

ミューオンの寿命、 g 因子の測定



小形悠
合田幸平
佐藤芳紀
下林俊典
安元智司

実験の目的

μ^+ の寿命・g因子を求める。

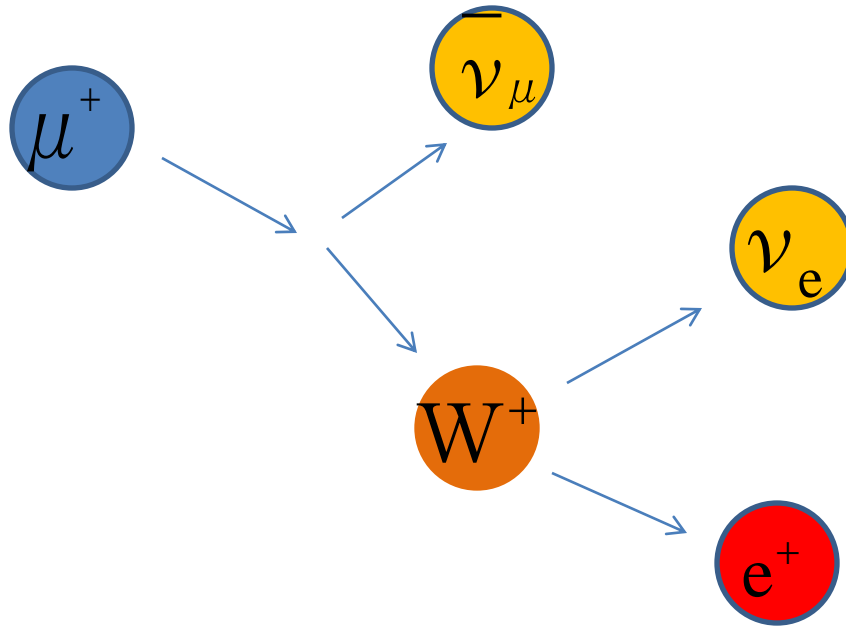
宇宙からは様々な粒子が降ってくる！



地球

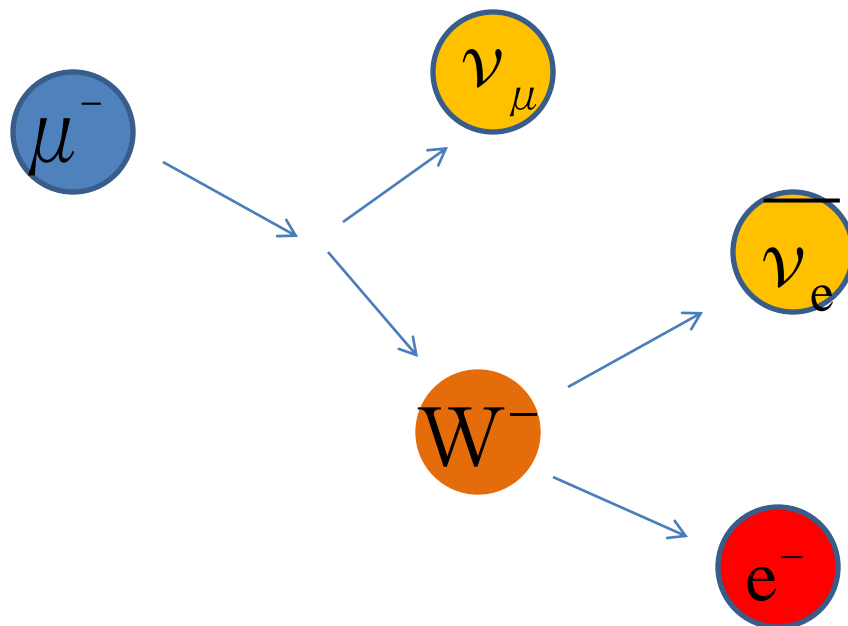
μ^+ の崩壊

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$



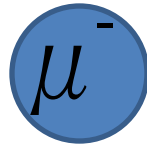
μ^- の崩壊

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



ミューオンの性質

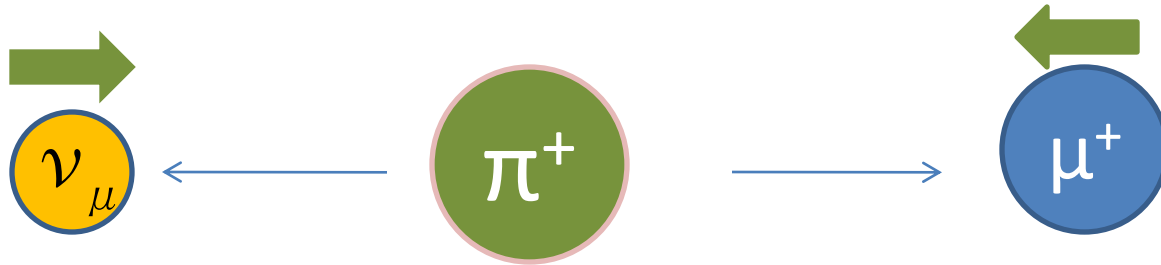
- μ^- は原子核と反応してしまうため、ほとんど検出にかからない。



⇒崩壊するのはほとんどが μ^+ である。

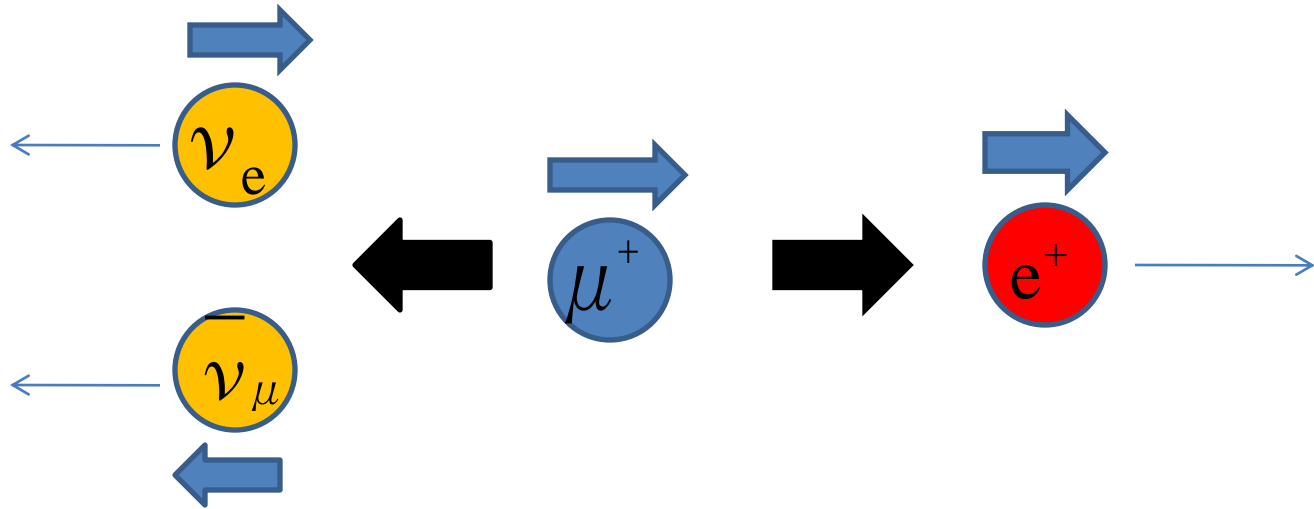
μ^+ の偏極

- μ^+ は π^+ の崩壊でできる。



- $\Rightarrow \mu^+$ のスピンは進行方向と逆向きである。
- 地上に来る μ^+ のスピンは進行方向と逆向きに偏極している

e^+ の飛び出す方向



- μ^+ のスピンの方に飛び出る

理論から予想されること

- 磁場があれば、スピンは角振動数が

$$\omega = \frac{g|e|B_z}{2m_\mu}$$

の歳差運動をする。

- 理論値は $g=2$ である。

実験原理

- 銅板によって止められた μ^+ のスピンは、崩壊するまでその場でコイルの磁場により歳差運動する。
- 崩壊したときに向いているスピンの方向が崩壊した陽電子の進行方向となる。

横軸を崩壊までの時間として銅板の上(下)で粒子の統計を取ると指数関数から振動数 ω で波打つことになる。

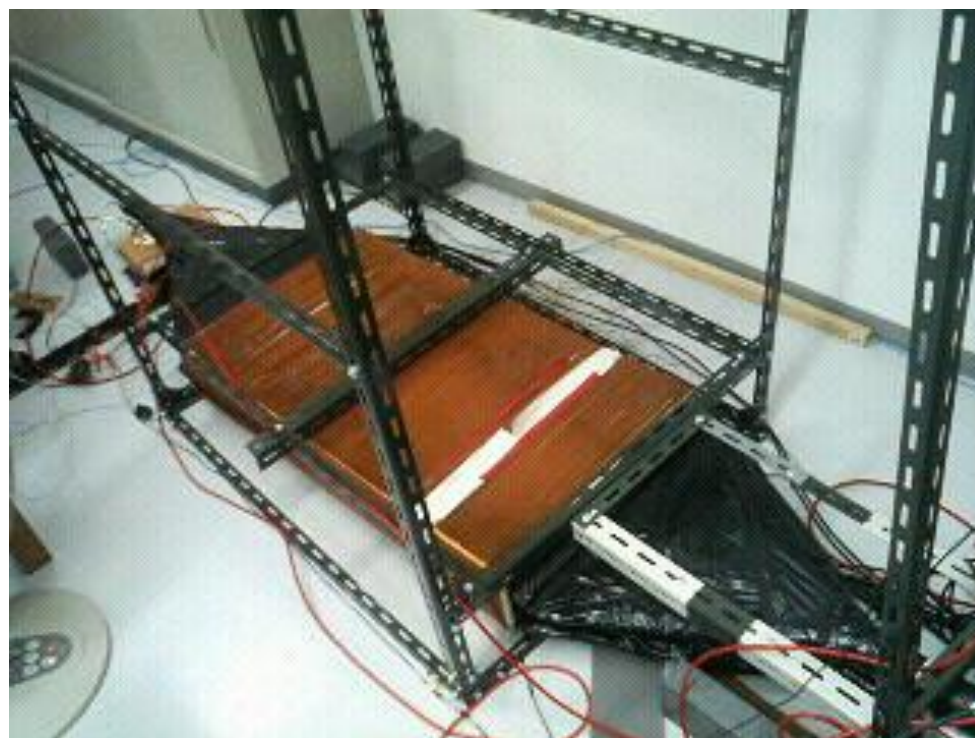
⇒この ω を測定し g を求める。

実験装置

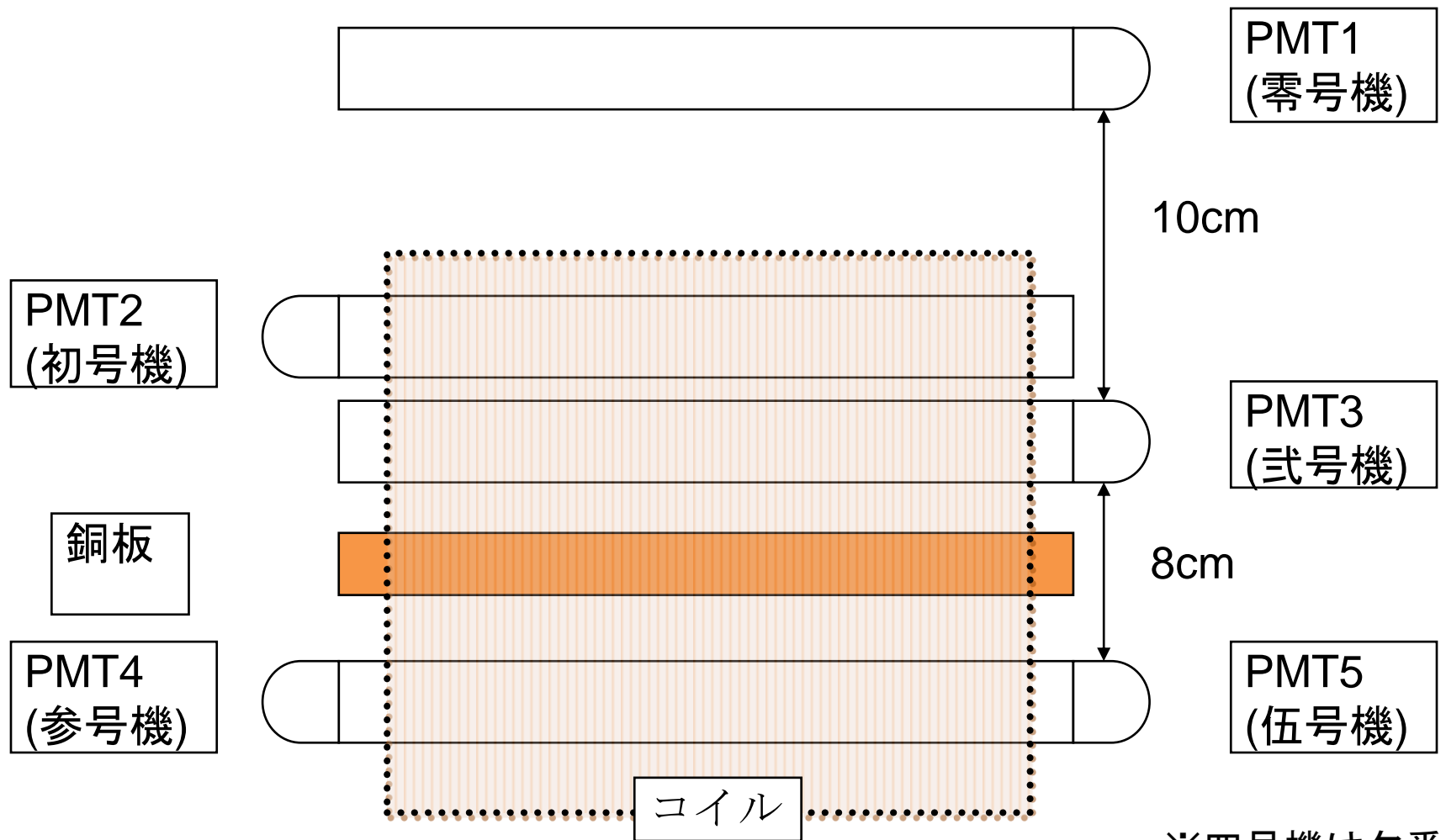
実験装置は主に次のものから構成される。

- プラスチックシンチレータ 4枚
100cm × 48cm × 1cm
- 光電子増倍管(PMT) 5個
- 銅板 2枚 50cm × 48cm × 1cm
- コイル (詳細は後述)

実際の実験装置



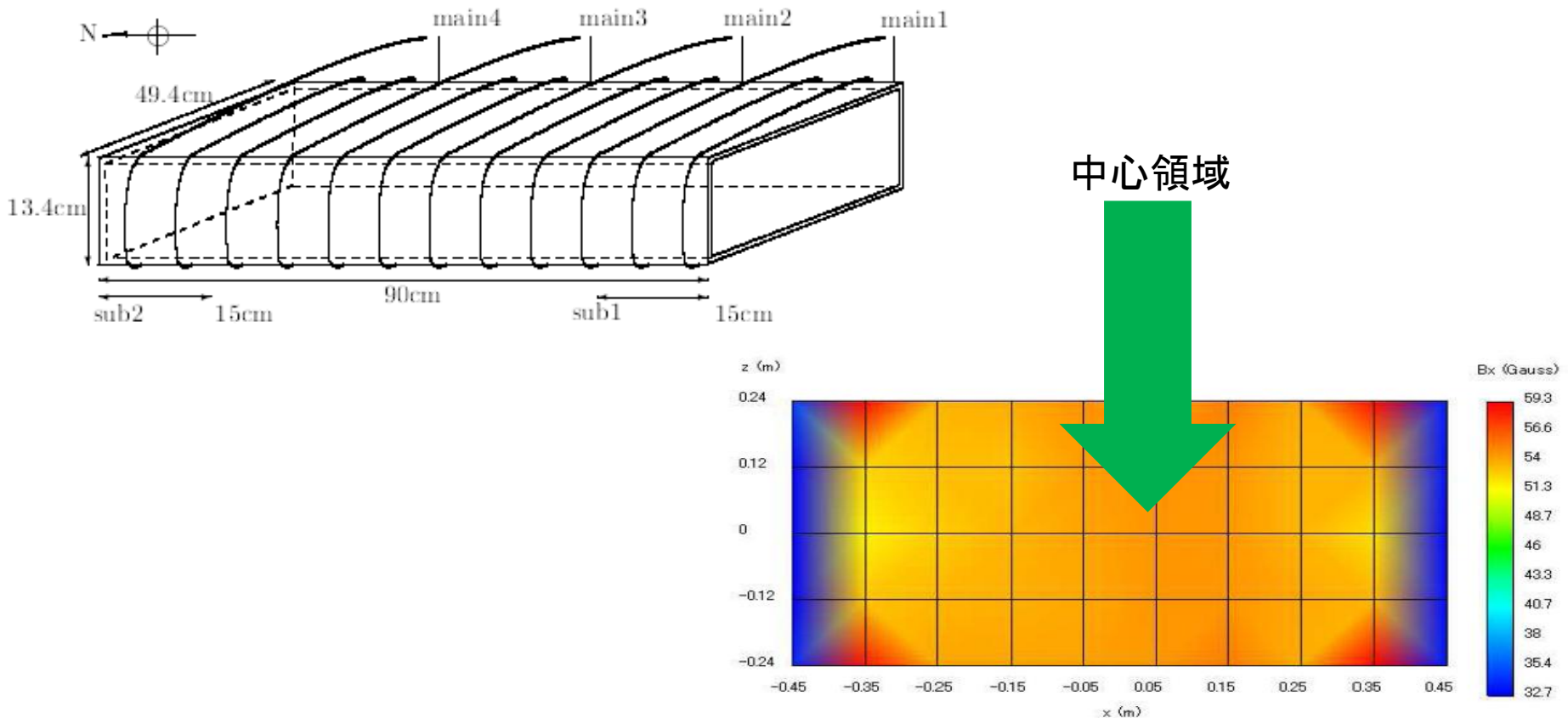
装置の概略



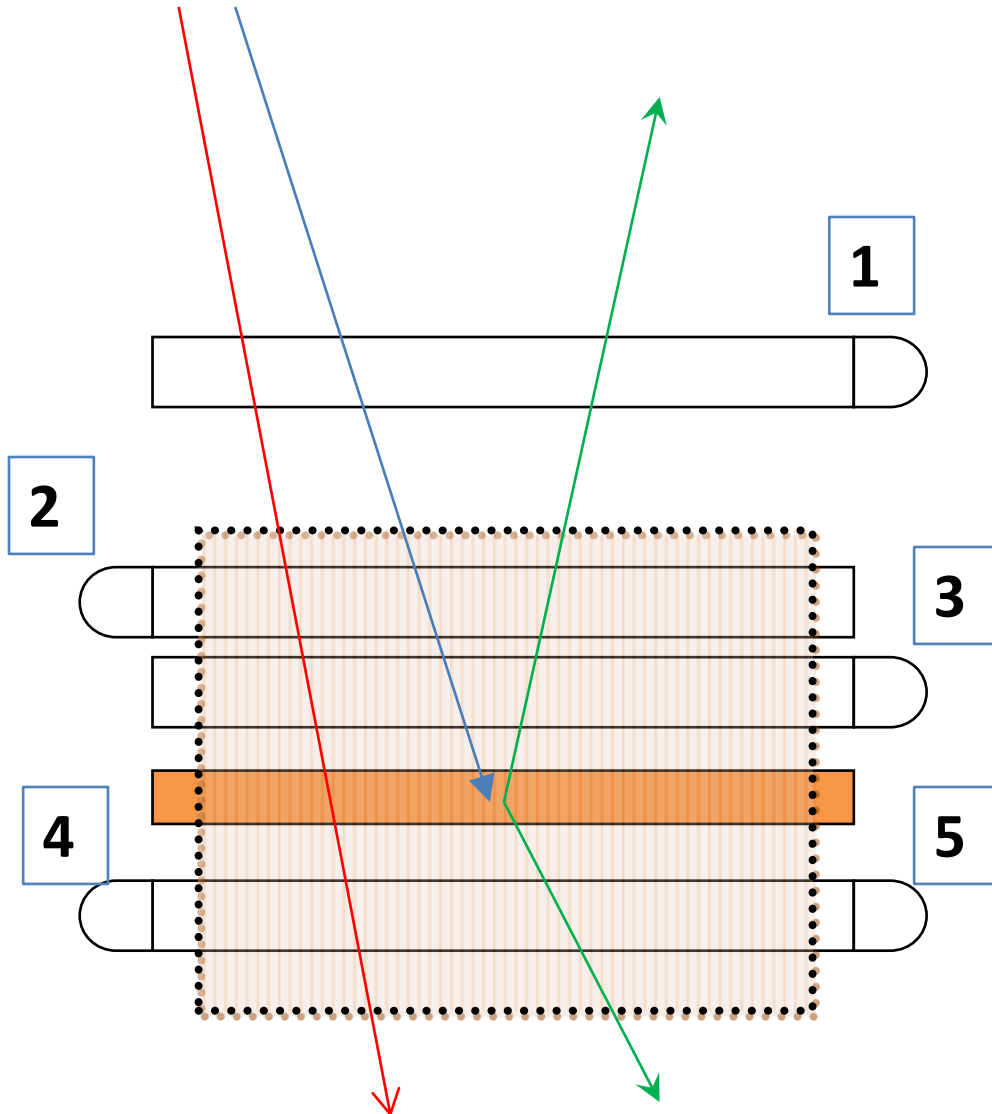
※四号機は欠番

コイル

コイルは下図のようにメインコイルとサブコイルから成り右下図のように銅板がある中心領域でほぼ一定の磁場を作り、その大きさは 49.2 ± 0.2 (測定誤差) ± 1.5 (系統誤差) Gである。



実験の方針



Start Signal

1, 2, 3が反応し4, 5が
どちらも反応しなかったもの。
(青矢のみ)

CH1(上に崩壊した粒子)

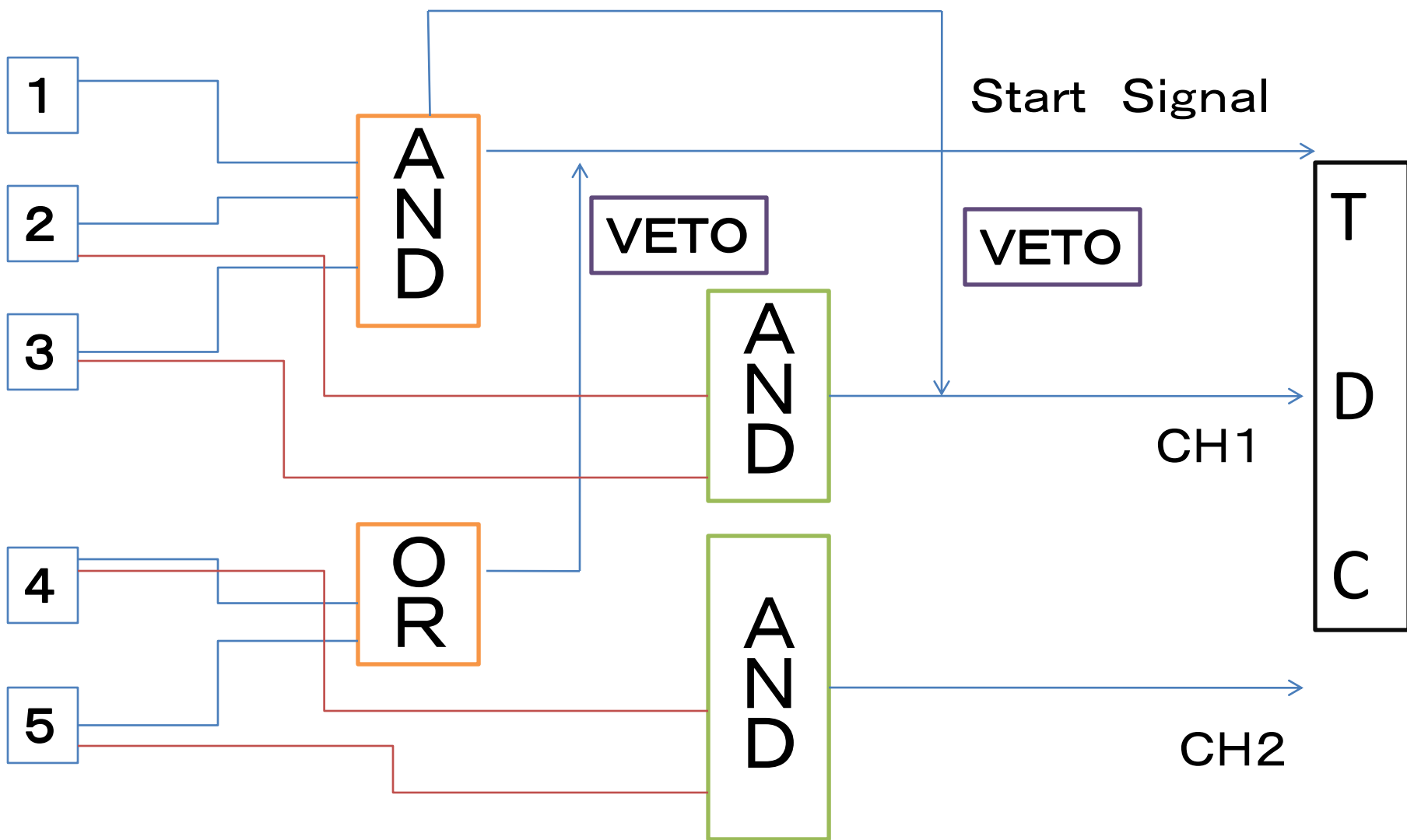
2, 3がともに反応したもの。

CH2(下に崩壊した粒子)

4, 5がともに反応したもの。

CH1、CH2の統計を取って
 ω を求める。

回路



各種設定

- PMTにかける電圧
 - ⇒低すぎると感度が落ちる。
 - ⇒高すぎるとノイズが大きくなる。
- 今回PMT1~5の順に1300、1700、1500、1300、1200Vで設定した。
- アナログ信号をデジタル信号に変える装置
 - ⇒反応感度ができるべくシンチレータの場所によらないように閾値を設定
- 今回は10mVであった。

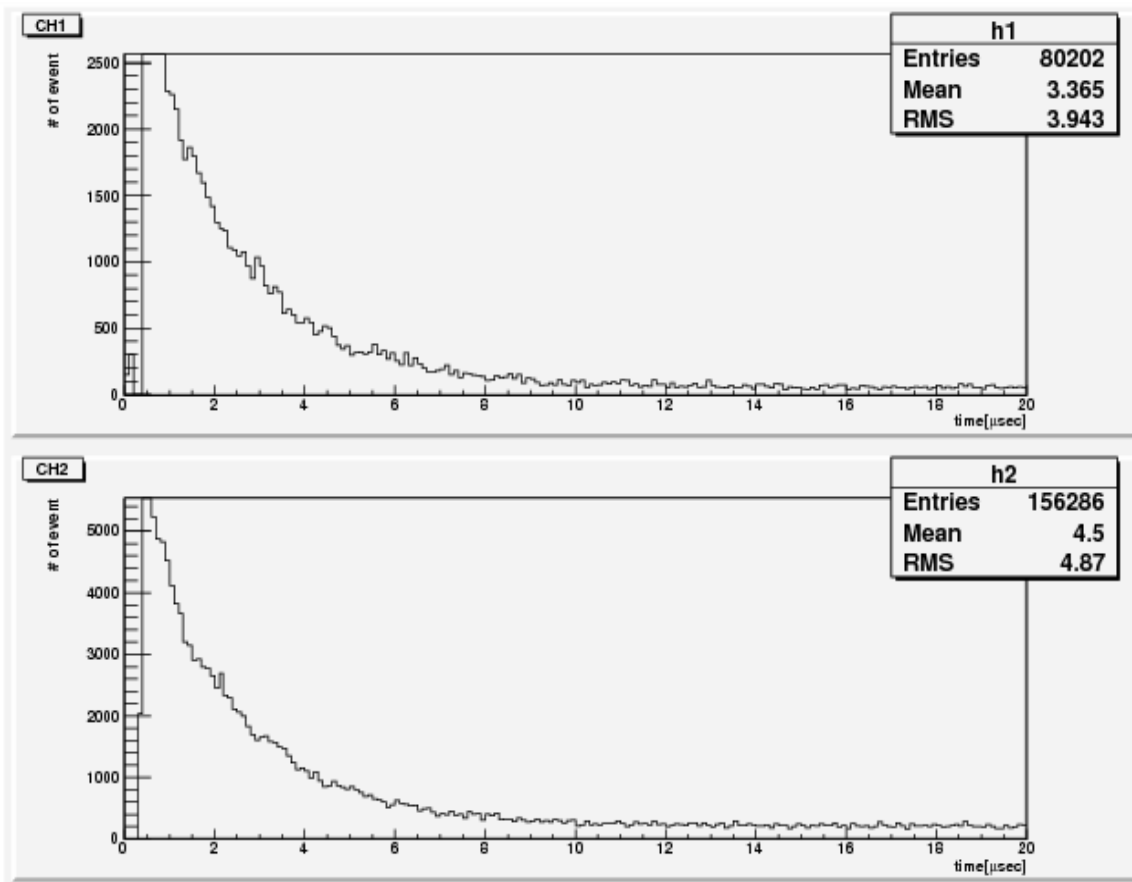
TDCの校正

- TDCは100ns、200nsずれて出てくる2つの信号を用意し(調整はオシロスコープで行った)校正を行った。

⇒100nsに対応するのが
(131.2 ± 1.9) × 10³カウント
である。

実験データ(磁場あり)

イベント数



26日間
データ数

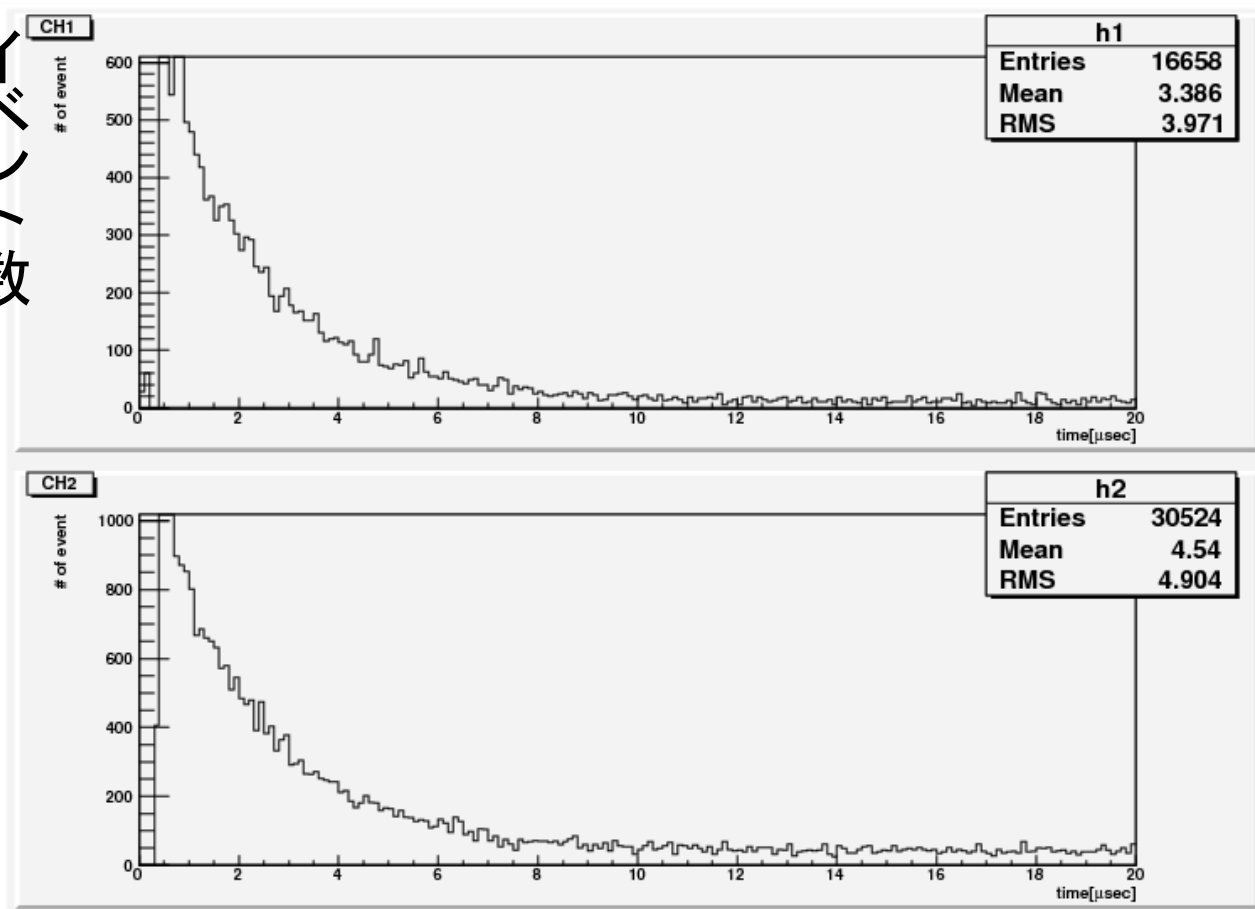
- CH1:80202個
- CH2:156286個

※CH1とCH2が同時に
反応しているものは
バックグラウンドの
ため、省いてある

Start信号が入ってからの時間[μ s]

実験データ(磁場なし)

イベント数



7日間
データ数

– CH1:16658個

– CH2:30524個

※CH1とCH2が同時に
反応しているもの
はバックグラウンド
のため、省いてある

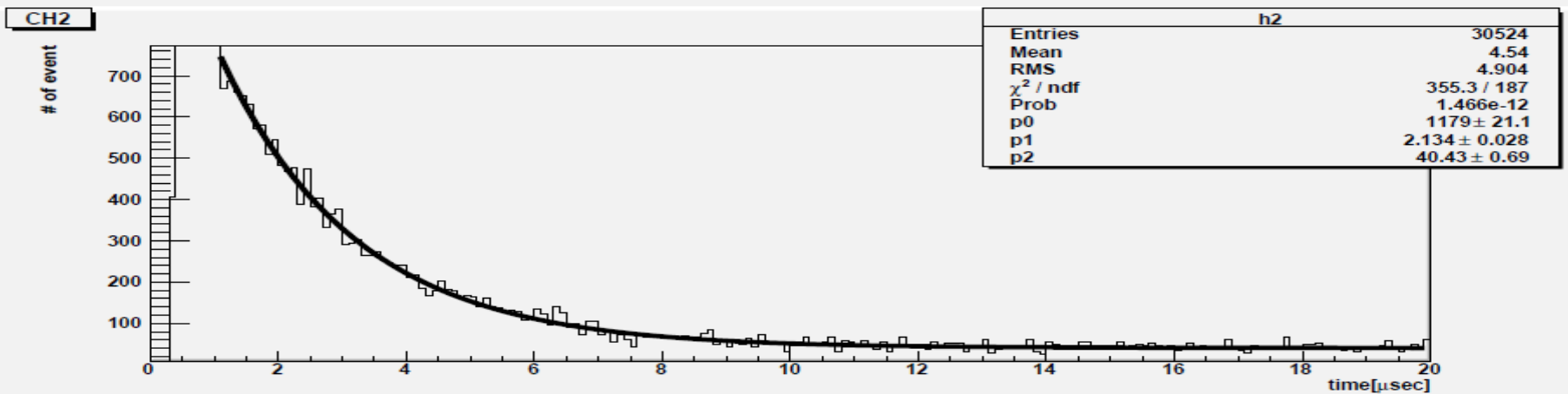
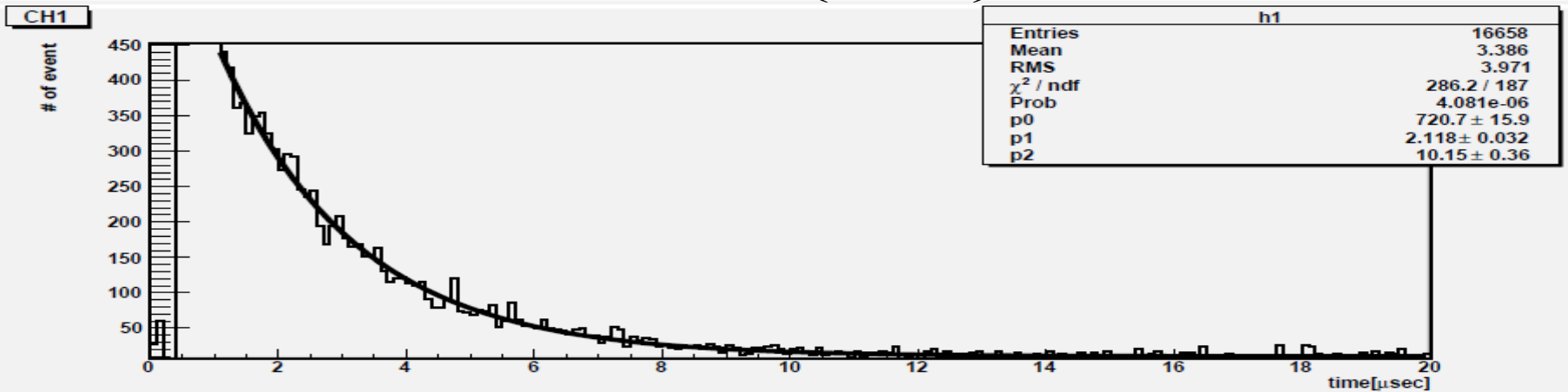
Start信号が入ってからの時間[μ s]

時間の原点について

- 回路を通る間に信号が遅れる
 - TDCの処理が原点を0にしていない
- ⇒ start信号が入ったのは横軸における約204ns

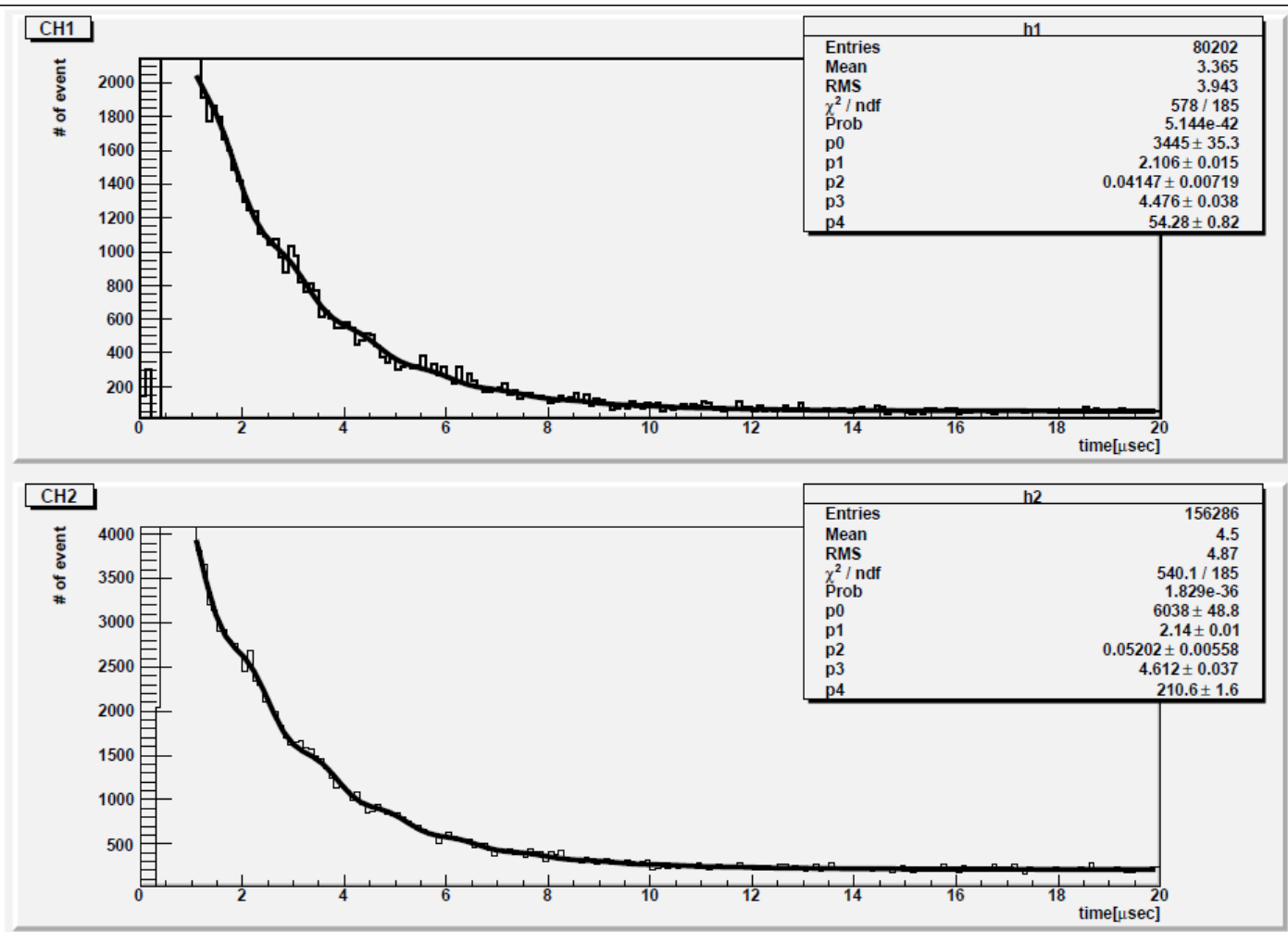
(a) 磁場なしの場合

$$N_1(t) = N_{10} \exp\left(-\frac{t}{\tau_\mu}\right) + b_1$$



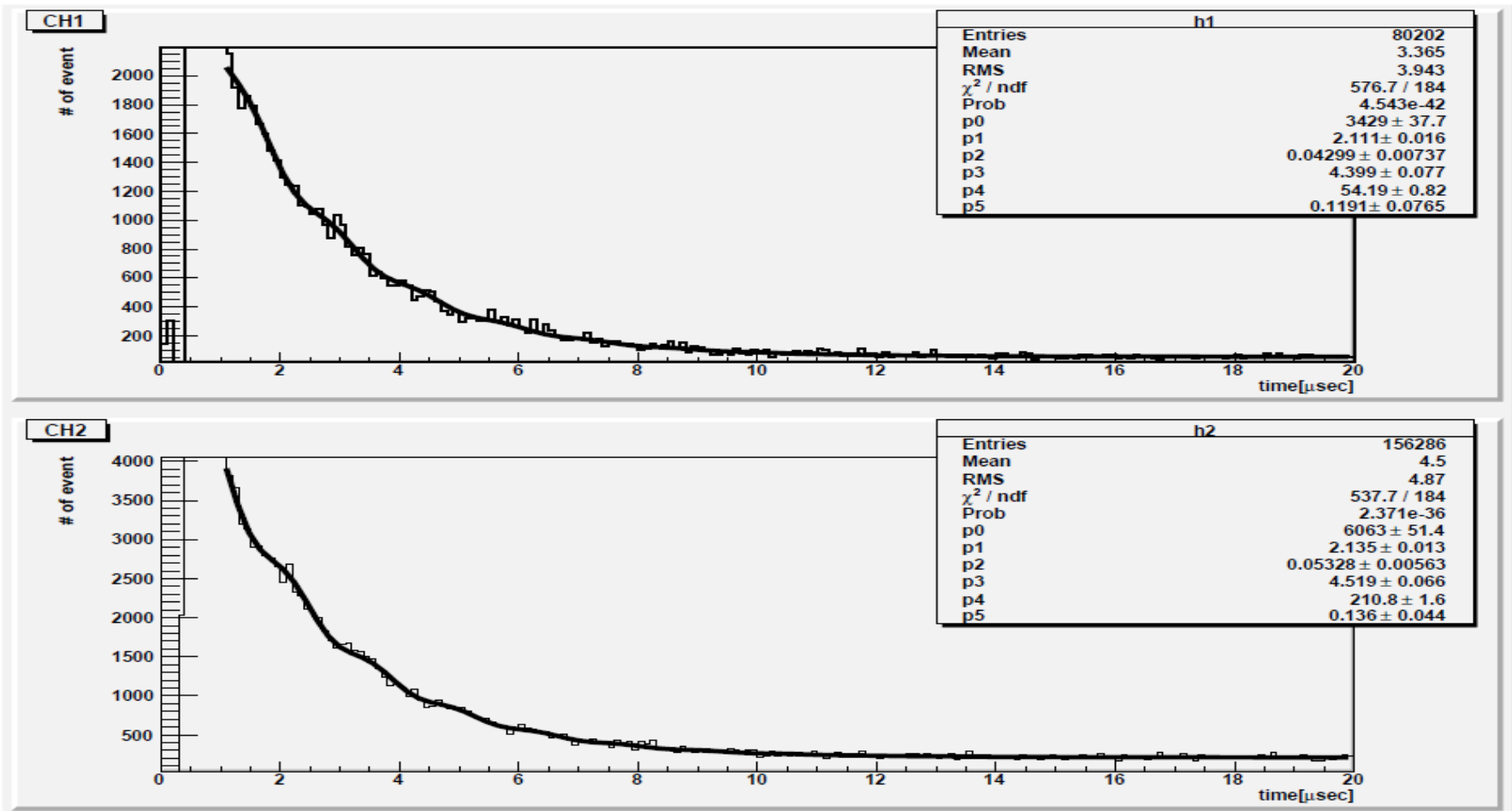
(b)磁場ありで位相を固定した場合

$$N_2(t) = N_{20} \exp\left(-\frac{t}{\tau_\mu}\right) \times (1 + \alpha_2 \cos[\omega_2(t - t_0)]) + b_2$$



(c) 磁場ありで位相を自由にした場合

$$N_3(t) = N_{30} \exp\left(-\frac{t}{\tau_\mu}\right) \times (1 + \alpha_3 \cos[\omega_3(t - t_3)]) + b_3$$



g因子を求める

- 必要な定数

ミューオンの質量： $m_{\mu}=105.6 \text{ MeV}/c^2$

電気素量： $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$$\omega = \frac{g|e|B_z}{2m_{\mu}}$$

結果まとめ

	CH1(b)	CH2(b)	CH1(c)	CH2(c)	文献値
τ_{μ} [μs]	2.087 ± 0.034	2.120 ± 0.033	2.092 ± 0.035	2.115 ± 0.034	2.197
ω [$1/\mu\text{s}$]	4.517 ± 0.077	4.655 ± 0.078	4.440 ± 0.102	4.561 ± 0.095	
g	2.155 ± 0.083	2.220 ± 0.085	2.118 ± 0.088	2.175 ± 0.087	2.0023

文献値に比べて
寿命は短く、 g は大きく見えた。

それぞれの測定の妥当性

- μ^- の影響の程度。
- 磁場Bの正確さ。
- $[130 \times 10^3 \text{カウントに対する補正}] = C$ の妥当性
(c)位相自由についてのみ考える)

μ^- の影響の評価

文献値より、

個数比 $N_+ : N_- = 6 : 5$ (地上で)

μ^- の寿命(銅中) $0.160 \pm 0.004 \mu\text{s}$

$\Rightarrow N_- / N_+ = 5/6 [\exp(-5.773t)]$

- フィットTINGは $1\mu\text{s} \sim 20\mu\text{s}$ の範囲で行ったので、 $1\mu\text{s}$ で計算してやると、 N_- は N_+ に対して、約0.84%となり μ^- の影響は無視できる。

磁場のみが間違っていた場合

- g因子の文献値から逆算すると磁場は
 $51.78 \pm 1.12 \text{ G}$

⇒磁場を形成するコイルのうちサブコイルの電流比を考慮していなかった。

磁場は文献値の91% ($49.2 \pm 1.7 \text{ G}$) から100% ($54.1 \pm 1.9 \text{ G}$) までの値であり、とりうる可能性のある値となっている。

これは十分可能性のある値。

Cのみが間違っていた場合

- 寿命の文献値から逆算するとCは

$$125.6 \times 10^3$$

⇒g因子は2.0745

- g因子の文献値から逆算するとCは

$$122.4 \times 10^3$$

⇒寿命は2.234 [μs]

寿命の評価

- ここまでで得られた寿命をまとめる。

	(a)CH1	(a)CH2	(b)CH1	(b)CH2	(c)CH1	(c)CH2
Cは妥当	2.138 ±0.045	2.153 ±0.042	2.087 ±0.034	2.120 ±0.033	2.092 ±0.035	2.115 ±0.034
Cが間違い			2.244	2.312	2.204	2.263
そのときの C(×10 ³)			122.0	118.3	124.0	120.8

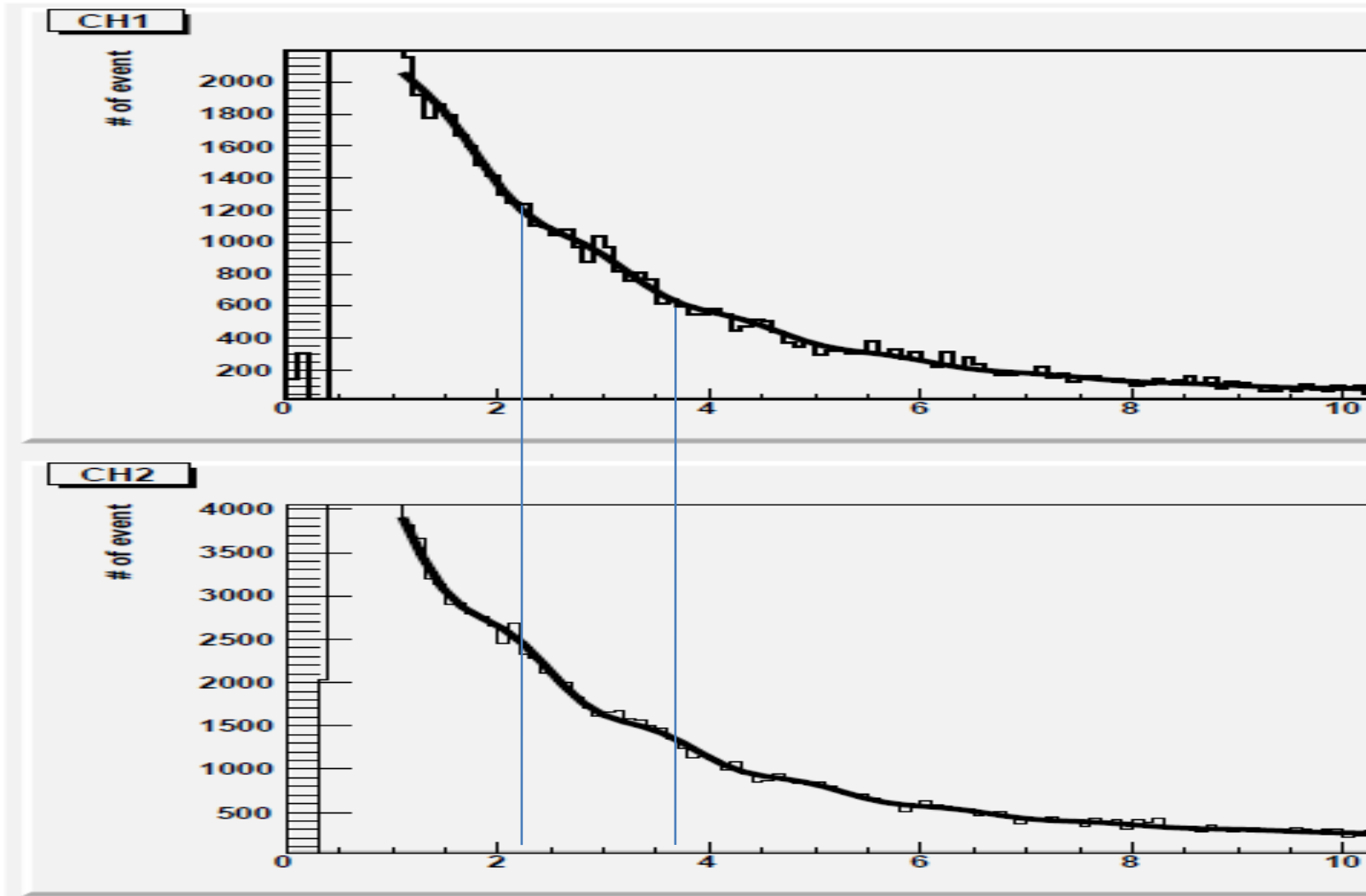
gの評価

磁場あり	(b)CH1	(b)CH2	(c)CH1	(c)CH2
結果通り	2.155 ± 0.083	2.220 ± 0.085	2.118 ± 0.088	2.175 ± 0.087
Cが間違っていた	2.046	2.142	2.016	2.094
そのときのC	124.6×10^3	126.6×10^3	124.9×10^3	126.3×10^3

- 妥当なCとして考えられるのは、
寿命においては、121.3
gにおいては、125.6
- その時の値を用いて寿命とgを再計算する。

	(a)CH1	(a)CH2	(b)CH1	(b)CH2	(c)CH1	(c)CH2
寿命	2.192	2.209	2.258	2.295	2.263	2.289
g			2.063	2.125	2.027	2.083

磁場ありの時の相関関係



反省

- 磁場の強さを測定しなかったこと。
- 磁場については単純に電流比から求めてしまった。
- 実際にはサブコイルのほうは電流が100%のまま
⇒単純にメインコイルの電流比で磁場を求めたのは間違いである。
- TDCの校正を100ns、200nsの二点でしか行わなかったため校正に予期しない誤差が出たとも考えられる。校正は慎重に十分データを取って行うべきだった。

まとめ

- 寿命については全体的に4～5%下方向に系統誤差が出る結果となった。
- g因子については、磁場・校正が原因と思われる系統誤差は出てきたもののおよそ文献値に近い値を得ることができた。

参考文献

- 現代の量子力学 上 J.J.Sakurai 吉岡書店
- 宇宙線 小田稔 裳華房
- 素粒子 武田暁 裳華房
- Introduction to High Energy Physics, Donald H. Perkins, Cambridge University Press
- 2004年度 P1レポート