

ポジトロニウム超微細構造の 量子振動を用いた測定 I (概要・セットアップ)

東大理、東大素セ^A、KEK^B、東大院総合文化^C

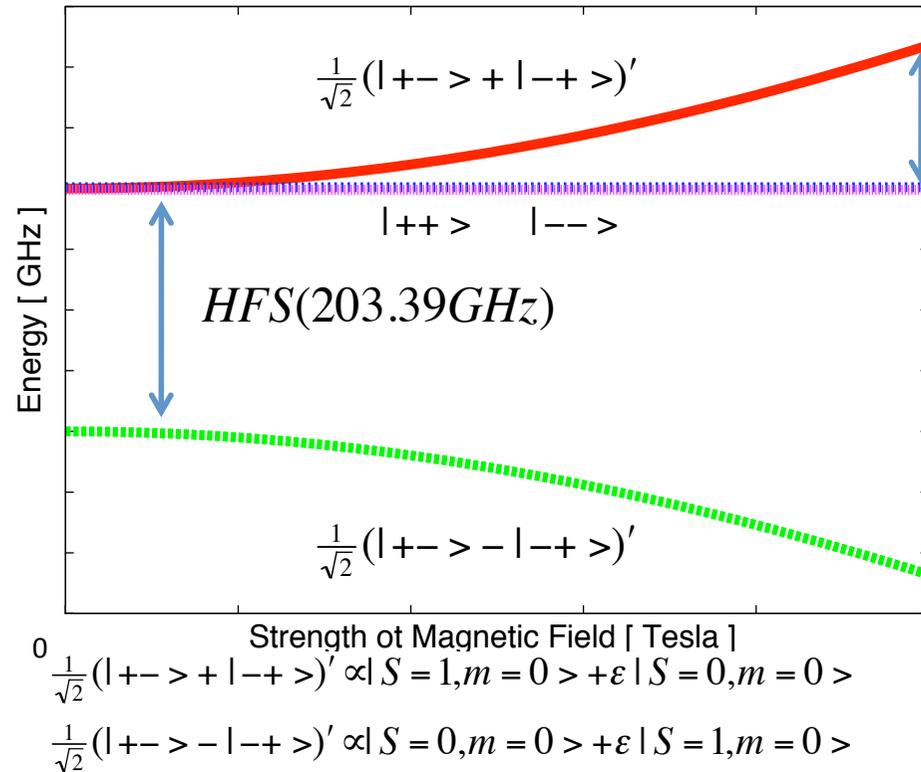
佐々木雄一、宮崎彬、石田明、
末原大幹^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、
小林富雄^A、田中賢一^B、山本明^B、
齋藤晴雄^C、池野正弘^B

日本物理学会 第64回年次大会
立教大学池袋キャンパス

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>



(磁場によって少し混合する)

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

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

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。

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|+-> + |-->)'$$

$$\uparrow \downarrow$$

$$|++>, |-->$$

周期26ns@100mT

<実験のモチベーション>

- 1、振動の周期 → HFS×磁場の関数 → PsのHFSの測定
- 2、振動の振幅 → Psの偏極の大きさに比例
→ スピン緩和を測る新しいプローブとして使える可能性

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、

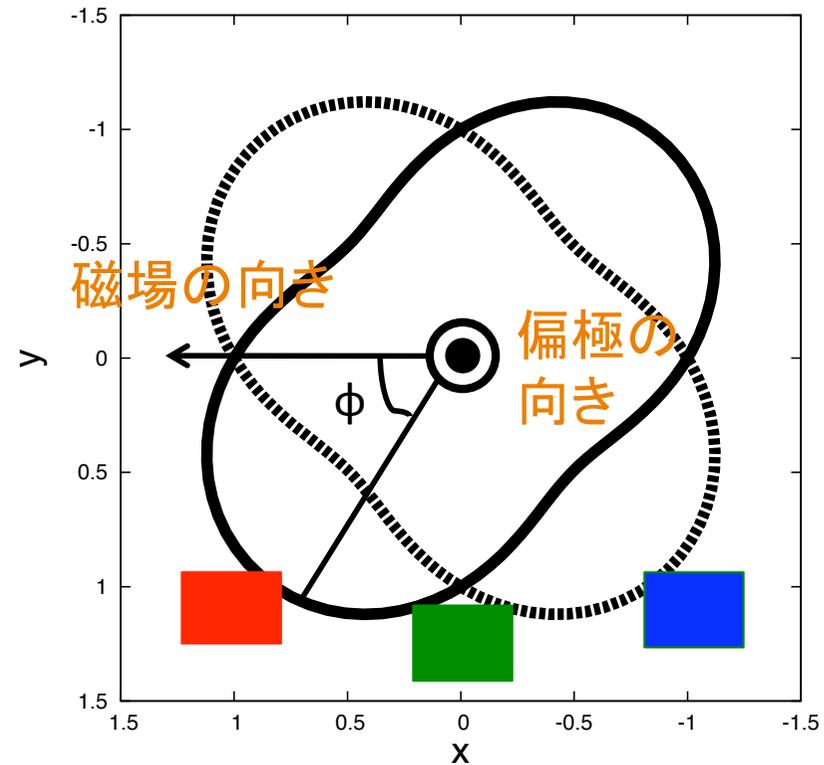
- 1、偏極している β^+ を使う
- 2、偏極の向きを磁場と直交にする

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、
 $\phi=45^\circ$ 、 225° (正位相)
 $\phi=135^\circ$ 、 315° (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 >

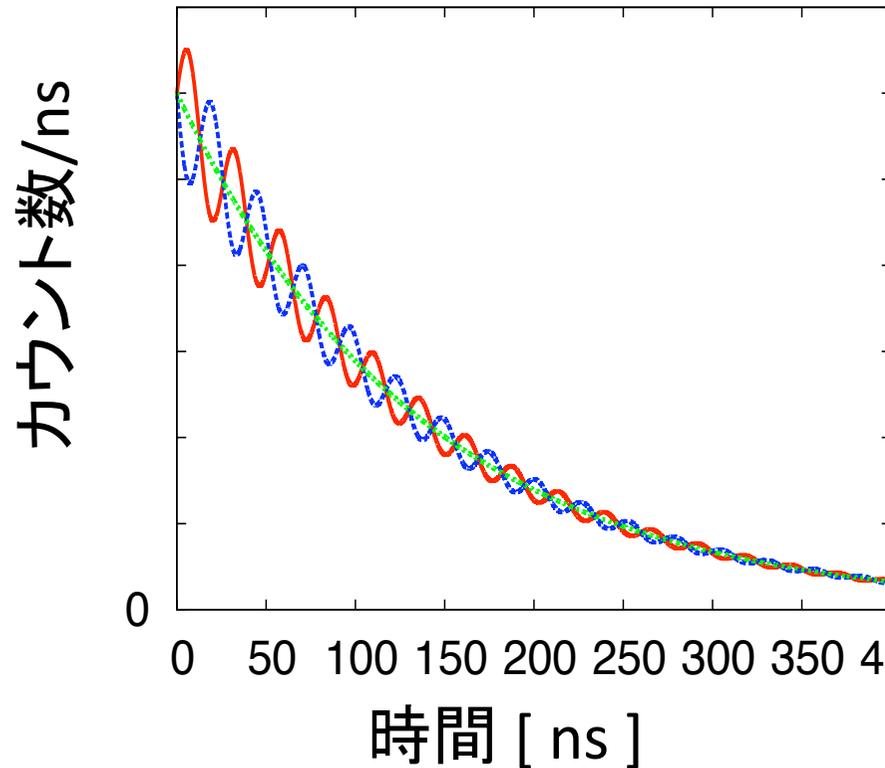


実線: $t=0$

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)



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

$\gamma_1 = \gamma_t + \frac{\chi^2}{4} \gamma_s$: 磁場による混合を起こした o-Psのdecay rate

$\gamma_2 = \gamma_t$: 物質中でのo-Psのdecay rate

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

$\gamma_s = \gamma_{p-Ps}$: 真空での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

$D \rightarrow$ 振動の振幅 \rightarrow Psの偏極率

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

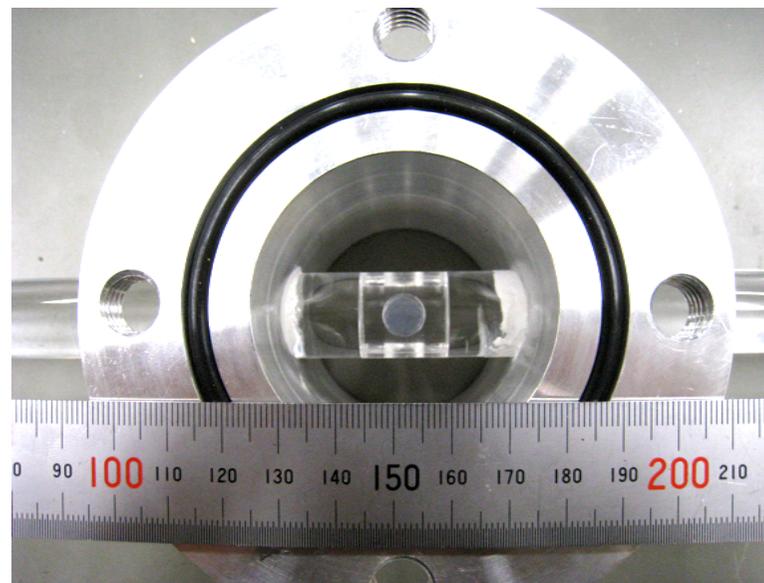
ライトガイド: $\Phi 20\text{mm}$ 、全長400mm

真空容器の外のPMTに光を導く

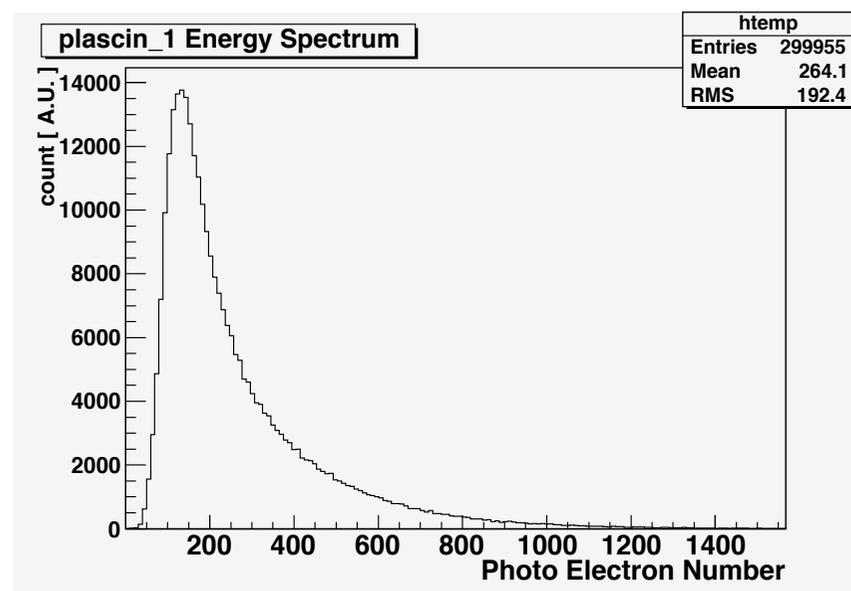
真空容器: ローターポンプで常時真空引き

→ 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＞

↓エアロゲル



Yuichi Sasaki

セットアップ(γ 線検出器)(1/2)

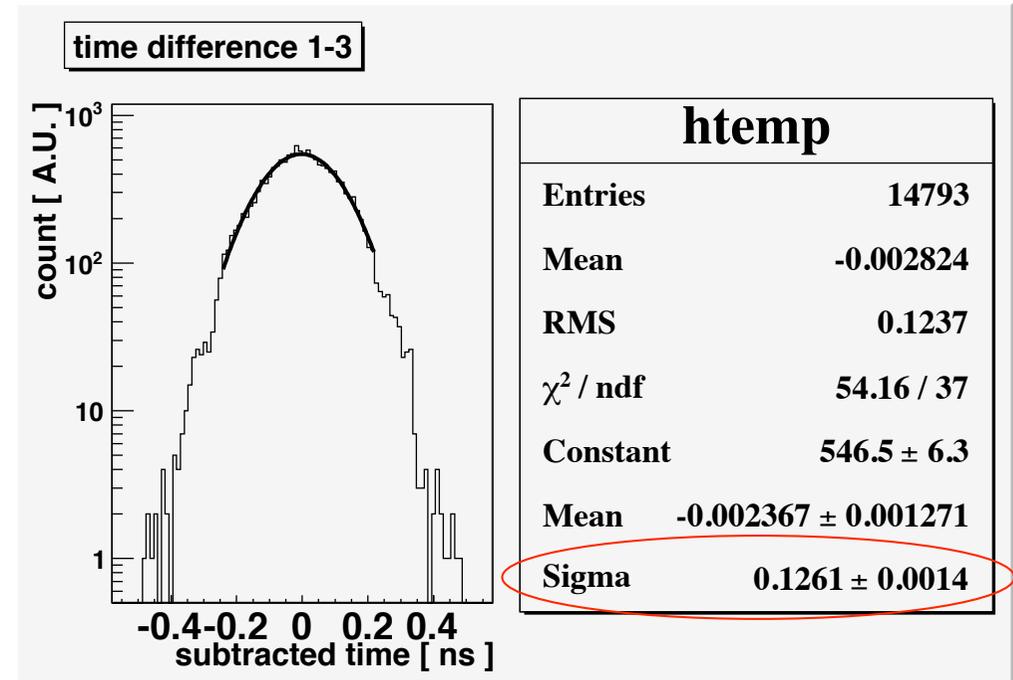
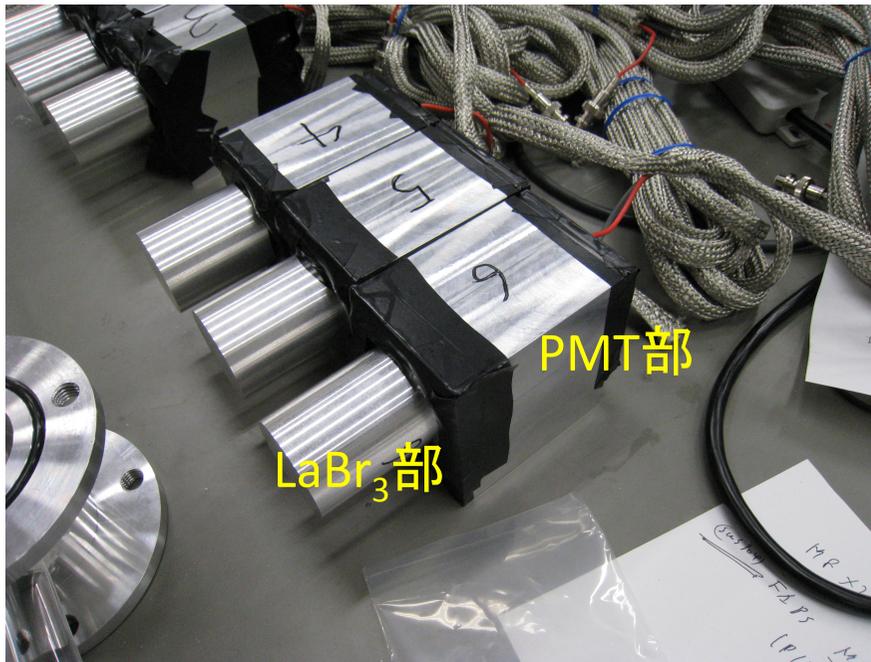
LaBr₃シンチレータ :

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、
磁場と平行に配置

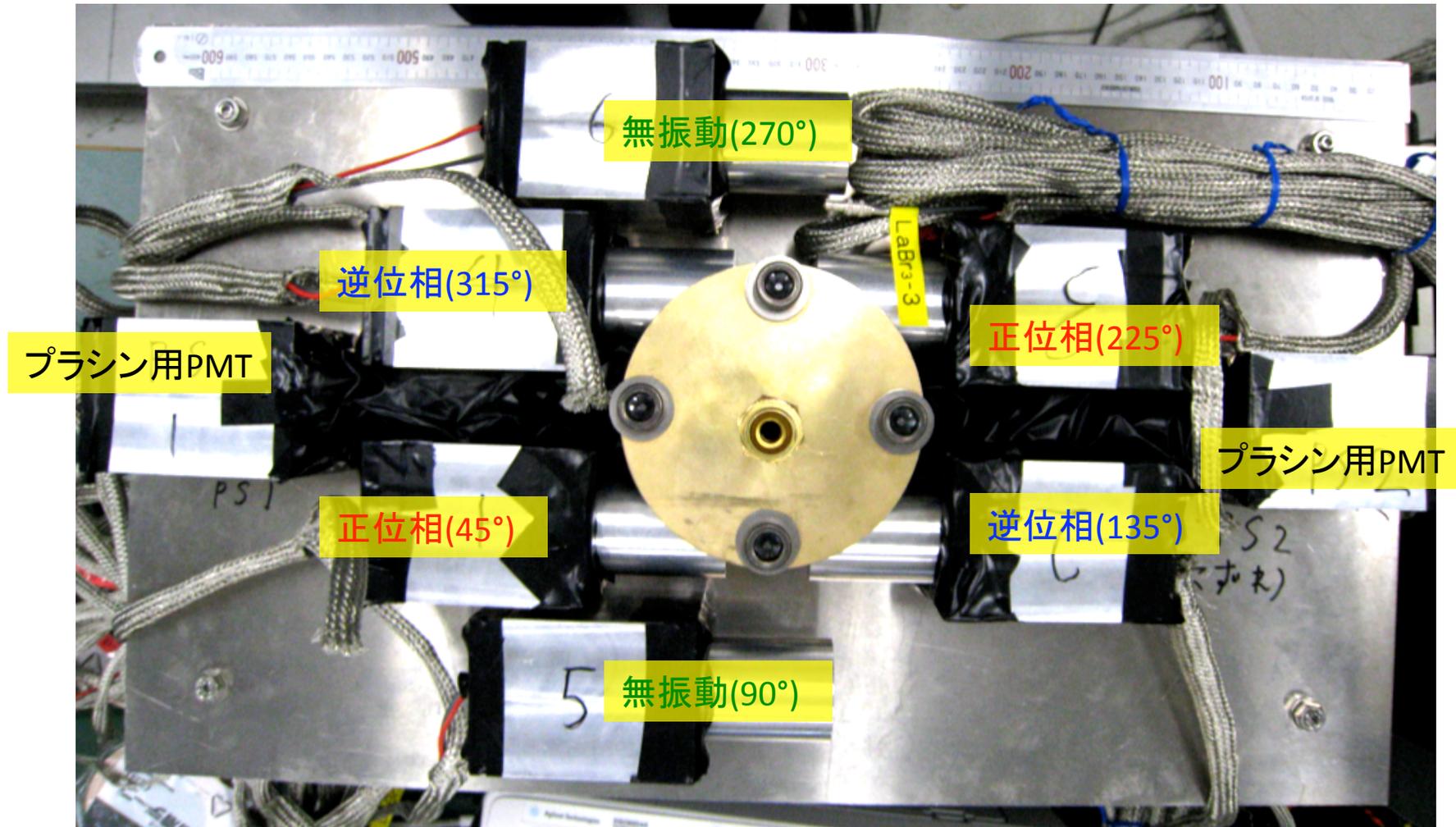
PMTホルダ : アルミで製作



<LaBr₃二個の時間差>

<製作したPMTホルダ>

セットアップ(γ 線検出器)(2/2)

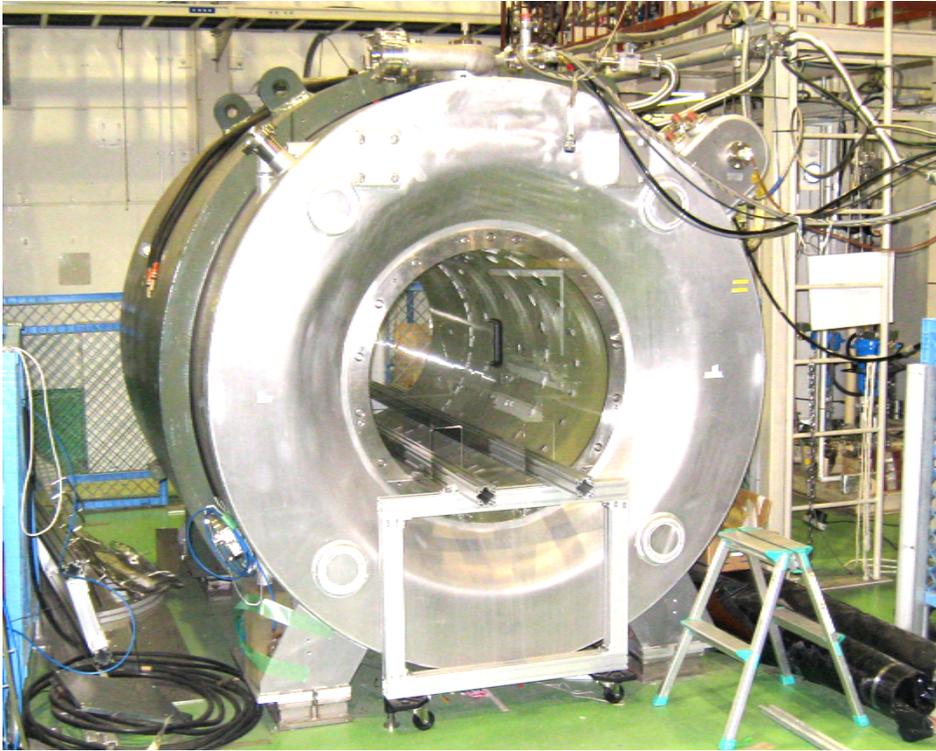


← 磁場の向き

◎ 偏極の向き(重力に対して上向き)

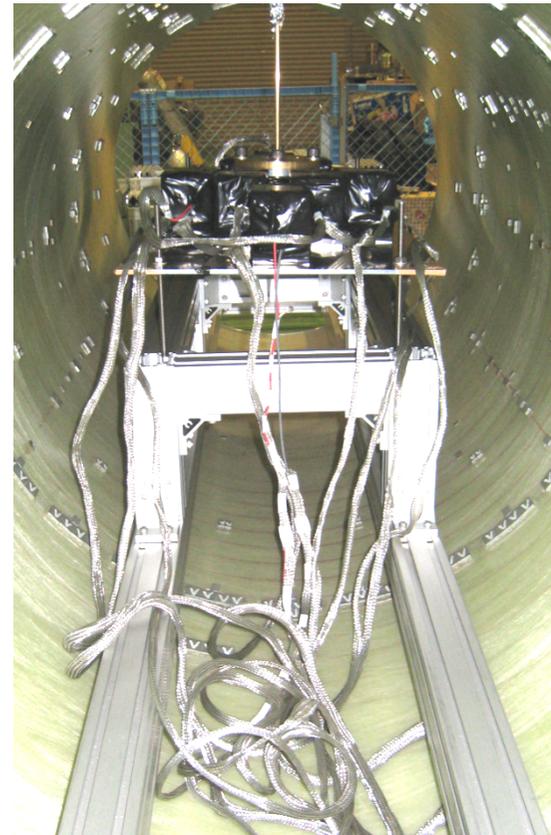
セットアップ(磁石)

<大型超伝導磁石>



磁石 : KEKの大型超伝導磁石

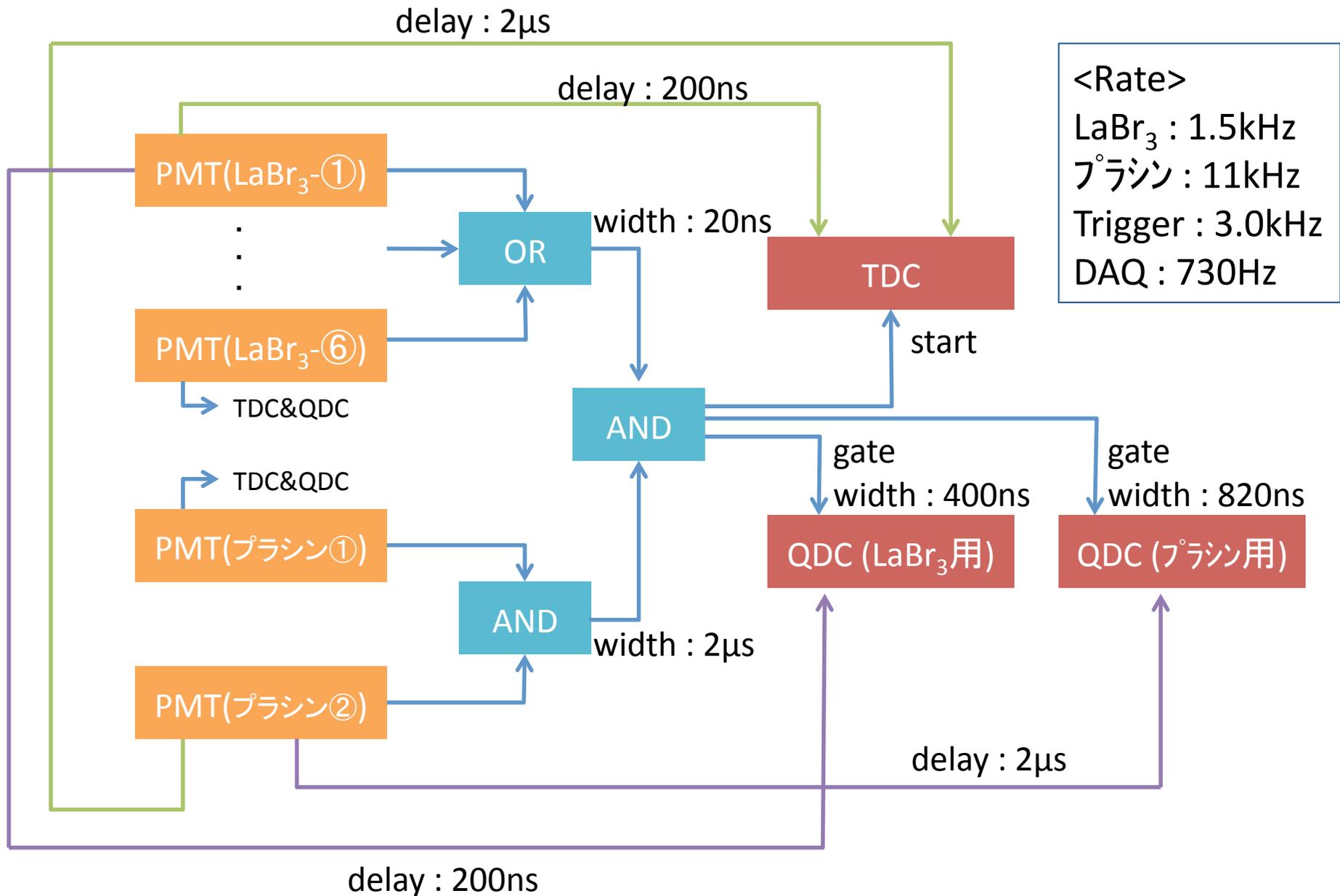
<PMT等の磁石への固定の様子>



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100ppm程度

エレキ

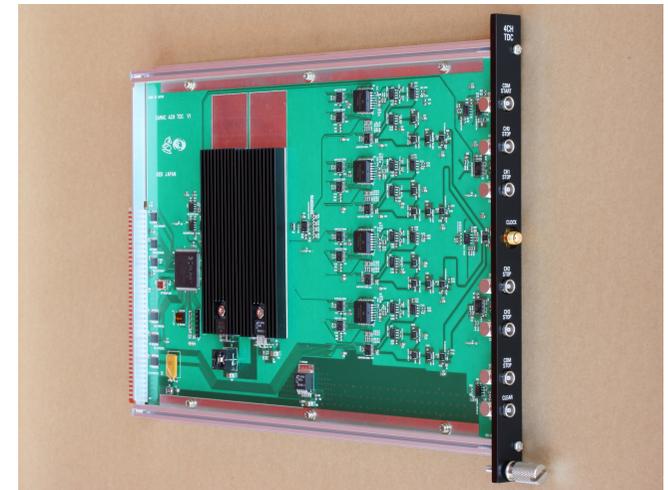


<Rate>
LaBr₃ : 1.5kHz
プラシン : 11kHz
Trigger : 3.0kHz
DAQ : 730Hz

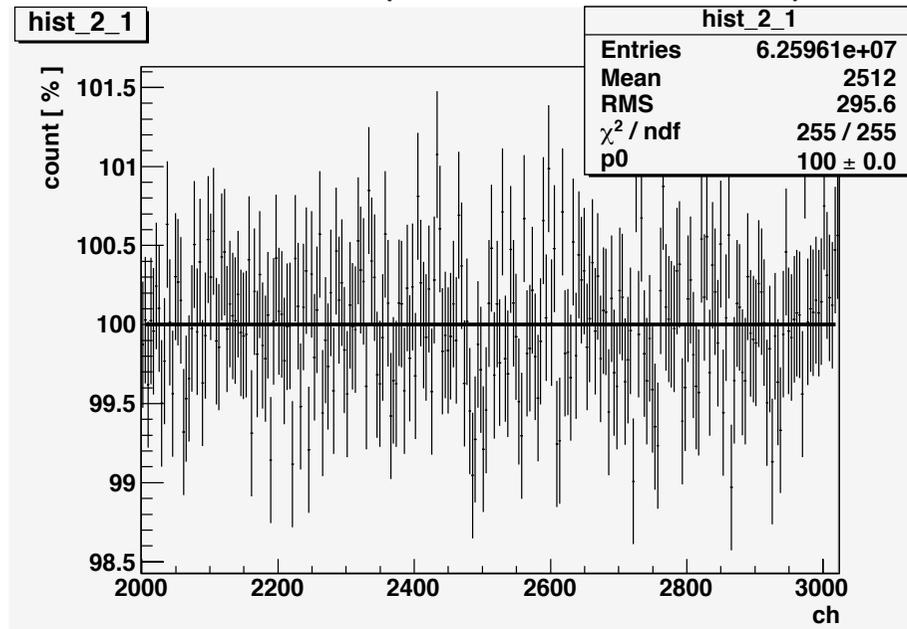
8GHz TDC

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を制作した

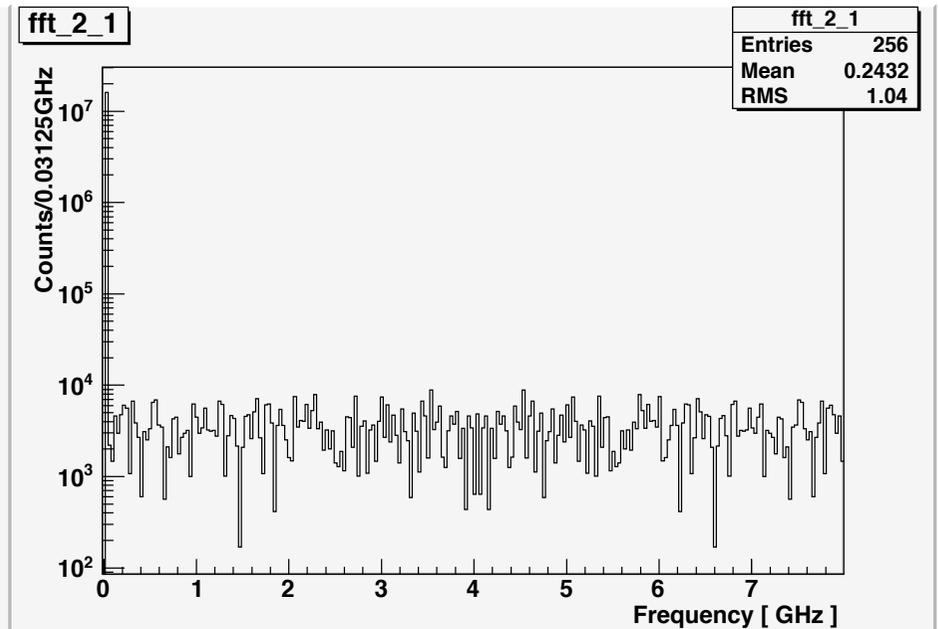
- *Integrated None Linearity 無し
- *Differential None Linearity は、
4binをまとめればほぼ見られなくなる
(ただし、安定性の問題から今回は5GHzで使用)



<ランダムクロックによるTDCスペクトル >
8GHz動作時 (4binをまとめてある)



<8GHz TDC >
<左図のフーリエ変換 >



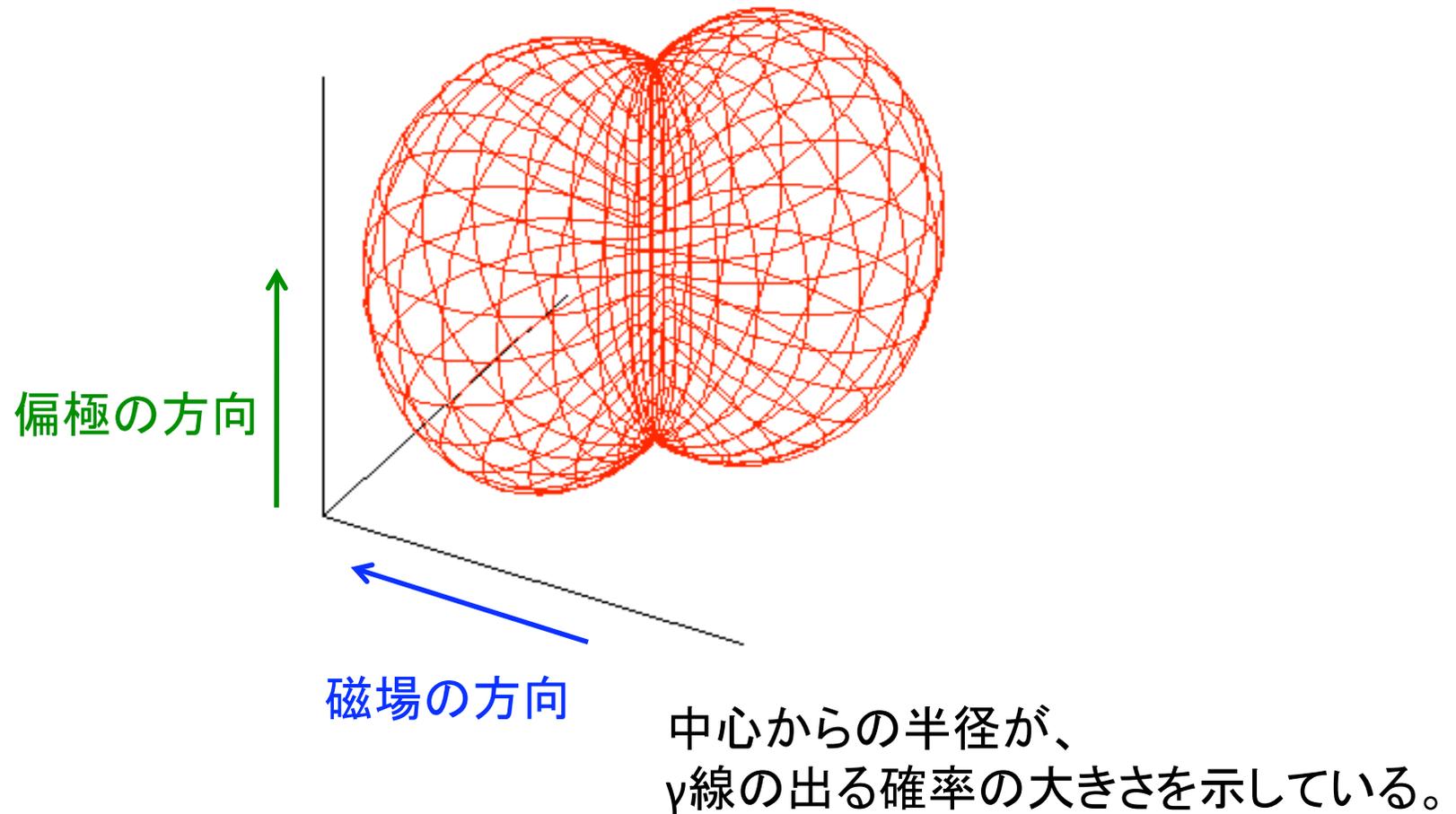
セットアップのまとめ

- * プラシンスタート、 LaBr_3 ストップ、両者のコインシデンスを取るエレキ
- * LaBr_3 を6個を用い、正位相、逆位相、無振動成分を2個ずつとった
- * 磁石は大型超伝導磁石を用い、 $\pm 5\text{mm}$ で20ppmの均一性
- * 磁場測定のabsoluteな精度(Systematic Error)は100ppm程度
- * 正確なタイミング測定のため、新たに8GHz Direct Clock動作のTDCを開発

バックアップ

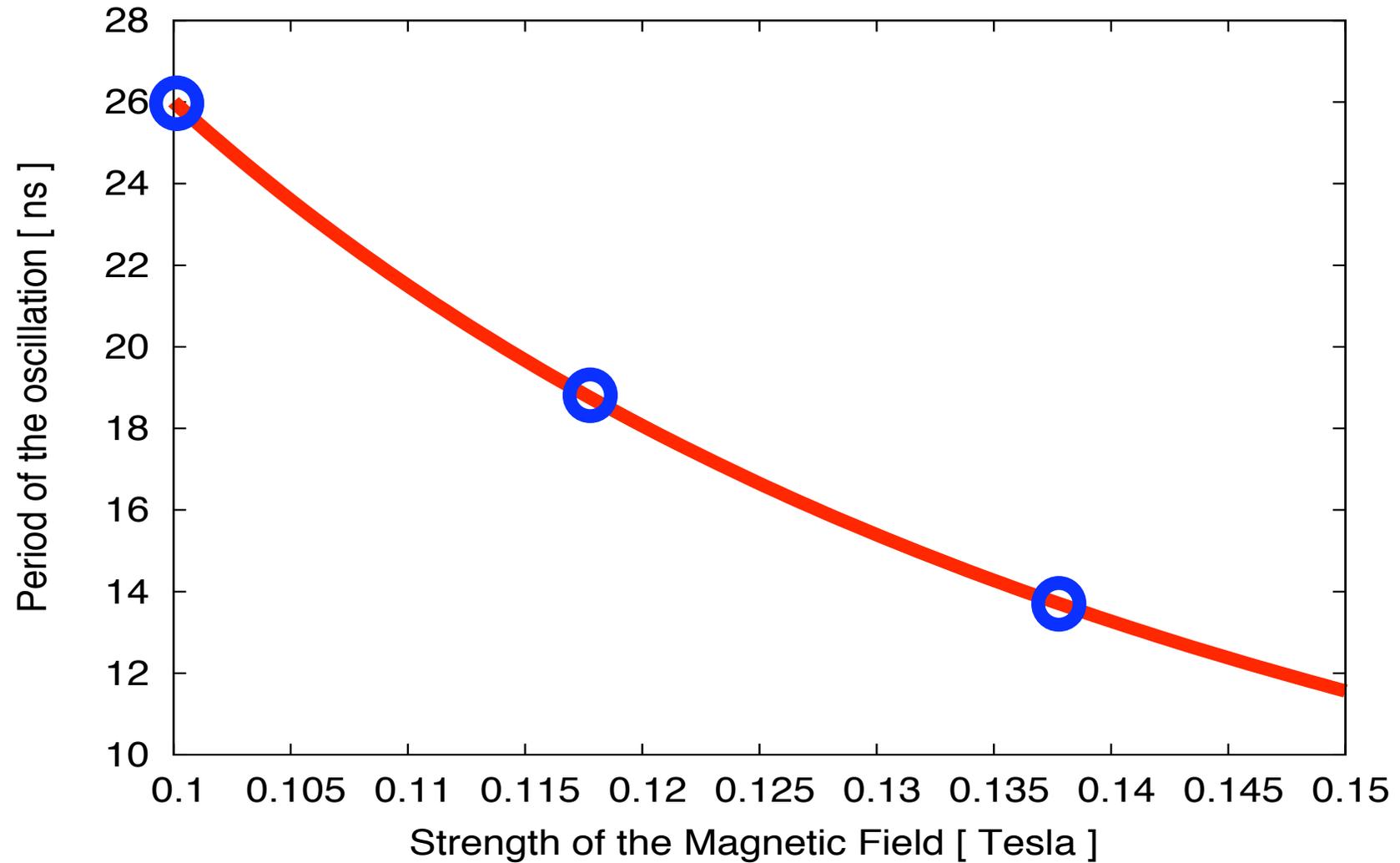
γ 線の出る方向分布

< γ 線の出る方向の確率分布>



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Psを作る際の密度行列 >

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

(θ, φ) : 磁場に対するβ+の偏極方向

P : β+の偏極率

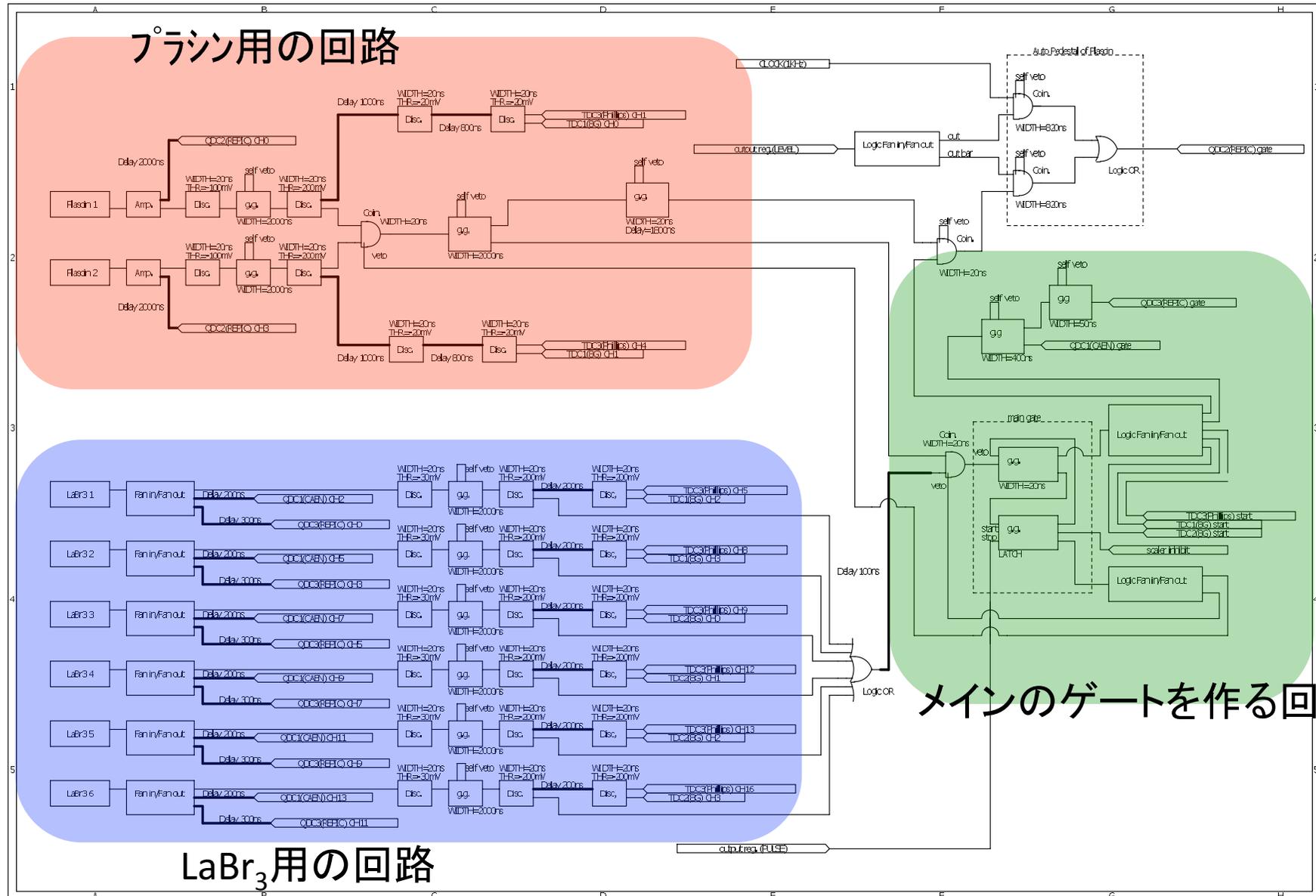
磁場による混合は無視している



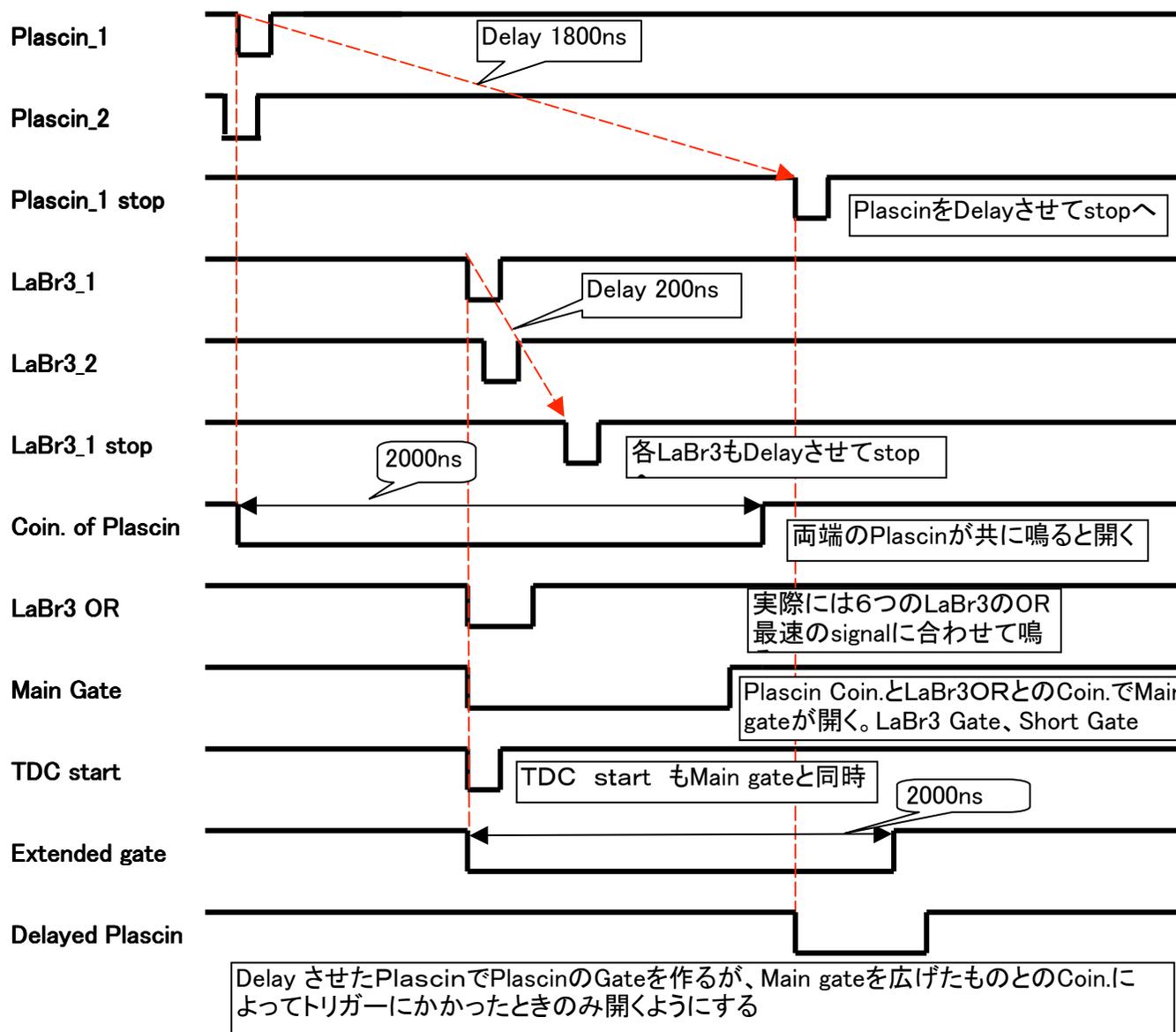
で囲った項が重ね合わせ
状態を作るのに効く

→ 磁場と直交したβ+偏極が必要

詳細な回路図



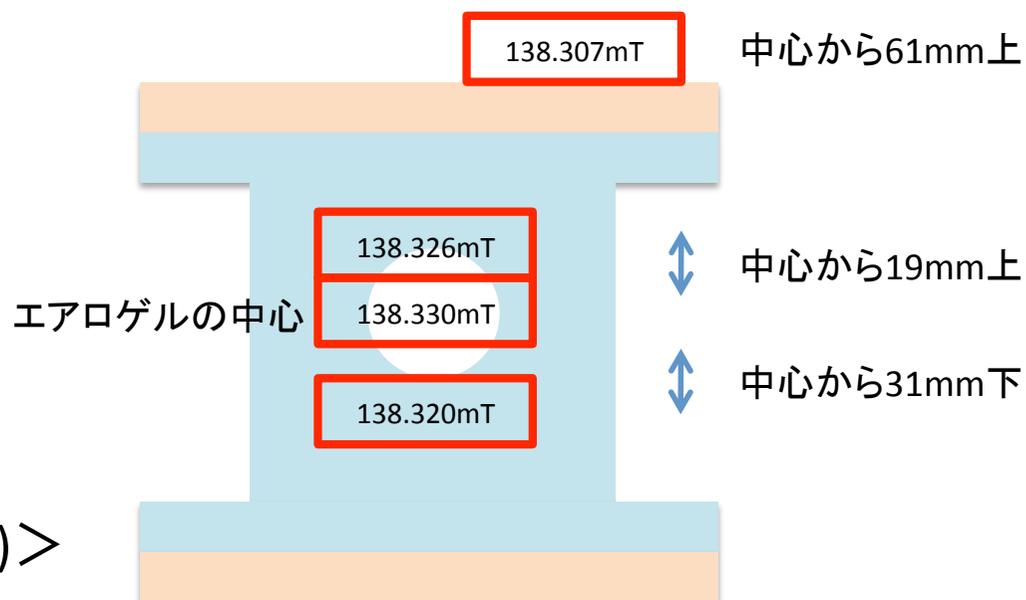
タイミングチャート



磁場の強さ

<磁場の強さの一覧(実測)>

	エアロゲル中央の磁場の測定値 (mT)
118mT (偏極上向き)	118.826 ± 0.010
118mT (偏極下向き)	118.824 ± 0.010
138mT (偏極上向き)	138.330 ± 0.007
138mT (偏極下向き)	138.328 ± 0.007
100mT (偏極上向き)	100.595 ± 0.007
100mT (偏極下向き)	100.593 ± 0.007



<磁場の測定値の一例 (138mT)>