

ポジトロニウム超微細構造の 量子振動を用いた測定II (解析・考察)

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、斎藤晴雄^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

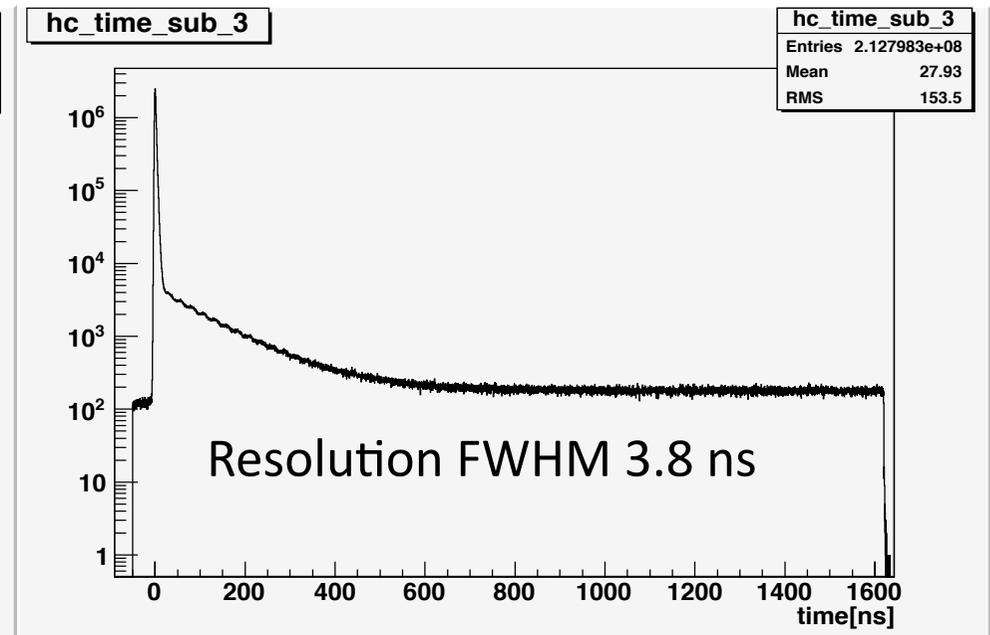
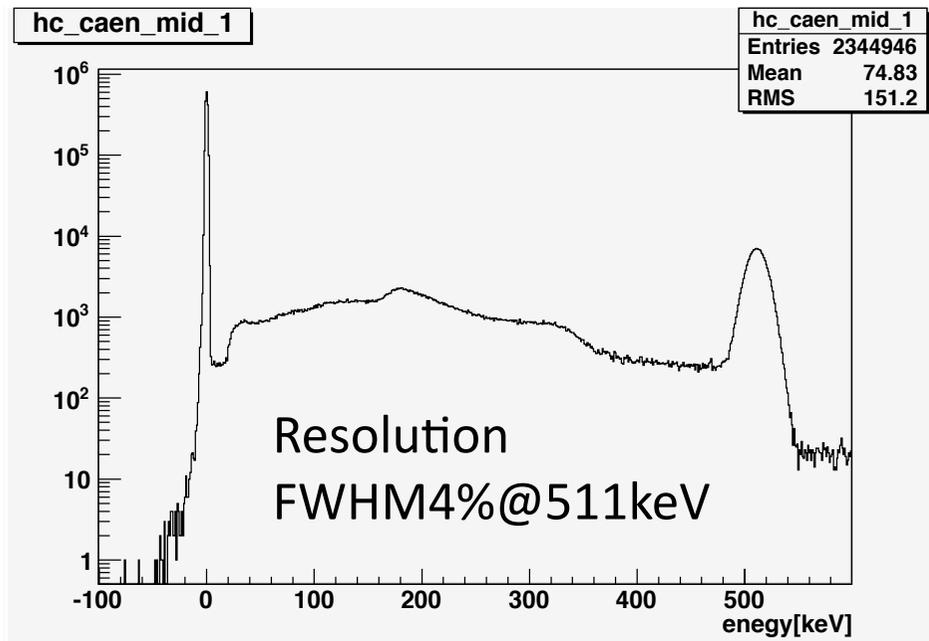
概要

- 測定データ概要
- 解析手法
- 解析
 - 逆位相同士の差を用いた解析
 - そのままのTiming Spectrumを解析
- Conclusion

測定データ

今回の解析に用いるRun

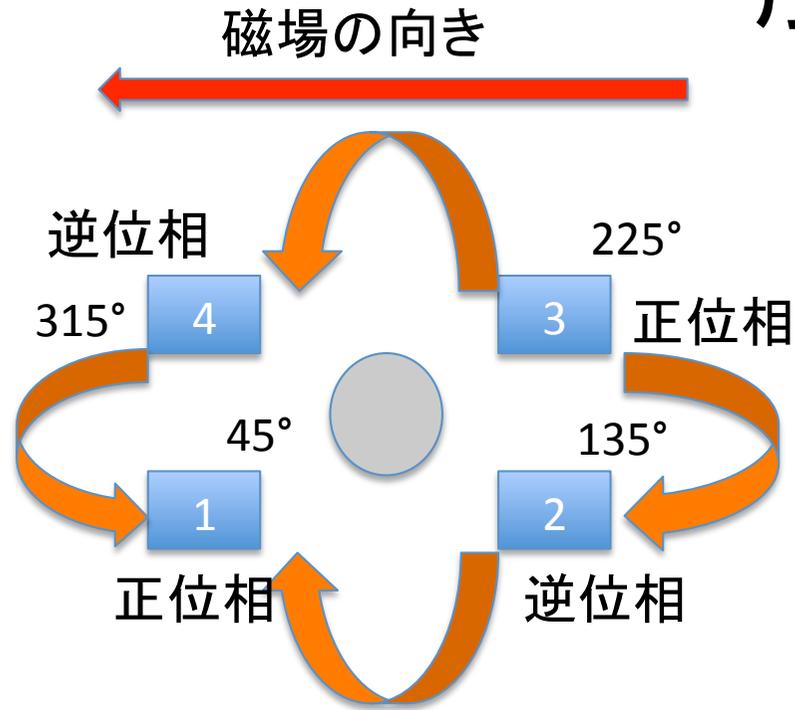
磁場(周期)	偏極の向き	期間	データ量
118mT(19ns)	上向き	3/2 11時 ~ 3/3 12時	6.5×10^7
118mT(19ns)	下向き	3/3 17時 ~ 3/4 13時	4.9×10^7
138mT(14ns)	下向き	3/4 15時 ~ 3/6 08時	9.7×10^7
138mT(14ns)	上向き	3/6 12時 ~ 3/9 13時	1.9×10^8
100mT(26ns)	上向き	3/9 14時 ~ 3/13 08時	2.1×10^8



100mTの時のenergy spectrum
他の磁場でも殆どGain同じ
Energy Resolutionも同程度

Timing spectrum
 β^+ と γ の時間差
→positroniumの寿命曲線

解析方法



寿命曲線が時間によって振動する。
その周期→HFS

Detectorの位置によって異なる位相
(1-3と2-4は同位相)

解析方法には2通り考えられる

①正位相から逆位相を引き算して、

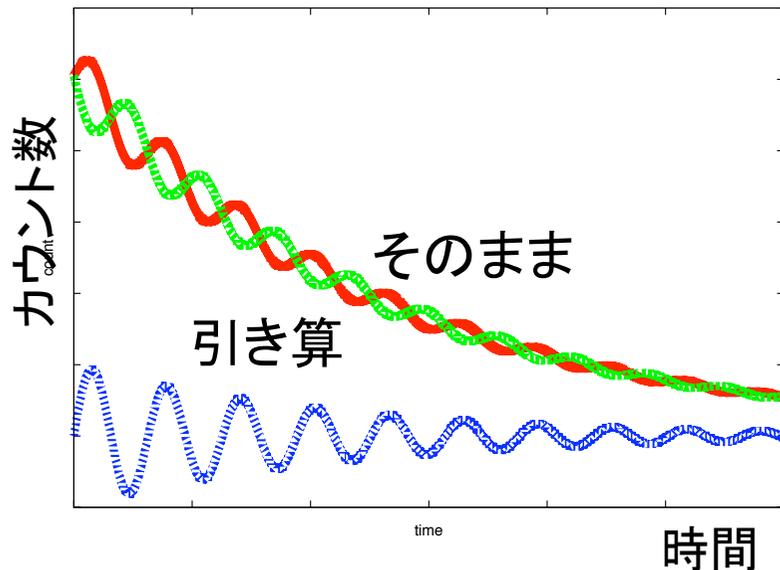
$$D \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(\Omega t + \theta_0) \quad \text{でFit}$$

②そのままのTiming Spectrumに対して、

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

でFit

今回は両方とも行い、それぞれを比較した

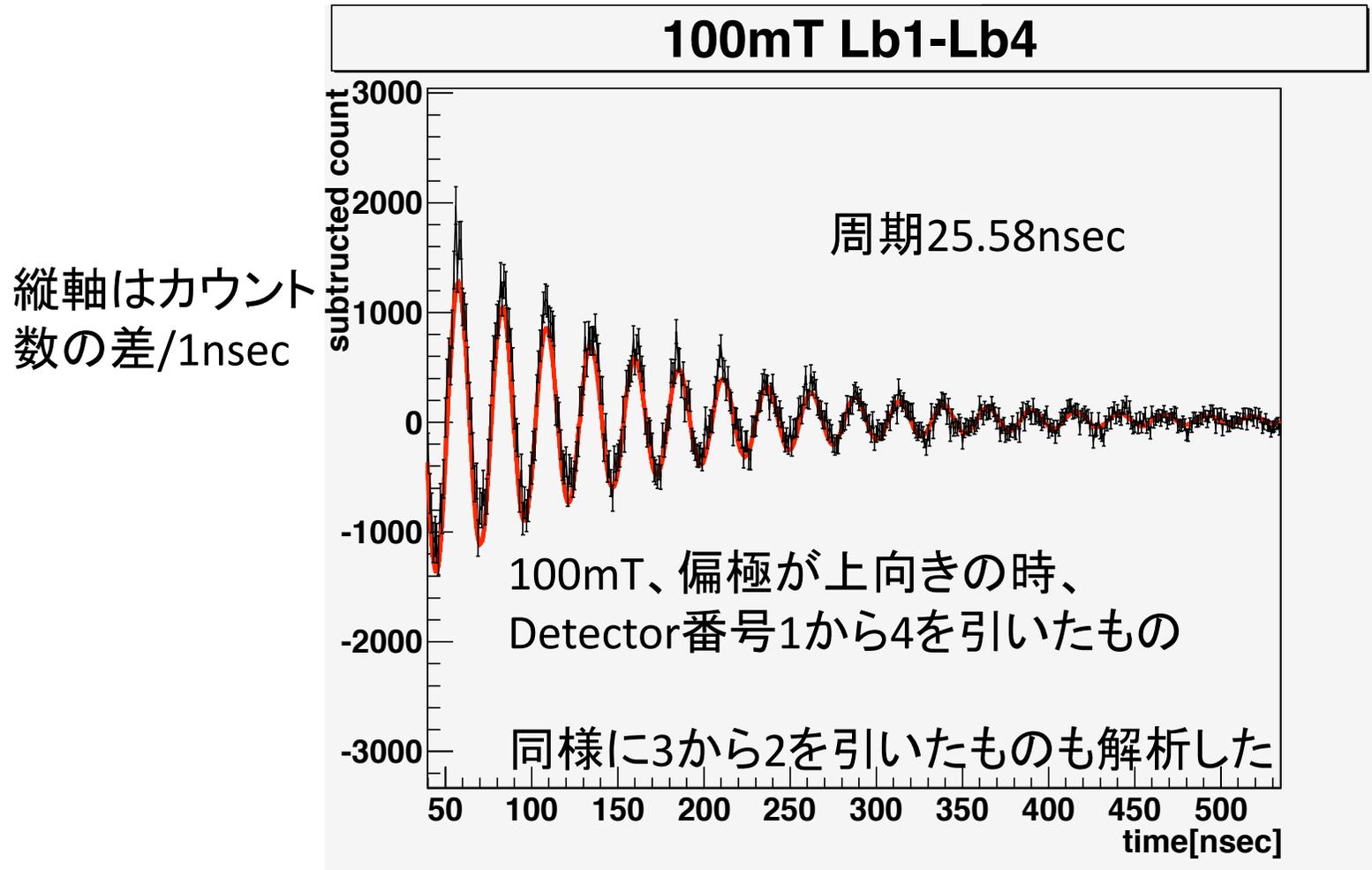


解析①

逆位相成分の差を用いた解析

逆位相同士の違い

Normalizationは行わずそのまま引き算



赤線: $D \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(\Omega t + \theta_0)$ でFit

他の磁場、偏極の向きに対して同様のFitを行った

Fittingの結果

磁場 [mT]	偏極の向き	用いた組	Fitで得られた周期[nsec]	HFS[GHz]
100	上	1-4	25.58±0.02	203.3±0.2
100	上	3-2	25.56±0.02	203.1±0.2
118	上	1-4	18.35±0.02	203.5±0.2
118	上	3-2	18.34±0.02	203.3±0.2
118	下	1-4	18.36±0.02	203.6±0.2
118	下	3-2	18.35±0.02	203.4±0.2
138	上	1-4	13.54±0.01	203.4±0.1
138	上	3-2	13.54±0.01	203.4±0.1
138	下	1-4	13.55±0.01	203.5±0.2
138	下	3-2	13.56±0.01	203.6±0.1

磁場によって異なる周期となっている

(100mT→26nsec, 118mT→19nsec, 138mT→14nsec)

異なる磁場、偏極、DetectorでConsistentなHFSの値が出てきた

解析②

そのままのTiming Spectrumを解析

引き算を使わないフィット

引き算の時と違い、exponential成分の上に振動がのっている。

Decay rateは

$$\gamma_2 = \gamma_t$$

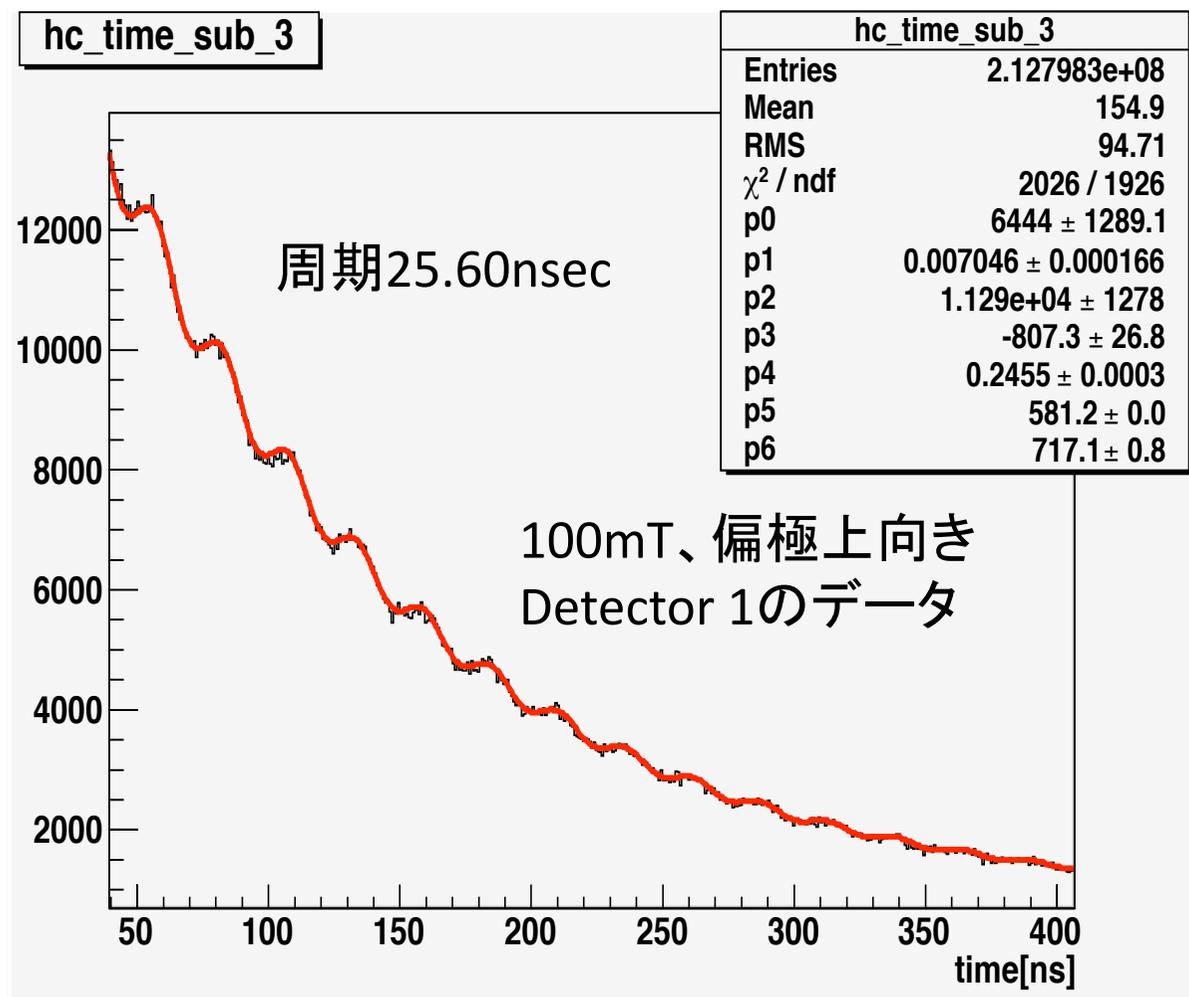
:物質の効果含む

$$\gamma_1 = \gamma_t + \frac{\chi^2}{4} \gamma_s$$

:磁場の効果 + 物質の効果

の2-component.

今回は γ_2 をFreeパラメータにし、磁場の効果は計算で求めた。



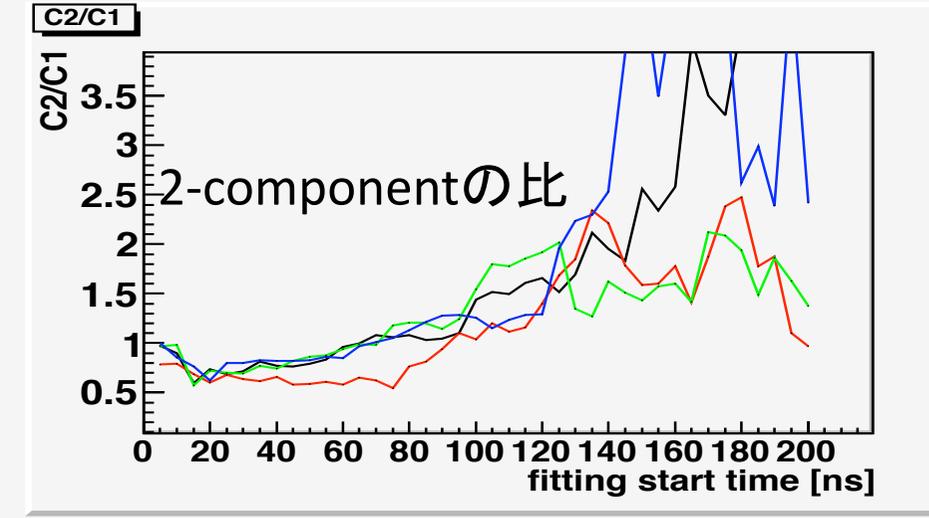
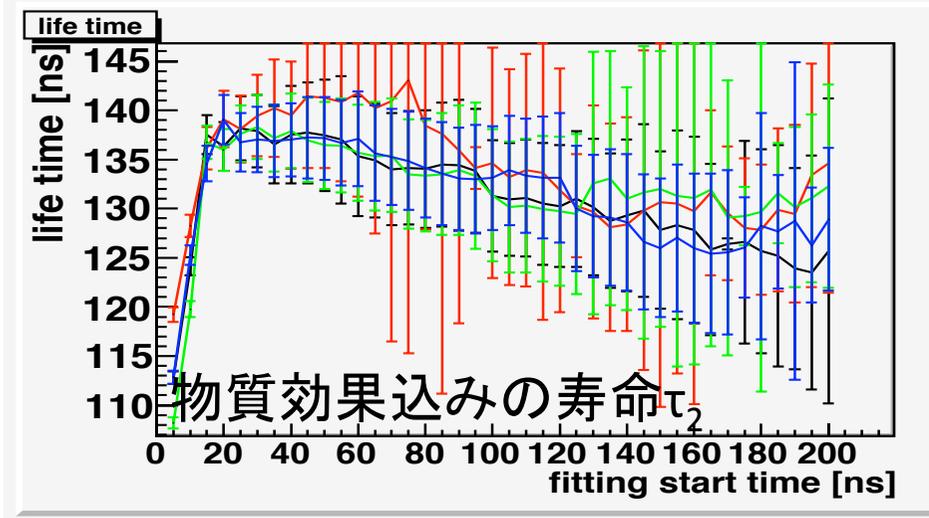
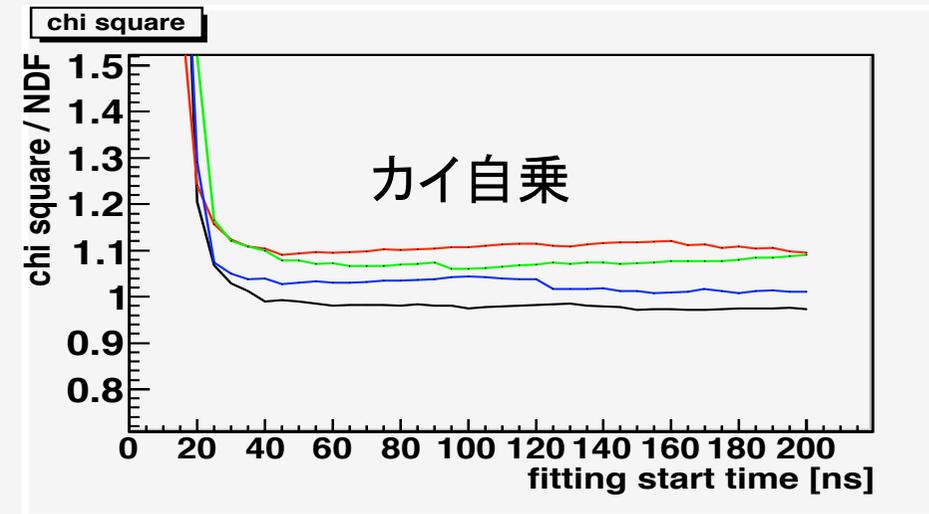
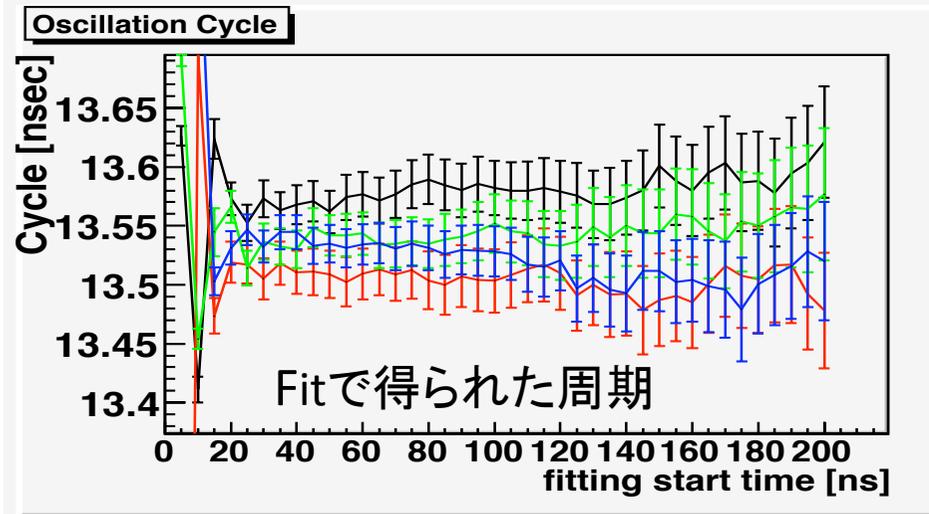
$$C_1 \exp(-\gamma_1 t) + C_2 \exp(-\gamma_2 t) + D \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(\Omega t + \theta_0) \quad \text{でFitしたのが上図の赤線}$$

Fitting方法の研究①

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

- $t < 40 \text{ nsec}$: 熱化の影響 ($\gamma_2 \rightarrow \gamma_2(t)$)
 - Fitting start timeを動かし無視できる場所を探す
- 2 componentの影響
 - 例: 磁場138mTのとき125nsecと92nsecの2つの寿命
 - 物質の効果で142nsec \rightarrow 125nsec (不定性大きい)
 - 磁場によるp-Ps成分混合で92nsec
 - 互いに近い値なのでパラメタ分離 (C_1 と C_2) が困難

Fitting方法の研究② 一番磁場による混合の影響の大きい138mTを使用



黒:Detector1 赤:Detector2 緑:Detector3 青:Detector4

どのDetectorも40nsec以降はカイ自乗値安定

寿命は安定していないが125~135nsec→シリカエアロジェル中の寿命とConsistent

2-Componentは分離できていないが、振動周期には効かないことがわかった。

結果①

以上で決めたFitting Procedure:
“40nsec以降を γ_2 FreeにしてFit”

$C_1 \exp(-\gamma_1 t) + C_2 \exp(-\gamma_2 t) + D \exp\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} t\right) \sin(\Omega t + \theta_0)$ にそって他のデータもFitした

磁場 [mT]	偏極の向き	Detector 番号	Fitで得られた周期[nsec]	HFS[GHz]
100	上	1	25.60±0.03	203.4±0.2
100	上	2	25.56±0.03	203.1±0.2
100	上	3	25.58±0.03	203.2±0.2
100	上	4	25.55±0.02	203.0±0.1
118	上	1	18.32±0.04	203.2±0.4
118	上	2	18.36±0.03	203.5±0.4
118	上	3	18.34±0.04	203.3±0.4
118	上	4	18.31±0.03	203.0±0.3
118	下	1	18.42±0.04	204.2±0.5
118	下	2	18.34±0.03	203.3±0.4

次ページに続く...

結果②

磁場 [mT]	偏極の向き	Detector 番号	Fitで得られた周期[nsec]	HFS[GHz]
118	下	3	18.36±0.03	203.5±0.3
118	下	4	18.31±0.03	202.9±0.4
138	上	1	13.54±0.01	203.4±0.2
138	上	2	13.54±0.01	203.5±0.2
138	上	3	13.55±0.01	203.5±0.2
138	上	4	13.53±0.01	203.3±0.1
138	下	1	13.58±0.02	203.9±0.3
138	下	2	13.51±0.03	203.0±0.4
138	下	3	13.54±0.01	203.4±0.2
138	下	4	13.55±0.01	203.5±0.2

磁場、偏極、Detectorによらず Consistent である

Conclusion

独立なデータをCombineして最終結果を出した。系統誤差は磁場のみ考慮。

引き算を用いた場合

203.42 ± 0.05 (stat) ± 0.03 (sys) GHz

統計誤差で250ppm

理論値(A.Czarnecki et al.)

203.39201 ± 0.00046

引き算を用いない場合

203.34 ± 0.06 (stat) ± 0.03 (sys) GHz

統計誤差で300ppm

いずれも統計誤差の範囲内でConsistentである。

過去の実験(Fan et al.)の精度1.7%を**2桁更新**する事に成功した。

現在も別の磁場で測定中で、最終的に統計誤差100ppmを目指している。

Spin緩和の効果はまだ確認できていない。

→統計を増やしてSpin緩和の効果の観測を目指す

Back up

今後の予定

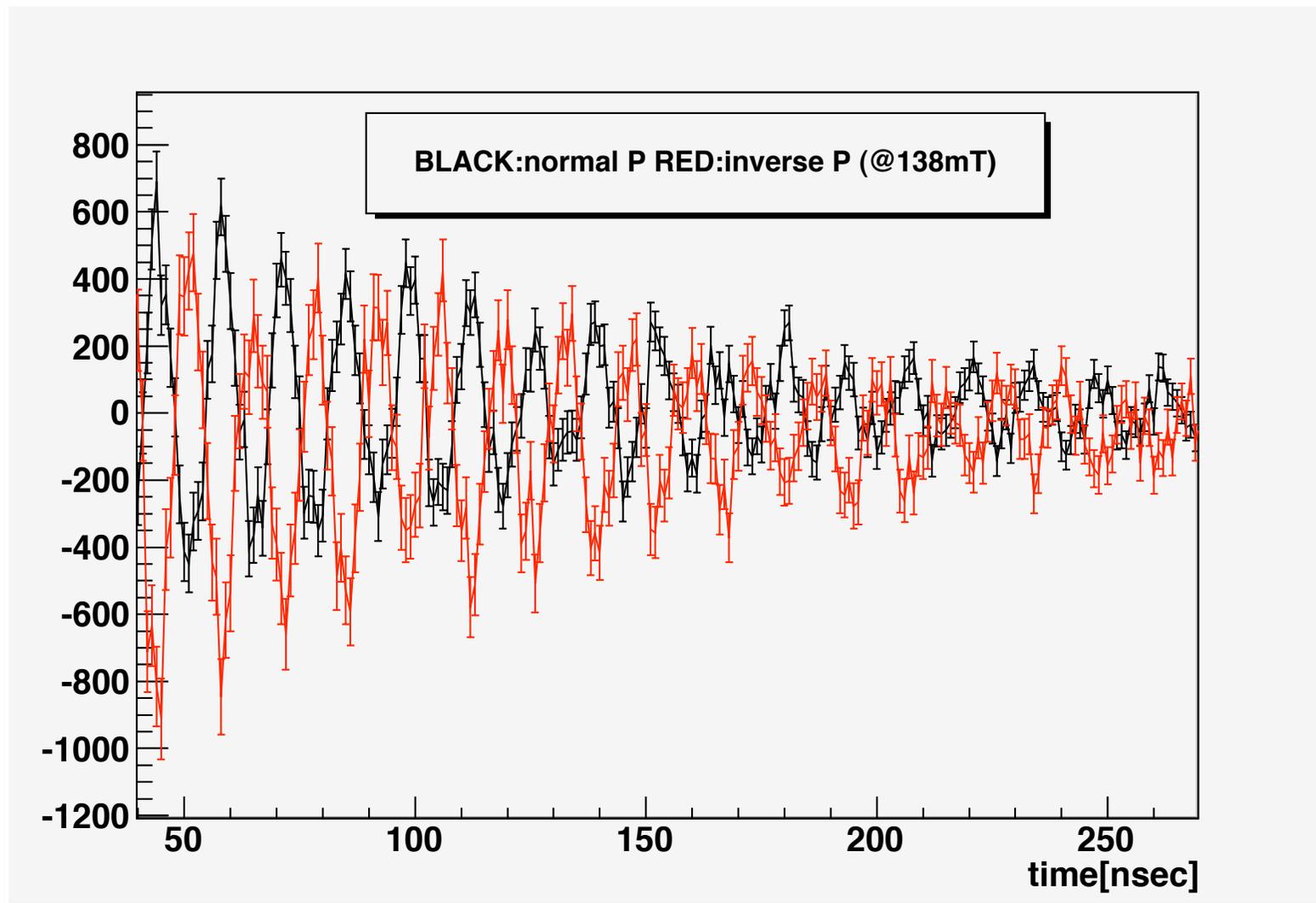
- 現在KEKで装置が稼働中
- 異なる磁場で統計をためている
- 4月初めまで運用予定
 - 全部でおよそ20日分のデータ
 - 統計誤差1/2→100ppmを目指す

磁場の値と系統誤差

呼び方	偏極の向き	正確な値[mT]	相対誤差[ppm]
100mT	上	100.595 ± 0.007	70
	下	100.590 ± 0.007	70
118mT	上	118.83 ± 0.01	85
	下	118.82 ± 0.01	85
138mT	上	138.330 ± 0.007	50
	下	138.328 ± 0.007	50

HFSに対して磁場は二乗で効いてくるので、表の2倍の系統誤差がHFSの推定には入ってくる。

偏極反転(138mT 引き算)



黒が偏極上向き、赤が偏極下向きの時のデータ。
位相は逆転している (減衰振動の係数Dは偏極Pに比例する)

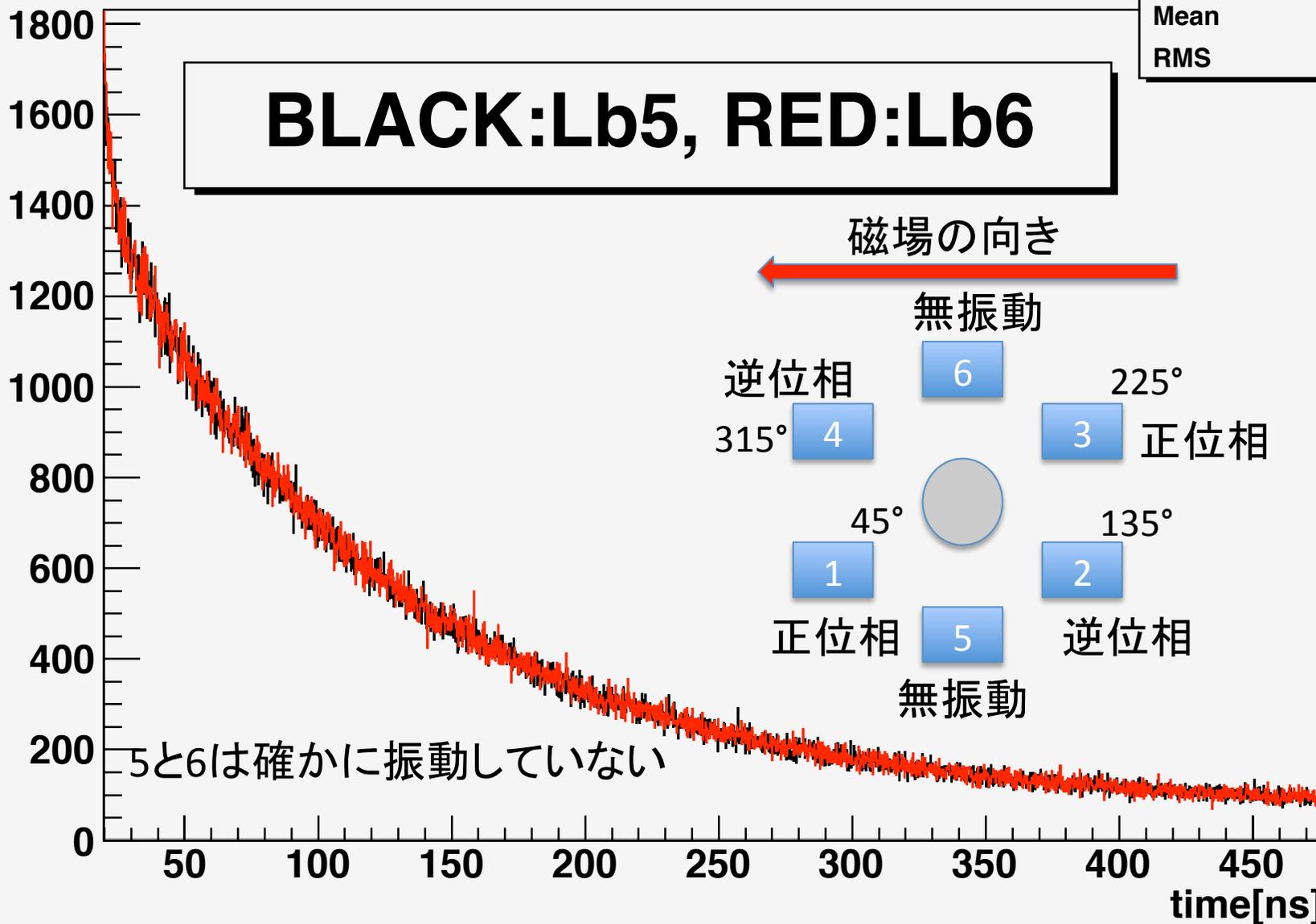
無振動成分

hc_time_sub_7

hc_time_sub_7

Entries	1.968696e+08
Mean	146.4
RMS	113.6

BLACK:Lb5, RED:Lb6



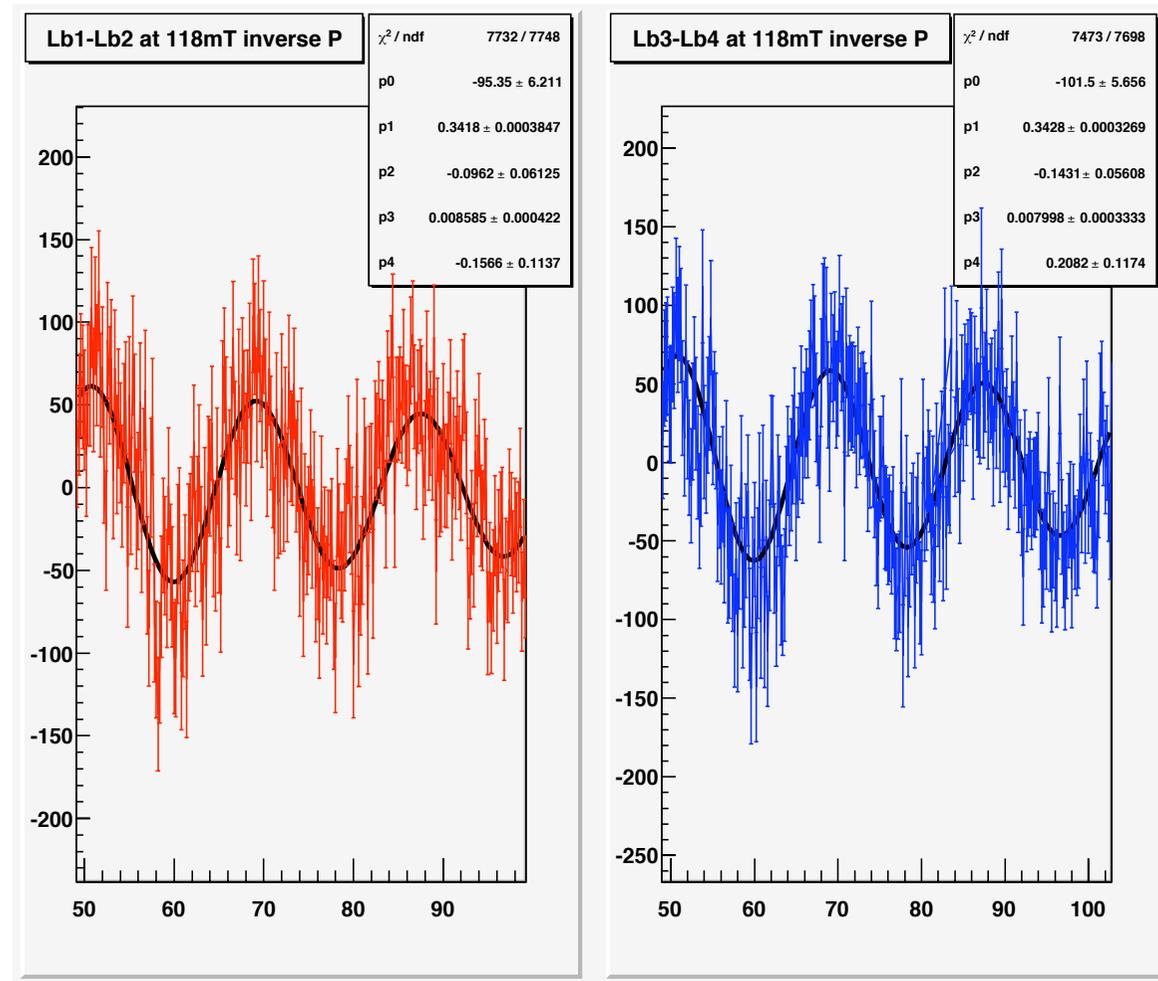
スピン緩和の解析法

- 磁場を印加せず寿命測定→ γ_2
- γ_2 を固定し、磁場印加下で2-Component→ γ_1
- 減衰振動の減衰具合が

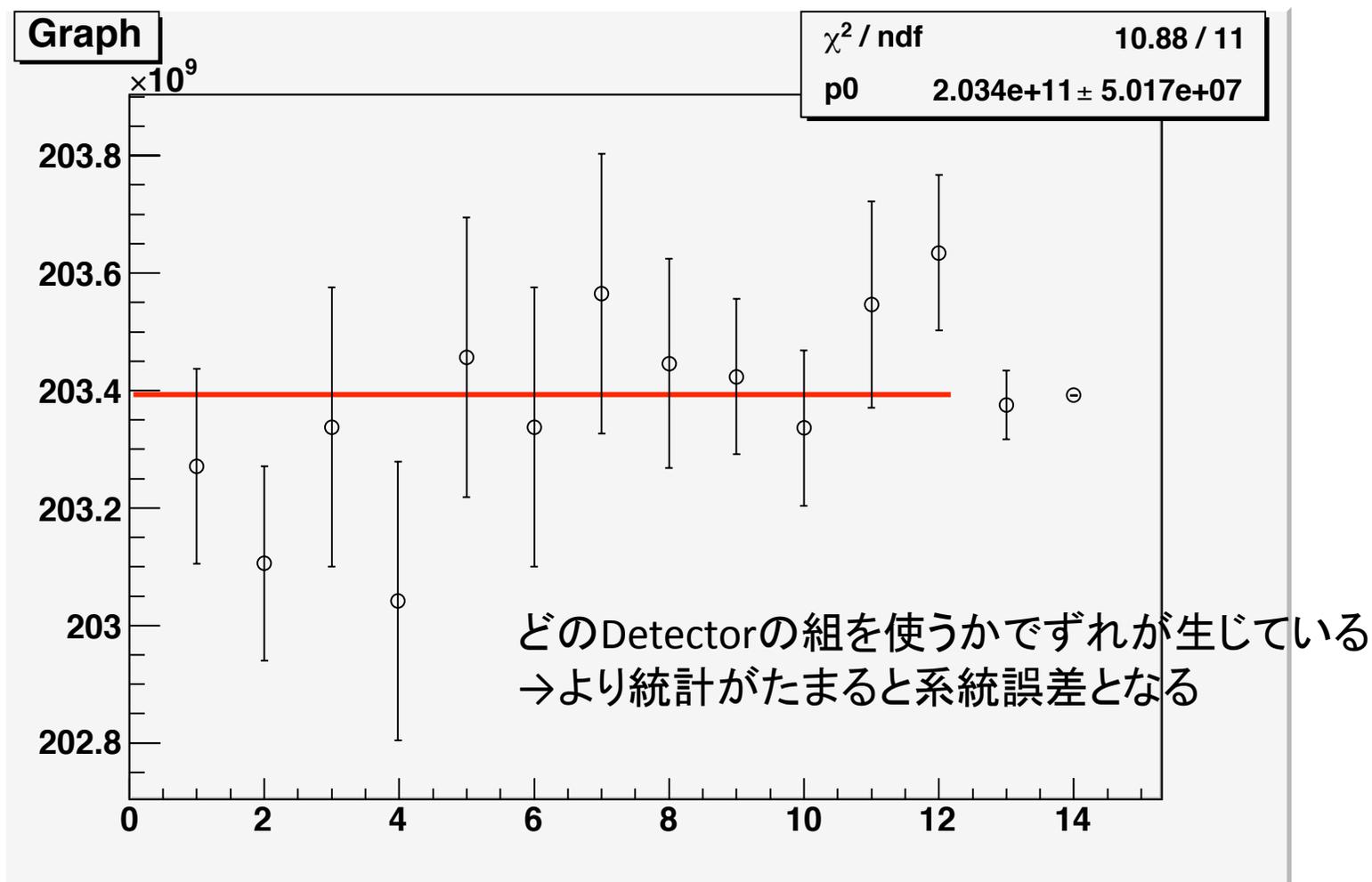
$\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$ からどれだけずれるか
→スピン緩和の効果そのもの

- 問題点
 - 寿命が上手くFit出来ていない
 - 2-Component Fitが現状では困難

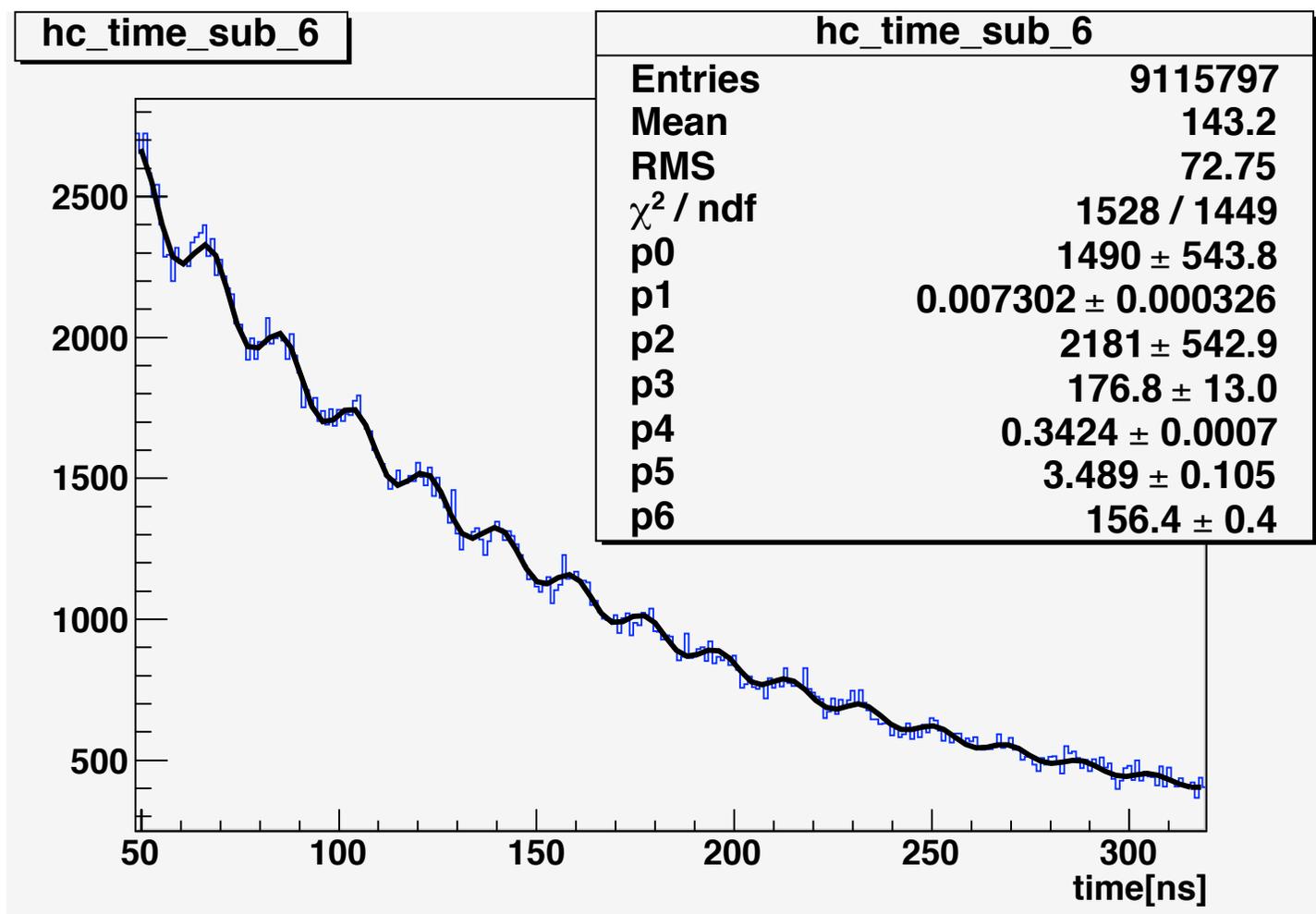
引き算Fitの様子



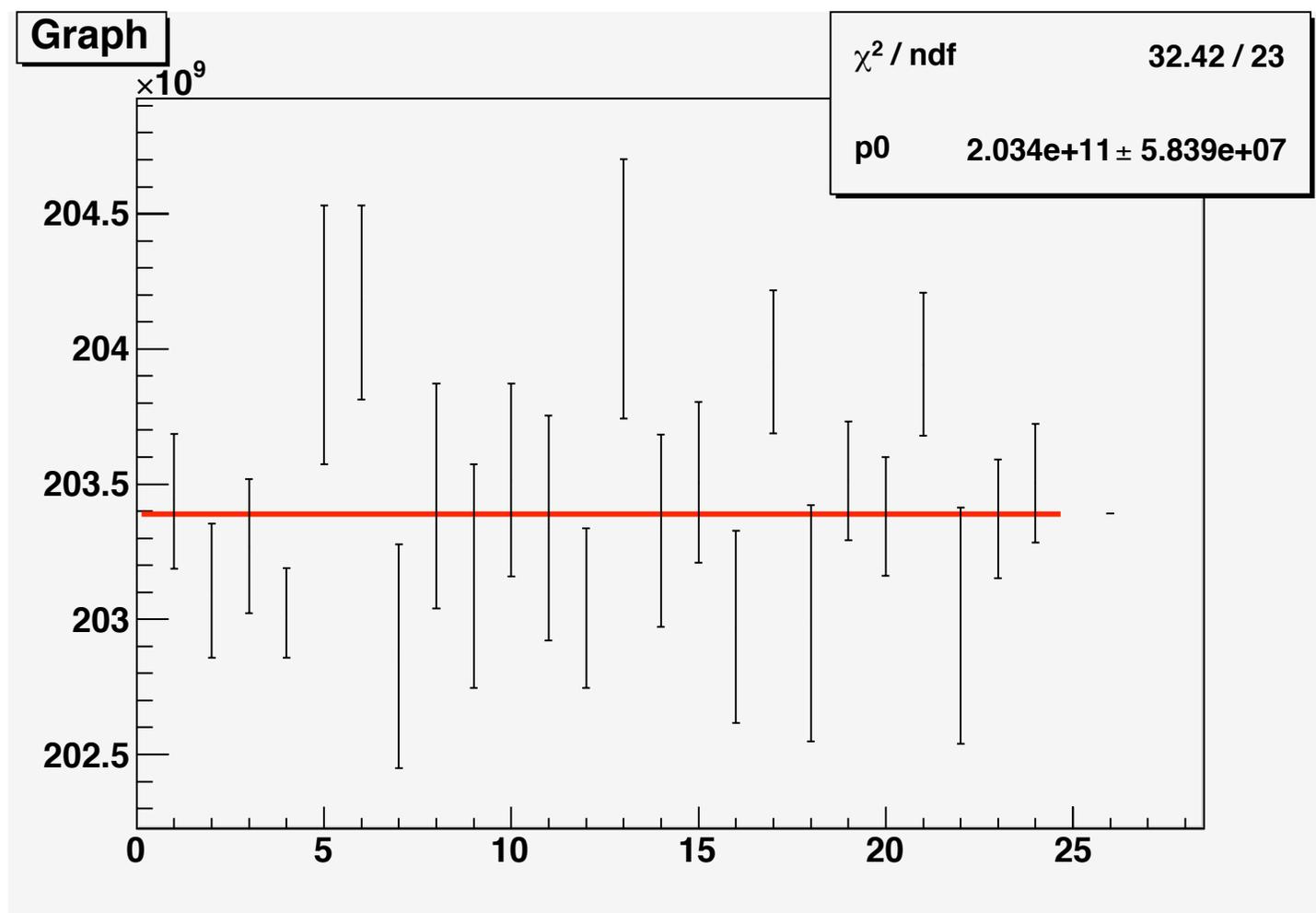
引き算の結果(拡大図)



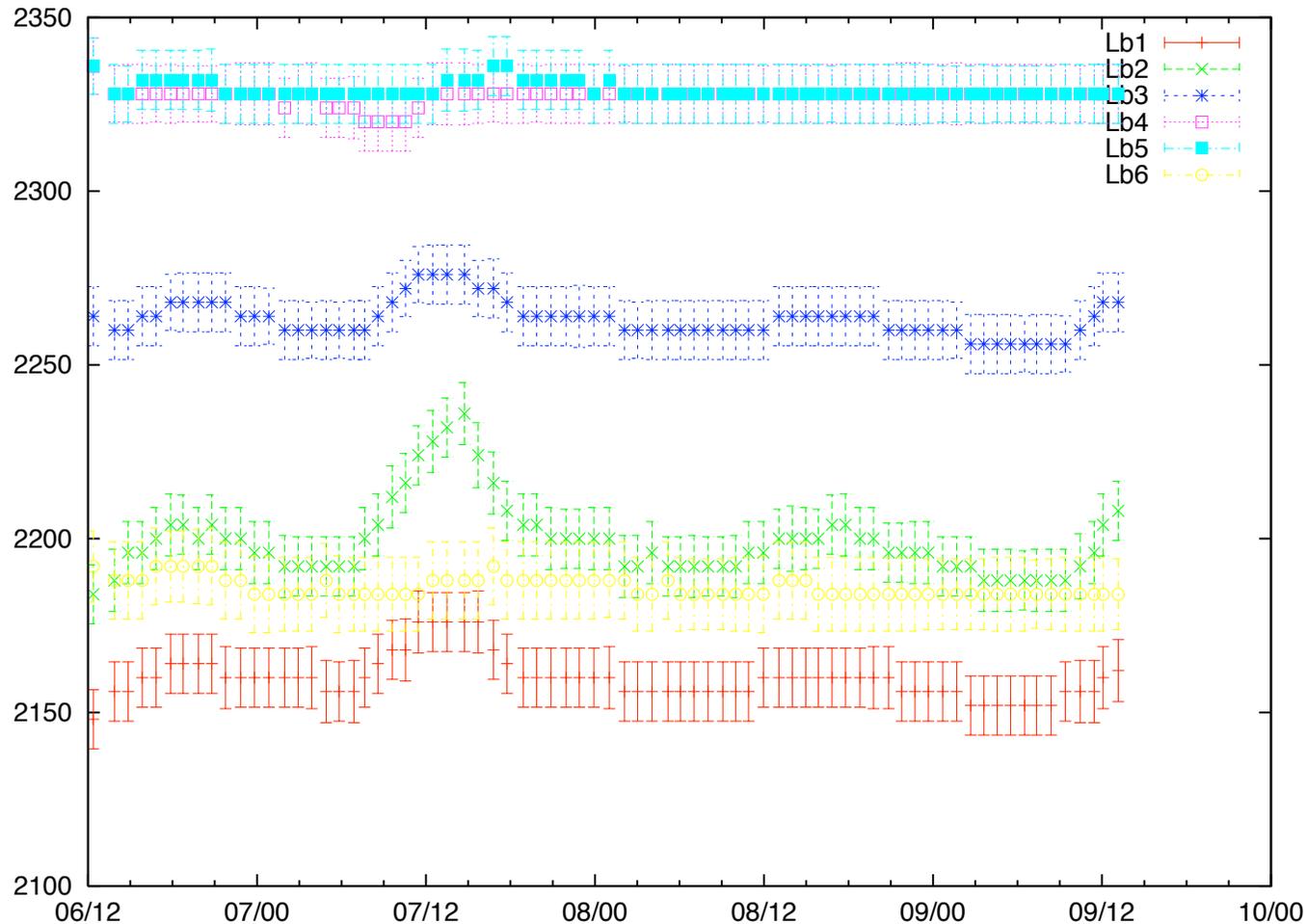
引き算無しFitの様子



引き算無しFitの拡大図



Pedestalの時間揺らぎ



Detector 1～3に用いていたFan in/Fan outが一日周期で50chの揺らぎを出していた
→現在進行中のRunでは性能の良いものに変えてある

過去の実験の問題点

- BaryshevskyやFanの用いている近似は1000ppm以下では成り立たない
 - 1000ppm弱の補正がかかる
 - 今回の実験(数百ppm)では効いてくる
- 計算に用いるのはボーア磁子 μ_B ではなく異常磁気モーメントも含めた電子の磁気能率 μ_e
 - 0.1%ほどの差が生じる \rightarrow 202GHzくらいになる
 - Fanの計算は μ_B を用いてはいないだろうか？

引き算の問題点

- 異なるDetectorの計数を引いている



- 微妙に異なる周波数の引き算

$$\sin(\omega t) - \sin((\omega - \delta)t) = 2 \cos\left[\left(\omega - \frac{\delta}{2}\right)t\right] \sin\left(\frac{\delta}{2}t\right)$$

うなり項

- 今後統計誤差が減ってくると、系統誤差として現れてくる
- ジオメトリの微妙な非対称性からくる統計数の差もバイアスとなりうる

→引き算を使わない手法の解析も行った！

引き算を使わないフィット

引き算の時と違い、base lineについて考察しなければならない。

問題となるもの:

- ・物質の効果 $\gamma_{pick-off}$
- ・磁気クエンチング $\chi^2/4\gamma_s$

Decay rateは

$$\gamma_2 = \gamma_t + \gamma_{pick-off}$$

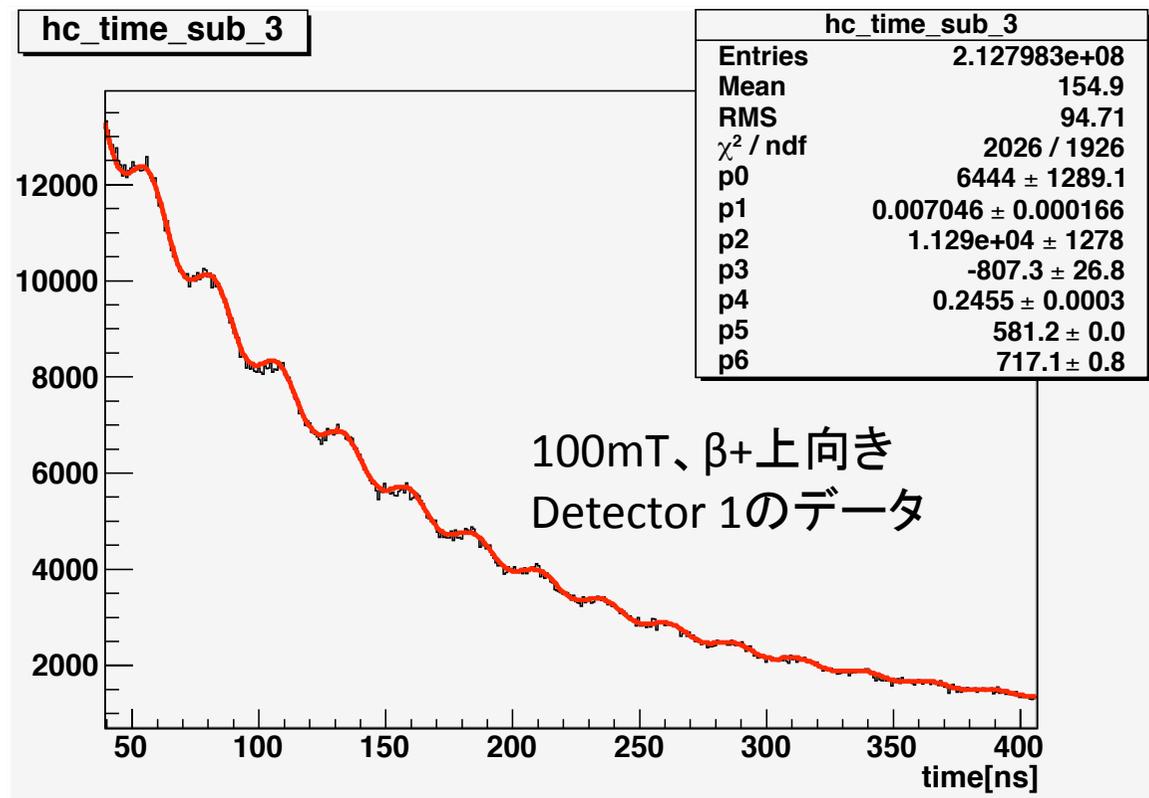
$$\gamma_1 = \gamma_t + \frac{\chi^2}{4} \gamma_s + \gamma_{pick-off}$$

の2-component.

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

でFitしたのが上図の赤線

o- Ps の熱化が遅く、短時間では物質の効果が時間の関数になる
今回はその効果が無視できうる時間領域を調べた。

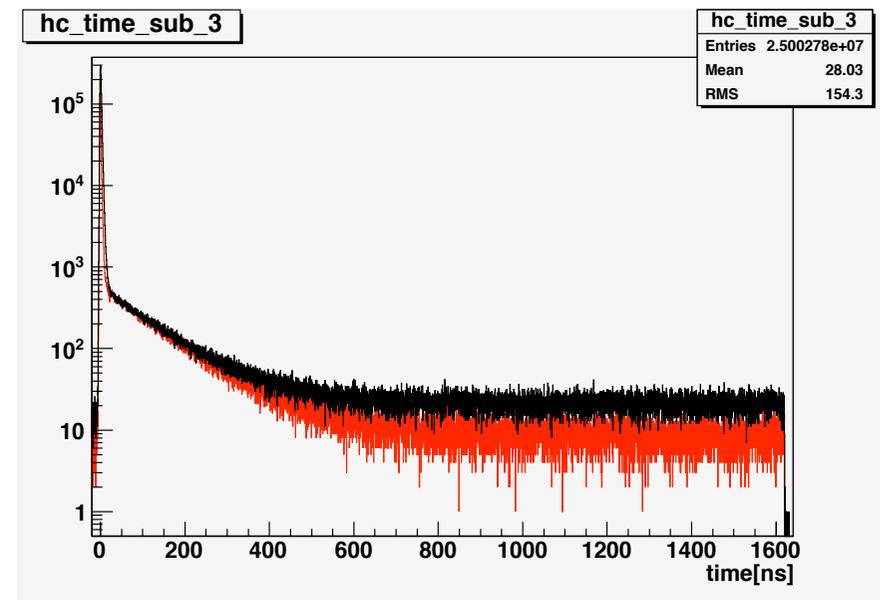


エネルギーカット①

Compton Free Cut

- 2γ 崩壊の影響の少ない領域(340~511- $n\sigma$ [keV])
- カット無しに比べ統計量1/10以下
- しかし統計量同じに合わせるとフィッティング精度2.5倍
→S/Nはよい
- 差し引き精度1/2

黒:カットなし、赤:CFカット



統計量が増えると系統誤差が少ないので正確なフィットが出来る可能性
今回は統計誤差に埋もれ、カット無しより不利
→今後の課題

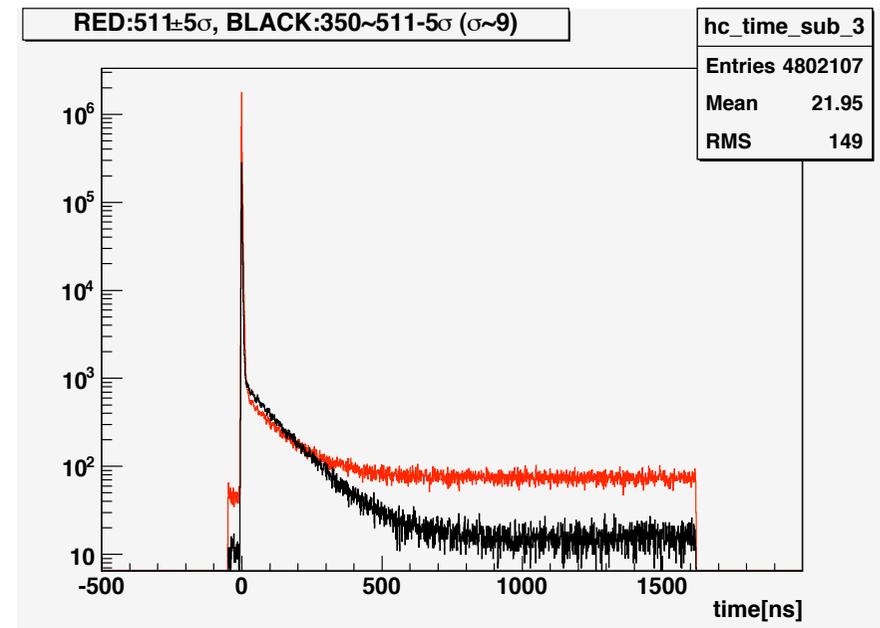
エネルギーカット②

511keV周囲でカット

- 深い振動成分がある
- 2γ 成分も多い
- CFに比べ統計量5倍
- フィテイングエラー2倍
- S/Nは非常に悪い

- 511keVのComptonが多い
340keV以下も同様

CFと511keVカットを重ねた図



おいしい成分も多いが、それ以上にゴミが多いため、511keV周囲はなるべく避けるべき
CFの511keV側も、近づくほどに寿命が短くなると同時にエラーが増加→5 σ で十分

引き算無しFitのまとめ

- 現状では統計を重視→エネルギーカット無し
(ただしWalkのある100keV以下は除去)
- 複数のDetectorで同時に取ったイベント除去
- 時間領域は熱化の影響が無視できる40nsec以降(それ以降寿命は変わるが周期は不変)
- 磁気クエンチングの項は低磁場ではFitしづらい
→磁場無しの場合で物質の効果を含めた γ_2 を使いたいが、不定性が大きく系統誤差の原因に
→今回は γ_2 をFreeにしてFitした