

ポジトロニウムの 超微細構造の精密測定 中間結果の報告

石田 明

(東京大学大学院理学系研究科)

KEK 低温センターセミナー

平成21年10月8日

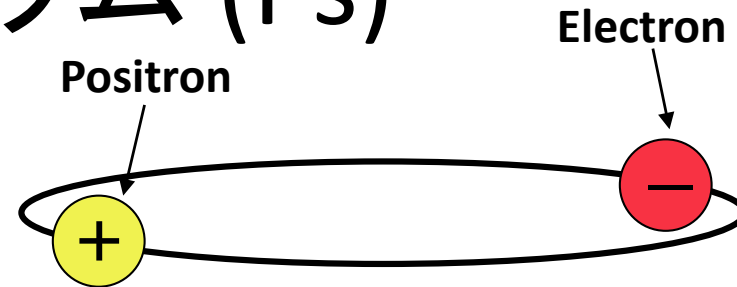
Ps HFS 測定

- 東大物理 & 素粒子センター
 - 小林富雄、浅井祥仁、難波俊雄、末原大幹、秋元銀河、石田明、佐々木雄一、宮崎彬、加藤康作
 - 東大総合文化
 - 斎藤晴雄
 - KEK 低温センター & 加速器
 - 山本明、田中賢一、吉田光宏
 - 福井大遠赤外センター
 - 出原敏孝、小川勇、漆崎裕一
 - ブルガリア科学アカデミー
 - S. Sabchebski
- } 203 GHz
直接遷移実験

目次

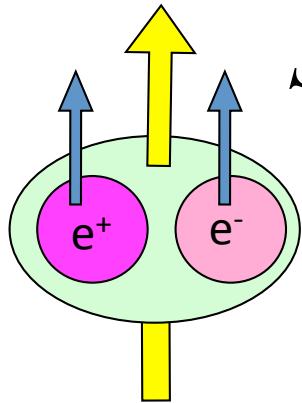
- ポジトロニウムとは
- エネルギー準位と超微細構造(HFS)
- HFSは、ずれている
- なぜ、ずれているのか
- 過去の実験と、考えられる系統誤差
- 我々の新しい実験セットアップ
- 第1回測定とその結果
- 今後の展望

ポジトロニウム (Ps)



- 電子陽電子束縛系
 - レプトン 2 個だけから成る、最も軽くて簡単な「原子」
 - 粒子・反粒子 → 新しい物理に敏感
- 束縛系 QED によって記述
- 基底状態 ($1S$) は、スピンの状態に応じて 2 種類の状態
 - 1^3S_1 (triplet、spin=1): オルソポジトロニウム (o-Ps)
 - $\tau=142\text{ns}$ 、 3γ 、(5γ 、 7γ ...) に崩壊
 - 1^1S_0 (singlet、spin=0): パラポジトロニウム (p-Ps)
 - $\tau=125\text{ps}$ 、 2γ 、(4γ 、 6γ ...) に崩壊

二つの状態



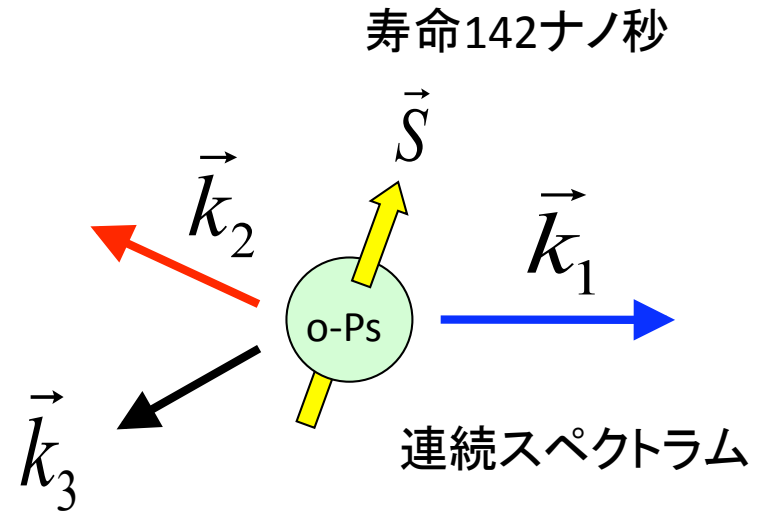
$\vec{S} = 1$ (三重項)

オルソポジトロニウム

Spin=1 光と同じ量子数

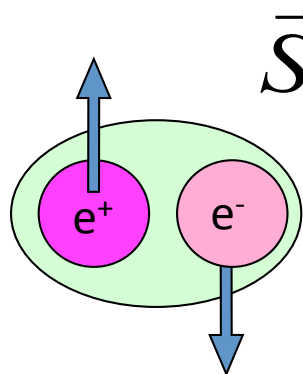
$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma, (5\gamma)$

o-Ps



寿命142ナノ秒

連続スペクトラム



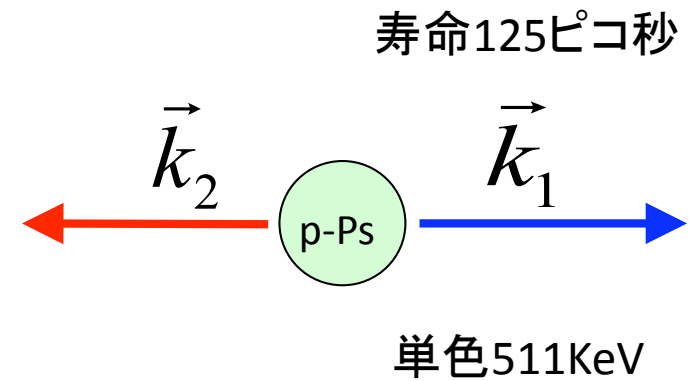
$\vec{S} = 0$ (一重項)

パラポジトロニウム

Spin=0 スカラー粒子

$p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma, (4\gamma)$

p-Ps



寿命125ピコ秒

単色511KeV

エネルギー準位

- ・水素原子と同様、様々な準位
- ・基底状態の束縛エネルギー = 6.8 eV (水素原子の半分)

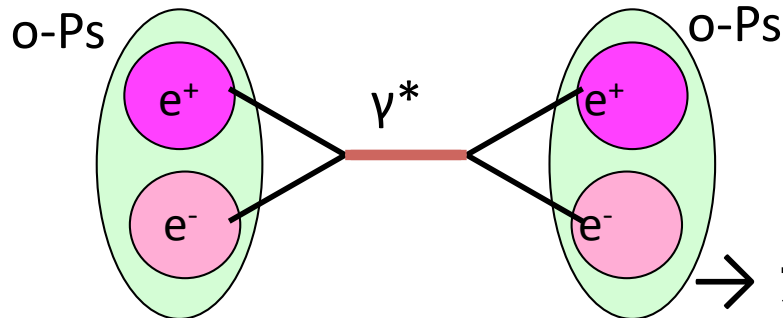
- ・大きな超微細構造 (HFS) 203 GHz (cf. H で 1.4 GHz)

理由は 2 つ

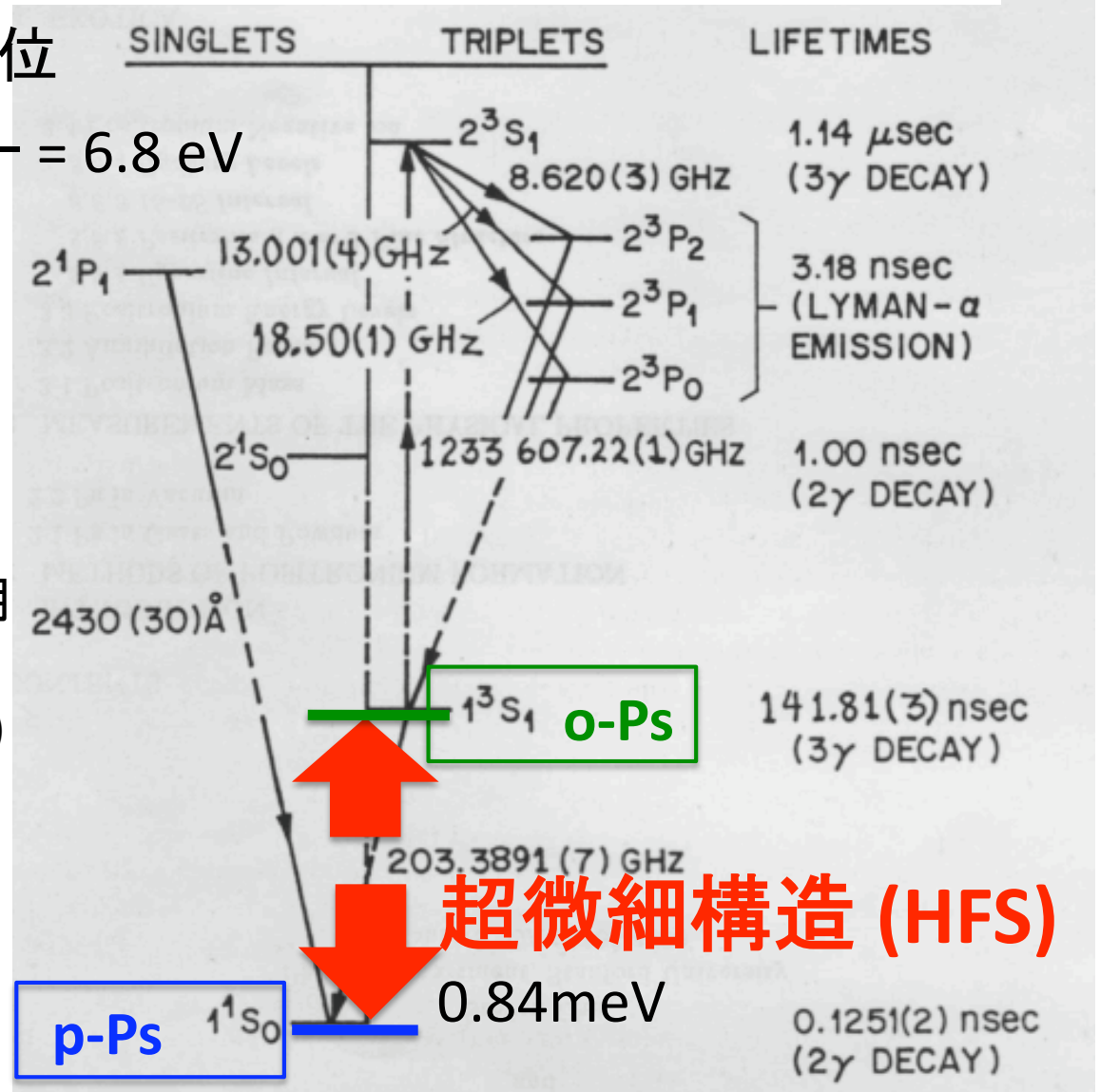
1. 大きな スピン-スピン相互作用

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2m} \vec{\sigma} \quad (\text{質量が小さい})$$

2. 量子振動 (40%の寄与)

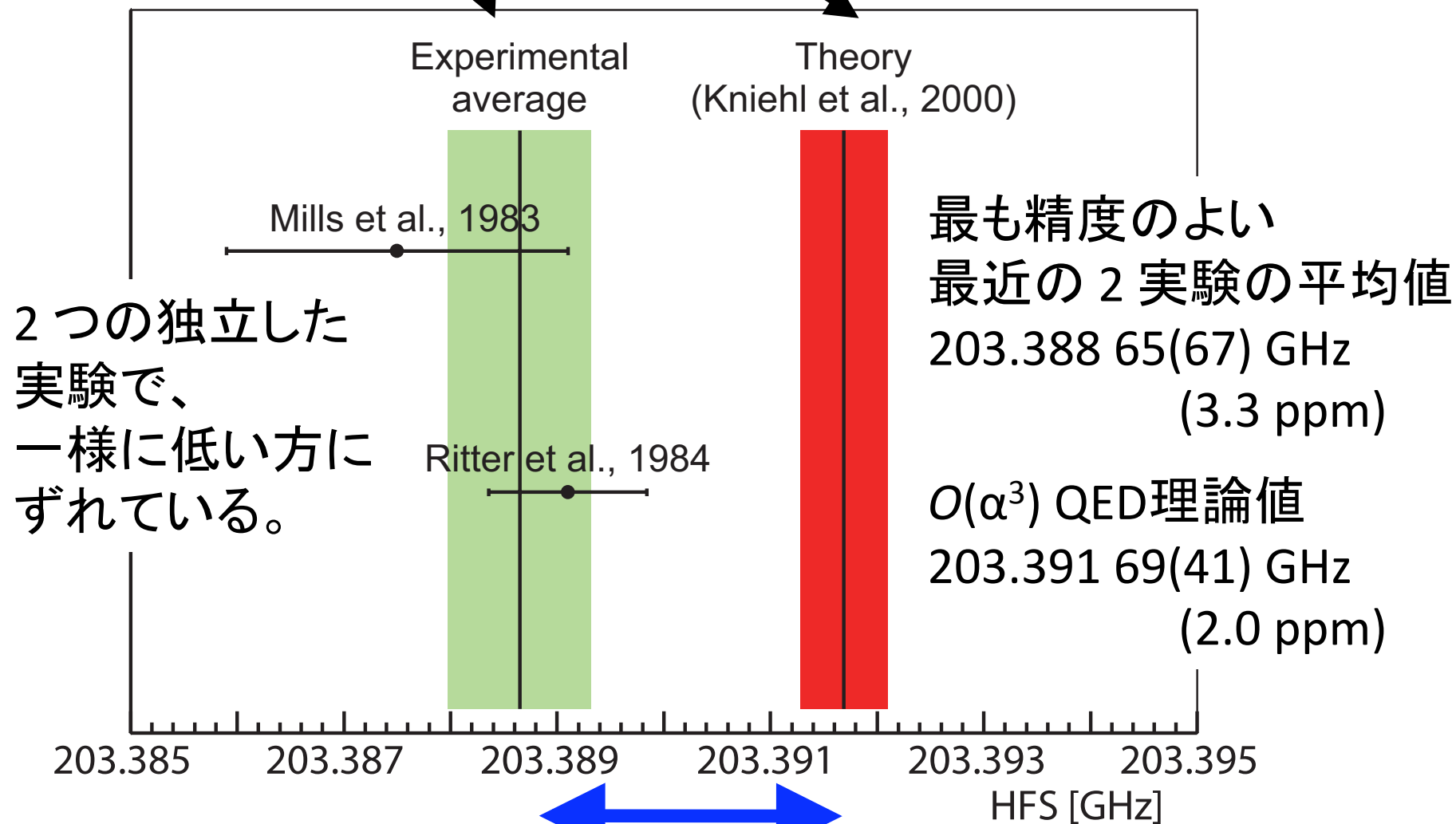


→ 新しい物理にsensitive



超微細構造 (HFS)

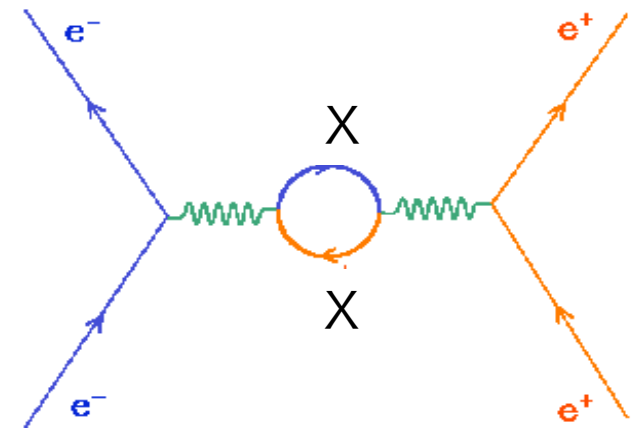
HFSは、実験と理論でずれている



15 ppm (3.9 σ) のずれ

超微細構造のズレが何を意味するか

- 理論計算が間違っている
 - 自由粒子の QED 計算と違い、束縛系の計算はそれなりに難しい
 - 3 次の項の計算も、今世紀に入ってから
- 過去の測定に共通の間違ひがある
 - 後述します
- 未知の物理の可能性
 - 相互作用の弱い未知の粒子の介在
 - 重い粒子には感度が弱いが、 $g-2$ と違い、s-channel の効果も見える
(例えば、 $O(\text{MeV})$ 、 $\alpha \sim 10^{-8}$ の擬スカラー)
 - $o\text{-Ps}$ の場合、余剰次元にも感度



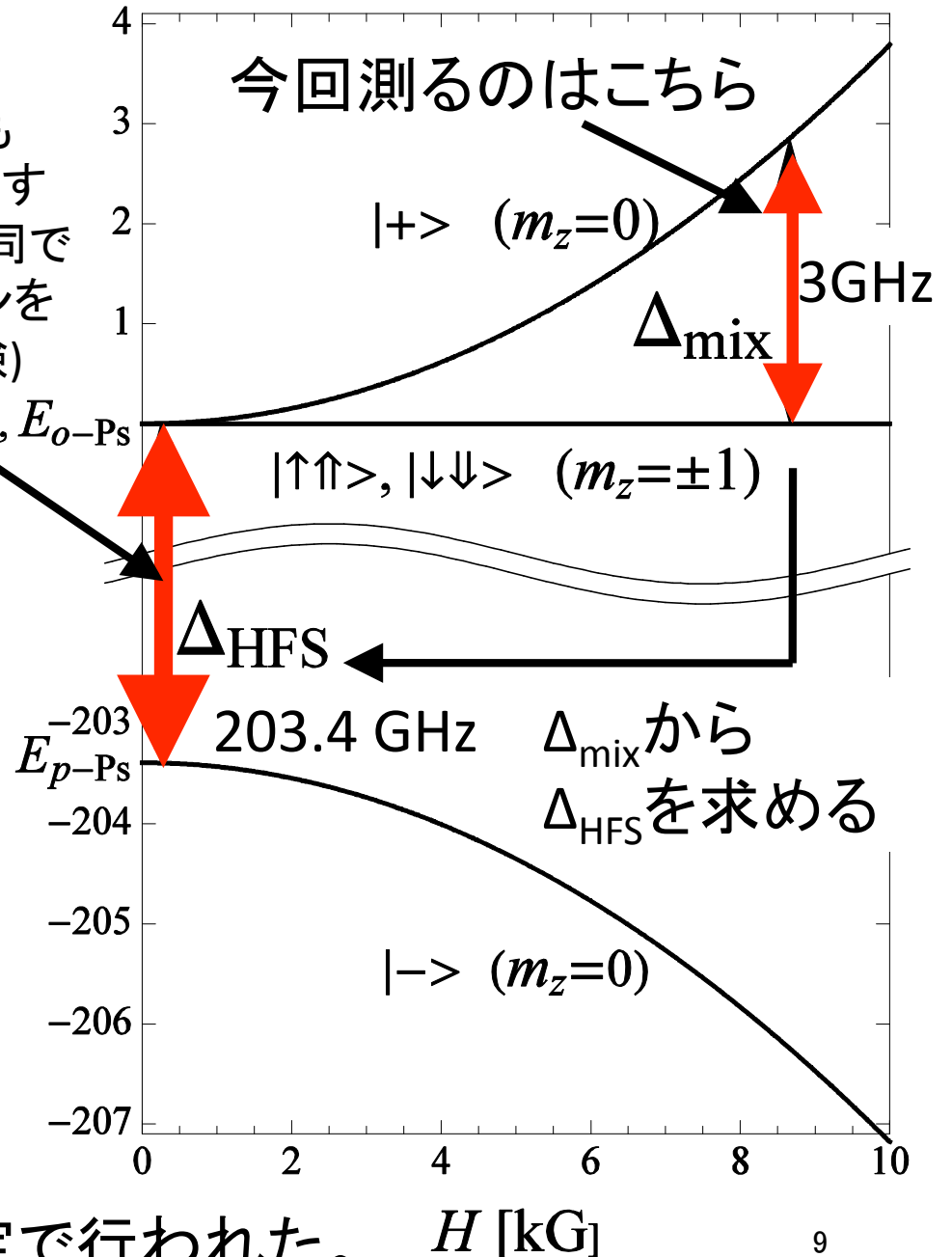
われわれが、はっきりさせましょう

Zeeman効果を用いた間接測定の方法

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)

Δ_{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 2γ 崩壊の
確率が高くなることを利用して測定。

こっちの
直接遷移にも
挑戦しています
(福井大と共同で
ジャイロトロンを
開発して実験)



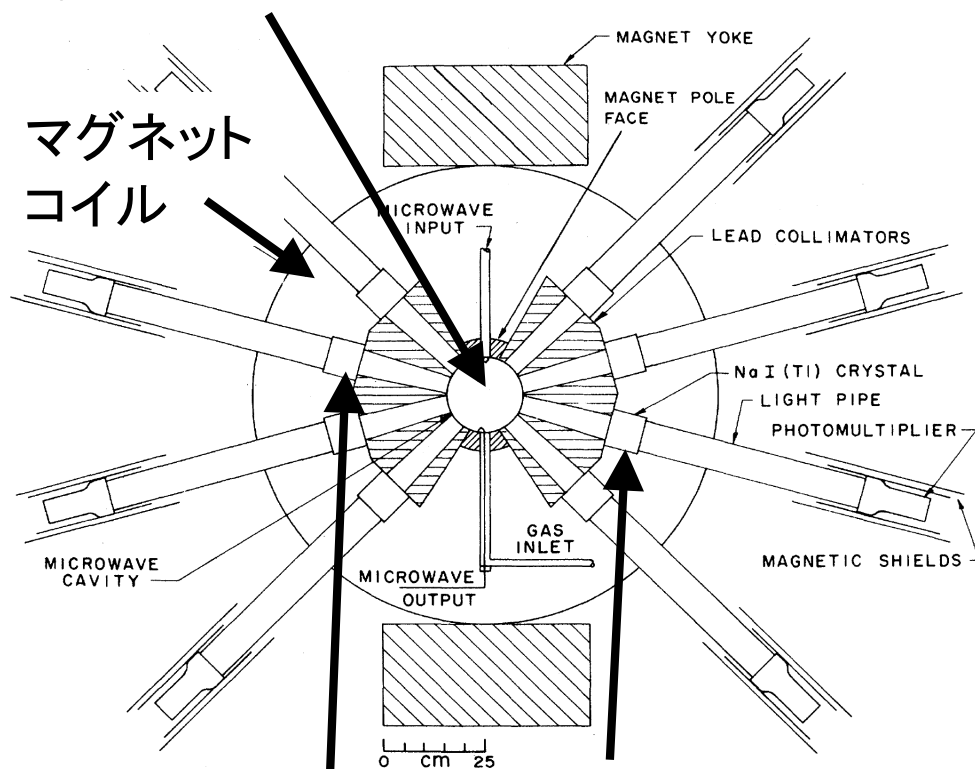
$$\Delta_{mix} = \frac{1}{2} \Delta_{HFS} \left(\sqrt{1 + x^2} - 1 \right)$$

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

から Δ_{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、考えられる系統誤差

RF Cavityにガスを入れて
 β^+ 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(80年代)

系統誤差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。

系統誤差2. 物質の効果

ポジトロニウム生成には、物質
(ここではガス)が必要不可欠だが、
物質は、HFSの値をずらしてしまう。

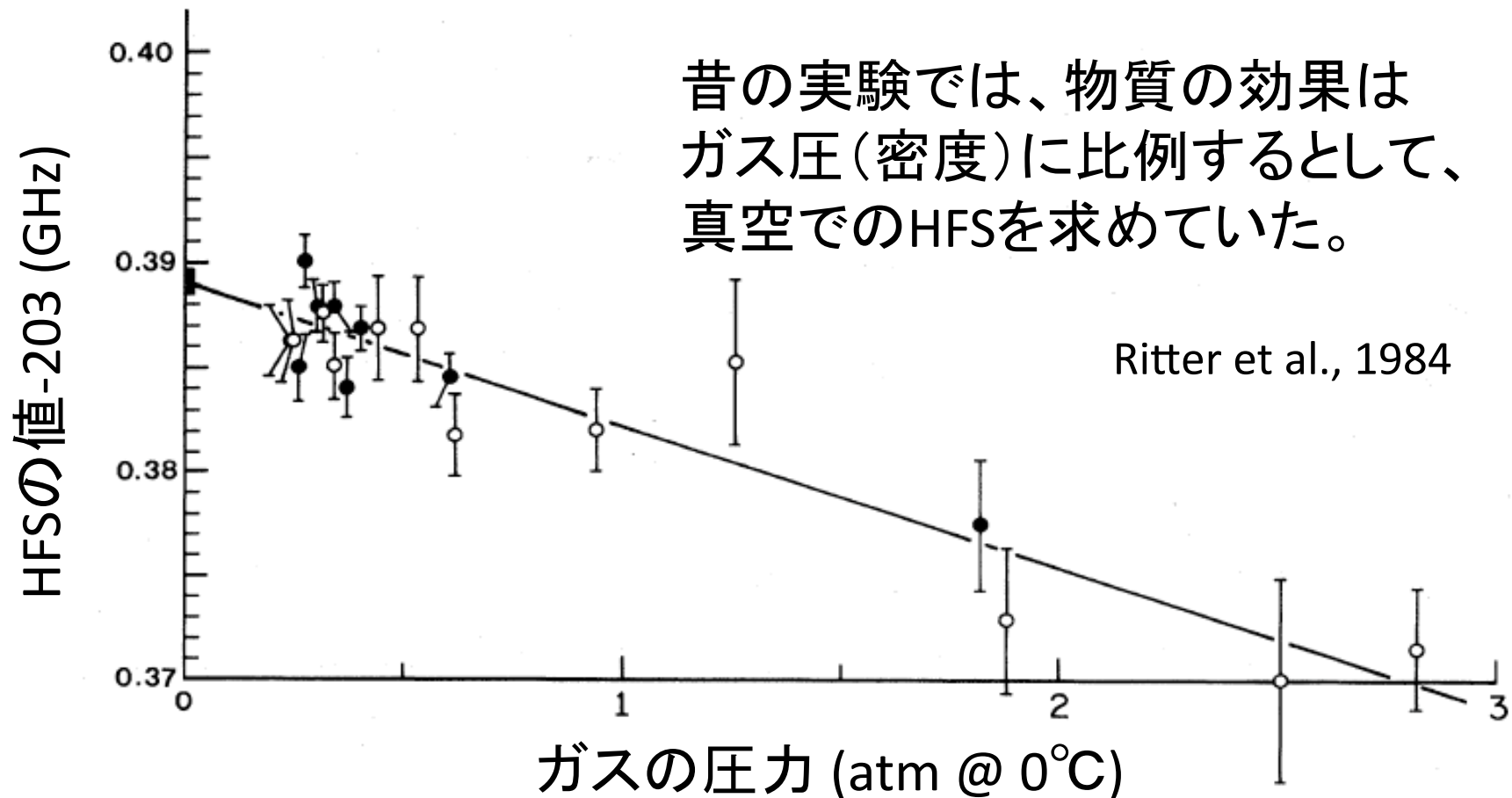
過去の実験では、物質の効果
の評価が、十分でなかった可能性
がある。

物質の効果

ポジトロニウムが物質と衝突すると、物質の周りの電場を感じて、エネルギー準位が変化する (シュタルク効果)。

この効果は、衝突頻度に比例する。

→速度が一定なら、衝突頻度は密度に比例する。



ポジトロニウムの熱化問題

生成された o-Ps は、1 eV 程度の運動エネルギーを持っている。

o-Ps は、周りの物質とぶつかって、エネルギーを落とし、室温 (1/30 eV) に下がる (熱化)。

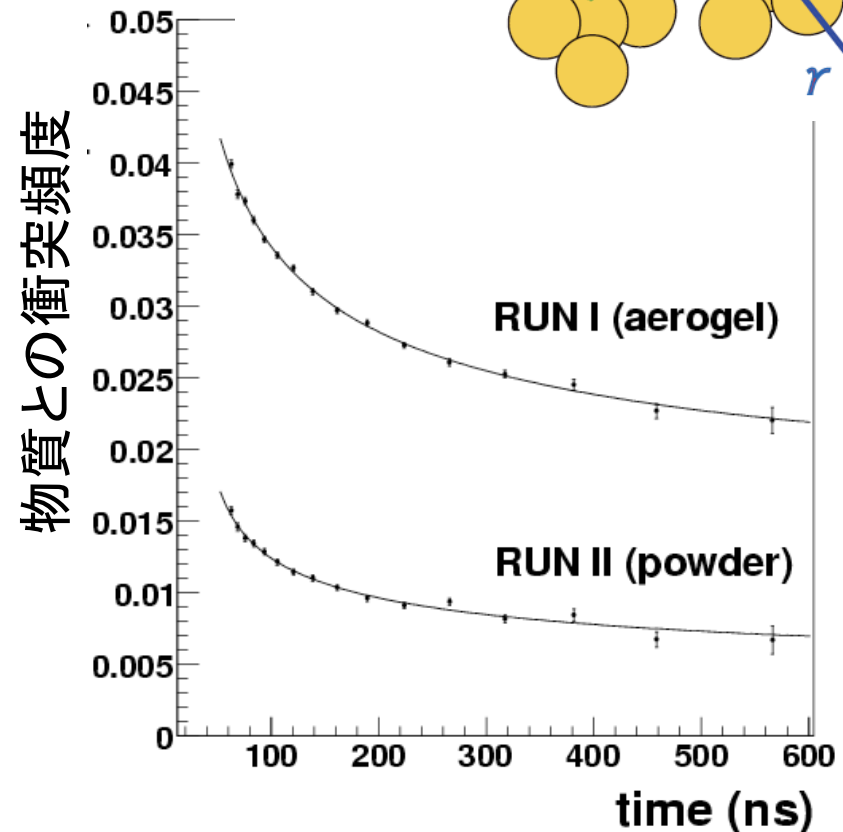
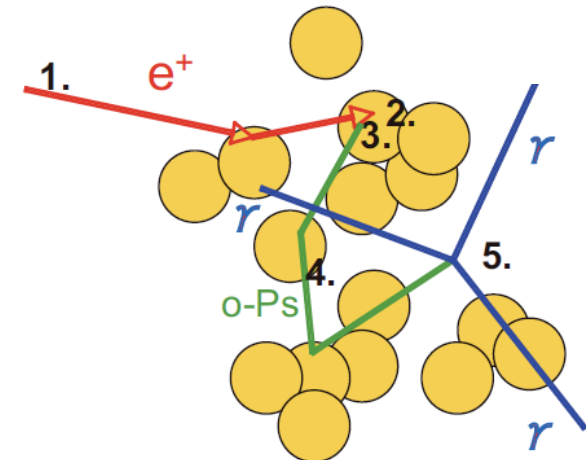
昔は、熱化はすぐに起こると思われていた。

しかし、熱化に時間がかかると、

物質の効果 (\propto 衝突頻度) は、密度に比例しない。

実際、1990年代の「オルソポジトロニウムの寿命問題」で、熱化には時間がかかり、これが深刻な系統誤差となることが分かった。

→HFSでも、深刻な系統誤差となっている可能性がある
(低圧では、より熱化に時間がかかり、大きな効果)。



我々の測定システム

測定の原理は過去と同じ (Zeeman効果を使った間接測定) だが、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。

RF 発振器 +
GaN AMP
2.8532 GHz
500 W CW

・ β -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。

・大型超伝導磁石

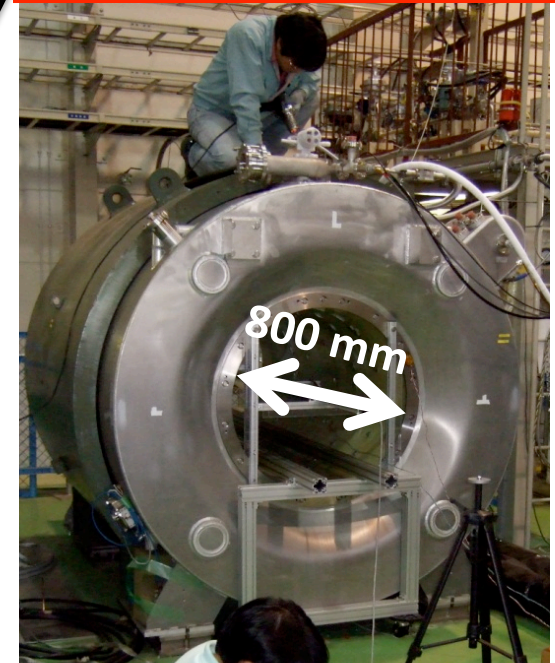
導波管

磁場 (0.866 T)

・ガンマ線検出器

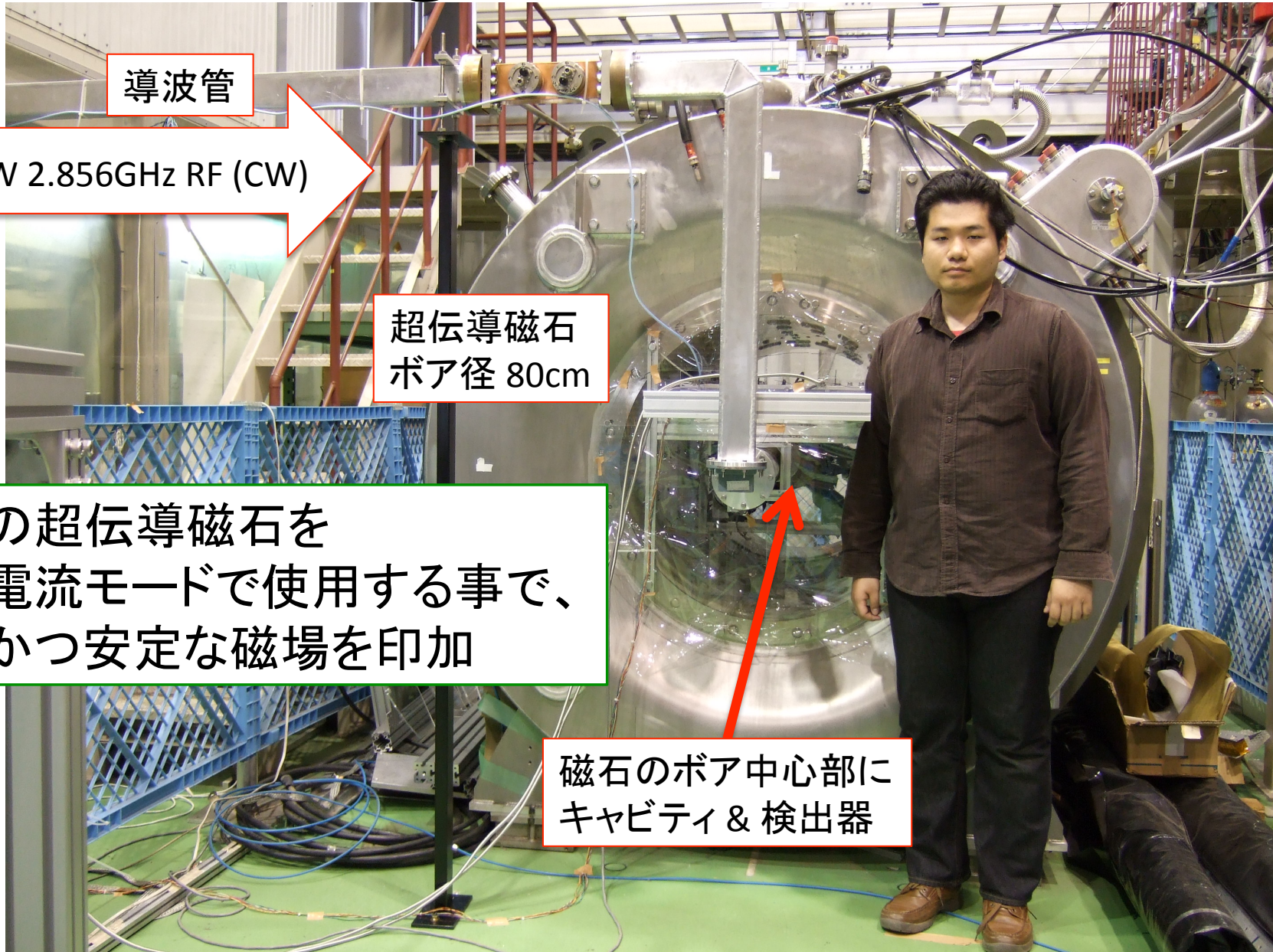
LaBr₃(Ce) シンチレータを使い、新しい 2γ -taggingで高統計の実験を行う。

RF Cavity
TM₁₁₀ モード
Q=14700



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。

我々の間接測定の設定アップ @KEK 低温棟



導波管

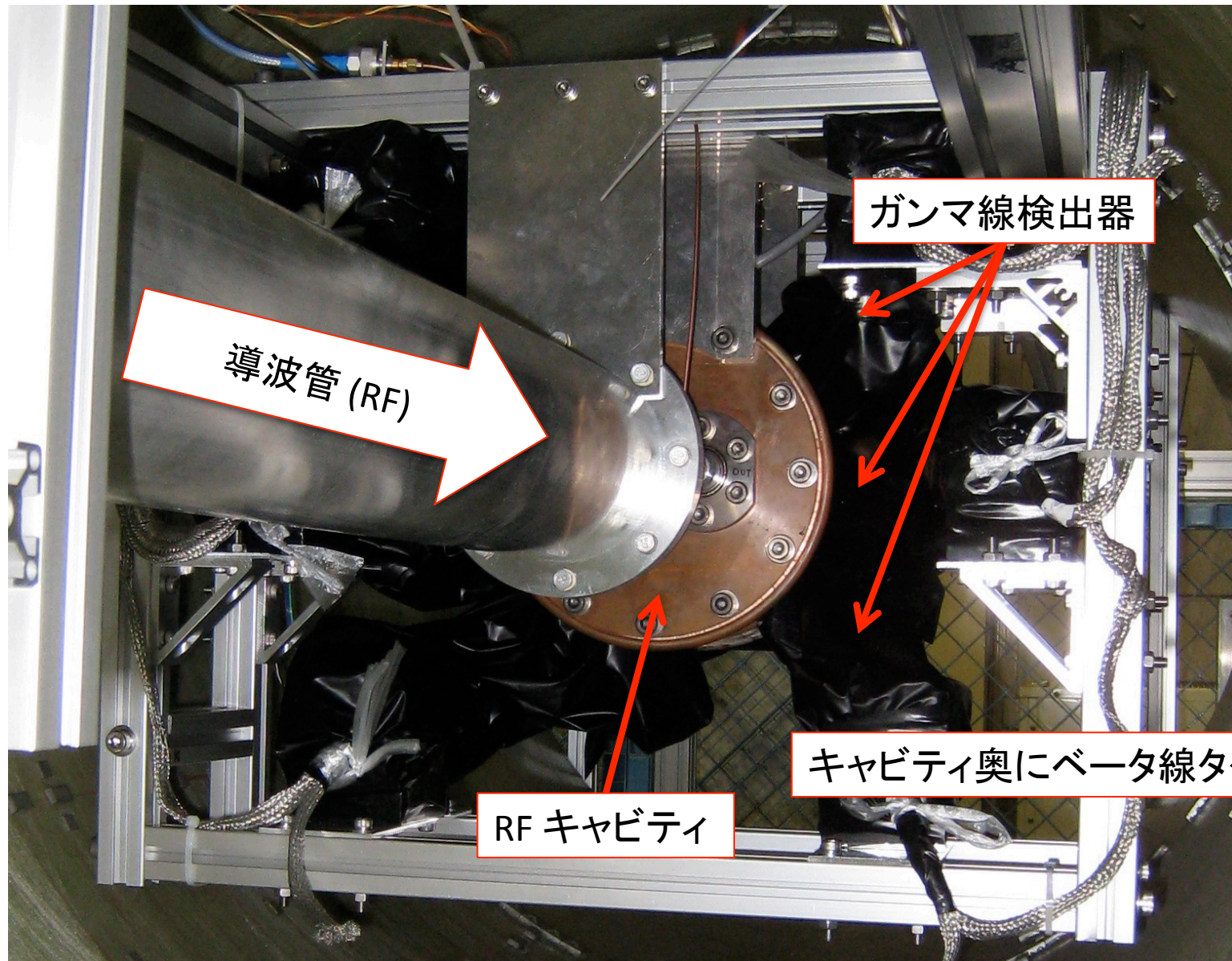
500W 2.856GHz RF (CW)

超伝導磁石
ボア径 80cm

大型の超伝導磁石を
永久電流モードで使用する事で、
均一かつ安定な磁場を印加

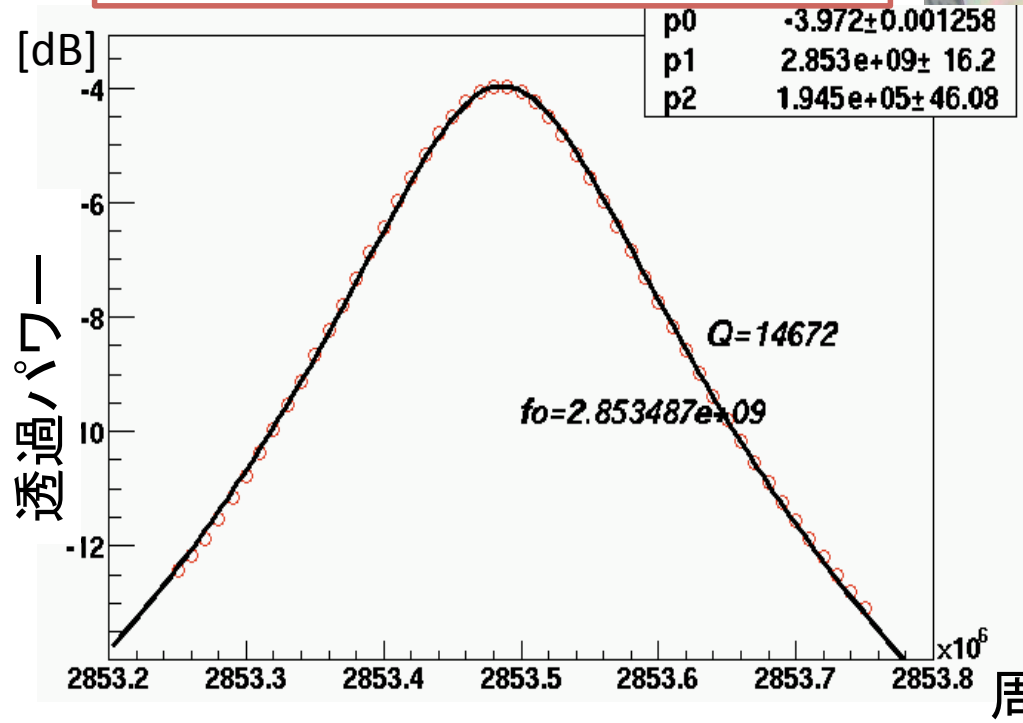
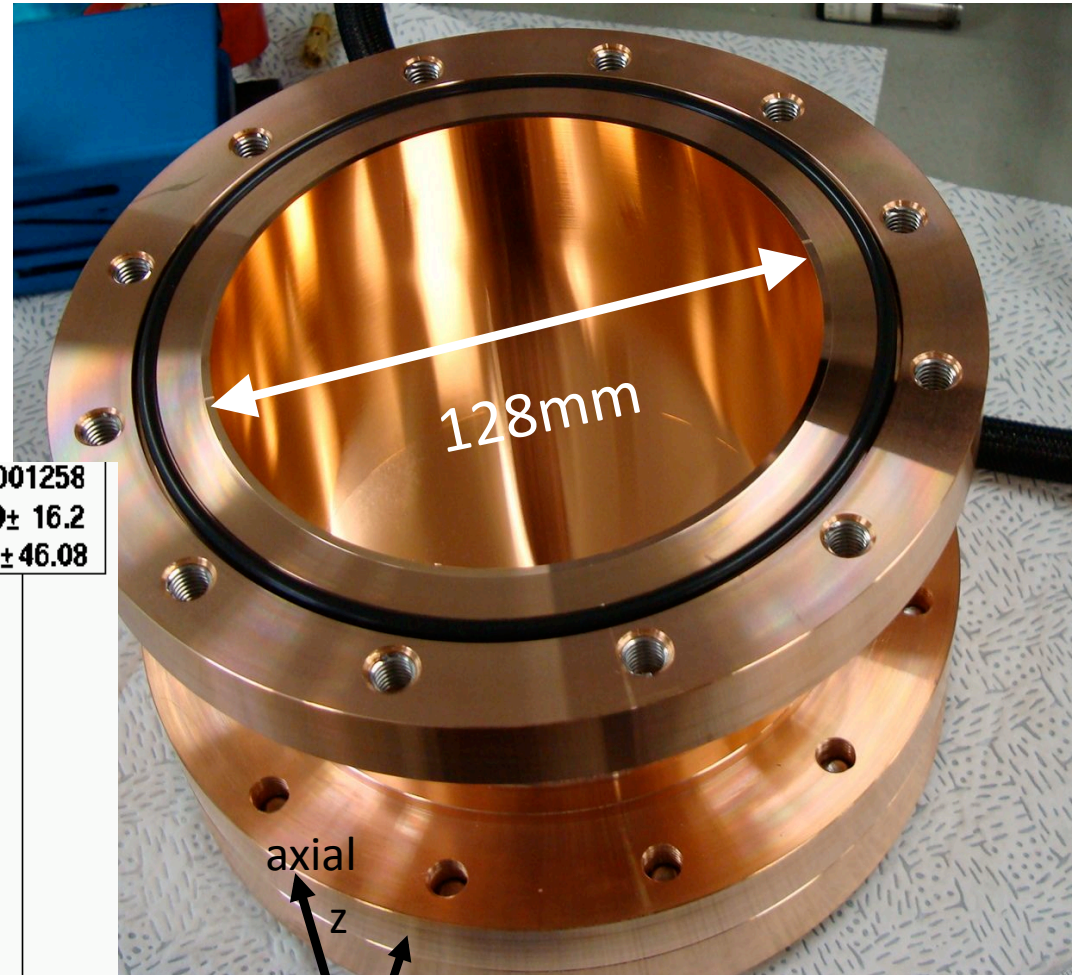
磁石のボア中心部に
キャビティ & 検出器

中心部のセットアップ (磁石ボア中心)

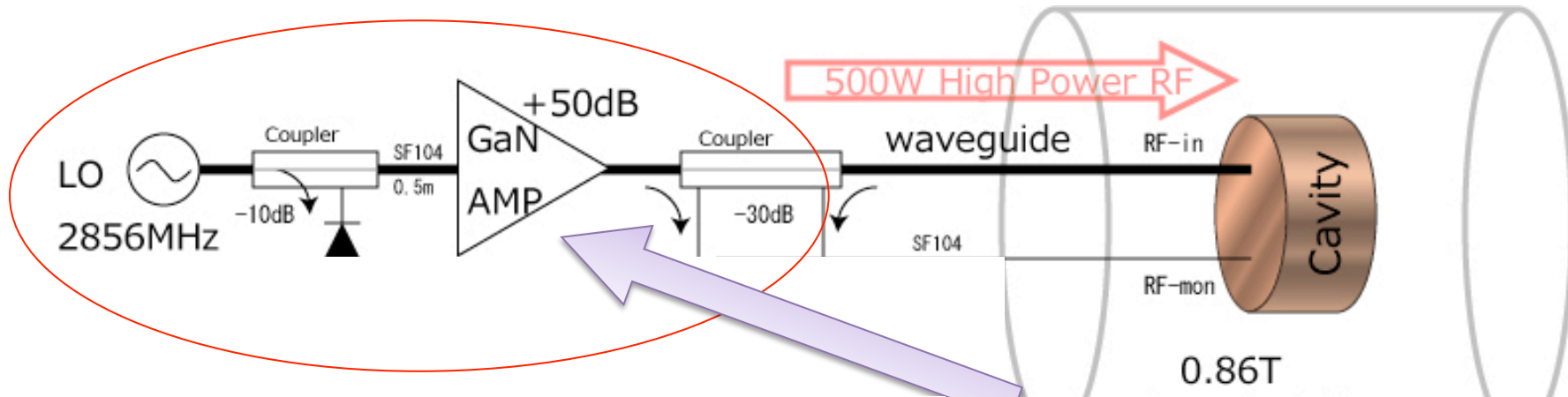


RF Cavity

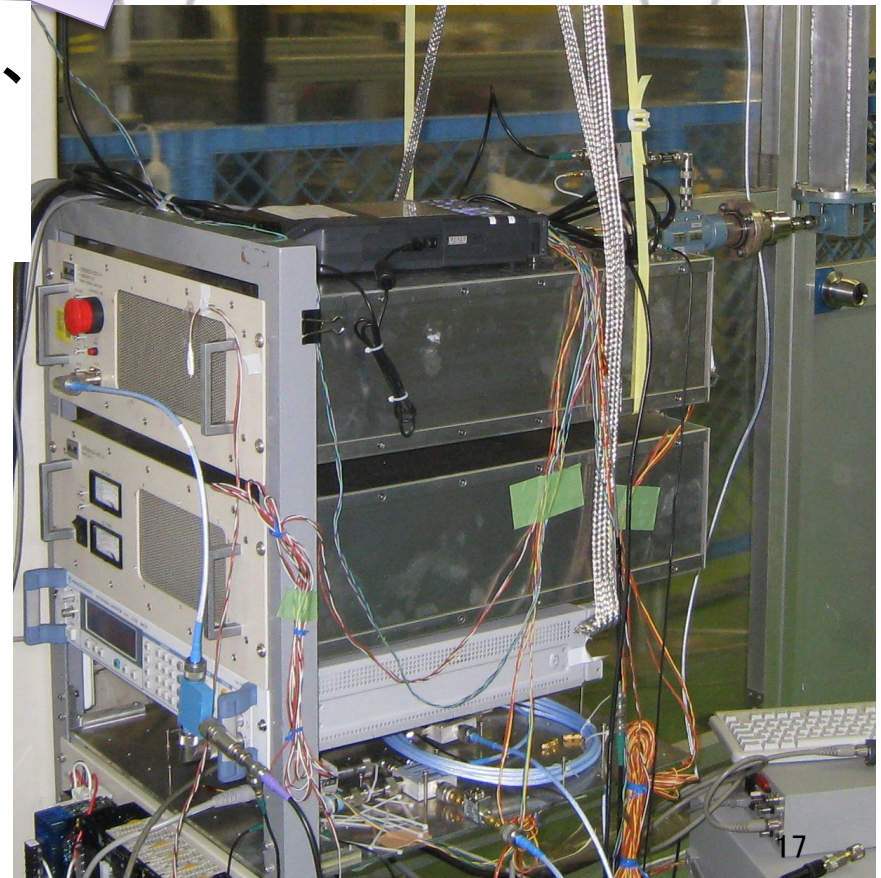
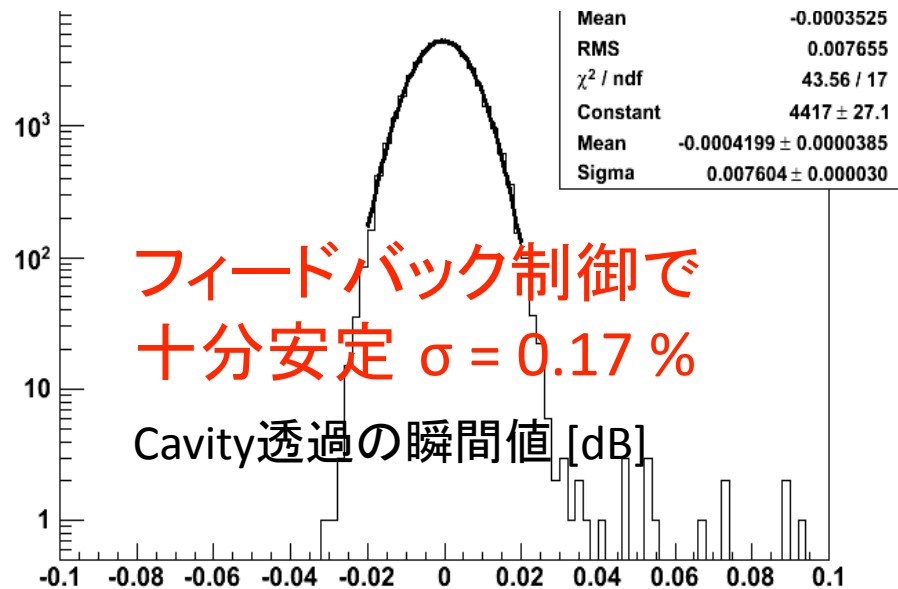
1. 共振周波数:
2856MHz
2. 共振モード: TM_{110}
3. RF耐圧: 500W [CW]
4. 側面厚(Cu): 2.0 mm
5. $Q=14700$



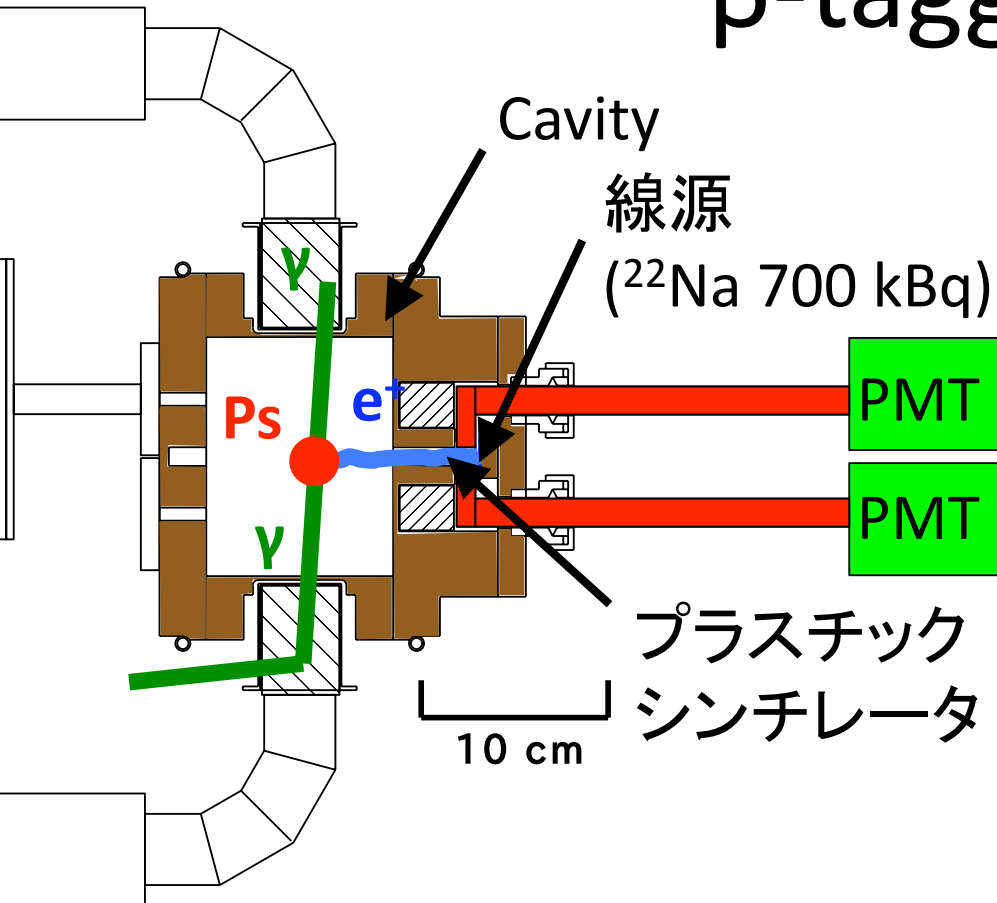
RF AMP



Signal Generatorで2856MHzのRFを出力、
GaN AMPで+50dBの増幅をする。
Cavity内には、**409 W** 入る。



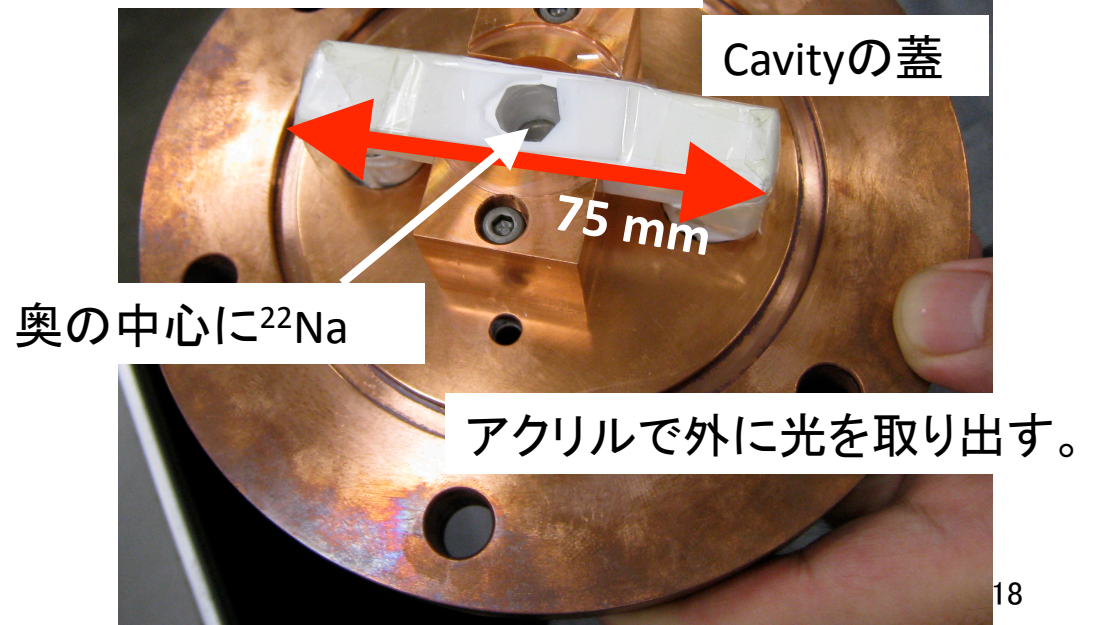
β -tagging system



- ・プラスチックシンチレータを使って、線源から放出された e^+ をタグ。
- ・シグナルは、ファインメッシュPMTで両側読み出し。
- ・この時刻をポジトロニウム生成時刻($t=0$)とする。

- ・2つのPMTのシグナルをコインシデンスする。
- ・十分な光量($\sim 10\text{p.e.}$)が得られることを確認。

15 mm四方、厚さ0.2 mmのプラスチックシンチレータ

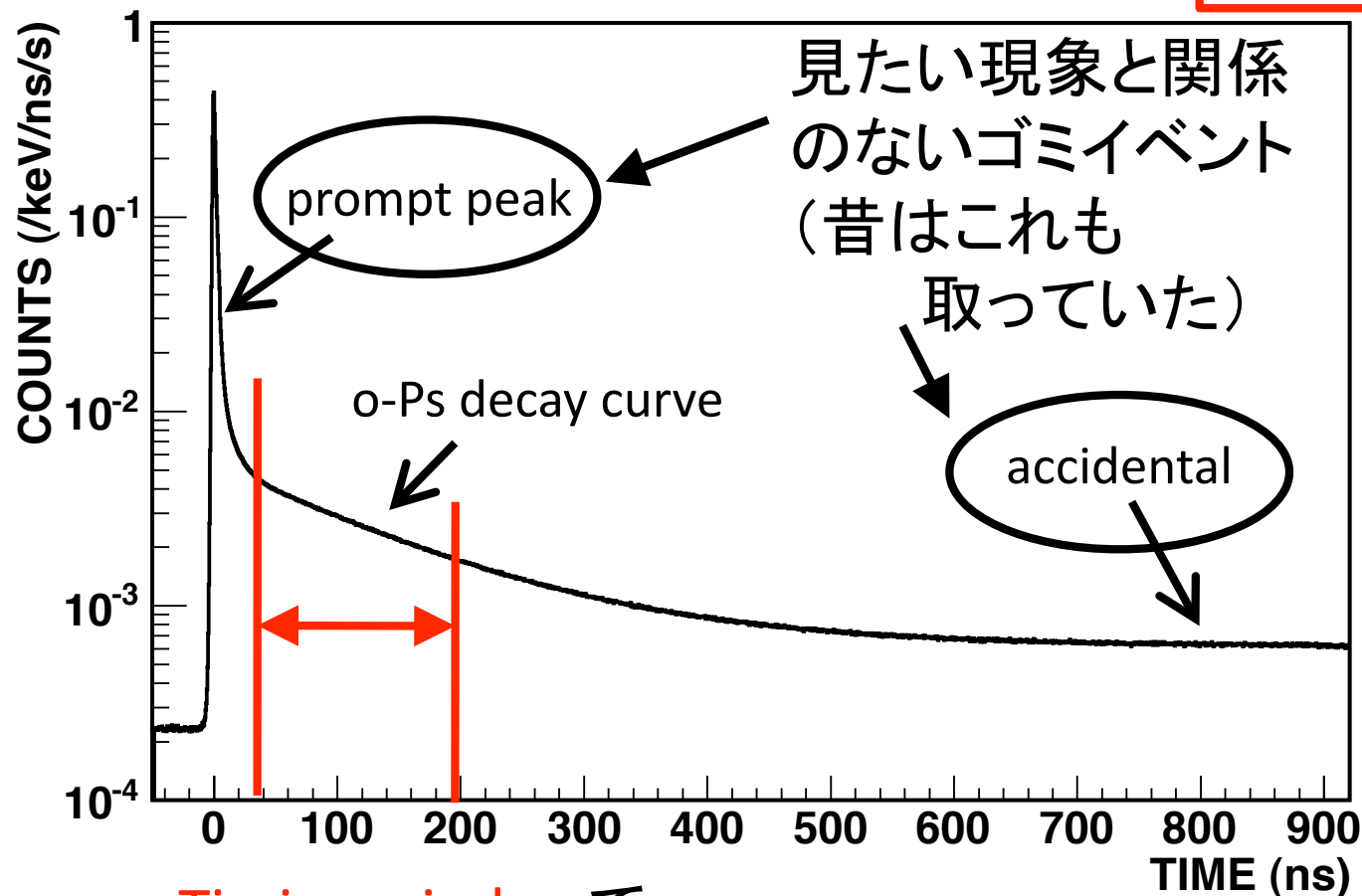


時間情報 (2つの利点)

1. S/N の向上

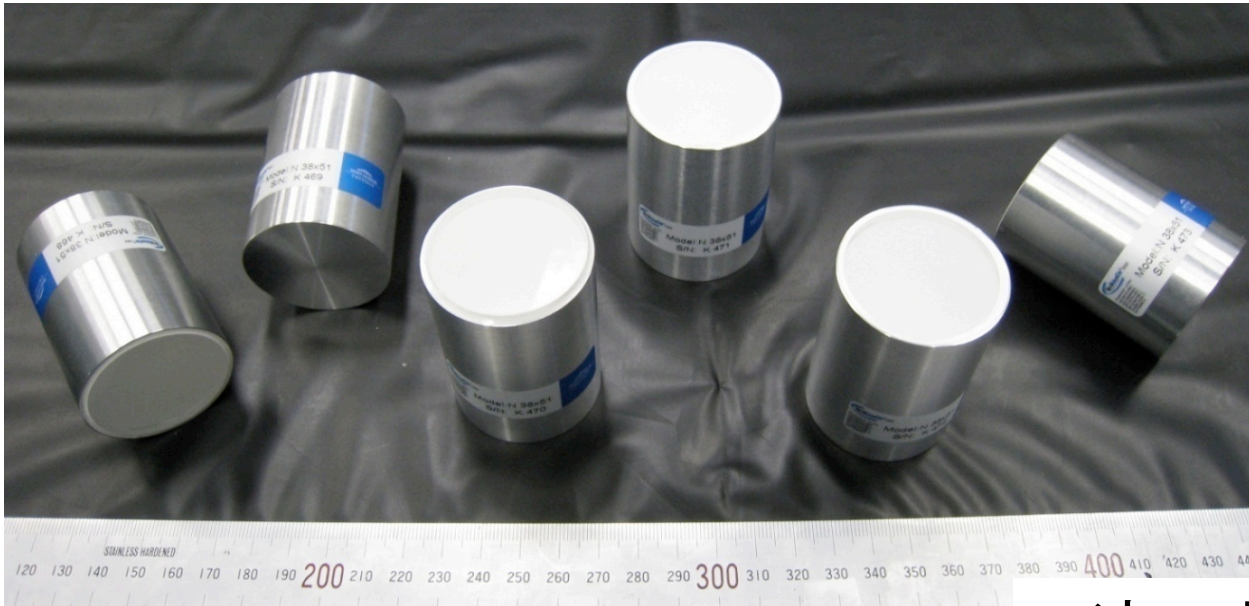
2. 物質の効果を正しく評価

ポジトロニウムの崩壊曲線



Timing windowで
見たいイベントだけを選び出す

ガンマ線検出器 (1) $\sim \text{LaBr}_3 \sim$

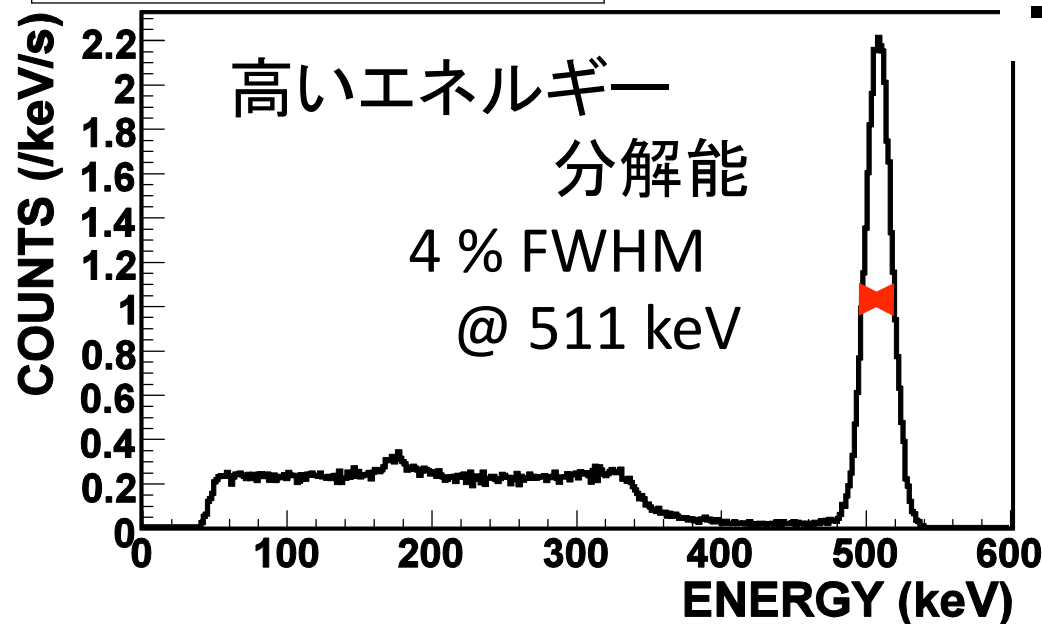


LaBr₃(Ce)シンチレータ
(直径1.5インチ、長さ2インチ)
を6個使用

UVTライトガイドで光を導き、
ファインメッシュPMTで、
磁場中での読み出しを行う。

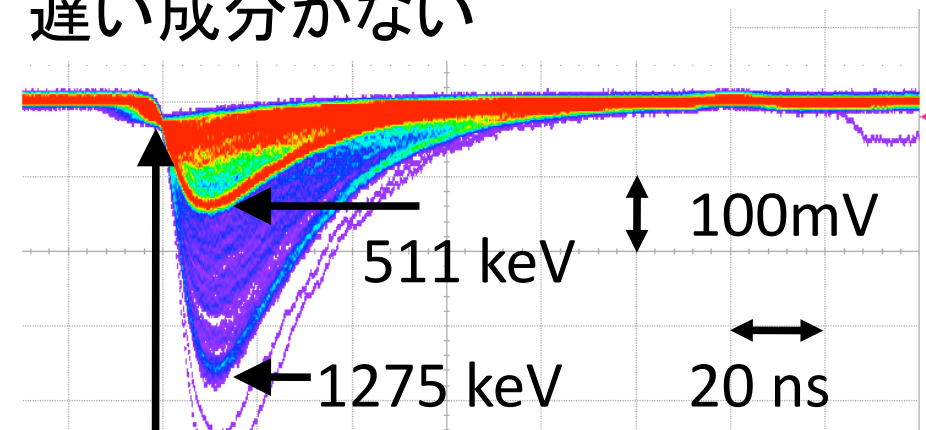
ENERGY SPECTRUM

^{22}Na



- 速い立ち上がり
- 遅い成分がない

^{22}Na

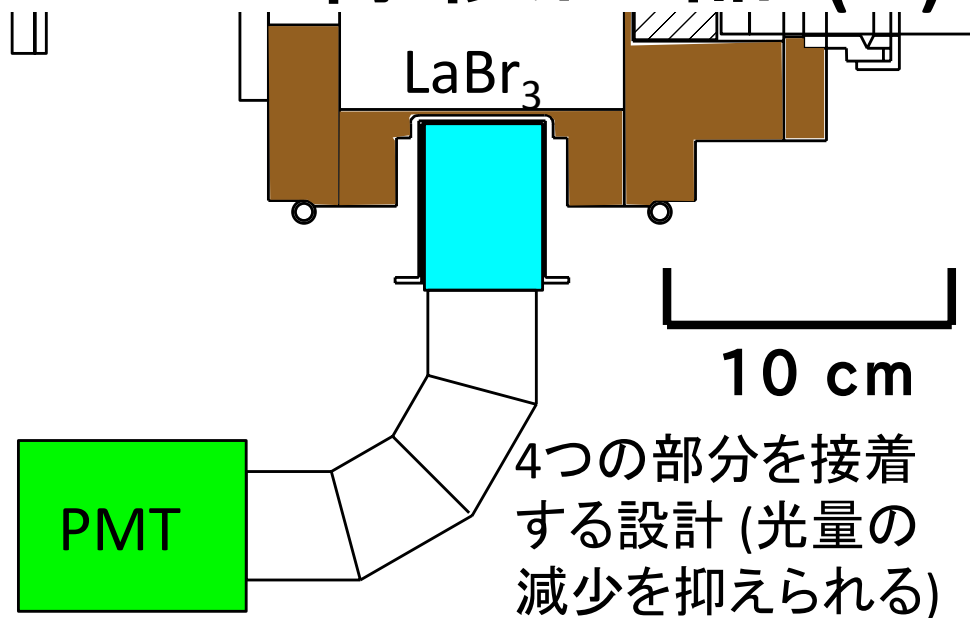


高い時間分解能

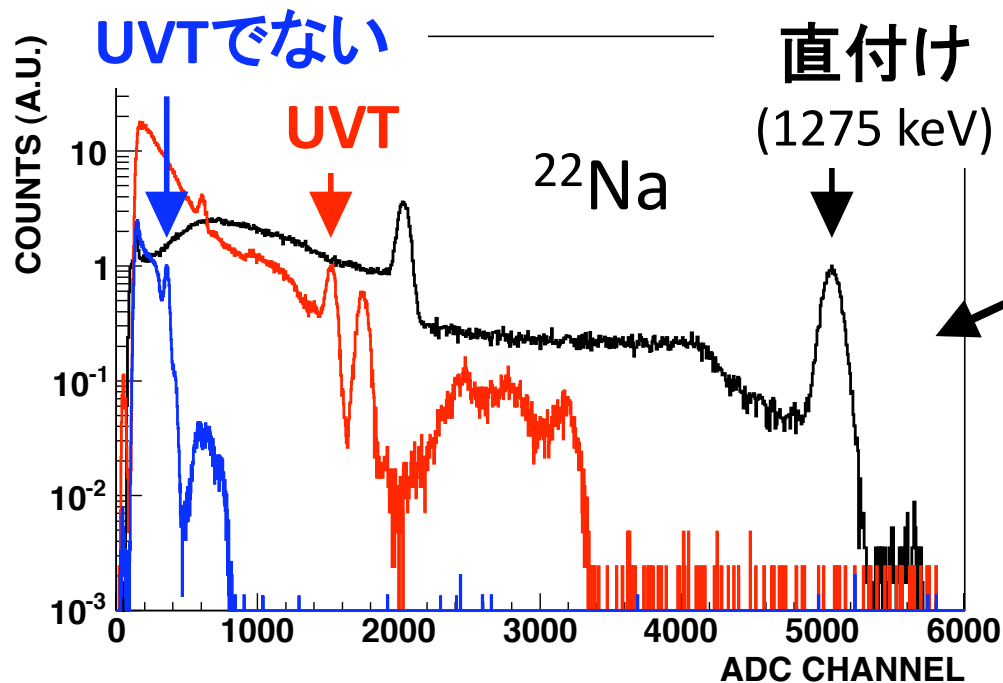
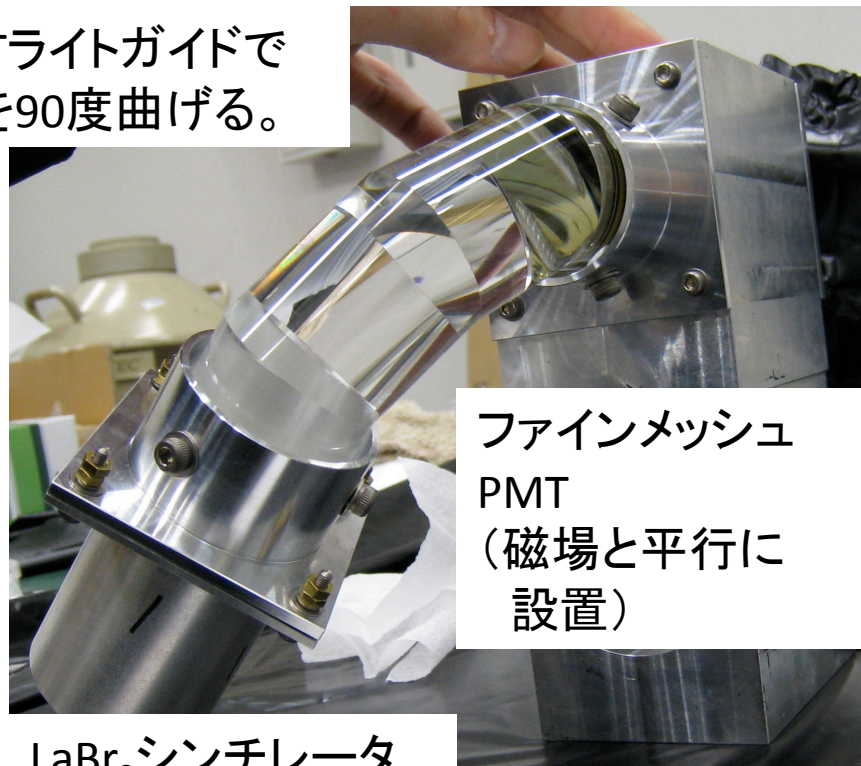
200 ps FWHM @ 511 keV

20

ガンマ線検出器 (2) ~UVTライトガイド~



UVTライトガイドで光を90度曲げる。



ライトガイドによる光量の変化

直付けに比べ、
UVT ライトガイドでは、
 光量が 30% に減少。
 (**UVTでない** ライトガイドでは、7% まで減少してしまう。)

新しい2 γ -taggingの方法

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
(昔の方法)



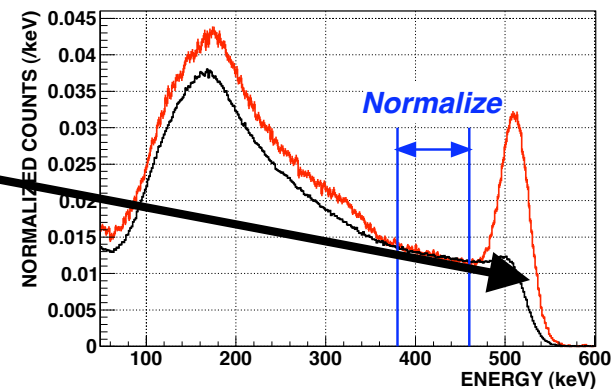
Back-to-back に検出器を置き、両方に 511 keV が入った場合を tag
(長所) S/N がよい (短所) Collection efficiency が小さい

(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 をもつ

LaBr₃(Ce) シンチレータを使うことで、Energy tagging が可能

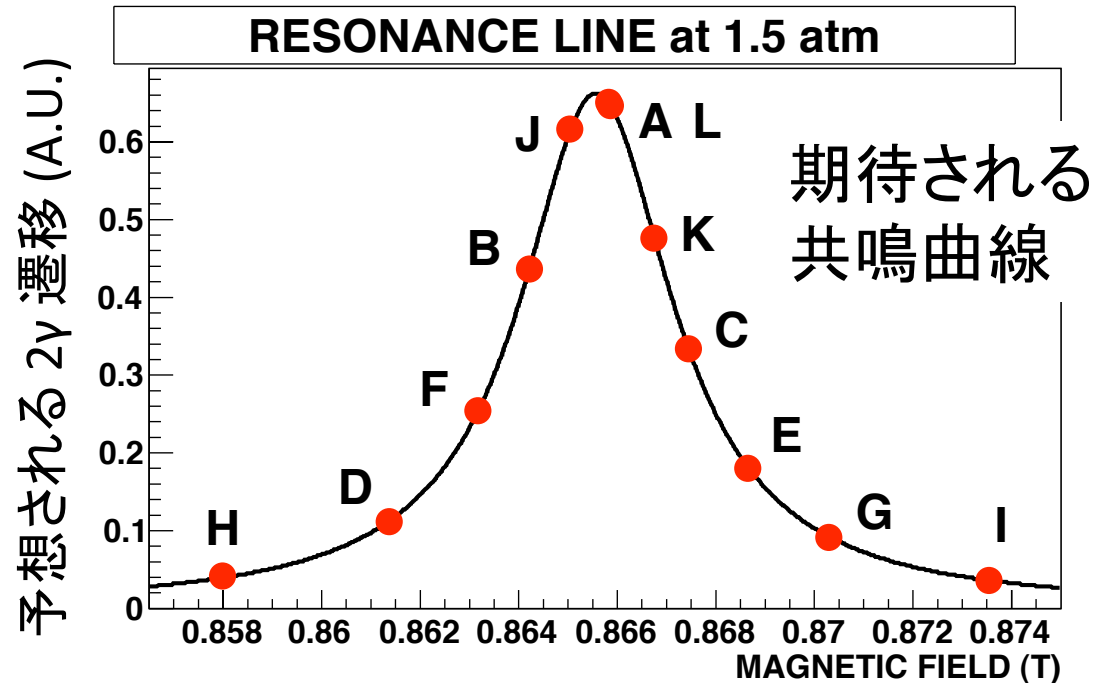
→ **約50倍高い統計** が得られる (短期間で測定可能)

第1回 測定 (1)

- 2009年6月から9月まで、測定した。
- Trigger は、 β -tagging system でのプラスチックシンチレータの
コインシデンスと LaBr_3 のORを、コインシデンスさせて作る (β
がタグできて、かつ LaBr_3 が1個でも鳴ったらデータを取る)。
- ポジトロニウムは、Cavity 中の
混合ガス(N_2 90% + イソブタン 10%) によって生成。
- イソブタン (クエンチング・ガス)によって、低速陽電子からの
バックグラウンドを除去。
- ガス圧 1.5 atm, 1.0 atm で測定。
- Trigger rate \sim 3.5 kHz, DAQ rate \sim 0.7 kHz

第1回 測定 (2)

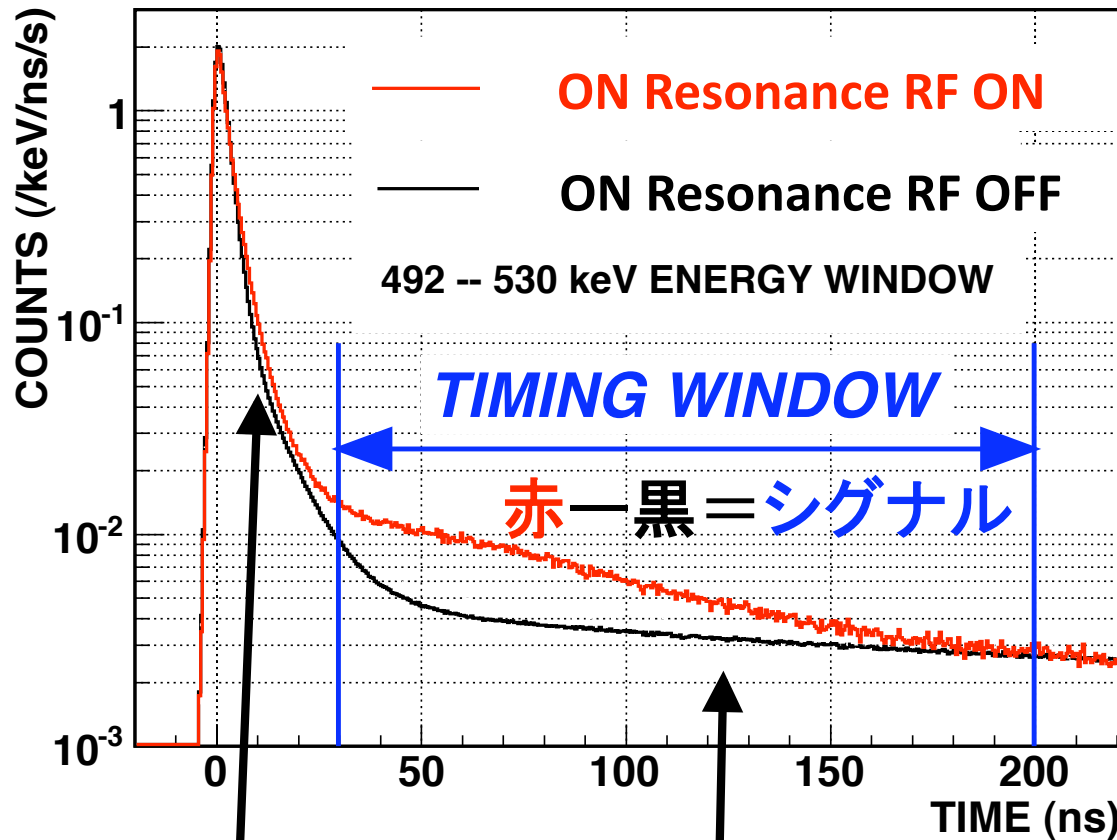
- o-Psの、 $m_z = \pm 1$ 成分から $m_z = 0$ 成分への遷移(Zeeman遷移)によって **2 γ 崩壊の数が増える**のを見る。
- 固定磁場において、RFの周波数を変えて測りたいが、アンプやCavityは、広範な周波数に対応できない。
- 固定周波数で、磁場を変えて変化を見ても、本質的には同じ。→ **磁場でスキャン**
- 磁場は、変更するたび、**永久電流モード**にする(安定した後の変化は、 ± 1 ppm以下)。
- 日中、RFをかけて測定し、夜中・休日に、RF-OFFの測定を行う。



Run	磁場	期間
1-1	A	6/29 - 7/2
1-2	A	7/2 - 6
2	B	7/6 - 8
3	C	7/8 - 13
4	D	7/13 - 15
5	E	7/15 - 20
6	F	7/20 - 22

Run	磁場	期間
7	G	7/22 - 27
8	H	7/27 - 29
9	I	7/29 - 8/3
10	J	8/3 - 12
11	K	8/12 - 14
12	L	8/20 - 21

時間スペクトル



短い寿命成分
($m_z = 0$)

長い寿命成分
($m_z = \pm 1$)

$m_z = \pm 1 \rightarrow m_z = 0$ の遷移が起きている。

- プラスチックシンチレータと、 LaBr_3 の時間差。

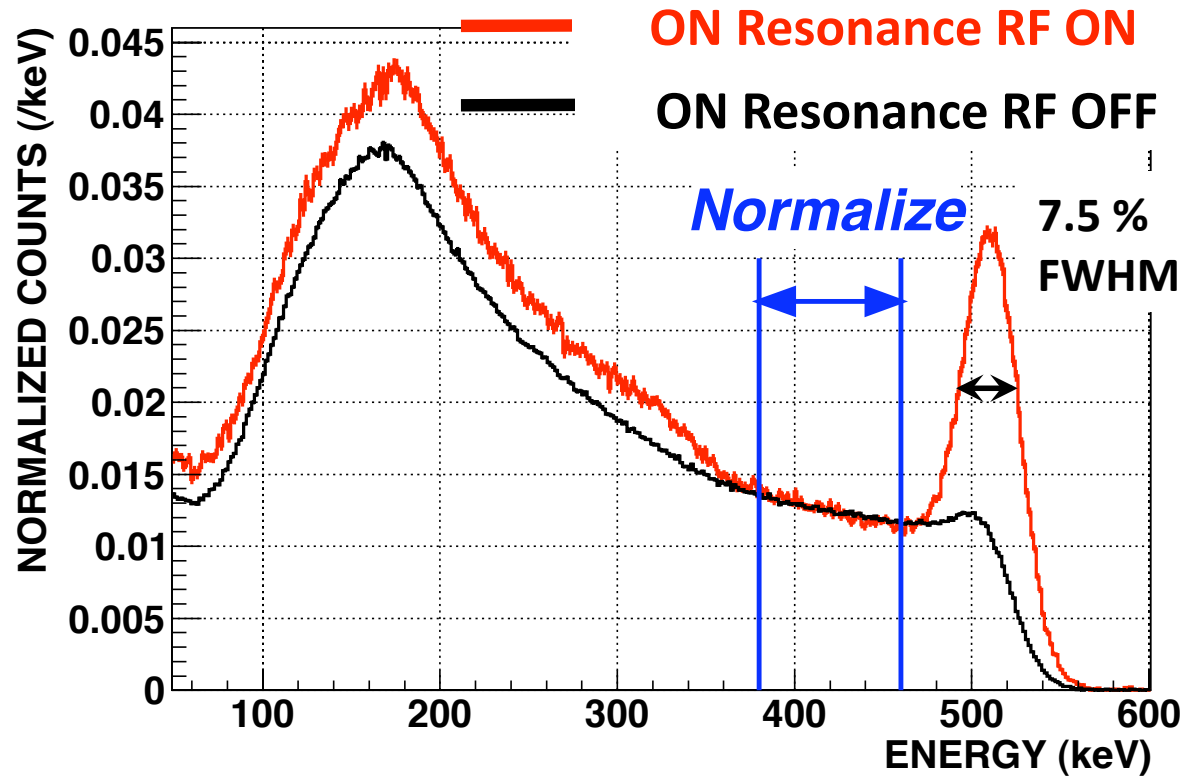
- 分解能 $\sigma \sim 1.0$ ns

- 511 ± 19 keV のエネルギーカットで、 2γ イベントを選択。

- 通常(RF OFF)は、短い成分(磁場)と、長い成分(pick-off)。

- 共鳴ピーク上(赤)では、遷移によって、 2γ イベントが増加していることが分かる。

エネルギースペクトル (1)



赤一黒 = シグナル

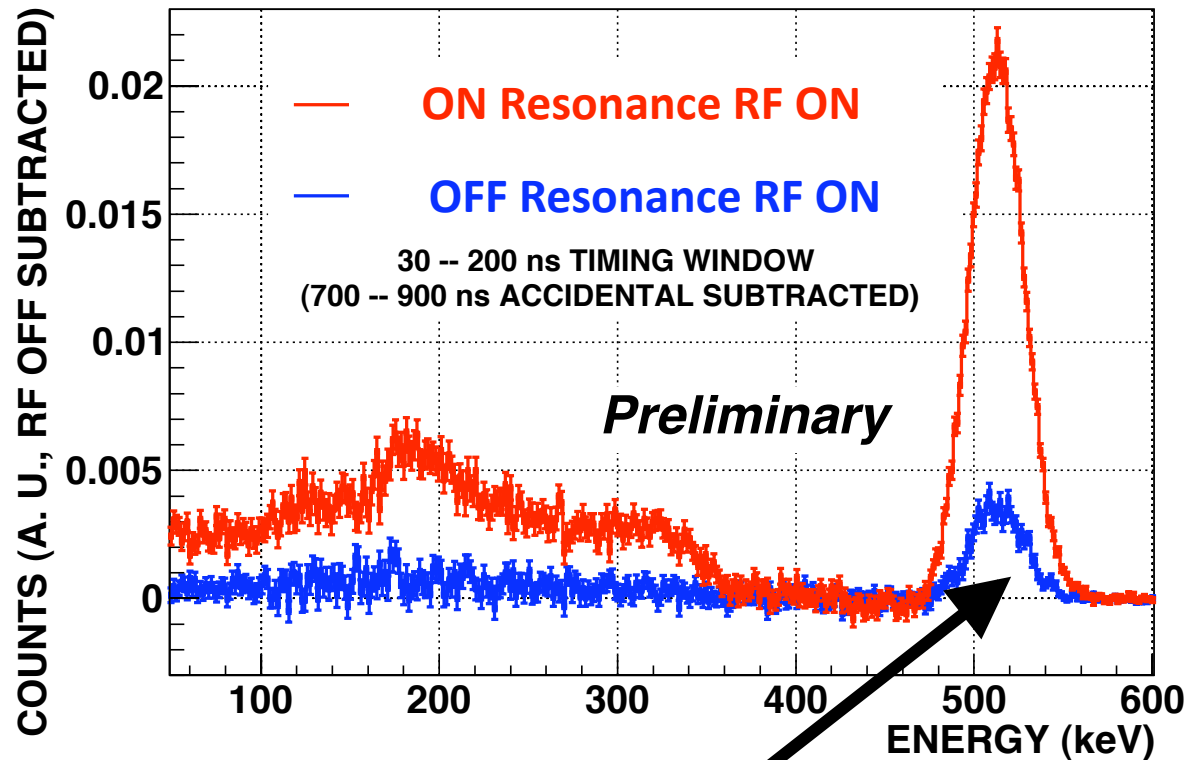
と考え、RF OFF を差し引いて、
遷移 2γ のエネルギースペクトルを作る。

- Prompt suppression 及び、アクシデンタルを除くため、30—200 ns の Timing window。

- アクシデンタル(700—900 ns)を、差し引いて、エネルギースペクトルを作成。

- 380—460 keV の、 2γ 崩壊からのコンプトン効果によるなだれ込みが最も少ない領域で、ノーマライズ。

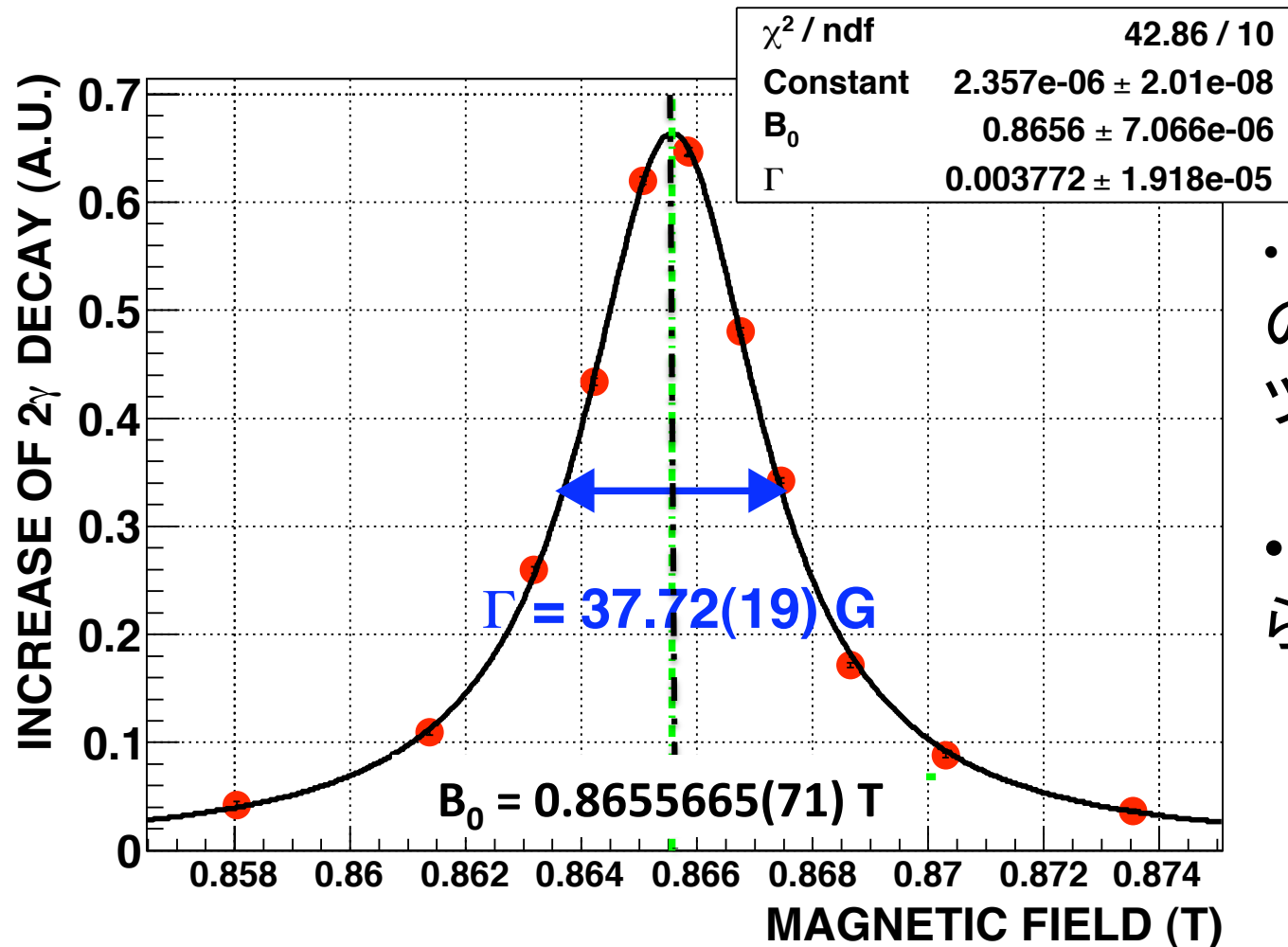
エネルギースペクトル (2)



このピーク面積(=2 γ 遷移の増分)から、遷移の共鳴曲線を作る。

- RF OFFのスペクトルを差し引いた後のスペクトル。
- 遷移 2 γ のみのスペクトルと考えるとよい。
- 共鳴ピークで、2 γ 崩壊が増えていることが、はっきりと現れている。
- ピークから外れたところ(青)では、遷移が少ない。

共鳴曲線



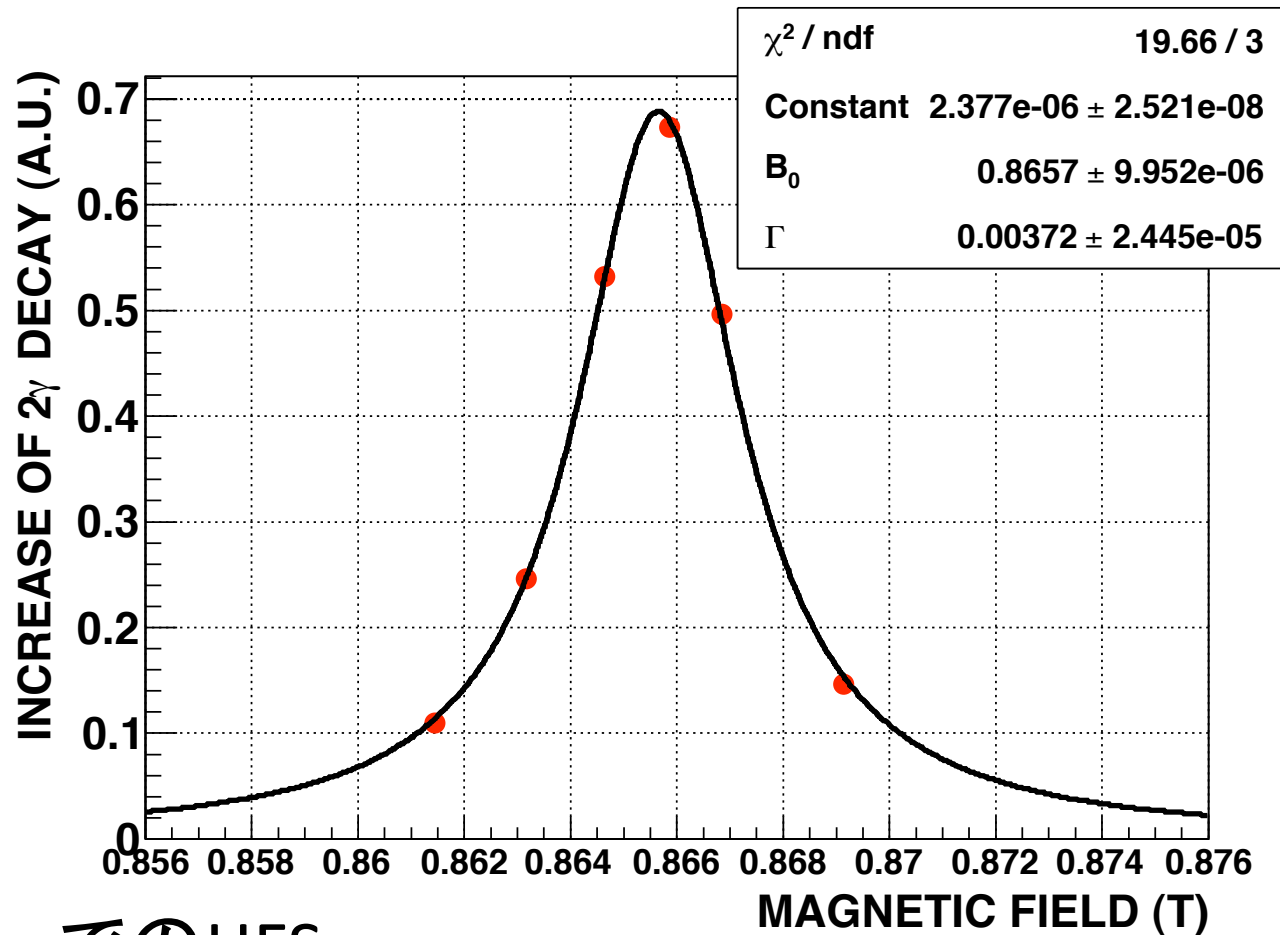
• ブライト・ウィグナーの共鳴曲線(ローレンツ関数)でフィット。

• 共鳴の中心から、HFSの値を求める。

1.5 atm での HFS

HFS = $203.3774 \pm 0.0035 \text{ GHz}$ (17 ppm, 統計誤差のみ)

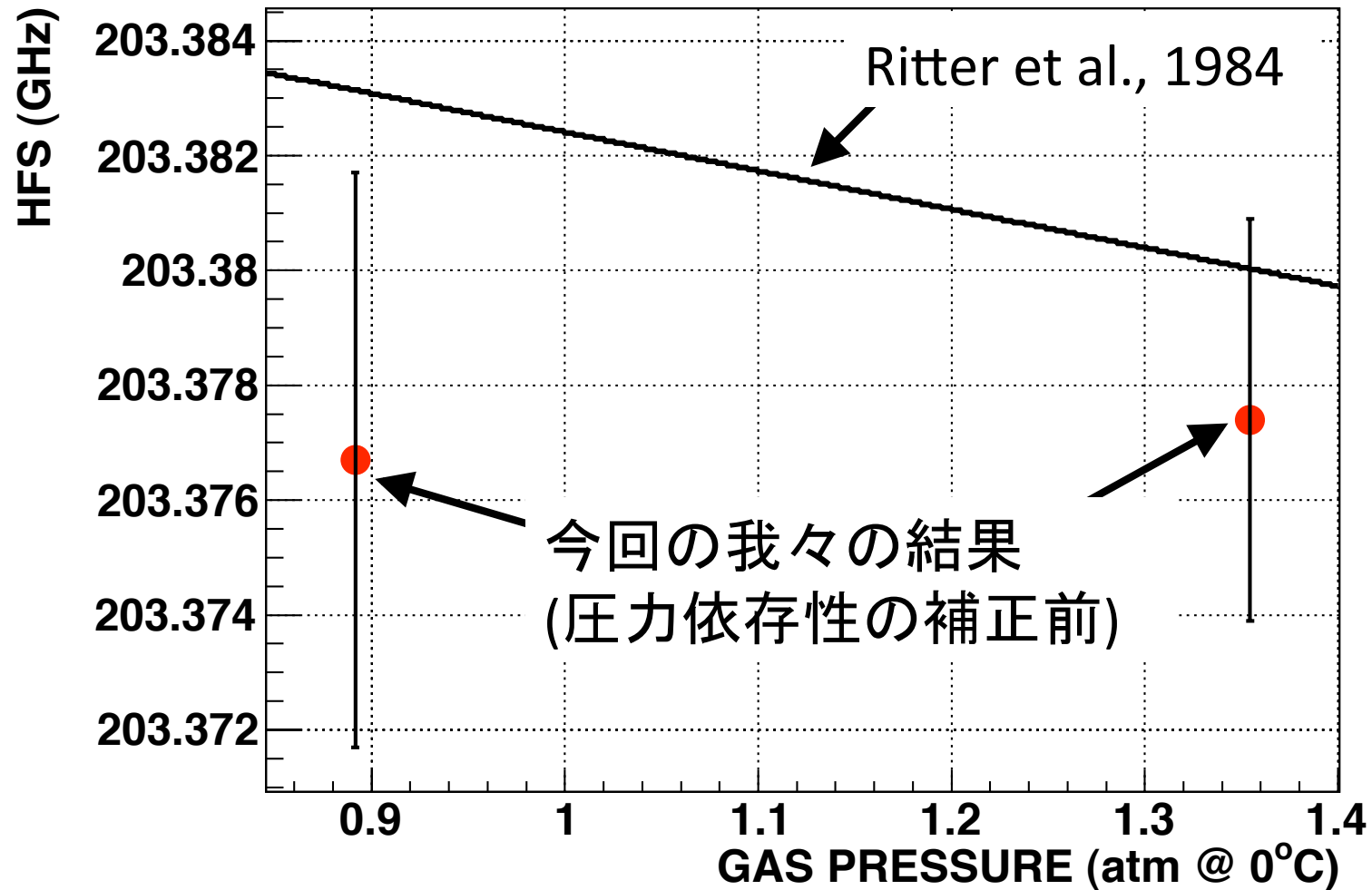
1.0 atm の結果



- 1.0 atm でのHFS

HFS = 203.3767 ± 0.0050 GHz (25 ppm, 統計誤差のみ)

圧力依存性



今回の、我々の結果からだけでは、圧力依存性は見られなかったが、過去の実験とはコンシステント

→ 今回は、-33 ppm/atm (Ritter et al., 1984) の補正を入れる。 30

系統誤差

系統誤差の要因	大きさ (ppm)
磁場の非一様性	22
解析法 (研究中 → Backup)	< 40
共鳴曲線の補正	< 20
圧力依存性 (熱化以外)	8
ポジトロニウムの熱化	< 20

系統誤差の要因	大きさ (ppm)
RF 周波数	6
RF Cavity の Q値	10
測定点とPs生成領域間の 磁場の補正	4
磁場変動	2
NMR磁場測定	2
Quadrature sum	56

青字: 今後の解析で改善予定

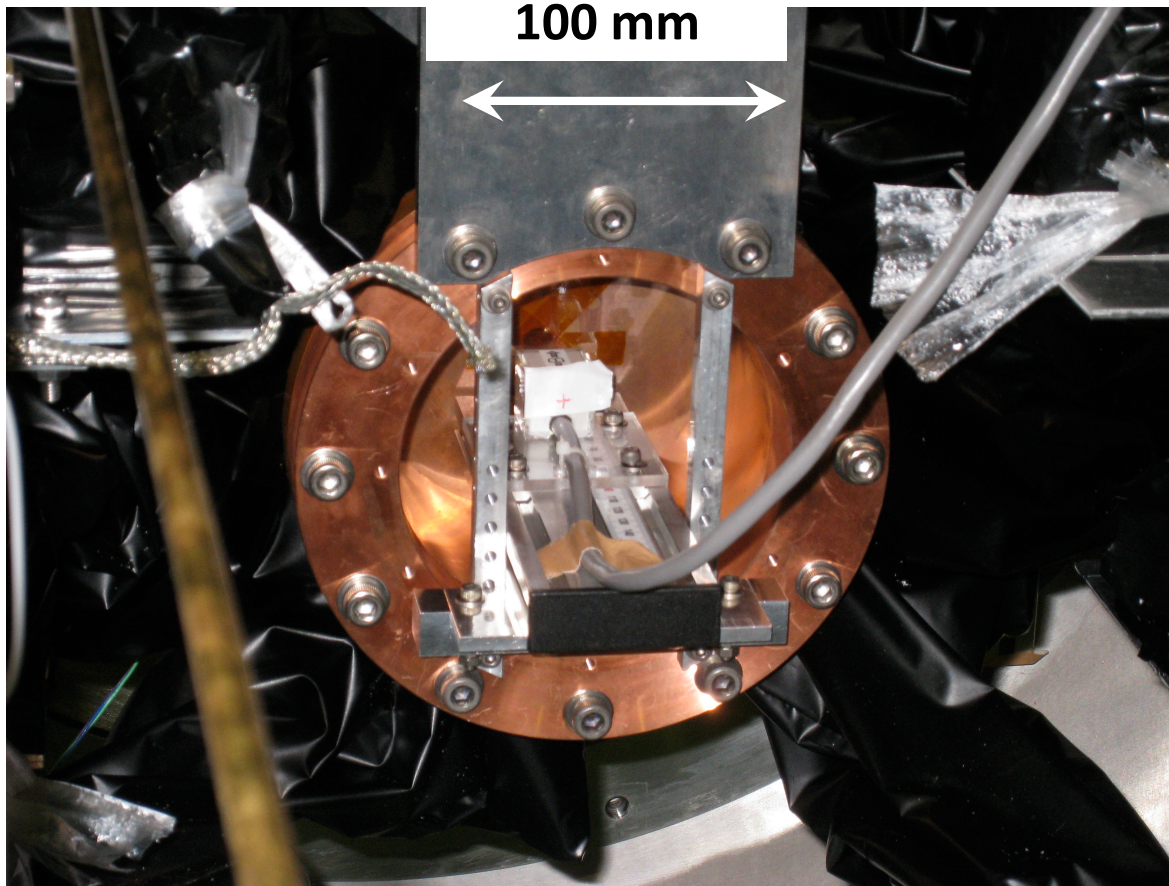
1.5 atm, 1.0 atm での測定で得られたHFSの暫定値
 203.385 ± 0.003 (14 ppm, stat.) ± 0.011 (56 ppm, sys.) GHz

過去の実験値・理論値と無矛盾

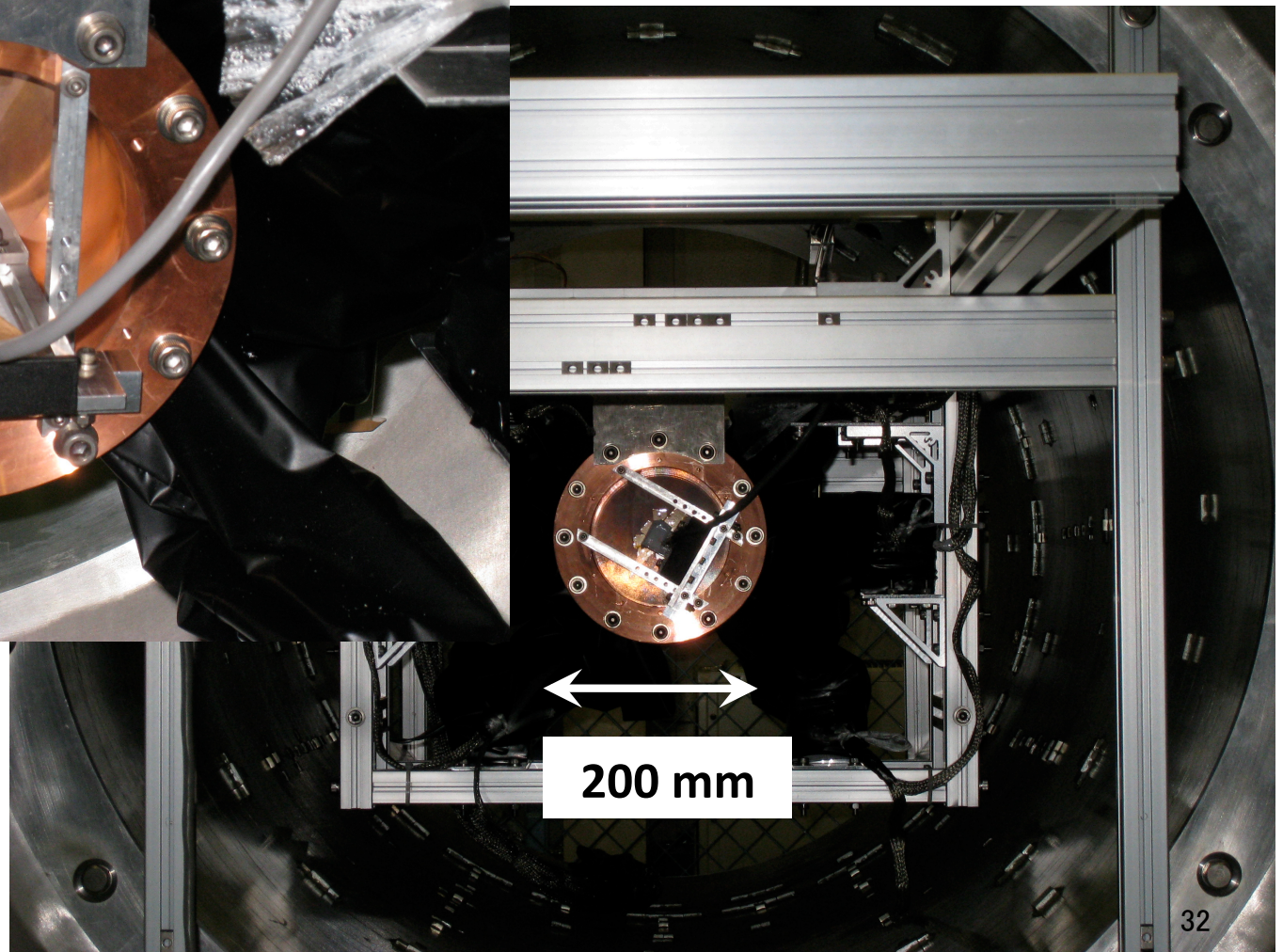
系統誤差を 1 桁以上改善する必要がある。

磁場測定

9月下旬、
磁場を精密に測定した。
Cavity 内で 310 点測定

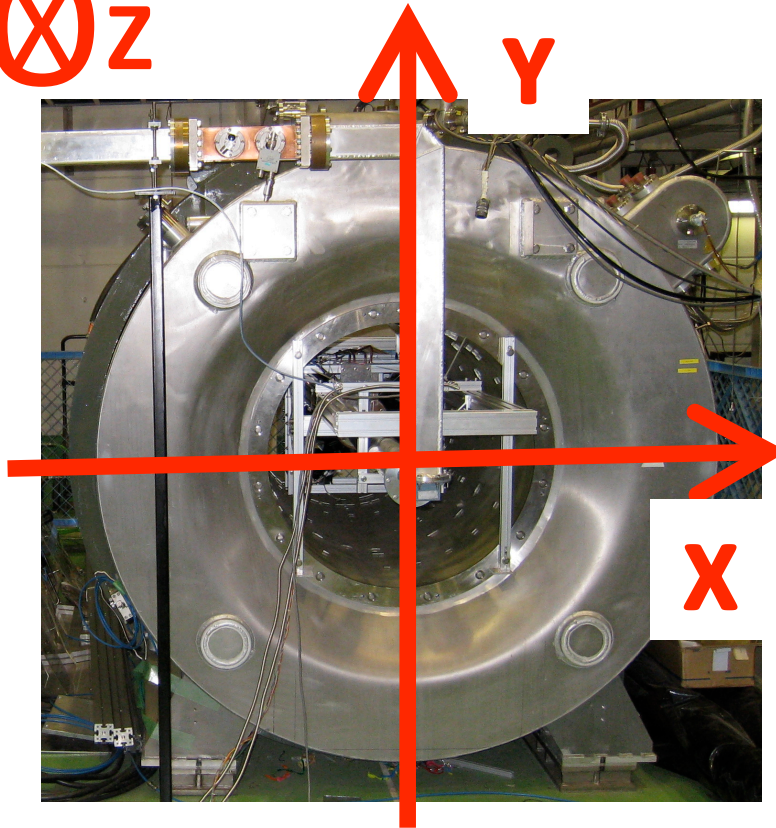


治具やPMTなどの
効果も含めた、
磁場分布を作成。

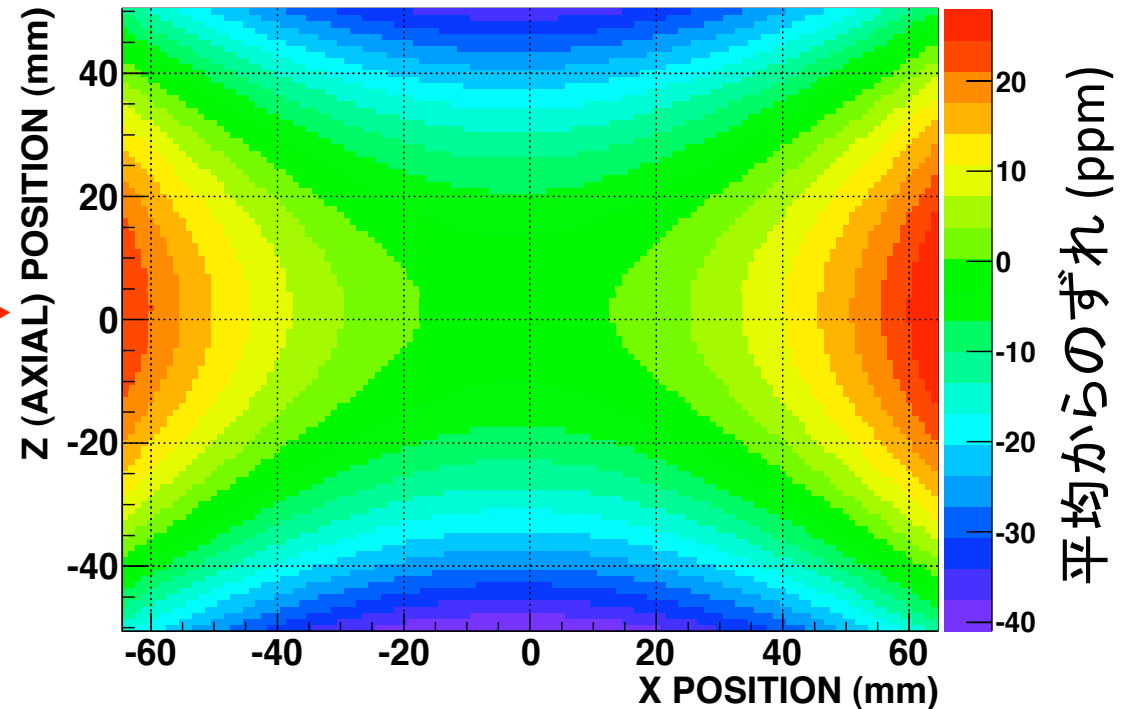


磁場の非一様性

⊗ Z



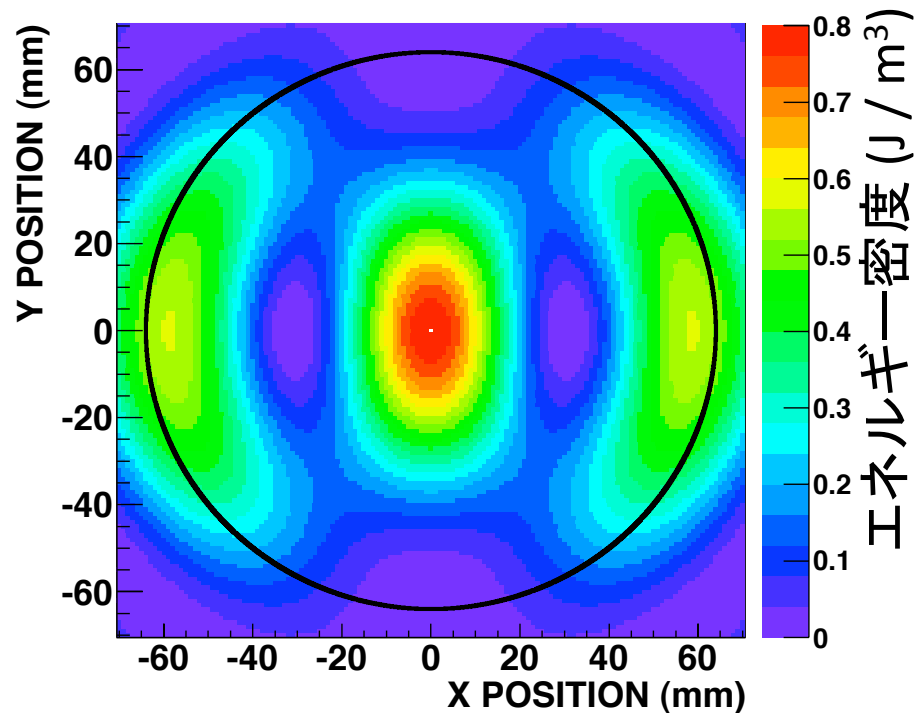
Y=0 平面での磁場分布
(Cavity の中心が原点)



- 磁場の非一様性が、深刻な系統誤差。
- Cavity内部での磁場の非一様性は、RMSで 23 ppm。

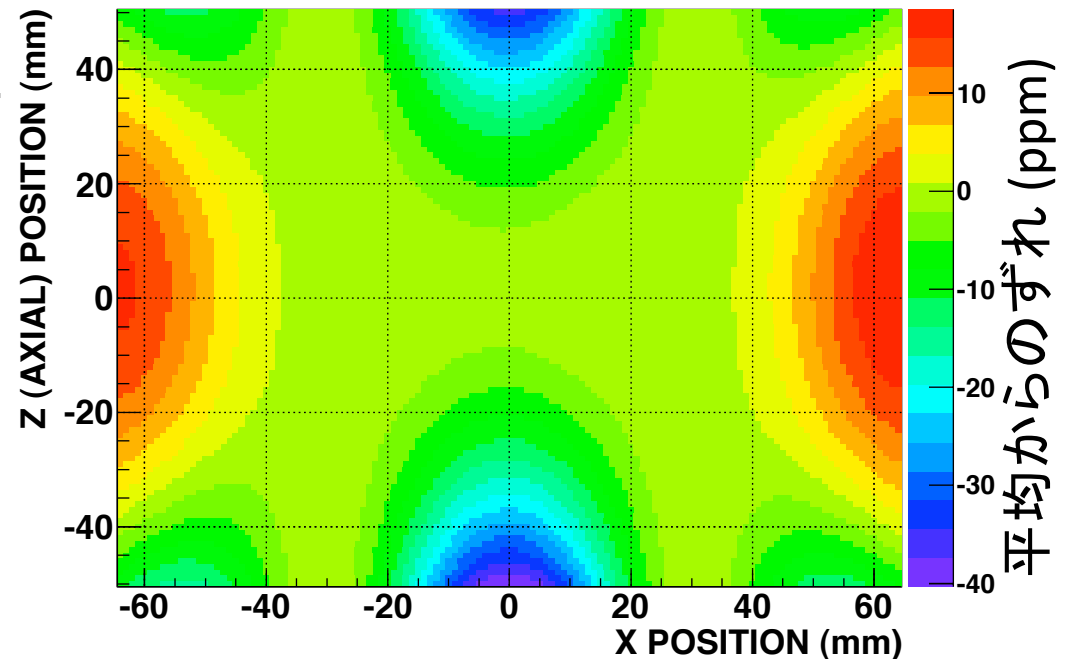
RF 磁場の強度

RFによる磁場のエネルギー分布(TM110 モード)



RF 磁場エネルギーの
重みをかけた後

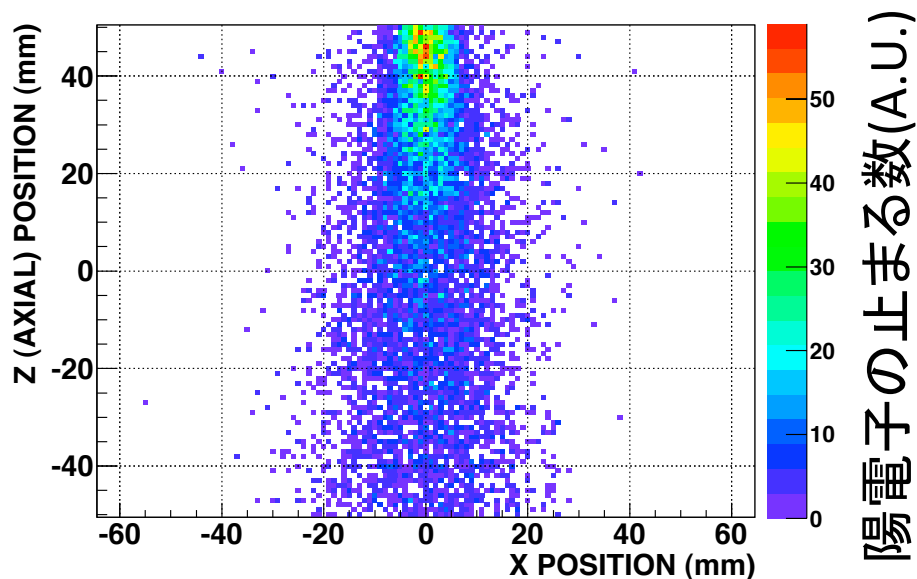
Y=0 平面での磁場分布
(Cavity の中心が原点)



一様性は、14 ppm (RMS)
に改善する。

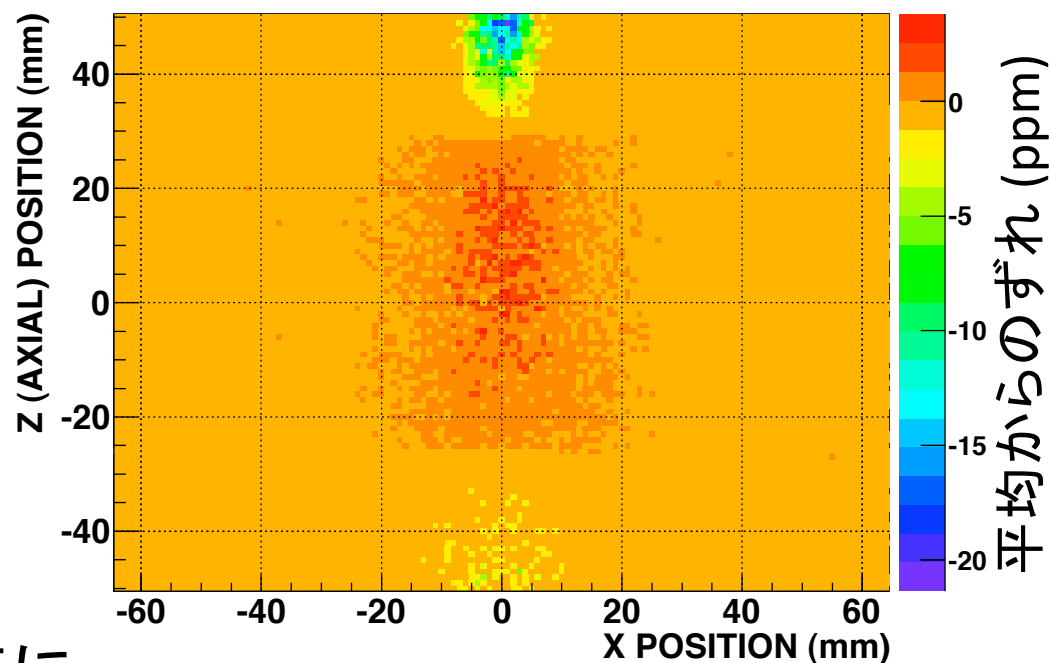
陽電子が止まる場所

陽電子が止まる場所の分布
(Geant4 MC simulation)



RF 磁場エネルギーに加え、
陽電子が止まる場所分布の
重みをかけた後

Y=0 平面での磁場分布
(Cavity の中心が原点)



一様性は 11 ppm (RMS)
(HFS にして、22 ppm) に改善
→これが、最終的な系統誤差に。

今後の展望

- 補償磁石の製作

深刻な系統誤差：磁場の非一様性を克服するため、補償磁石を用いる。今回の磁場測定の結果を基に、設計を開始している。実機製作を行い、試験的にHFS測定を行う(年明け)。O(1) ppmの磁場一様性を得る。

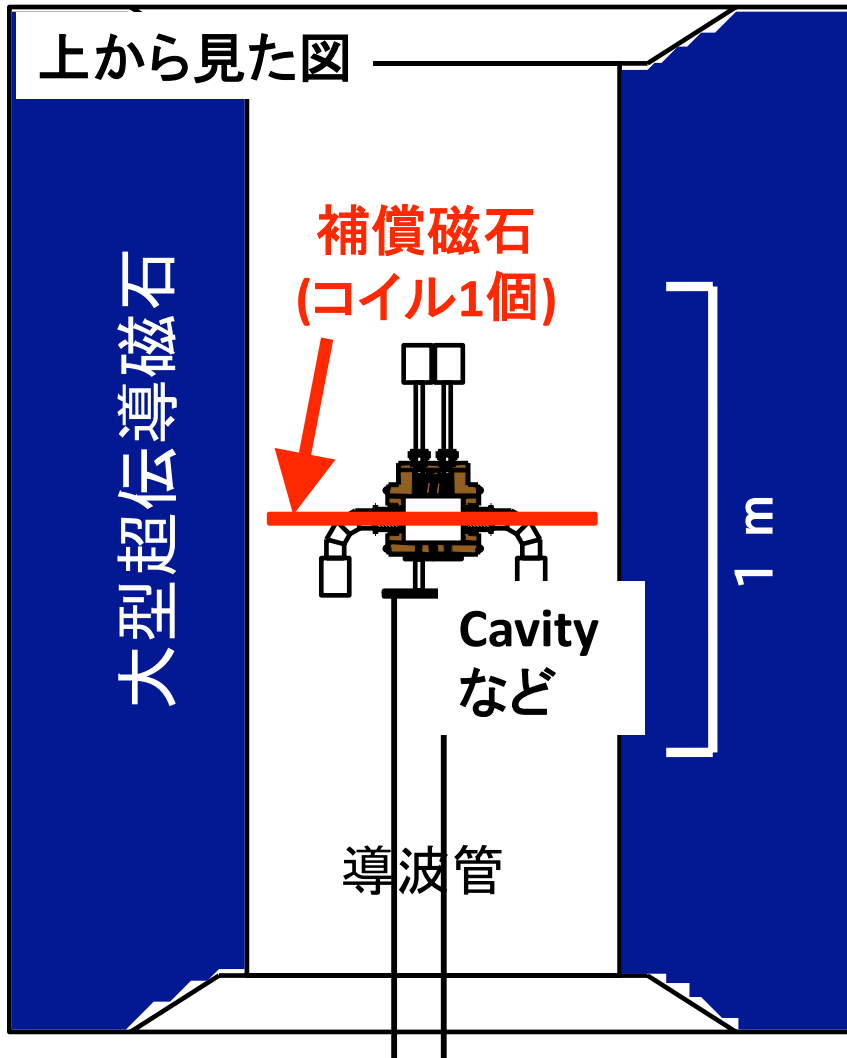
- 系統誤差、解析方法の研究 → 他の系統誤差を 1 ppm 程度に抑える。

- 物質の効果を精密に測定し、O(1) ppm の精度でHFSを測る(本測定、来年)。

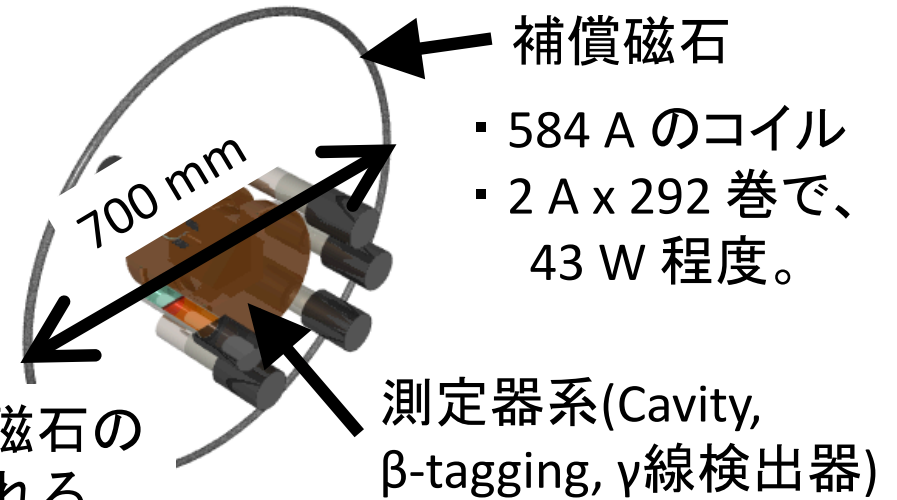
- 統計精度：第1回測定で、約60日で14 ppm

- 今後 2 年間程度の測定で、必要な精度が得られる。

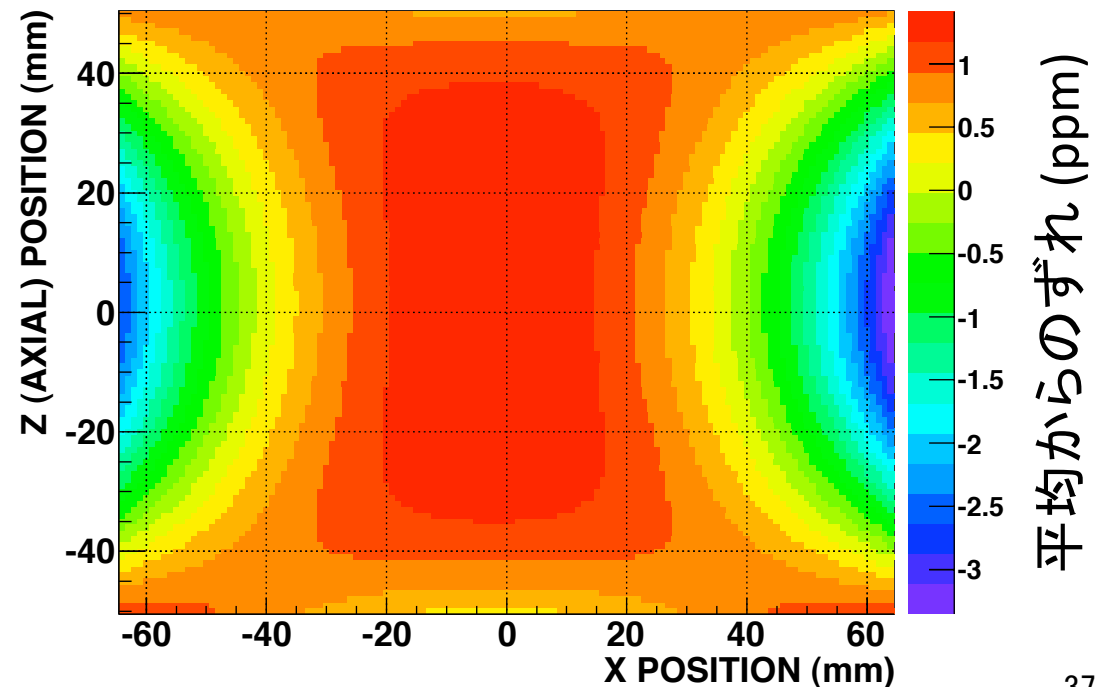
補償磁石の仮設計



補償磁石 (コイル 1 個) によって、
1 ppm (RMS) の一様性が得られる。
(シミュレーション)



Y=0 平面での磁場分布 (Cavityの中心が原点)



まとめ

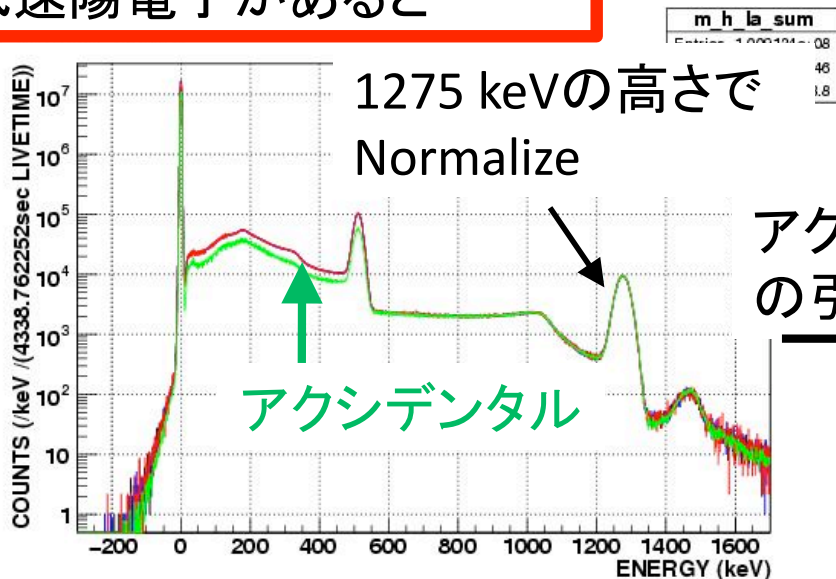
- 重要な物理量である、ポジトロニウムの超微細構造が、実験と理論で 一様に 3.9σ ずれている。
- ポジトロニウムの超微細構造の精密測定に向け、2ヶ月間、第1回測定を行った。
- 今までのデータから、過去の実験値・理論値と無矛盾な結果が、58 ppm 程度で求まっている。
- 深刻な系統誤差は、磁場の非一様性。
- 磁場の一様性を、 $O(1)$ ppmで得るため、補正磁石を開発する。
- 2年程度で、物質の効果を入れて $O(1)$ ppm の精度を達成する。

Backup

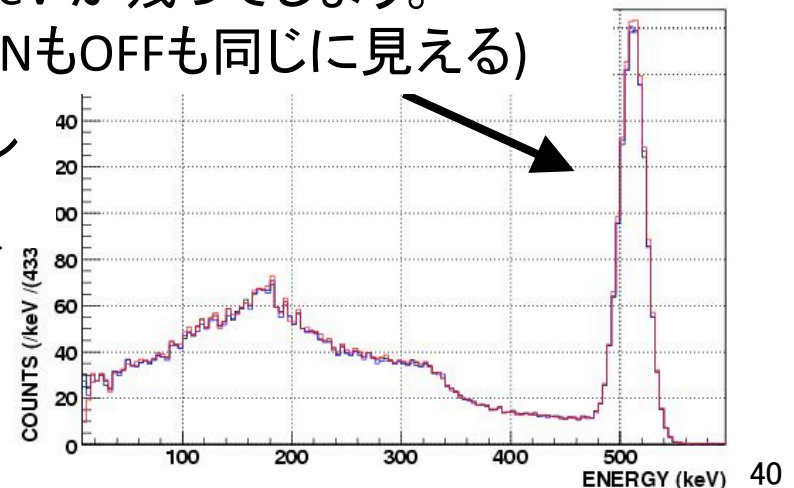
低速陽電子 (Slow Positron)

- ・ ガス中で、陽電子は、ガス分子との衝突を繰り返し、エネルギーを失う。
- ・ エネルギーを失ってほぼ止まった後、陽電子の多くは、遅くなったまま生き続け、Psを生成したり、対消滅したりせず、 ~ 180 ns の寿命を持つ \rightarrow 低速陽電子
- ・ タイミングカットをかけて、アクシデンタルを引いても、低速陽電子が対消滅するときの 2γ が、大きなバックグラウンドとなる。
- ・ 2008年末のテスト測定では、これが大きな問題となった (30–400 ns timing windowのなかで、アクシデンタルを引いた後のイベントの、60%を、低速陽電子が占めていた)。
- ・ イソブタンなどのガスは、低速陽電子の寿命を短くする、クエンチャーの能力がある。 \rightarrow 今回の測定では、イソブタンを混ぜ、バックグラウンド除去に成功した。

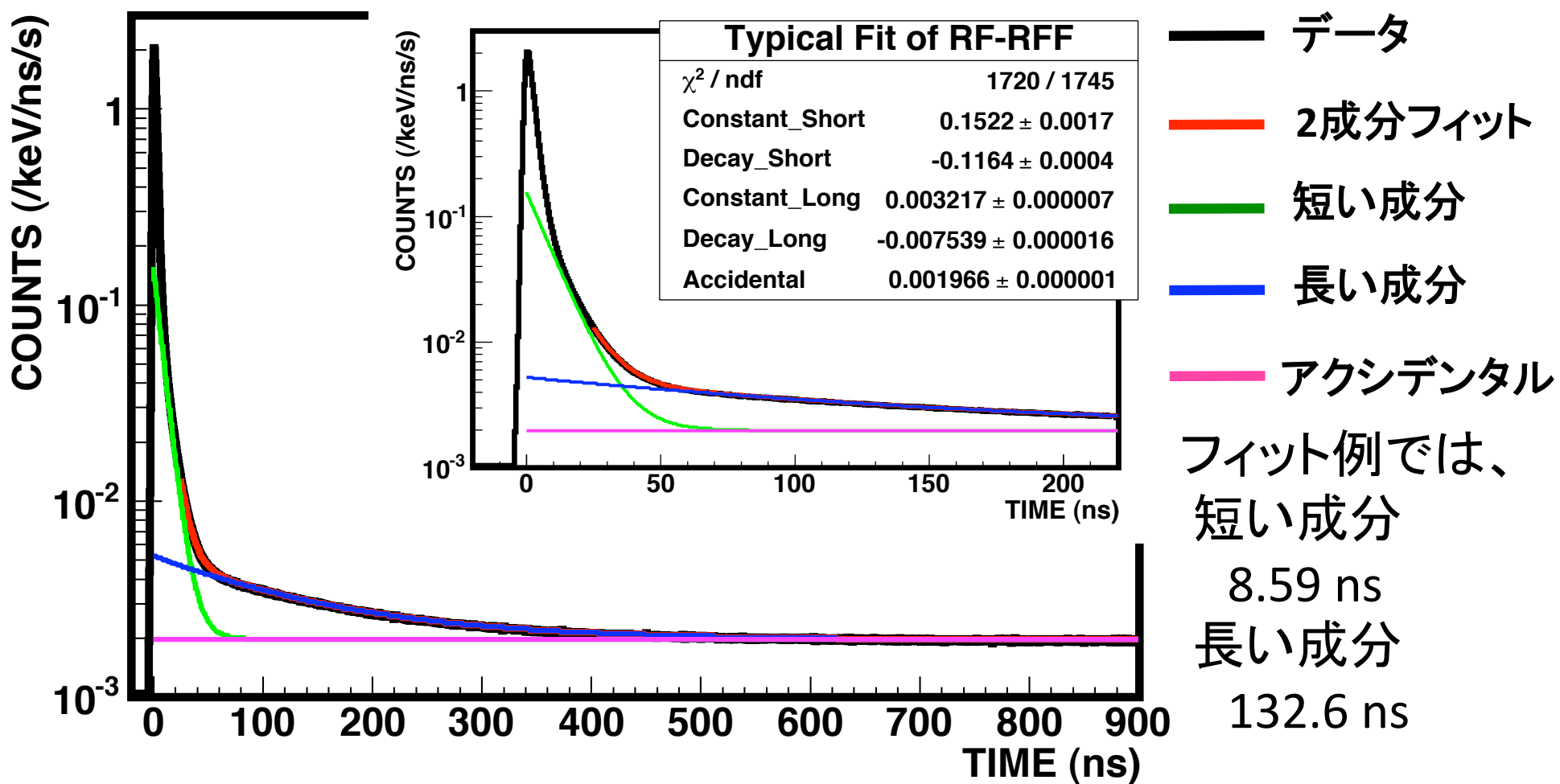
低速陽電子があると……



アクシデンタルを引いても、511 keV が残ってしまう。(RF ONもOFFも同じに見える)



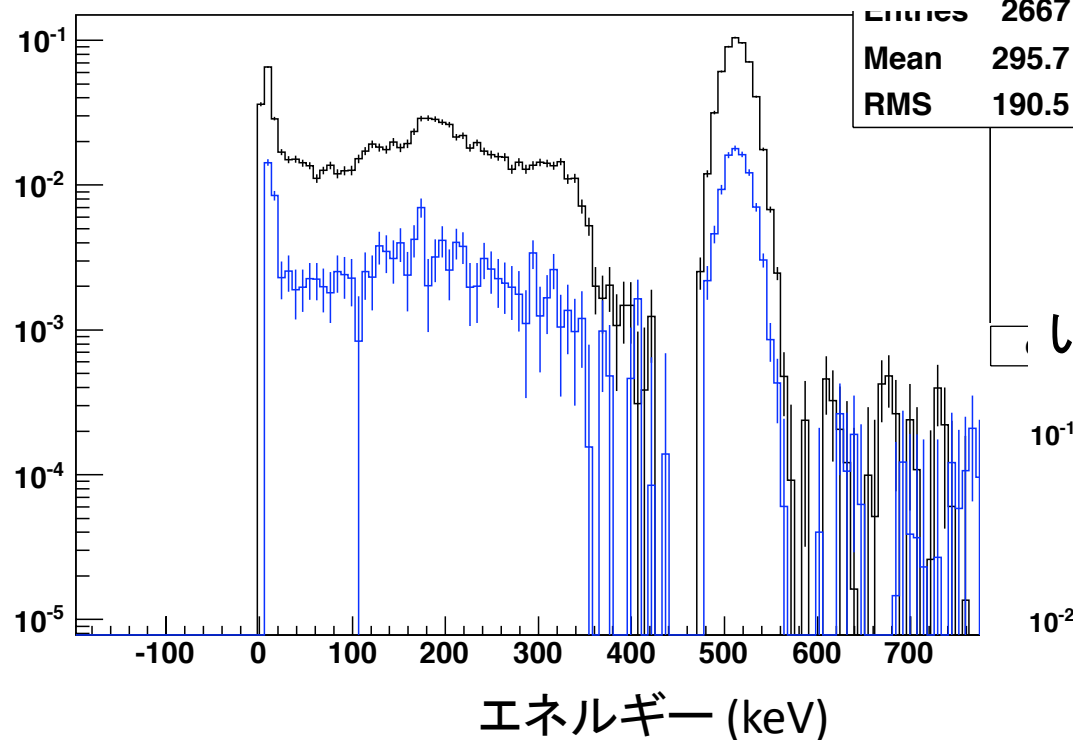
磁場中での寿命 2成分フィット例



$$f(t) = \exp(R_{stop} t) \{ C_1 \exp(\gamma_1 t) + C_2 \exp(\gamma_2 t) + A \}$$

RF OFF 引き算後のスペクトル

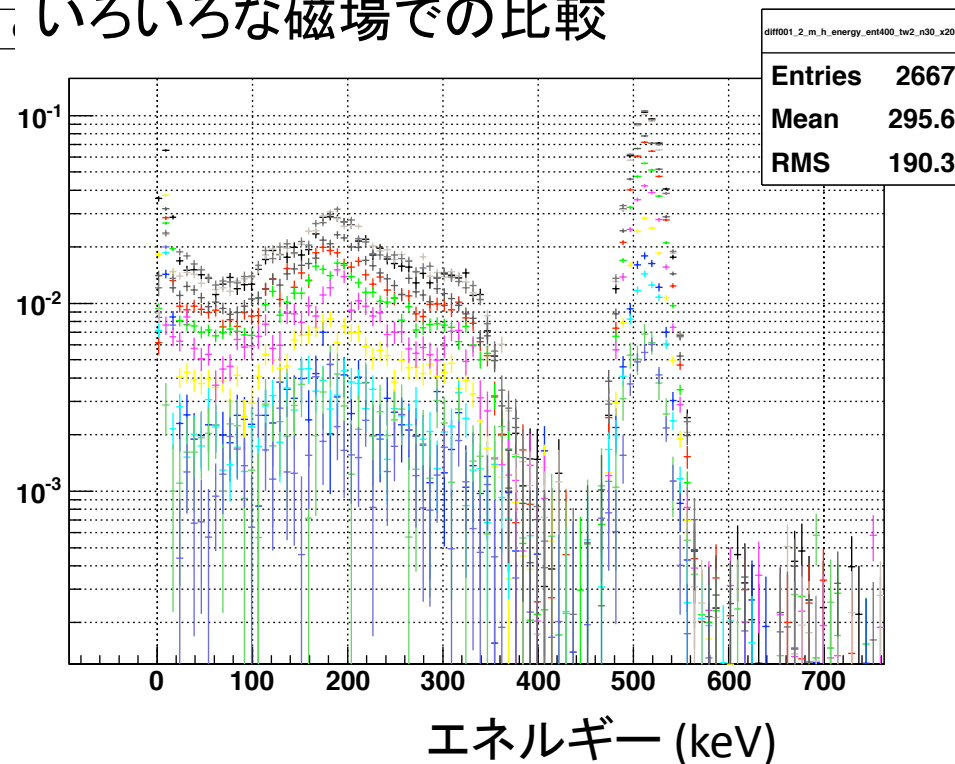
d ログスケールで。(黒:ピーク、青:裾)



相似形になっている。

遷移 2γ のスペクトル
であると考えてよい。

いろいろな磁場での比較



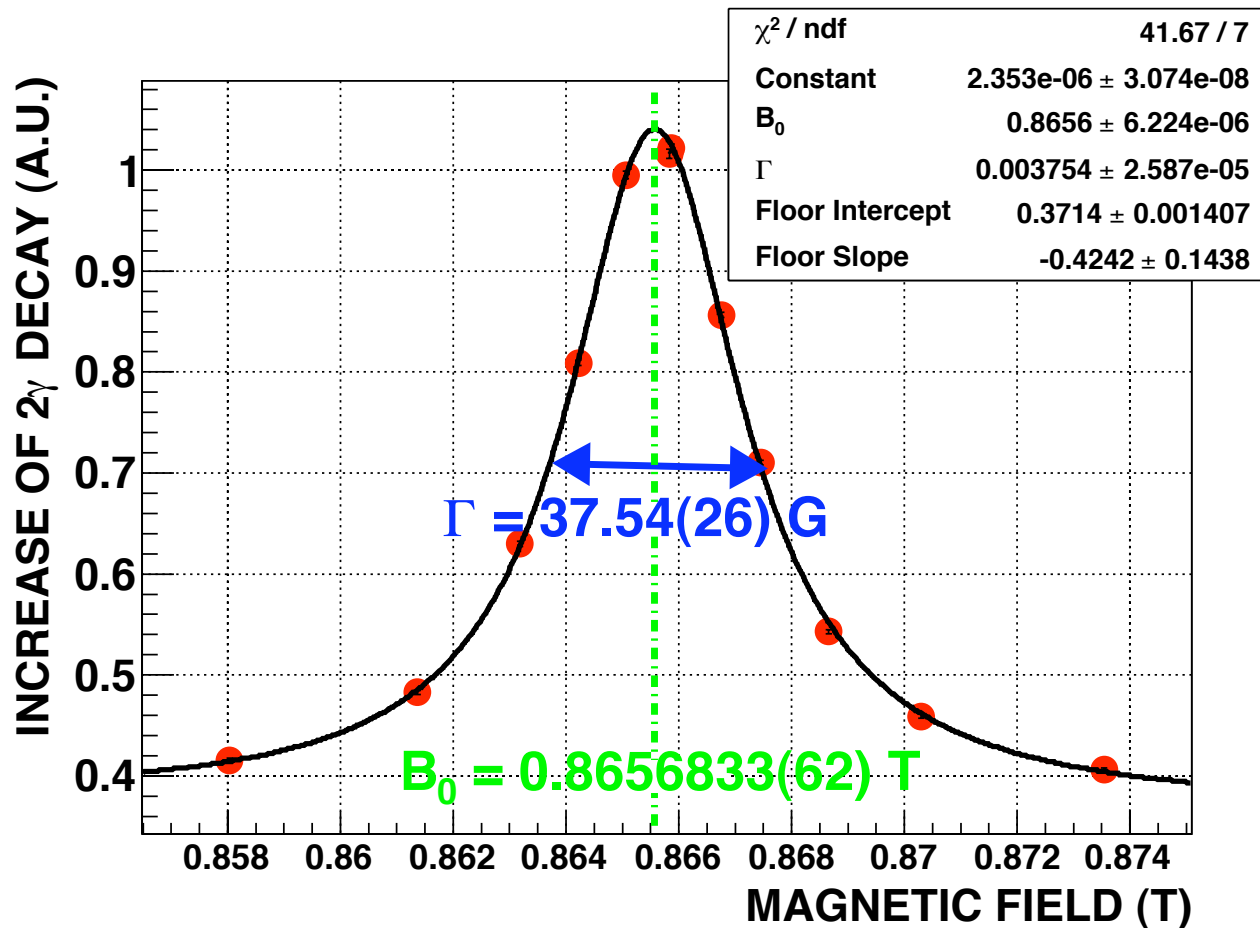
解析法(1)

Single $2\gamma/3\gamma$ RF-ON+RF-OFF

- 解析法として、まず、 LaBr_3 single triggerで、 $2\gamma/3\gamma$ の比を、RF-ON から RF-OFF を引いて調べた (3γ でノーマライズした)。
- これ以外にも、解析法 (2γ 遷移量の選び方) は、考えられる。
- 解析方法による違いは、最終結果の系統誤差となるので、詳細な研究が必要。
- RF-ON のみで $2\gamma/3\gamma$ を見る方法、RF-ON の 2γ レートだけを見る方法、single trigger でなく、back-to-back を用いる方法が考えられる。計 6 通り試した。

解析法(2)

Single $2\gamma/3\gamma$ RF-ON



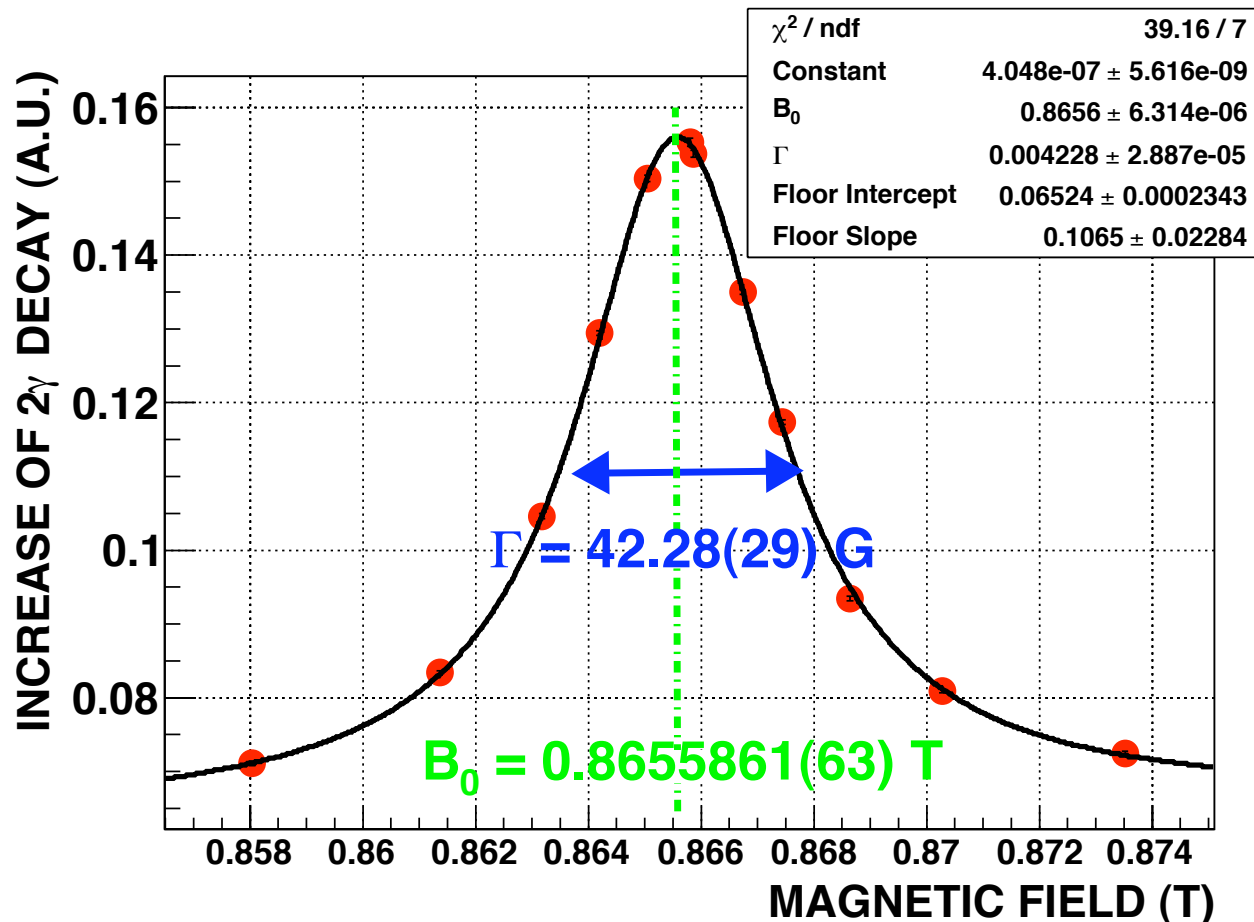
RF-OFFを引かないため、フロアが残っている。フロアの形として、一次関数を仮定し、(ブライト・ウィグナー+一次関数)でフィット。

HFS

$$= 203.395 \pm 0.003 \text{ (15 ppm, stat.)} \pm 0.014 \text{ (69 ppm, sys.) GHz}$$

解析法(3)

Single 2γ RF-ON



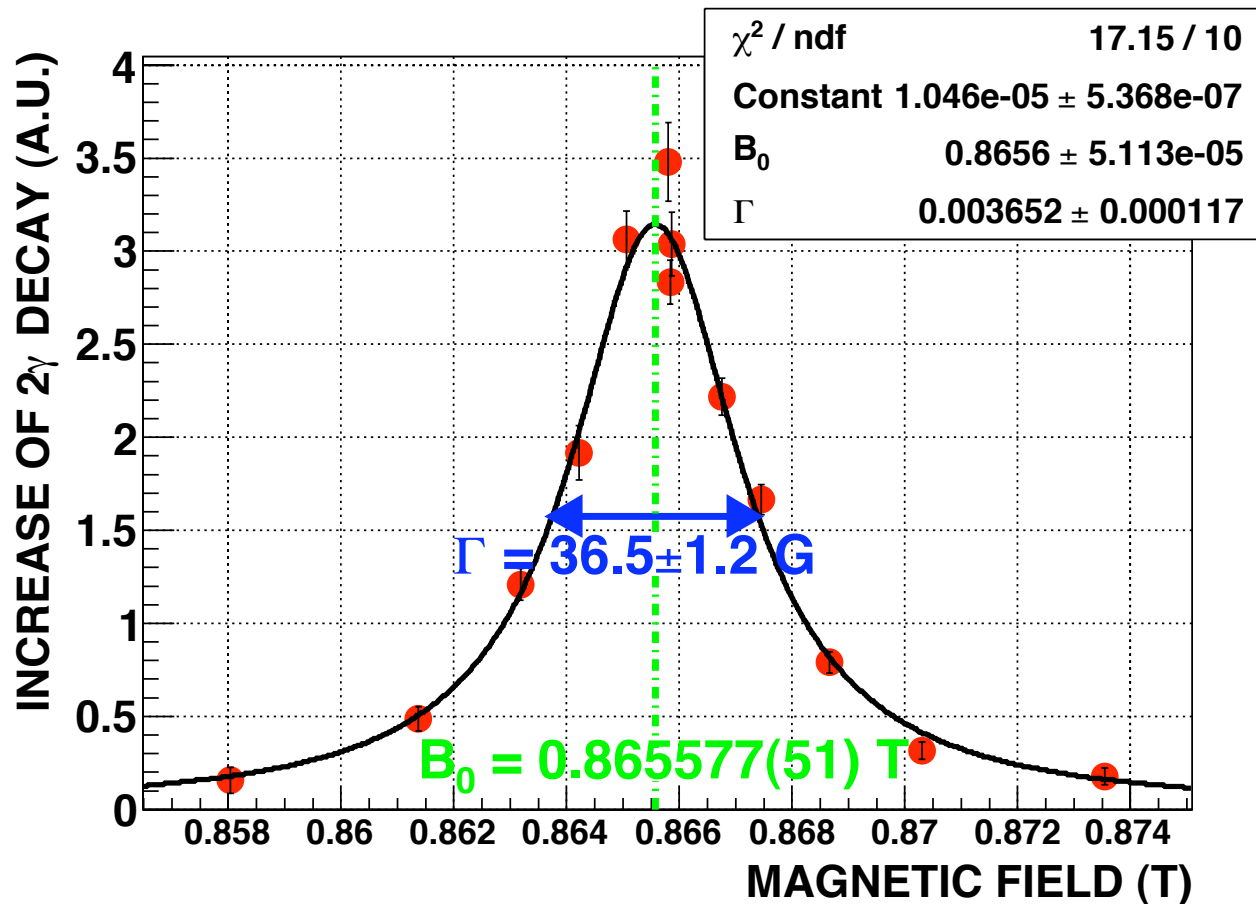
基本的に、511 keV FWHM に来たイベントレートを見ている。
RF-ONのみのため、フロアが残っている。
レートの場合、線源が時間とともに弱くなることの補正を入れる必要がある。

HFS

$$= 203.396 \pm 0.003 \text{ (15 ppm, stat.)} \pm 0.014 \text{ (69 ppm, sys.) GHz}$$

解析法(4)

Back-to-back $2\gamma/3\gamma$ RF-ON+RF-OFF



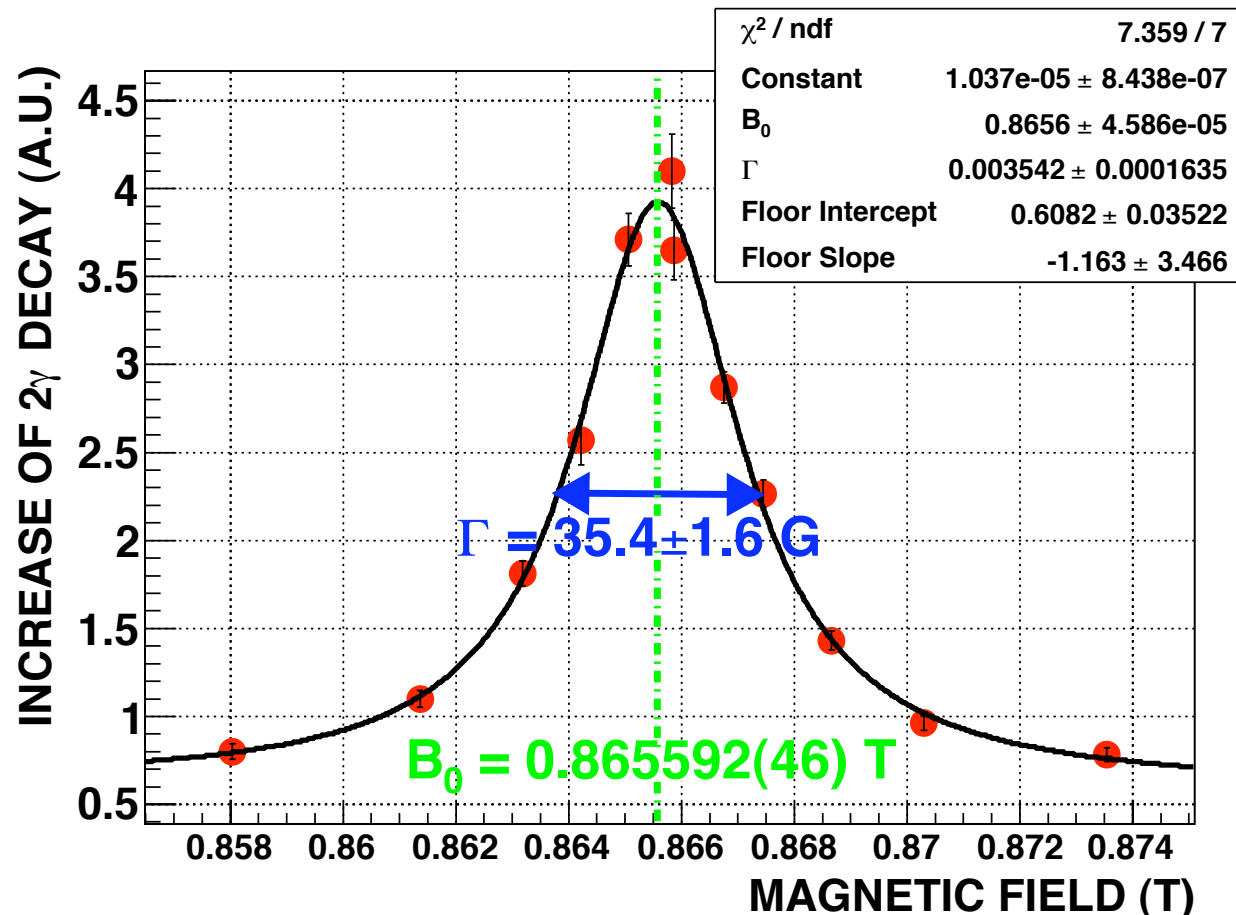
最初の解析法
を、Back-to-back条件
を課して、行ったもの。
 2γ は、2本とも511
keV FWHM, 3γ は、2
本ともコンプトンフ
リー。
比の大きさは、Single
より5倍よいが、統計
が少ないため、損し
ている。

HFS

$$= 203.392 \pm 0.024 \text{ (120 ppm, stat.)} \pm 0.014 \text{ (69 ppm, sys.) GHz}$$

解析法(5)

Back-to-back $2\gamma/3\gamma$ RF-ON



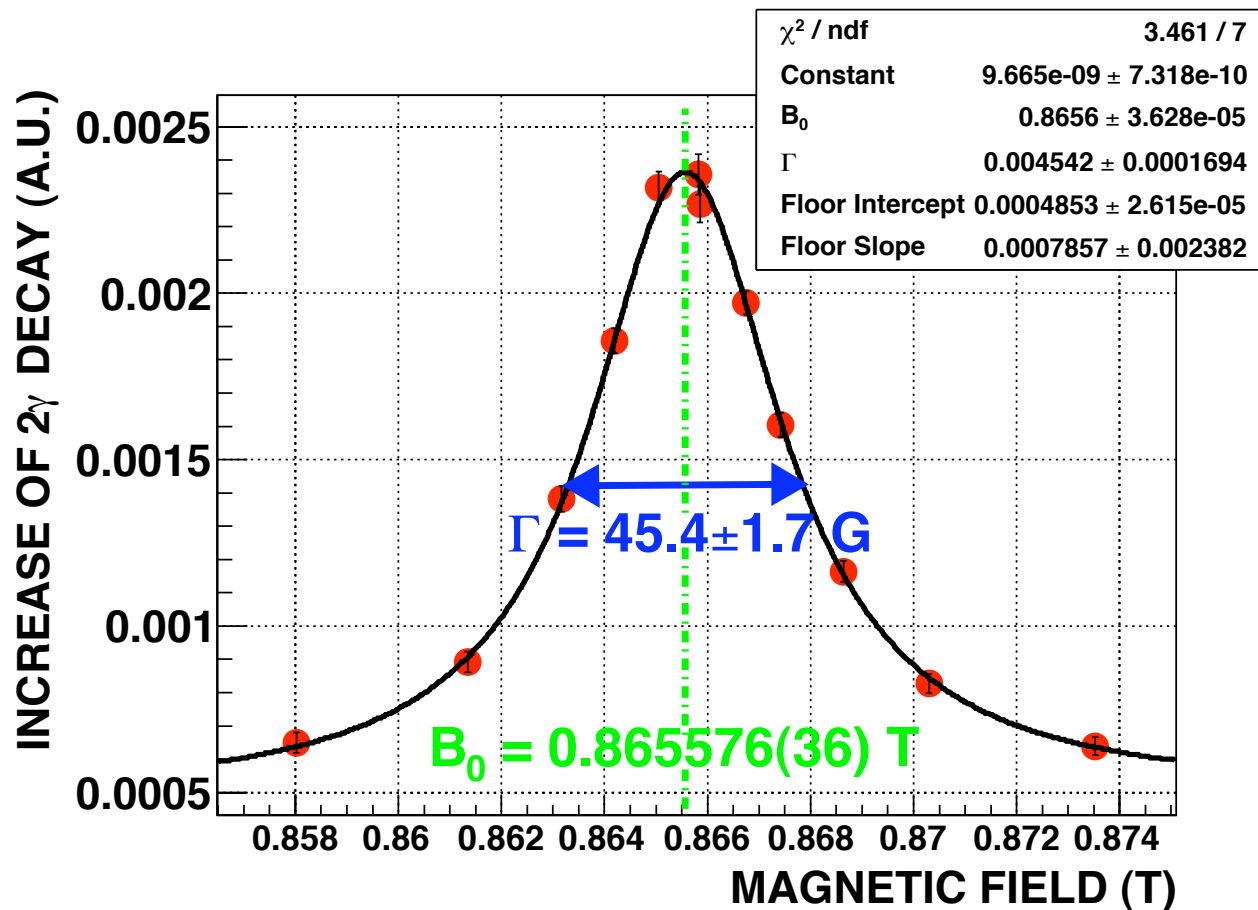
解析法(4)において、RF-OFFの引き算を行わなかったもの。

HFS

$$= 203.399 \pm 0.022 \text{ (110 ppm, stat.)} \pm 0.014 \text{ (69 ppm, sys.) GHz}$$

解析法(6)

Back-to-back 2γ RF-ON



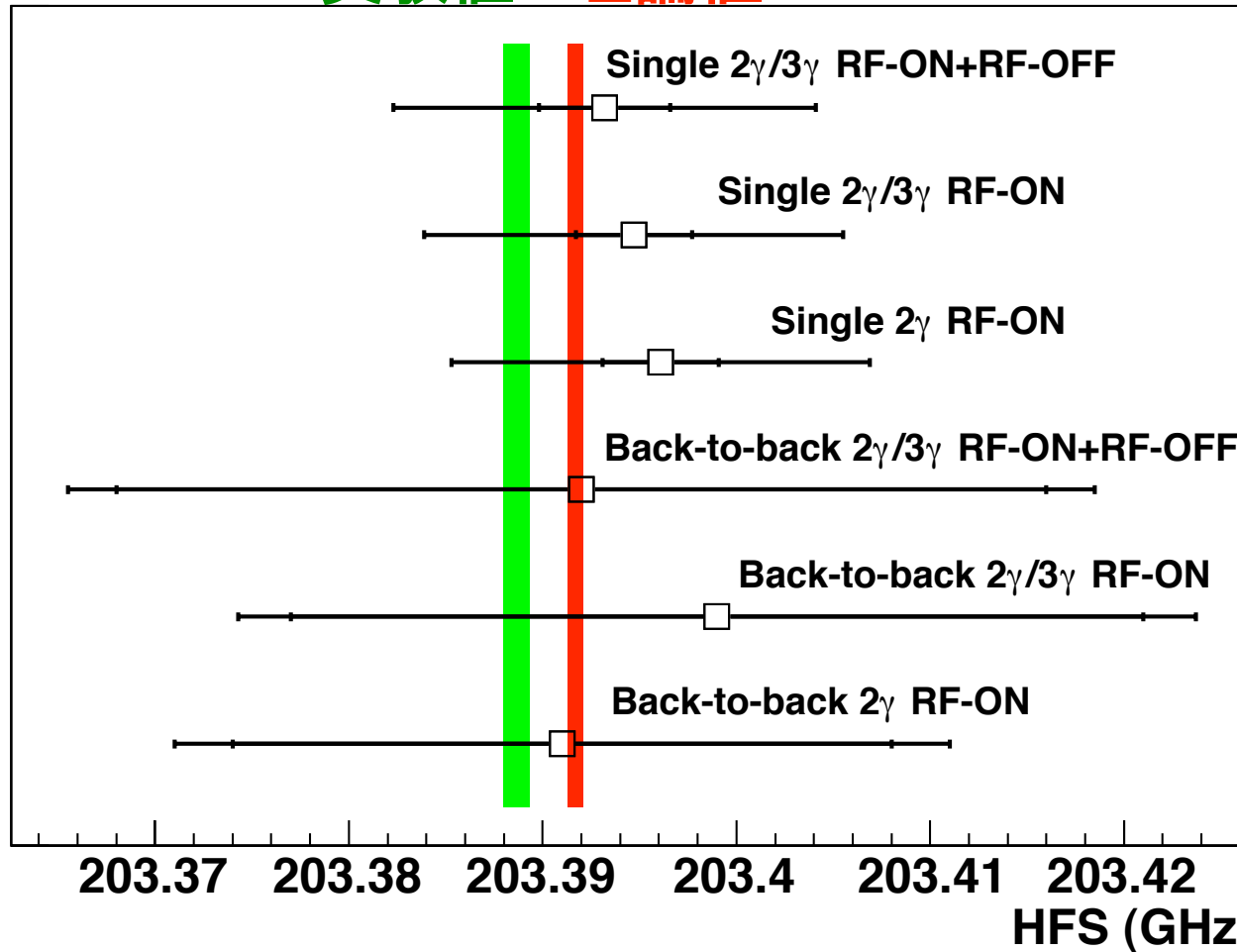
Back-to-backで、両方が511 keV FWHMであったイベントのレートを見ている。昔の実験は、この方法で解析された。

HFS

$$= 203.391 \pm 0.017 \text{ (84 ppm, stat.)} \pm 0.014 \text{ (69 ppm, sys.) GHz}$$

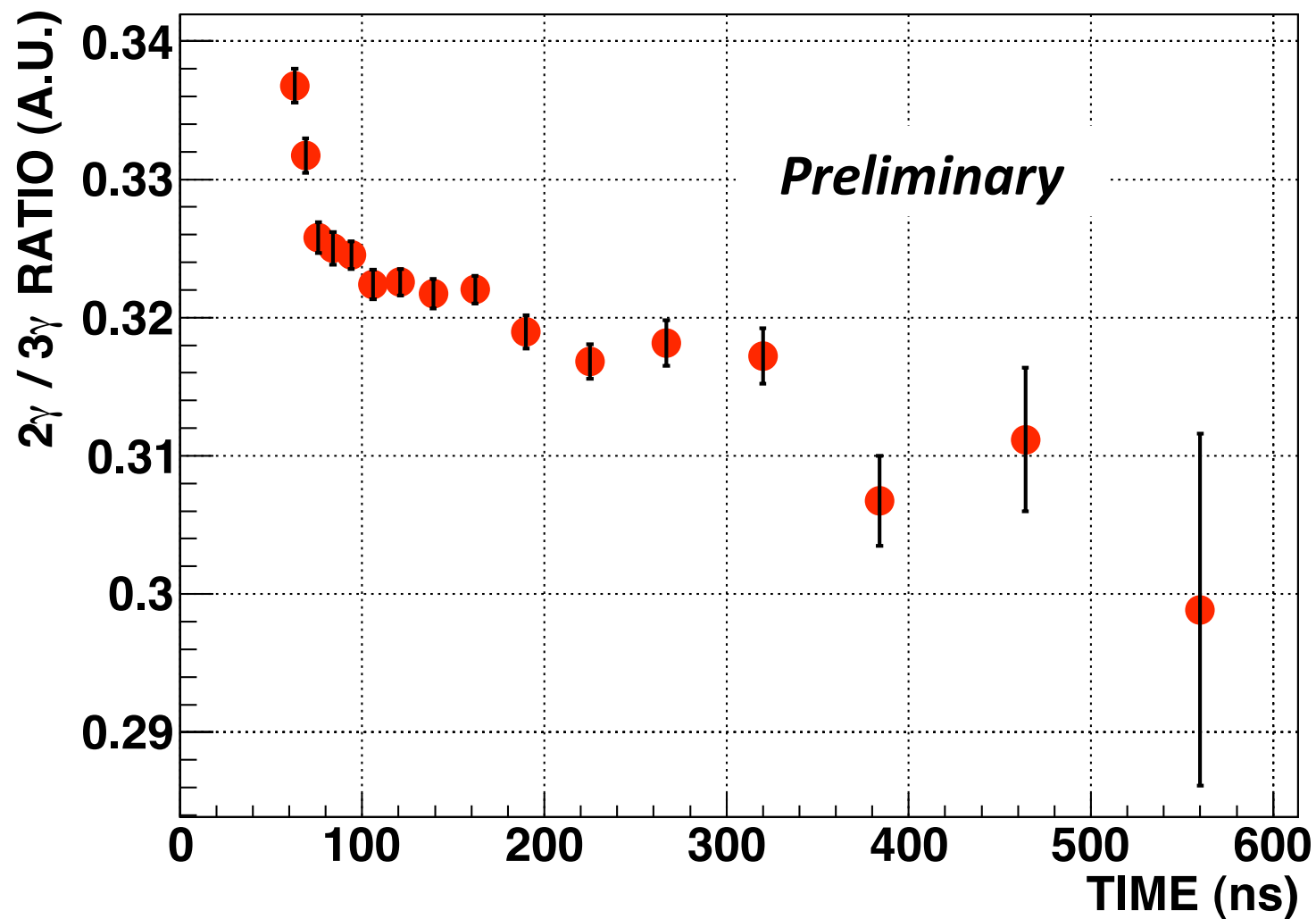
解析法の比較 まとめ

実験値 理論値

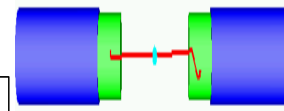
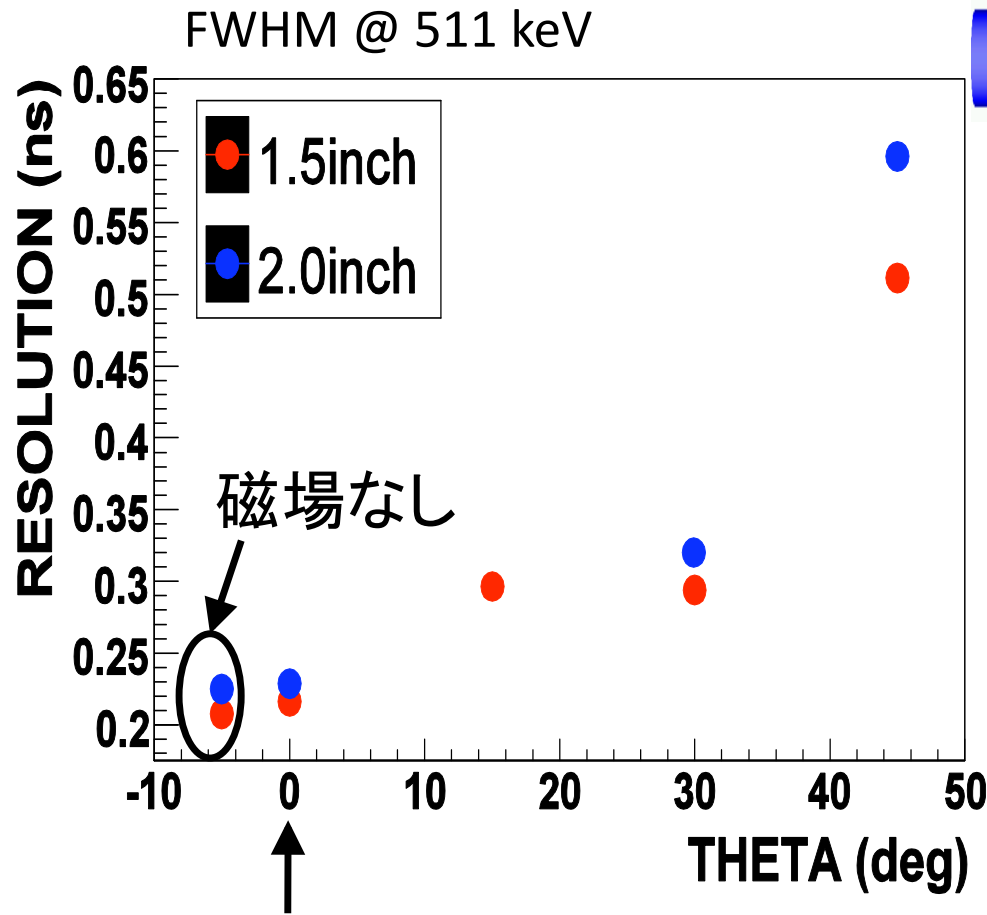


解析法の違いによる系統誤差が、40 ppm と、大きすぎる。
→ 更なる研究が必要。

熱化は測れるか？



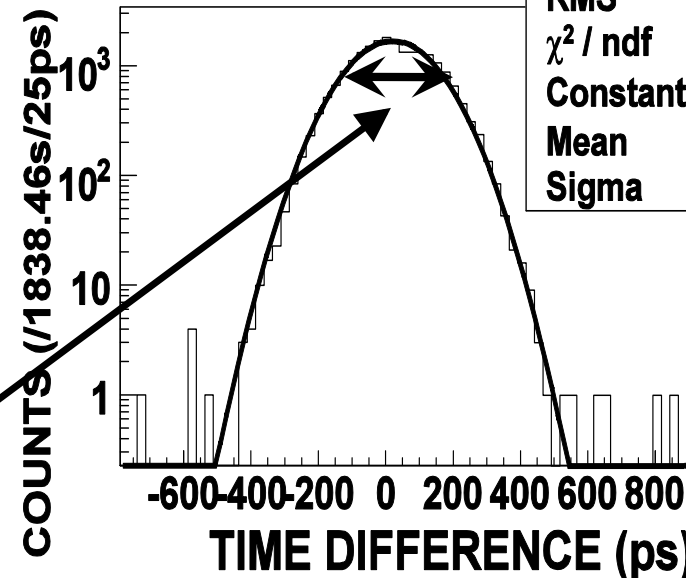
時間分解能の角度(θ)依存性



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

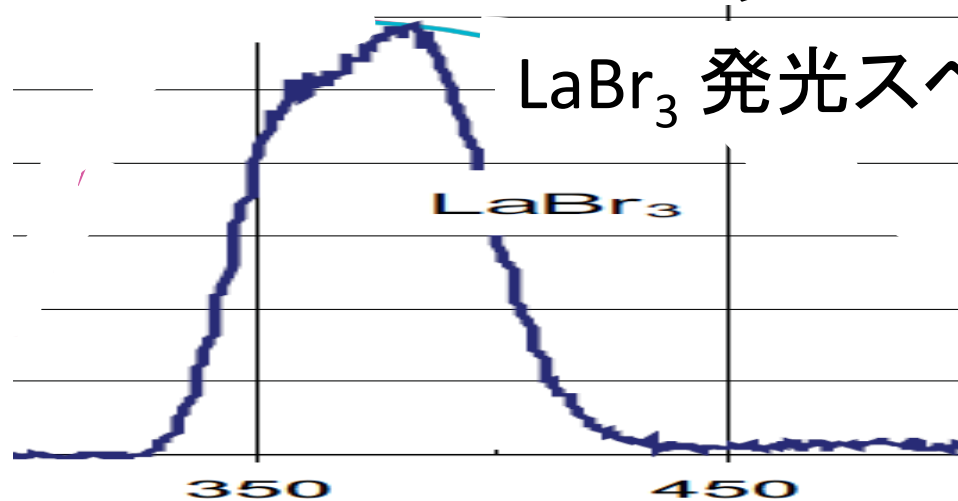


pmt1_511keV_pmt2_511keV	
Entries	21312
Mean	20.86
RMS	125.2
χ^2 / ndf	203.1 / 43
Constant	1692 ± 13.9
Mean	20.67 ± 0.86
Sigma	124.4 ± 0.6

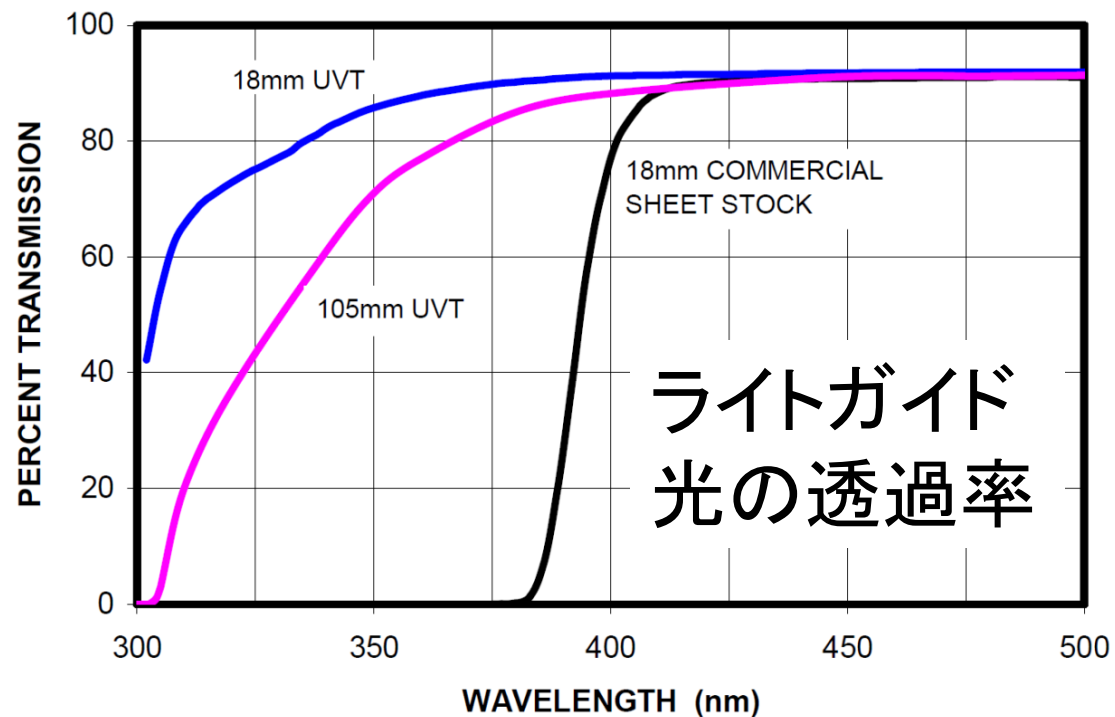
0°のとき悪化していない。

FWHM 293 ps @ 511 keV

UVT ライトガイド

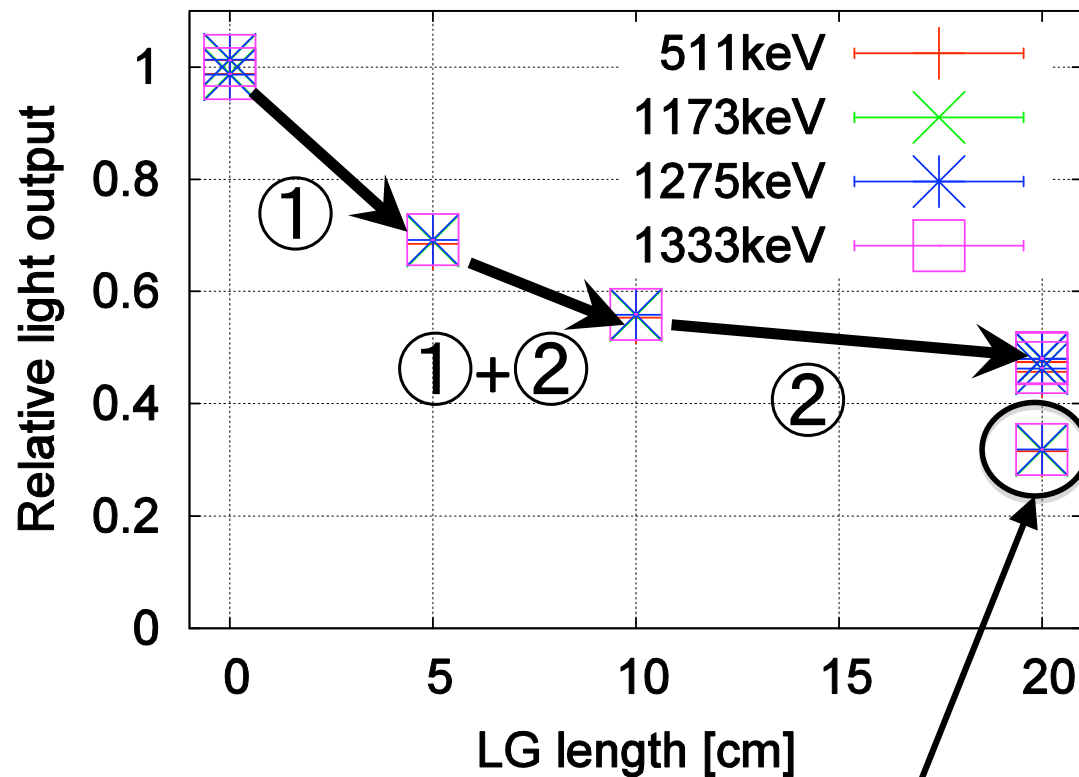


LaBr₃ は、
シンチレーション光の
波長が $\lambda=380$ nm のため

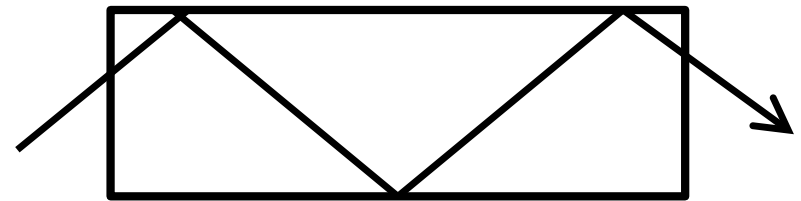


UVT
(Ultra-Violet Transmitting)
ライトガイド
を使う。

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。

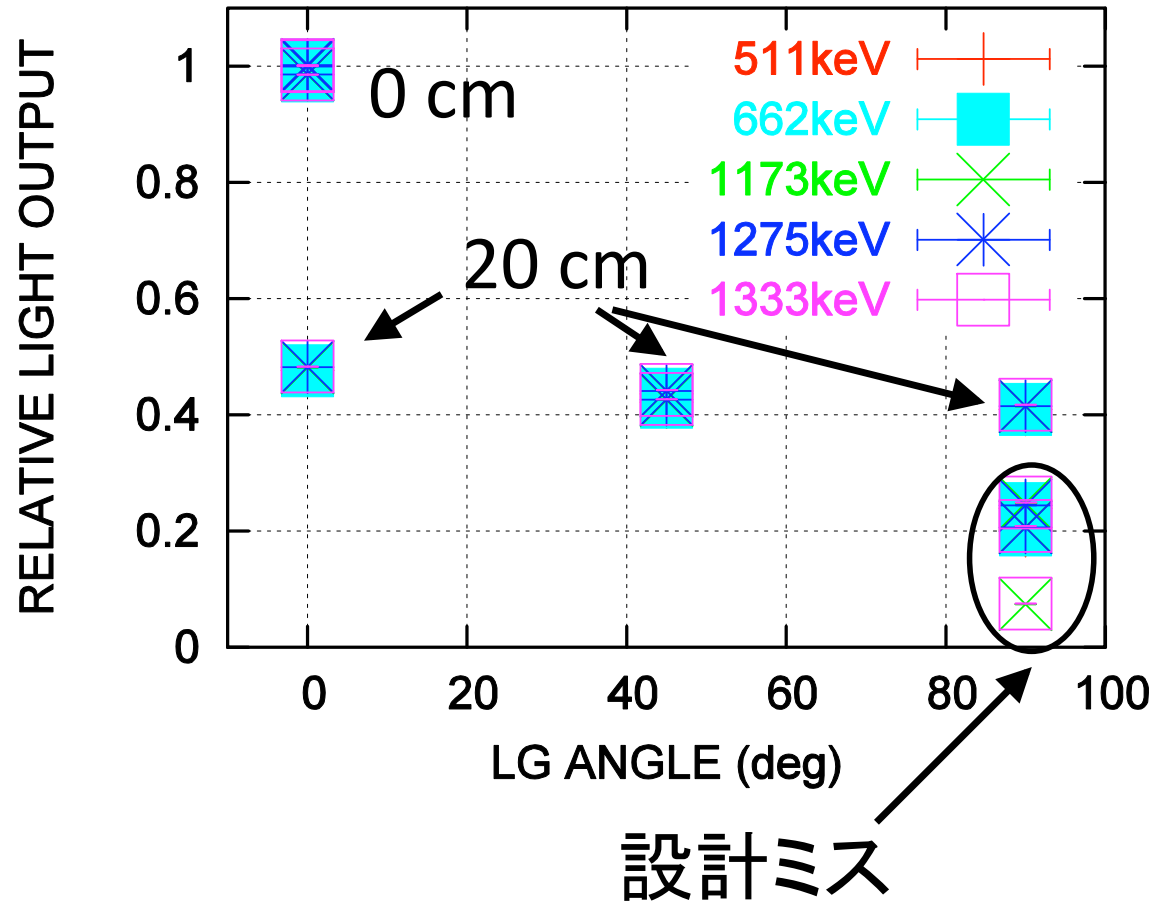


② 吸収による減少。
(影響は小さい)

20 cm で半分弱になるが、
そこで既にほぼ一定。

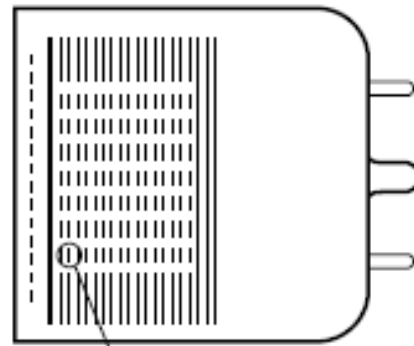
PMT 面から
LG はがれてた

角度(曲げ)依存性



- 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。

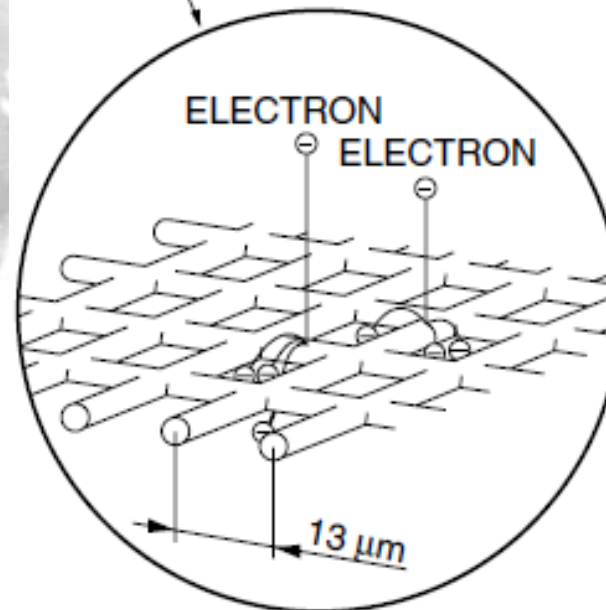
ファインメッシュ PMT



コバール (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

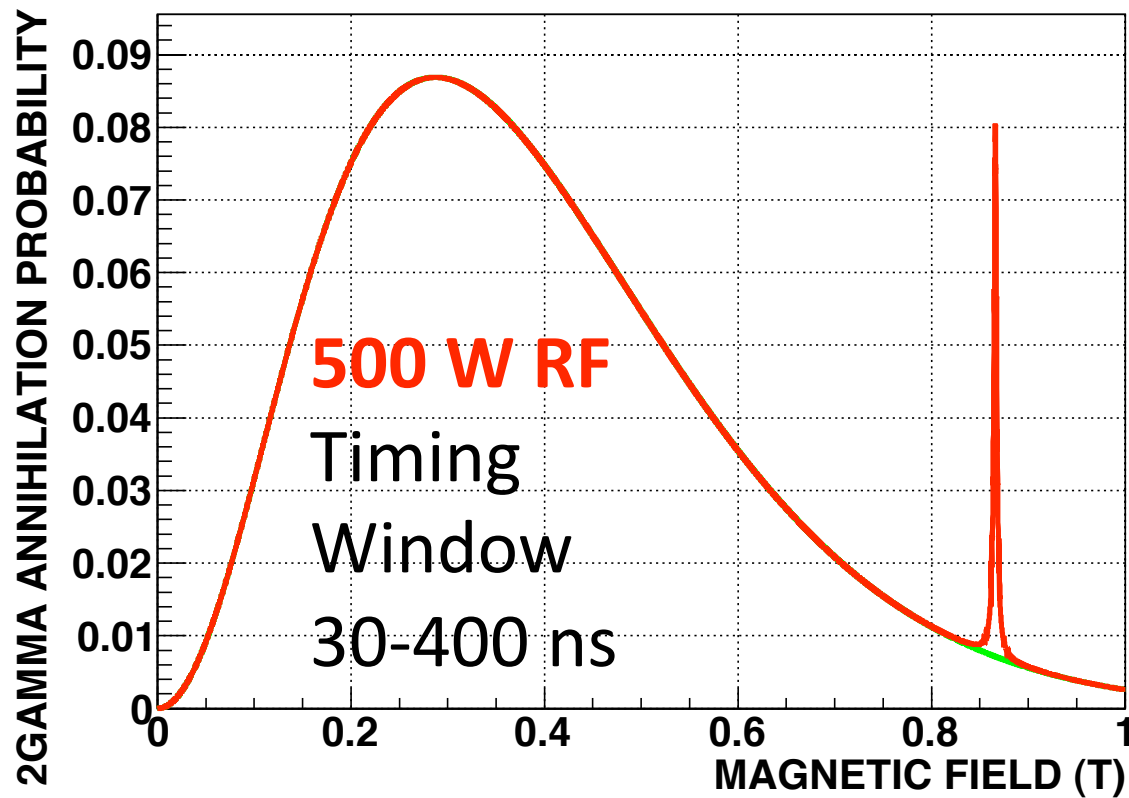
→ 10 ppm

FINE-MESH TYPE

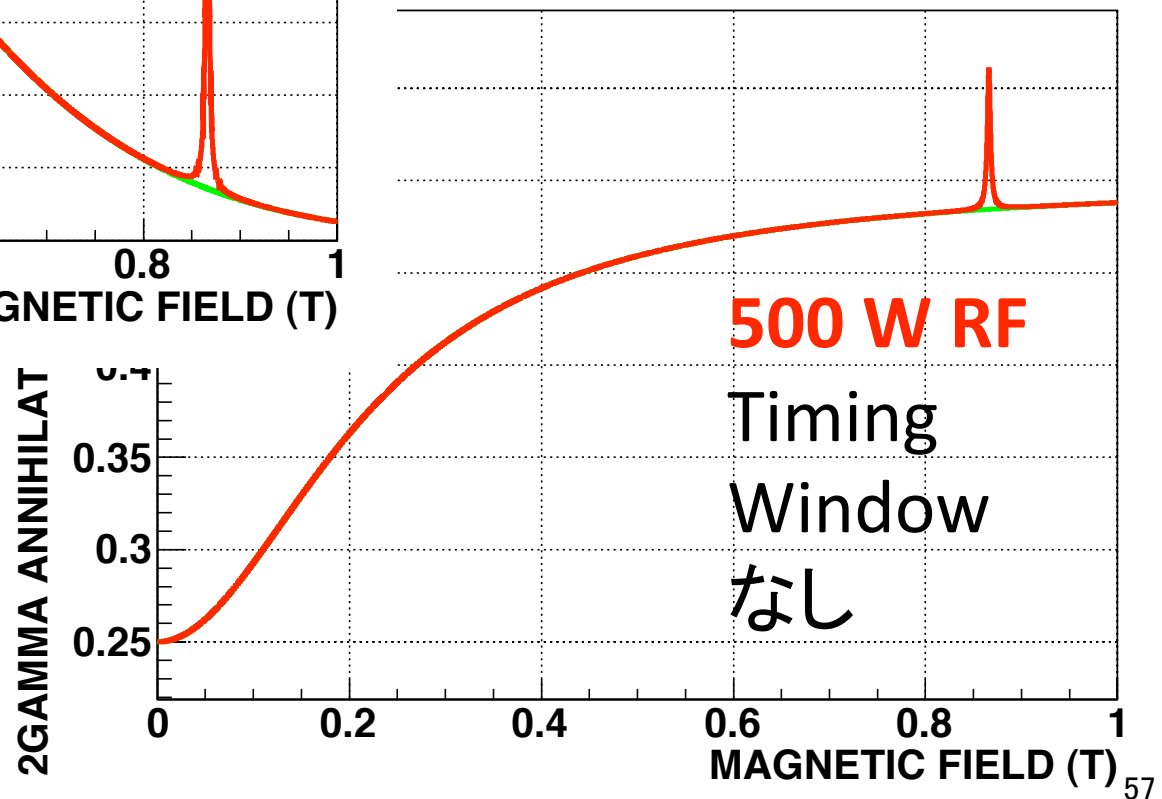
Table of Scintillator Properties

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 (Ce)	5.29	1.9	63000	380	25.6	1.88

2 γ 崩壊確率



Timing Window による
2 γ 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

