

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、東大院総合文化^B、KEK^C

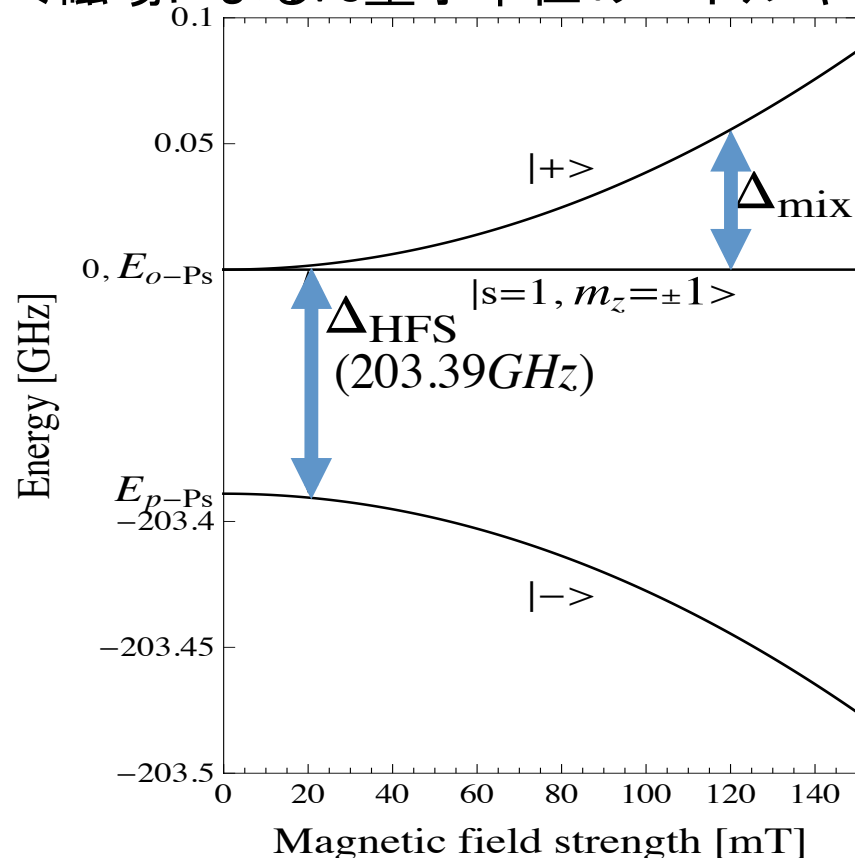
佐々木雄一、宮崎彬、石田明、
末原大幹^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、
小林富雄^A、斎藤晴雄^B、池野正弘^C、
田中賢一^C、山本明^C

2009 京都大学原子炉実験所専門研究会
「陽電子科学とその理工学への応用」
京都大学原子炉実験所

測定法の概要

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。

$$\begin{array}{c} | + > \\ \uparrow \downarrow \\ | s = 1, m_z = \pm 1 > \end{array}$$

周期26ns@100mT

$| + > \propto | s = 1, m_z = 0 > + \epsilon | s = 0, m_z = 0 >$
 $| - > \propto | s = 0, m_z = 0 > + \epsilon | s = 1, m_z = 0 >$
 (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、

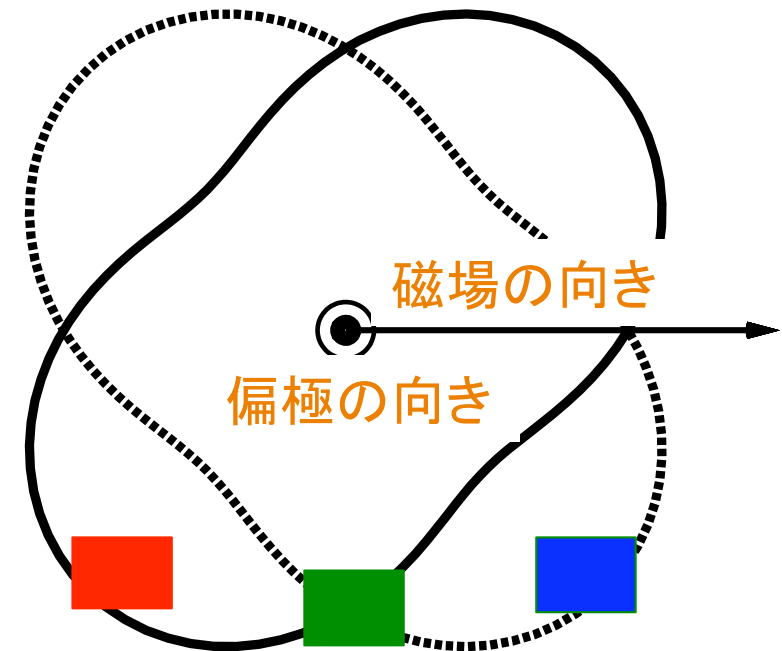
- 1、偏極している β^+ を使う
- 2、偏極の向きを磁場と直交にする

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、
 $\phi=135^\circ, 315^\circ$ (正位相)
 $\phi=45^\circ, 225^\circ$ (逆位相)
の間を交互に入れ替わる

＜ γ 線の飛ぶ向きを
半径の大きさに表した絵＞

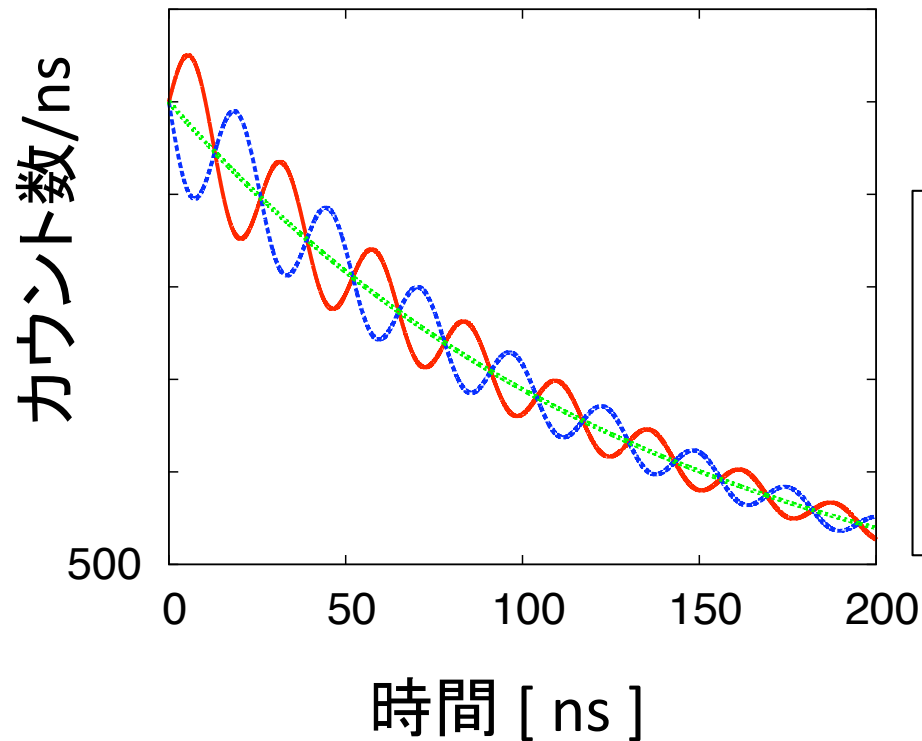


実線: $t=0$

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＞

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

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

Δ_{mix} から HFS が求められる。

セッティング

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

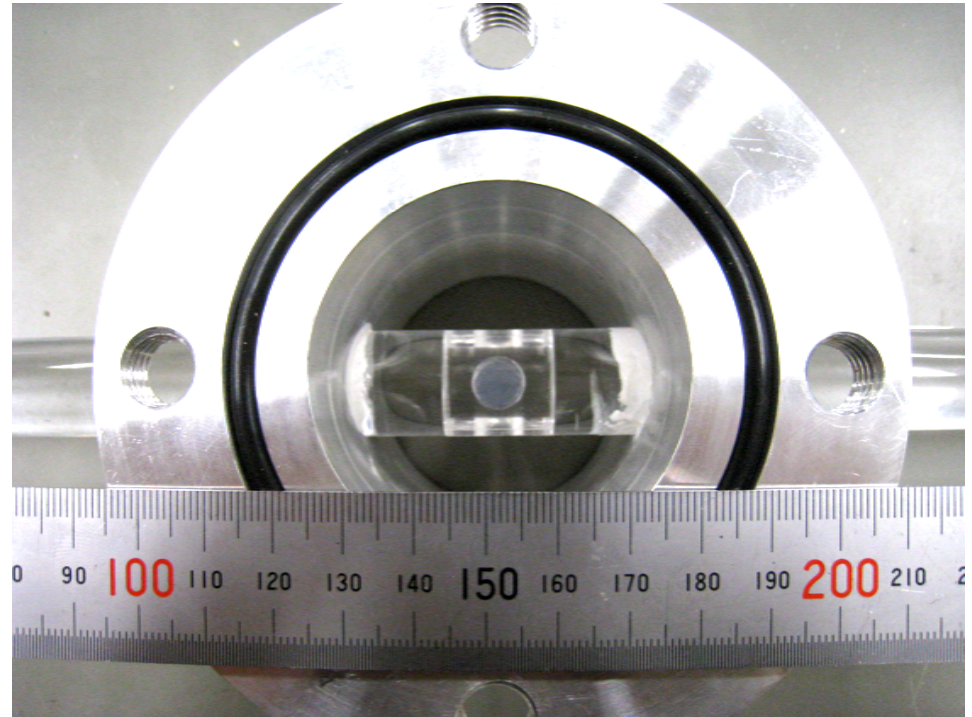
$\Phi 20\text{mm} \times 400\text{mm}$

真空容器:

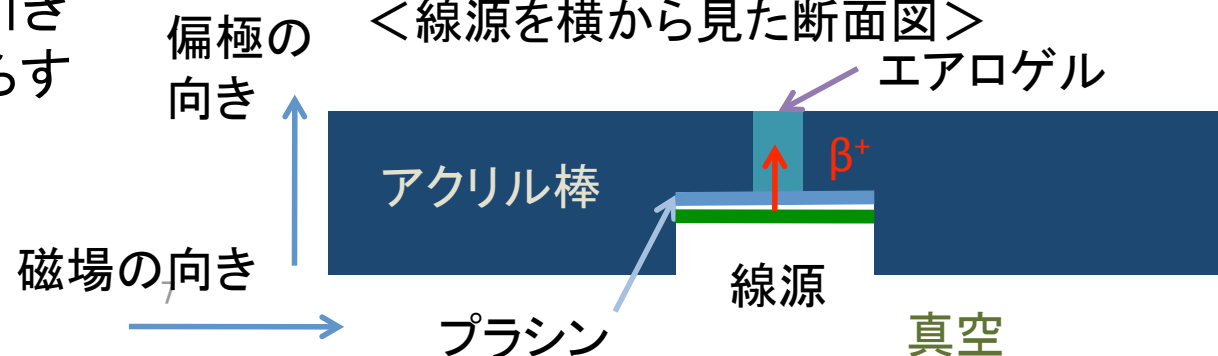
ロータリーポンプで真空引き

→ 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＞

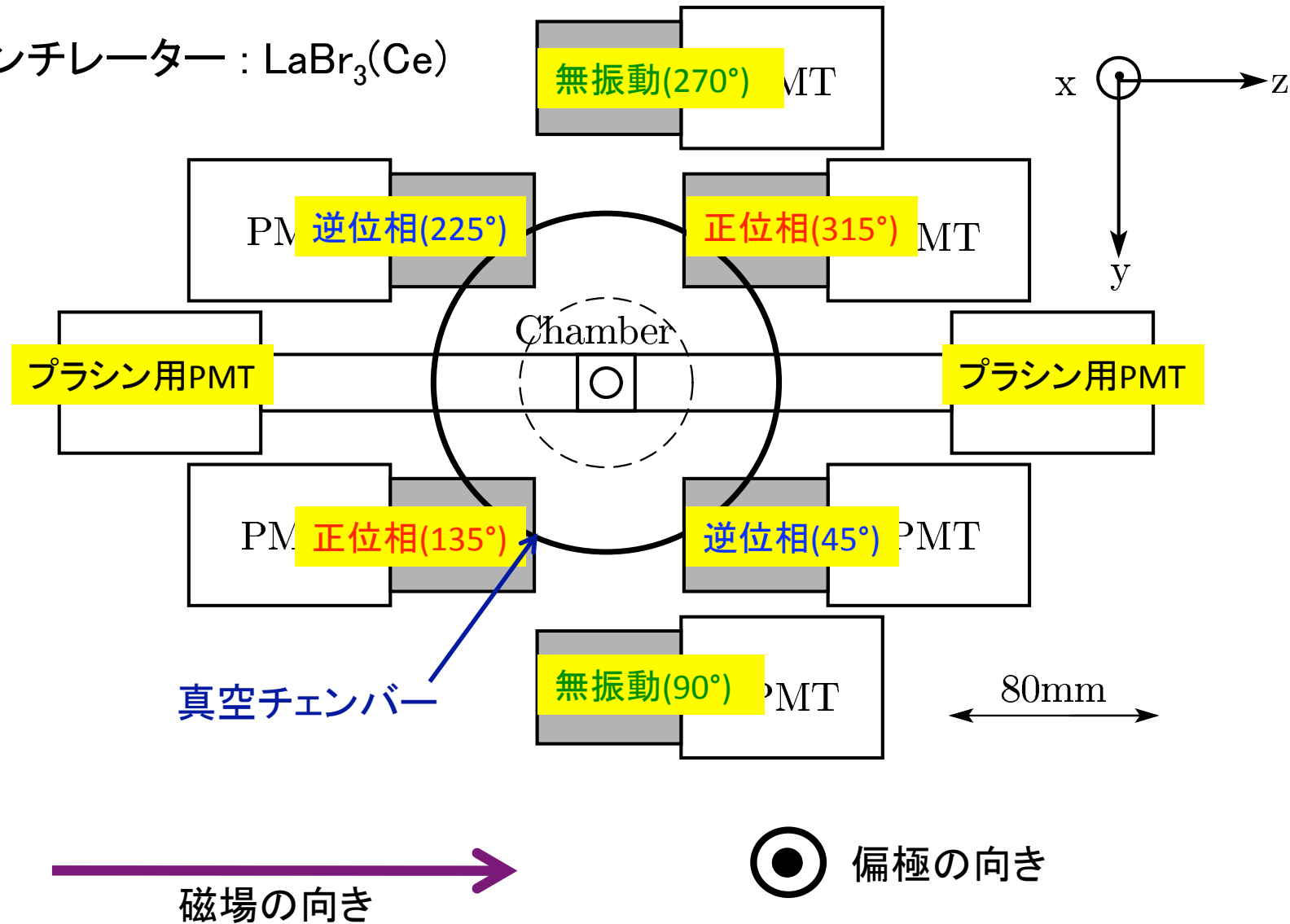


＜線源を横から見た断面図＞

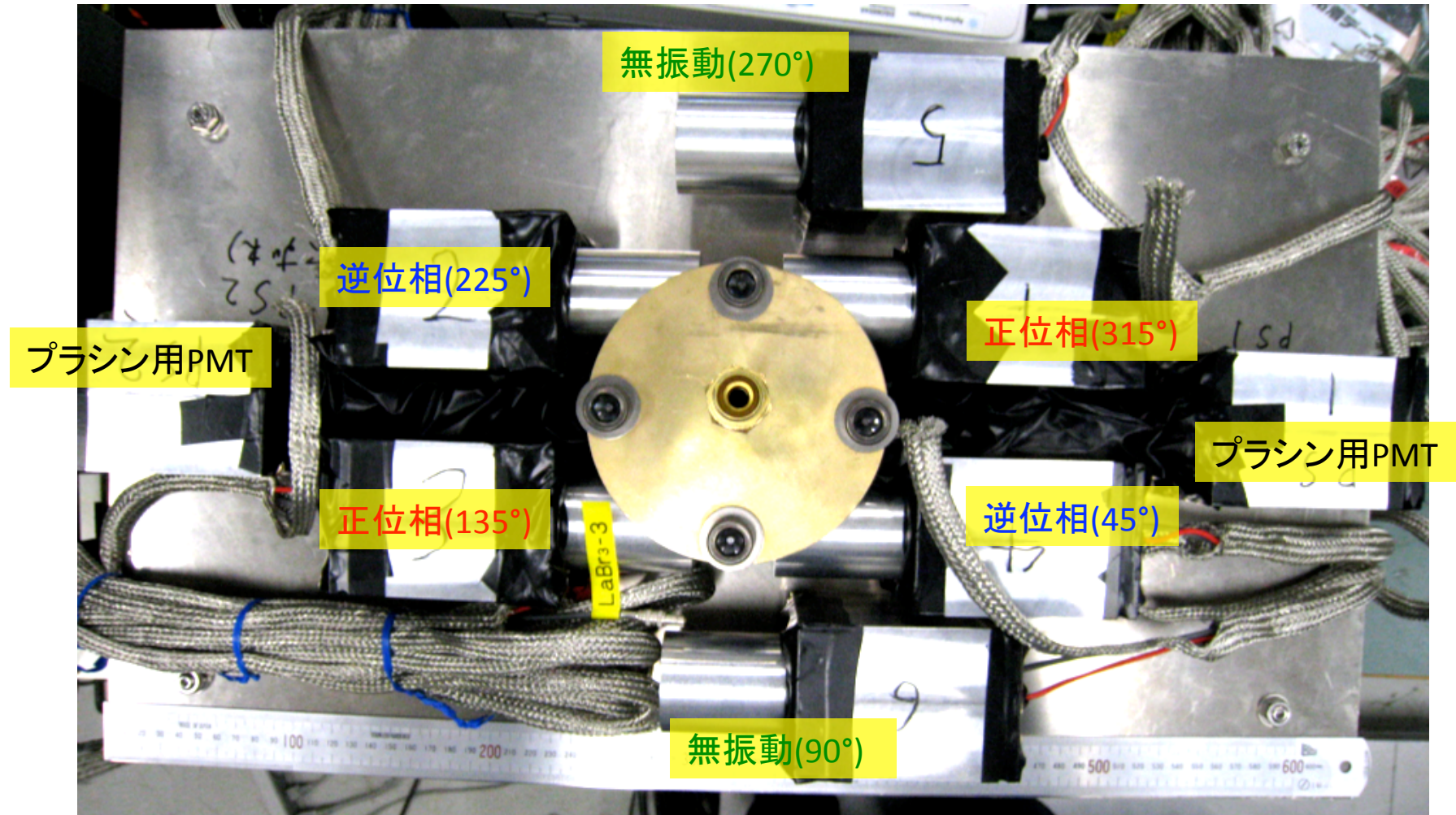


セットアップ(γ線検出器)

シンチレーター : $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$



セットアップ(γ 線検出器)写真



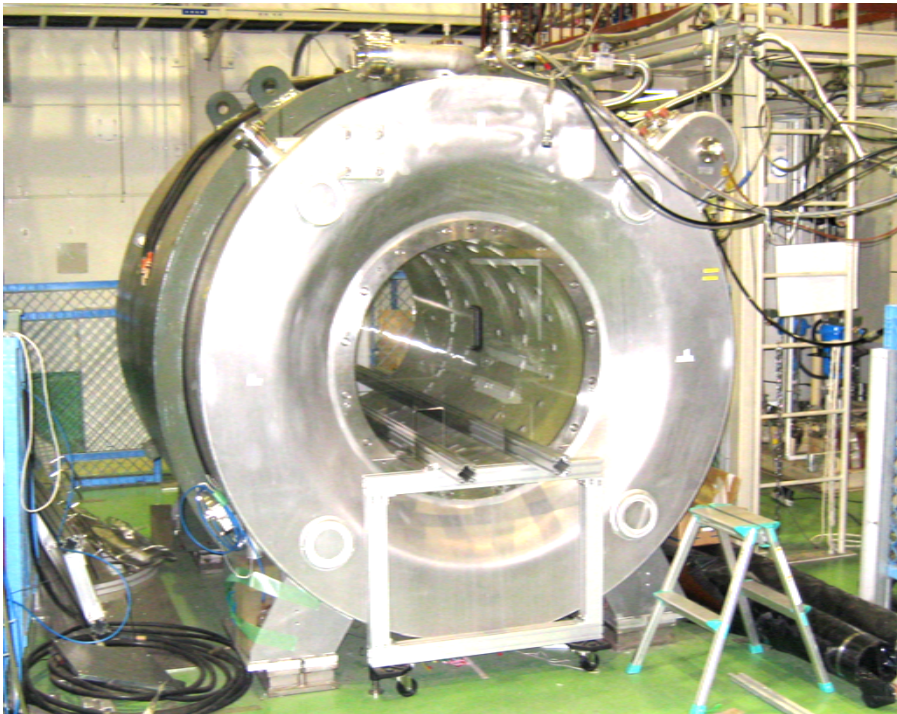
→
磁場の向き

◎ 偏極の向き

一様磁場を作る磁石と8GHzダイレクトクロックTDC

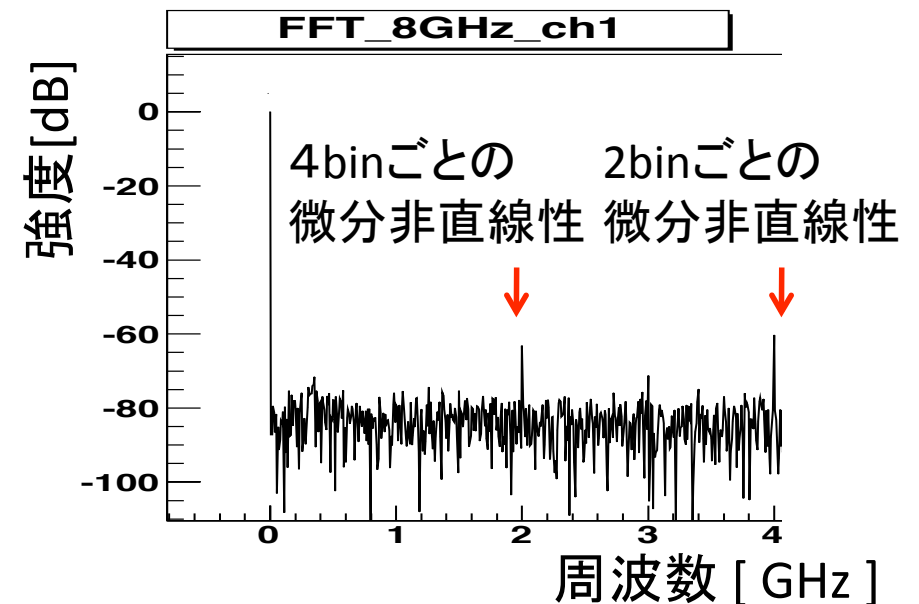
一様磁場

- 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を新規に開発
- 最高8GHz動作(今回は5GHzで使用)
- 良い微分・積分直線性

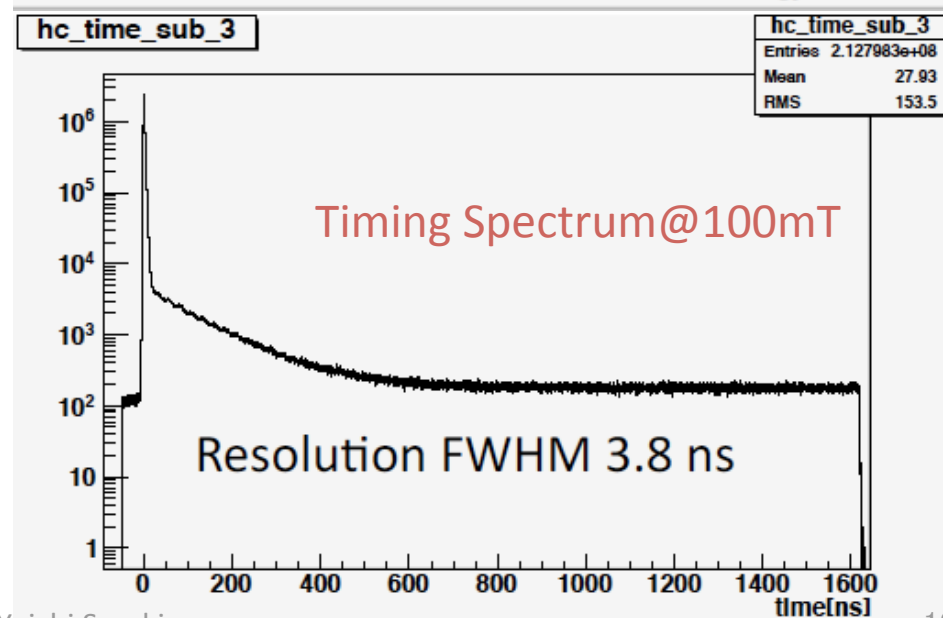
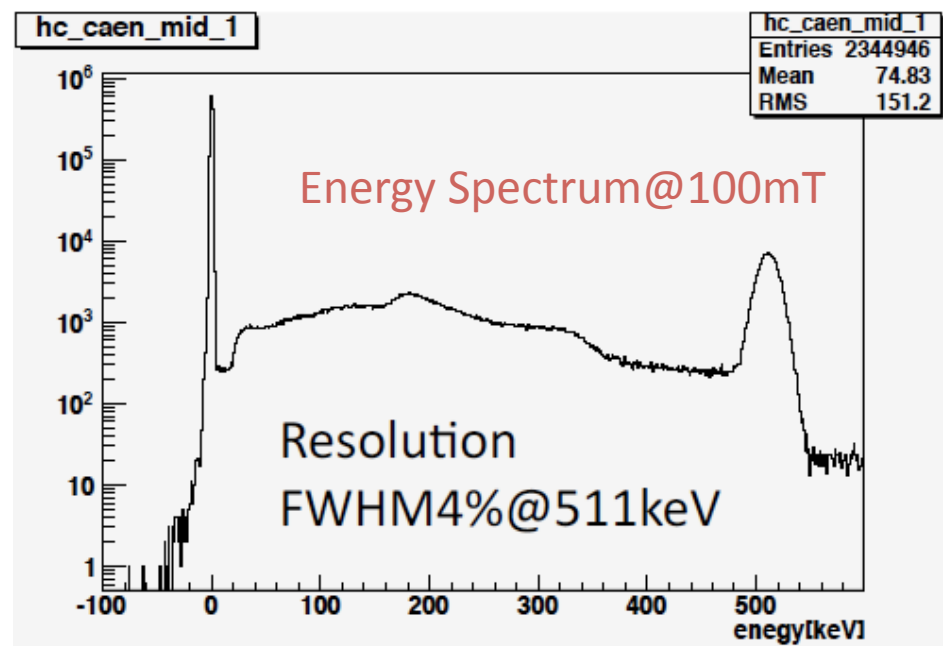


<スペクトル(8GHz時)のフーリエ変換>

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

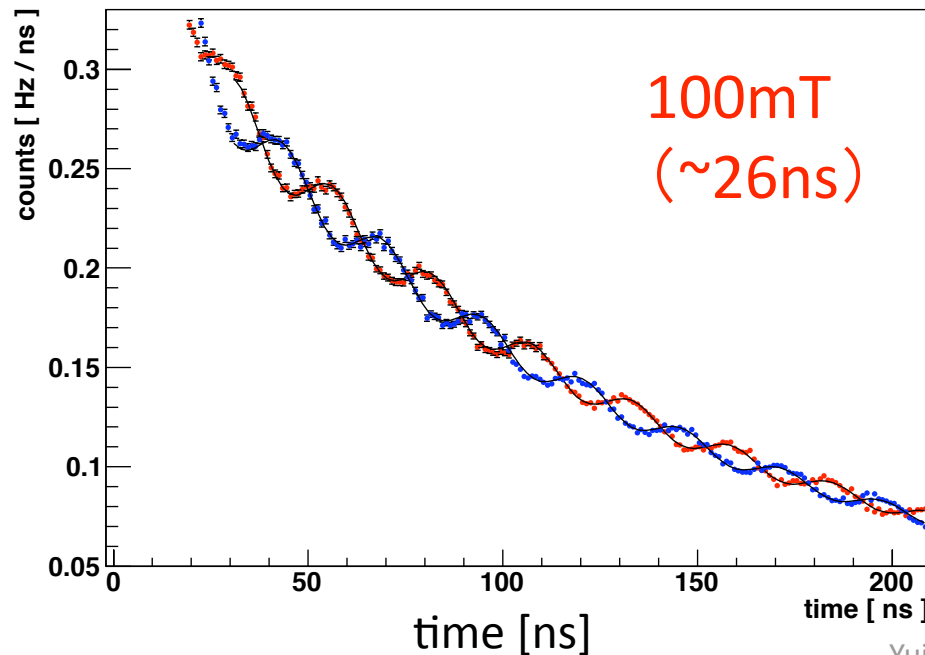
- 6個のデータを同時に使ってフィットする
- フィット関数は、

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

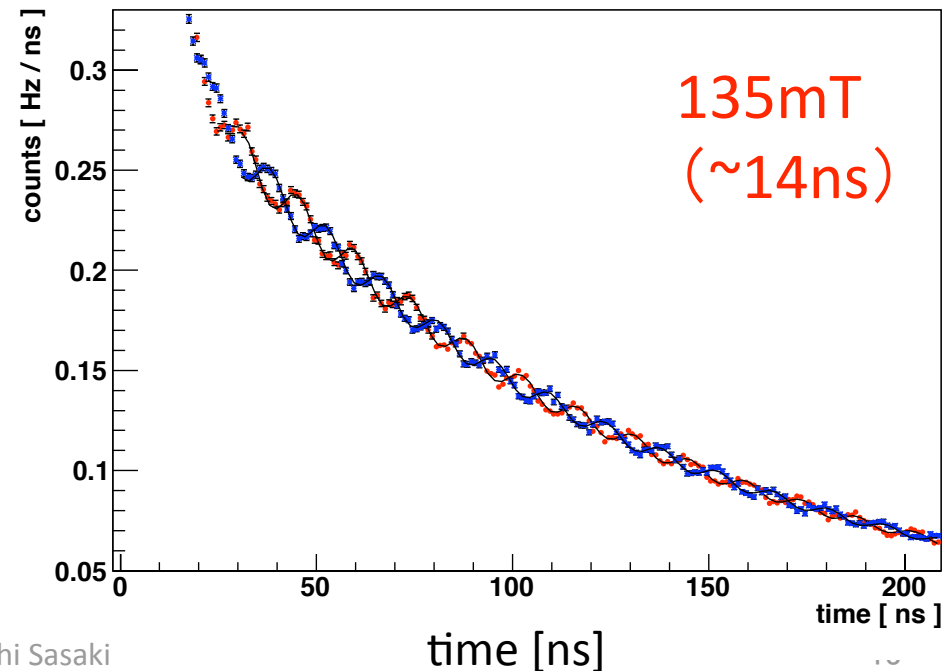
(γ_1 、 γ_2 、 Δ_{mix} は共通、それ以外は各検出器ごと)

- 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



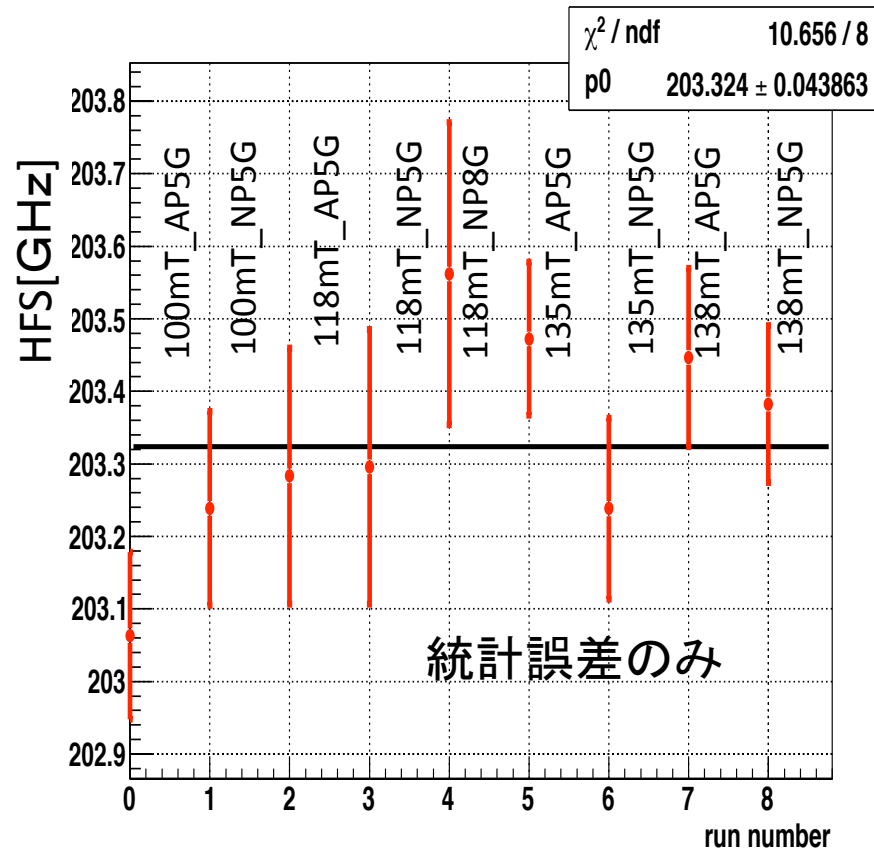
フィットの一例@100mT,偏極上向き,検出器#1

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)

フィット範囲を少しずらしてもconsistent ※ χ^2/ndf は最悪でも1.05以下。

A,B,C,D, θ は個々の検出器について値があるので、ここでは一例を示している

結果



<各RUNでのHFS値>

すべてのRunの値を平均して、

HFS = 203.324 GHz
 $\pm 0.044(\text{stat.})$ (215ppm)
 $\pm 0.028(\text{sys.})$ (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

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

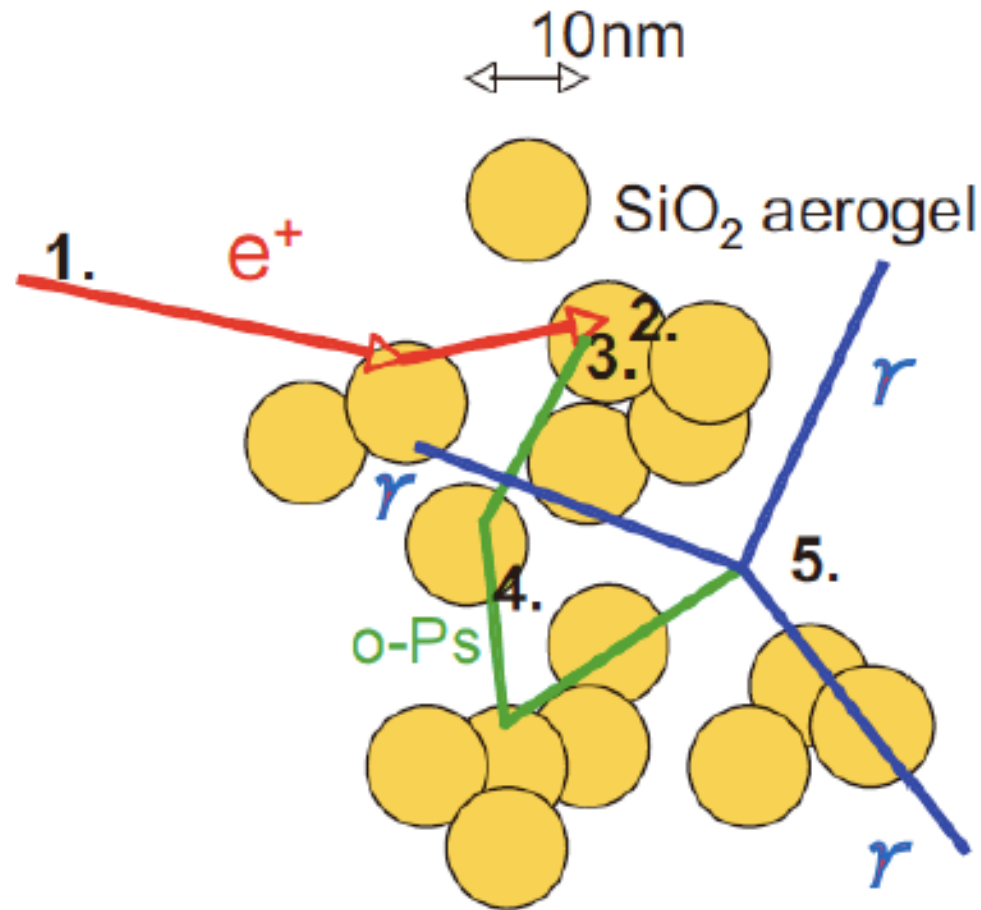
$$(215\text{ppm}) \quad (140\text{ppm})$$

- この値は、フィット範囲、エネルギーカット等を変えても consistent。

- 光源を用いない同様の方法でHFSを測定した、S.Fanの結果を約50倍improveした。

バックアップ

物質の効果—熱化過程とは



- Ps生成時運動エネルギー 1 eV
→室温の運動エネルギー 1/30 eV
になる過程

- 物質の密度が小さい場合
→単位時間当たりの衝突回数
が減って遅い熱化
→高いpick-off rateが長い時間続く

pick-off rateは物質と時間の関数！
(この関数を別途実験で求めてやる
ことで補正が可能)

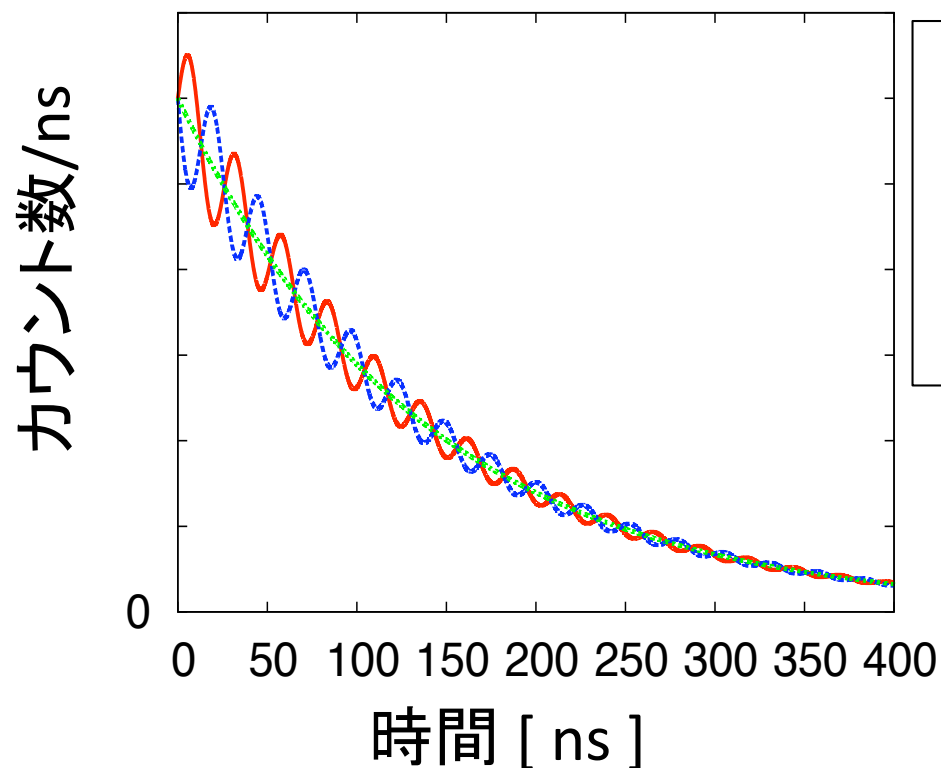
1980年代のo-Ps寿命問題の原因となった過程

今回の3GHz実験でも原因となりうる

(おおざっぱな見積もりでは、補正は理論との差を減らす向きに働く)

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 γ の時間変化(寿命曲線)＞ @100mT (26ns周期)



$$C_1 \exp(-\gamma_1 t) + C_2 \exp(-\gamma_2 t) + D \exp(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t) \sin(\Omega t + \theta_0)$$

$$\gamma_1 = \gamma_t + \frac{\chi^2}{4} \gamma_s : \text{o-Psのdecay rate} + \text{磁気クエンチ}$$

$$\gamma_2 = \gamma_t : \text{o-Psのdecay rate}$$

$$\gamma_t = \gamma_{\text{o-Ps}} + \gamma_{\text{pick-off}} : \text{o-Psのdecay rate} + \text{pick off}$$

$$\gamma_s = \gamma_{\text{p-Ps}} : \text{p-Psのdecay rate}$$

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

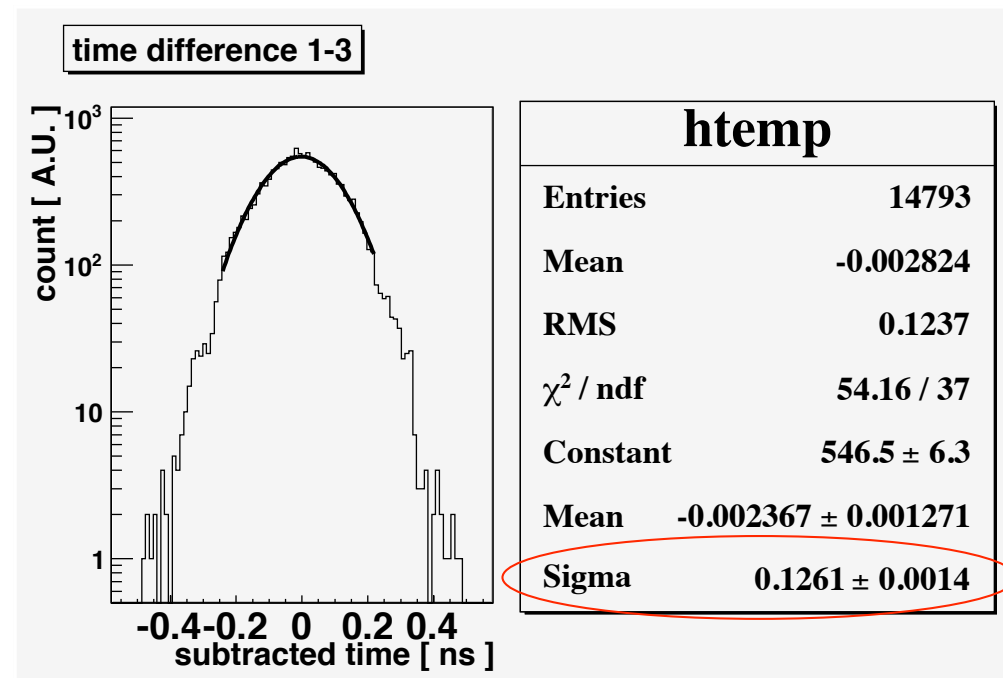
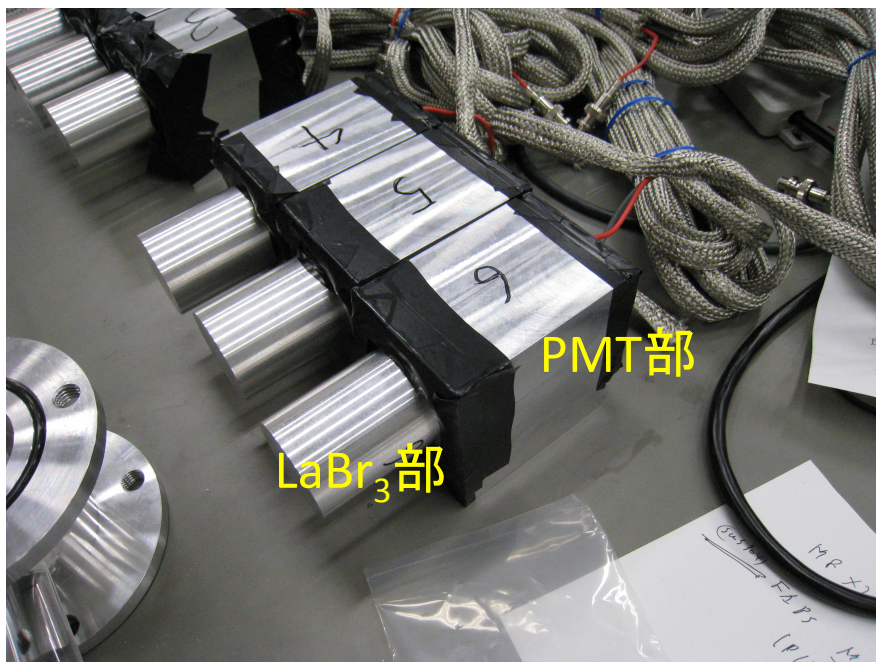
セットアップ(γ 線検出器)(1/2)

LaBr₃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



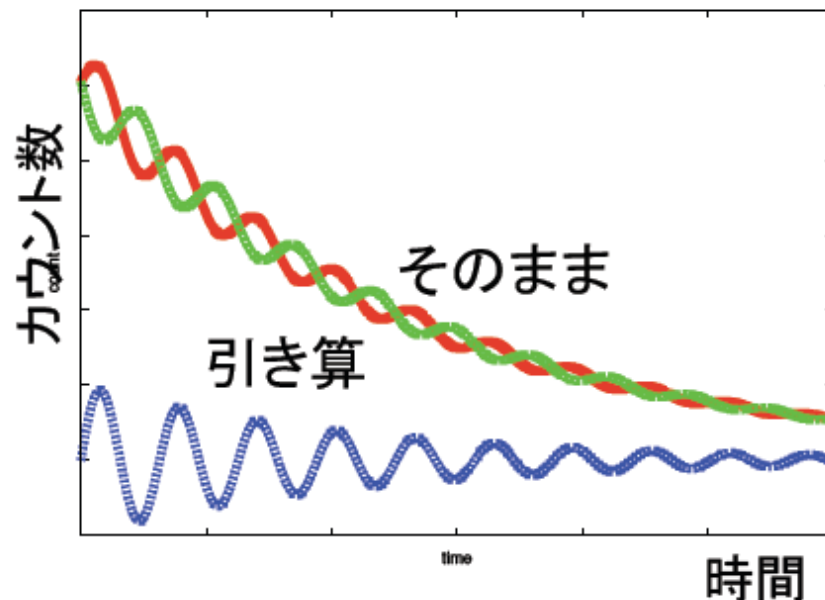
<LaBr₃二個の時間差>

<製作したPMTホルダ>

解析方法は大きく二つ

逆位相同士を引き算する方法

- 正位相、逆位相のヒストグラムを引き算してexp成分を消す。
- 熱化等expをゆがませる成分をキャンセル出来る。
- 時間分解能の差で二倍高周波が出来てしまう可能性。

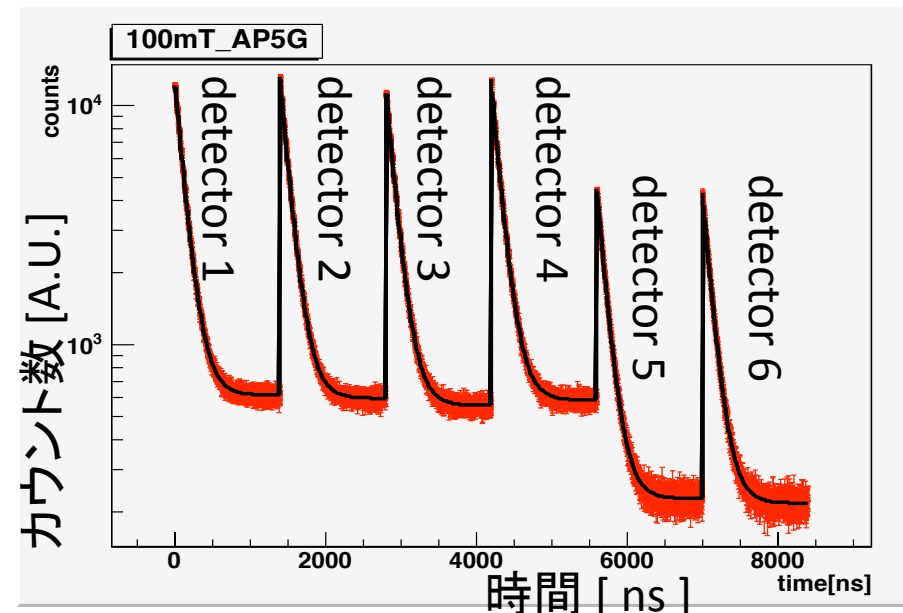


<引き算フィットの概念図>

Yuichi Sasaki

そのままフィットする方法

- 素直に (exp+減衰振動) でフィットする。
- 6個を同時にフィットする。
- おかしな成分がでてくることはない。



<そのままフィットの概念図>

21

オフラインでのカット

<シングルフォトンカット>

- 1イベントに鳴った LaBr_3 が一つだけのイベントを選ぶ

→ 1、理論では1 γ を考えている

2、p-PsのBack-to-Backを減らす

1イベント中でいくつの LaBr_3 が鳴ったか

ヒット数	割合[%]
1	78.7
2	20.1
3	1.2

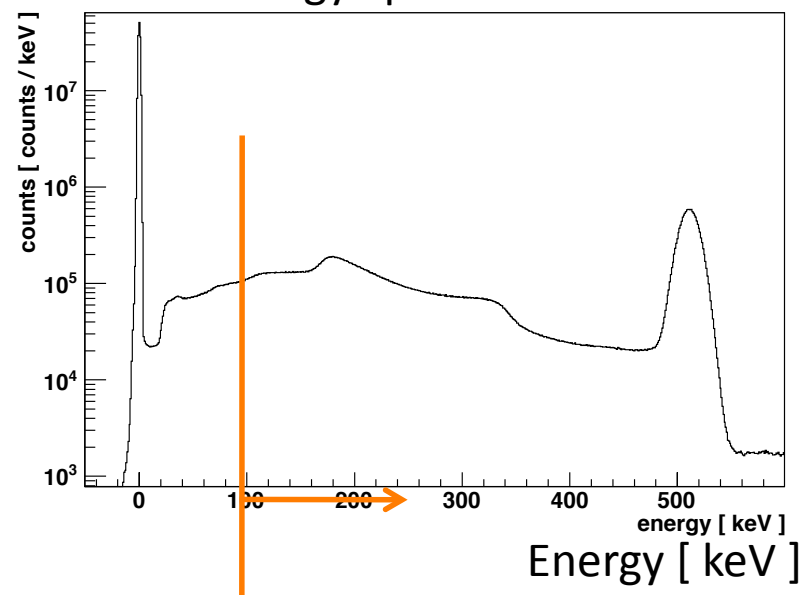
<エネルギーカット>

- 100keV以下を捨てる

→ 1、振動成分の分布は低エネルギーで少ない

2、ゴミイベントの除去

Energy Spectrum

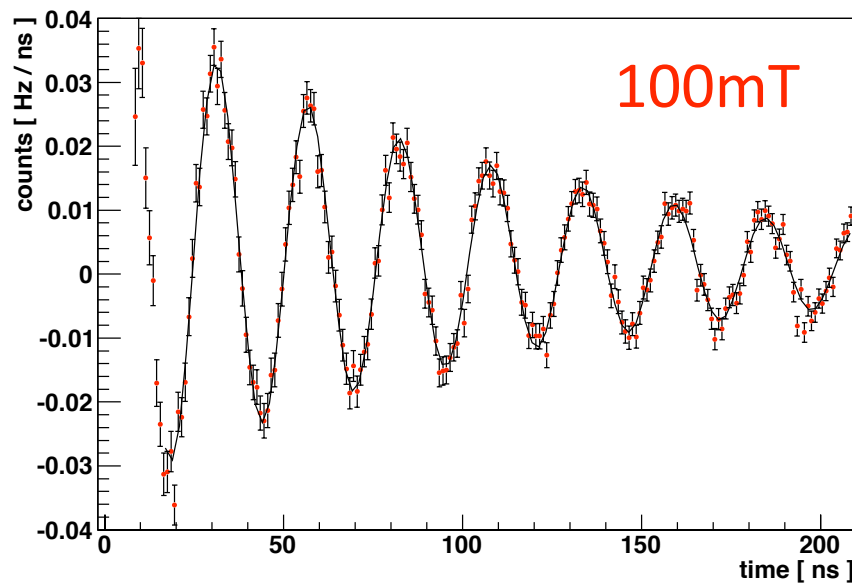


これらのカットはS/Nにしか効かず、振動成分の周波数をずらすことは無い

逆位相同士を引き算したフィット

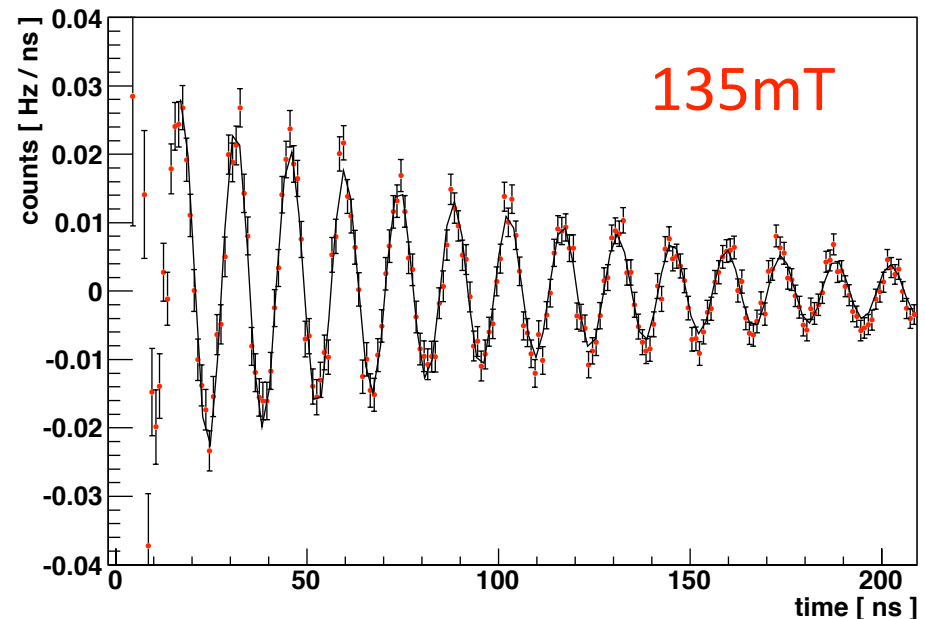
- 同位相にある検出器のヒストグラムは足して、
逆位相にある検出器のヒストグラムは引く
- フィット関数は、 $f(x) = Ae^{-\gamma_1 t} + Be^{-\gamma_2 t} + Ce^{-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t} \sin(\Omega t + \theta_0) + D$
(A、B、Dは引き算が不完全な時のための保険。 γ_1 、 γ_2 は不定性が大きい。)
- フィット範囲は16ns ~ 1416ns。プロンプトのテールがキャンセル出来るのでフィット範囲をかなり前に出来る。

<引き算後の寿命曲線とフィット>



time [ns]

Yuichi Sasaki



time [ns]

そのままフィットでのHFS値一覧

呼び名	偏極の向き	磁場の値[mT]	角振動数[rad/ns]	HFS[GHz]
100	上	100.594 ± 0.007	0.24565 ± 0.00016	203.24 ± 0.13 (658 ppm)
100	下	100.592 ± 0.007	0.24585 ± 0.00014	203.07 ± 0.12 (567 ppm)
118	上	118.826 ± 0.010	0.34264 ± 0.00032	203.30 ± 0.19 (870 ppm)
118	下	118.824 ± 0.010	0.34265 ± 0.00030	203.29 ± 0.18 (930 ppm)
118※	上	118.826 ± 0.010	0.34219 ± 0.00035	203.57 ± 0.21 (1023 ppm)
135	上	134.807 ± 0.007	0.44109 ± 0.00027	203.24 ± 0.12 (614 ppm)
135	下	134.805 ± 0.007	0.44057 ± 0.00023	203.48 ± 0.11 (517 ppm)
138	上	138.330 ± 0.007	0.46411 ± 0.00025	203.39 ± 0.11 (532 ppm)
138	下	138.326 ± 0.007	0.46394 ± 0.00028	203.45 ± 0.12 (604 ppm)

※TDCが8GHzでのRunだった。

平均 : HFS = 203.328 ± 0.044 (stat.) GHz (215 ppm)

引き算フィットでのHFS値一覧

呼び名	偏極の向き	磁場の値[mT]	角振動数[rad/ns]	HFS[GHz]
100	上	100.594 ± 0.007	0.24559 ± 0.00014	203.29 ± 0.11 (552 ppm)
100	下	100.592 ± 0.007	0.24579 ± 0.00012	203.12 ± 0.10 (505 ppm)
118	上	118.826 ± 0.010	0.34286 ± 0.00026	203.17 ± 0.16 (767 ppm)
118	下	118.824 ± 0.010	0.34249 ± 0.00025	203.38 ± 0.15 (738 ppm)
118※	上	118.826 ± 0.010	0.34222 ± 0.00029	203.55 ± 0.17 (845 ppm)
135	上	134.807 ± 0.007	0.44105 ± 0.00022	203.26 ± 0.10 (497 ppm)
135	下	134.805 ± 0.007	0.44059 ± 0.00018	203.47 ± 0.08 (415 ppm)
138	上	138.330 ± 0.007	0.46421 ± 0.00021	203.34 ± 0.09 (520 ppm)
138	下	138.326 ± 0.007	0.46401 ± 0.00024	203.42 ± 0.12 (604 ppm)

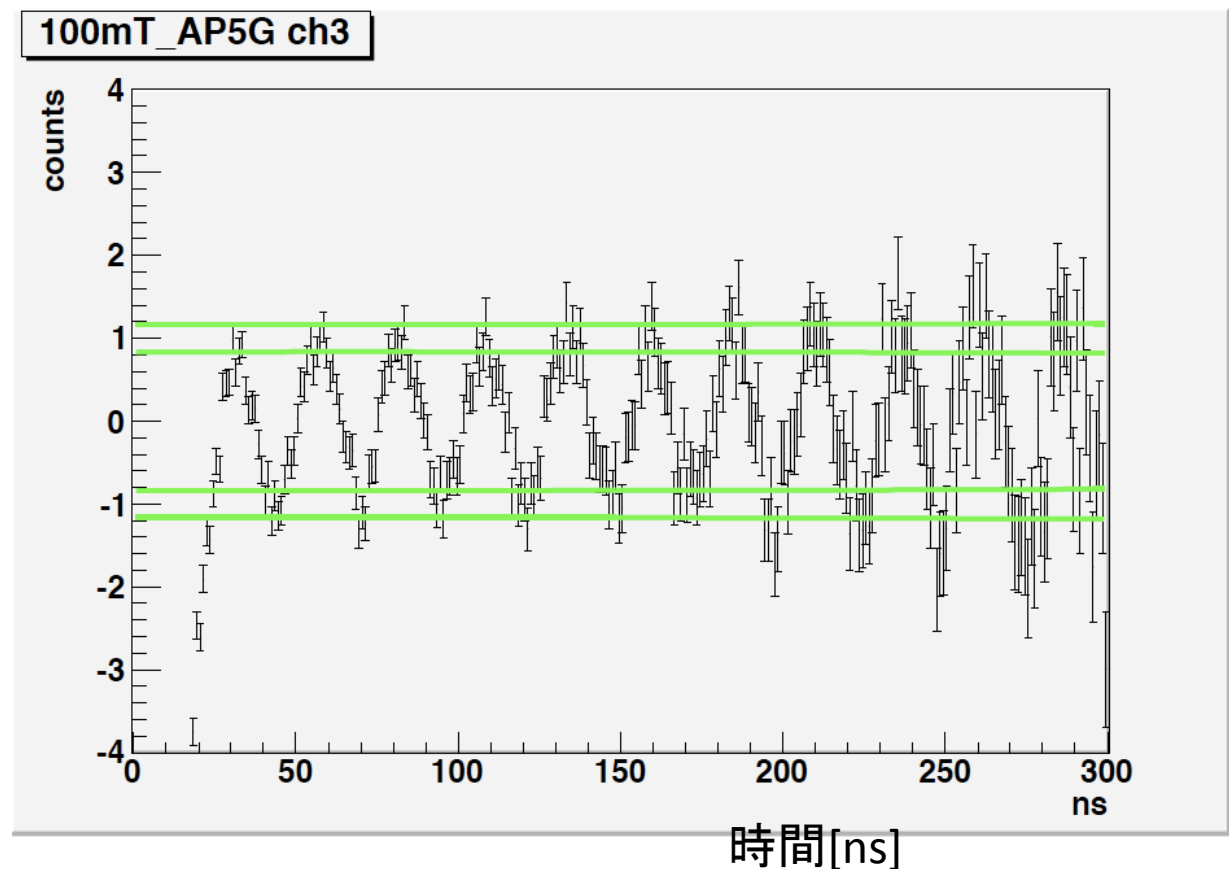
※TDCが8GHzでのRunだった。

平均 : HFS = 203.333 ± 0.037 (stat.) GHz (181 ppm)

スピン緩和による振動の減衰

- 物質の効果によってPsのスピンの交換
→振動の減衰として見られるはず
- ミドリの線：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しているといえる
→統計が足りず、
今回の実験からは
何とも言えない。

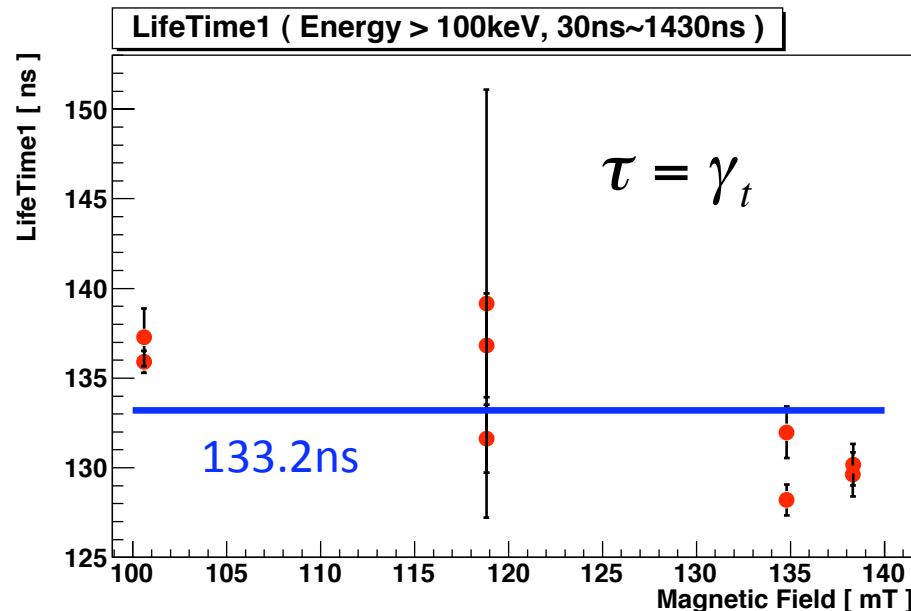
右図：timing spectrum
からexp成分を除き、
振動成分を抜き出した絵



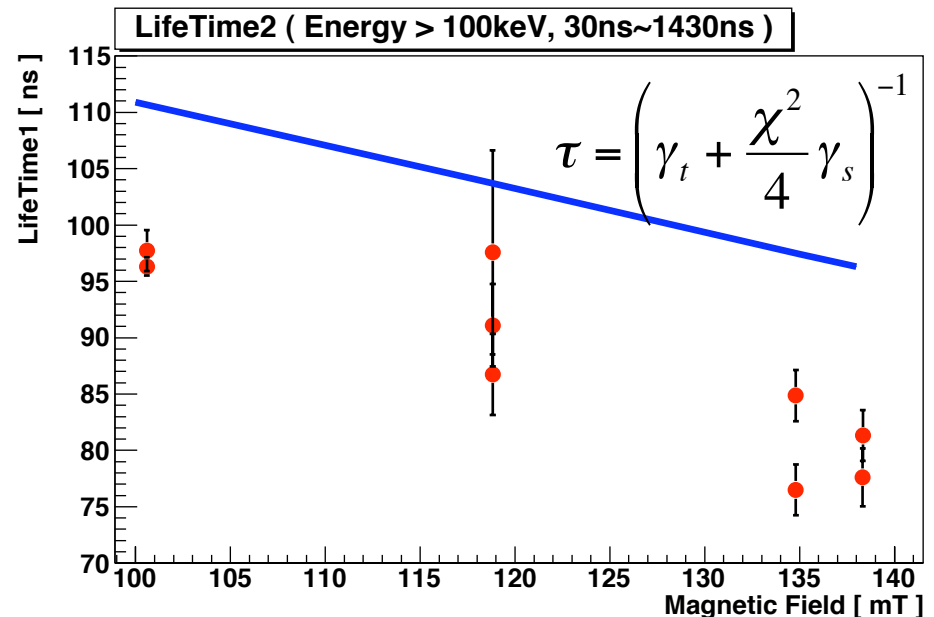
2寿命成分の分離

- 磁場によるp-Psとo-Psの混合
→”o-Psの寿命成分” と ”短くなった寿命成分” が出る
- 青が0mTのデータから求めた理論値
- 短い寿命成分は短く出てしまう→減衰振動の項が値を引っ張っている？
- この寿命成分の分離は振動周期とはほぼ独立→HFSには効かない

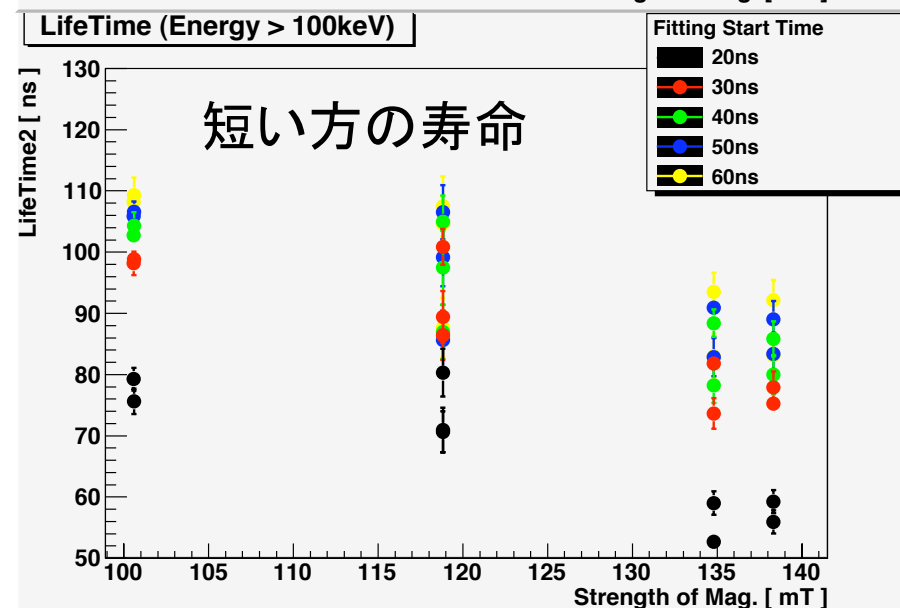
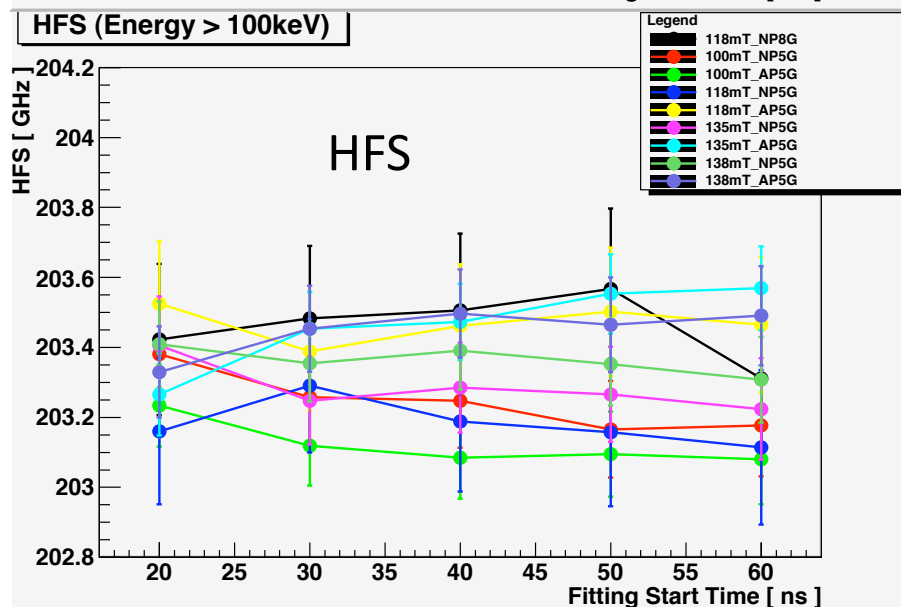
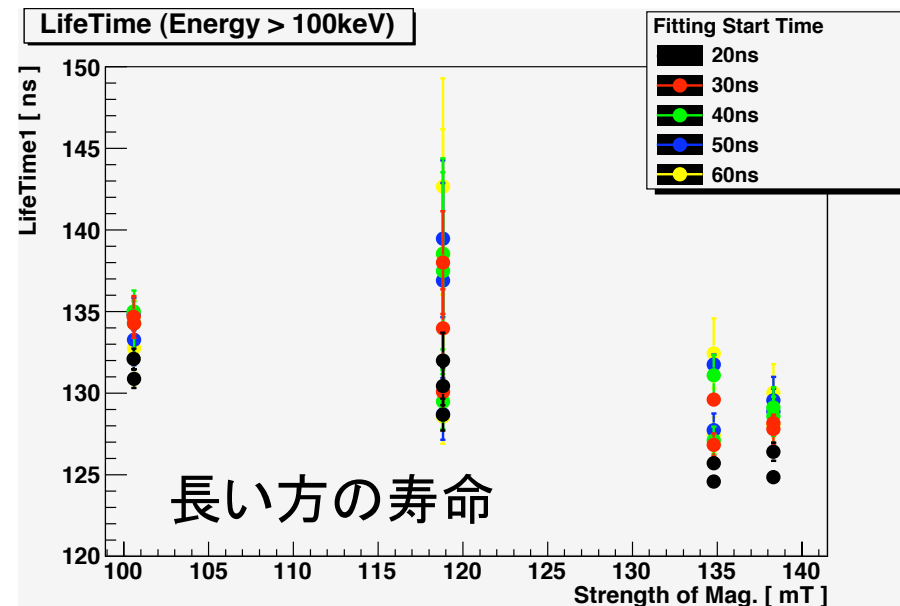
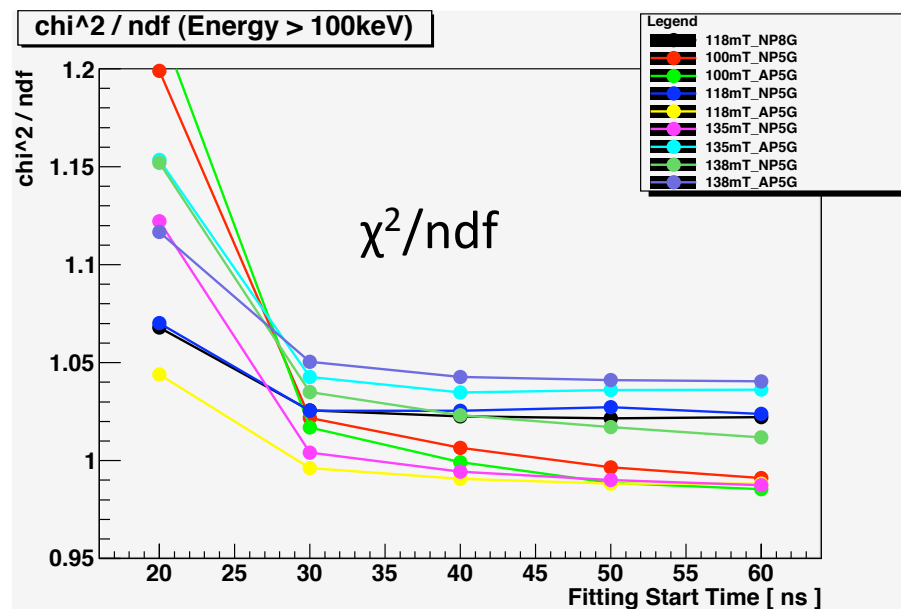
長い寿命成分(定数)



短い寿命成分(磁場の関数)



そのままフィットでのフィッティング開始点に対する値の安定性



フィッティング開始時間 [ns]

Yuichi Sasaki

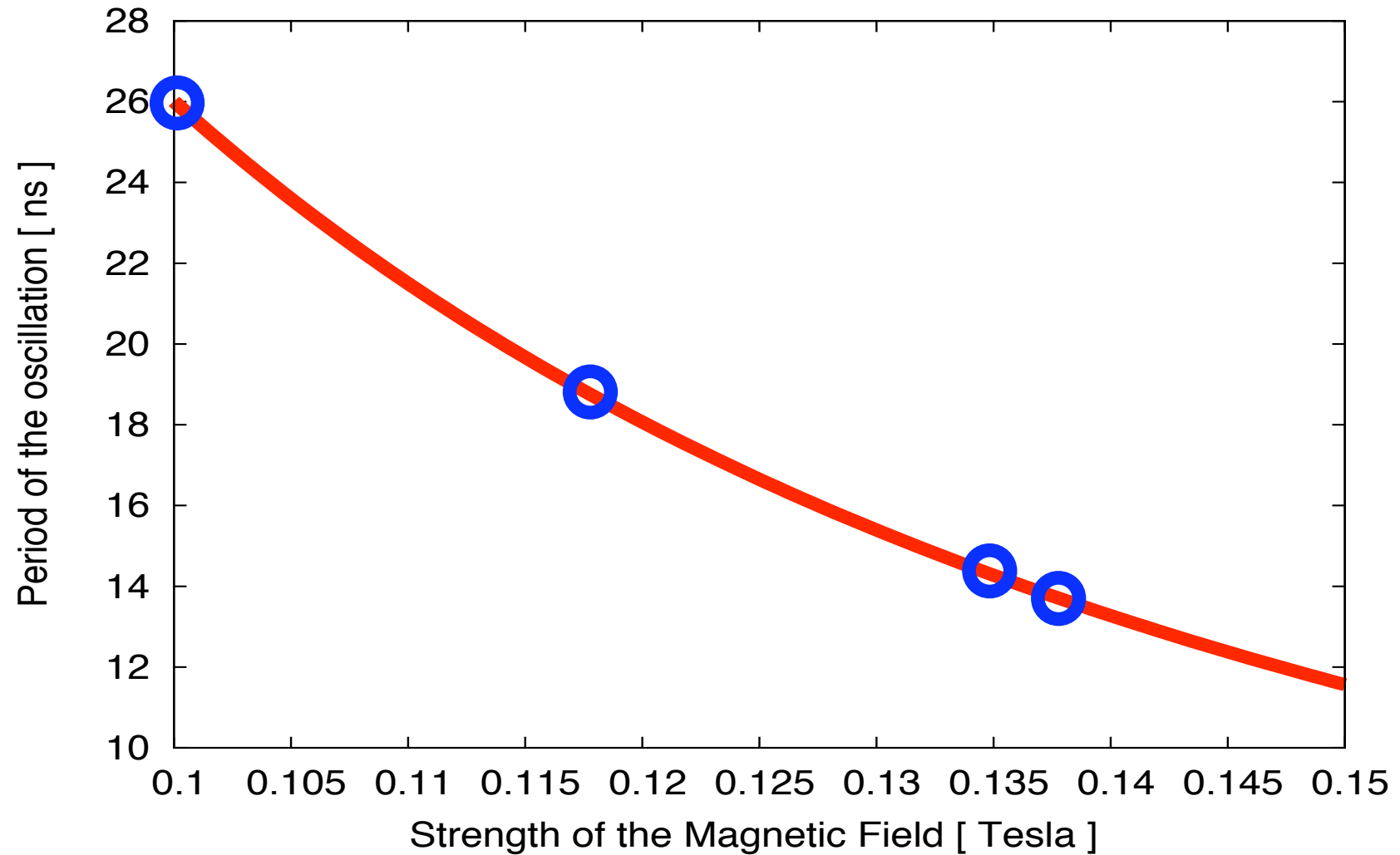
磁場の強さ [mT]

28

量子振動の周期

＜磁場の強さと振動周期の関係＞

○: 今回測定した条件



密度行列

＜偏極した β^+ が無偏極の e^- に入射して P_S を作る際の密度行列＞

$$\begin{aligned}
 & \langle j, m | \rho_- \otimes \rho_+ | j, m \rangle = \\
 & \langle j, m | s \rangle \langle s | \rho_- \otimes \rho_+ | s \rangle \langle s | j, m \rangle = \\
 & \left(\begin{array}{cccc}
 \frac{1}{4} & -\frac{\cos \theta P}{4} & \frac{e^{i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & -\frac{e^{-i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} \\
 -\frac{\cos \theta P}{4} & \frac{1}{4} & \frac{e^{i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & \frac{e^{-i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} \\
 \frac{e^{-i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & \frac{e^{-i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & \frac{1+\cos \theta P}{4} & 0 \\
 -\frac{e^{i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & \frac{e^{i\phi} \sin \theta P}{4\sqrt{2}} & 0 & \frac{1-\cos \theta P}{4}
 \end{array} \right) \begin{array}{l} |S=0, m=0\rangle \\ |S=1, m=0\rangle \\ |S=1, m=1\rangle \\ |S=1, m=-1\rangle \end{array}
 \end{aligned}$$

$|S=0, m=0\rangle$ $|S=1, m=0\rangle$ $|S=1, m=1\rangle$ $|S=1, m=-1\rangle$

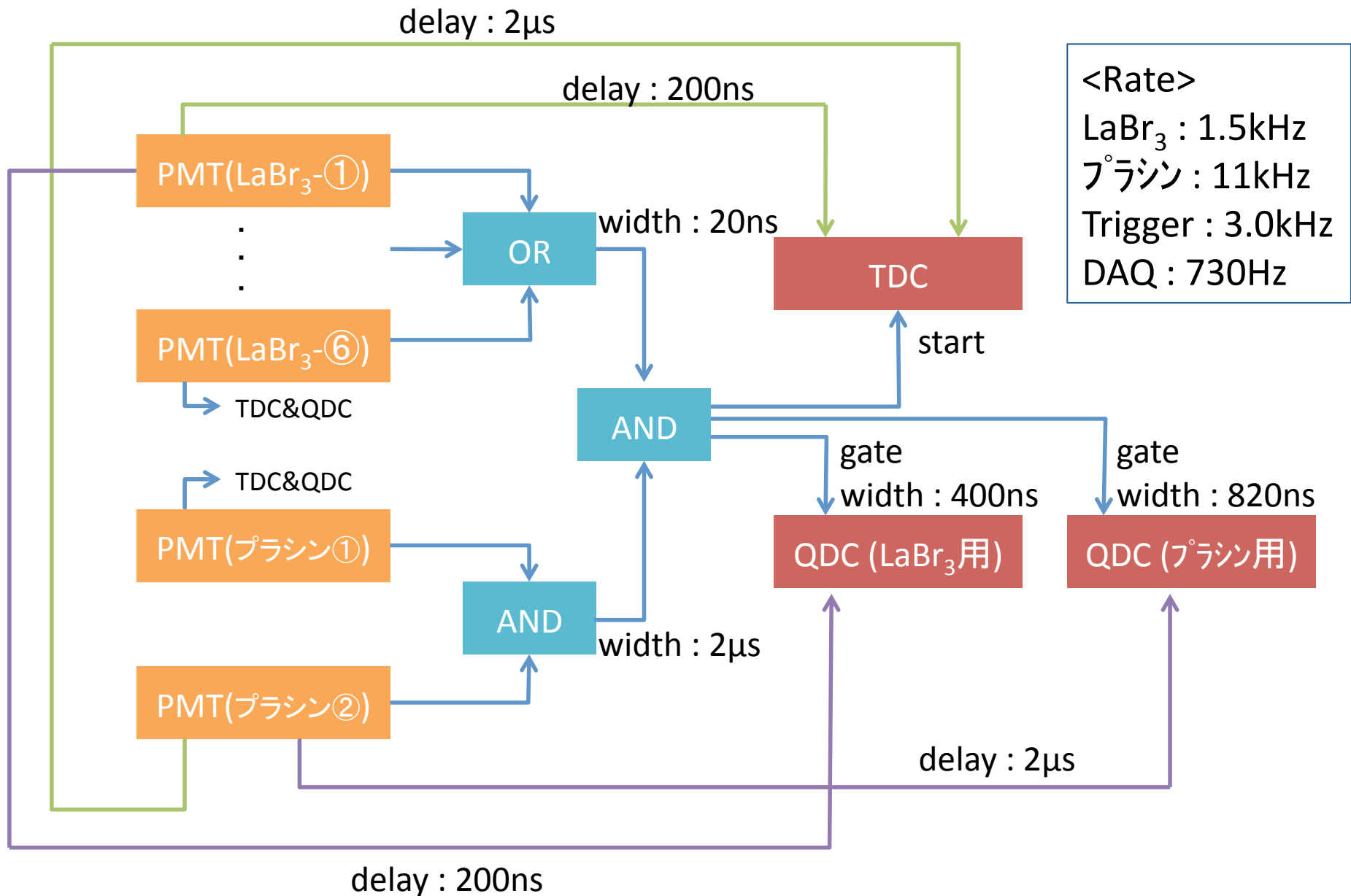
(θ, ϕ) : 磁場に対する β^+ の偏極方向

P : β^+ の偏極率

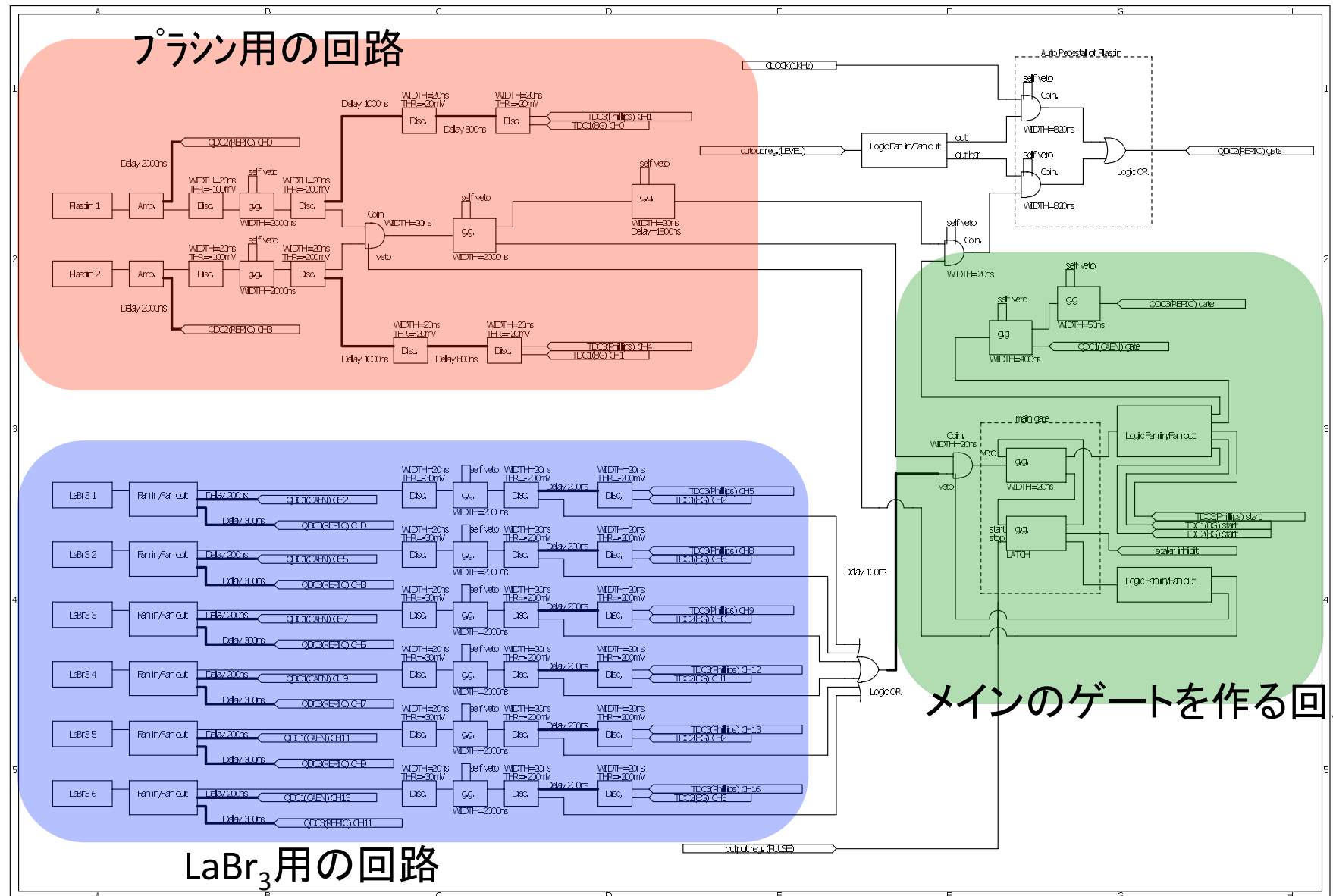
磁場による混合は無視している

で囲った項が重ね合わせ
状態を作るのに効く
→磁場と直交した β^+ 偏極が必要

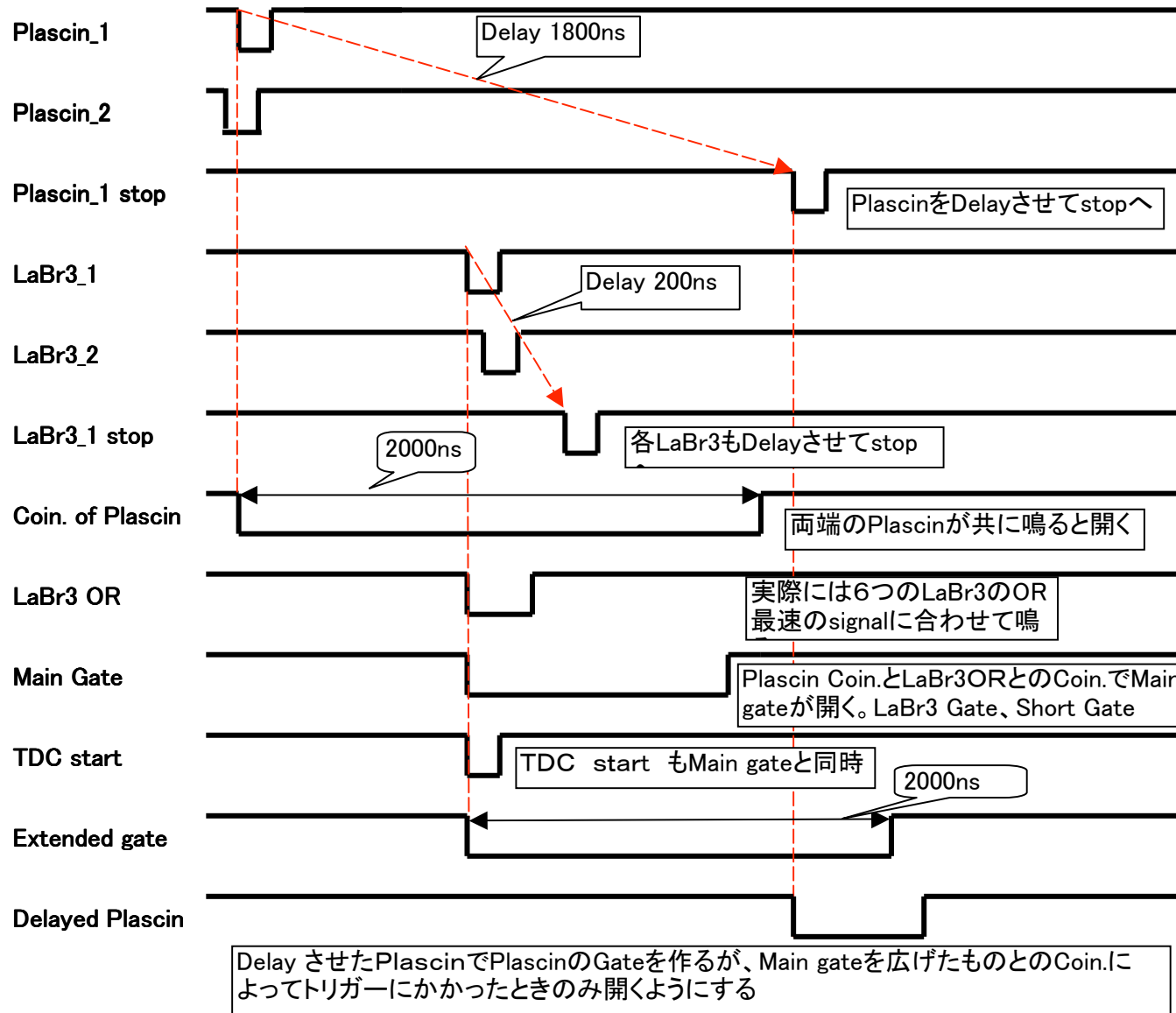
エレキ



詳細な回路図

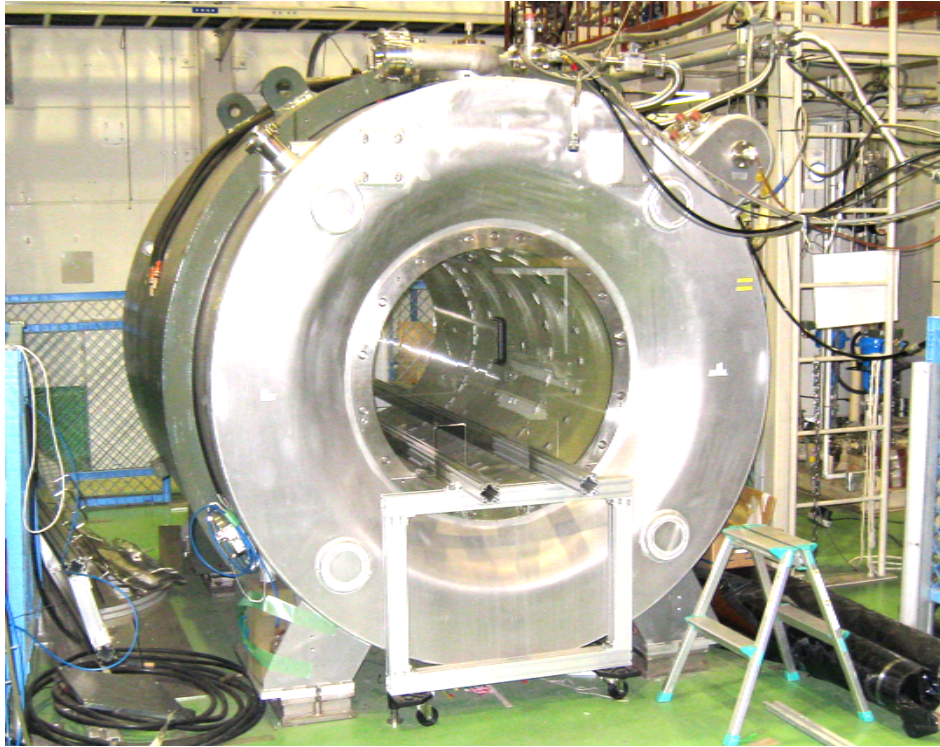


タイミングチャート



セットアップ(磁石)

＜大型超伝導磁石＞

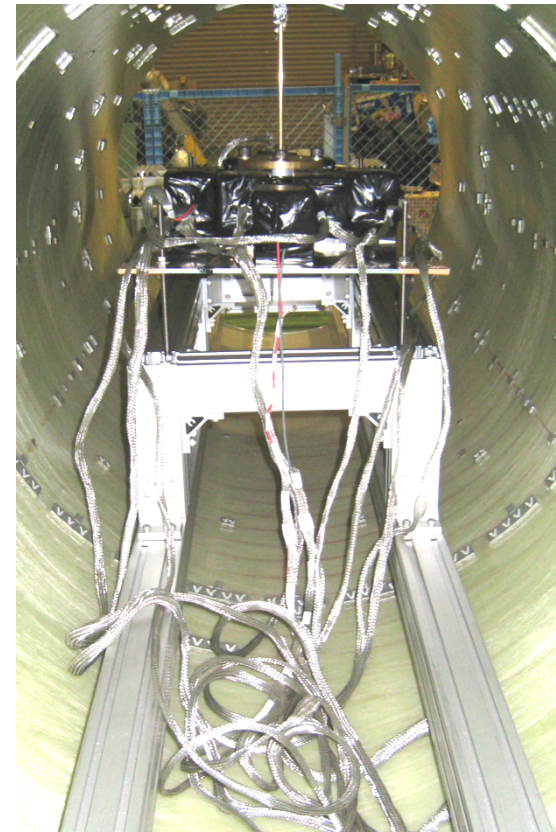


磁場の均一性: $\pm 5\text{mm}$ の範囲で20ppm

磁場の測定: NMRを用いた磁力計、
absoluteな精度は100ppm程度

磁石: KEKの大型超伝導磁石

＜PMT等の磁石への固定の様子＞

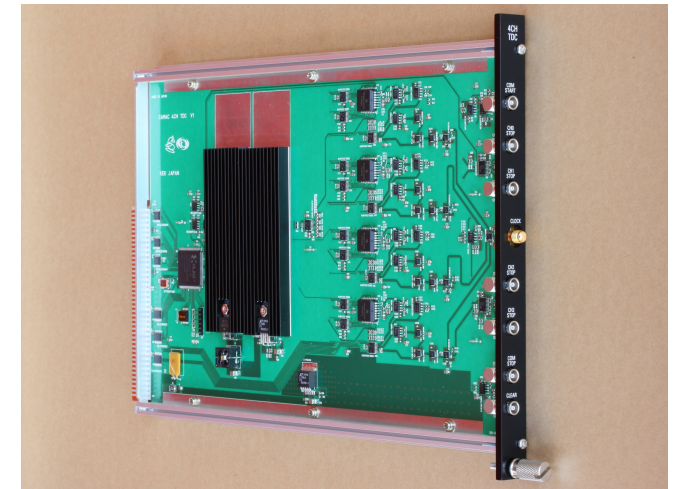


8GHz TDC

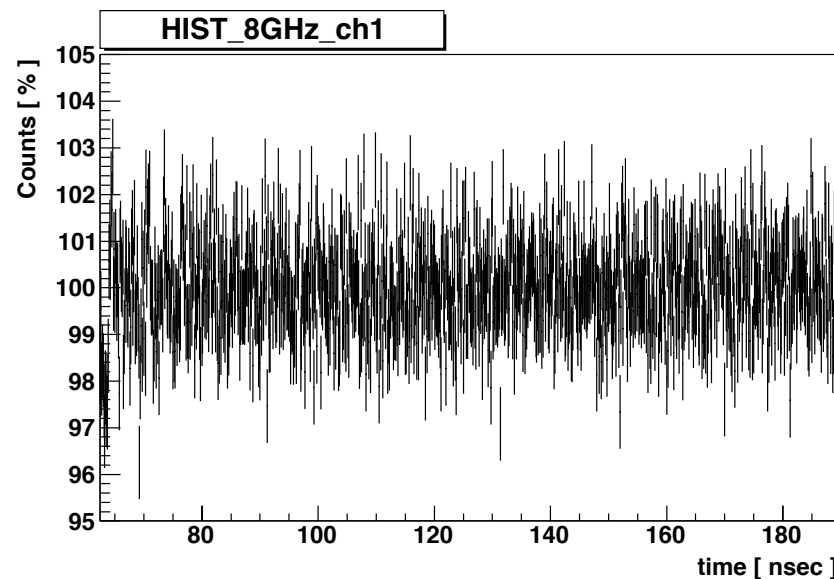
振動の周期を正しく測る → 正確なTDCが不可欠
→ 8GHz動作のDirect Clock TDCを製作した

* Integrated Non Linearity 無し

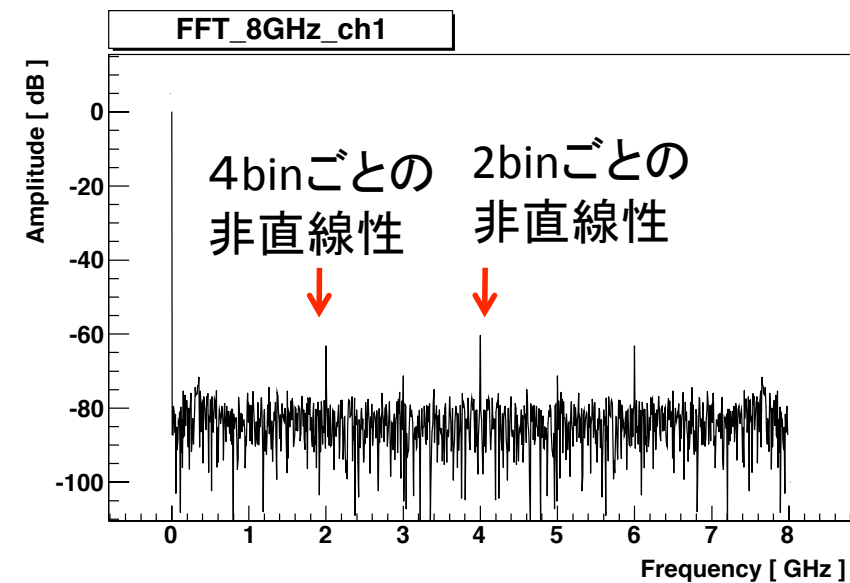
* Differential Non Linearity は、
4binをまとめればほぼ見られなくなる
(ただし、安定性の問題から今回は5GHzで使用)



＜ランダムクロックによるTDCスペクトル＞
8GHz動作時



＜8GHz TDC＞
＜左図のフーリエ変換＞

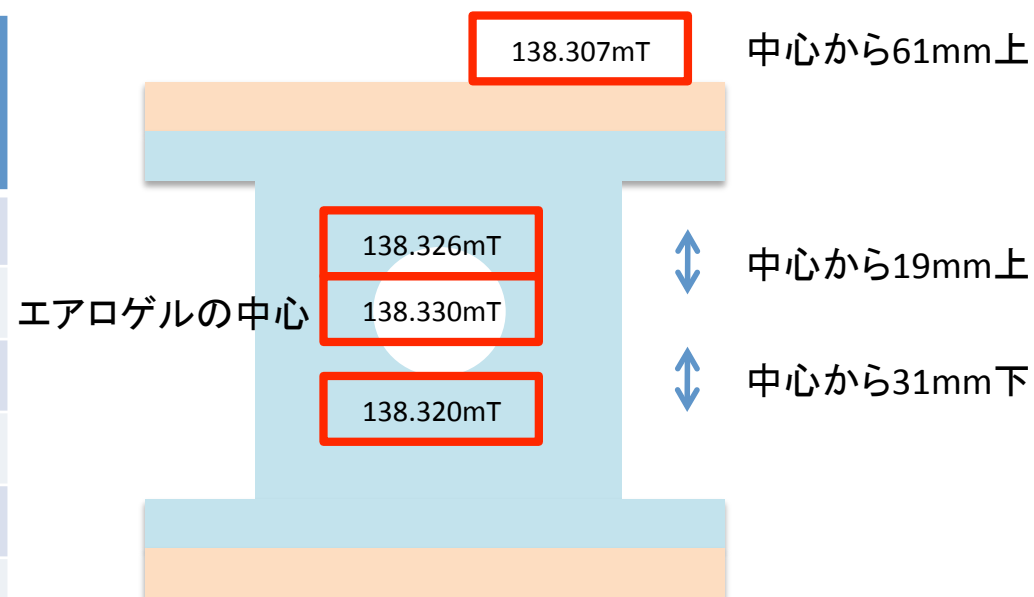


磁場の強さと測定例

<磁場の強さの一覧(実測)>

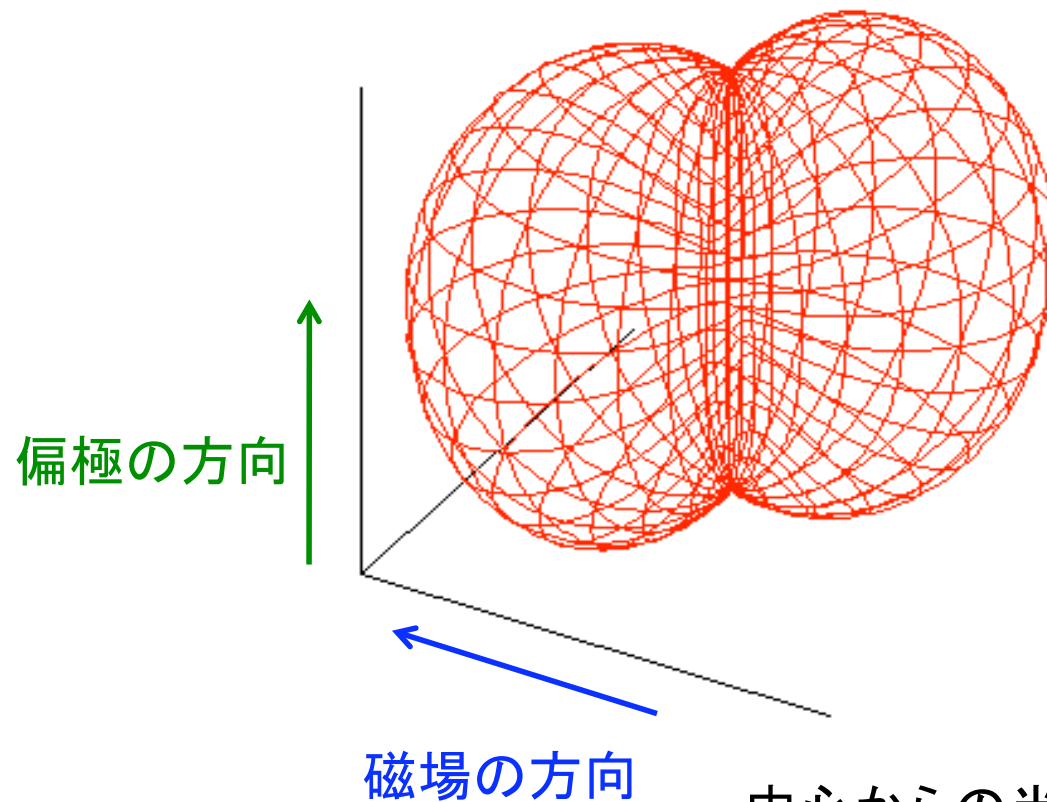
呼び名	エアロゲル中央の 磁場の測定値 (mT)
138mT (偏極上向き)	138.3300 ± 0.007
138mT (偏極下向き)	138.3260 ± 0.007
135mT (偏極上向き)	134.8065 ± 0.007
135mT (偏極下向き)	134.8053 ± 0.007
118mT (偏極上向き)	118.8255 ± 0.010
118mT (偏極下向き)	118.8237 ± 0.010
100mT (偏極上向き)	100.5944 ± 0.007
100mT (偏極下向き)	100.5920 ± 0.007

<磁場の測定値の一例 (138mT)>



γ 線の出る方向分布

＜ γ 線の出る方向の確率分布＞



中心からの半径が、 γ 線の出る確率の大きさを示している。