

ポジトロニウム超微細構造の 量子振動を用いた測定

arXiv:1002.4567

(submitted to Phys. Lett. B)

東大理、東大素セ^A、KEK^B、東大院総合文化^C

宮崎彬、佐々木雄一、石田明、
末原大幹^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、
小林富雄^A、田中賢一^B、山本明^B、
齋藤晴雄^C、池野正弘^B

第47回アイソトープ・放射線研究発表会
2010年7月8日 日本科学未来館

この手法の特色

今までの話

- ポジトロニウム超微細構造の精密測定(2p-I-07, 2p-I-08)
- サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウムの超微細構造の測定(2p-I-09)

実験的に全く異なる技術

→ともに大強度・安定な光源が鍵

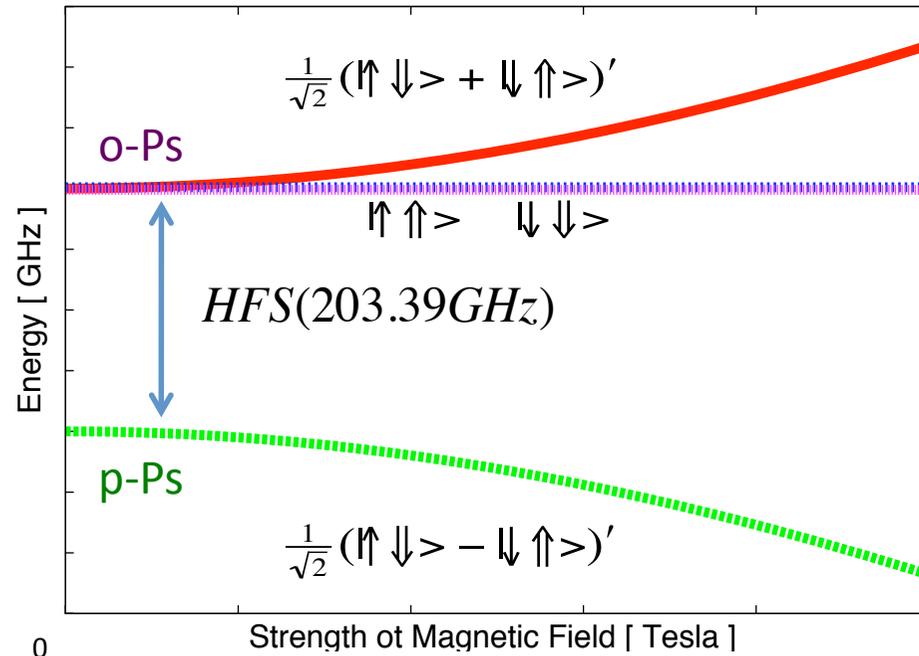
この手法

- 光源による遷移の代わりに量子振動を用いてHFS測定
 - エネルギー準位ではなく時間で測定(相補的な手法)
 - 高い時間分解能での測定が鍵
- さらに応用としてスピン緩和測定が考えられる

Ps-HFSの量子振動による測定の概要(1/3)

<磁場によるPs量子準位のエネルギー分裂>

$$\chi \approx 0.275B[T]$$



$$\frac{HFS}{2} \left(\sqrt{1 + \chi^2} - 1 \right)$$

この二準位間の重ね合わせ状態を作ると、量子状態は両者のエネルギー差で振動

例: 周期26ns@100mT

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)' \propto |S=1, m=0\rangle + \varepsilon |S=0, m=0\rangle$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)' \propto |S=0, m=0\rangle + \varepsilon |S=1, m=0\rangle$$

(磁場によってp-Psと、o-Psのうちm=0の成分が少し混合)

振動の周期 → (HFS×磁場の関数)⁻¹
→ PsのHFSの測定

Ps-HFSの量子振動による測定の概要(2/3)

欲しい量子重ね合わせ状態を作るために

1. 偏極している β^+ を使って偏極Psを作る
2. 偏極の向きを磁場と直交にする

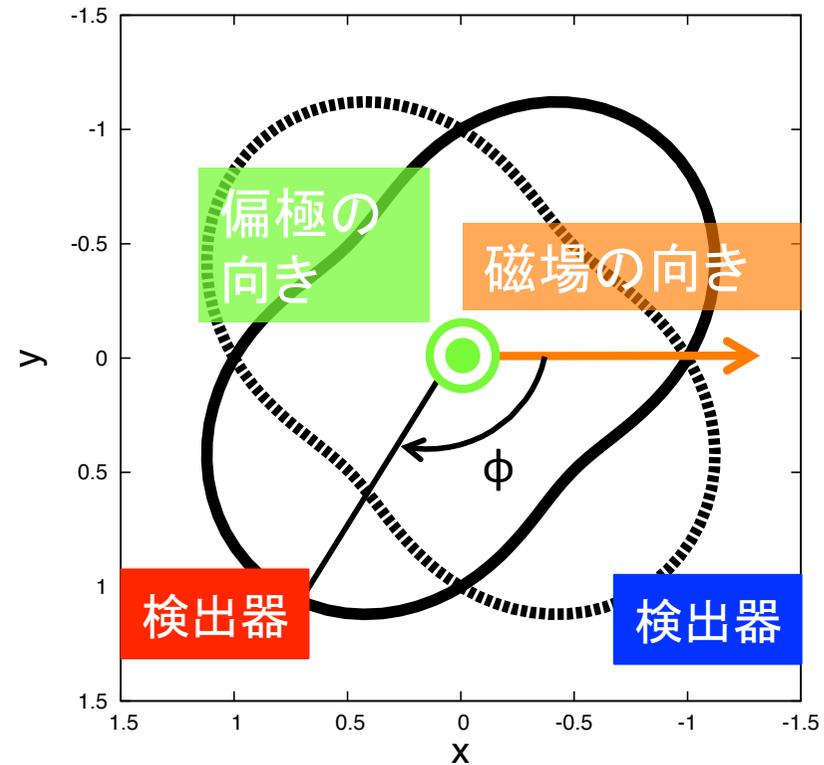
量子状態間の振動

→ 3γ 崩壊における

” γ 線が飛ぶ分布”の振動

γ 線が飛びやすい方向が、
 $\phi=135^\circ$ 、 315° (正位相)
 $\phi=45^\circ$ 、 225° (逆位相)
の間を交互に入れ替わる

＜ γ 線方向分布を
半径の大きさで表した絵＞

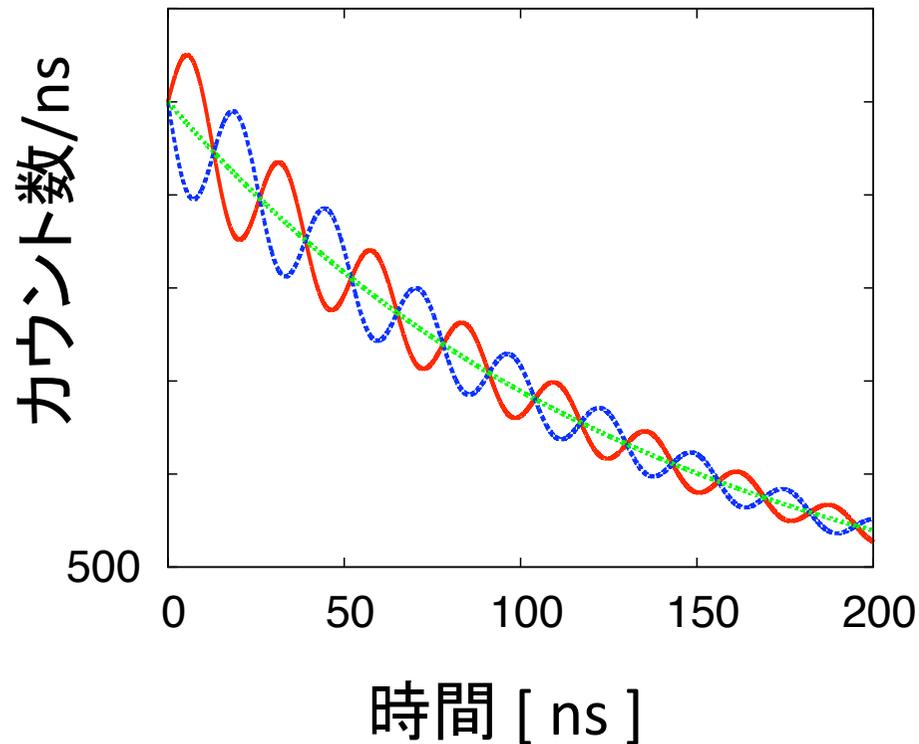


実線: $t=0$

破線: 半周期後($t=T/2$)

Ps-HFSの量子振動による測定の概要(3/3)

< 検出器に入る γ 線の数の時間変化(寿命曲線) >



< 寿命曲線の式 >

$$\begin{aligned} & A \exp(-\gamma_1 t) \\ & + B \exp(-\gamma_2 t) \\ & + C \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(\Omega t + \theta_0) \end{aligned}$$

パラメーターの詳細はフィットの項で後述

赤: $\phi=45^\circ$ (正位相)にある検出器
青: $\phi=135^\circ$ (逆位相)にある検出器
緑: $\phi=90^\circ$ にある検出器

$\Omega \rightarrow$ 振動周期 \rightarrow HFS

セットアップ(線源まわり)

線源: $^{68}\text{Ge-Ga}$ 、30kBq

高いEnd Point Energy (1.9MeV)

→大きな偏極率(平均0.86)

→大きな振幅

プラシン: 500 μm 厚、

線源を挟んでぴったり貼り付け

エアロゲル: SiO_2 、0.11g/cc、 $\Phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$

DAQで採るうち1割程度がo-Ps

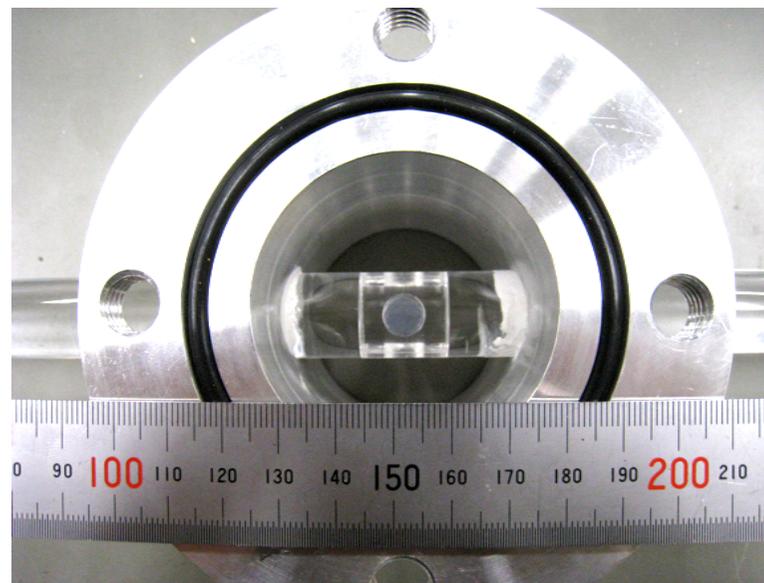
ライトガイド: $\Phi 20\text{mm}$ 、全長400mm

真空容器の外のPMTに光を導く

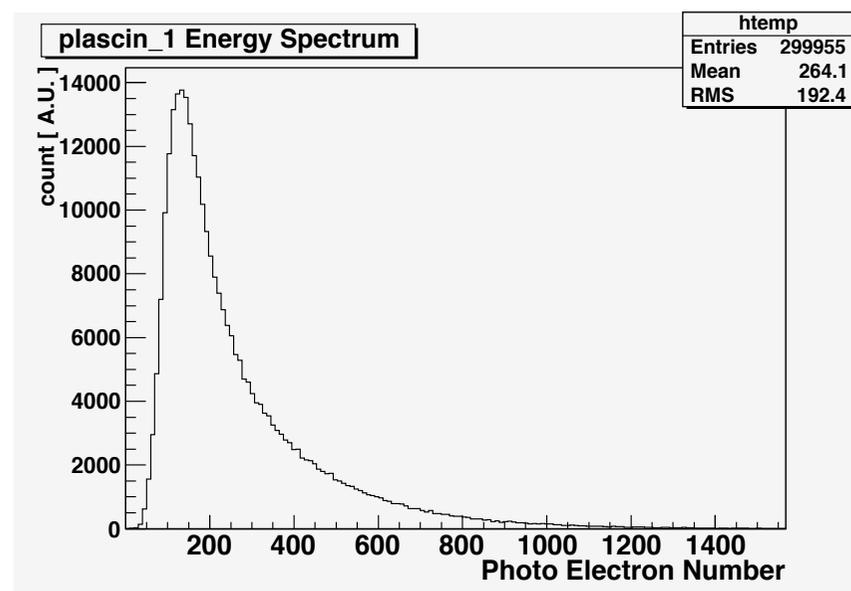
真空容器: ロータリーポンプで常時真空引き

→ O_2 によるPick offを減らす

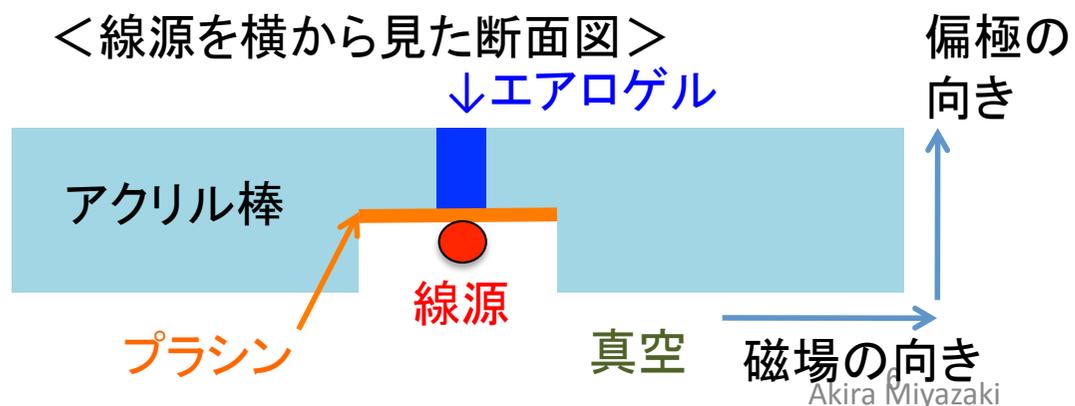
＜真空容器に固定したアクリル棒＞



＜プラシンのエネルギースペクトル＞

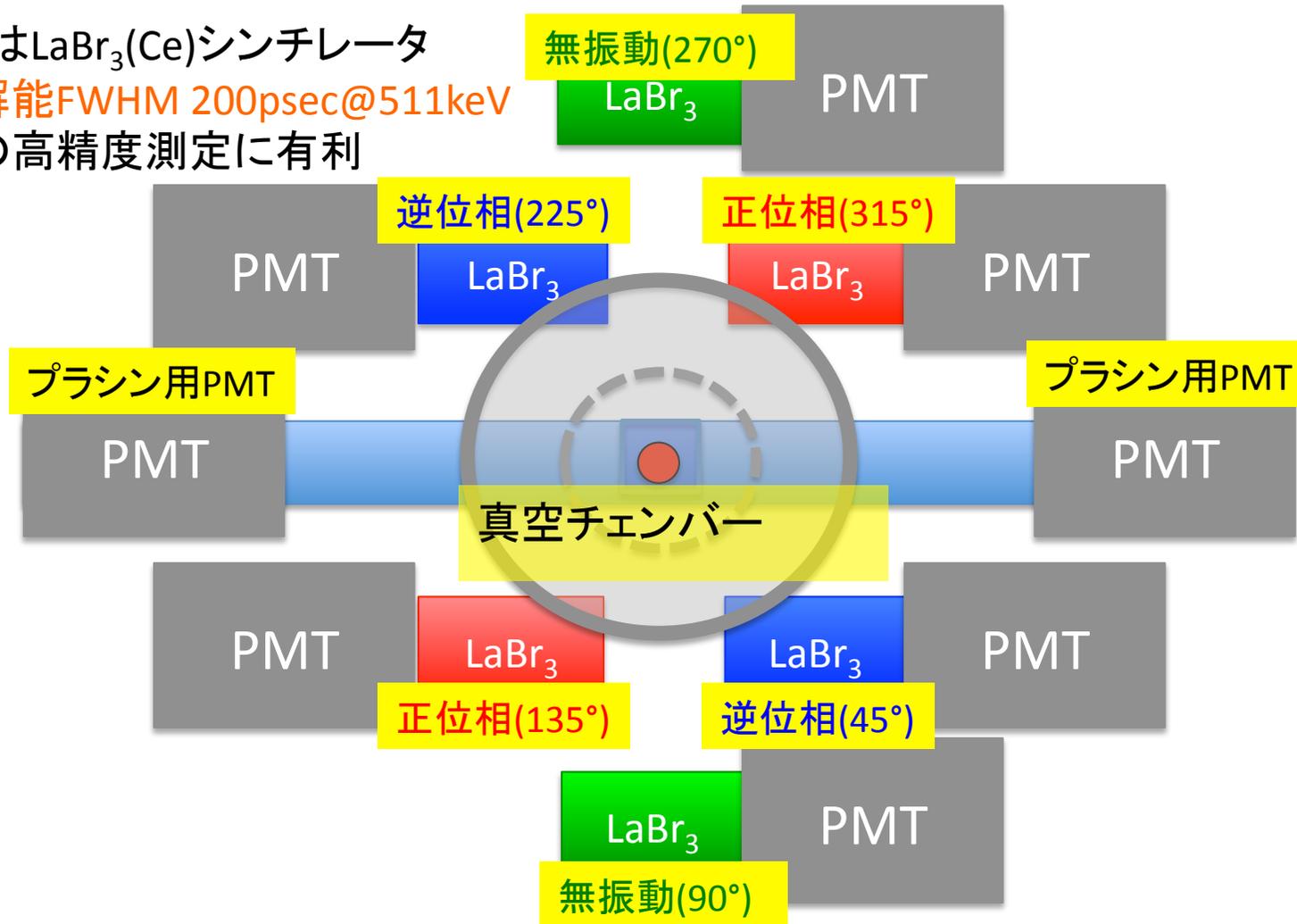


＜線源を横から見た断面図＞



セットアップ(γ線検出器)

γ線検出器はLaBr₃(Ce)シンチレータ
→時間分解能FWHM 200psec@511keV
量子振動の高精度測定に有利

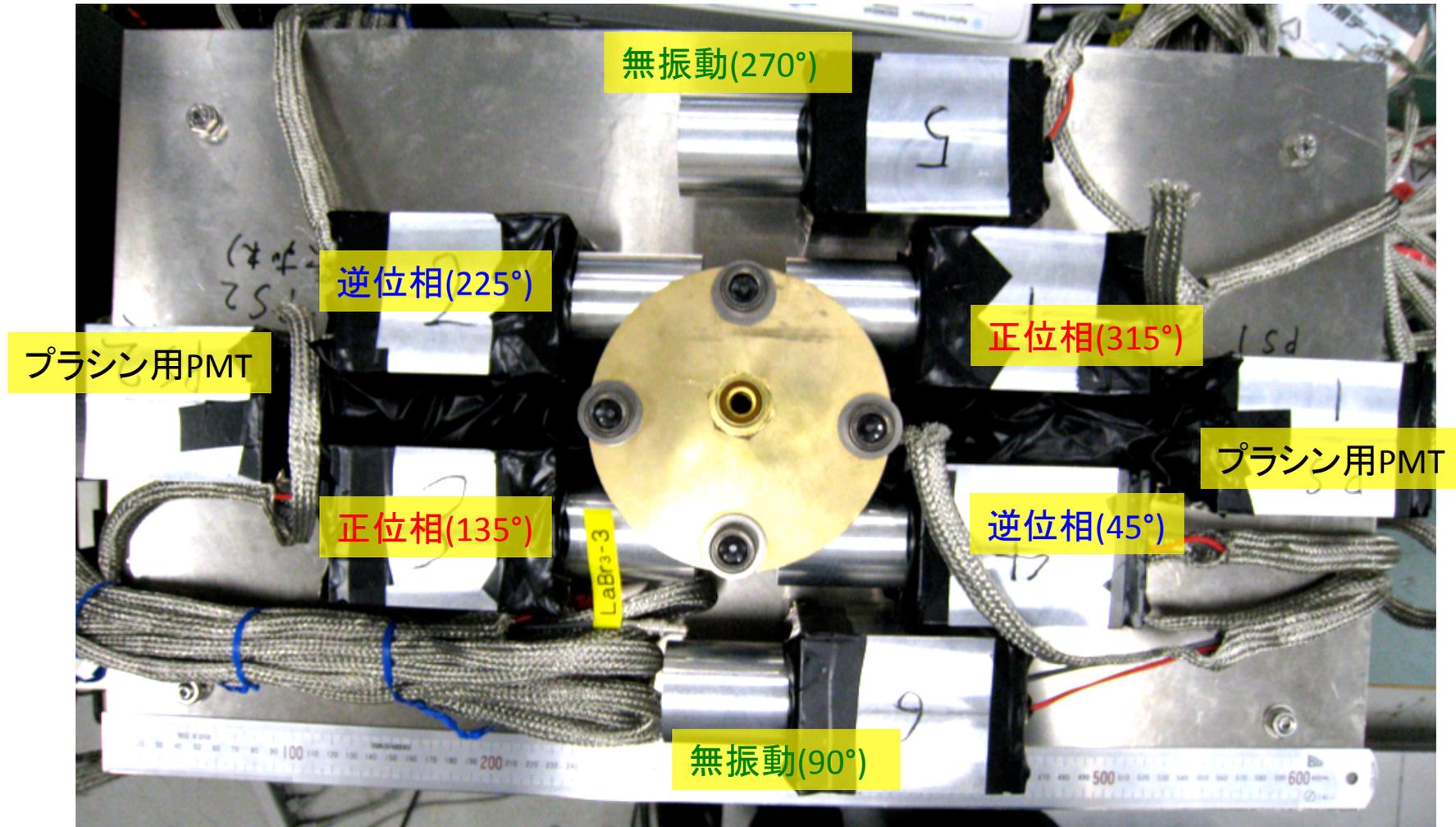


磁場の向き



偏極の向き(重力に対して上向き)
チェンバーをひっくり返すことで反転しながら実験

セットアップ(γ 線検出器)写真



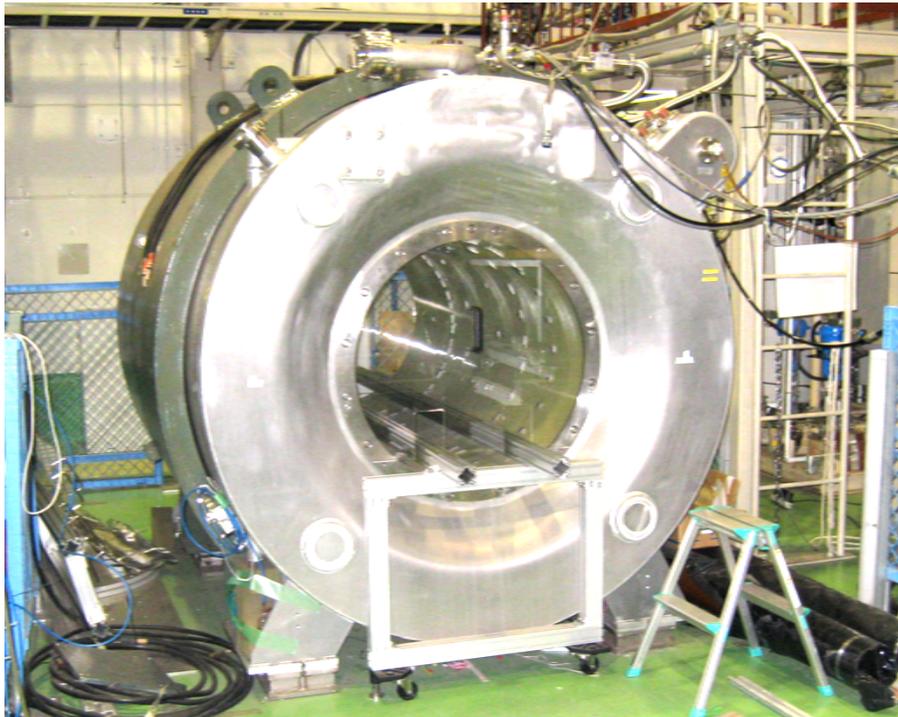
→ 磁場の向き

◎ 偏極の向き(重力に対して上向き)

一様磁場を作る磁石と8GHzダイレクトクロックTDC

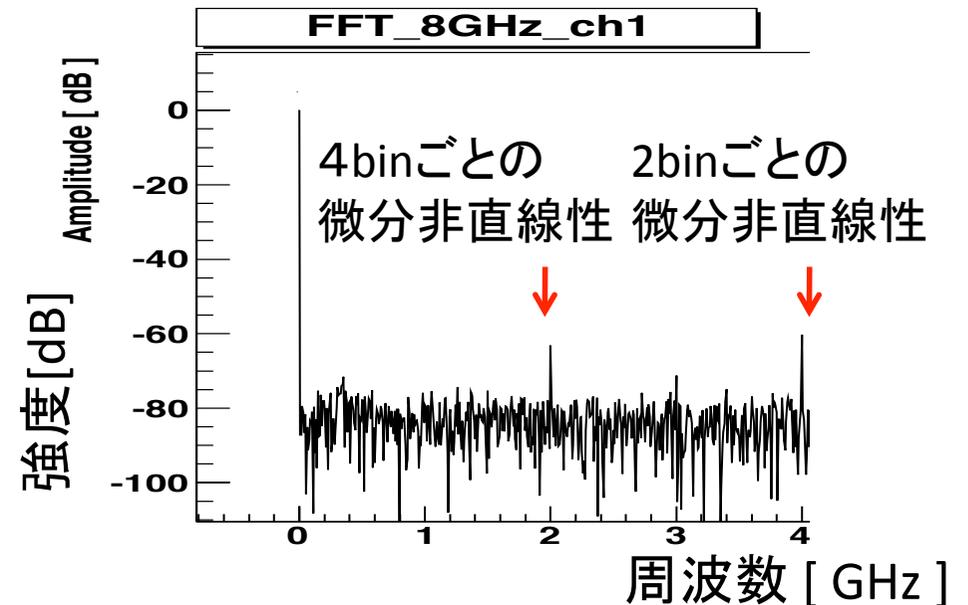
一様磁場

- KEKの大型超伝導磁石を使用
- $\pm 5\text{mm}$ の範囲で20ppmの均一性



8GHz動作のダイレクトクロックTDC

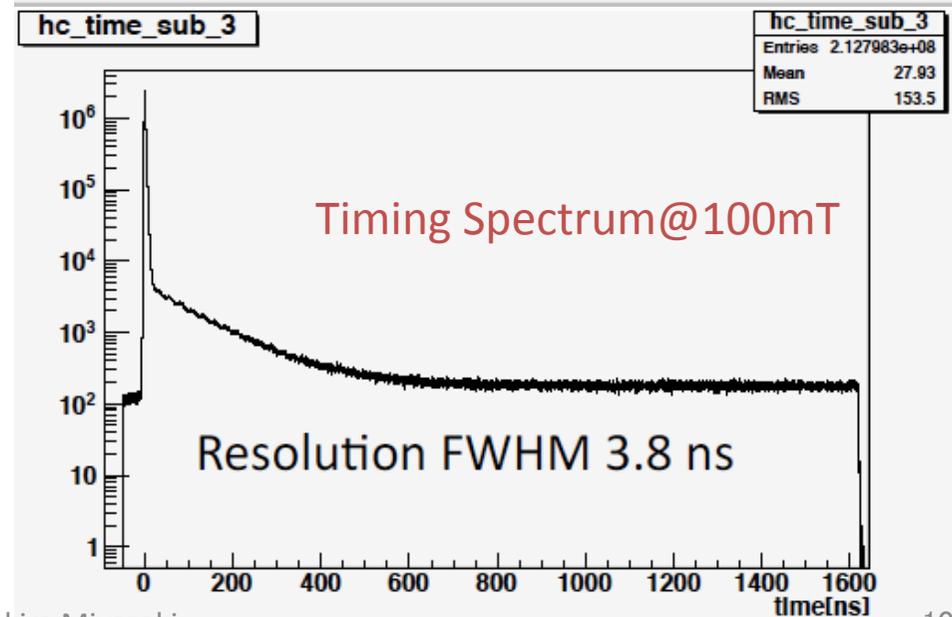
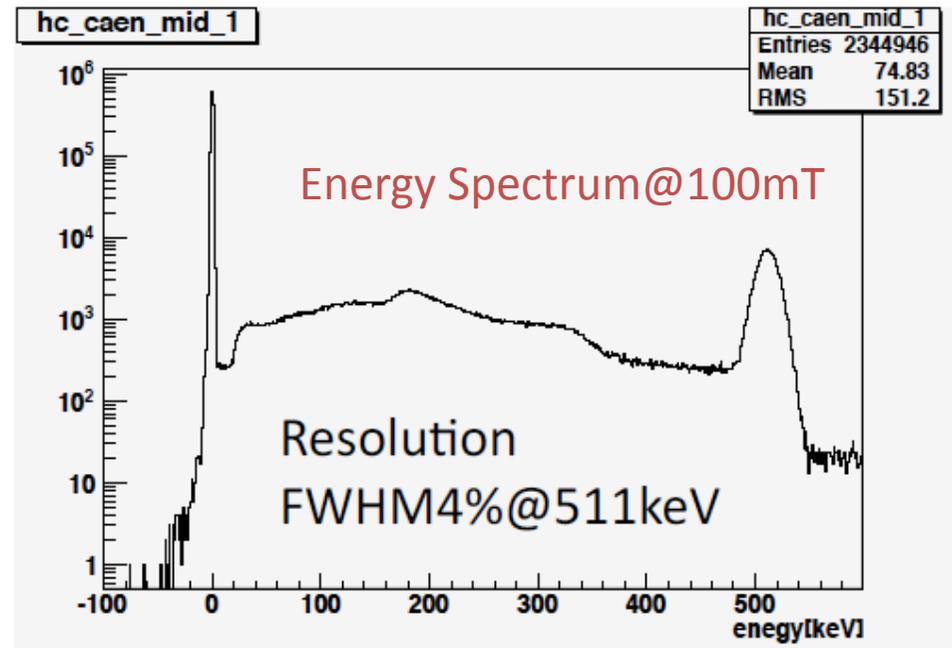
- クロックを直接カウントするタイプのTDCをKEKと新規に開発
- 最高8GHz動作(今回は5GHzで使用)



<スペクトル(8GHz時)のフーリエ変換>

取得したデータ量と典型的なスペクトル

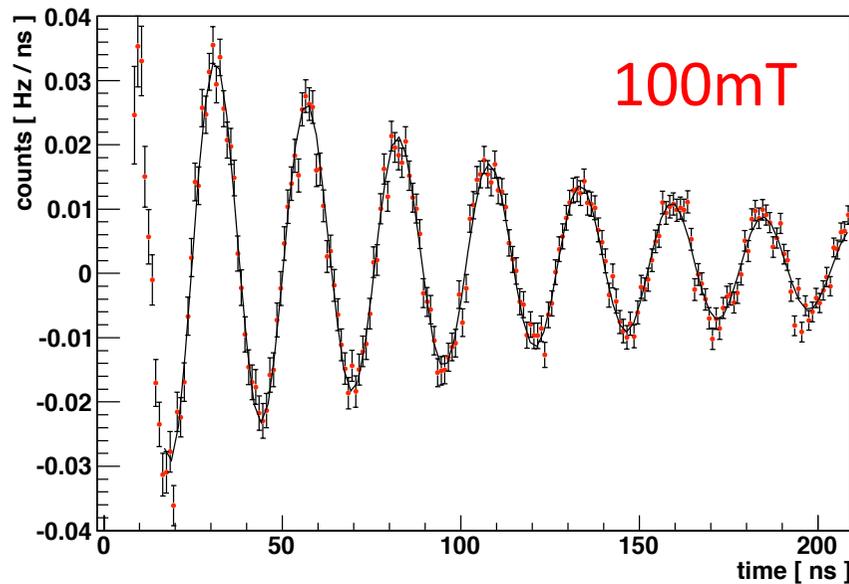
磁場(周期)	e ⁺ 偏極の向き	DAQ イベント数
0mT (no osci.) (TDC : 8GHz)	up	4.2×10 ⁷
100mT (26 ns)	up	2.1×10 ⁸
100mT (26 ns)	down	2.6×10 ⁸
118mT (19 ns)	up	6.7×10 ⁷
118mT (19 ns) (TDC : 8GHz)	up	6.5×10 ⁷
118mT (19 ns)	down	4.9×10 ⁷
135mT (14 ns)	up	2.1×10 ⁸
135mT (14 ns)	down	1.9×10 ⁸
138mT (14 ns)	up	2.0×10 ⁸
138mT (14 ns)	down	9.7×10 ⁷



フィット方法

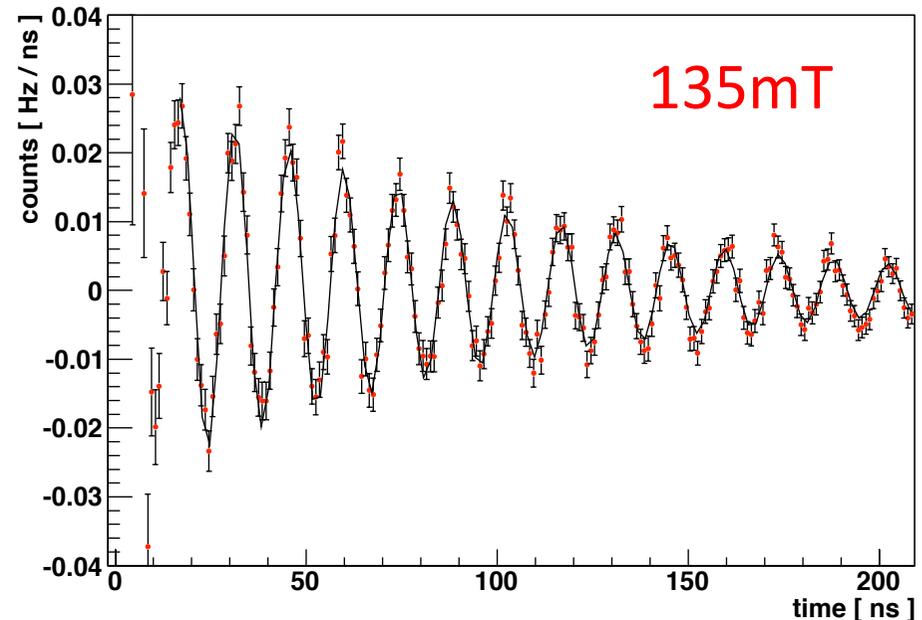
- 同位相にある検出器のヒストグラムは足して、逆位相にある検出器のヒストグラムは引く
- フィット関数は、
$$f(x) = Ae^{-\gamma_1 t} + Be^{-\gamma_2 t} + Ce^{-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t} \sin(\Omega t + \theta_0) + D$$
(A、B、Dは引き算が不完全な時のための保険。実際A、B、Dはゼロコンシステント)
- フィット範囲は16ns ~ 1416ns。プロンプトのテールがキャンセル出来るのでフィット範囲をかなり前に出来る。

<引き算後の寿命曲線とフィット>



time [ns]

Akira Miyazaki



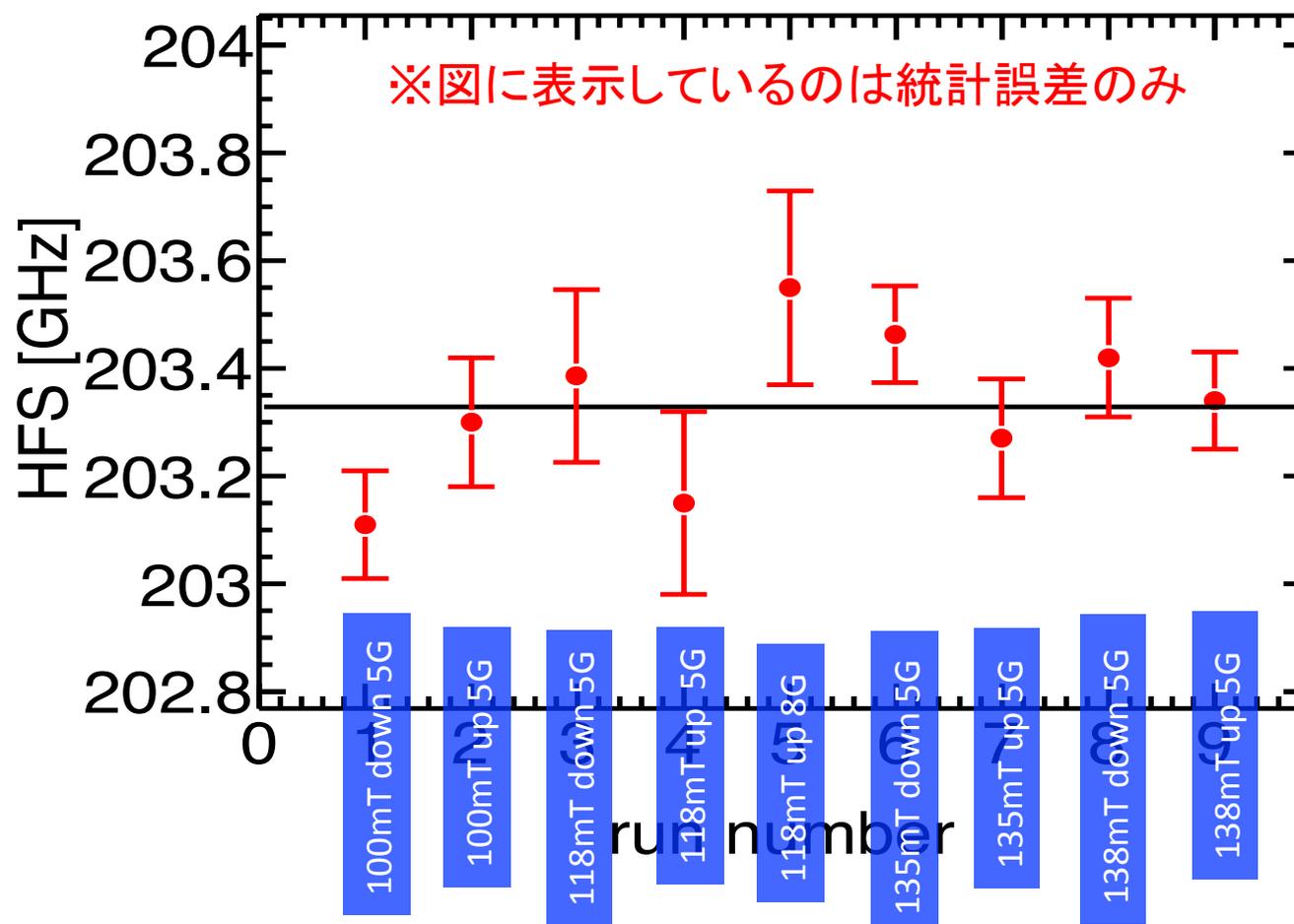
time [ns]

結果(1/2)

HFS=203.324 GHz

± 0.039 (stat.)(192ppm)

± 0.015 (sys.)(74ppm)



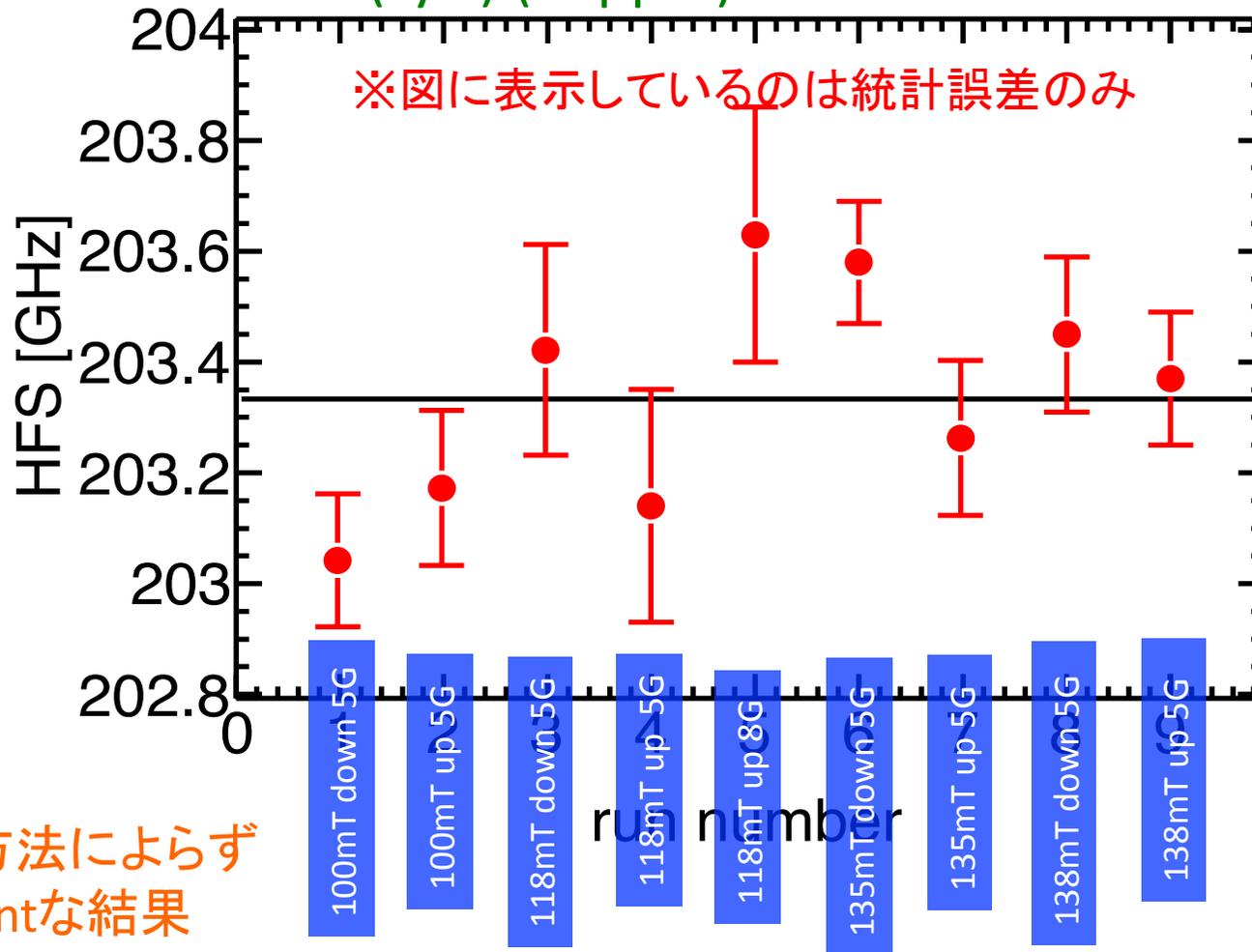
結果(2/2)

異なるフィット方法:引き算をせず, exp+減衰振動でフィット

HFS = 203.336 GHz

$\pm 0.048(\text{stat.})$ (236ppm)

$\pm 0.015(\text{sys.})$ (74ppm)



※フィット方法によらず
consistentな結果

系統誤差

	値
磁場の測定精度 最大の系統誤差	35 ppm
磁場の非一様性	10 ppm
TDCの精度	2 ppm以下
フィット方法による系統誤差	negligible
エアロジェルのシュタルク効果	-10 ppm

これらの2乗和の平方根で系統誤差を見積もった。
→ 0.015 GHz (74 ppm)

応用 : スピン緩和による振動の減衰

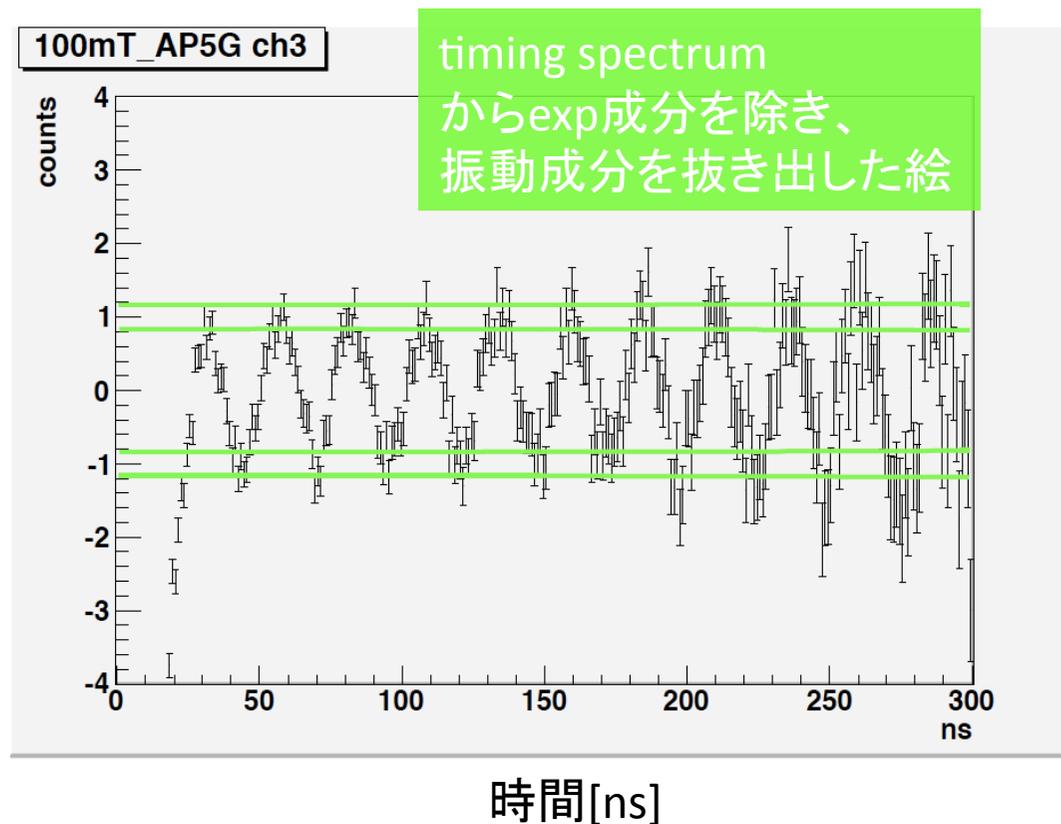
- 物質中の磁場によってPsのスピンの緩和 → 振動の減衰として見られる

$$f(t) = Ae^{-\gamma_1 t} + Be^{-\gamma_2 t} + Ce^{-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t} e^{-\frac{t}{T_{relax}}} \sin(\Omega t + \theta_0) + D$$

スピン緩和の効果

ミドリ線 : フィッティングの不定性
これから外れると有意に振動が減衰
→ 統計が足りず、今回の実験
からは何とも言えない。

酸素のように不対電子がある物質の
場合、実際にスピン緩和の効果は観
測されている(他のグループの研究)



まとめ

- 我々は量子振動を用いて、光源を用いずポジトロニウムの超微細構造を測定する実験を行った。

- 結果は

$203.324 \pm 0.039(\text{stat.}) \pm 0.015 (\text{sys.}) \text{ GHz}$

(192ppm) (74ppm)

- この値は、フィット方法、フィット範囲、エネルギーカット等を変えてもconsistent。
- 実験(Mills, Ritter, et al)の 203.388 65GHz とも 1σ 以内で一致しているが、エラーが大きいため理論(Kniehl et al., 2000)の 203.39169GHz とも一致している。
- 長時間測定(数年), 線源強度の向上(3倍), γ 線ディテクターの立体角向上(3倍), エアロジェル密度を変えてシュタルク効果を評価することで, 15ppmでHFSの問題が検証出来る
- 物質の効果によるスピン緩和は今回観測されなかった