

ポジトロニウム超微細構造の 量子振動を用いた測定

東大理、東大素セ^A、KEK^B、東大院総合文化^C

佐々木雄一、宮崎彬、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、
斎藤晴雄^C、池野正弘^B

第16回 ICEPPシンポジウム 2010.2.17
白馬村

ポジトロニウム超微細構造について

HFSの値は実験と理論で乖離している

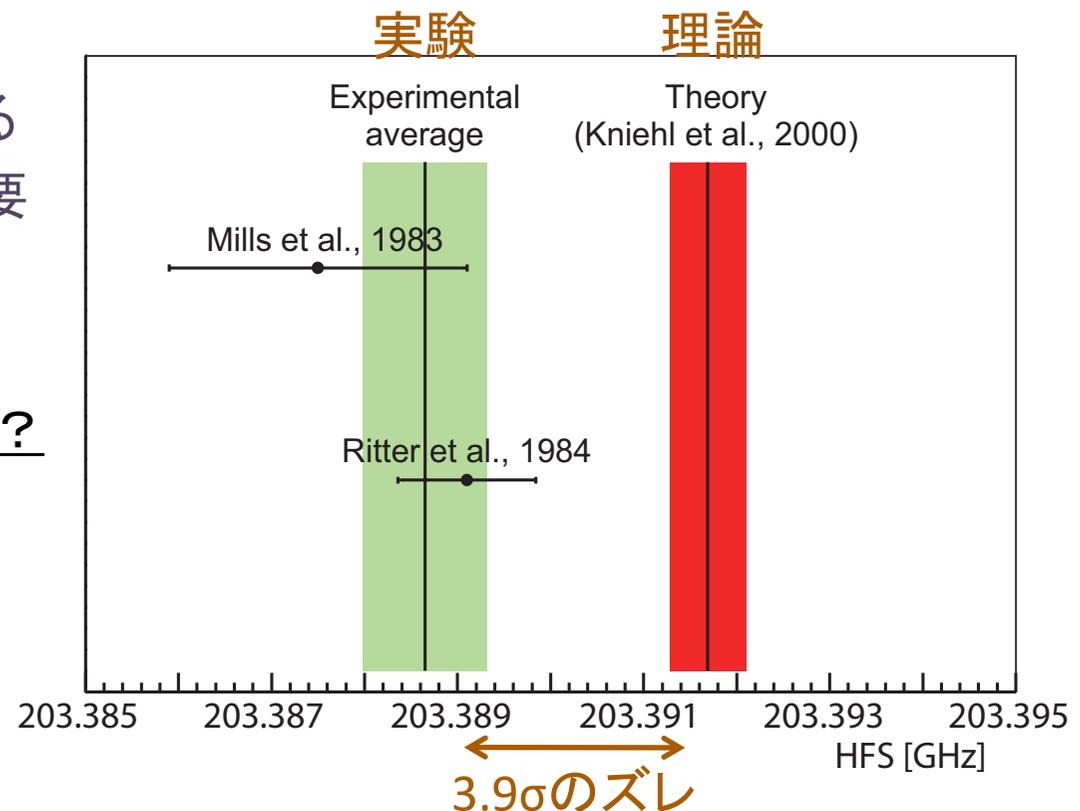
- 過去の実験の平均で3.3ppmの精度(Mills, Ritter, et al.)
- 理論はそれを後追いする形で、 $O(\alpha^3)$ の精度(Kniehl et al., 2000)

(実験) = 203.388 65(67) GHz (3.3ppm)
(理論) = 203.391 69(41) GHz (2.0ppm)

<HFSの値>

実験の平均と3.9 σ ずれている
->再度精密測定が必要

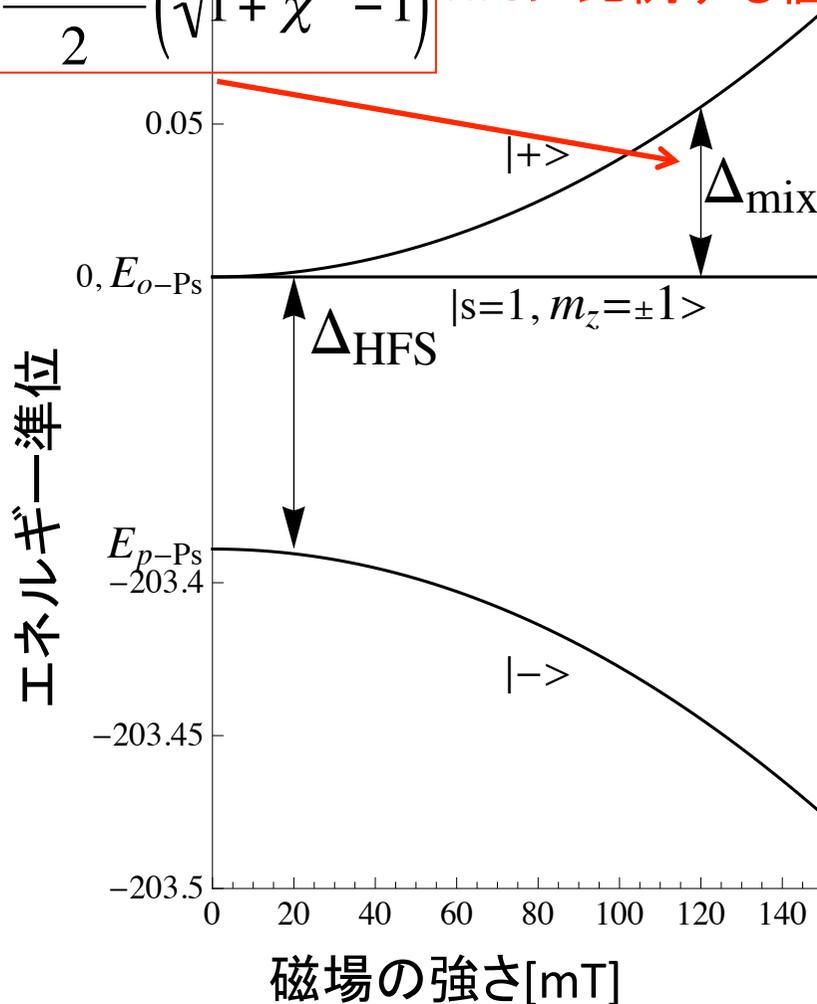
- 新しい物理の可能性？
- 系統誤差を見逃しただけ？



我々の測定の方針

<磁場が変わったときのPsエネルギー準位><過去の実験>

$$\frac{\Delta_{HFS}}{2} \left(\sqrt{1 + \chi^2} - 1 \right) \text{ HFSに比例する値}$$



203GHzの直接測定は不可能

→磁場中でゼーマン効果を見ていた

- ◆ 磁場の系統誤差
- ◆ 物質の効果によるズレ

<我々の実験>

◆ 0(100)ppmの結果を簡単に(光源を用いず)出せる新しい方法

→量子振動での測定

◆ 物質の効果を正しく入れる
+高精度の磁場

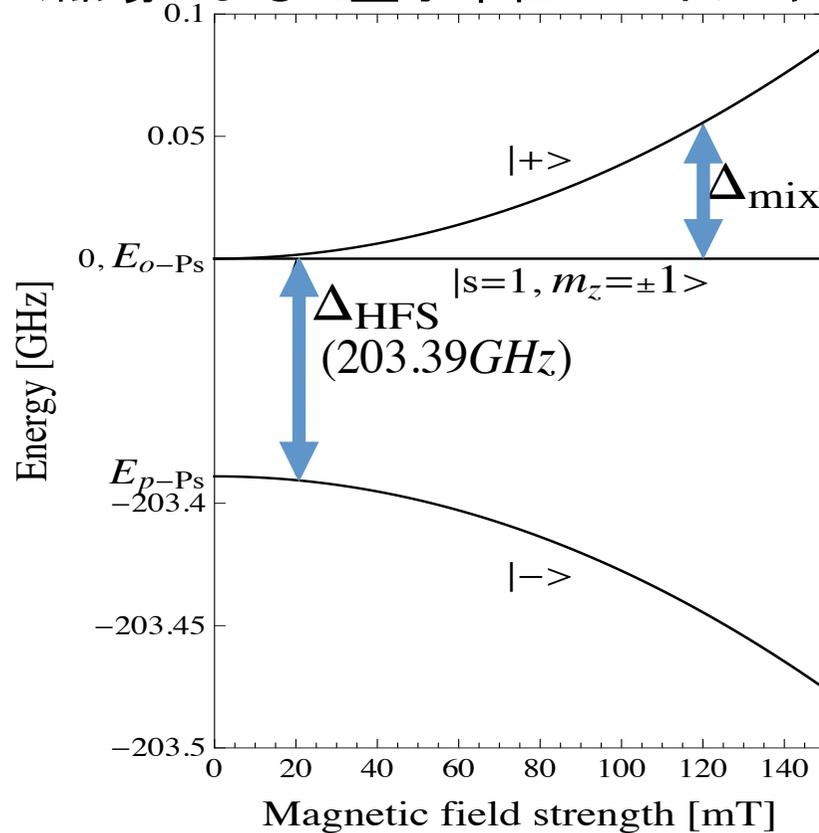
→3GHz測定

◆ 磁場を使わない直接測定
→203GHz測定

ポジトロニウム超微細構造の 量子振動による測定の概要

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＞



$$\Delta_{mix} = \frac{\Delta_{HFS}}{2} \left(\sqrt{1 + \chi^2} - 1 \right) \quad \chi \approx 0.275 B [T]$$

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する。

$$| + \rangle$$

$$\uparrow \downarrow$$

$$| s = 1, m_z = \pm 1 \rangle$$

周期26ns@100mT

$| + \rangle \propto | s = 1, m_z = 0 \rangle + \epsilon | s = 0, m_z = 0 \rangle$
 $| - \rangle \propto | s = 0, m_z = 0 \rangle + \epsilon | s = 1, m_z = 0 \rangle$
 (磁場によって少し混合する)

振動の周期 \rightarrow (HFS×磁場の関数)⁻¹
 \rightarrow 光源を用いず Ps HFS の測定

Ps-HFSの量子振動による測定の概要(2/3)

コヒーレントな重ね合わせ状態を作るためには、

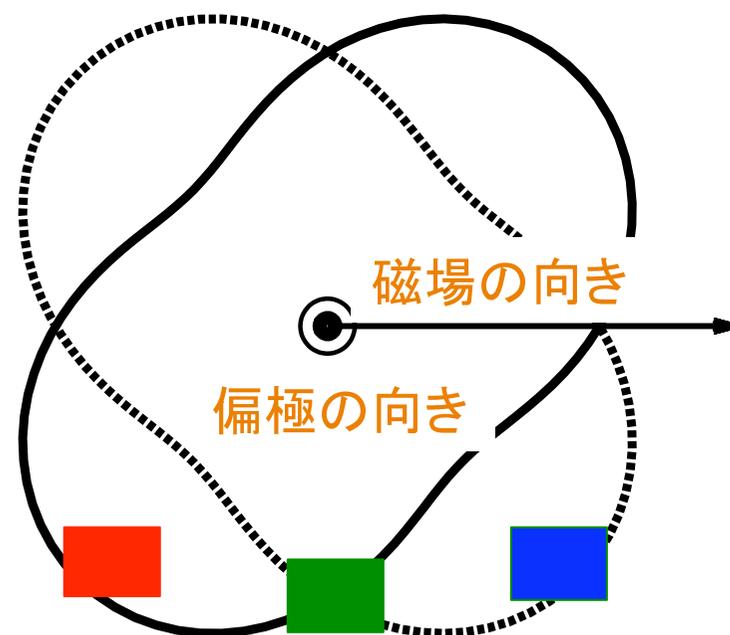
- 1、偏極している β^+ を使う
- 2、偏極の向きを磁場と直交にする

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線の飛ぶ向きを
半径の大きさを表した絵 >

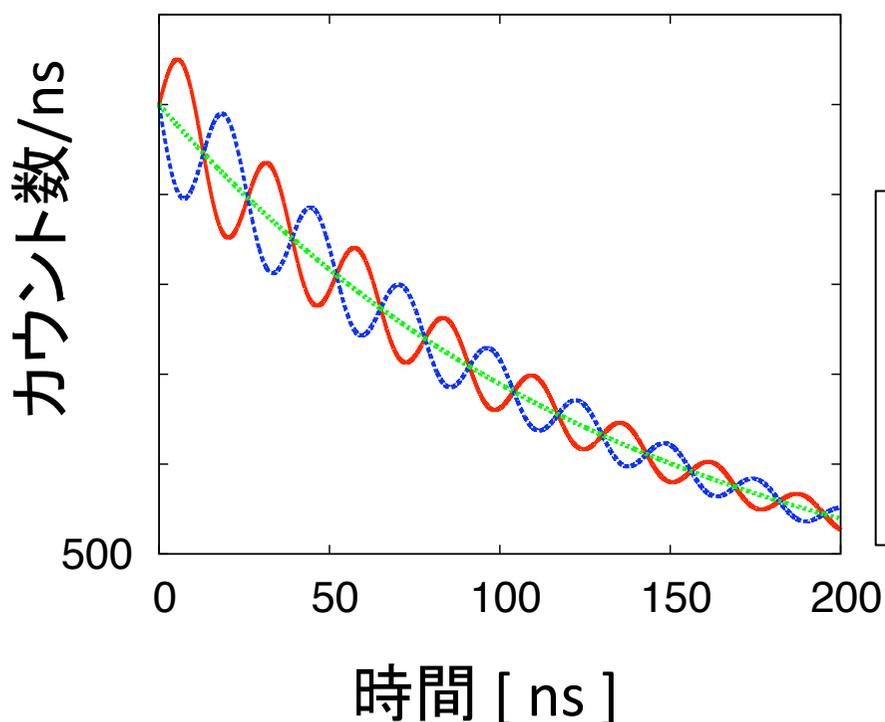


実線: $t=0$

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 線の数の変化(寿命曲線)>



<寿命曲線の式>

$$C_1 \exp(-\gamma_1 t) + C_2 \exp(-\gamma_2 t) + D \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(2\pi \Delta_{mix} t + \theta)$$

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

Δ_{mix} から HFS が求められる。

セットアップ

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

プラスチックシンチレーター:

500 μm 厚、

線源にぴったり貼り付け

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: アクリル

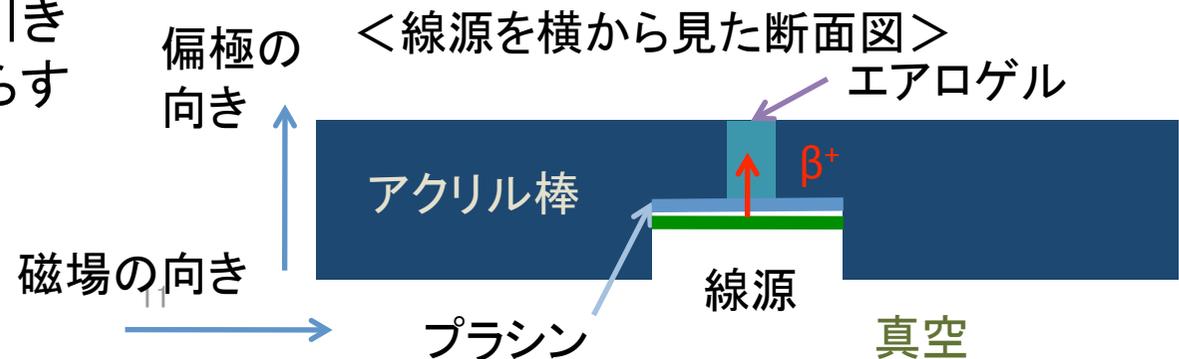
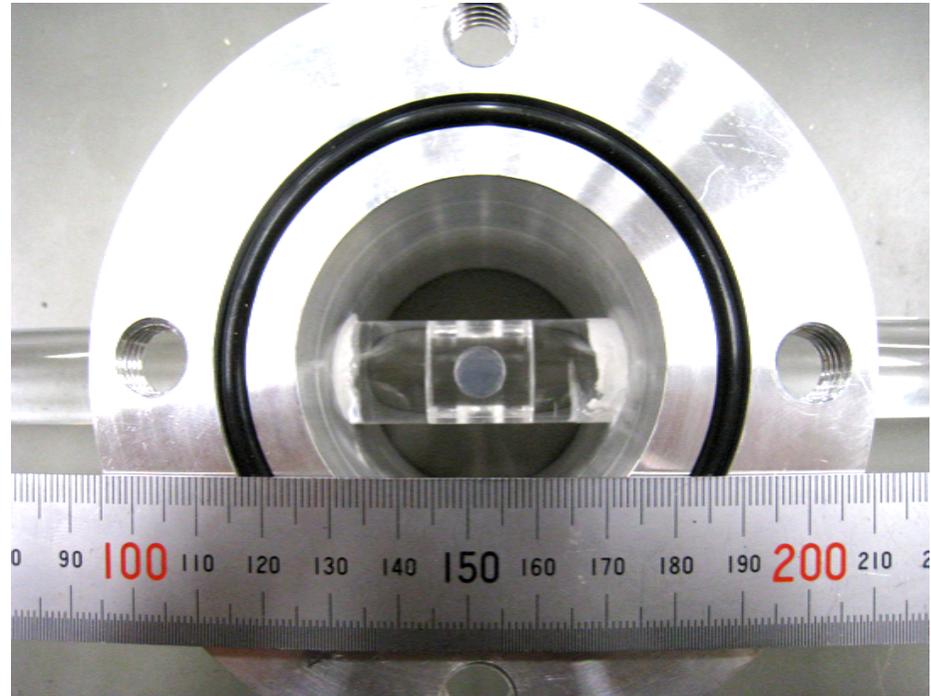
$\Phi 20\text{mm} \times 400\text{mm}$

真空容器:

ロータリーポンプで真空引き

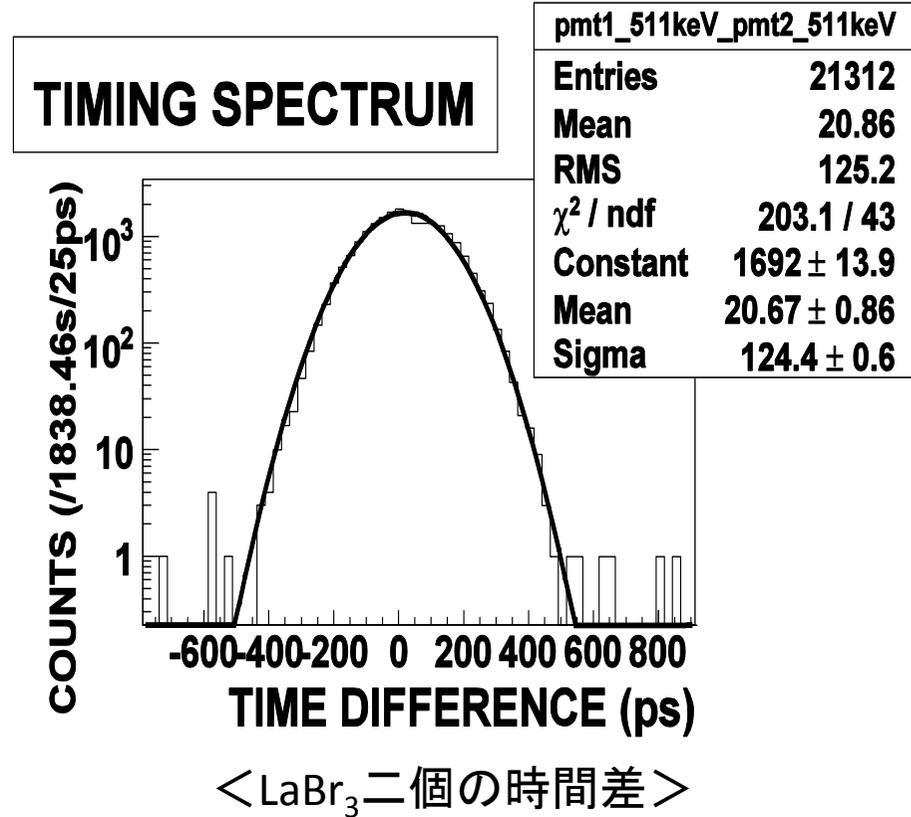
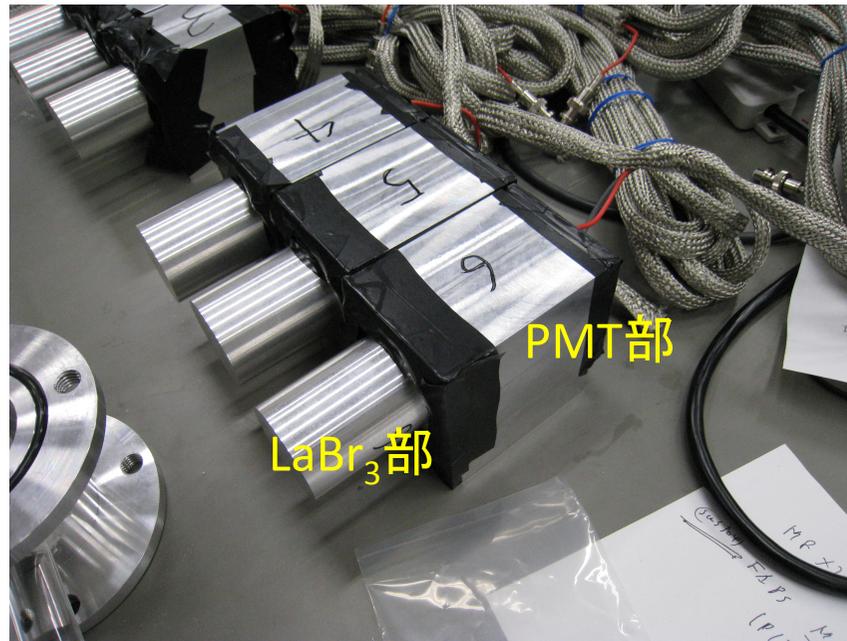
→ O_2 によるPick offを減らす

<真空容器に固定したアクリル棒>



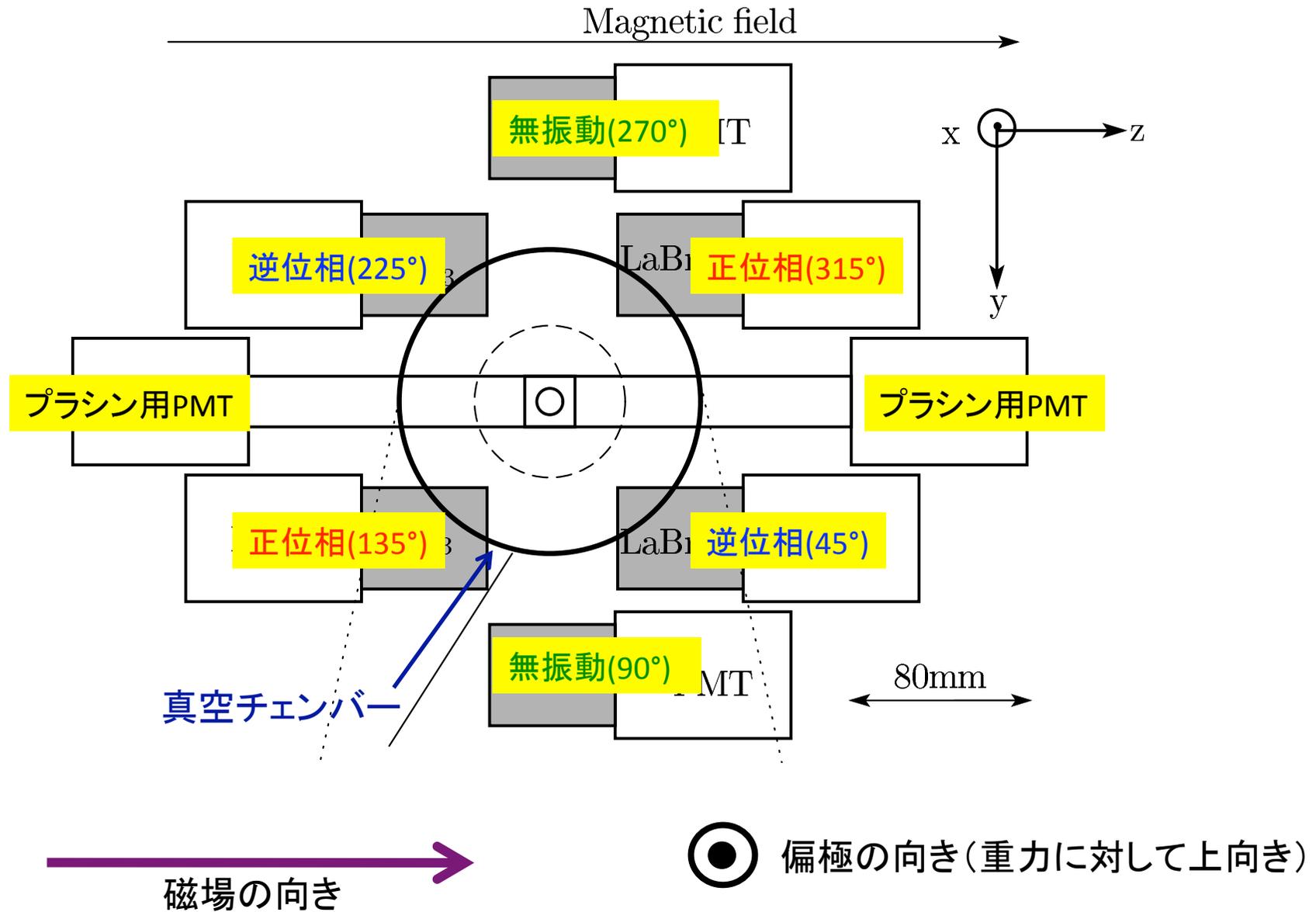
セットアップ(γ線検出器)

- LaBr₃(Ce)シンチレータ :
時間分解能(FWHM:210ps)、
エネルギー分解能(FWHM:4%)
@511keV , 100mT
- PMT : すべてfine mesh(H6614)、
磁場と平行に配置
- PMTホルダ : アルミで製作

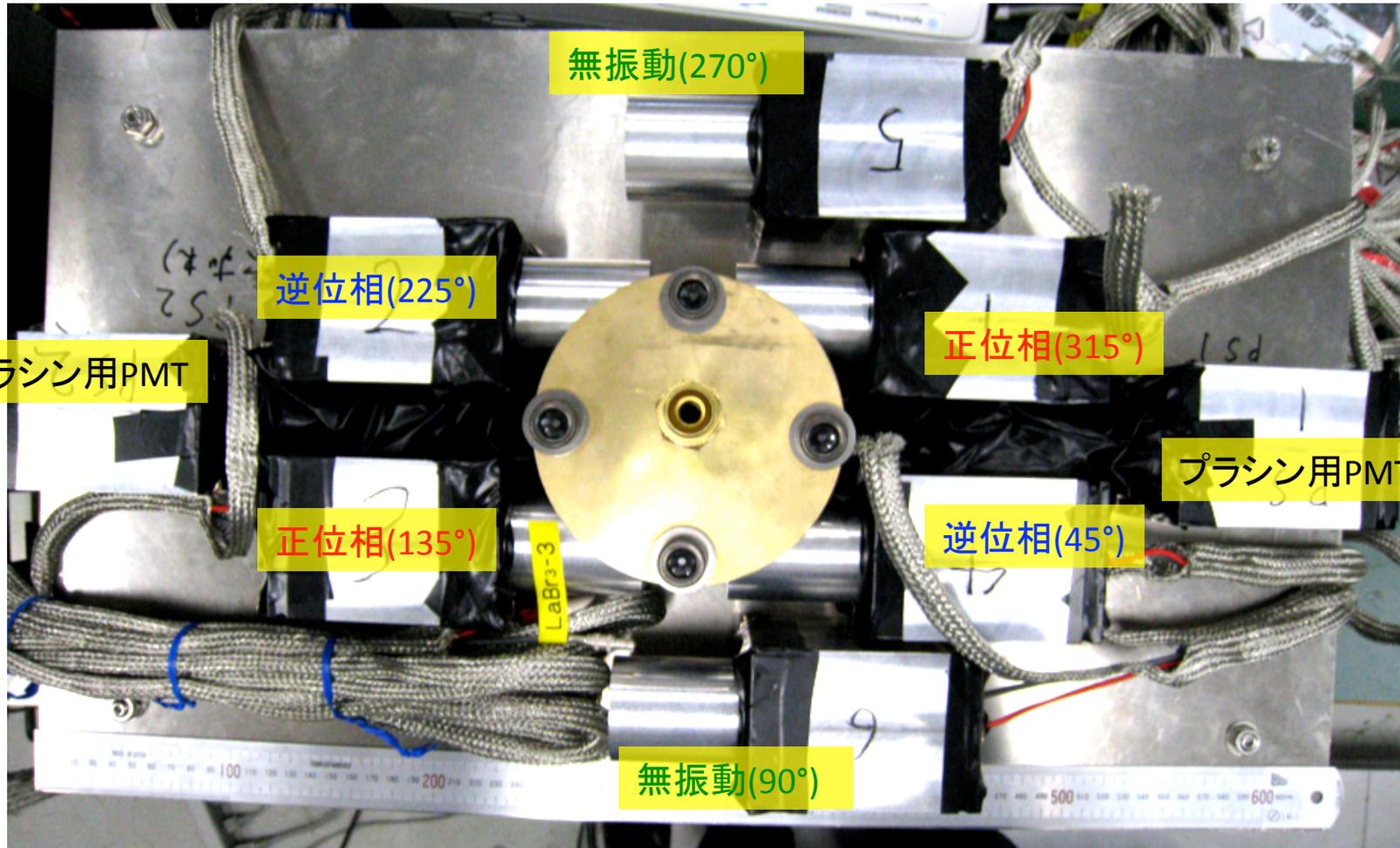


<製作したPMTホルダ>

セットアップ(γ線検出器)



セットアップ(γ 線検出器)写真

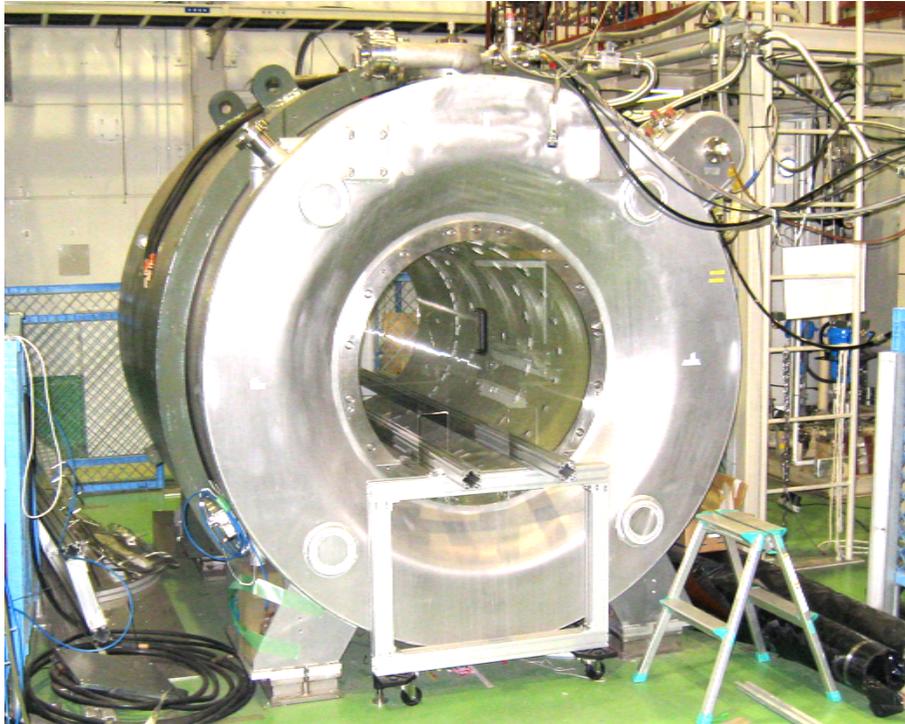


→ 磁場の向き

◎ 偏極の向き(重力に対して上向き)

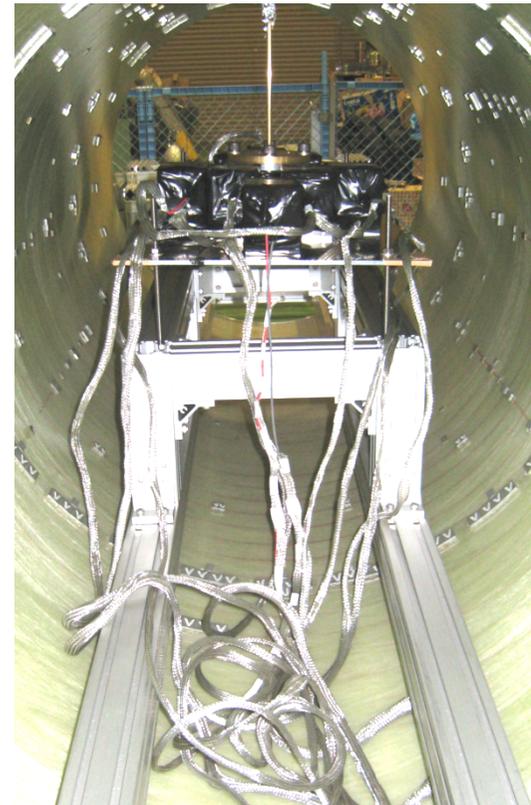
セットアップ(磁石)

<大型超伝導磁石>



磁石 : KEKの大型超伝導磁石

<PMT等の磁石への固定の様子>



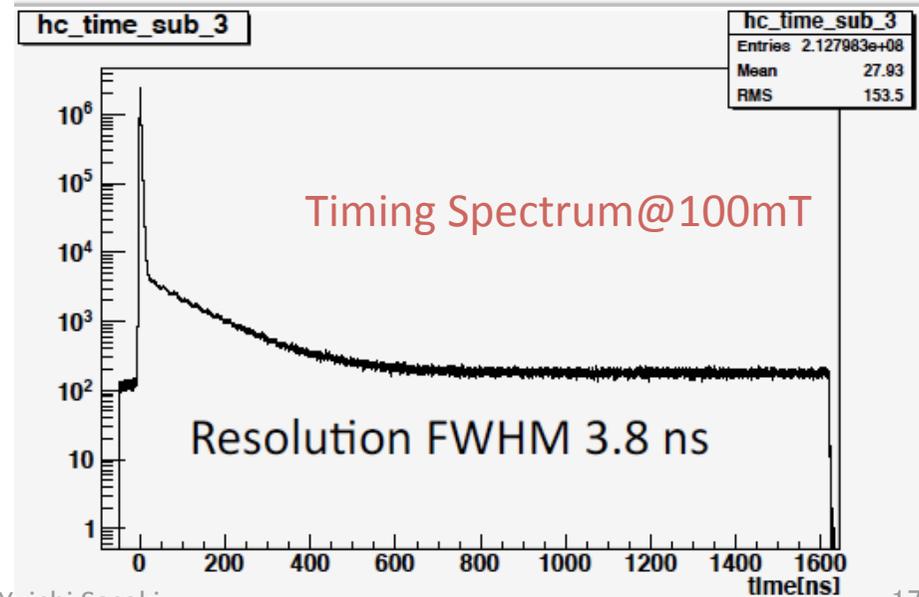
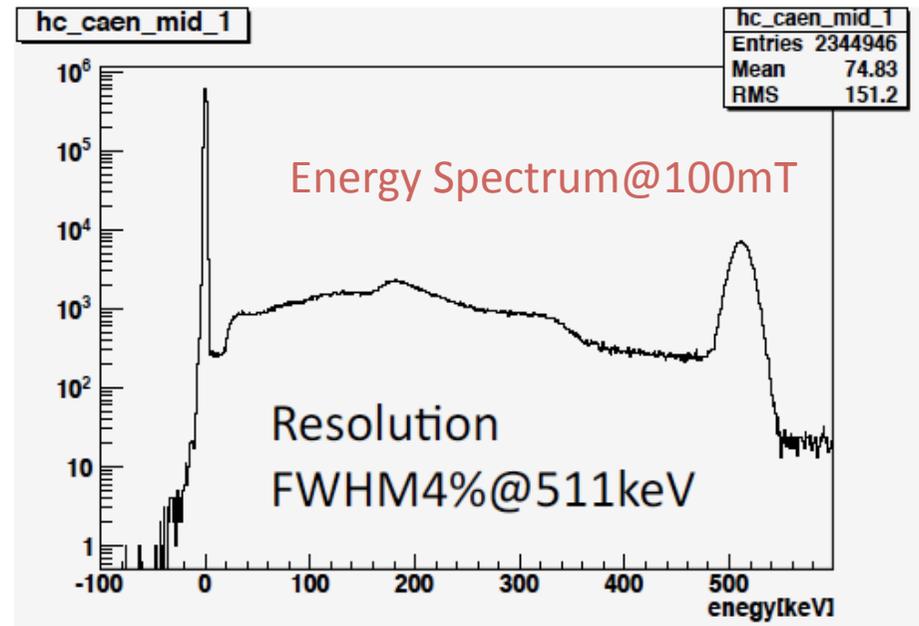
磁場の均一性 : $\pm 5\text{mm}$ の範囲で20ppm

磁場の測定 : NMRを用いた磁力計、
absoluteな精度は70ppm程度

解析

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

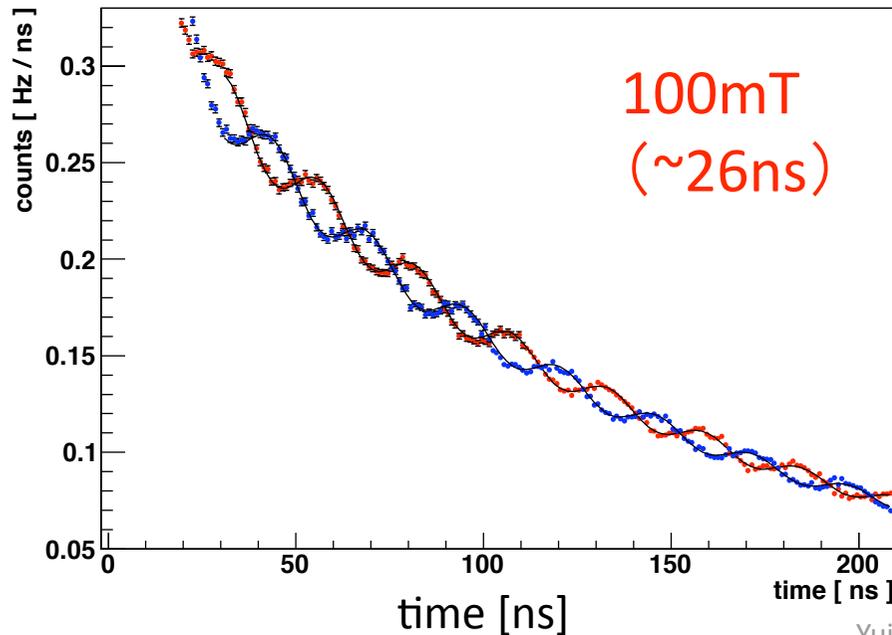
- 6個のデータを同時に使ってフィットする
- フィット関数は、

$$f(t) = Ae^{-\gamma_1 t} + Be^{-\gamma_2 t} + Ce^{-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t} \sin(2\pi\Delta_{mix} t + \theta) + D$$

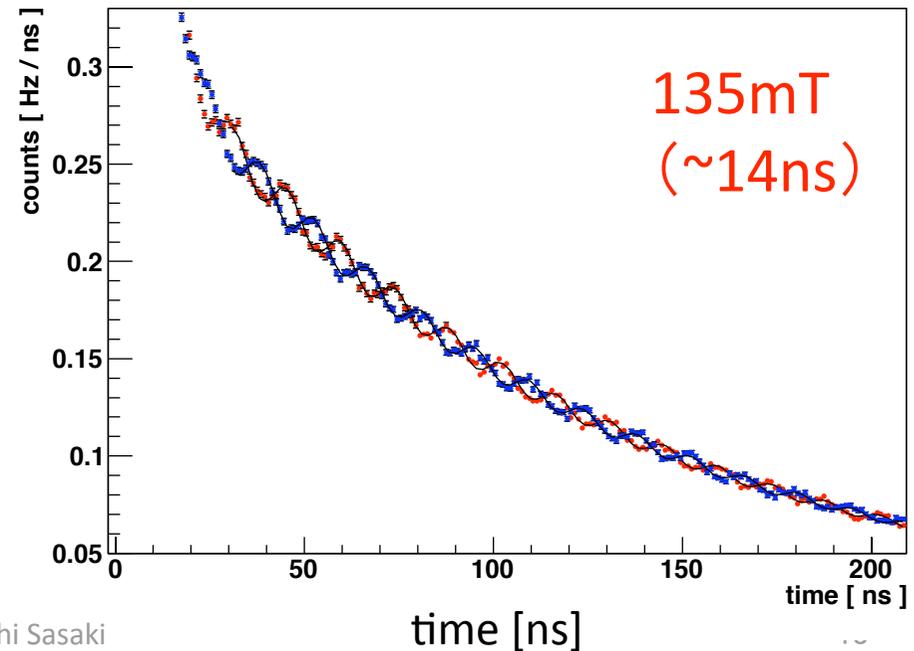
(γ_1 、 γ_2 、 Δ_{mix} は共通、それ以外は各検出器ごと)

- フィット範囲は30ns ~ 1430ns (プロンプトのテールが十分落ち着いた所)

<寿命曲線の拡大図>



Yuichi Sasaki



..

フィットの一例@100mT,偏極上向き,検出器#1

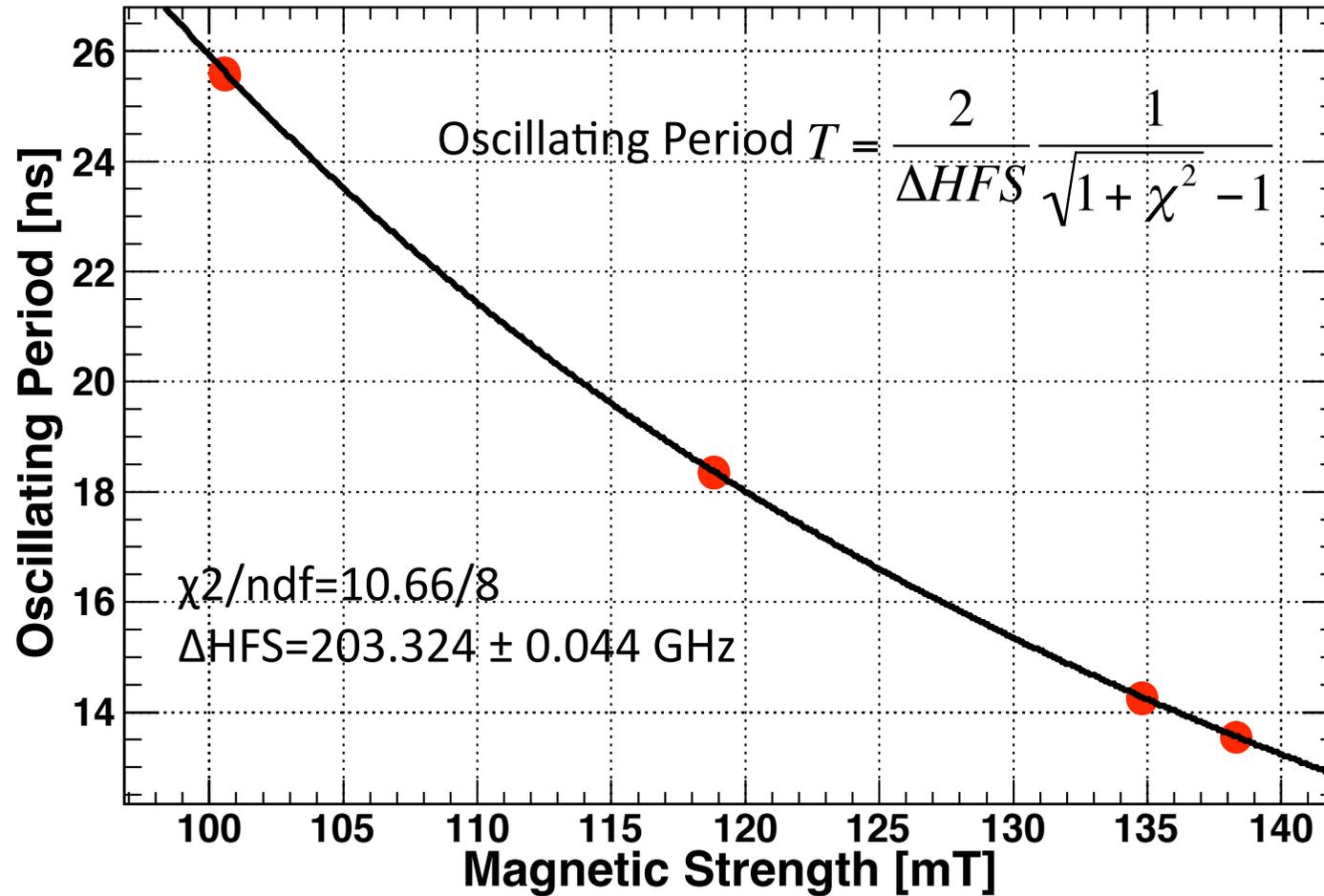
パラメーター	値	意味
$A_{\#1}$	5900 ± 130 など	寿命 γ_1 成分のexpの定数
$B_{\#1}$	3600 ± 140 など	寿命 γ_2 成分のexpの定数
$C_{\#1}$	537 ± 15 など	振動成分のexpの定数
$D_{\#1}$	511.3 ± 0.8 など	アクシデンタルの定数
γ_1	0.00736 ± 0.00003	o-Psの崩壊率[ns ⁻¹]
γ_2	0.01038 ± 0.00009	磁気クエンチしたo-Psの崩壊率[ns ⁻¹]
$2\pi\Delta_{mix}$	0.24565 ± 0.00016	振動成分の角振動数[rad/ns]
$\theta_{\#1}$	1.27 ± 0.03 など	振動成分の初期位相[rad]
χ^2 / ndf	1.02	Reduced chi square (ndf = 1400)

※ χ^2/ndf は最悪でも1.05以下。

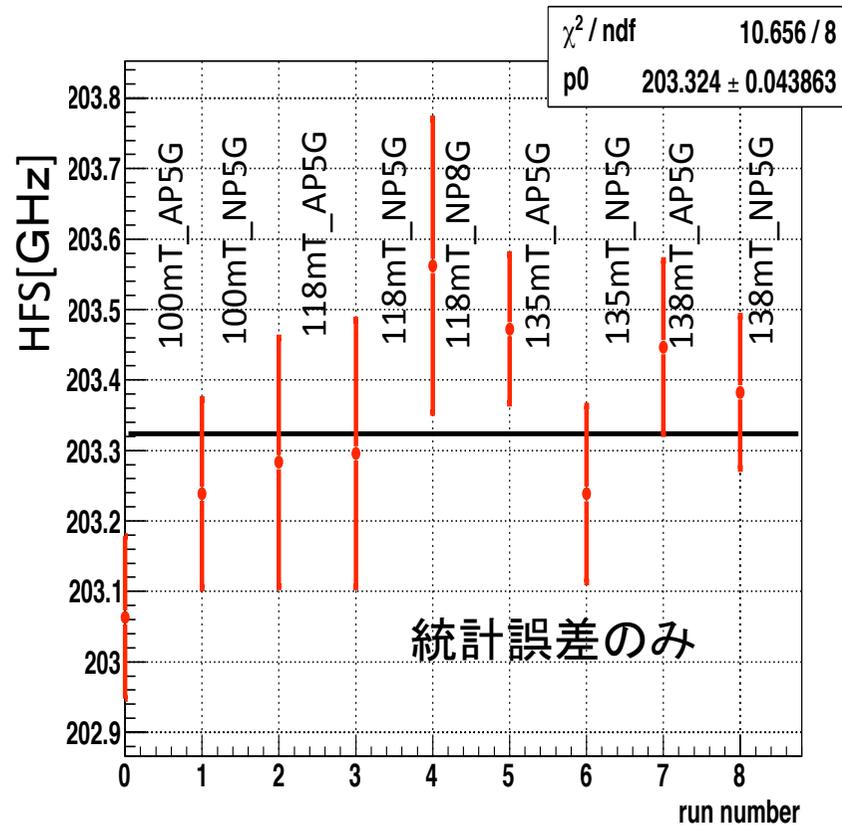
全29パラメータ。A,B,C,D, θ は個々の検出器について値があるので、これは一例。

磁場を変えたときの振動周期

赤点: 測定結果 (誤差: 各600ppm程度)
黒線: フィット結果



結果



<各RUNでのHFS値>

すべてのRunの値を平均して、

HFS = 203.324 GHz
± 0.044(stat.) (215ppm)
± 0.028(sys.) (140ppm)

磁力計のキャリブレーションの信頼性
70ppm(HFSには二乗で効く)が飛び
抜けて大きい

→これが系統誤差

まとめ

- 量子振動を用いて、Ps HFSを測定する実験を行った。

- 結果は、

$$203.324 \pm 0.044(\text{stat.}) \pm 0.028 (\text{sys.})\text{GHz}$$

$$(215\text{ppm}) \quad (140\text{ppm})$$

エラーが大きいのので、問題になっている理論と実験との値の違いに対して何かいうことは出来ないが、それらとも1sigma程度で合っている。

- HFS測定の第一弾としてo(100)ppmの結果を出すことが出来た。

- o(1)ppmを目指す精密測定については、次の3GHz測定を参照。