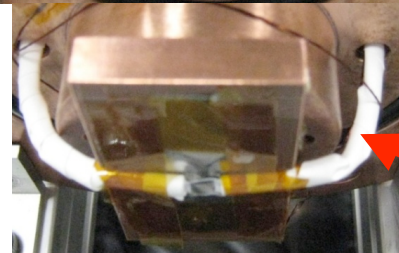
On-resonance (0.866 T) および  
Off-resonance (on-resonanceから十分  
(60Gauss)離れた点)の2点で  
RF - ON / OFF で測定を行った。

内側(拡大)  
 $\beta$ -tagging system



プラスチック  
シンチレーション  
ファイバー( $\phi$  2 mm)  
(中央部は t 200  $\mu$ m,  
 $\phi$  4 mmに潰してある)

上から



Ti ホイル (16 $\mu$ m)の  
奥に線源 ( $^{22}\text{Na}$ )

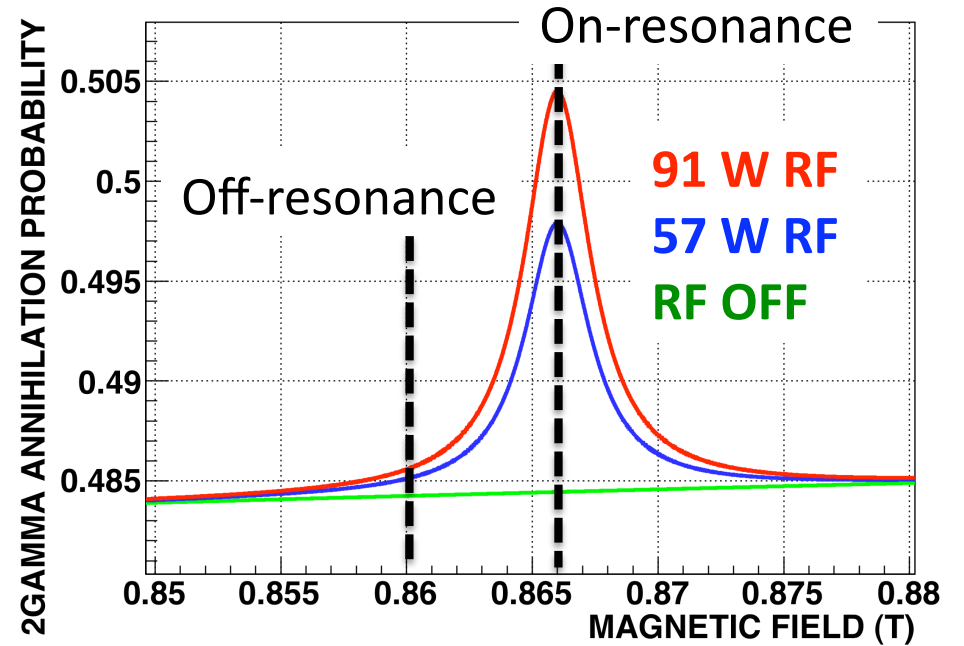
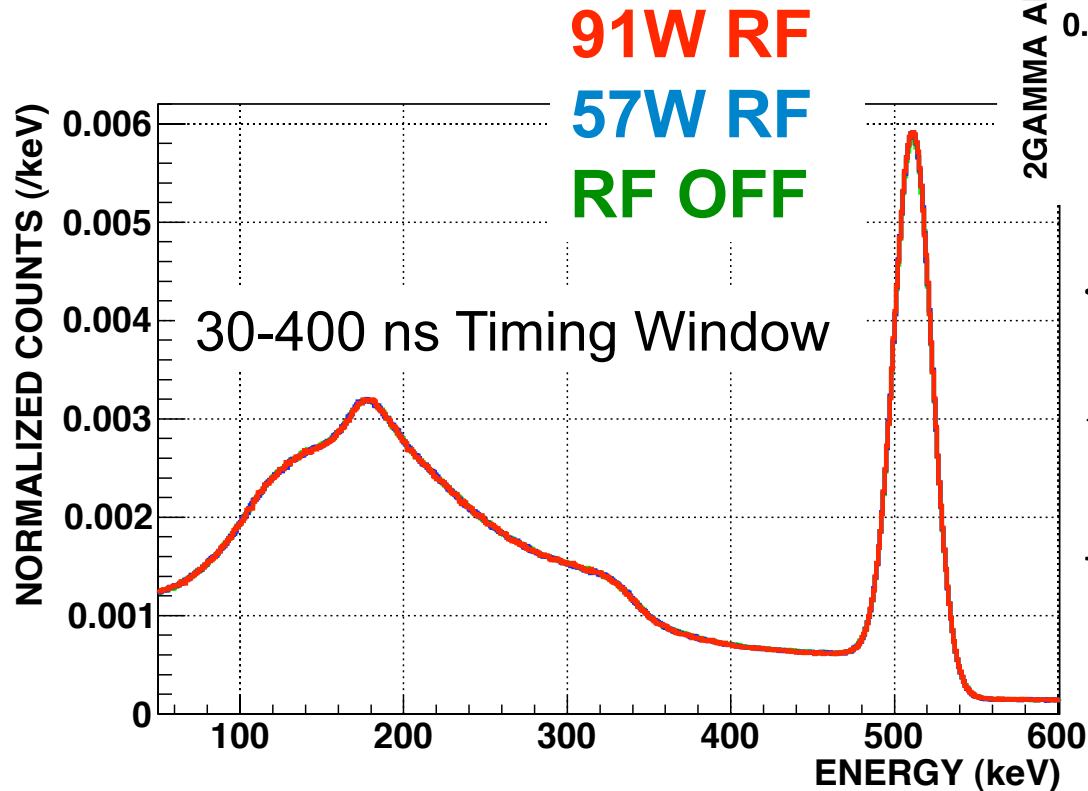
90度曲げて外へ。  
PMTで光量を測定



# テスト実験の解析(1)

2 $\gamma$ 崩壊の確率が、RF (2.856 GHz) を入れることで、0.866 T (On-resonance) で高くなる。テスト実験では、57 W と 91 W のRFパワーについて測定。

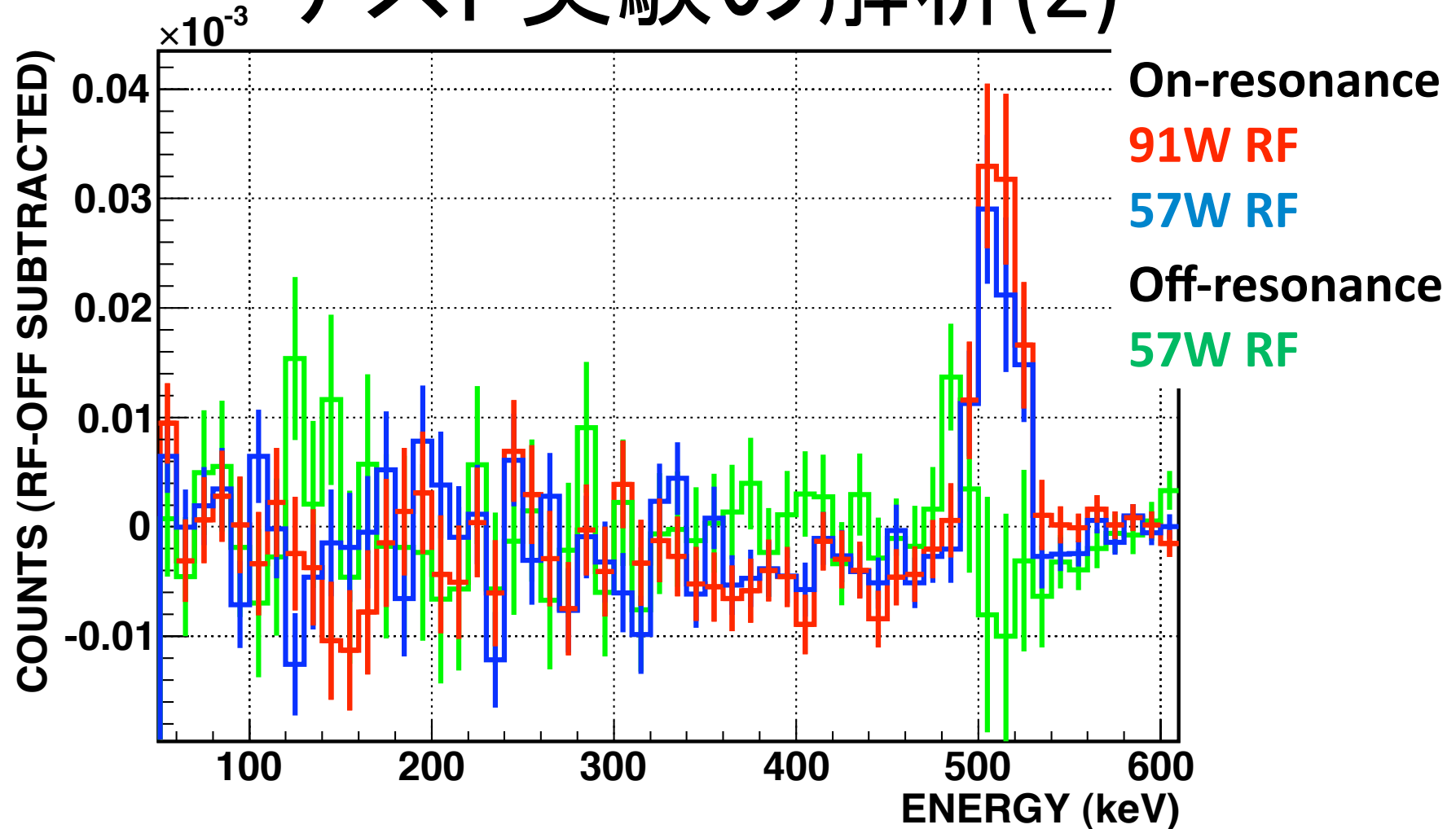
On-resonanceではパワーに比例して、2 $\gamma$ 崩壊による511 keV のrateが上がるのが期待される。



<- On-resonance での、LaBr<sub>3</sub>シンチレータで得られた $\gamma$ 線エネルギースペクトルの比較 (Timingカット後)。

- > ・ RF ON と RF OFF の差分を見る。  
・ 511  $\pm$  60 keV のイベント割合を比較する。

# テスト実験の解析(2)



RF ON の $\gamma$ 線エネルギースペクトルからRF OFF の $\gamma$ 線エネルギースペクトルを差し引いたもの。  
On-resonanceでのみ、RFパワーに比例して、511 keV のrateが有意に上がっている。

# テスト実験の解析(3)

On-resonanceでの比較条件	511 ± 60 keV イベント割合の比較	Excess by $\sigma$
57 W RF / RF OFF	1.00370(74)	5.0
91 W RF / RF OFF	1.00530(80)	6.6
91W RF / 57W RF	1.43(30)	1.4

- Excess が確認された。
- Excess は RF パワーにほぼ比例

→ **遷移を確認**

2 $\gamma$  遷移確率に換算すると、

2.07 ± 0.91 % @ 57 W

2.4 ± 1.0 % @ 91 W

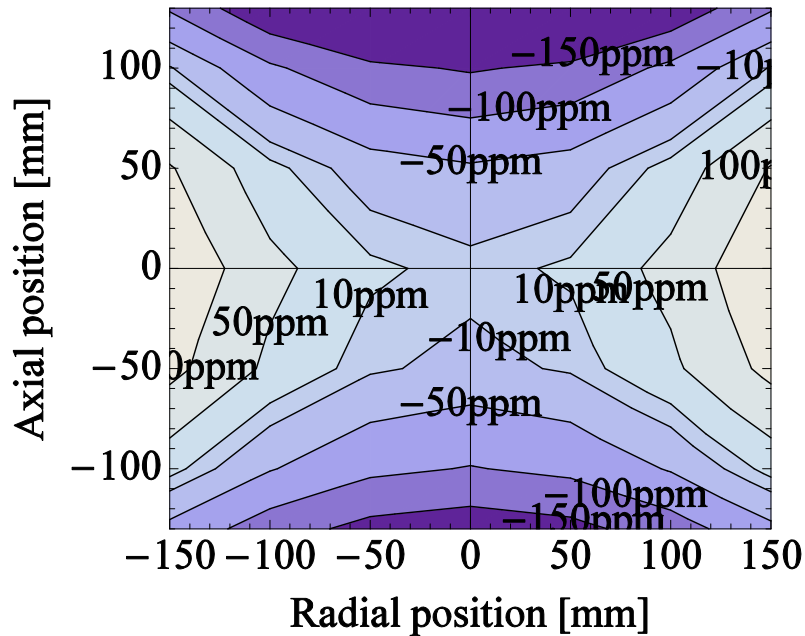
500 W RF を入れたとき、

**15 ± 5 %**

の遷移が期待される。

# 本測定へ向けて

## 補償磁石の設計



<-実験に使用するKEK低温センターの大型超伝導磁石では、補償磁石なしで、10 cmの広い領域で70 ppmの一様性が得られている。

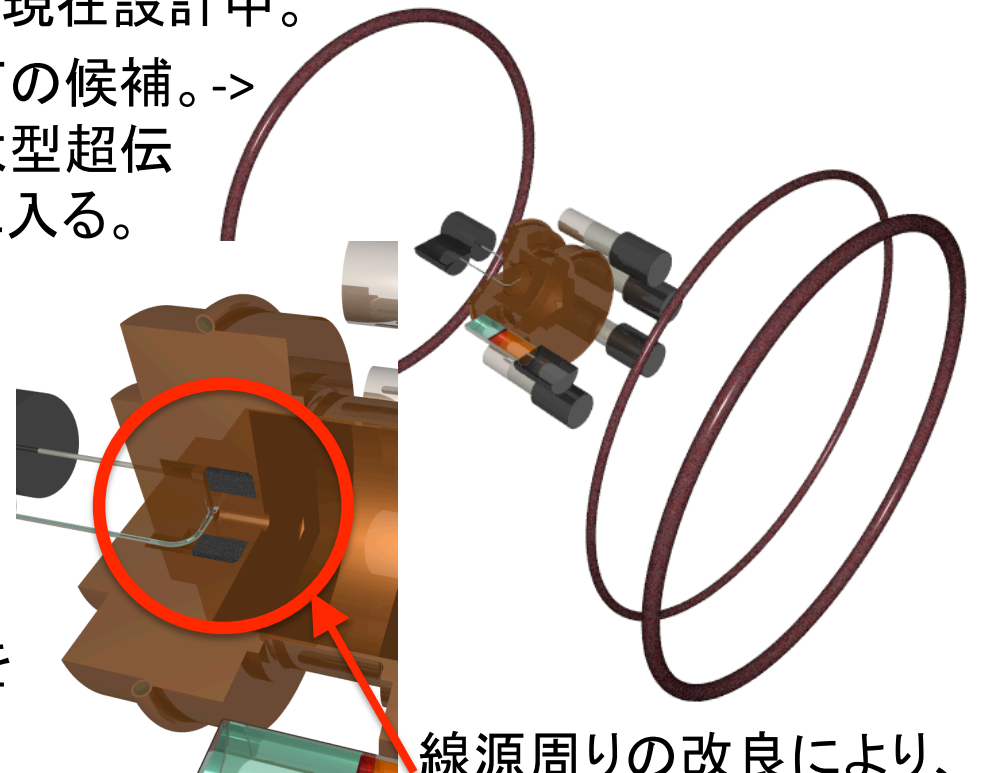
->これを0(ppm)の一様性まで高めるため、補償磁石を現在設計中。

補償磁石の候補。->  
全体が大型超伝導磁石に入る。

## RF Cavity、ガンマ線検出器の改良

テスト実験では、アクシデンタルが多く、効率的に統計をためられなかった。

->アクシデンタルを減らすための改良をするべく、設計中。



線源周りの改良により、アクシデンタルを減らす。

-> これらを設計・製作、5月に0(10ppm)でのHFS測定を目指す。

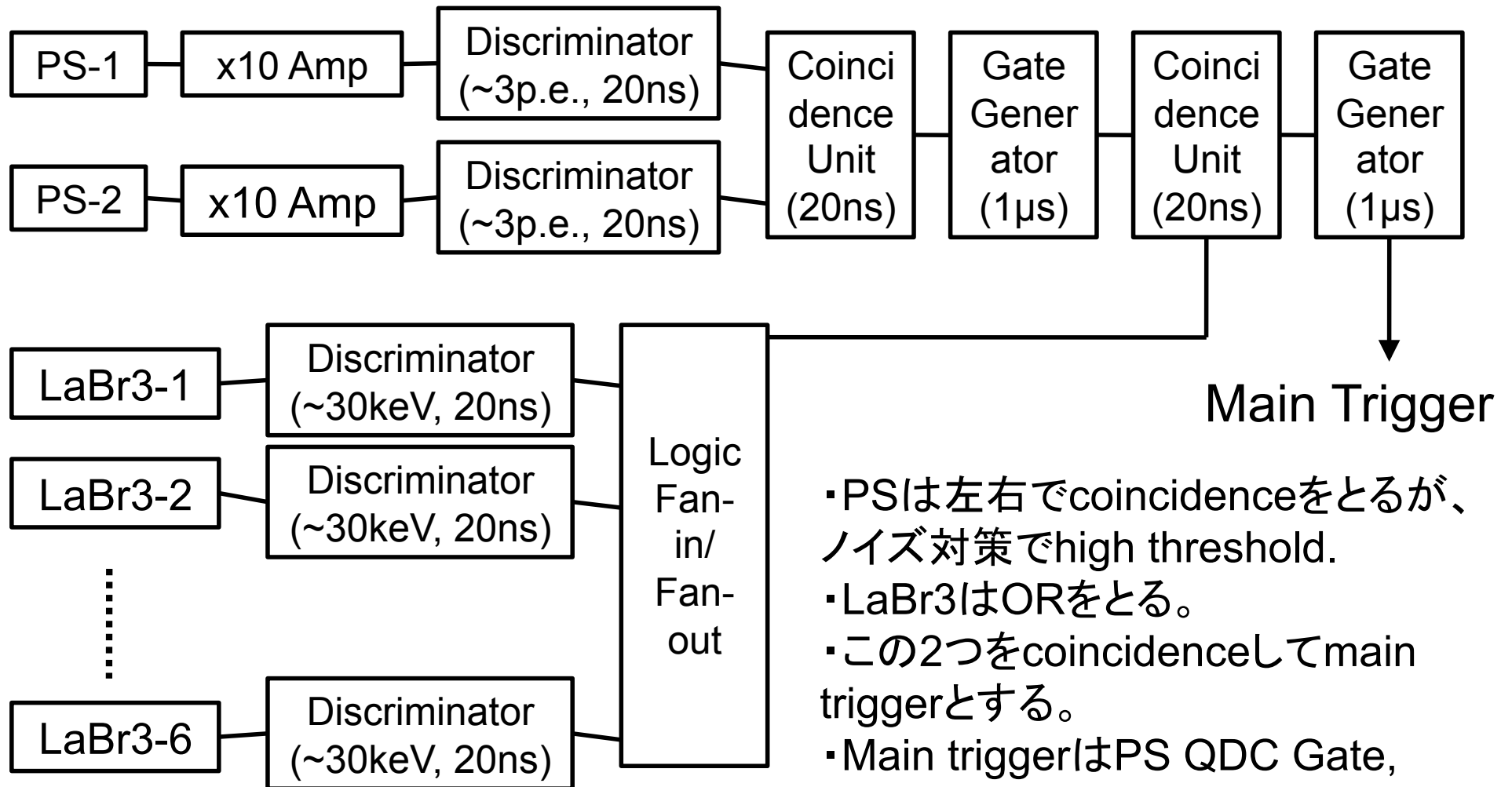
# まとめ

- ポジトロニウムは、レプトンのみで構成された極めてクリーンな系であり、束縛系QEDの精密検証や未知の物理現象の探索に適している。
- ポジトロニウムの超微細構造(HFS)は、実験値とQED理論計算値が一樣にずれており、その解明をすべく、我々は新しい実験を行う。
- 過去の実験における問題点として、磁場の非一樣性、物質の効果が挙げられる。
- 問題点に対処するための新たな手法
  1. 大型超伝導磁石で磁場の一樣性を確保
  2. 時間情報を取得することで物質の効果を正しく評価
  3. 高性能ガンマ線検出器によって高統計の実験
- テスト実験により、On-resonanceでの遷移を確認した。
- 磁場の一樣性を高めるとともに、RF Cavityやガンマ線検出器の設計を改良し、5月に $O(10\text{ppm})$ の測定を目指す。



# Backup

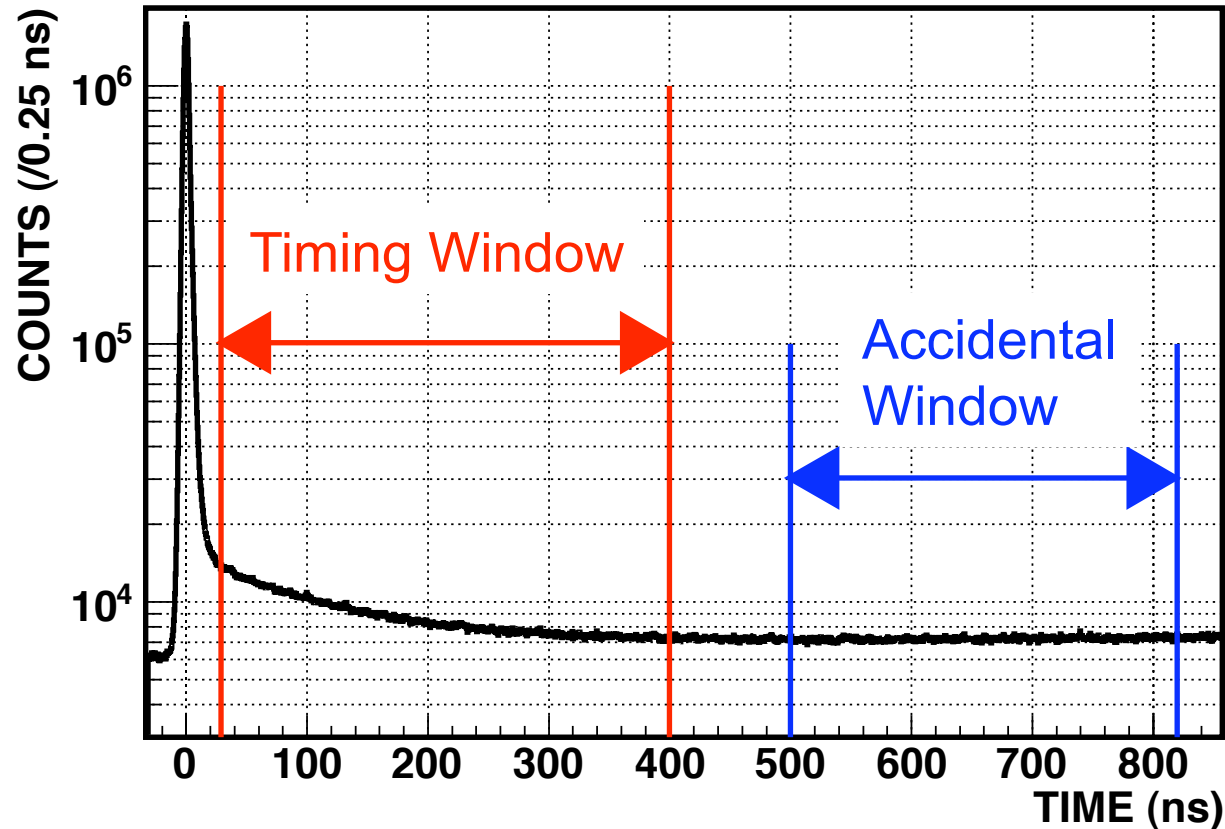
# DAQ 概略 (LaBr3 single & PS coincidence)



・それぞれDiscriの出力をTDC stopに入れ、PSはアンプ後、LaBr3はLinear Fan-in/outで分けた出力をQDCへ。

- ・PSは左右でcoincidenceをとるが、ノイズ対策でhigh threshold.
- ・LaBr3はORをとる。
- ・この2つをcoincidenceしてmain triggerとする。
- ・Main triggerはPS QDC Gate, TDC Startに使われ、時間幅を短くしてLaBr3 QDC, LaBr3 baseline QDC の GATE.

# 2 $\gamma$ 遷移確率の算出(1)



① Accidental Window (500 – 820 ns) のエネルギースペクトルを、Timing Window (30 – 400 ns) のエネルギースペクトルから引く。  
(Normalization は Window 幅と、Accidental rate (93 kHz) 及び Cutting efficiency (87 %) を使って行う。)

② ①で作ったエネルギースペクトルに対し、  
( $511 \pm 60$  keV ( $\sim 5\sigma$ ) rate) / (50 – 1375 keV で  $511 \pm 60$  keV 以外 rate)  
なる比を算出する。

# 2 $\gamma$ 遷移確率の算出 (2)

- ③ ①で残ったのは Exponential 成分のみで、Timing Window をかけているので、陽電子が止まってから何らかの(Ps生成など)形で崩壊する(2 $\gamma$ , 3 $\gamma$ )もののみと考えられる。

そこで遷移なしのときの 2 $\gamma$ , 3 $\gamma$  のうち、検出器にかかる個数の比を、  
 $2\gamma : 3\gamma = q : (1 - q)$  とおく。

- ④ MC Simulation を用いて、2 $\gamma$ , 3 $\gamma$ 崩壊のエネルギースペクトルを作成し、  
511  $\pm$  60 keV が全体 (50-1375 keV) に占める割合を求める。  
これを2 $\gamma$ , 3 $\gamma$  それぞれ $\beta, \alpha$ とする。

- ⑤ 以上を用いれば、②で作った比(遷移のないときを  $x_{OFF}$  とする)は、

$$x_{OFF} = \frac{(1 - q)\alpha + q\beta}{(1 - q)(1 - \alpha) + q(1 - \beta)} \quad (1)$$

とかける。これより

$$q = \frac{(1 + x_{OFF})\alpha - x_{OFF}}{(1 + x_{OFF})(\alpha - \beta)} \quad (2)$$

# 2 $\gamma$ 遷移確率の算出 (3)

- ⑥ さらに、遷移が起きているときの②の比を  $x_{ON}$  とする。  
3 $\gamma$  崩壊の内、遷移によって 2 $\gamma$  になるものの確率を  $p$ 、  
2 $\gamma$ と2 $\gamma$ の検出効率比を  $\varepsilon \equiv \frac{\varepsilon_{2\gamma}}{\varepsilon_{3\gamma}}$  とすれば、

$$x_{ON} = \frac{(1-q)(1-p)\alpha + (q + \varepsilon p(1-q))\beta}{(1-q)(1-p)(1-\alpha) + (q + \varepsilon p(1-q))(1-\beta)} \quad (3)$$

- ⑦ (2), (3) から、求める  $p$  は、

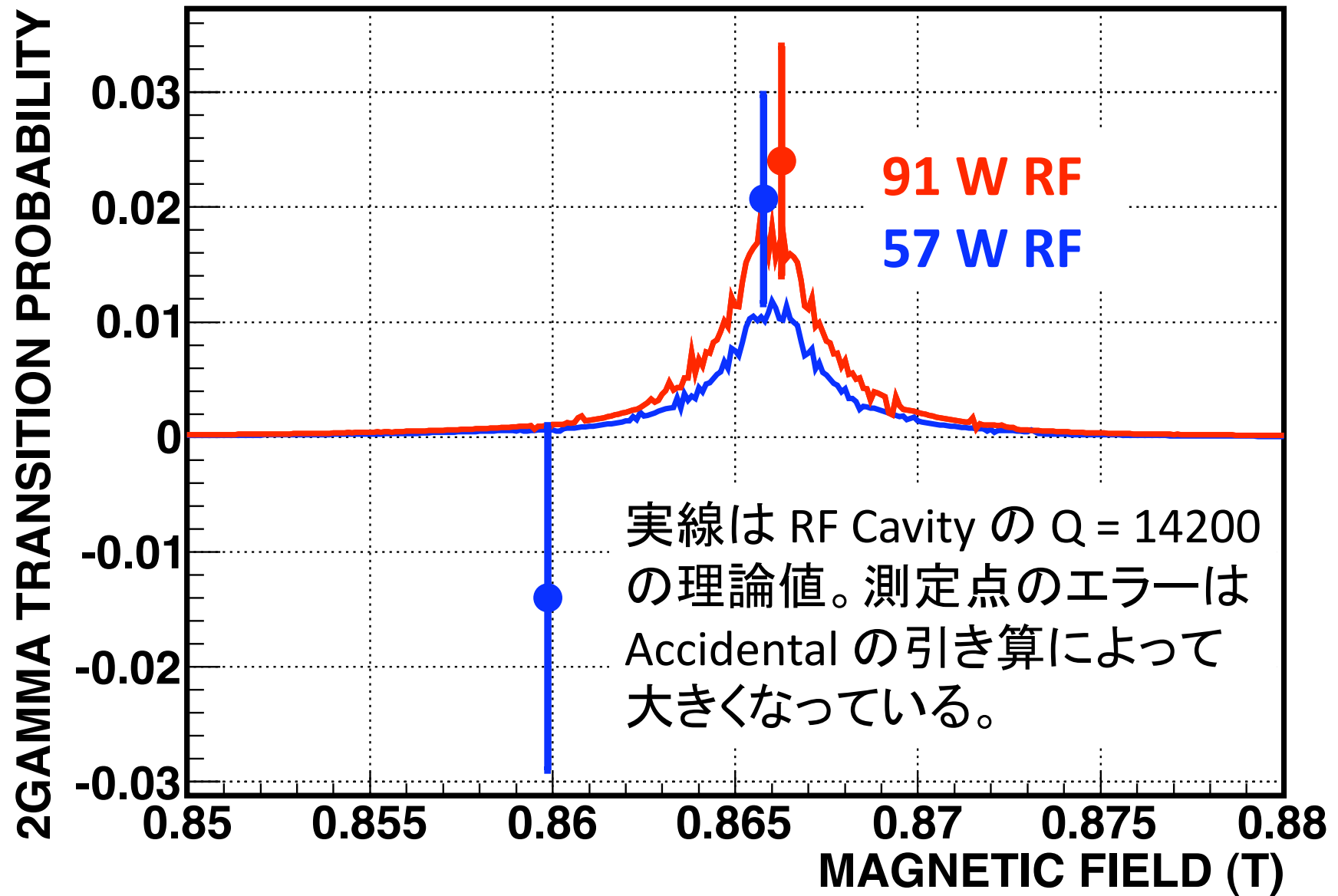
$$p = \frac{(x_{ON} - x_{OFF})(\alpha - \beta)}{\left[ \alpha - \varepsilon\beta - x_{ON} \{1 - \alpha - \varepsilon(1 - \beta)\} \right] \{ \beta(1 + x_{OFF}) - x_{OFF} \}} \quad (4)$$

- ⑧ なお、(2)は検出効率を含んでいるので、求めたい  $q'$  に直す。

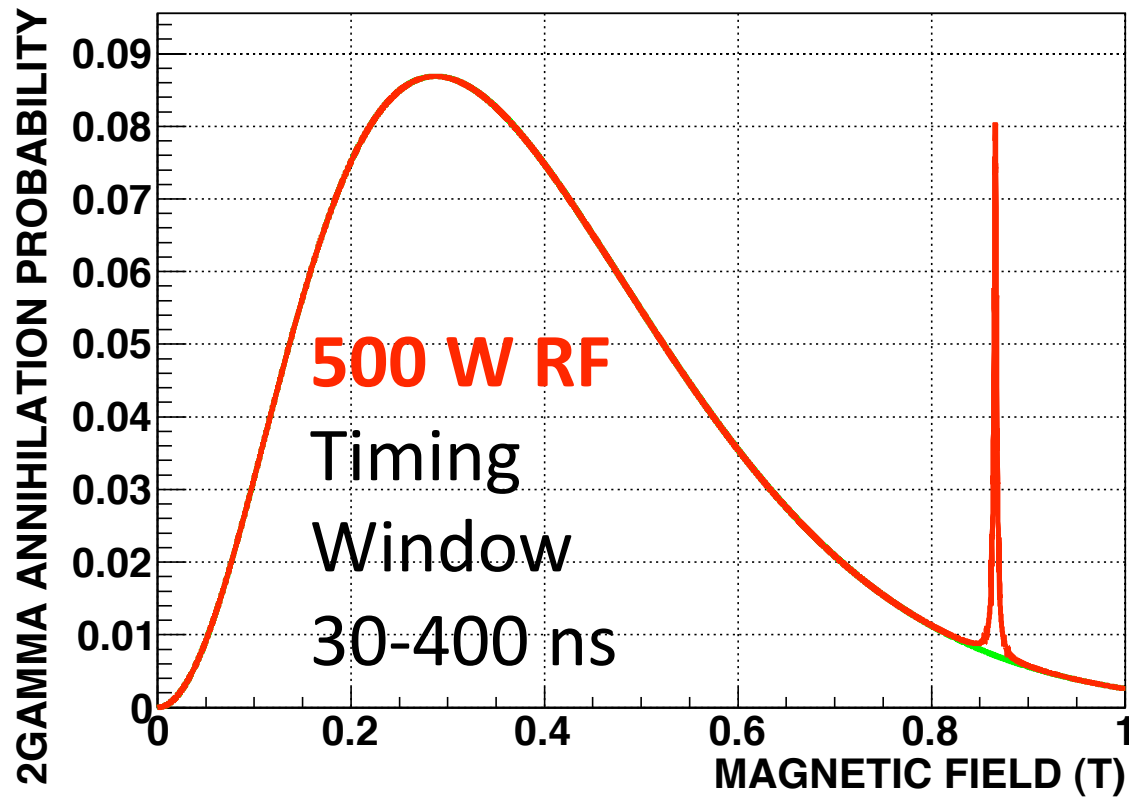
$$q' = \frac{q}{q + \varepsilon(1 - q)} \quad (5)$$



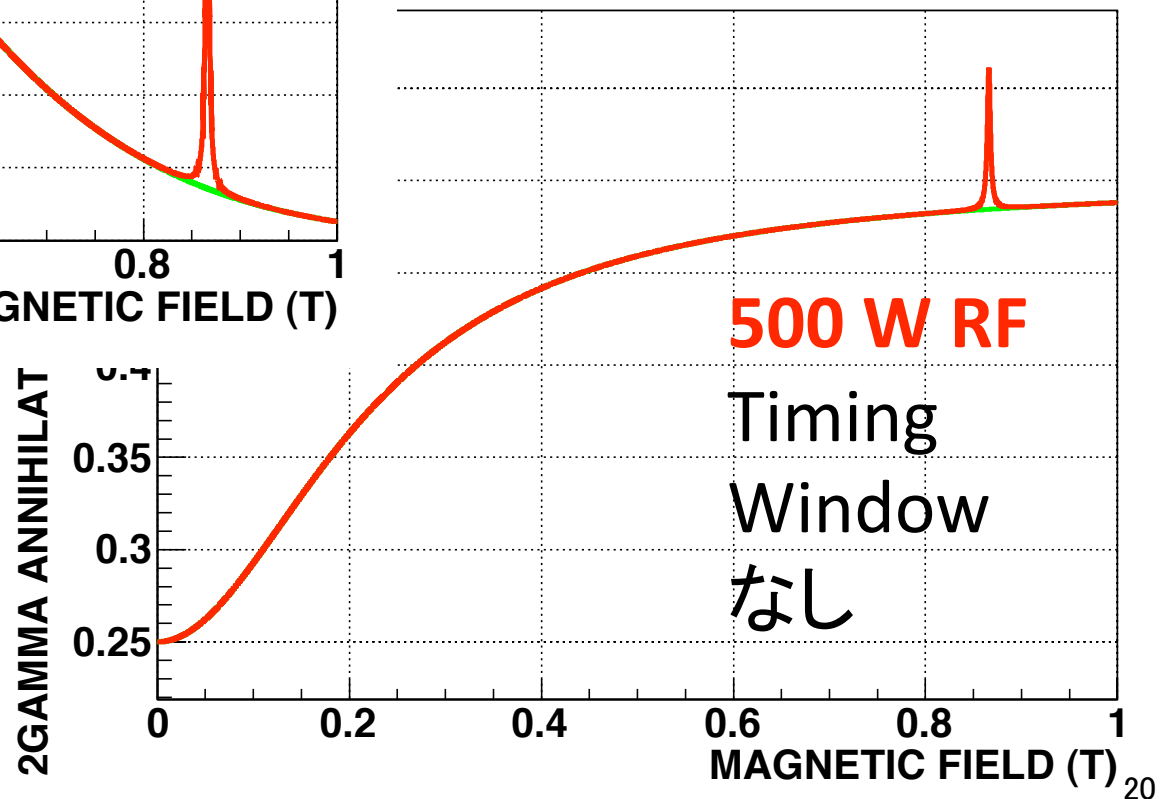
# 2 $\gamma$ 遷移確率



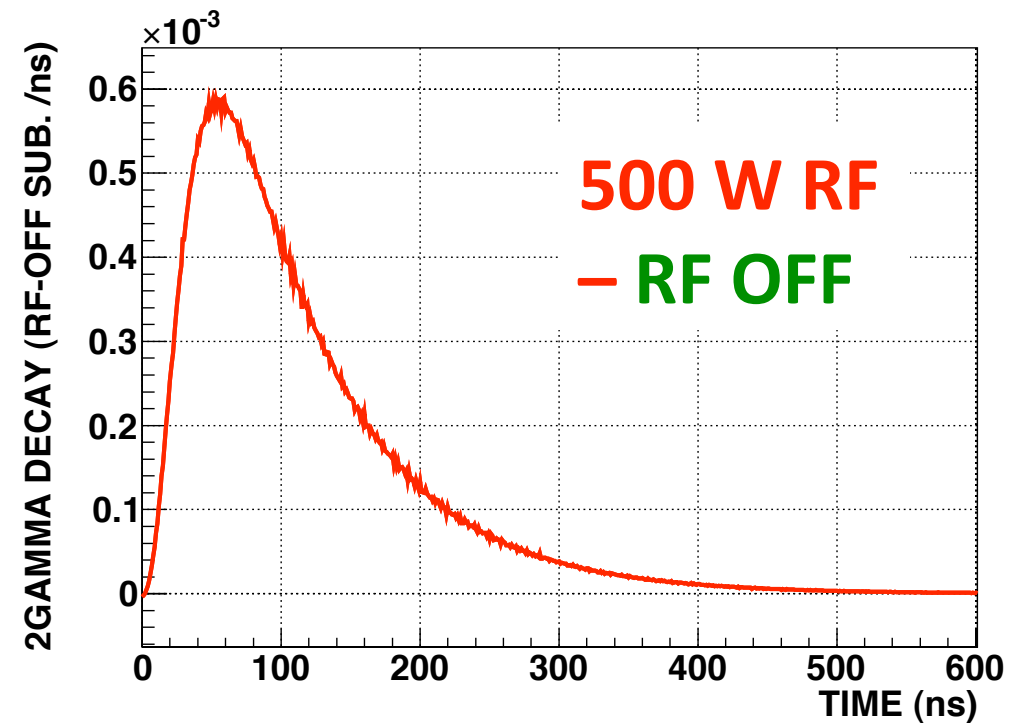
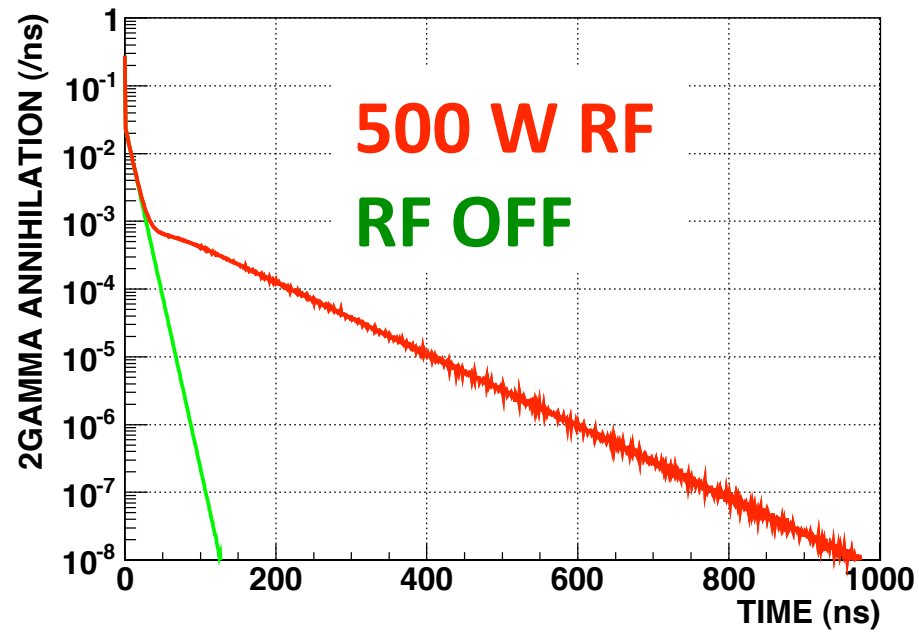
# 2 $\gamma$ 崩壊確率



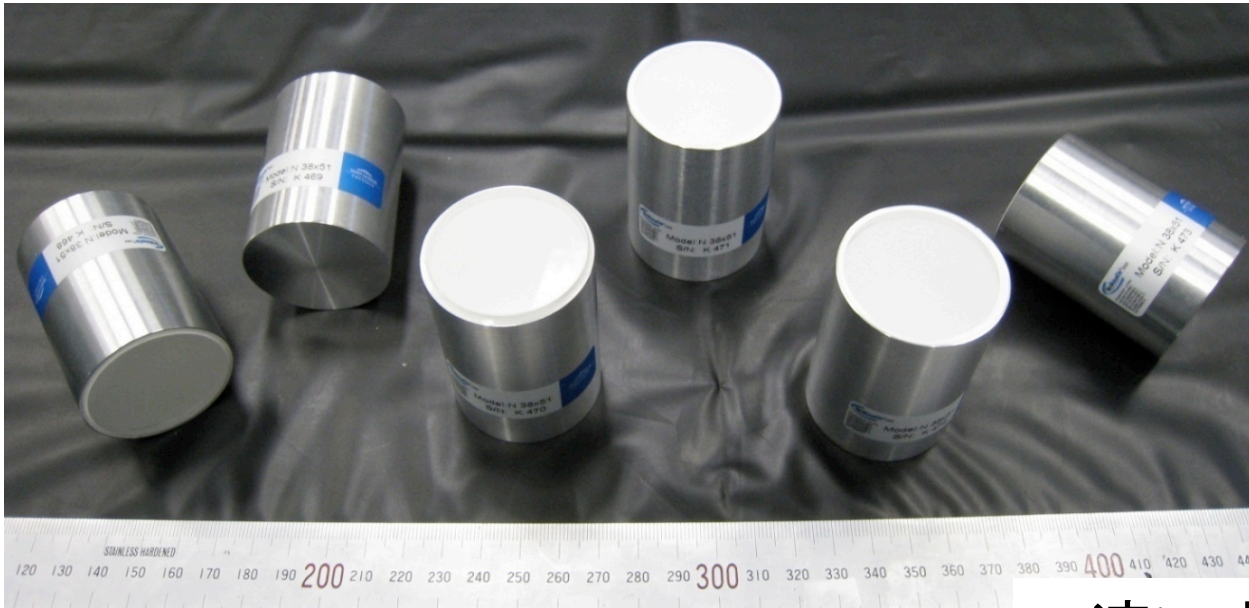
Timing Window による  
2 $\gamma$ 崩壊確率の違い。  
Timing Window によって  
BG を減らすことができる。  
(図はQ=14200の理論値)



# Timing Window の選び方



# ガンマ線検出器



LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレータ

(直径1.5インチ、長さ2インチ)

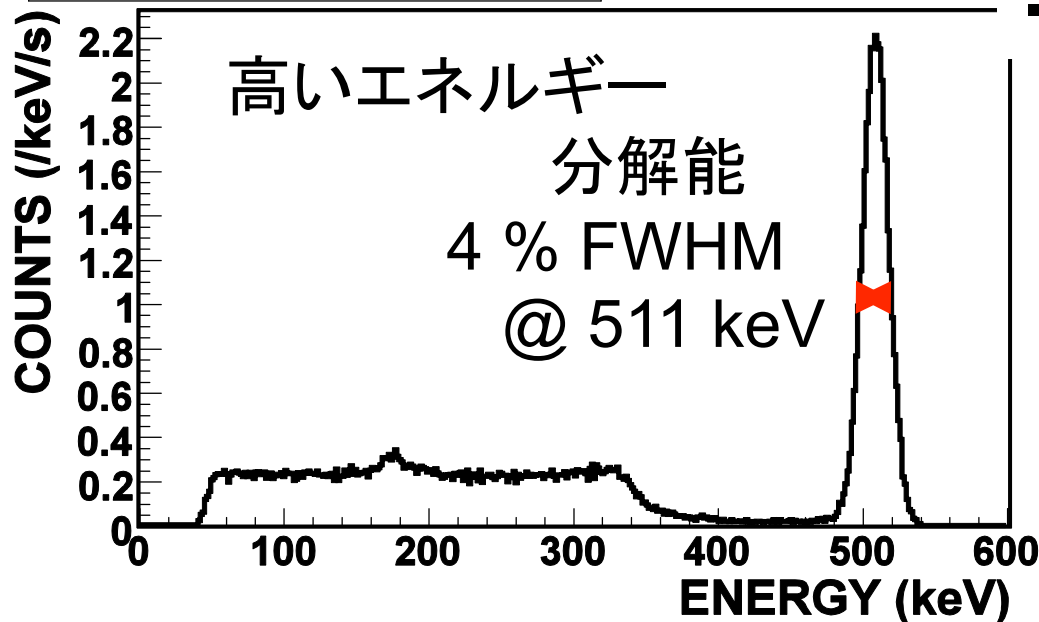
を6個使用

磁場中でもPMTを磁場と平行にすることで非常に高い性能を発揮する

(6月にテストで測定した)。

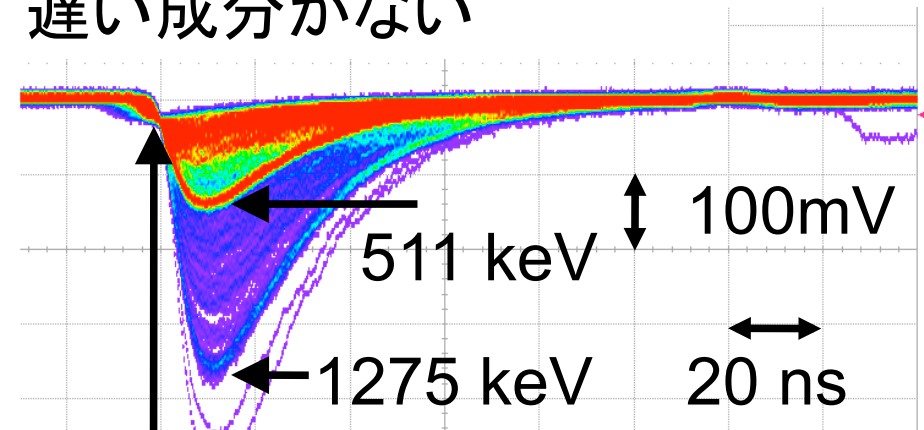
ENERGY SPECTRUM

<sup>22</sup>Na



- 速い立ち上がり
- 遅い成分がない

<sup>22</sup>Na

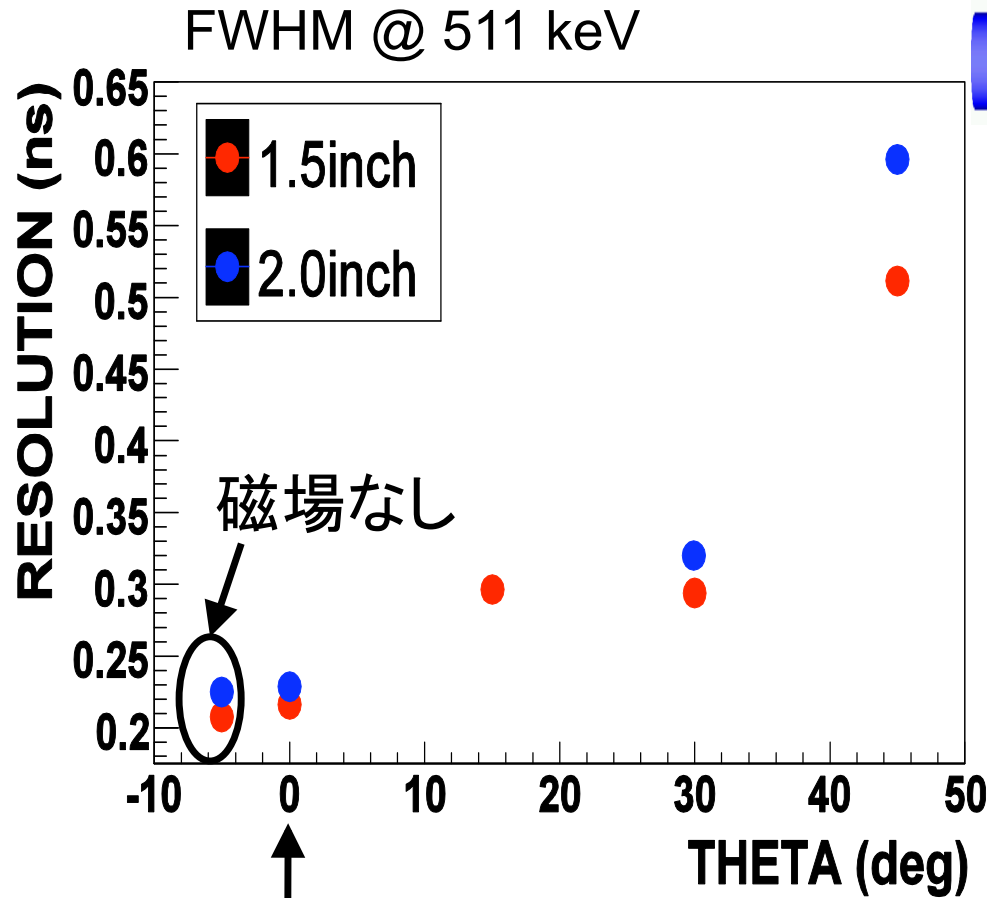


高い時間分解能

200 ps FWHM @ 511 keV

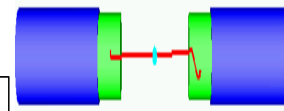
22

# 時間分解能の角度( $\theta$ )依存性



0°のとき悪化していない。

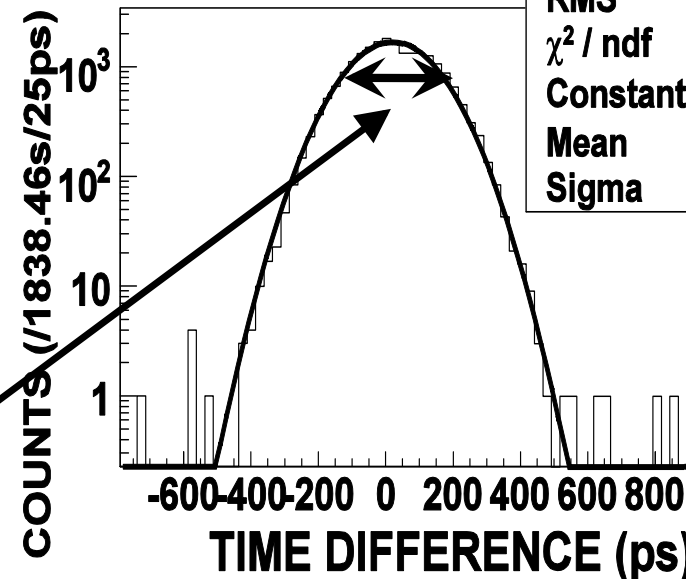
FWHM 293 ps @ 511 keV



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
$\chi^2 / \text{ndf}$	203.1 / 43
Constant	$1692 \pm 13.9$
Mean	$20.67 \pm 0.86$
Sigma	$124.4 \pm 0.6$



# 新しい2 $\gamma$ -taggingの方法

2 $\gamma$  崩壊と 3 $\gamma$  崩壊の比から、HFS を求める

→ 2 $\gamma$  を正確に tag する必要      2つの方法

(1) Geometrical  
(昔の方法)



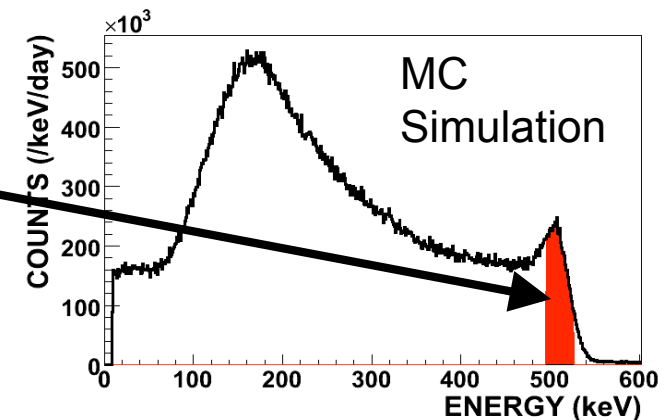
Back-to-back に検出器を置き、両方に 511 keV が入った場合を tag  
(長所) S/N がよい      (短所) Collection efficiency が小さい

(2) Energy  
(新しい方法)

**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



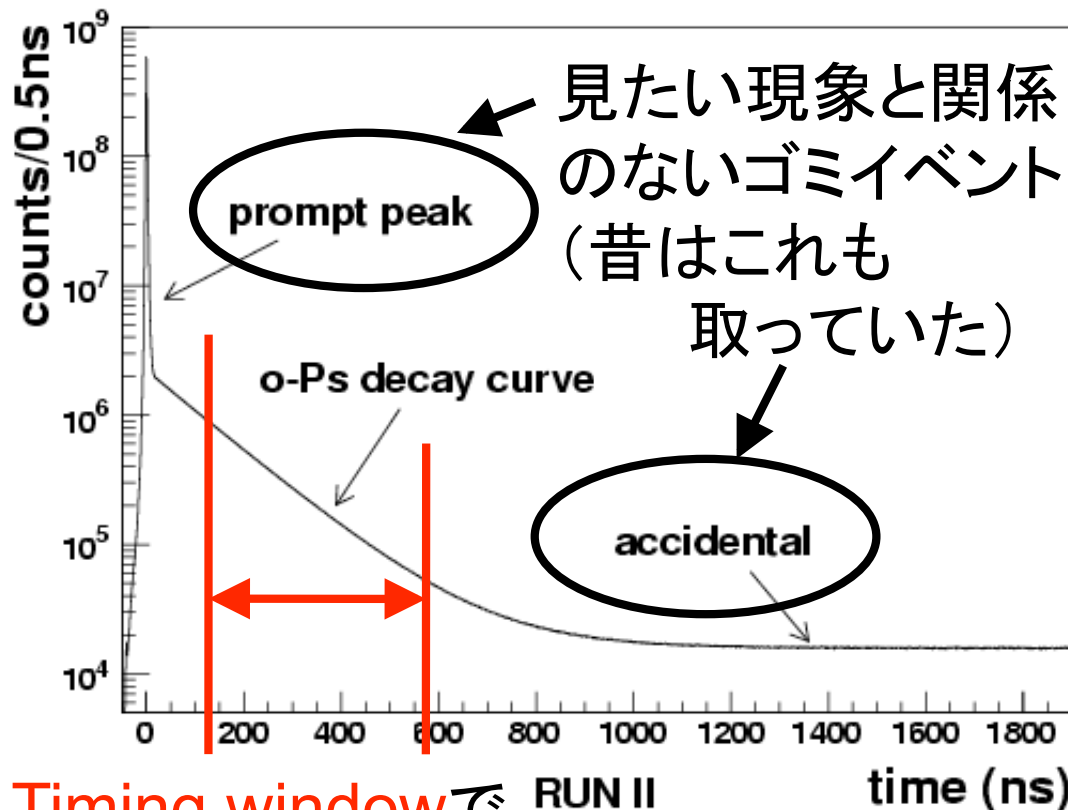
**高いエネルギー分解能** (4 % FWHM @ 511 keV) をもつ

LaBr<sub>3</sub>シンチレータを使うことで、Energy tagging が可能

→ **約50倍高い統計** が得られる (短期間で測定可能)

# 時間情報と物質の効果

ポジトロニウムの崩壊曲線



Timing windowで RUN II  
見たいイベントだけを選び出す。

熱化の途中で周りの電子とぶつかり  
2 $\gamma$ 崩壊する(=pick-off)割合を正しく評  
価。

生成されたPsは  
周りの物質と  
衝突しながら  
進み、止まって  
から崩壊する。

