

宇宙線ミュオンを用いたg因子測定

名古屋大学 N研 M1

須江 祐貴

ミューオンのg因子

ミューオン

- 質量 $m_\mu = 105.6 \text{ MeV}$ の荷電レプトン
- 寿命 $\tau = 2.197 \text{ } \mu\text{sec}$ で $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$ 崩壊を起こす
- 二次宇宙線として地上に大量に降り注いでいる

スピン1/2をもつ荷電粒子はスピン磁気モーメントを持ち以下の式で与えられる。

$$\vec{\mu}_s = \frac{ge}{2m} \vec{s}$$

$\vec{\mu}_s$ はスピン磁気モーメント, e は電荷素量, m は質量, \vec{s} はスピン,
 g がg因子である

最低次ではこのg因子は2という値をとる

(しかし、実際にはQEDなどの効果によりわずかに2という値からわずかにずれ、およそ2.00233・・・)

g因子測定

宇宙線ミュオンの以下の特徴を利用し

g因子の最低次での測定を目指す

- 宇宙線ミュオンはスピン偏極をもつ
- $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$ 崩壊による電子・陽電子はミュオンのスピン方向にわずかに放出されやすい

$$N_{Upper}:N_{Lower} \sim 1.1:1$$

- 磁場中でのミュオンの磁気モーメントは以下の周期でラーモア歳差運動を行う

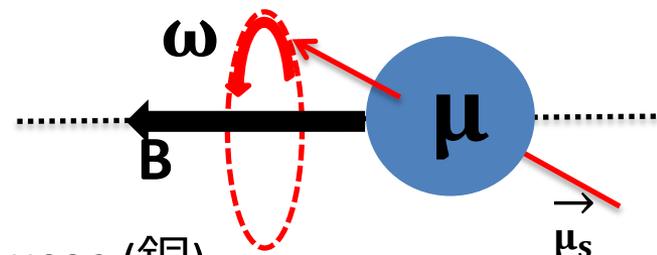
$$\omega = \frac{geB}{2m_\mu}$$

- 物質中における μ^+ と μ^- の寿命が大きく異なる

$$\tau_+ \sim 2.197 \text{ } \mu\text{sec}$$

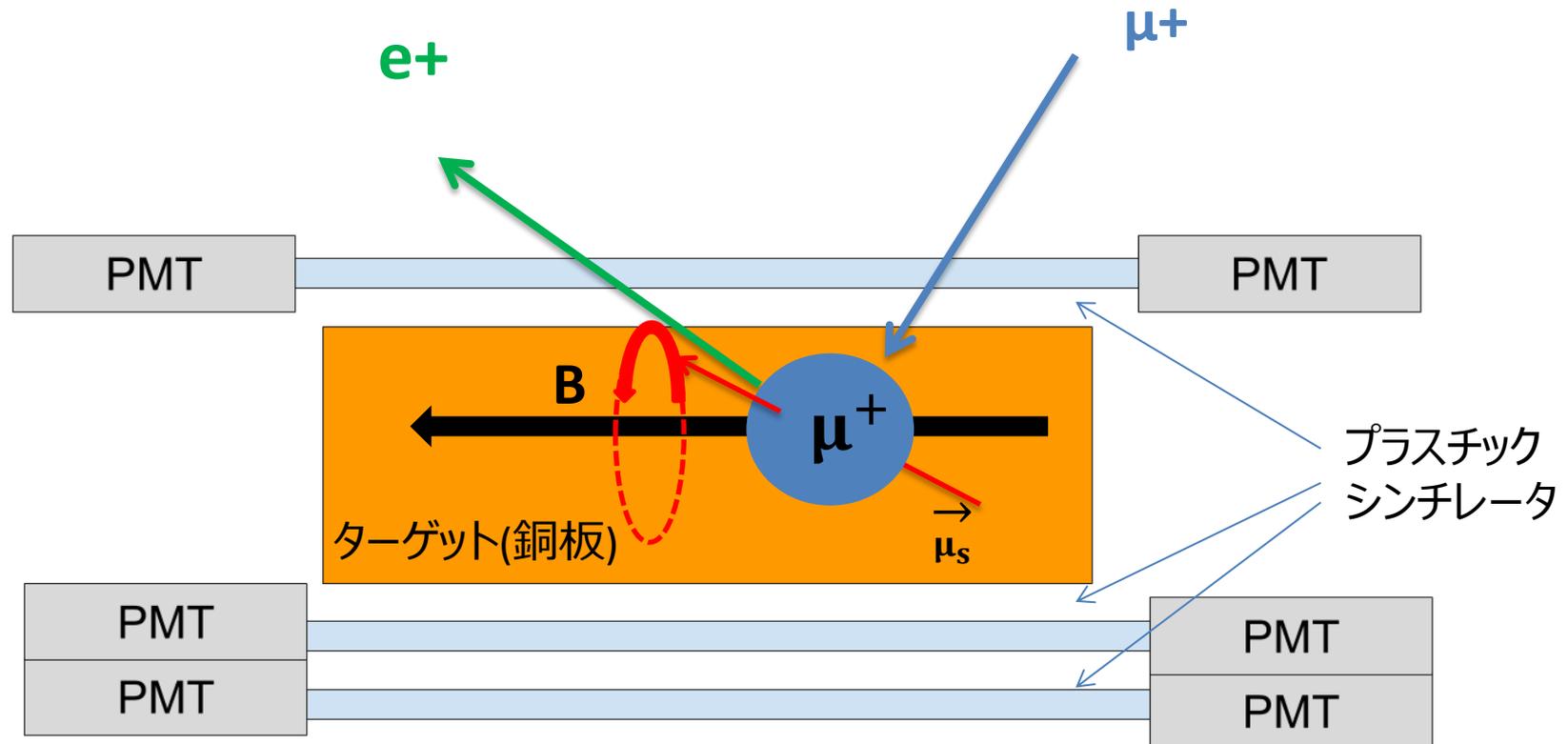
$$\tau_- \sim 0.16 \text{ } \mu\text{sec (銅)}$$

→崩壊時間から μ^- の信号を大きく削減し、 μ^+ での測定を行う



実験手法

- ✓ ターゲットである銅板中に地面に水平な方向の磁場をかける
- ✓ ミューオンをターゲットである銅板中に静止させラーモア歳差運動をさせる
- ✓ 崩壊時間と陽電子の放出方向(上下)をシンチレーションカウンタとTDCによって測定する



磁場の生成

磁場への要求はターゲットである銅板内でのなるべく強力で一様な磁場

$$\text{ラーモア歳差運動周期: } T_{larmor} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{4\pi m_{\mu}}{geB}$$

製作する磁場に対する要求

- 磁場分布
- 電源電圧・電流
- 発熱

ソレノイドコイルを設計



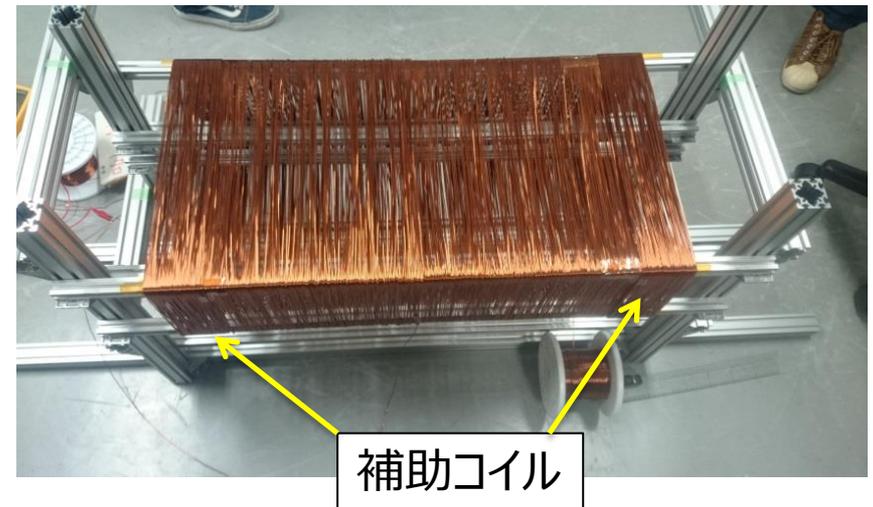
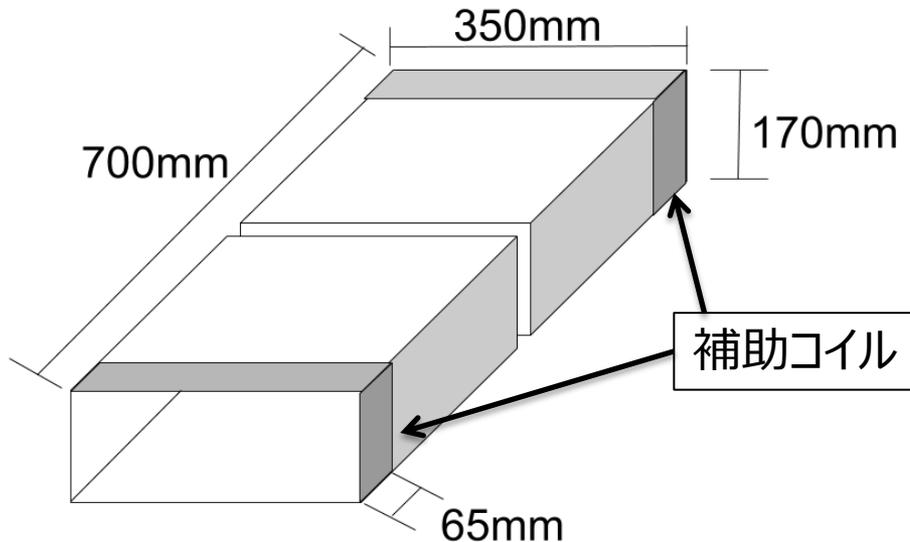
形状・巻き数・
マグネティックワイヤー
を決定する

コイルの設計と製作

以下のようなコイルを設計・製作した

- 2分割の直方体型ソレノイドコイル $700 \times 350 \times 170 \text{ mm}^3$
- 両端に磁束密度を一様にするための補助コイル
- 中心での予想磁束密度は

$B = 23.5 \text{ Gauss} \rightarrow$ ラーモア周期 $\sim 3 \mu\text{sec}$

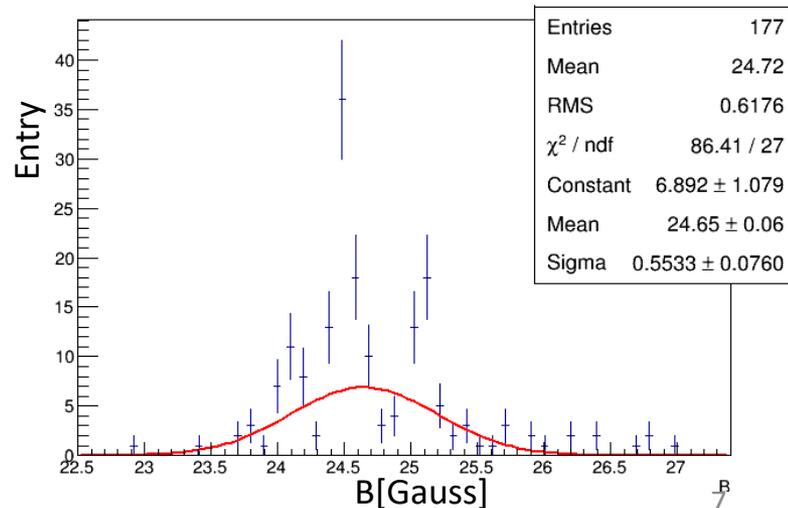
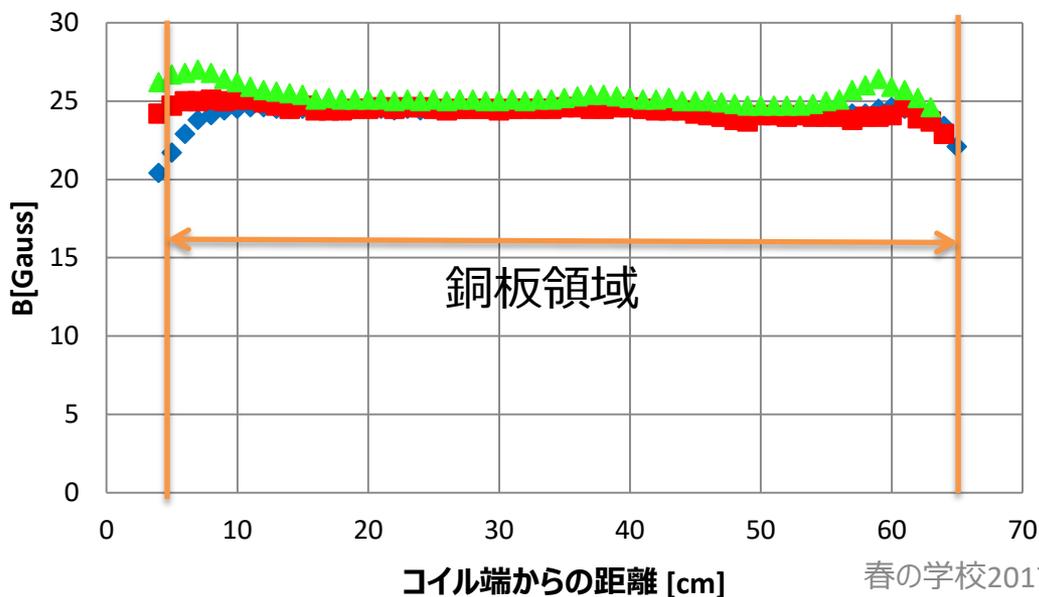
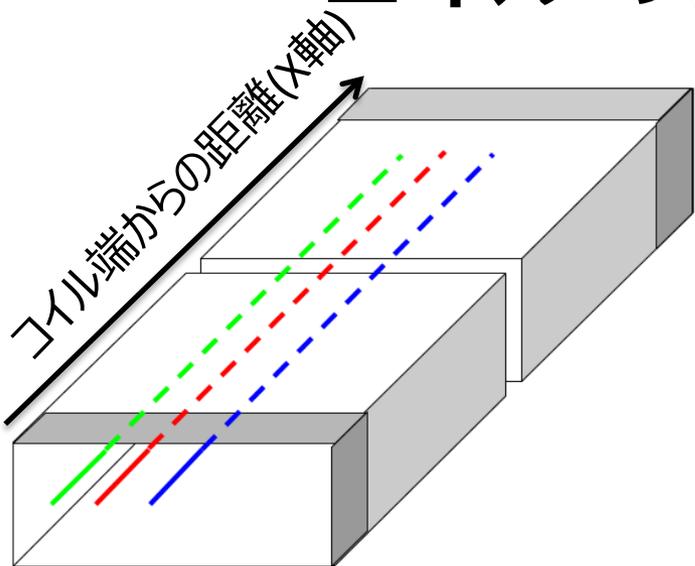


コイルの強度・一様性評価

磁場一様性を確認するためにガウスメータを用いて
実際の磁束密度の測定を行った

銅板の中に当たる 177 点でのヒストグラムより
磁束密度は $24.7 \pm 1.1 (2\sigma)$ Gaussとした

この磁束密度がg因子に与える誤差はおよそ5%となる



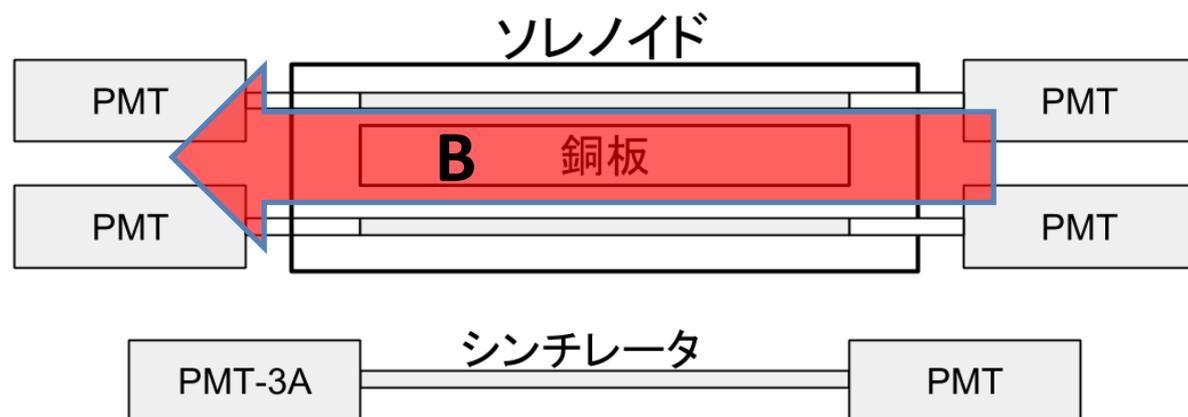
磁場付近のPMTによる問題

今回のセットアップでは

磁場とPMTが近い位置にあることにより以下の問題が予想される

1. PMTのGainの低下
2. 磁場一様性の悪化

→ライトガイドの長さやアンプを用いて解決を図る



磁場付近のPMTによる問題

1. 検出効率の低下

磁場の影響でPMTのGainが低下することで宇宙線ミュオンや崩壊陽電子の検出効率が低下してしまう。

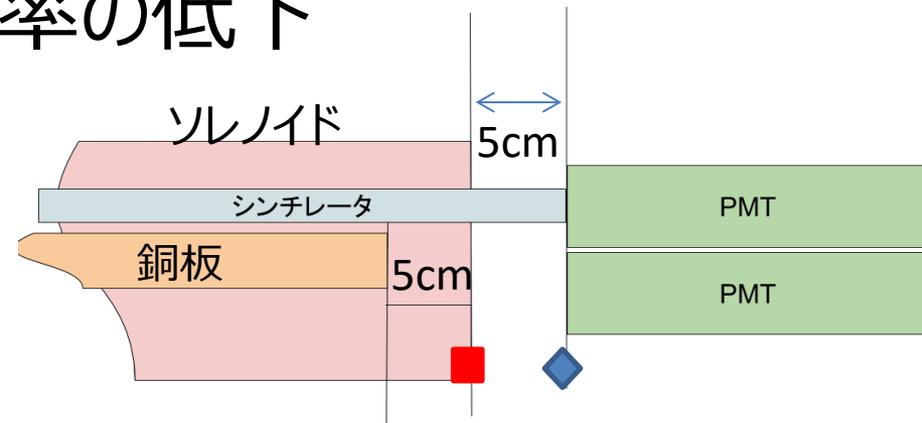
そこで、

- PMTをコイルから遠ざける
- PMT後段にアンプを用いることで検出効率を保つ

以下の条件で解決が可能

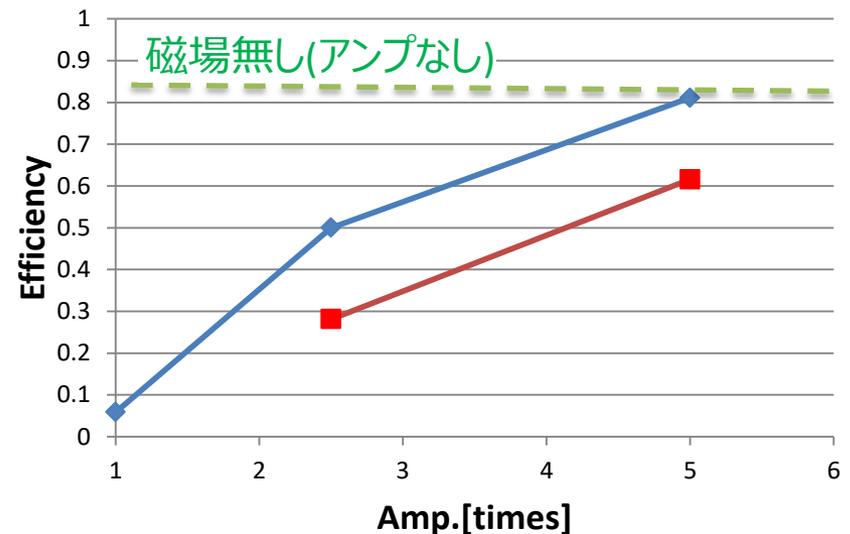
→5 倍以上のアンプ

→コイルから 5 cm以上の距離



◆ 光電面の位置がコイル端から 5 cm

■ 光電面の位置がコイル端から 0 cm

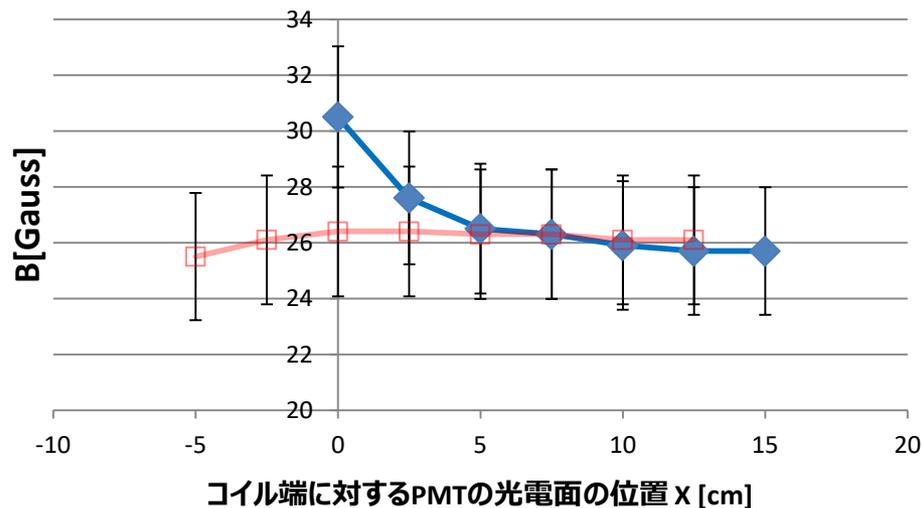


磁場付近のPMTによる問題

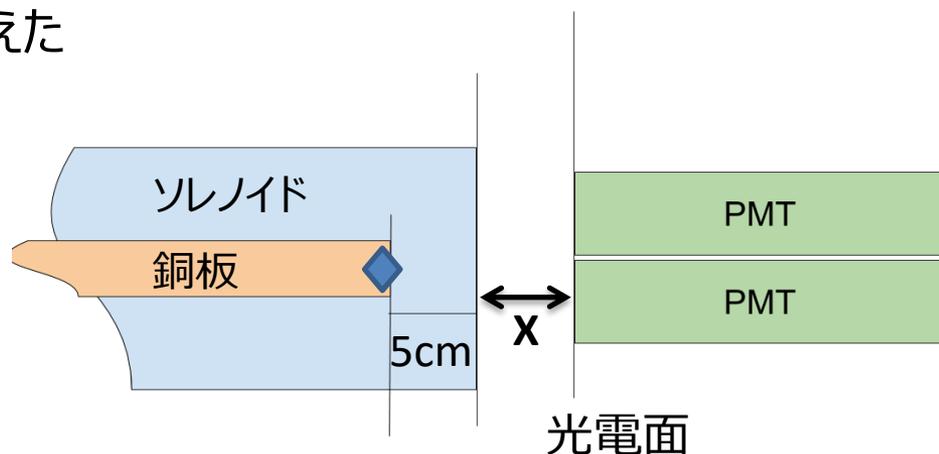
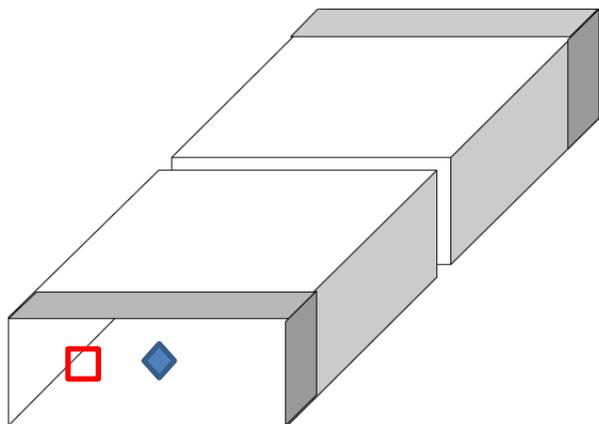
2.磁場一様性の悪化

PMTに巻き付けられている磁気シールドは
高い透磁率を持ち磁場領域に影響を与える

PMTの位置を変化させ、
ガウスメータで磁束密度を計測した



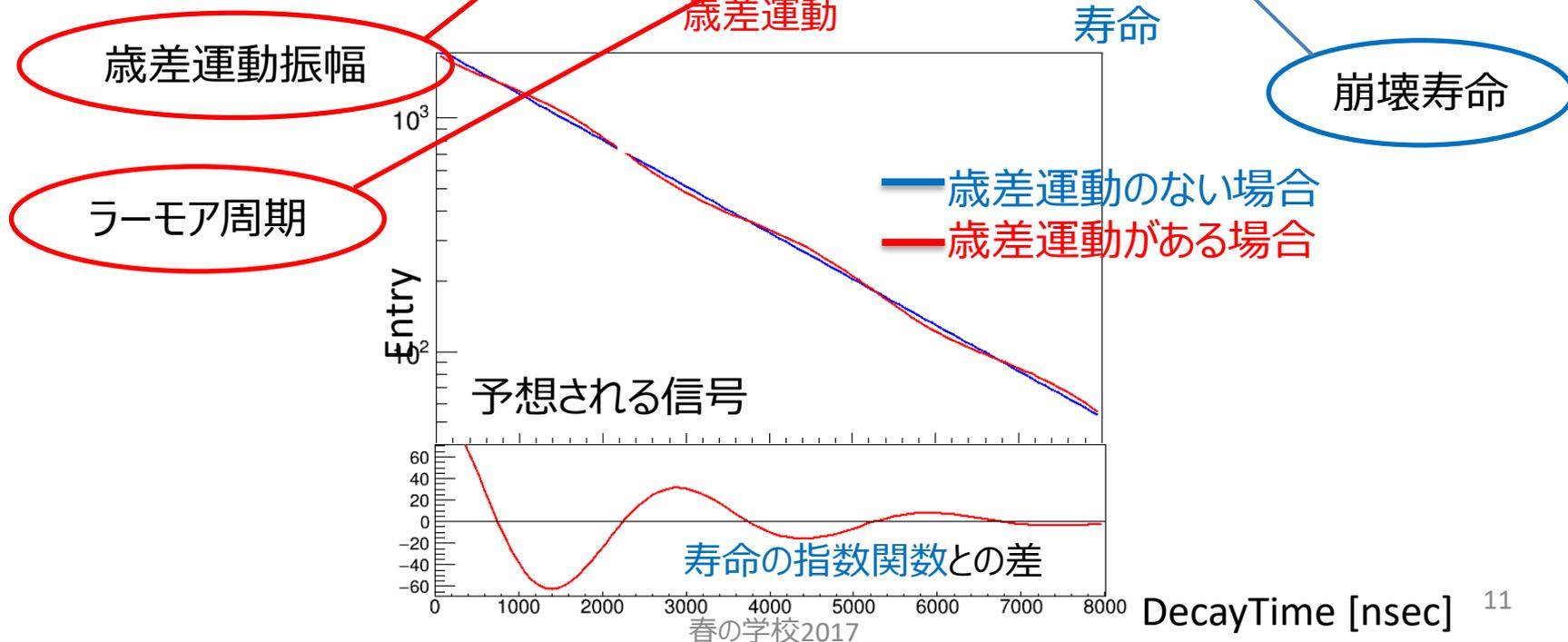
→ コイルから10cm遠ざけるようなライトガイド
を用いることで磁場一様性の悪化を抑えた



ラーモア周期の測定

ノイズの少ない銅板直下のシンチレーションカウンタのデータに対して
以下の関数を用いて歳差運動成分をフィッティングする

$$\text{崩壊数: } N_{e+}(t) = N_0 \left(1 - A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) + [\text{noise}]$$



ラーモア周期の測定

$$N_{e^+}(t) = N_0 \left(1 - A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) + [\text{noise}]$$

およそ40日分の計測データが得られた

フィットによって得られたラーモア周期と
そこから導かれるg因子は

$$T = 2.87 \pm 0.29 \text{ } \mu\text{sec}$$
$$\rightarrow g = 2.08 \pm 0.21$$

となった。

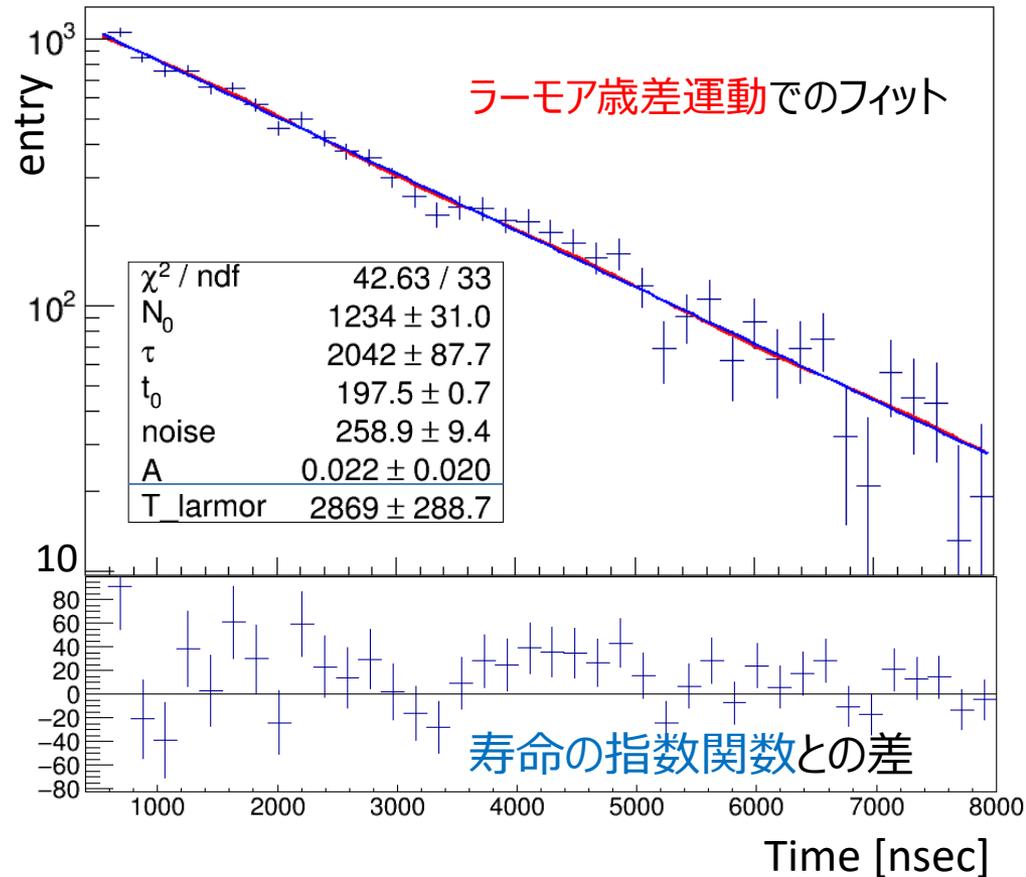
今回の解析では

歳差運動の振幅に対する誤差が大きく

$$A = 0.022 \pm 0.020$$

となっている。

より精度の良い測定のためには統計量を増やす必要がある



改善案

$$N_u - N_l = N_{0u} \left(1 + A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right) - N_{0l} \left(1 - A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)$$

陽電子が上に出たイベント

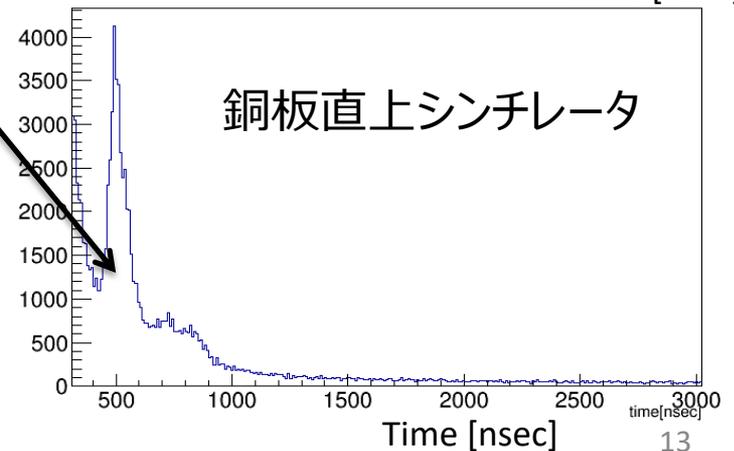
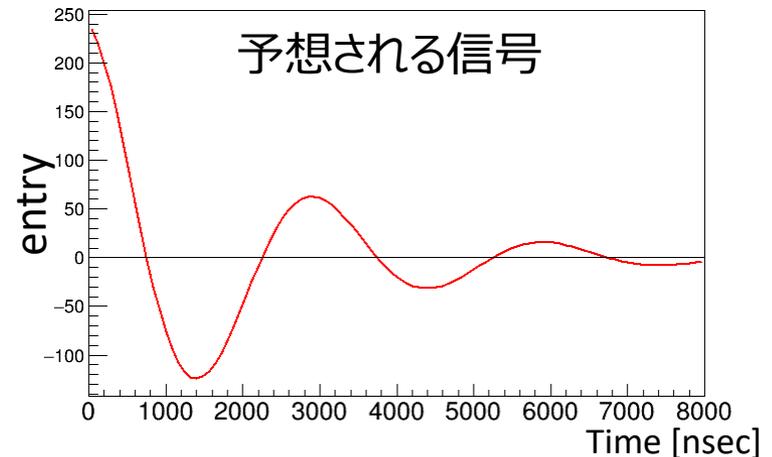
陽電子が下に出たイベント

銅板直上のシンチレータでとれたデータも使用することでおよそ2倍のデータを使用できる

しかし、上のシンチレータはバックグラウンドが多くデータを解析に使用できていない

ミュオン入射時の信号による

→上のシンチレーションカウンタのバックグラウンドについて改善を行うことで取得する統計量の増加を狙える



Summary

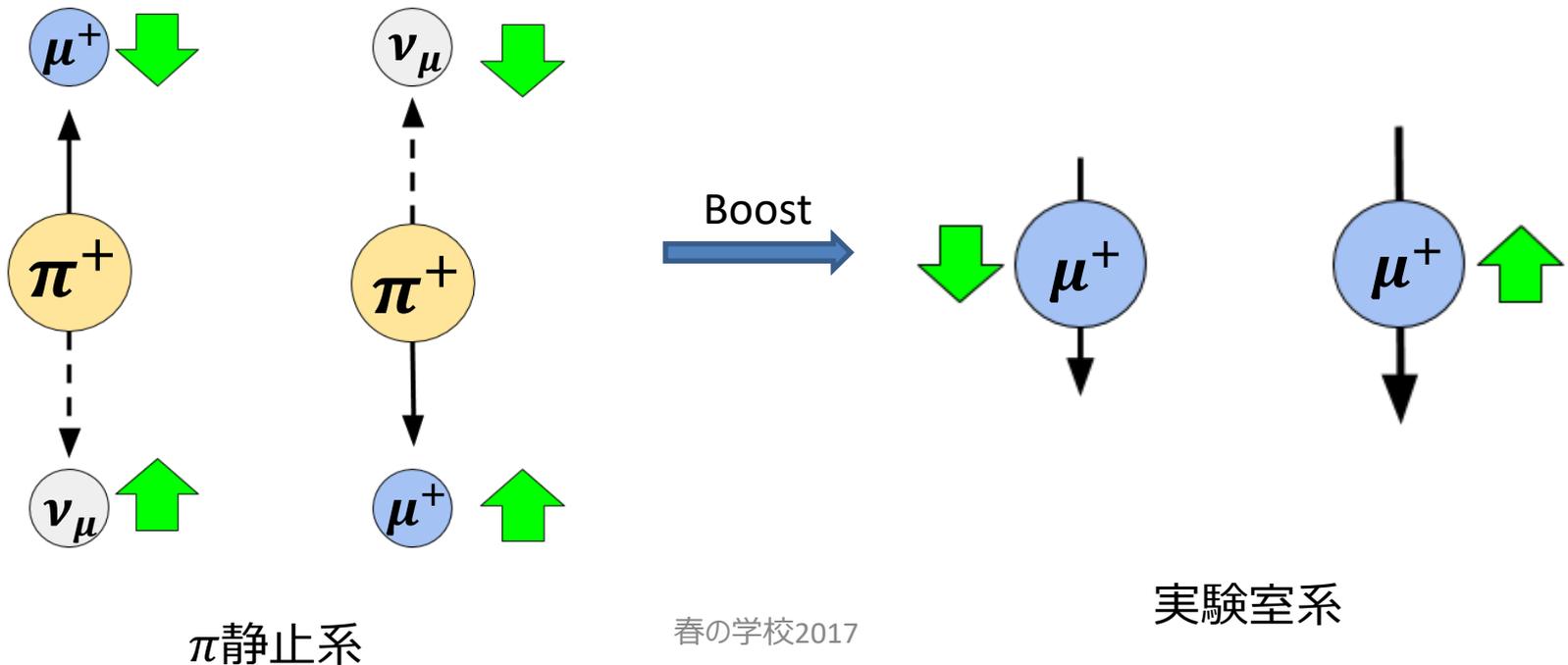
- 宇宙線ミュオンを用いたg因子測定を試みた
- ソレノイドを用いて十分な一様性を持つ磁場を生成することができた
- 製作した装置で測定したg因子は $g = 2.08 \pm 0.21$ となった。

改善のために・・・

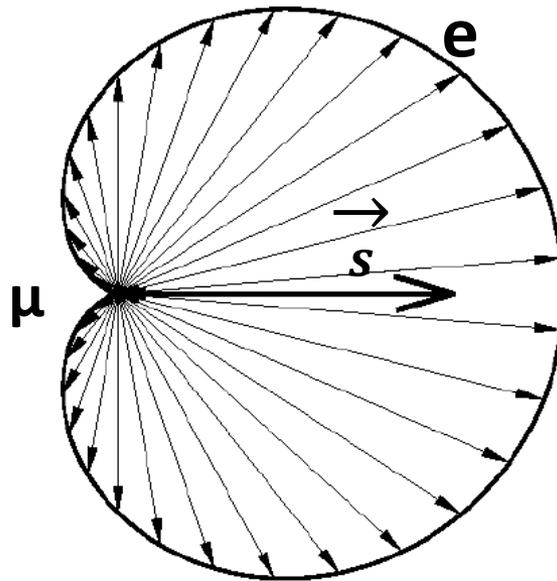
- より多くのイベントが必要となる
- ノイズを減らすセットアップの構築

宇宙線ミュオンの偏極

- π 静止系において $\pi \rightarrow \mu\nu$ 崩壊で放出される μ は100%のスピン偏極度を持った状態で等方的に放出される。
- しかし実験室系ではブーストされるためどちらの向きのスピンも地上に降り注ぐ
- μ 源である π の運動量分布に着目すると運動量の低い方が多く存在する。
- そのため地上に降り注ぐある運動量のミュオンに注目した場合、
 π^+ 静止系で下向きに放出された(スピン上向きの) μ^+ が多く検出される。



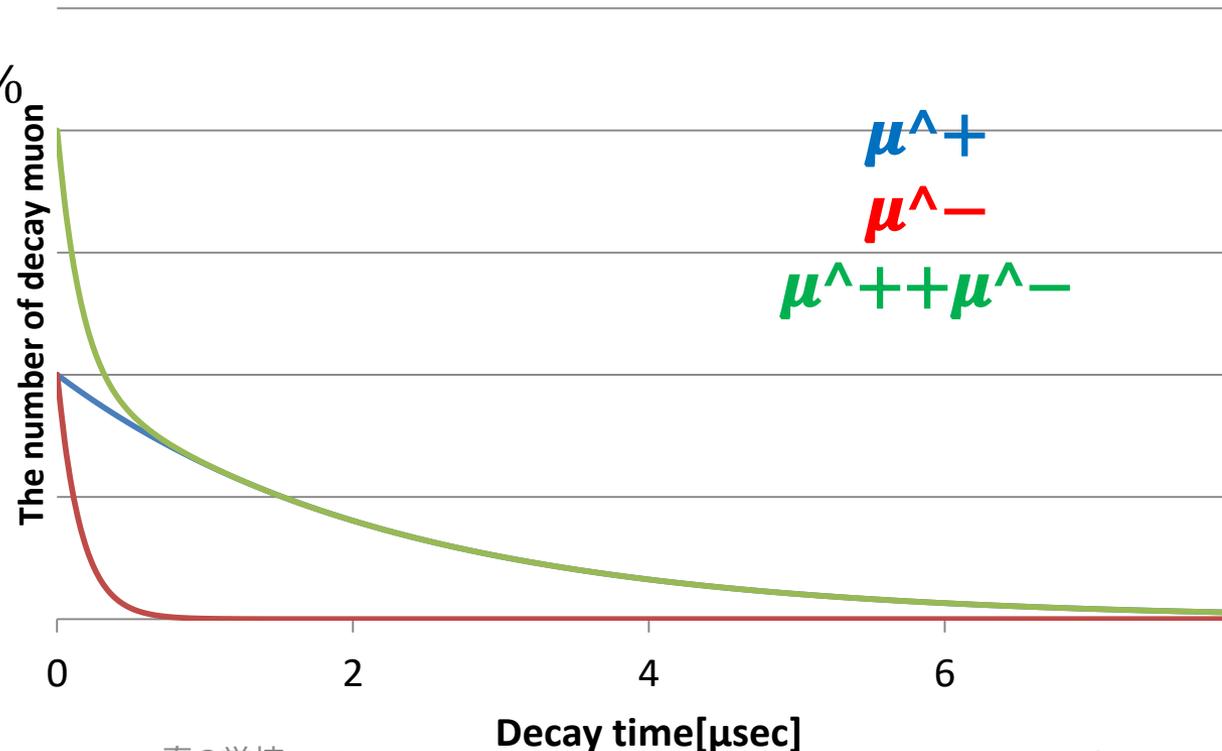
$\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$ 崩壊時の電子放出方向



<http://users.ox.ac.uk/~sjb/musr/musr.html>

銅板中における μ^+ と μ^- の寿命の見かけ上のちがいを

- 物質中では μ^- は原子核中の陽子との反応モード(終状態が中性)が存在するため、陽電子を検出して測定した場合での寿命は見かけ上短くなる。
- 銅板中ではおよそ160nsec
- At 350 nsec, $\frac{\mu^-}{\mu^+ + \mu^-} \sim 11\%$
- At 800 nsec, $\frac{\mu^-}{\mu^+ + \mu^-} < 1\%$



Expected histogram

- イベント数2000程で片側のシンチレータのみを使用したときの $\chi^2 = 1$ の時の値を求めると以下のようなになる
- μ^- の除去やアフターパルスの観点から1.6 μ sec以上のみのデータを使って計算している。
- ラーモア周期は小さいほう(印加するBが大きいほう)が良い分解能を得ることができる。
- また上側シンチレータももちいると統計量の増加から分解能の向上が見込める。
 - ✓ 上側シンチレータはアフターパルスの影響も考える必要があるため考慮が必要

Larmor T	$\Delta T(\chi^2=1)$	B[T]
1	0.034	0.00733
2	0.141	0.003665
3	0.328	0.002443
4	0.616	0.001833
5	0.998	0.001466
6	1.478	0.001222

下側シンチのみ

Larmor T	$\Delta T(\chi^2=1)$	B[T]
1	0.0555	0.00733
2	0.233	0.003665
3	0.563	0.002443
4	1.097	0.001833
5	1.817	0.001466
6	2.743	0.001222

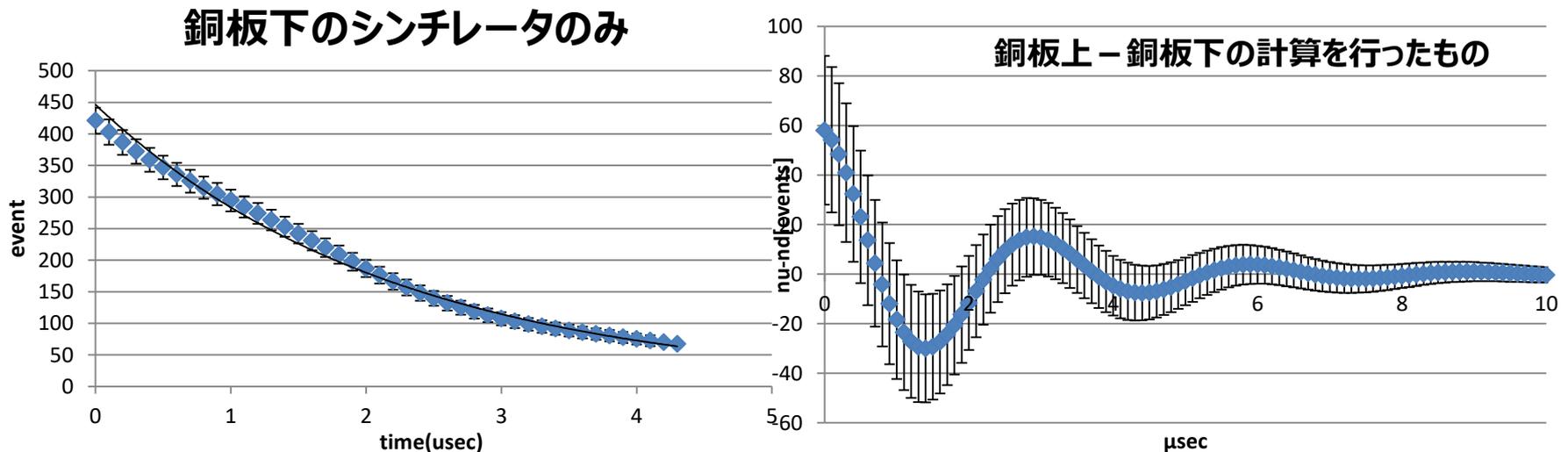
上下両シンチの差をとったもの

予想されるヒストグラム

- Up and down side Ratio of positron emitted by cosmic ray muons decay in copper, $N_u : N_d$, is as follows when spin polarization ratio $P \sim 0.4$ according to literature value.

$$N_u : N_d = 1 + \frac{P}{6} : 1 - \frac{P}{6} \sim 1.1 : 1$$

- Then, expected histogram that we can obtain are as follows.
- In this figure, Statics of one side scintillator is about 10000 events



- Result of These and some calculation, requirements is mTesla-order magnet field as strong as possible.

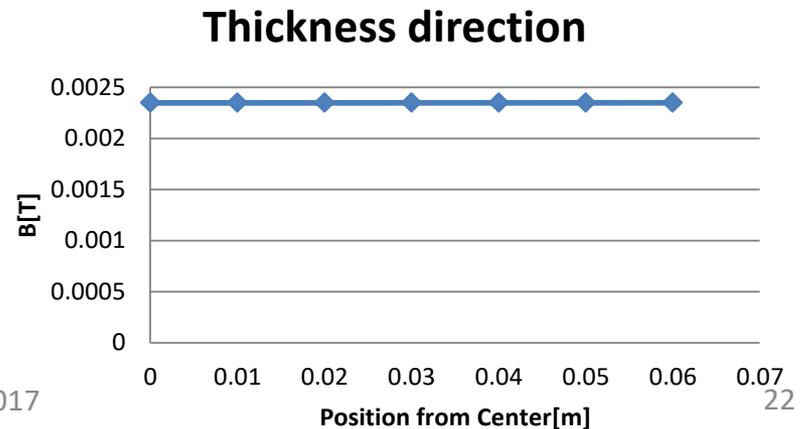
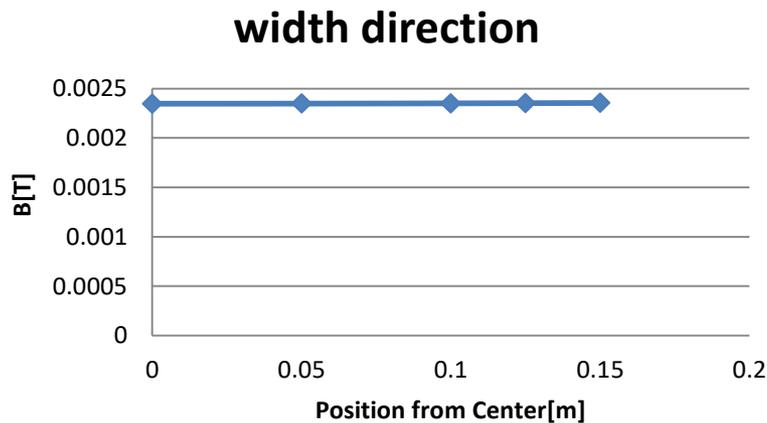
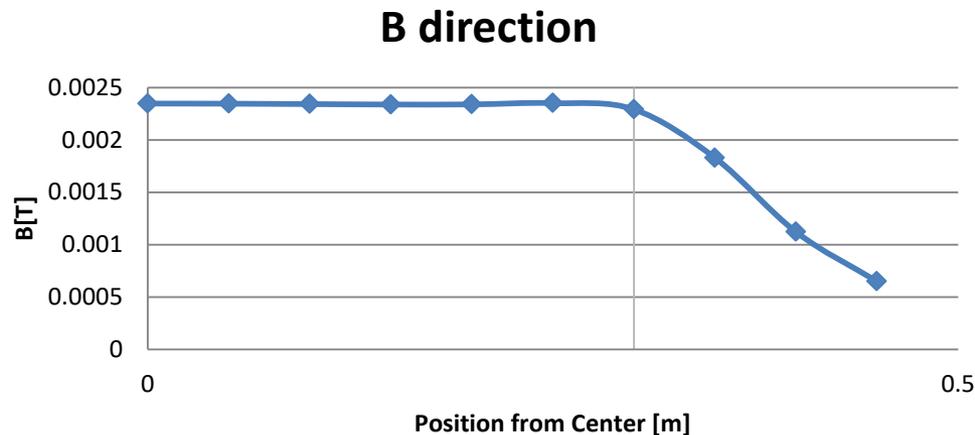
コイルの設計

- 使用する電源装置の限界は10V-20Aまで
- 発熱に関してはコイルに使用するエナメル線の断面積に対して許容電流密度を $2.5\text{A}/\text{mm}^2$ と設定しこれを超えないような電流値を設定する。
 - 許容電流密度とは自然冷却で定常温度となることのできる電流値の目安
 - ワイヤーの直径に対し許容電流は以下ようになる
 - 抵抗は目標のコイルサイズにすき間を開けずワイヤーを巻きつけたときの抵抗
 - 10V電流はそれに10V印加したときの電流
 - 主に電源装置の電圧の制限によって許容電流を超えることはない
 - 2分割することでワイヤーへの電流を2倍にすることができる
 - 直径が大きくなると取扱い（手巻きによる巻きつけ）が大変になるため $\phi 1.4$ を選択した

Φ [mm]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
許容電流[A]	0.31	0.71	1.26	1.96	2.83	3.85	5.03
抵抗[Ω]	320	96	60	20	12	7.4	4.9
10V電流[A]	0.031	0.104	0.25	0.49	0.85	1.3	2
2分割時[A]	0.063	0.209	0.504	0.974	1.30	2.72	4.08

磁束密度の予想値

$\phi 1.4\text{mm}$ PEW wire 7.1Turn/cm 10V 2.72A(to each solenoid)
銅板内での磁束密度のズレは2%以内に収まっている



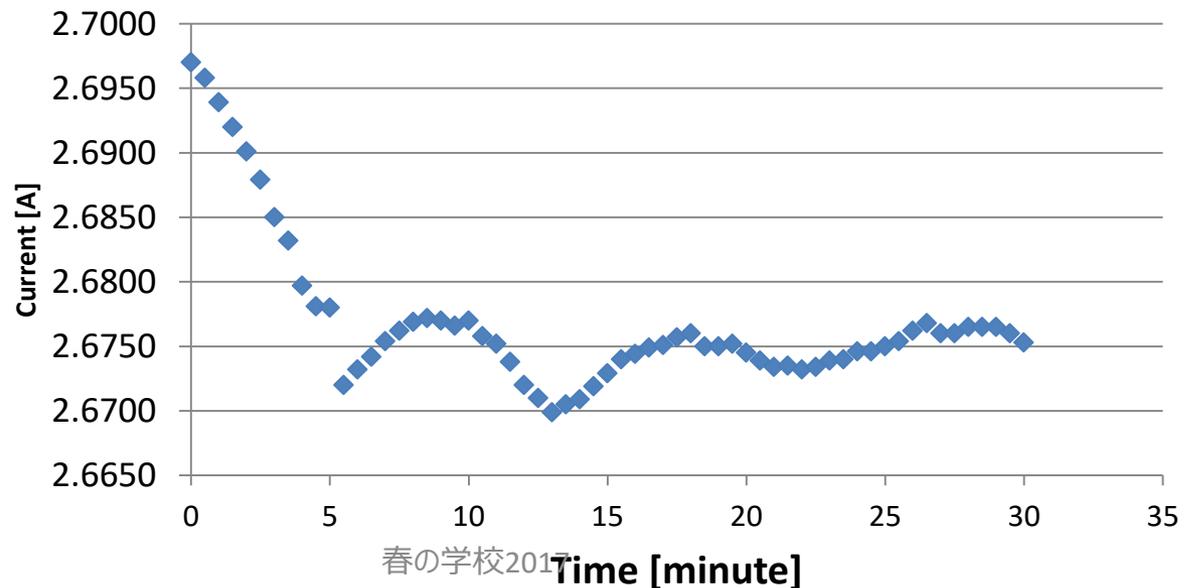
コイルの性能評価

安定性

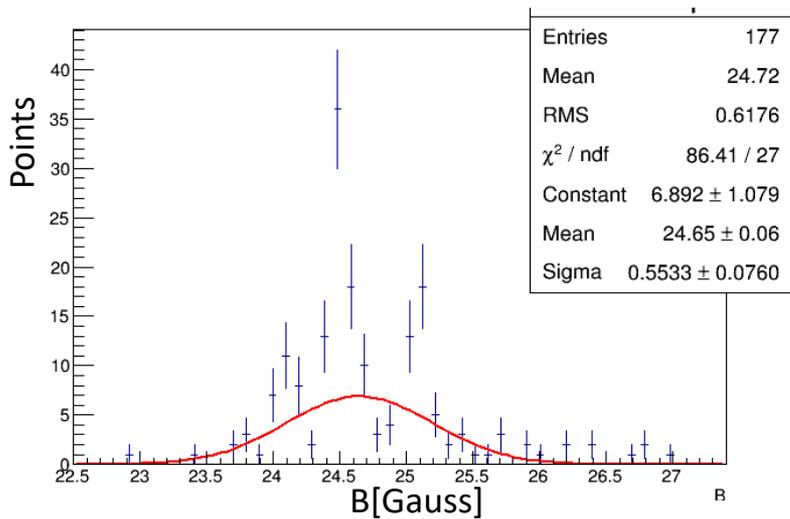
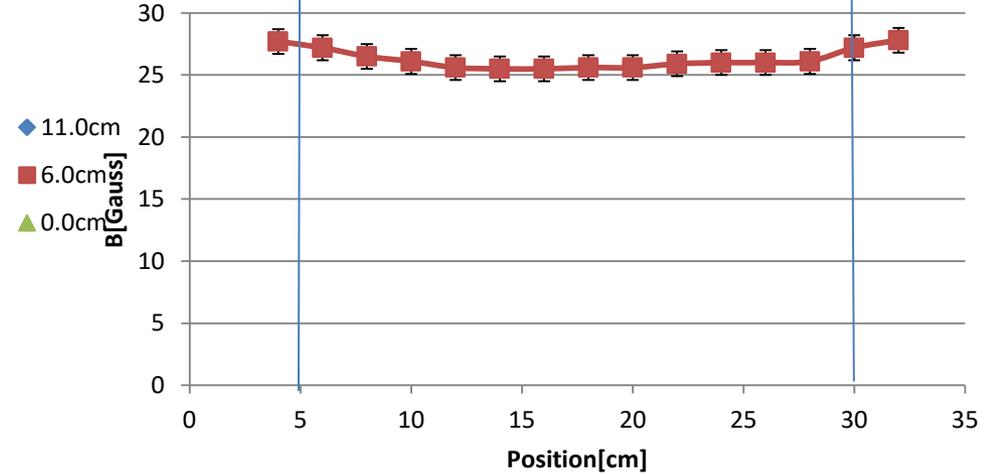
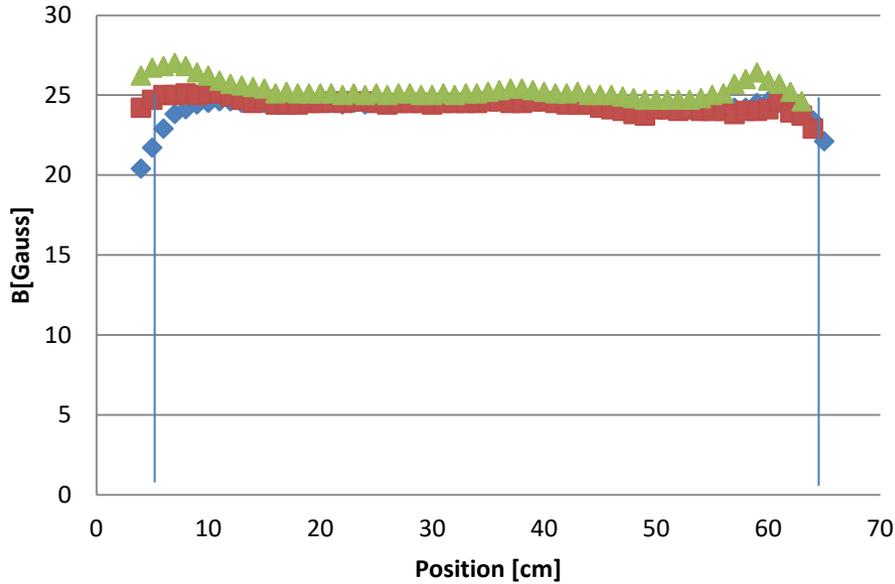
コイルの熱安定性を評価するため、1分毎電流値の測定を行った

電圧をかけ始めてすぐは電流の変化が顕著となっている

→異常な発熱は見られなかったが、以降の実験は30分以上経ってから測定を行った



計測した磁束密度



$< -2\sigma$	$-2\sigma \sim -1\sigma$	$-\sigma \sim 0$	$0 \sim 1\sigma$	$1\sigma \sim 2\sigma$	$> +2\sigma$
2.7%	7.1%	49.2%	29.0%	5.5%	6%

磁場中でのPMT

1. Gainの低下

今回使用しているHead-on型PMTは磁場に弱い

→高透磁率を持つ金属が円筒状に巻いてある

→光電面と読み出し面を塞ぐわけにはいかない

→光電面に垂直な磁場には弱い



Z axis

FOCUSING ELECTRODE

PHOTOELECTRON e^-

SECONDARY ELECTRON

LAST DYNODE

VACUUM (10^{-4} Pa)

DIRECTION OF LIGHT
⇒

FACEPLATE

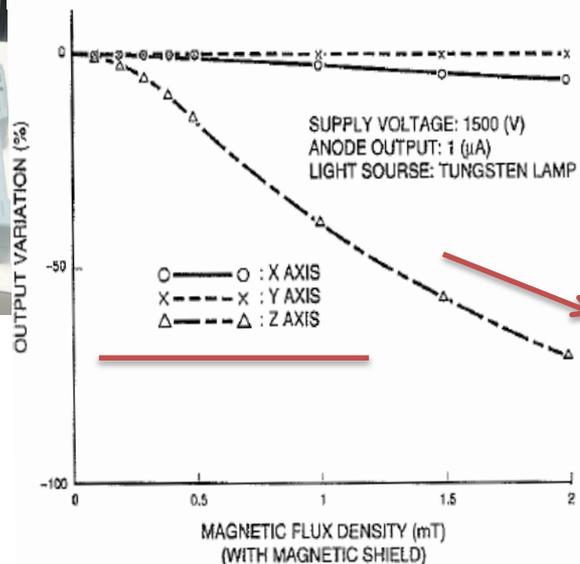
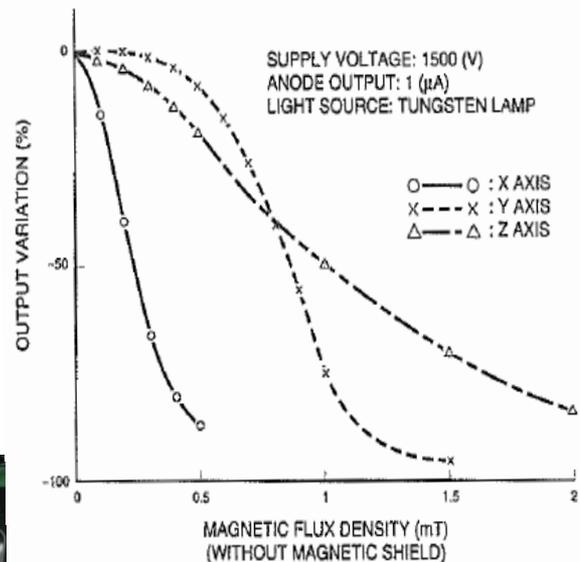
ELECTRON MULTIPLIER (DYNODES)

STEM PIN

PHOTOCATHODE

ANODE

春の学校2017

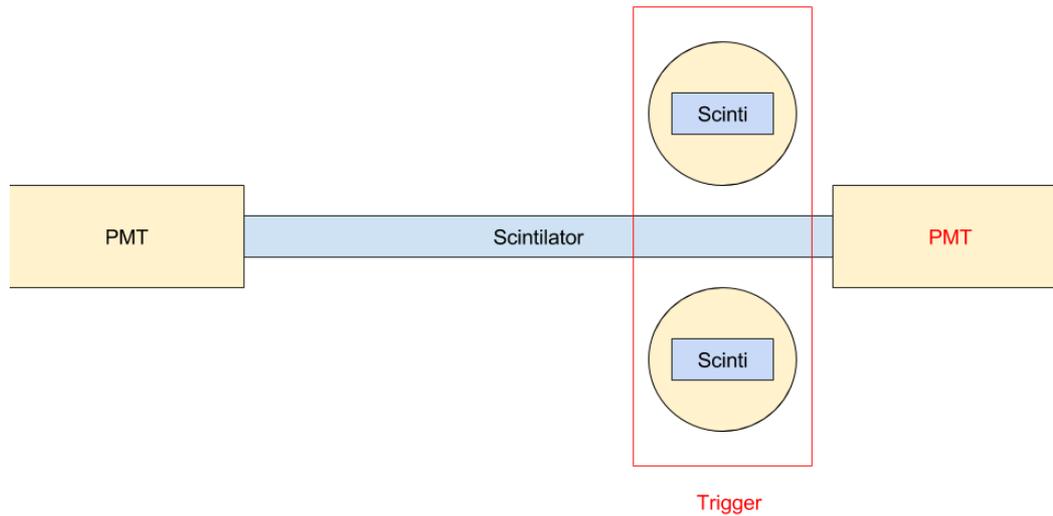


TPMOB0007EB

Figure 7-38: Magnetic characteristics of a photomultiplier tube

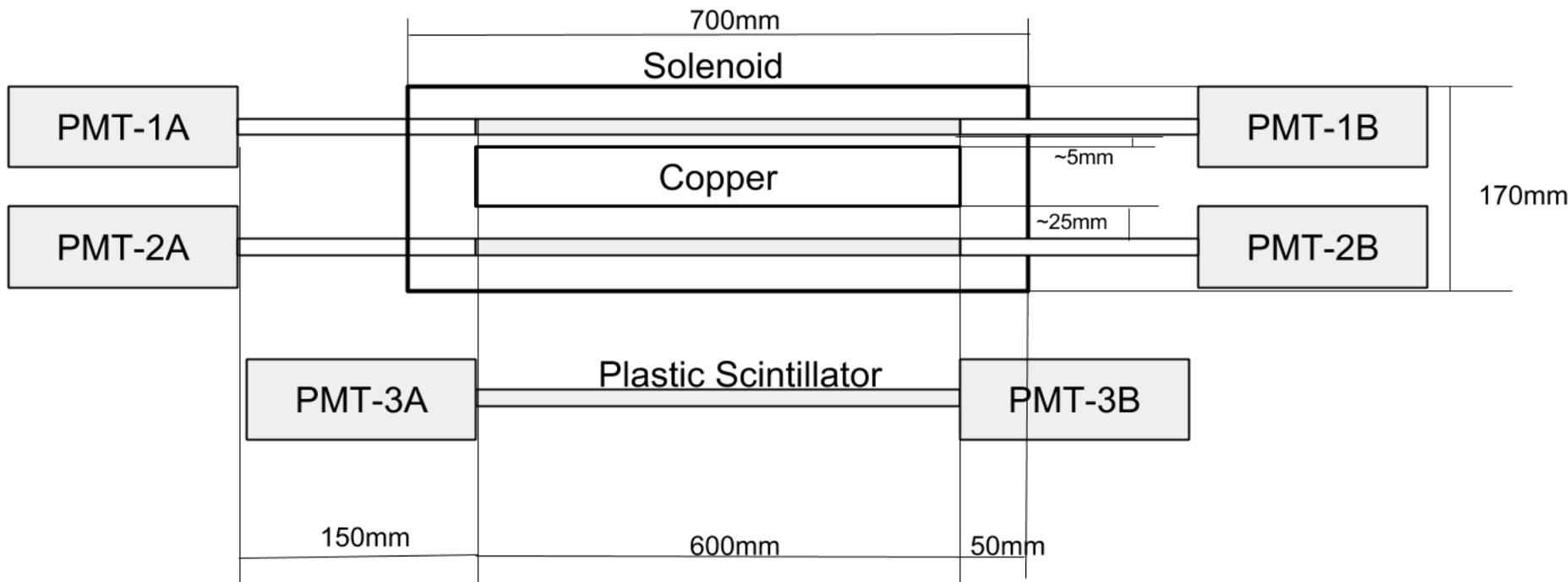
Hamamatsu Photonics K.K.
PHOTOMULTIPLIER TUBES -Basics and Applications-

効率測定セットアップ



上下シンチレータのコインシデンス + 測定するPMTとのコインシデンス
上下シンチレータのコインシデンス

Setup



ラーモア周期の測定

ノイズの少ないCu↓シンチレータのデータに対して

以下の関数を用いて歳差運動成分をフィッティングする

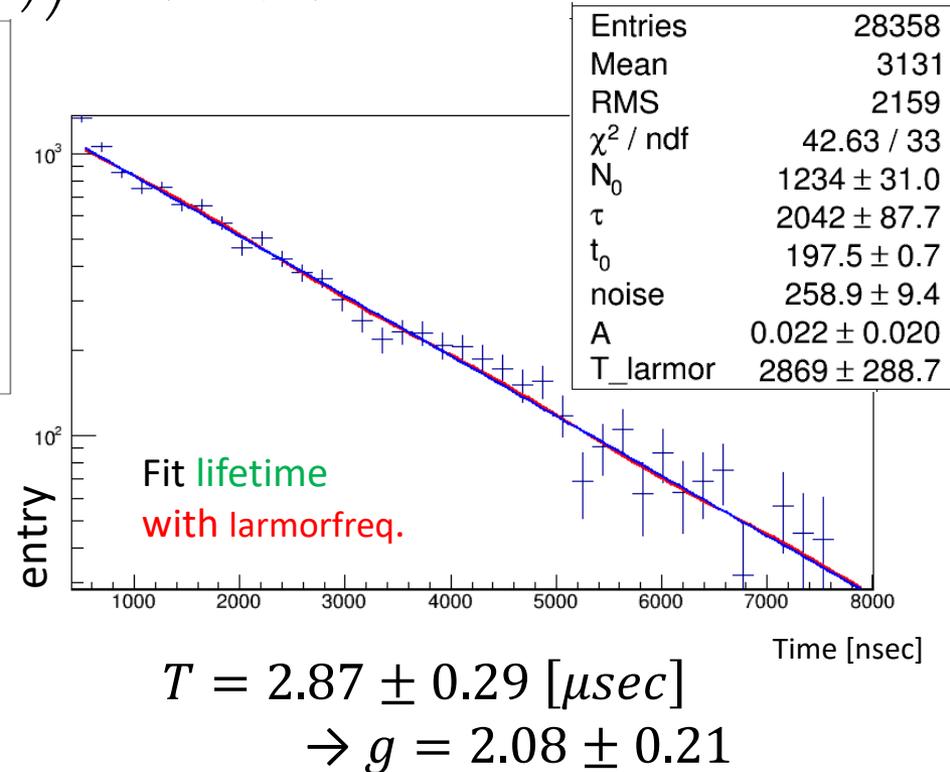
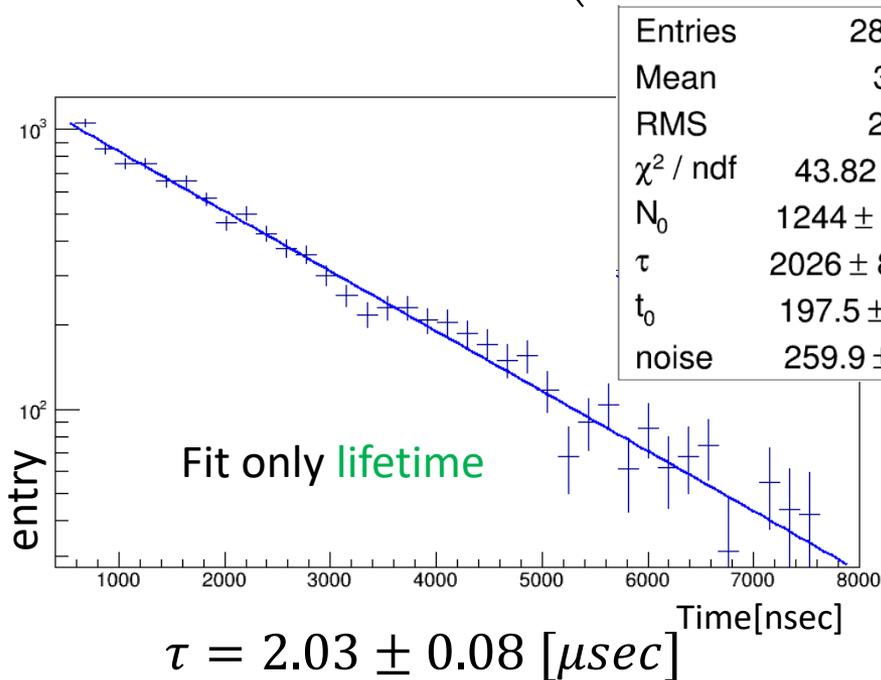
$$N_{\downarrow\text{decay}} = N_0 \left(1 - A * \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) + [\textit{noise}]$$

それぞれのパラメーターの予想値は

- $A \sim 0.04$: 歳差運動振幅 (スピン偏極度と電子の放出分布に依存)
- $t_0 \sim 197$ [nsec] : 時間原点 (ミュオン貫通イベントで計測)
- $\tau \sim 2197$ [nsec] : μ^+ の寿命(文献値)
- $T \sim 3000$ [nsec] : ラーモア周期 (B=24.6 Gauss ,g = 2としたときの値)

ラーモア周期の測定

$$N_{\downarrow} = N_0 \left(1 - A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) + [\text{noise}]$$



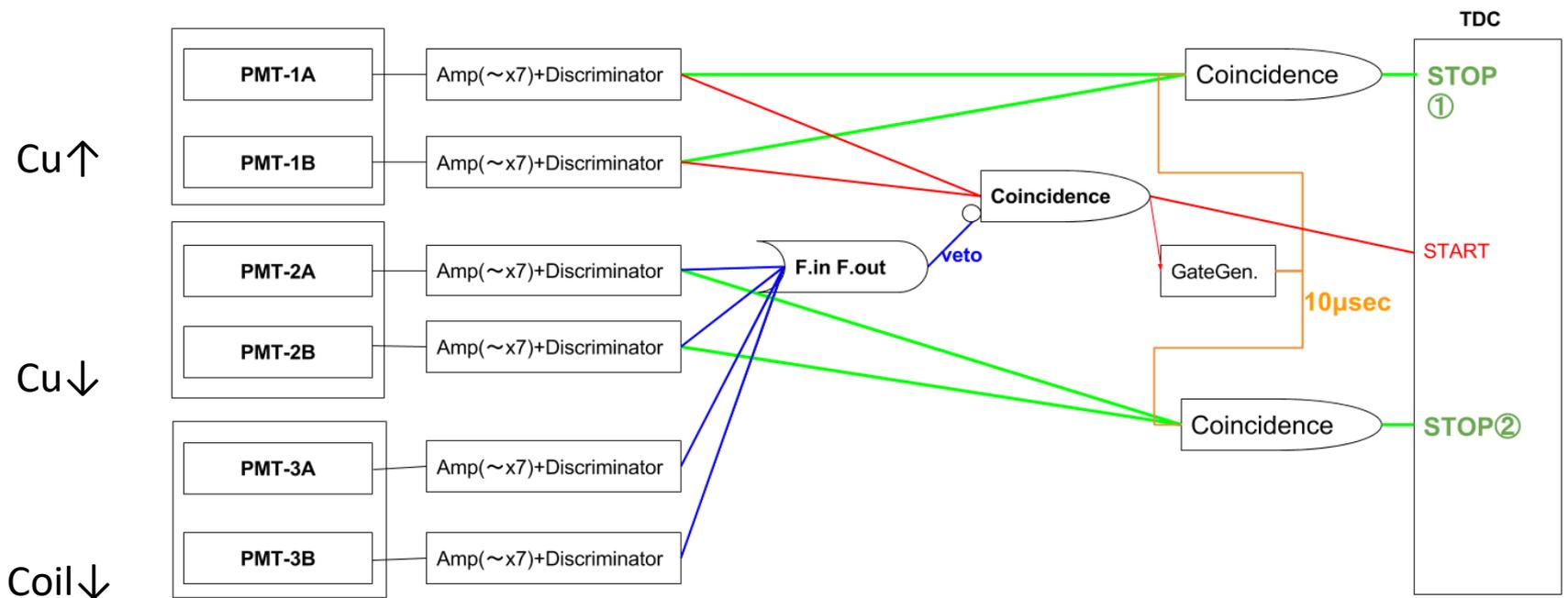
およそ30日分の計測

ラーモア歳差運動の振幅Aの誤差が大き過ぎる

→ラーモア周期に対する統計的な有意差は0.5 σ

→本当にラーモア歳差運動が見えているとはいいがたい

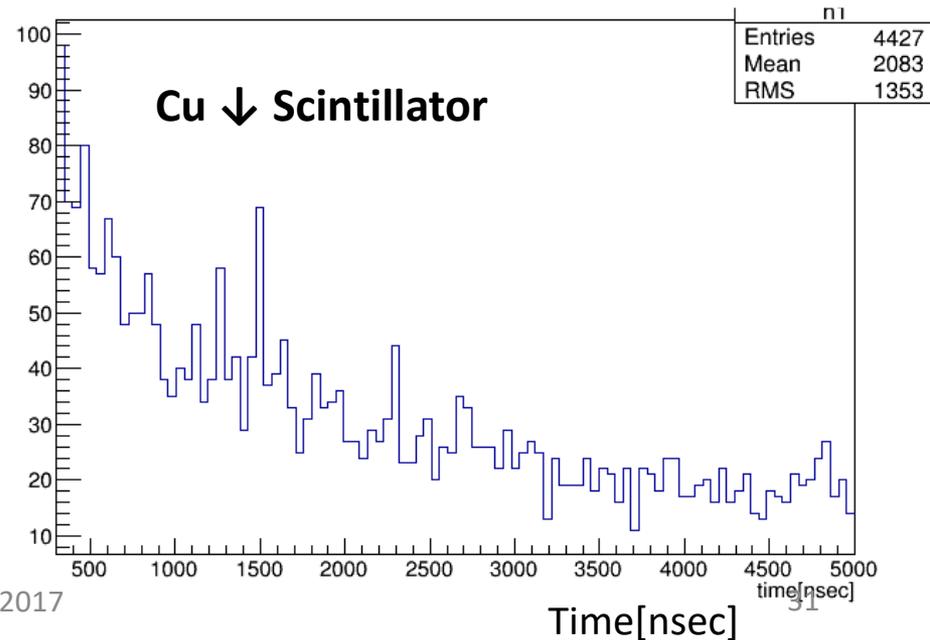
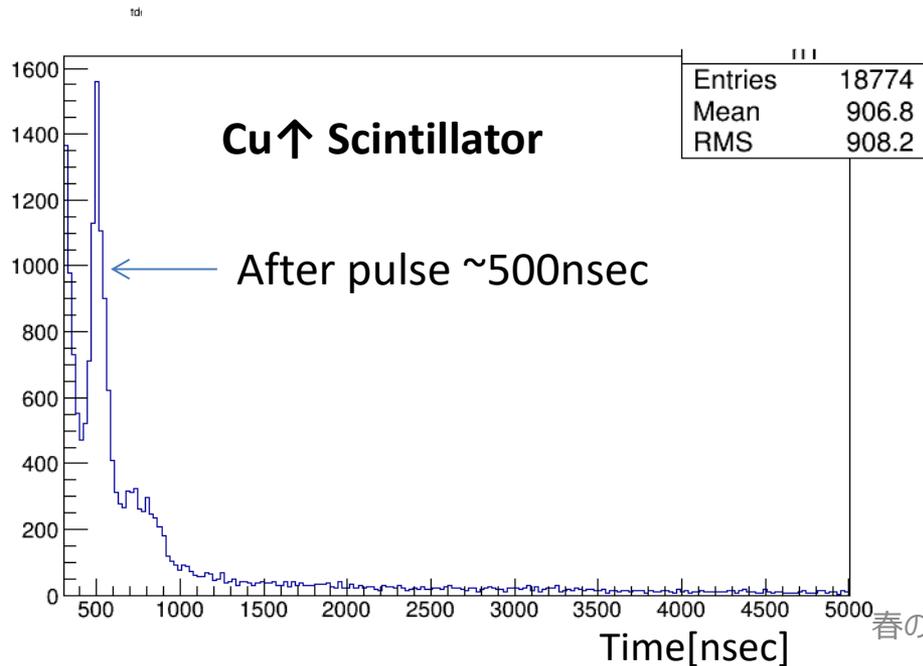
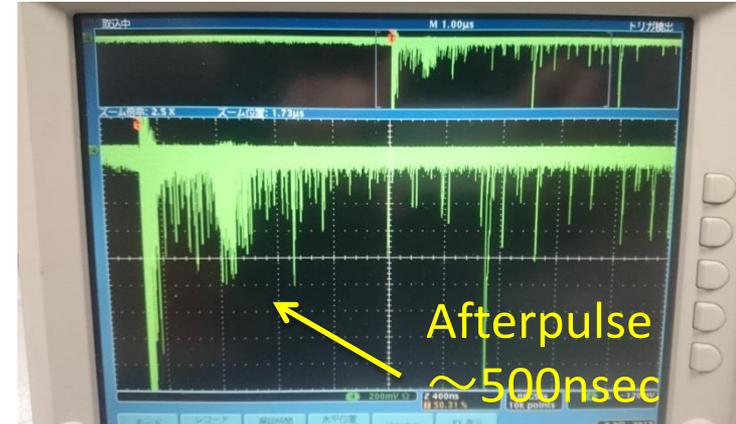
wiring



Afterpulse

Cu↑のシンチレータにはミュオンが入射した
信号のアフターパルスが見える

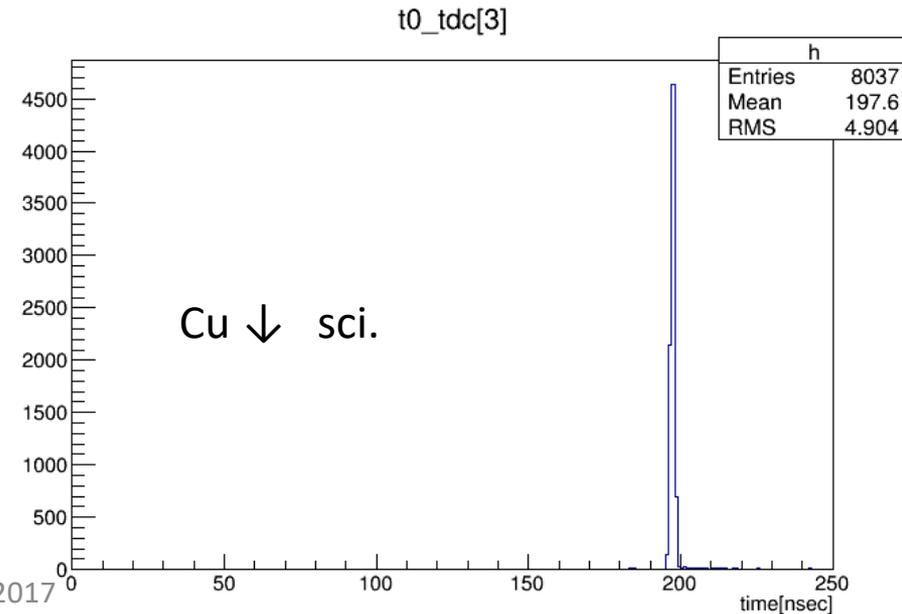
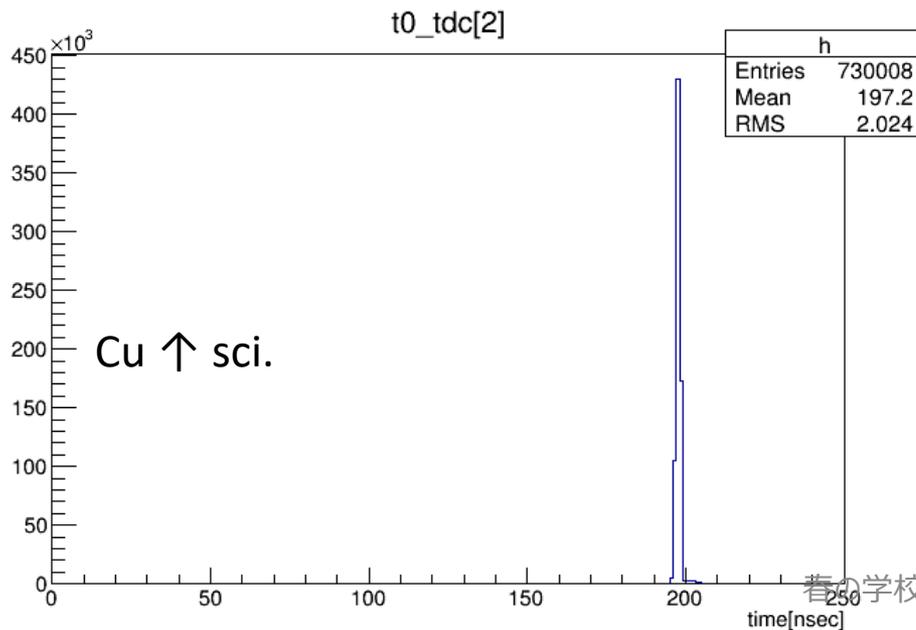
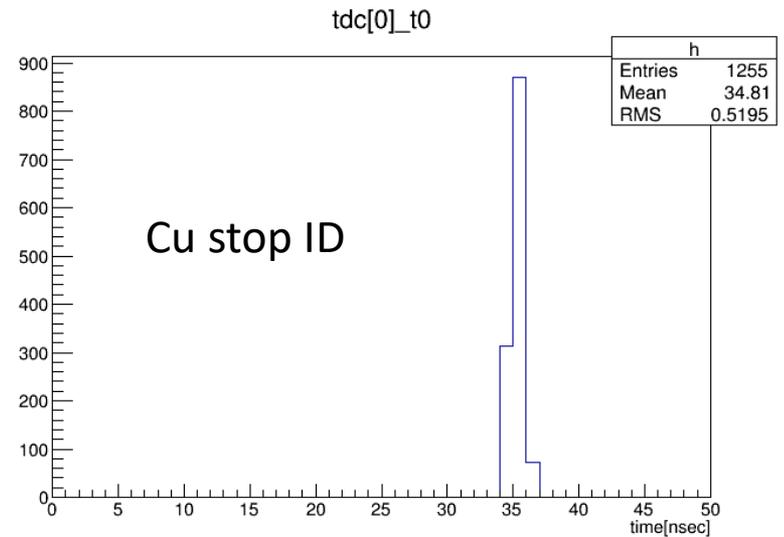
Cu↑ - Cu↓ というデータの解析を予定していたが、
Cu↓のみのデータを用いた解析を行う



Time origin

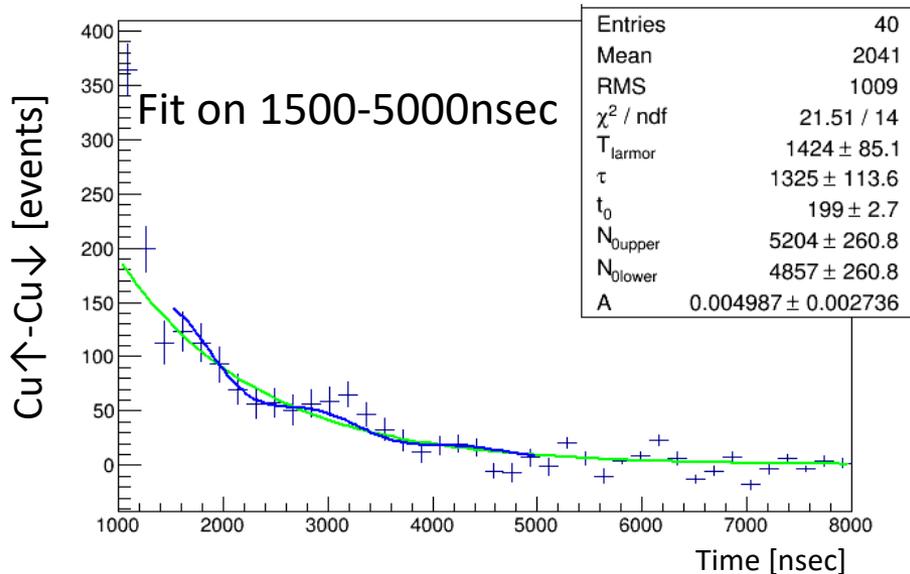
ミュオン貫通イベントを用いた時間原点の測定

→ラーモア周期のオーダーに対して
よい時間分解能が出ている



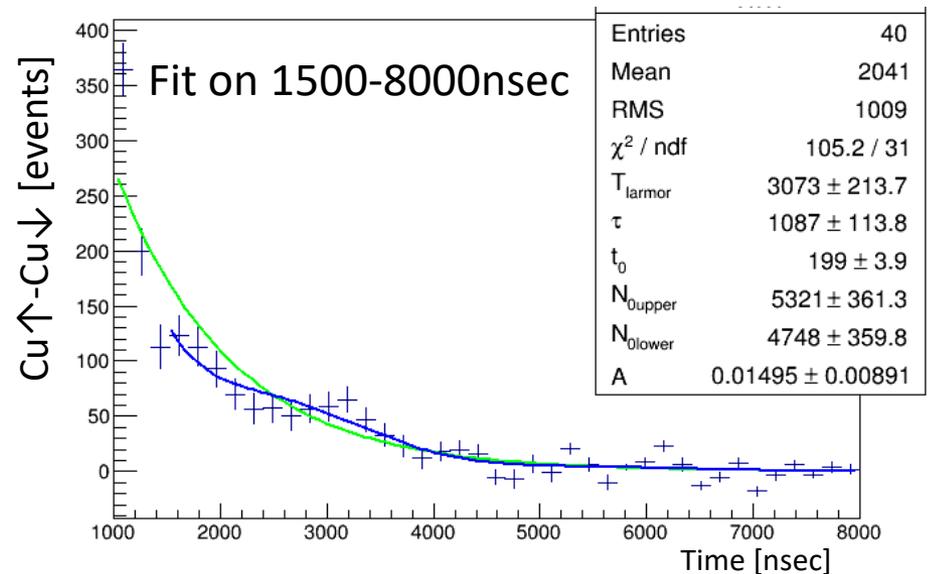
Larmor frequency $\text{Cu}\uparrow\text{-Cu}\downarrow$

$$N_u - N_l = N_{0u} \left(1 + A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right) - N_{0l} \left(1 - A \cos \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) \exp \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)$$



$$T = 1424 \pm 85 \text{ [nsec]}$$

$$\rightarrow g = 4.20 \pm 0.28$$



$$T = 3073 \pm 213 \text{ [nsec]}$$

$$\rightarrow g = 1.95 \pm 0.15$$

This is about 150 hours data.

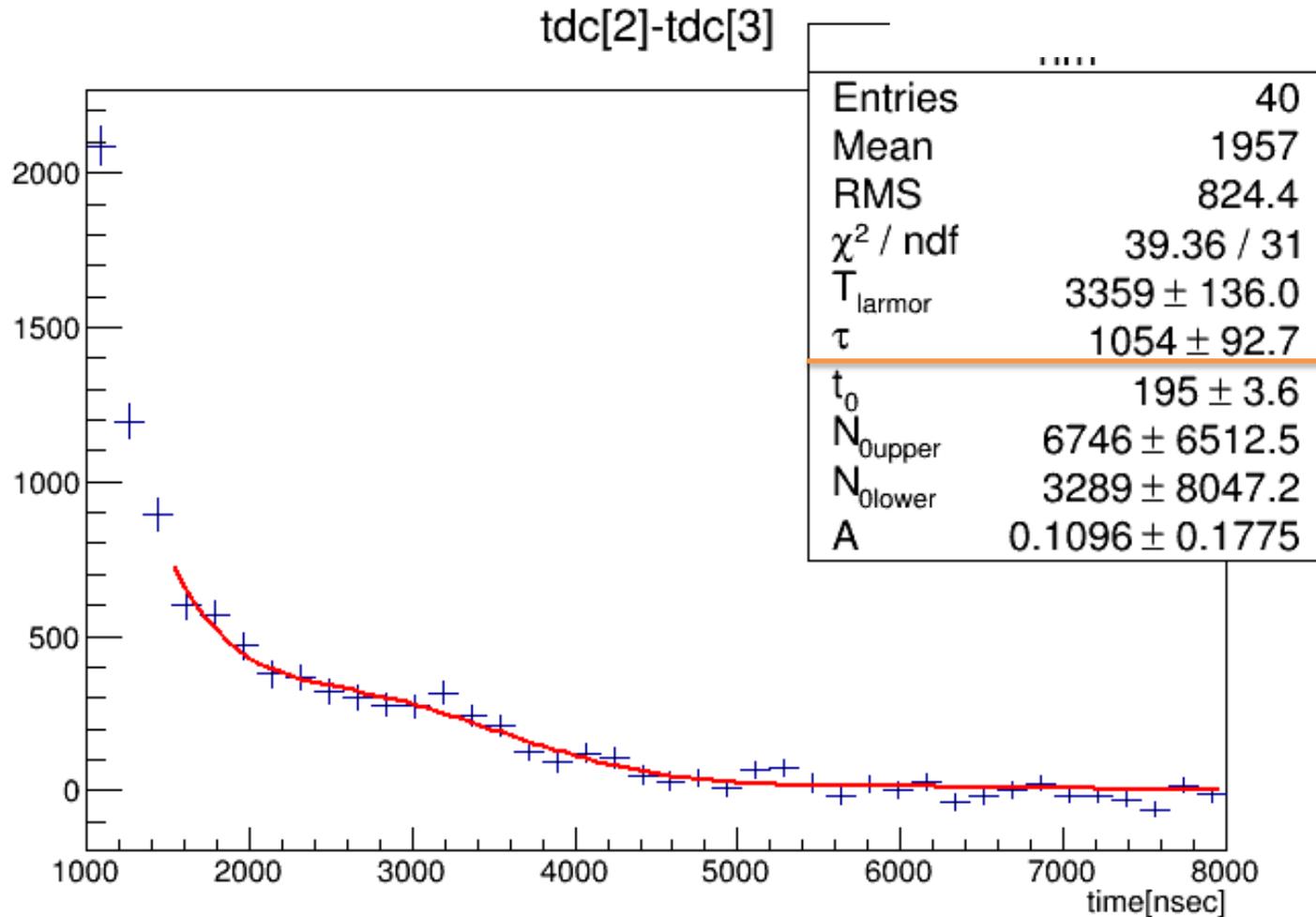
Some frequency seems to appear, but

changing a fitting region makes a big changes of the result...

→ Does a larmor frequency really appear?

→ more events and NO magnetic field data are required.

Cu \uparrow -Cu \downarrow (~ 700 hours)



必要な統計量

- 1-5 μsec の間に, 40000イベント必要である($\chi^2/ndf = 1, \delta_g = 0.2$)

	Noise	Entries	Decay Event	Event rate[/h]	Hours/40000events
Cu↓	5400	22300	16900	~19	のこり~1200hours

