

ポジトロニウムの 超微細構造の精密測定 II (間接測定の状態と展望)

東大理, 東大素セ^A, 東大院総合文化^B, KEK^C,
福井大遠赤セ^D, ブルガリア科学アカデミー^E

石田明, 秋元銀河, 佐々木雄一, 宮崎彬, 加藤康作,
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, 田中賢一^C, 山本明^C,
漆崎裕一^D, 小林真一郎^D, 小川勇^D, 出原敏孝^D, S. Sabchebski^E

Thanks to: 山口博史, K. S. Khaw, 風間慎悟

2009年9月13日 日本物理学会2009年秋季大会 於甲南大学

概略

- 全体のシステム
- β -tagging system
- ガンマ線検出器
- 第1回測定と解析
- 今後の展望
- 補償磁石の仮設計
- まとめ

全体のシステム

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。

RF 発振器 +
GaN AMP
2.8532 GHz
500 W CW

(秋元が発表)

導波管

・ 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。

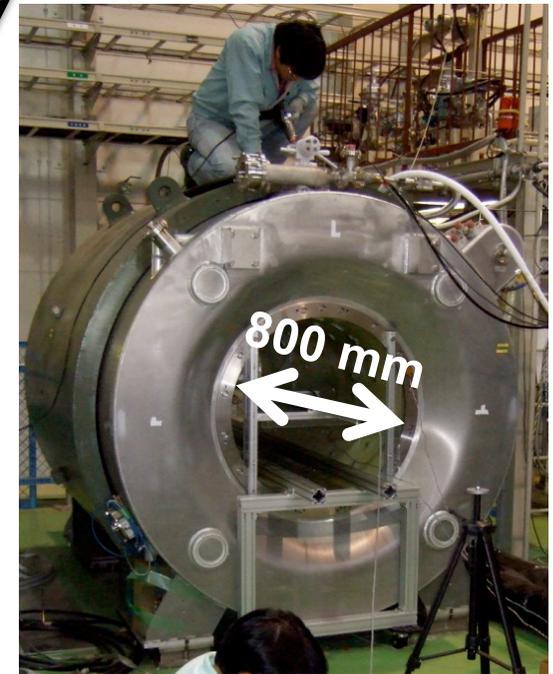
磁場 (0.866 T)

・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。

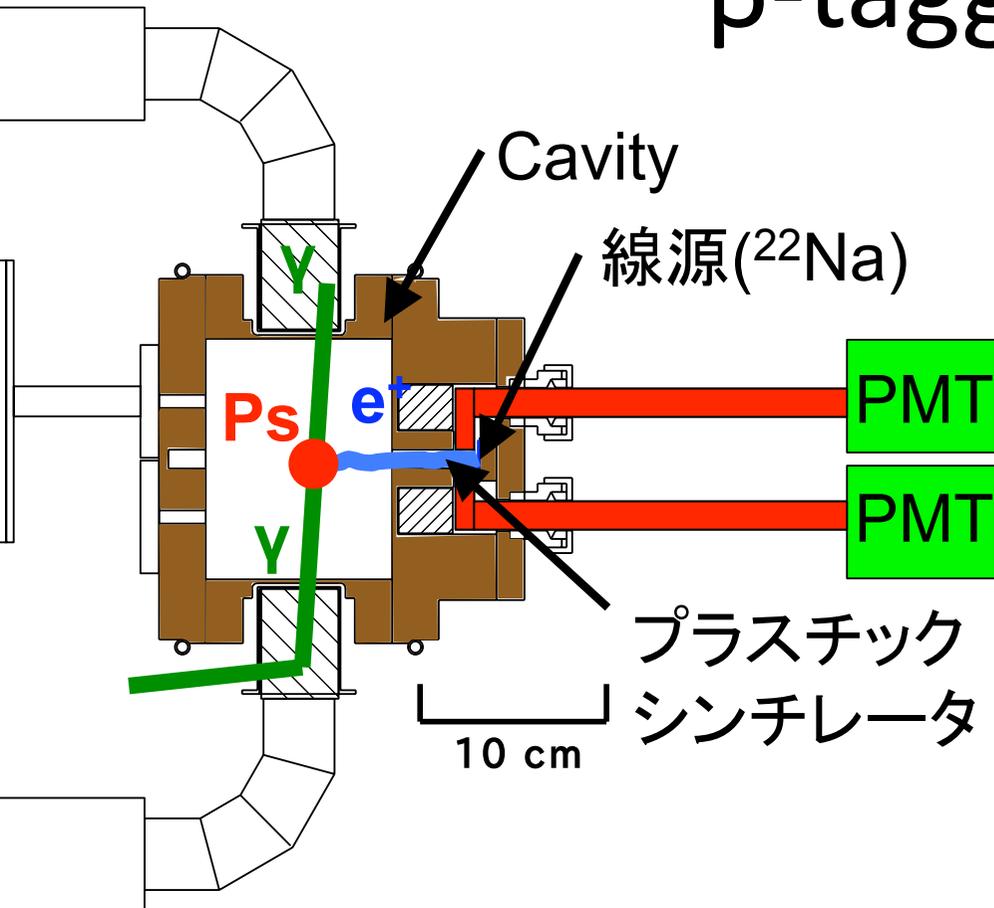
RF Cavity
TM₁₁₀ モード
Q=14700
(秋元が発表)

・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。

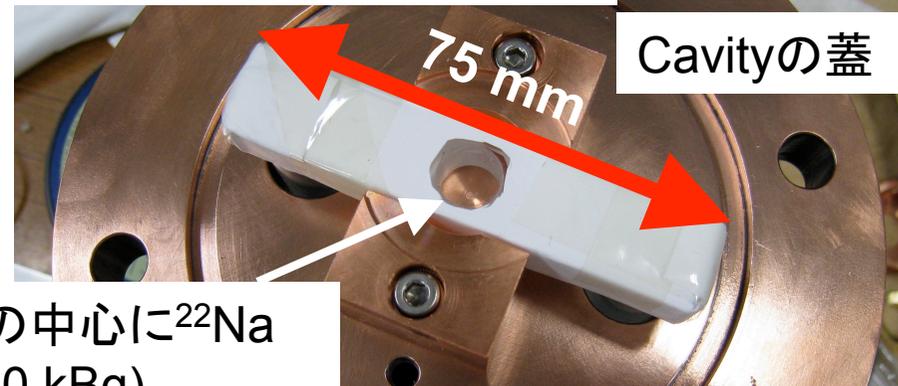
β -tagging system



- ・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。

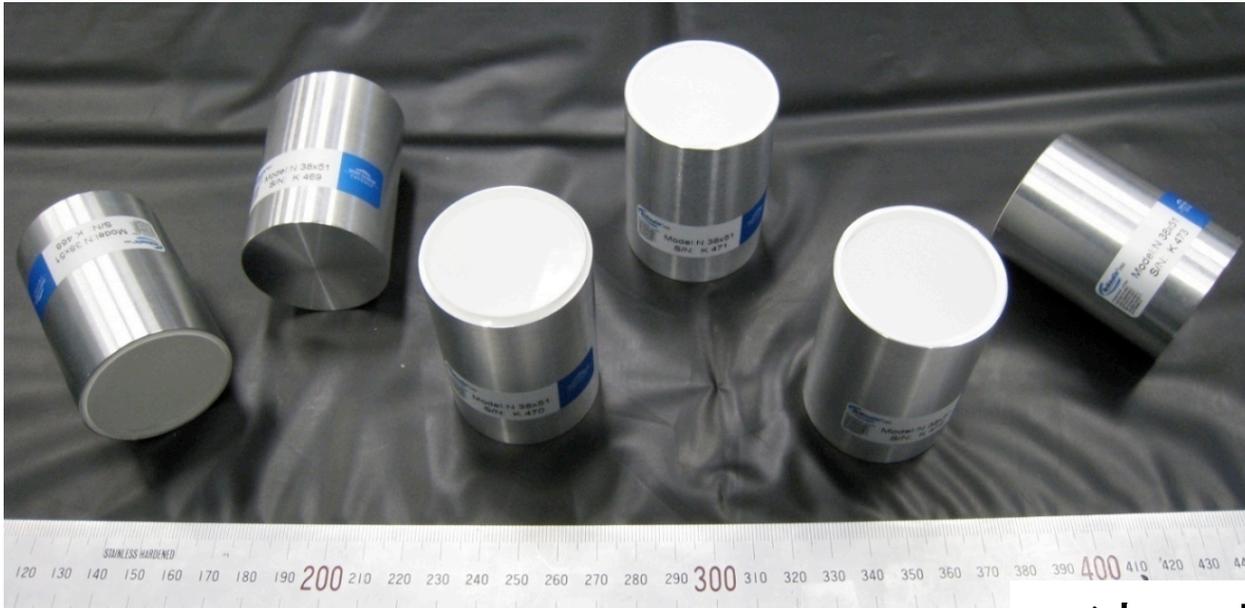
- ・2つのPMTのシグナルをコインシデンスする。
- ・十分な光量($\sim 10\text{p.e.}$)が得られることを確認。

15 mm四方、厚さ0.2 mmのプラスチックシンチレータ



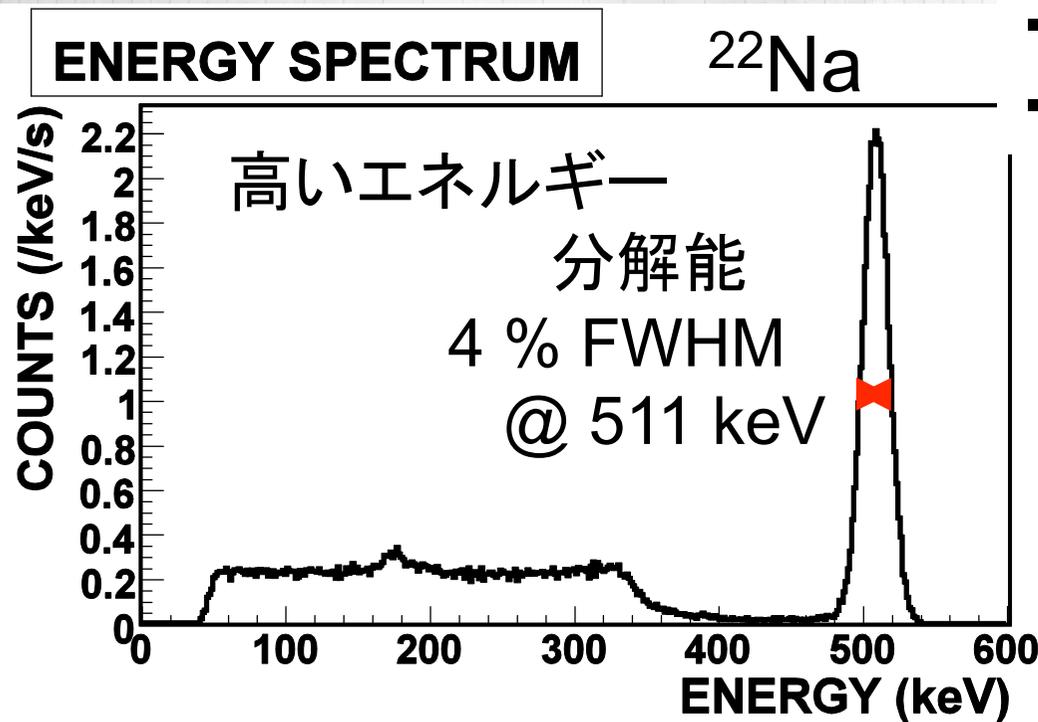
アクリルで外に光を取り出す。

ガンマ線検出器 (1) $\sim \text{LaBr}_3 \sim$

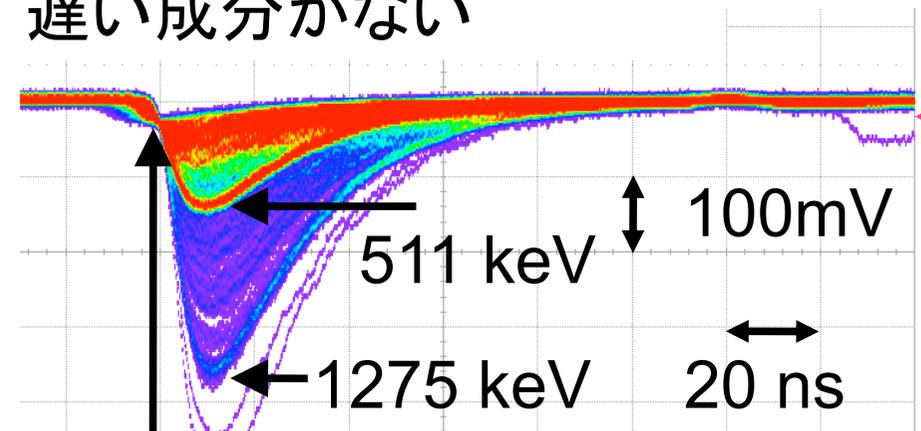


LaBr₃(Ce)シンチレータ
(直径1.5インチ、長さ2インチ)
を6個使用

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。

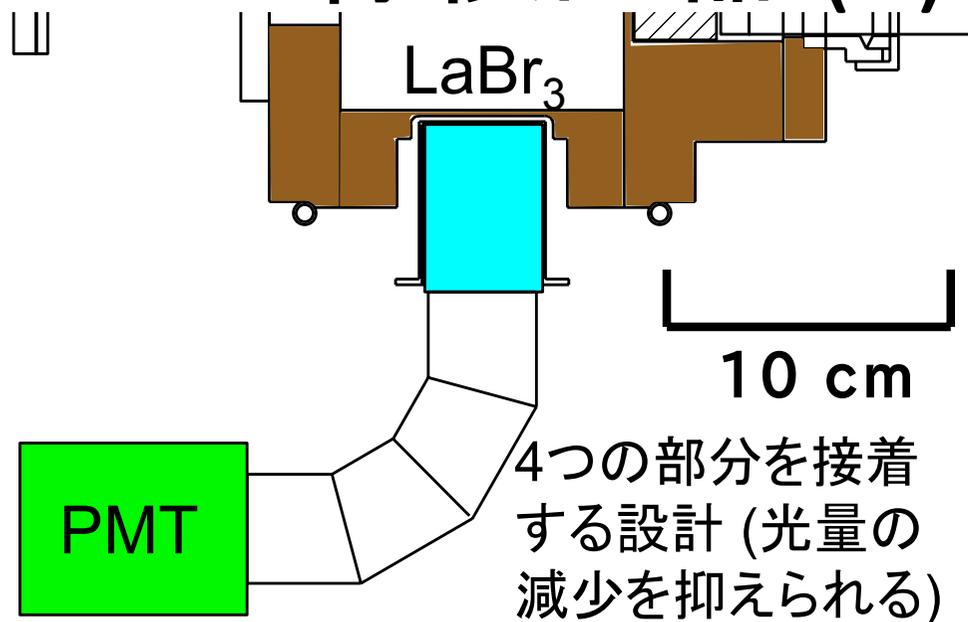


- 速い立ち上がり
- 遅い成分がない

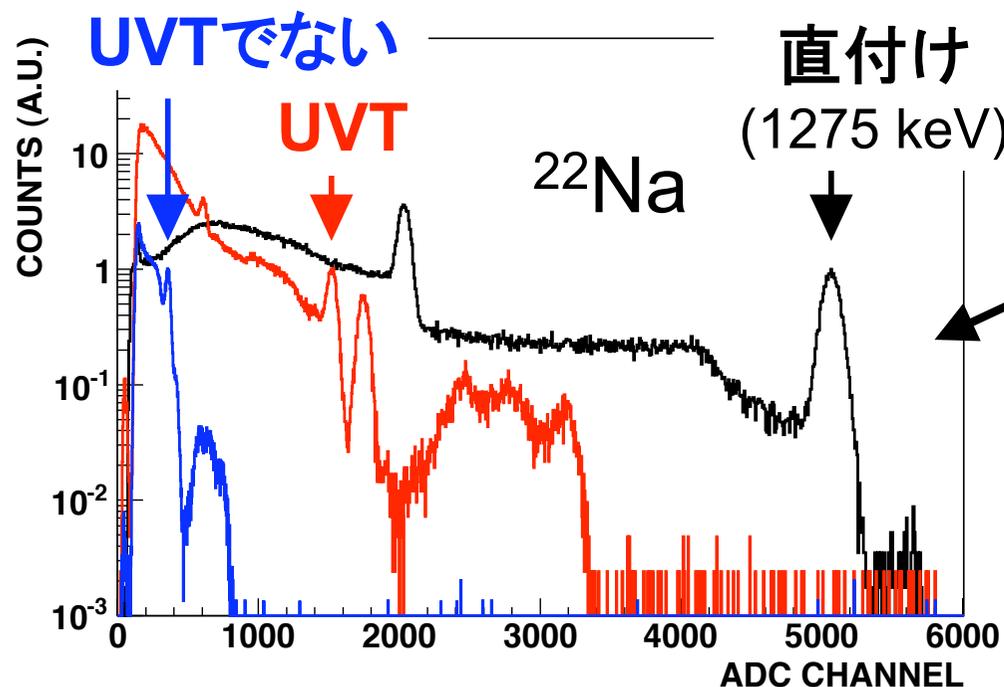
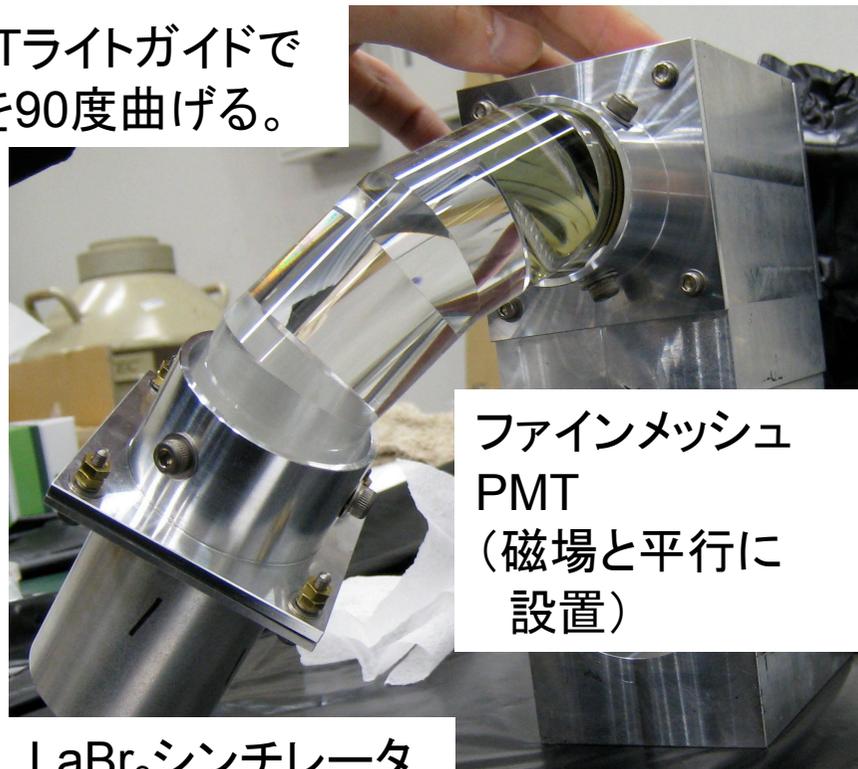


高い時間分解能
200 ps FWHM @ 511 keV

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

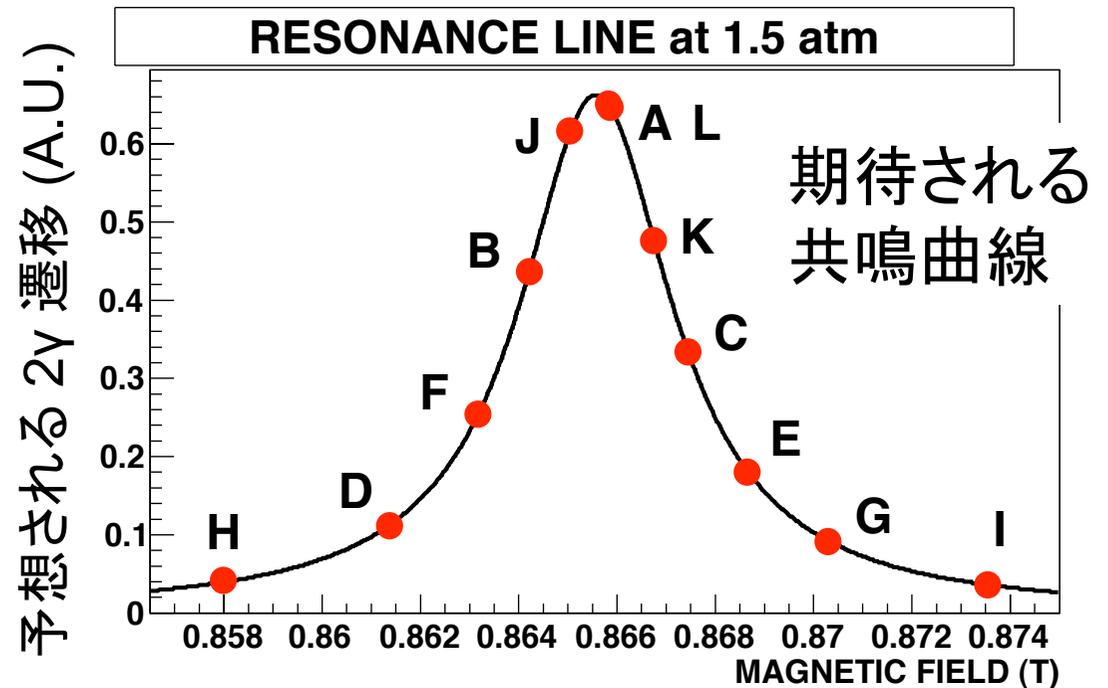
直付けに比べ、
UVT ライトガイドでは、
光量が 30 % に減少。
(UVTでないライトガイドでは、7 %
まで減少してしまう。)

第1回 測定 (1)

- 2009年6月から、測定を開始 (9月末までの予定)。
- 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、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 (1.5 atmは測定終了、現
在、1.0 atm で測定中)。
- Trigger rate \sim 3.5 kHz, DAQ rate \sim 0.7 kHz

第1回 測定 (2)

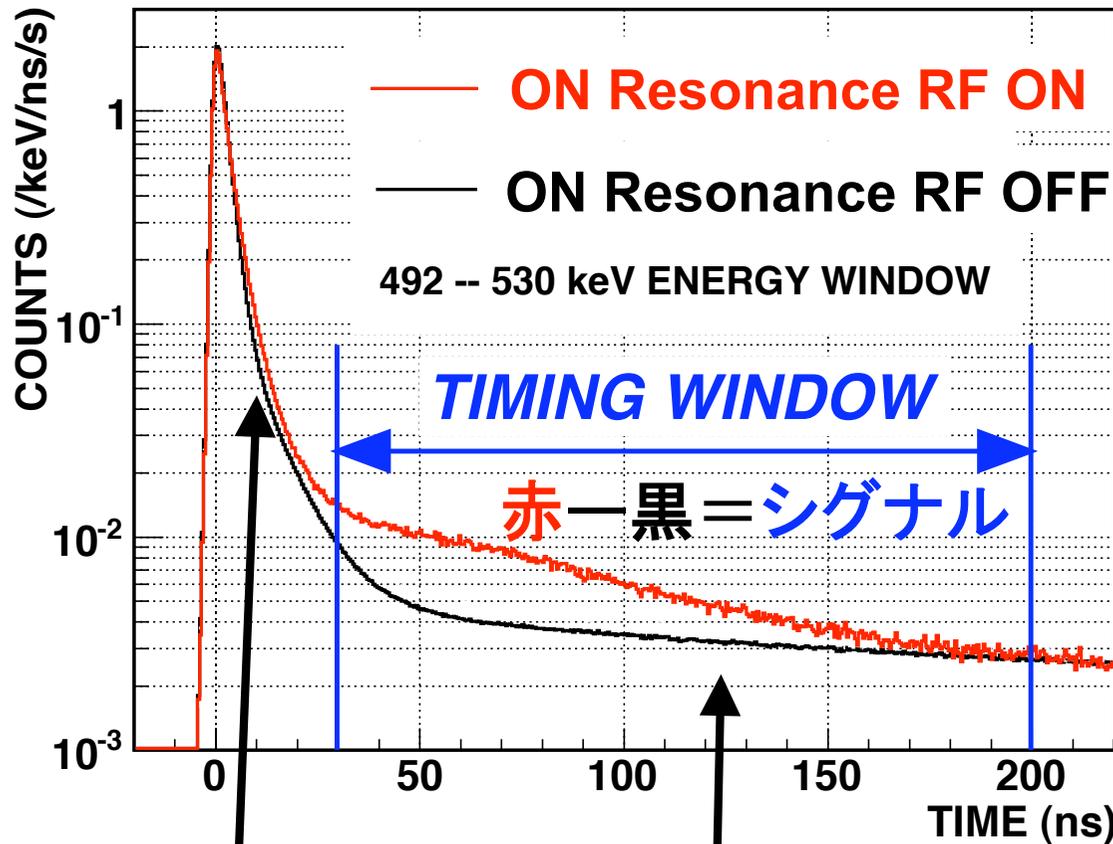
- o-Psの、 $m_z = \pm 1$ 成分から $m_z = 0$ 成分への遷移(Zeeman 遷移)によって **2 γ 崩壊の数が増える**のを見る。
- 固定磁場において、RFの周波数を変えて測りたいが、アンプやCavityは、広範な周波数に対応できない。
- 固定周波数で、磁場を変えて変化を見ても、本質的には同じ。-> **磁場でスキャン**
- 磁場は、変更するたび、**永久電流モード**にする(安定した後の変化は、 ± 1 ppm以下)。
- 日中、RFをかけて測定し、夜中・休日に、RF-OFFの測定を行う。



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



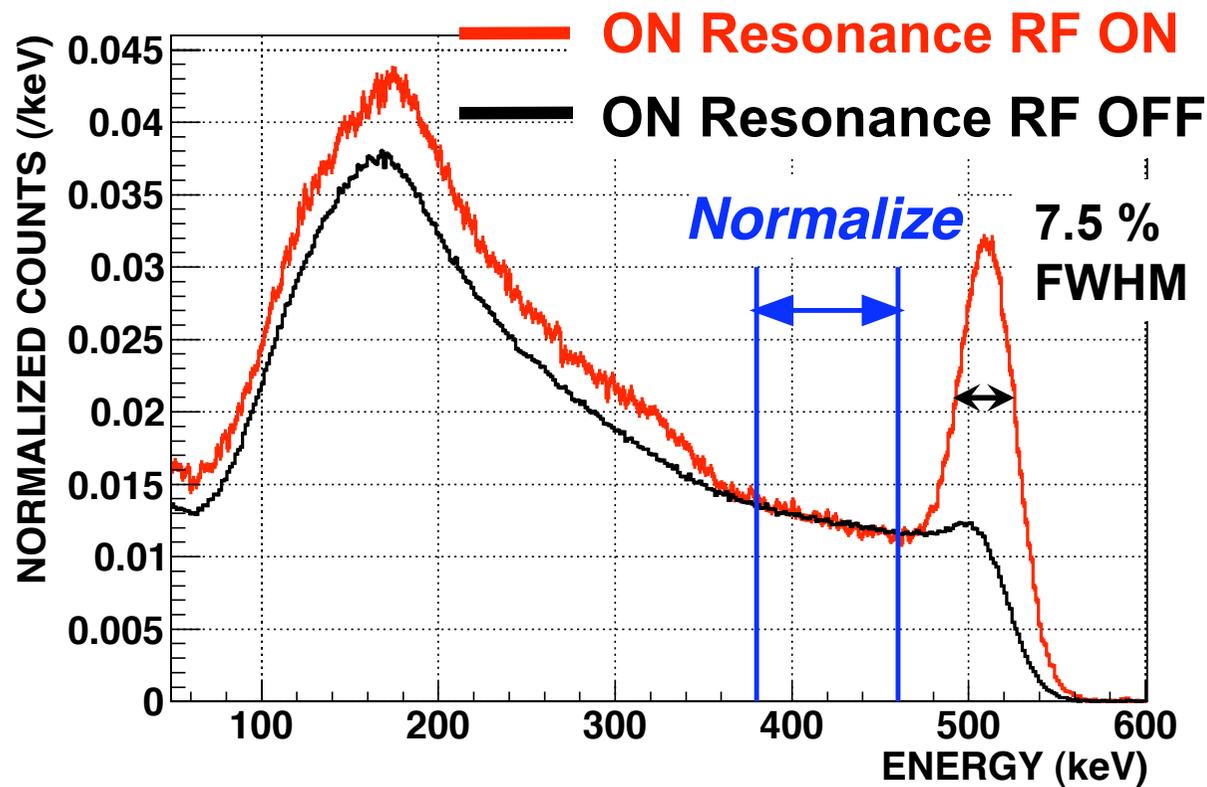
短い寿命成分
($m_z = 0$)

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 keV FWHM 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—黒 = シグナル

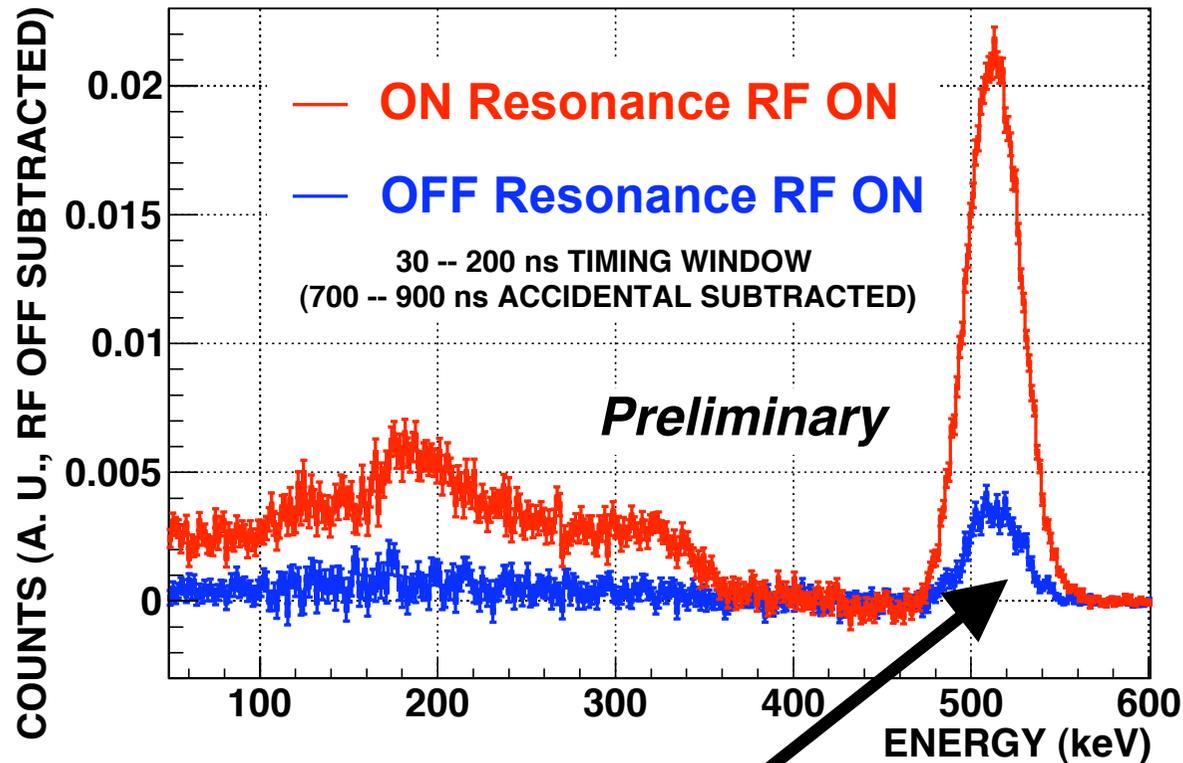
と考え、RF OFF を差し引いて、遷移 2γ のエネルギースペクトルを作る。

- 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。

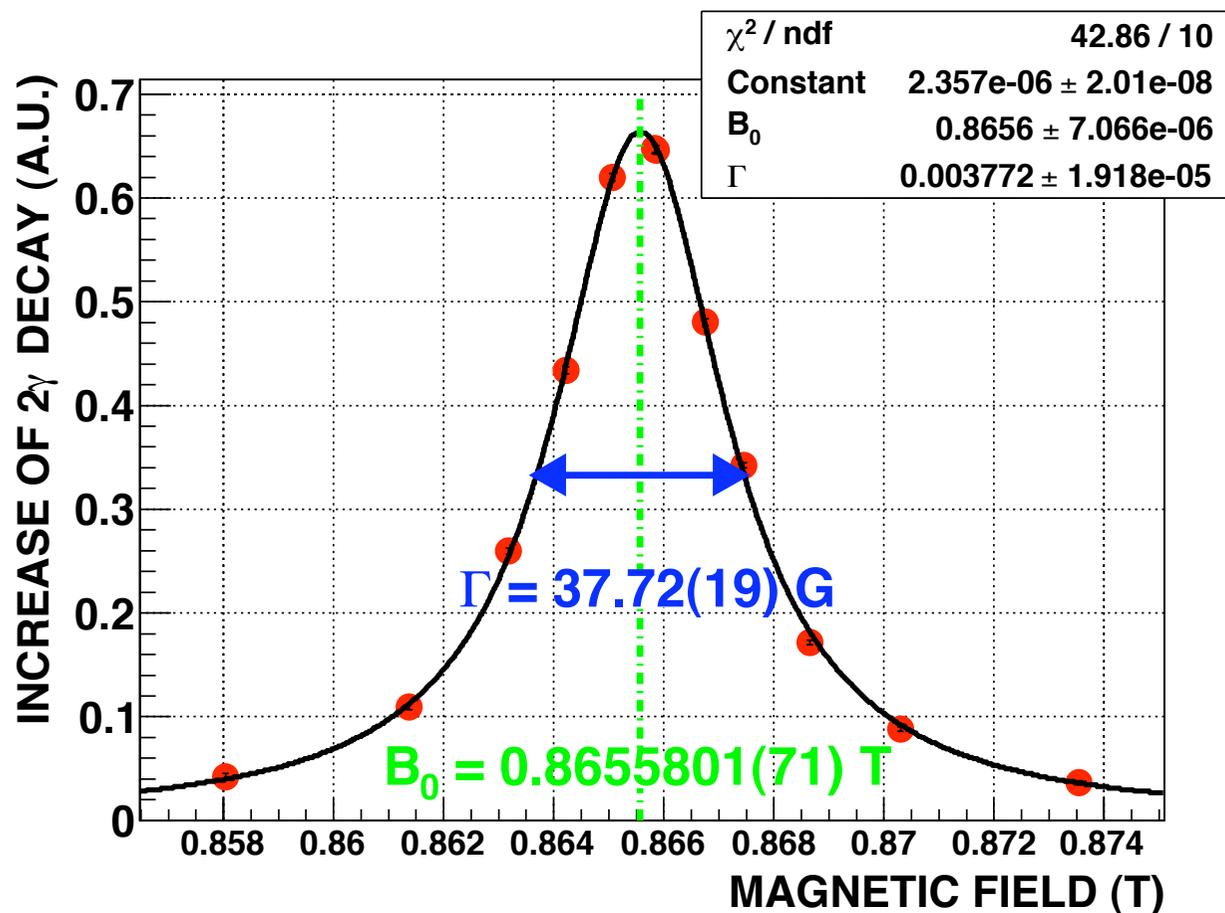
エネルギースペクトル (2)



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。

HFS = 203.3932 ± 0.0034 GHz (17 ppm, 統計誤差のみ)

系統誤差

系統誤差の要因	大きさ (ppm)
磁場の非一様性	41
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)	10
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	20
磁場変動	2
NMR磁場測定	2
Quadrature sum	69

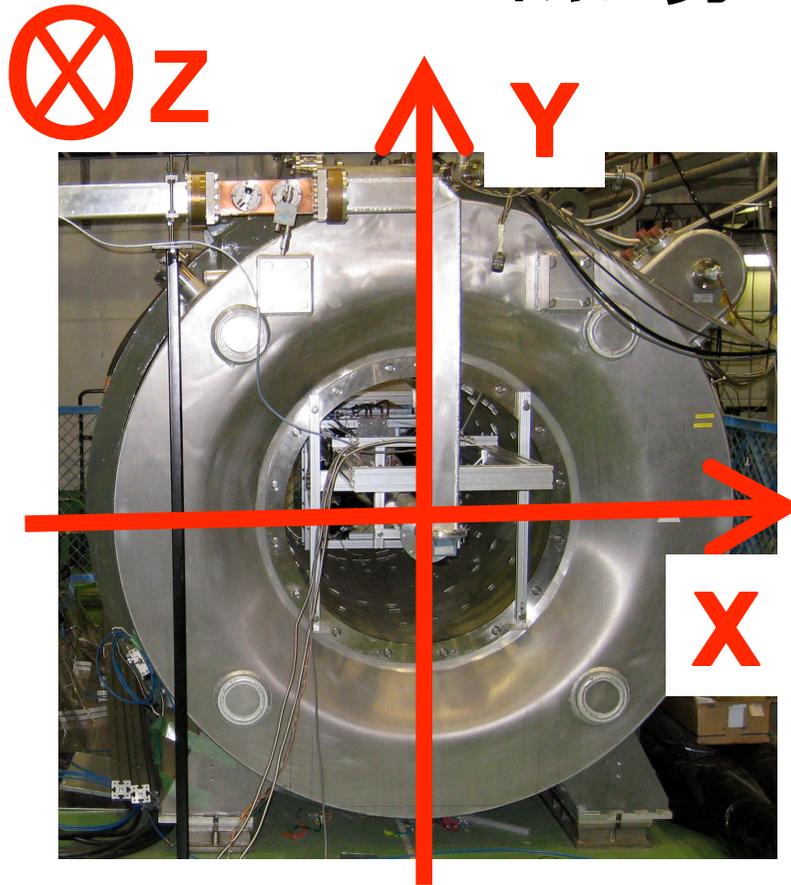
青字: 今後の解析で改善予定

1.5 atm での測定で得られたHFSの暫定値
 203.393 ± 0.003 (17 ppm, stat.) ± 0.014 (69 ppm, sys.) GHz

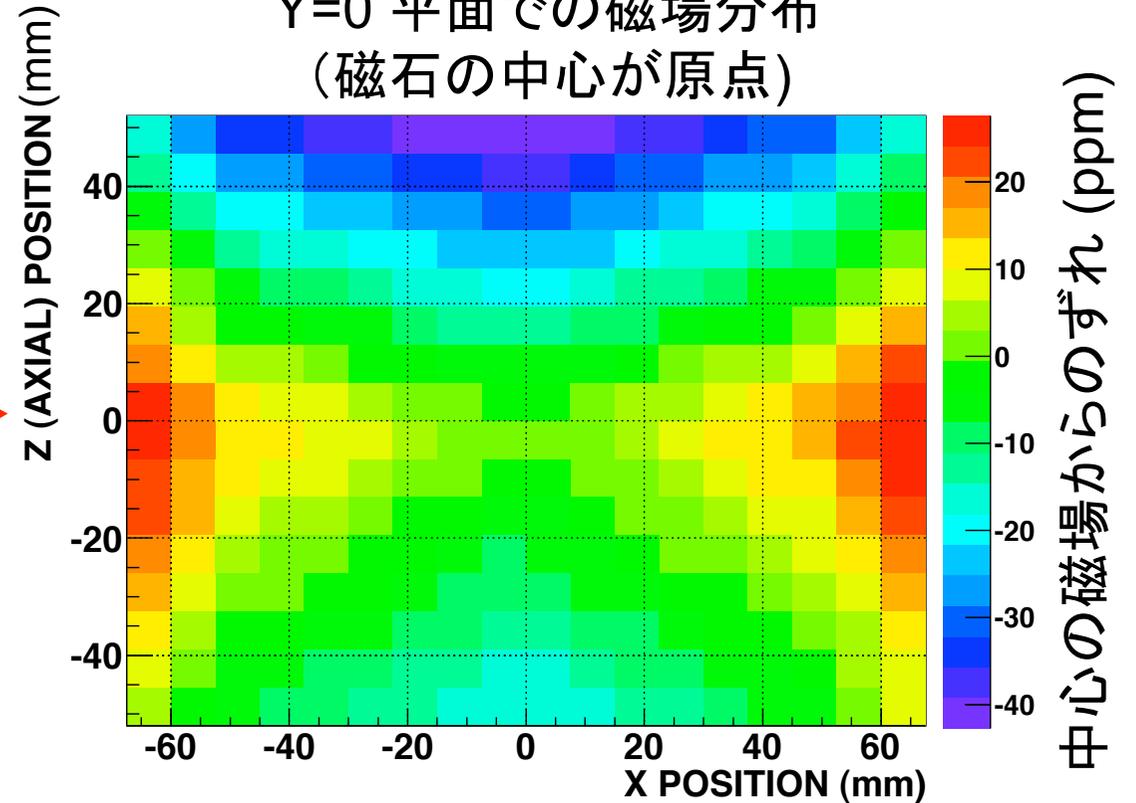
過去の実験値・理論値と無矛盾

系統誤差を 1 桁以上改善する必要がある。

磁場の非一様性



Y=0 平面での磁場分布
(磁石の中心が原点)

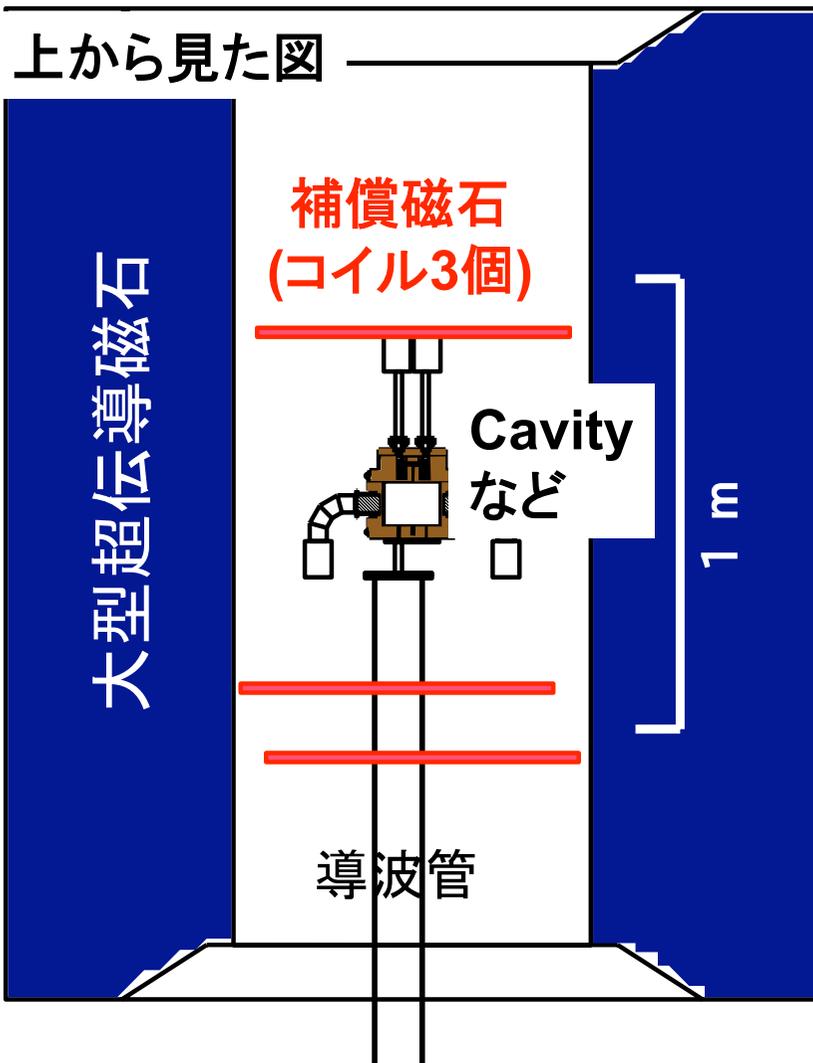


- 磁場の非一様性が、最大の系統誤差。
- Cavity内部での磁場の非一様性は、RMSで 20 ppm (HFSにして 41 ppm)。

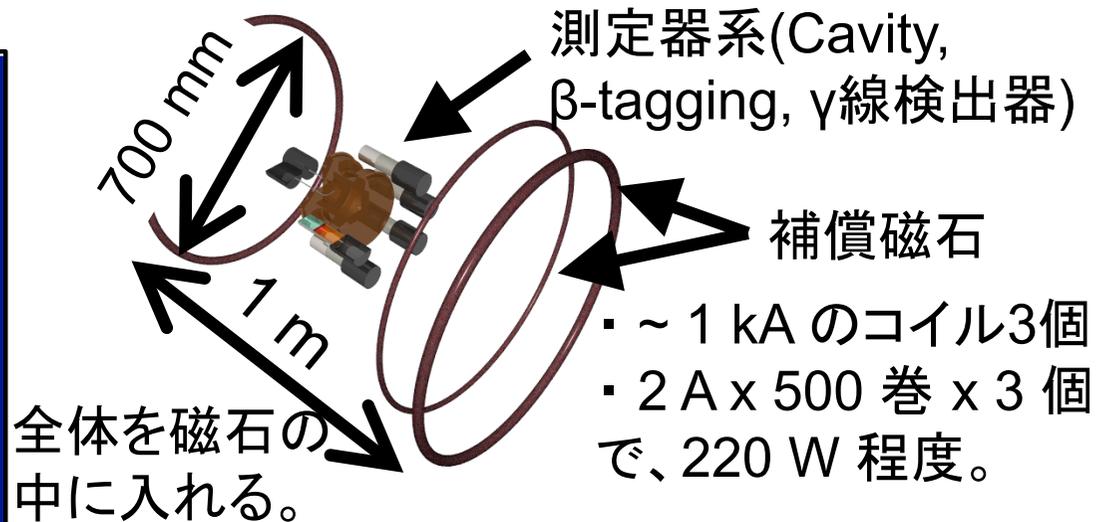
今後の展望

- 1.0 atm での測定を、9月中旬まで継続 -> 圧力依存性を見る。
- 磁場測定
磁場の詳細な強度分布を得る (測定は9月下旬)。
- 補償磁石の製作
最大の系統誤差: 磁場の非一様性を克服するため、補償磁石を用いる。過去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 (年末～年明け)。0(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、0(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、24時間換算約20日で17 ppm -> 1年かければ3~4 ppm

補償磁石の仮設計

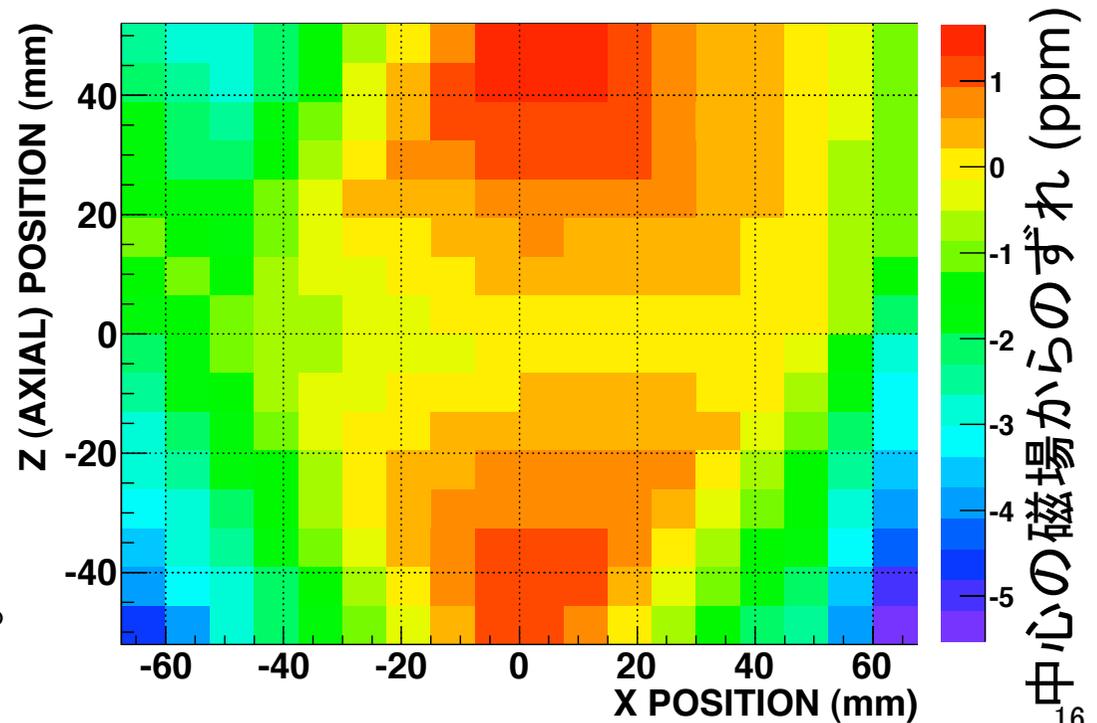


補償磁石 (コイル 3 個) によって、
2 ppm (RMS) の一様性が得られる。
(シミュレーション)



- ・ ~ 1 kA のコイル3個
- ・ 2 A x 500 巻 x 3 個で、220 W 程度。

Y=0 平面での磁場分布 (磁石の中心が原点)



まとめ

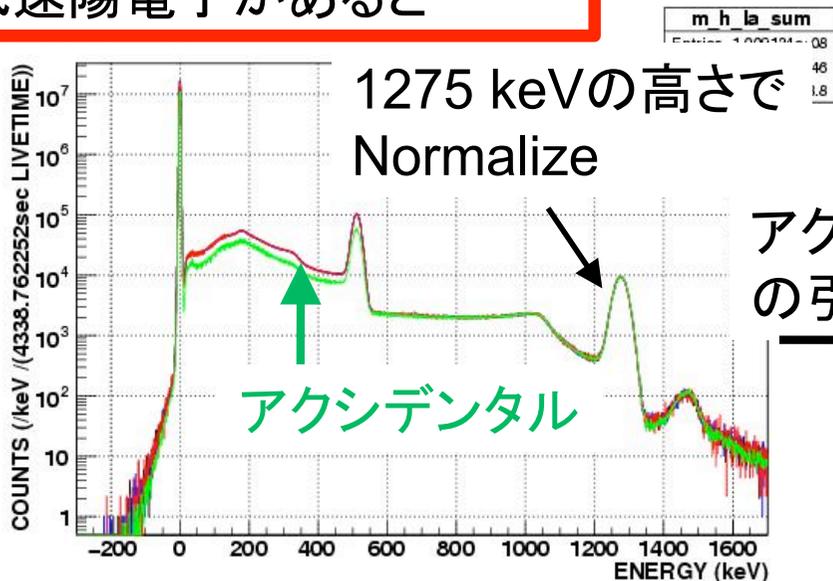
- ポジトロニウムの超微細構造の精密測定に向け、第1回測定を進行中。
- 今までのデータから、過去の実験値・理論値と無矛盾な結果が、71 ppm 程度で求まっている。
- 最も深刻な系統誤差は、磁場の非一様性。
- 磁場の一様性を、 $O(1)$ ppmで得るため、磁場を精密に測定し、補正磁石を開発する。
- 1年程度で、物質の効果を入れて $O(1)$ ppm の精度を達成する。

Backup

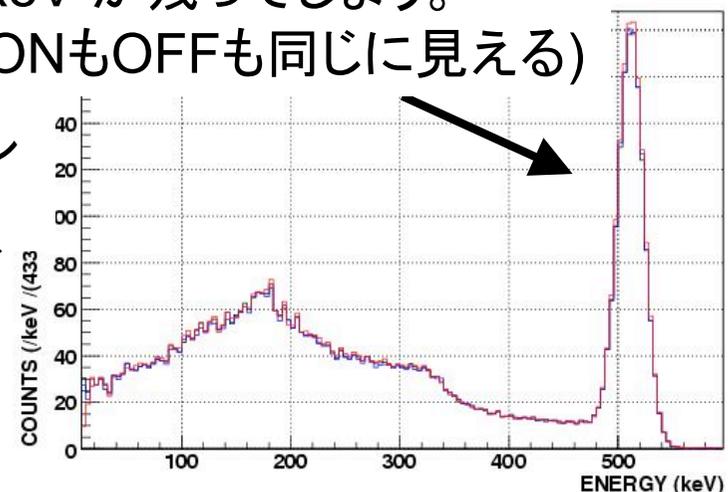
低速陽電子 (Slow Positron)

- ・ 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 -> 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。 -> 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。

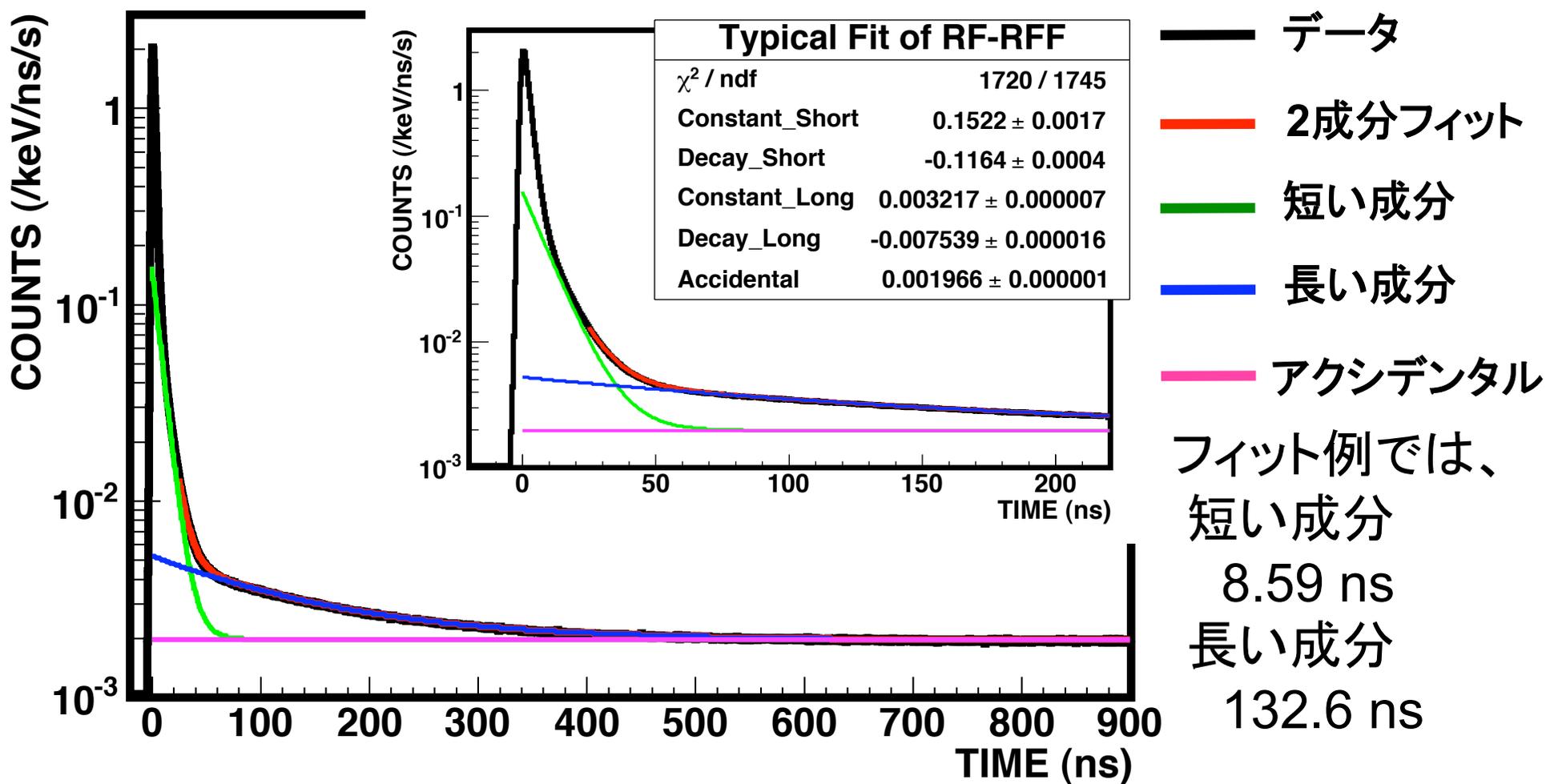
低速陽電子があると……



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)



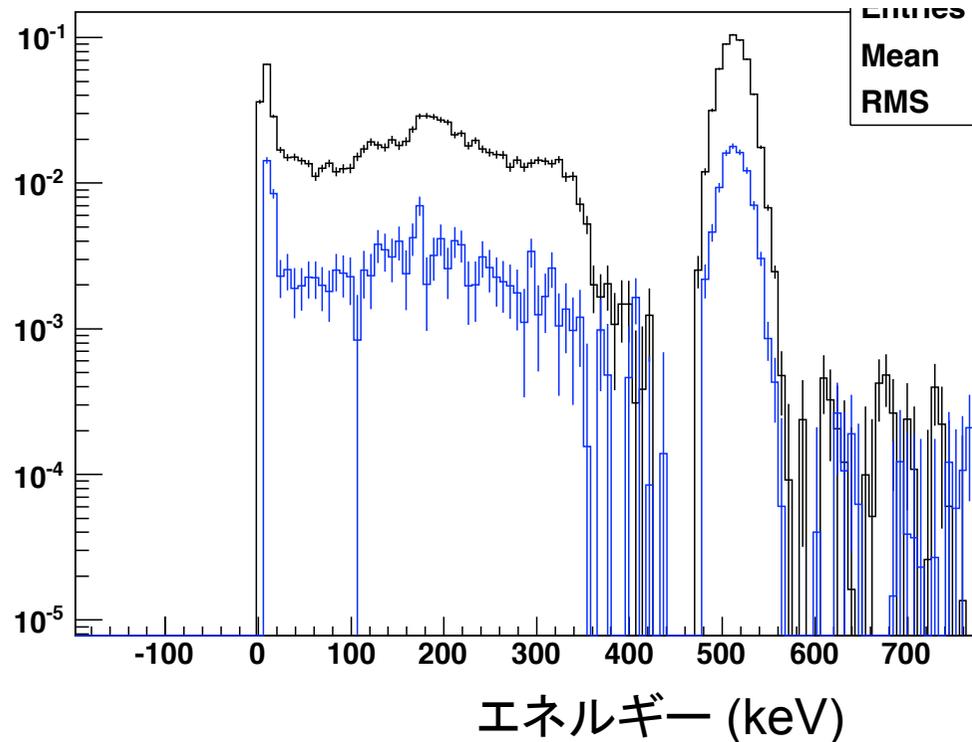
磁場中での寿命 2成分フィット例



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

RF OFF 引き算後のスペクトル

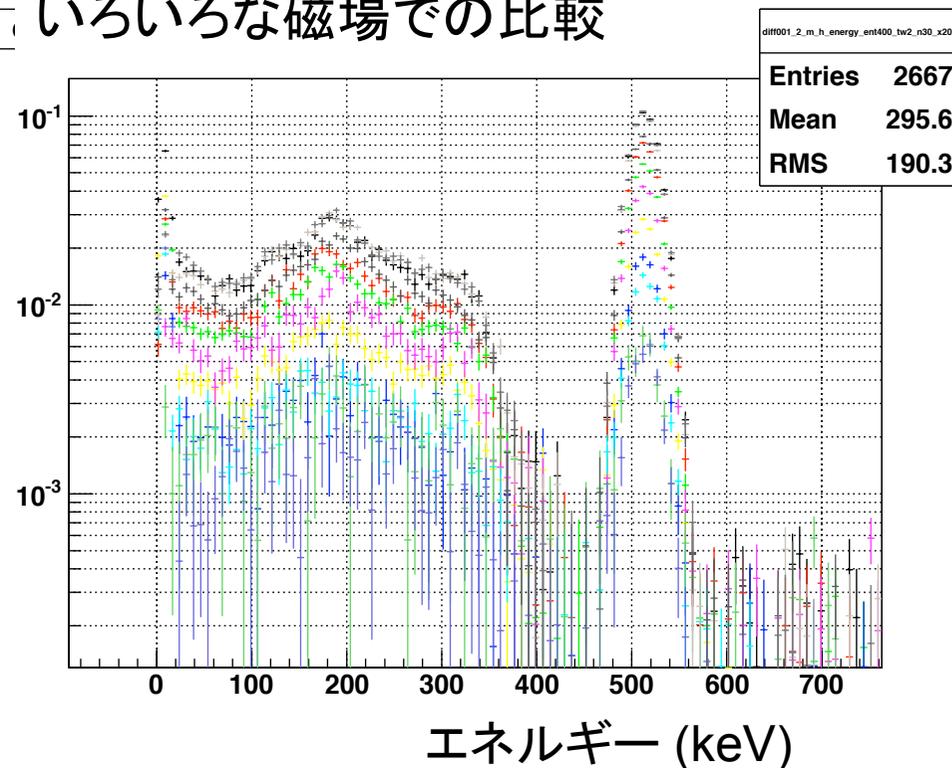
d ログスケールで。(黒:ピーク、青:裾)



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



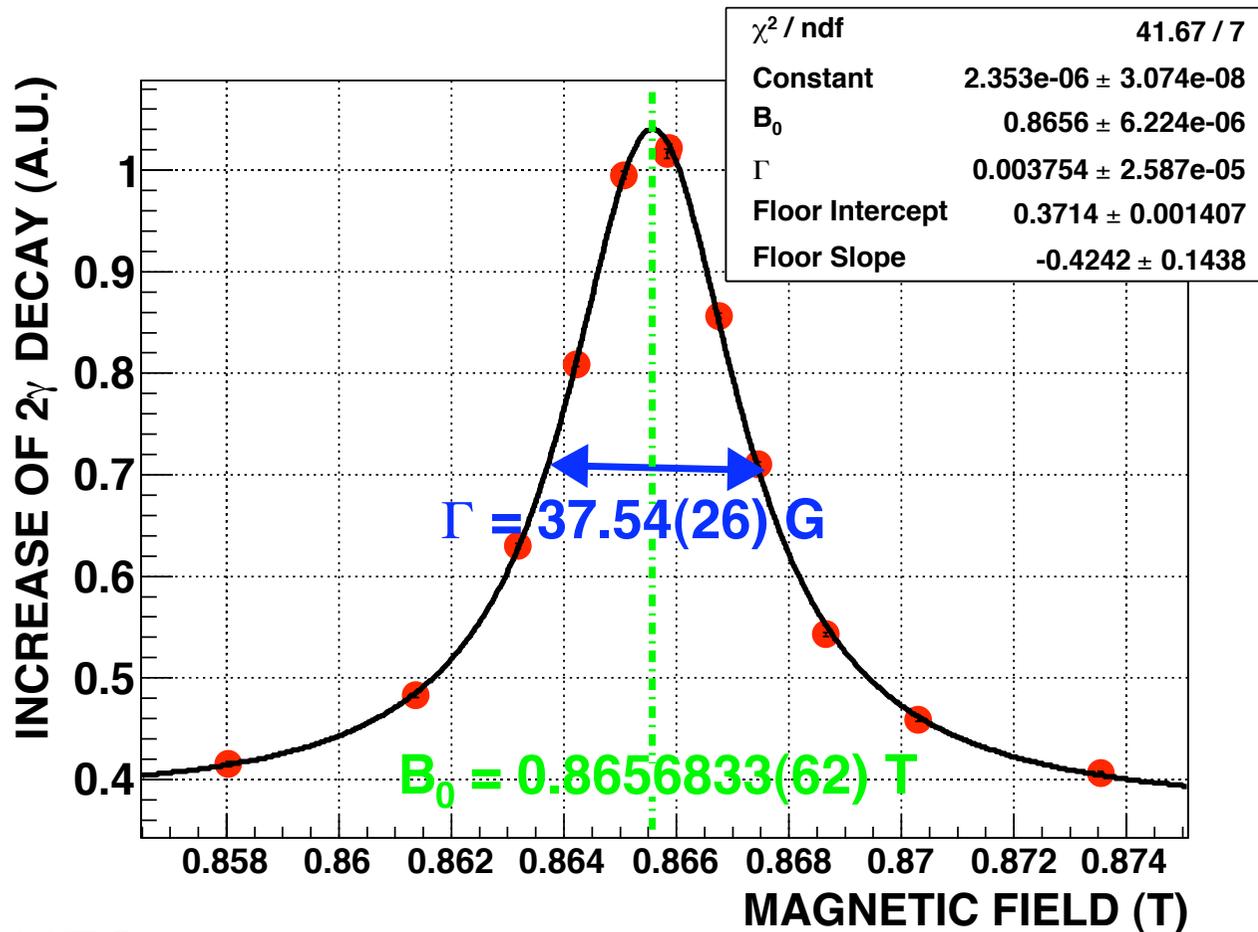
解析法(1)

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



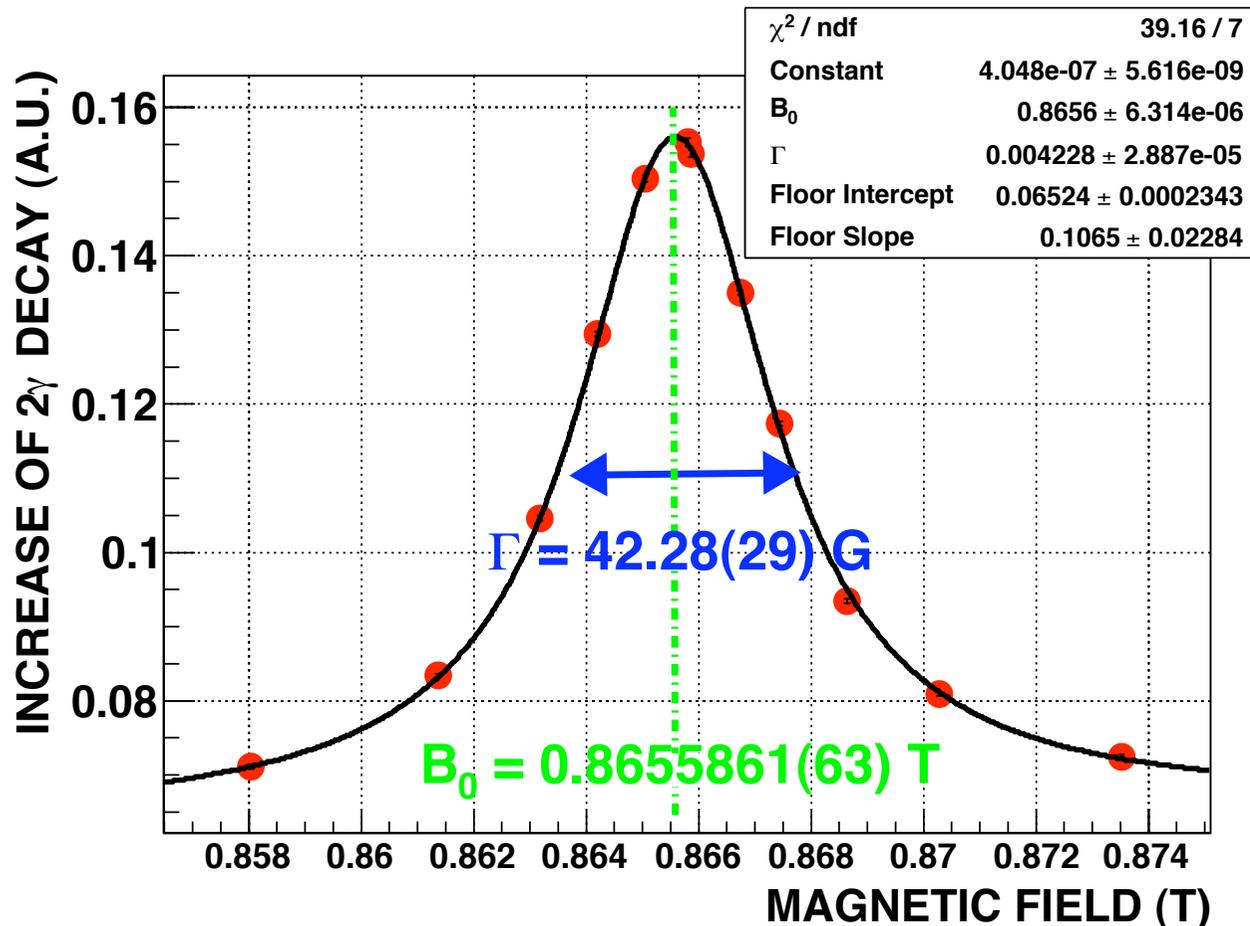
RF-OFFを引かないため、フロアが残っている。
フロアの形として、一次関数を仮定し、(ブライト・ウィグナー+一次関数)でフィット。

HFS

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

解析法(3)

Single 2γ RF-ON



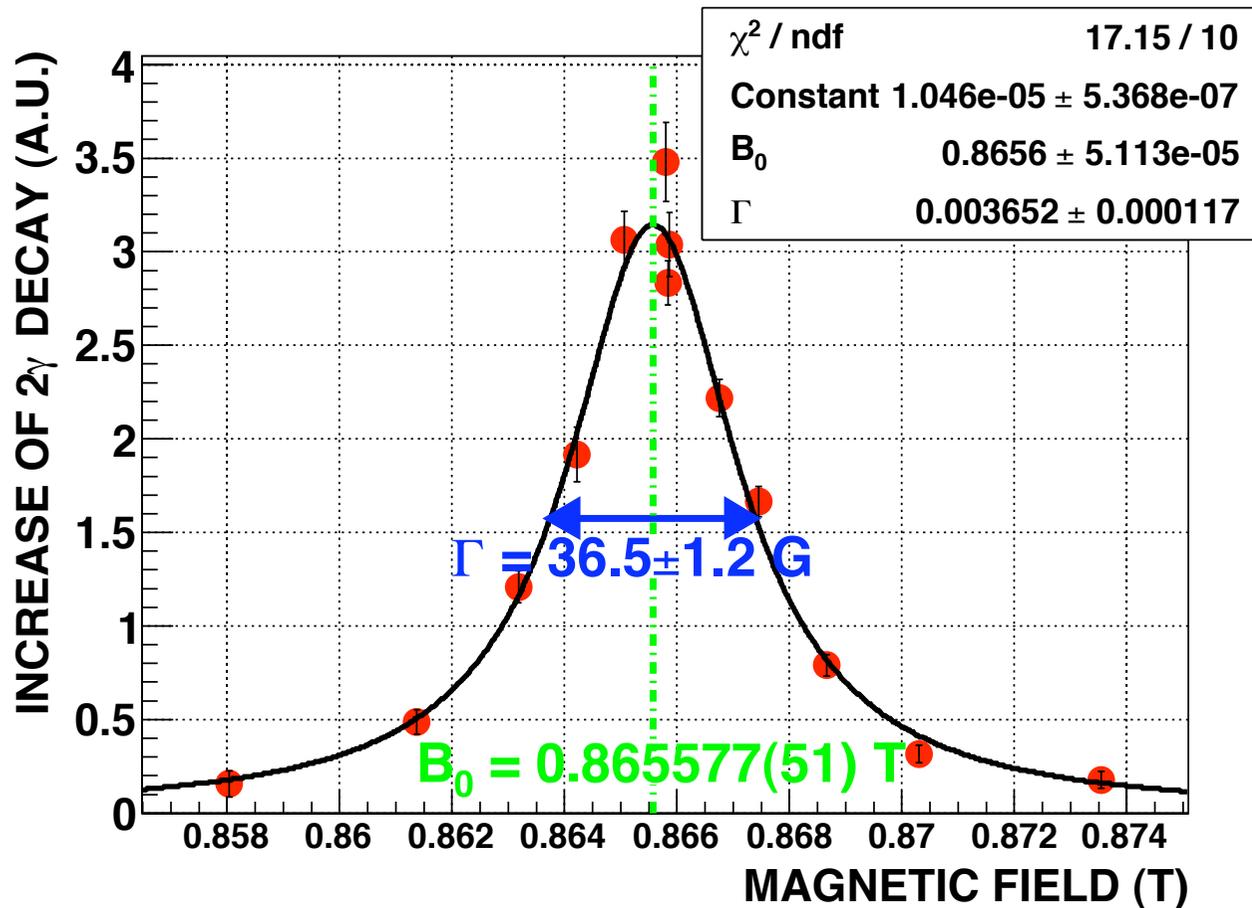
基本的に、511 keV FWHM に来たイベントレートを見ている。RF-ONのみのため、フロアが残っている。レートの場合、線源が時間とともに弱くなることの補正を入れる必要がある。

HFS

$= 203.396 \pm 0.003$ (15 ppm, stat.) ± 0.014 (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。

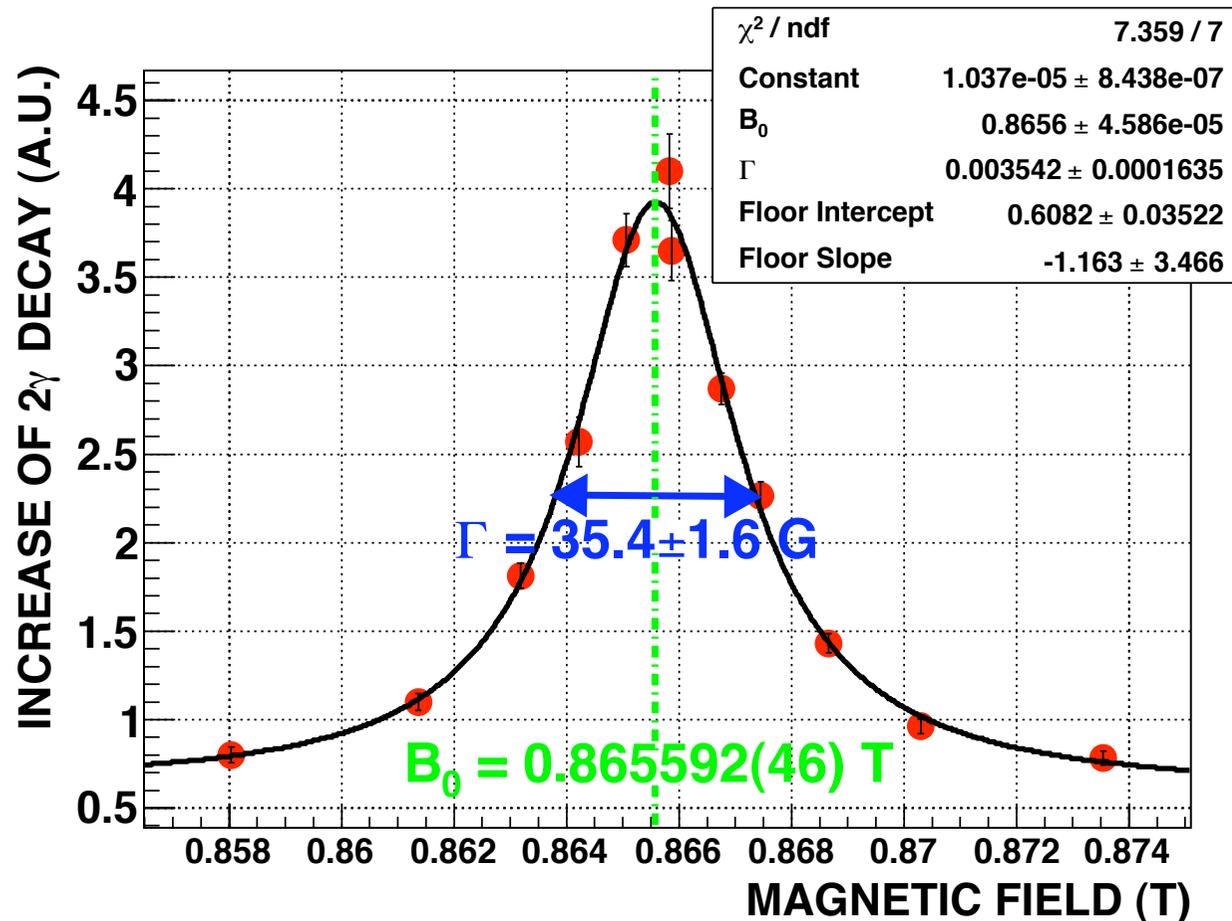
比の大きさ
は、Singleより5倍よ
いが、統計が少ない
ため、損している。

HFS

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

解析法(5)

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



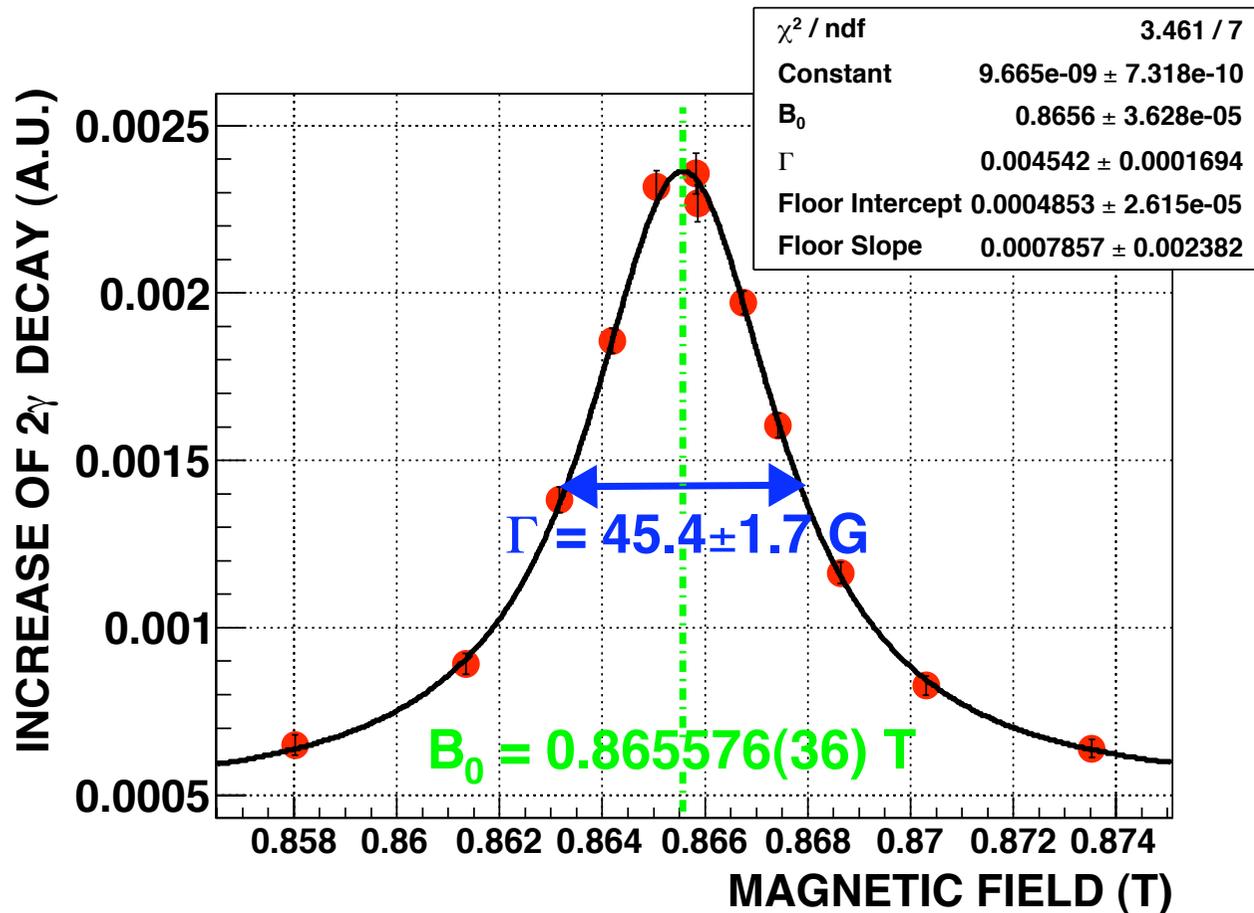
解析法(4)において、RF-OFFの引き算を行わなかったもの。

HFS

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

解析法(6)

Back-to-back 2 γ RF-ON



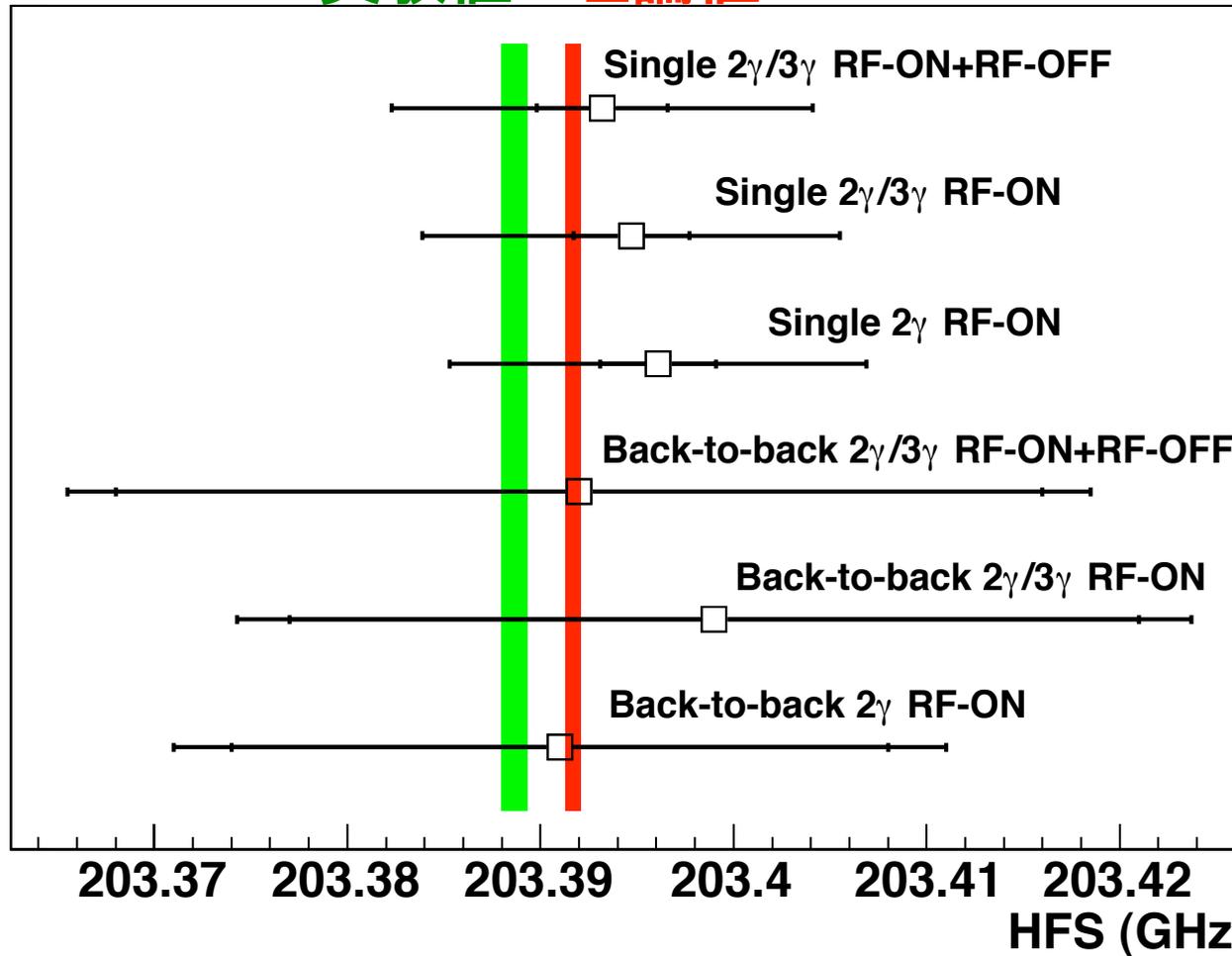
Back-to-backで、両方が511 keV FWHMであったイベントのレートを見ている。昔の実験は、この方法で解析された。

HFS

= 203.391 ± 0.017 (84 ppm, stat.) ± 0.014 (69 ppm, sys.) GHz

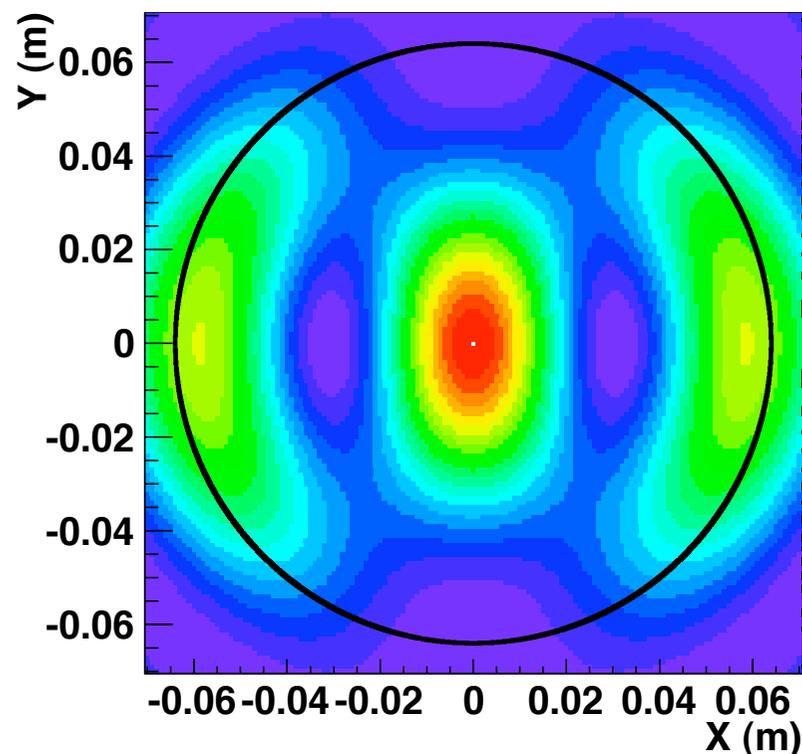
解析法の比較 まとめ

実験値 理論値

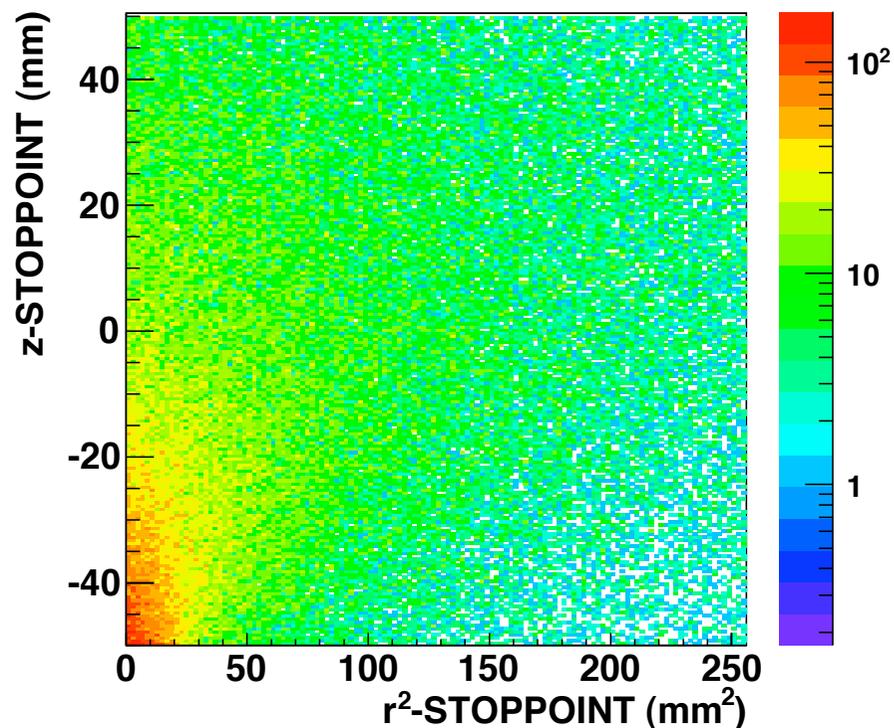


解析法の違いによる系統誤差が、40 ppm と、大きすぎる。
-> 更なる研究が必要。

RF強度、 e^+ の止まる場所



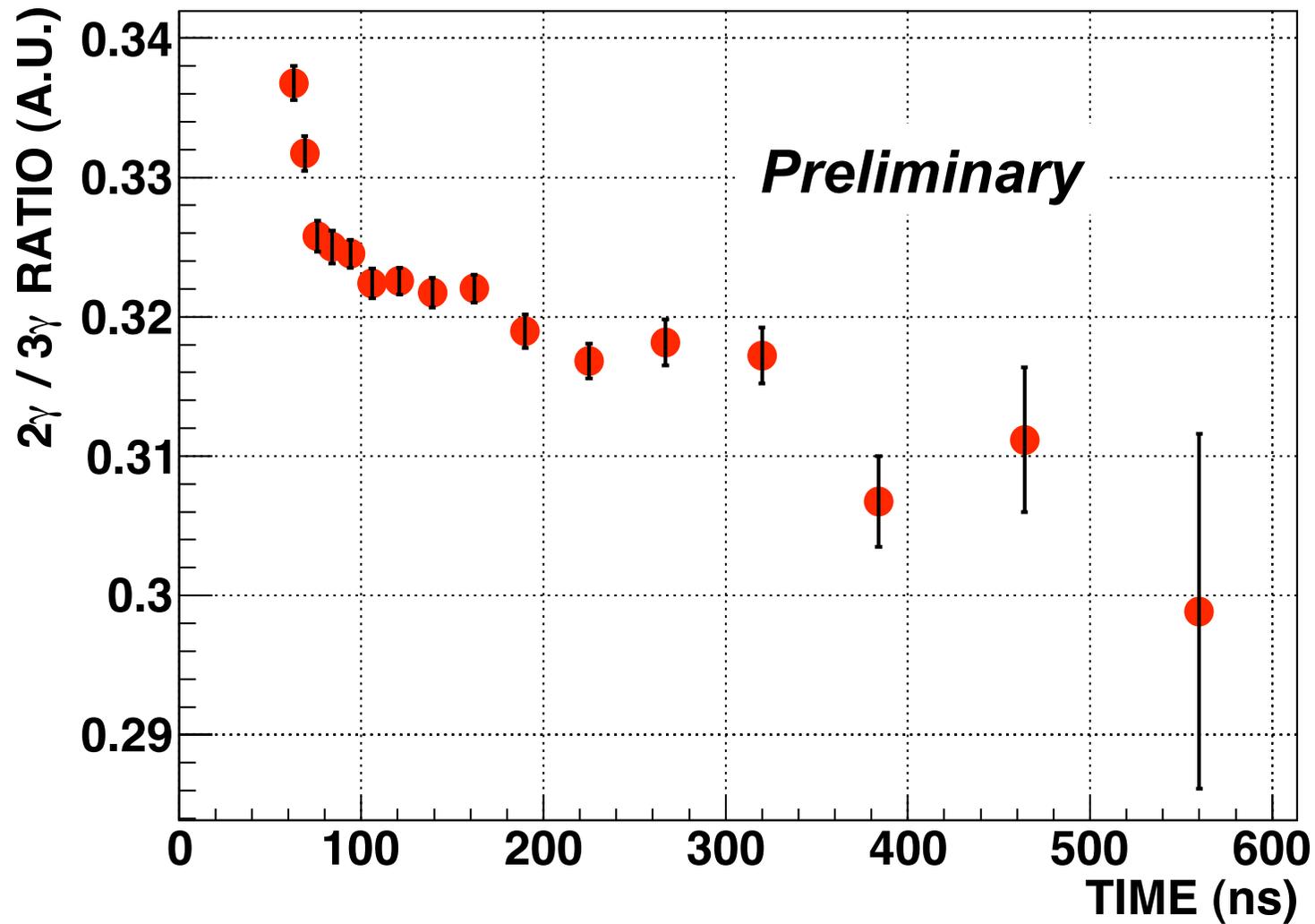
RFによる磁場のエネルギー分布



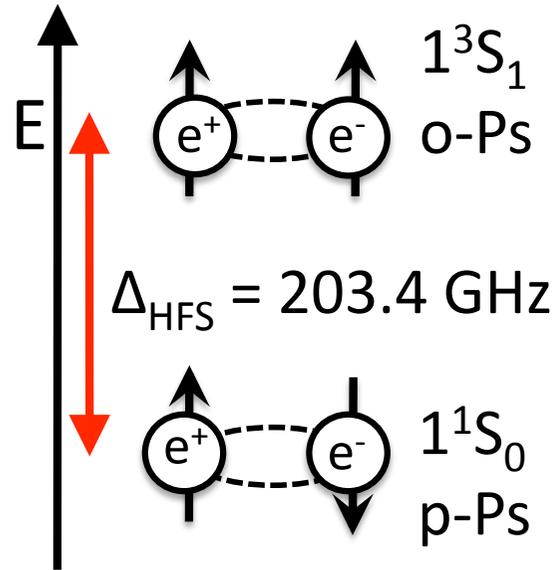
陽電子が止まる場所の分布
(Geant4 MC Simulation)

実際には、これらの重みもかける必要がある。
ほとんど、中心軸上の磁場しか効かないことが分かる。

熱化は測れるか？



ポジトロニウムの超微細構造(HFS)



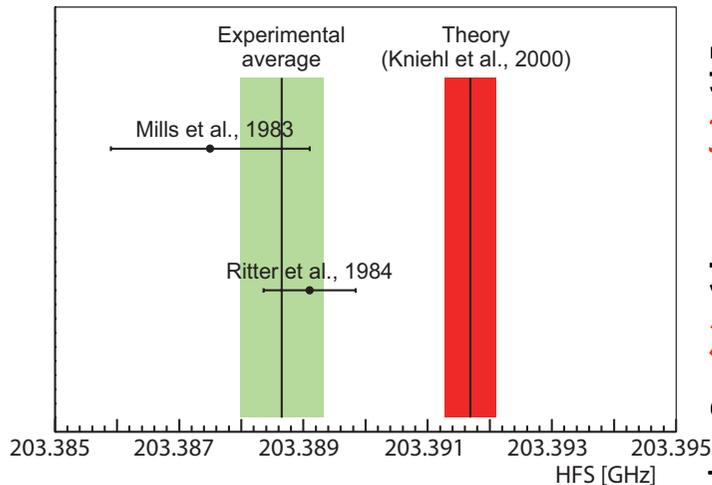
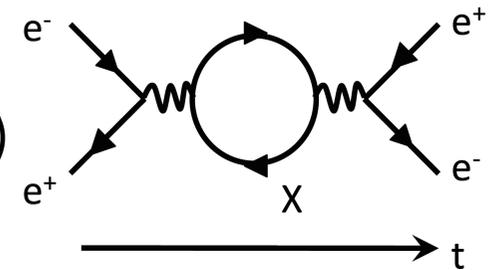
ポジトロニウムの基底状態

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、

3.3 ppm の精度で求まっている

(203.38865(67) 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 (15ppm, 3.9σ)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

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

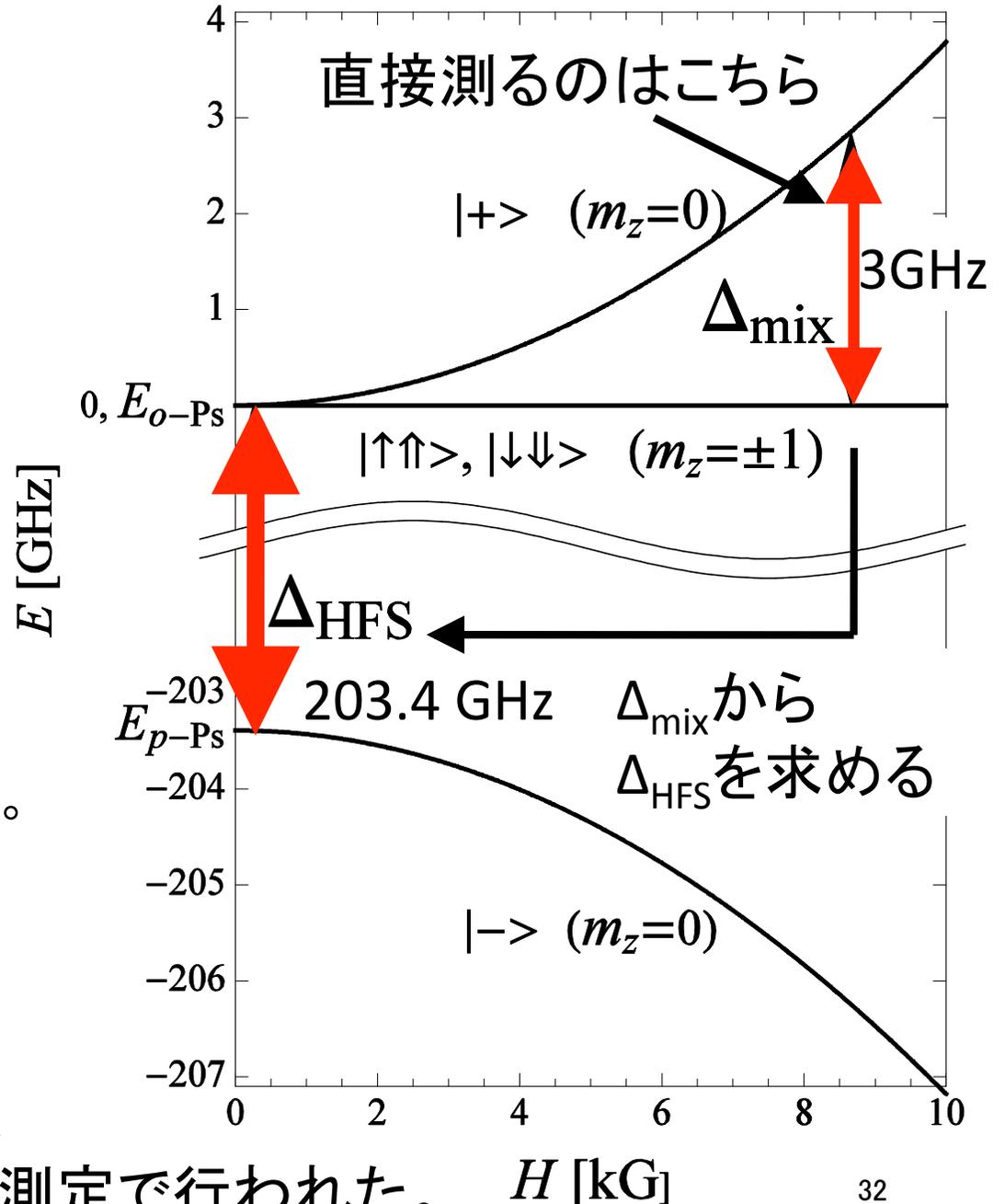
磁場をかけると、
o-Psの($S=1, m_z=0$)と
p-Ps($S=0, m_z=0$)が混合し
エネルギー準位が分裂
(Zeeman 効果)

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。

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

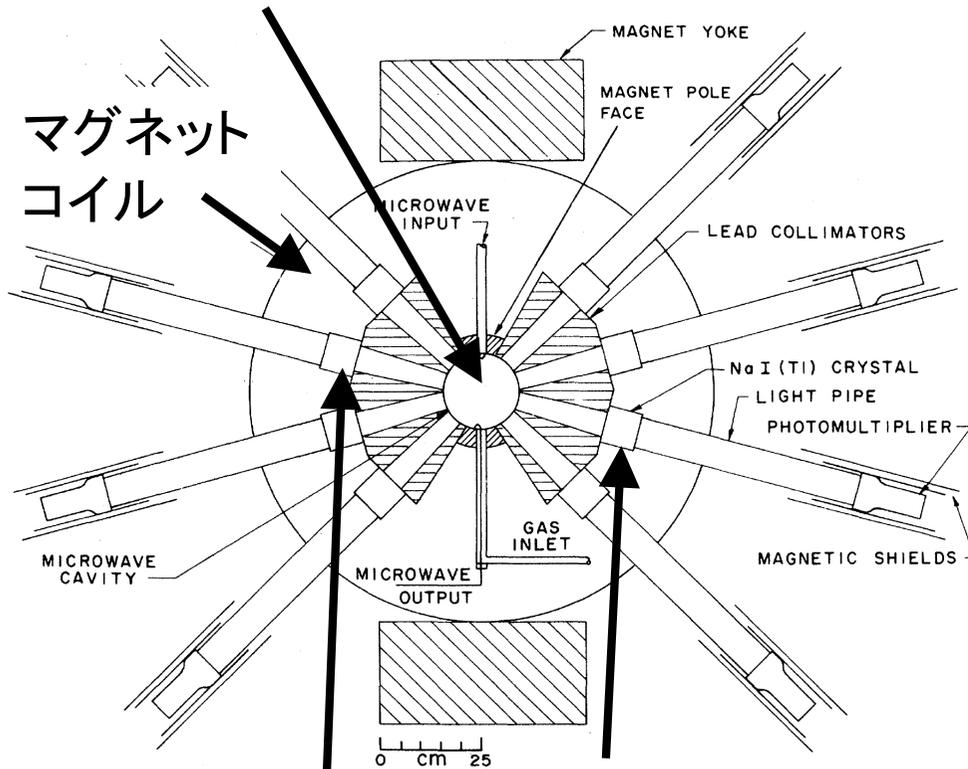
$$x = \frac{2g'\mu_B H}{\Delta_{HFS}}$$

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。



過去の実験と問題点

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(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。

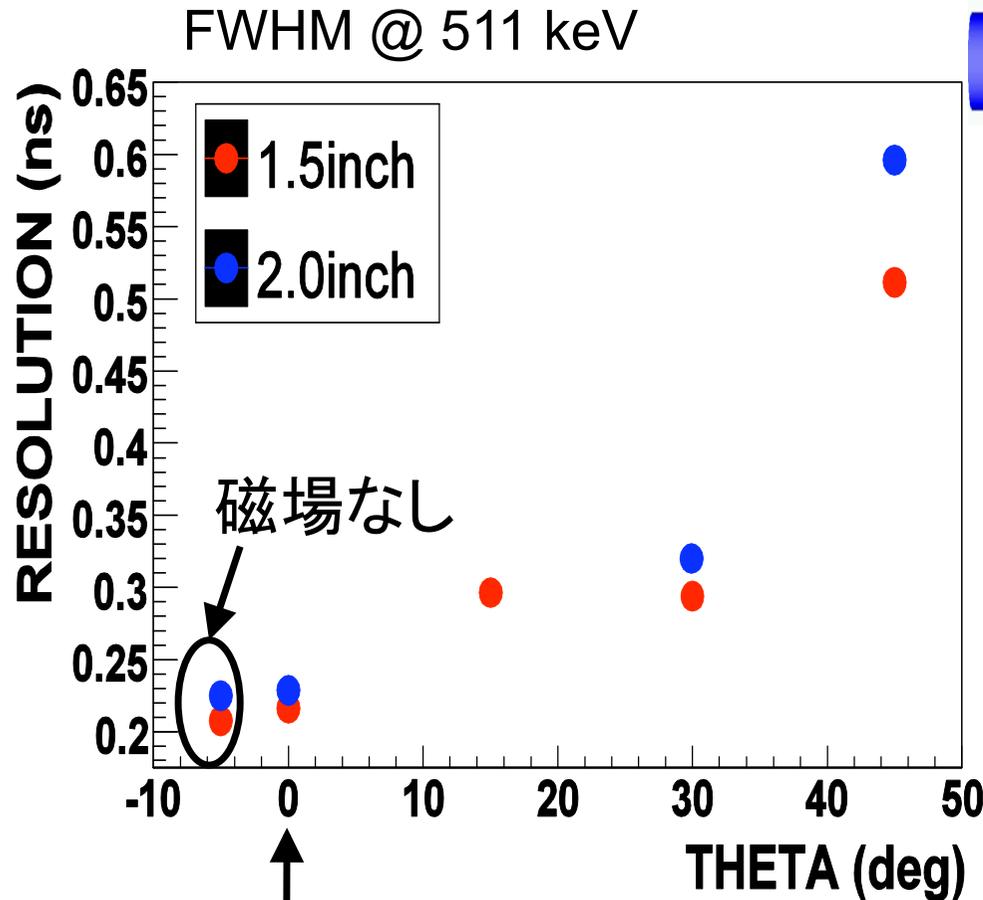
-> 大きなサイズでppm精度での
磁場制御は非常に困難。

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。

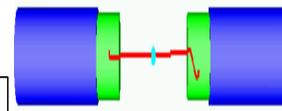
90年代、「オルソポジトロニウムの
寿命問題」で、この効果が
深刻な系統誤差を生むことを
我々が示した。

時間分解能の角度(θ)依存性



0°のとき悪化していない。

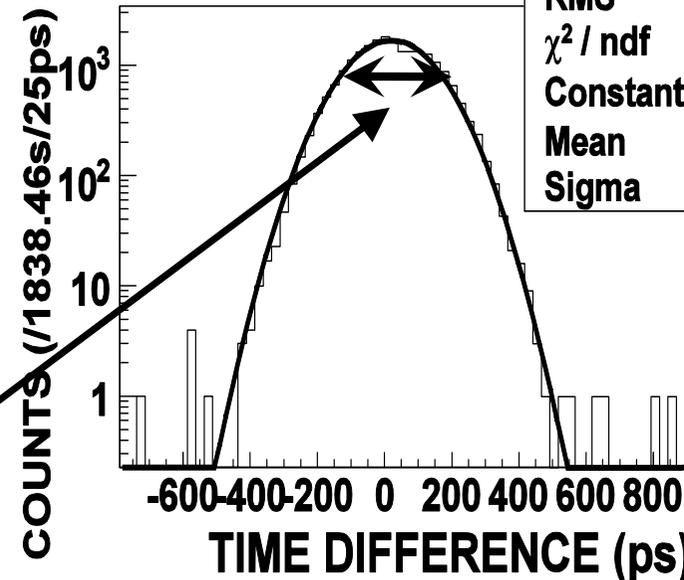
FWHM 293 ps @ 511 keV



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
χ^2 / ndf	203.1 / 43
Constant	1692 ± 13.9
Mean	20.67 ± 0.86
Sigma	124.4 ± 0.6

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)



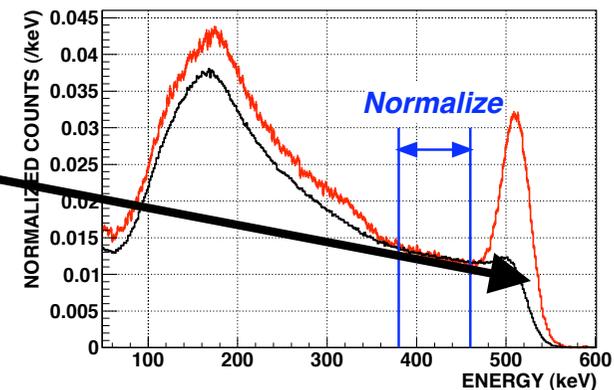
Back-to-back に検出器を置き、両方に 511 keV が入った場合を tag
(長所) S/N がよい (短所) Collection efficiency が小さい

(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



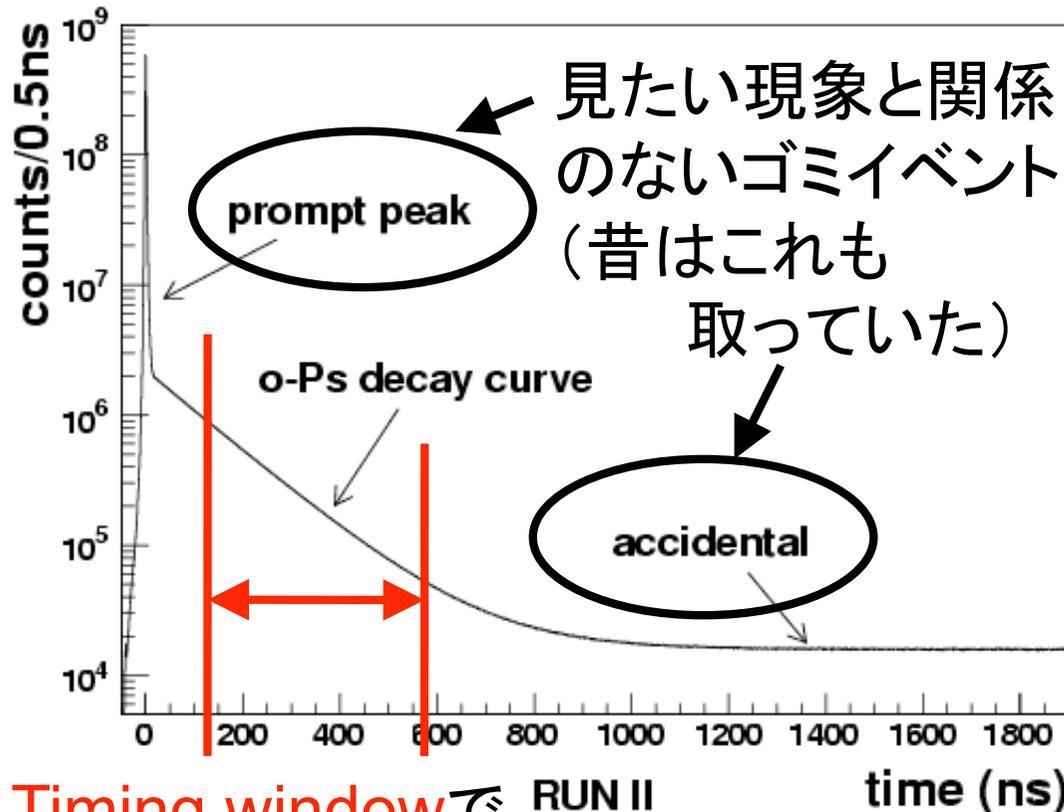
高いエネルギー分解能 (4 % FWHM @ 511 keV) をもつ

LaBr₃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

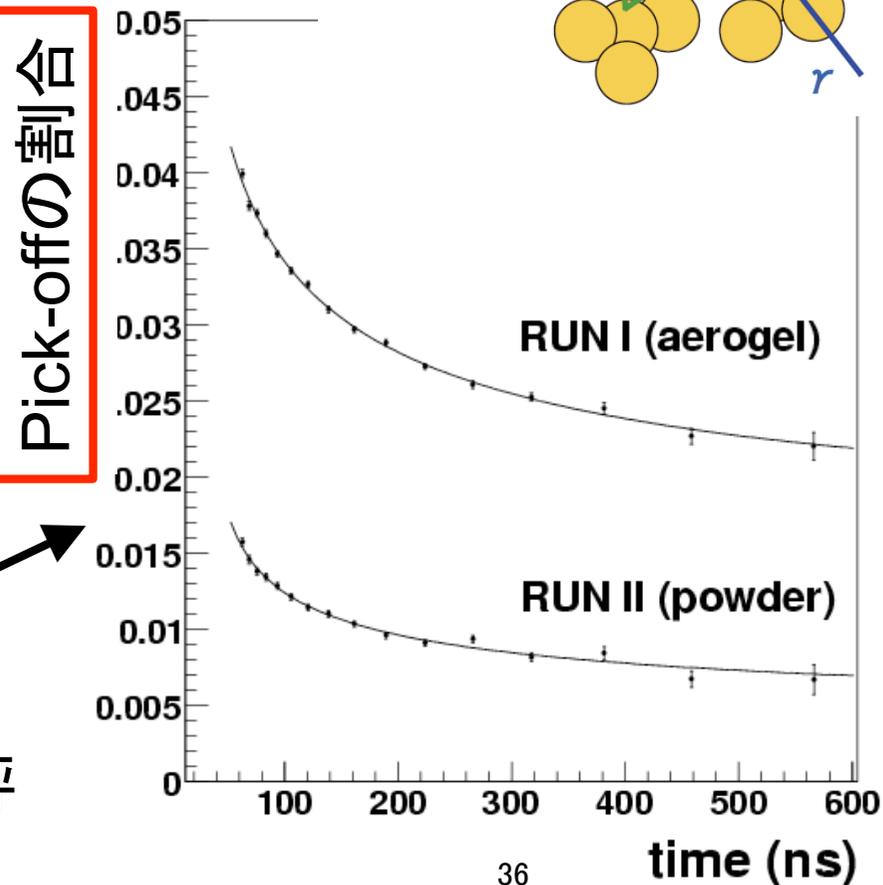
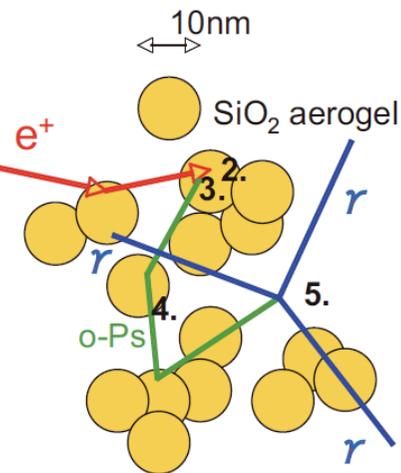
ポジトロニウムの崩壊曲線



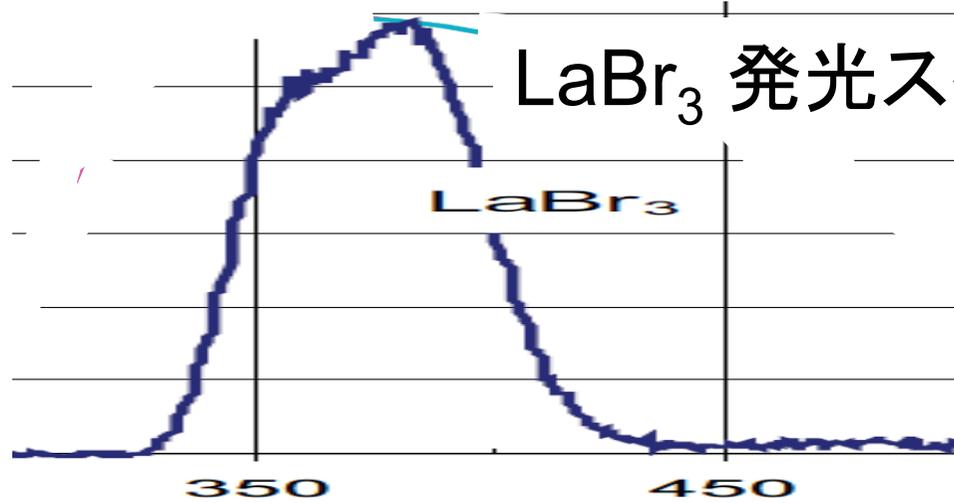
Timing window で RUN II
見たいイベントだけを選び出す。

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

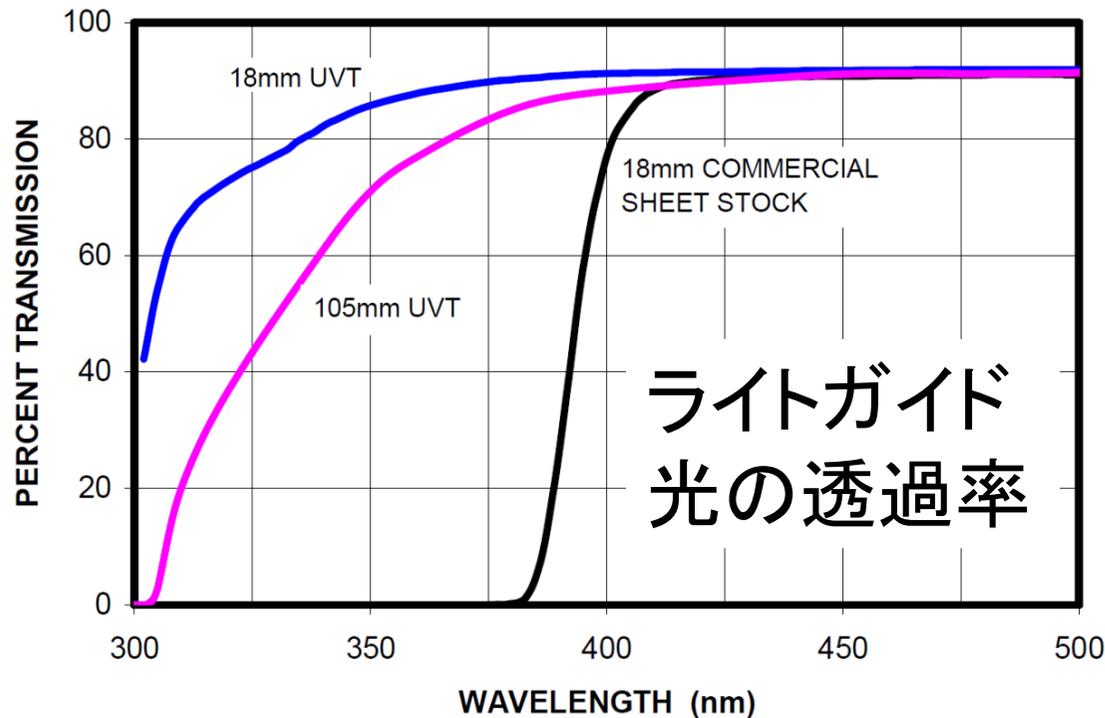
生成されたPsは
周りの物質と
衝突しながら
進み、止まって
から崩壊する。



UVT ライトガイド

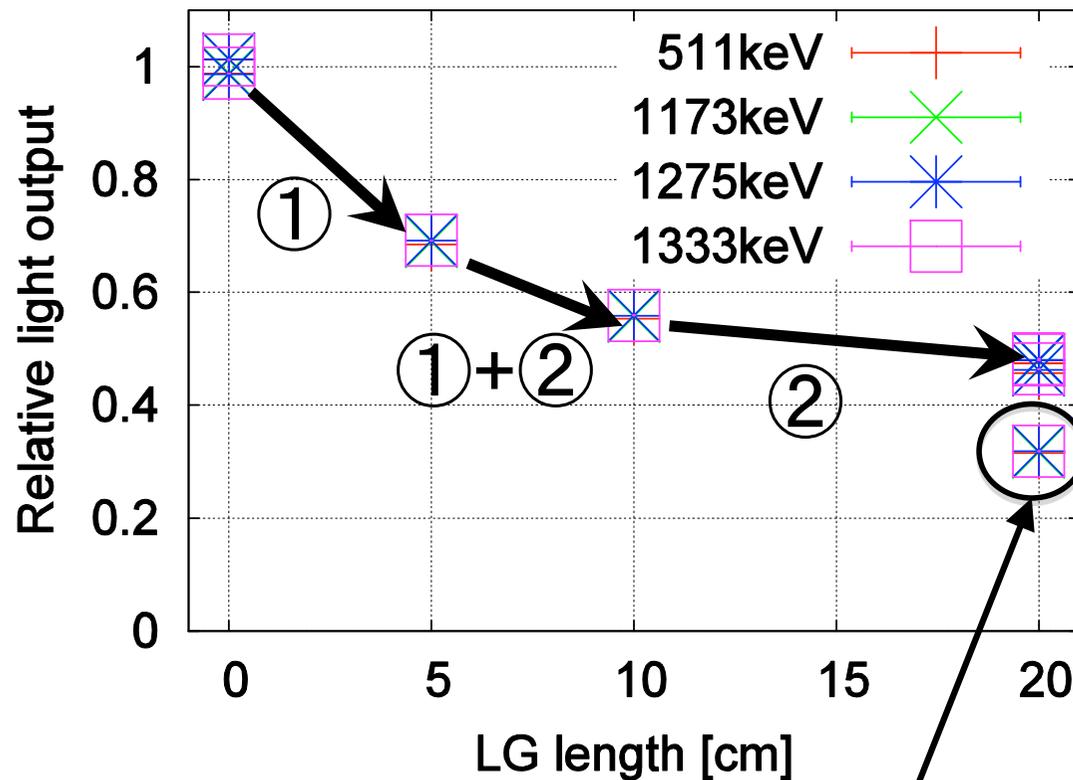


LaBr₃ は、
シンチレーション光の
波長が $\lambda=380$ nm のた
め

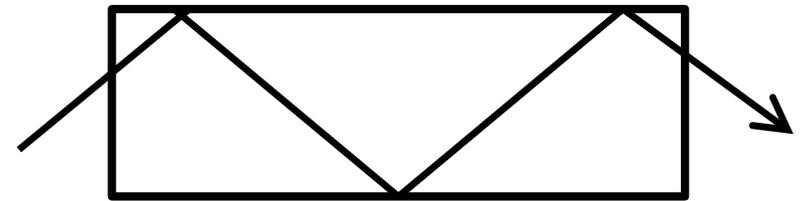


UVT
(Ultra-Violet
Transmitting)ライトガイド
を使う。

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。

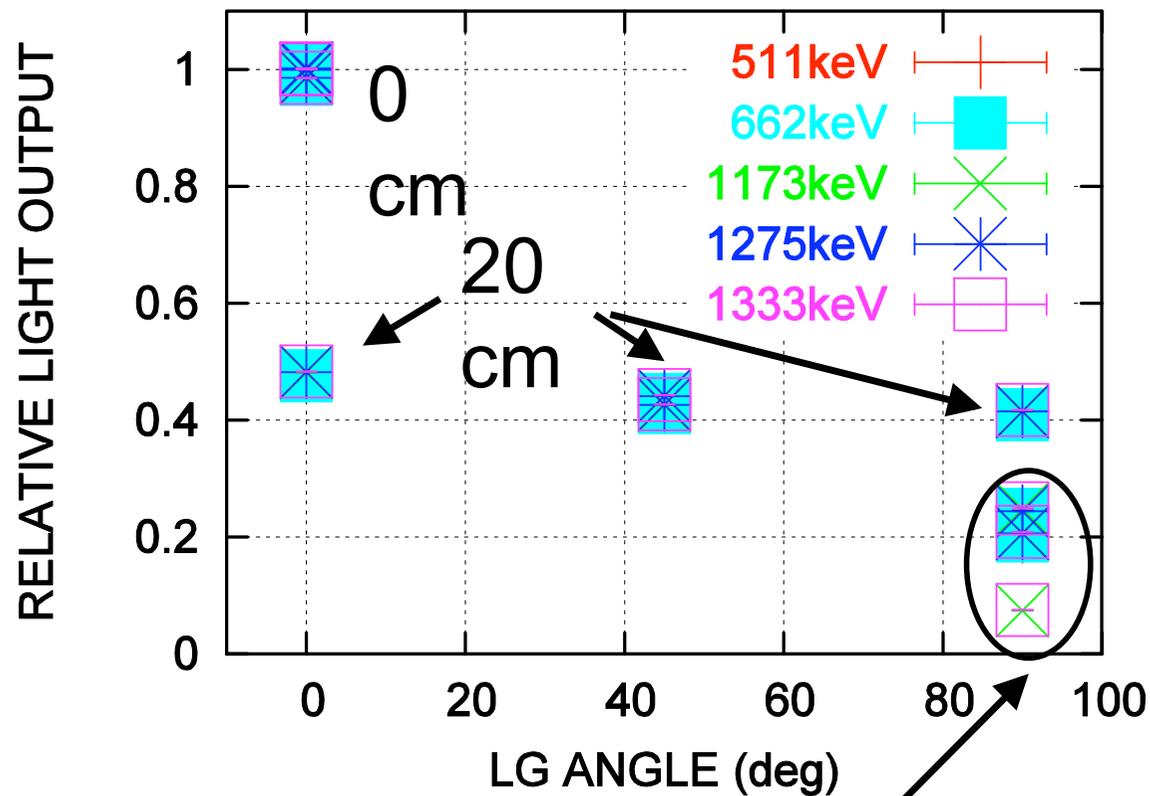


② 吸収による減少。
(影響は小さい)

20 cm で半分弱になるが、
そこで既にほぼ一定。

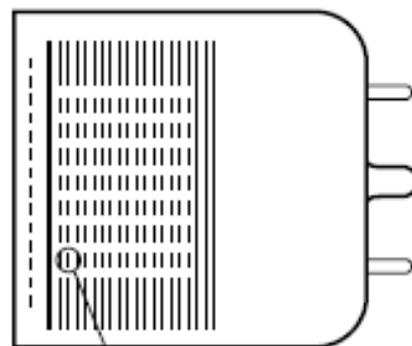
PMT 面から
LG はがれてた

角度(曲げ)依存性

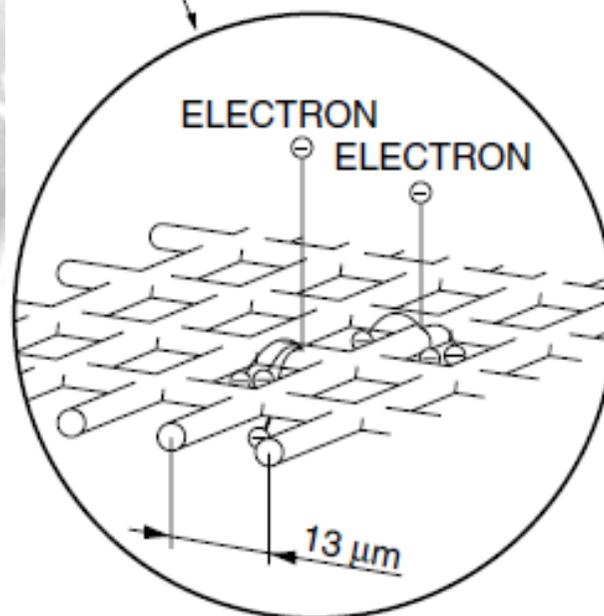


- 20 cm では、
0°も 45°も 90°も
ほとんど変化なし。
- 曲げによる効果は
ほとんどない。

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



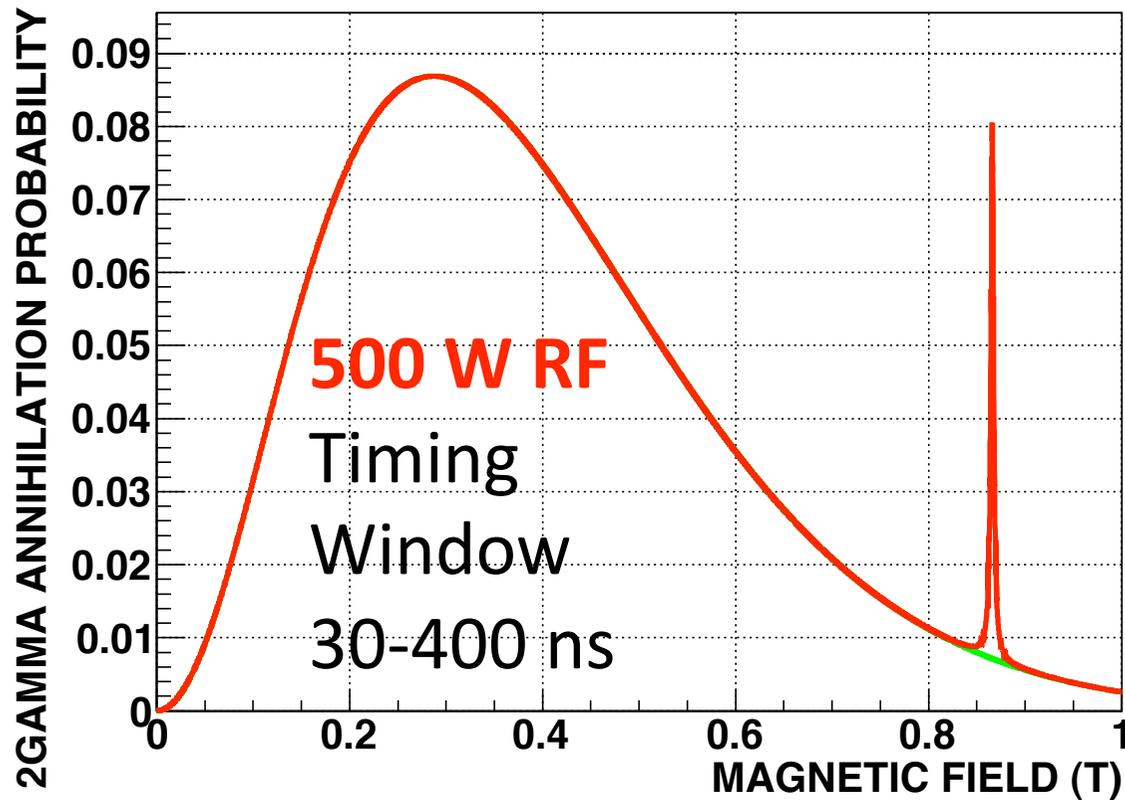
KEK で行った
測定では、
磁石の中心から数cm
-> 100 ppm
10 cm
-> 10 ppm

FINE-MESH TYPE

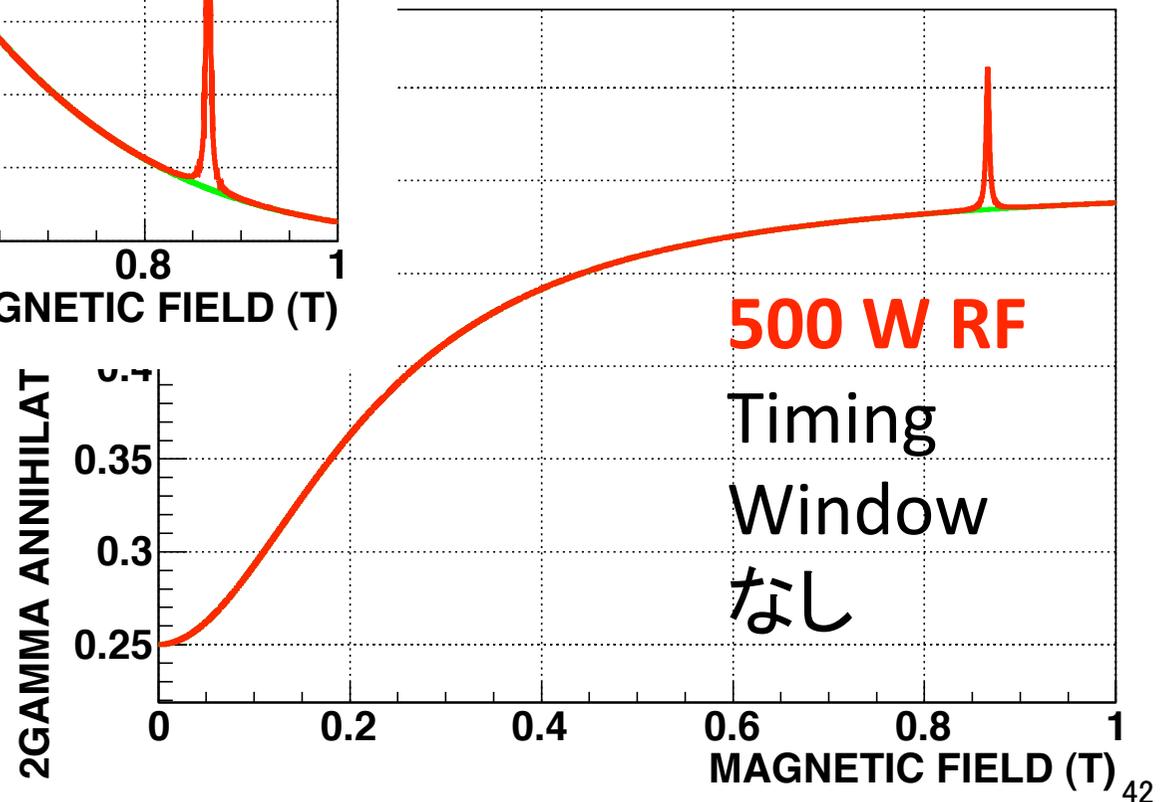
Table of Scintillator Properties

Scintillator	Density	Refractive index	Photons per MeV	Emission Maximum	Decay Constant	Radiation Length
	g / cm ³			nm	ns	cm
NaI (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 (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

