

水中におけるミューオンの寿命測定

慶応義塾大学理工学部 物理学科 西村研究室

永井 雄大

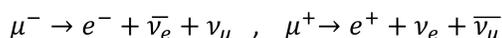
1. 目的

宇宙線ミューオンを水中で静止させて崩壊時間を測定し、水中における負ミューオンの寿命を求め、また、測定精度検証のため、鉄およびアルミ中におけるミューオンの寿命を求め

2. ミューオンとニュートリノ識別

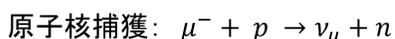
ミューオン (μ^- , μ^+)

第2世代の荷電レプトンであり、2次宇宙線に含まれる。弱い相互作用により約 $2.2 \mu\text{s}$ で崩壊する。



$$\text{崩壊粒子数の時間変化} \quad \frac{\Delta N_{\text{decay}}}{\Delta t} = \frac{N_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \tau: \text{寿命}$$

物質中において、 μ^+ は崩壊反応のみであるのに対し、 μ^- は原子核捕獲反応を起こすことがあるため、寿命が短くなる



物質中: $\tau_{\mu^-} < \tau_{\mu^+} = 2.2 \mu\text{s}$

スーパーカミオカンデ(SK)

SKは、水を標的としてニュートリノ(ν)を検出する水チェレンコフ検出器である。 ν は原子核と衝突して μ を生成する(図1)。また、水中における $\tau_{\mu^-}/\tau_{\mu^+}$ は以下のように求められている。

$$\tau_{\mu^-} = 1.7954 \pm 0.0020 \mu\text{s} \quad [1]$$

$$\tau_{\mu^+} = 2.1969811 \pm 0.0000021 \mu\text{s} \quad [2]$$

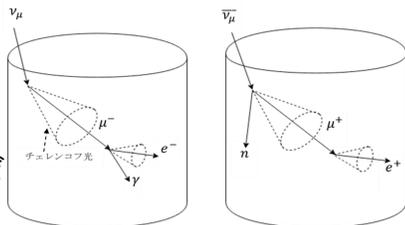


図1 水中における ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ の反応

水中における μ^-/μ^+ の寿命差条件などから $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ の識別感度を向上させることで、ニュートリノの質量階層性問題の解決が期待されている。

τ_{μ^-} には2nsの誤差があり、 τ_{μ^+} に比べ精度が劣るため、本研究では水中における τ_{μ^-} 測定を試みる。

3. 実験方法

シンチレーションカウンター (T, U, D, L, R) を使用

シンチレータ: μ, e が入射すると微弱な光を発する
PMT(光電子増倍管): 光を電気信号に変換・増幅

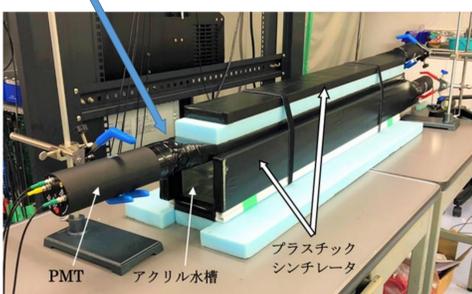


図2 実験装置 全体

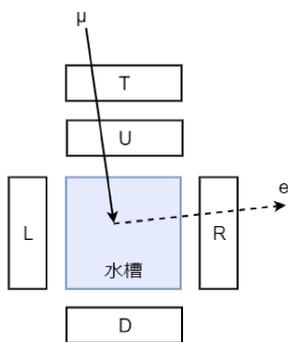


図3 実験装置 断面図

μ が水中で静止 (TUDLR) = START信号

その後、U, D, L, R で信号 = STOP信号

START・STOP信号を記録し、その時間差から崩壊時間を算出
⇒ 崩壊時間分布を作成

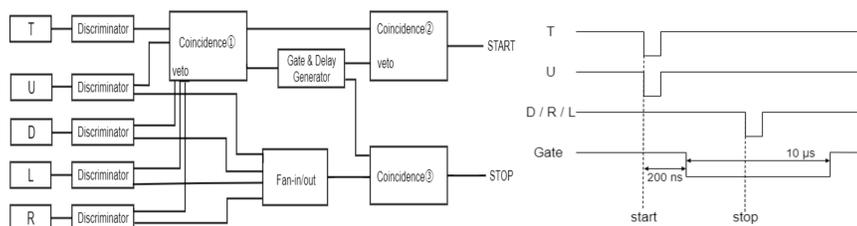


図4 作成した回路

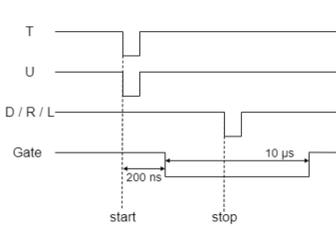


図5 タイミングチャート

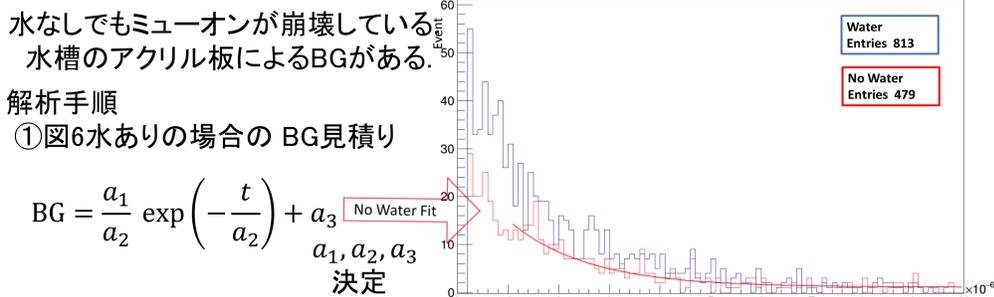
4. 水中での測定

崩壊時間分布の Fit 関数 Fitパラメータ: N_+, τ_{μ^+}, C

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N_-}{\tau_{\mu^-}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right) + \frac{N_+}{\tau_{\mu^+}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right) + \text{BG}$$

実験装置などによるバックグラウンド

水槽に水を入れた状態と抜いた状態で48時間ずつ測定(図6)



解析手順

① 図6水ありの場合のBG見積り

$$\text{BG} = \frac{a_1}{a_2} \exp\left(-\frac{t}{a_2}\right) + a_3$$

No Water Fit
 a_1, a_2, a_3 決定

② 文献値より

$$\tau_{\mu^+} = 2.1969811 \times 10^{-6} \text{ [2]}$$

$$N_+/N_- = 1.28 \text{ [3]}$$

を仮定

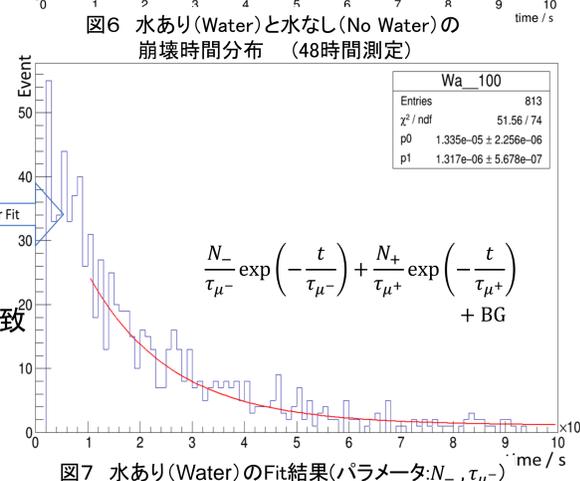
③ Fit により、 N_-, τ_{μ^-} を決定

$$\tau_{\mu^-} = 1.3 \pm 0.6 \mu\text{s}$$

文献値(1.80 μs)と誤差の範囲で一致

0.6 μs の誤差要因

・統計数の少なさ
(水あり) - (水なし) ~ 300



5. 測定精度の検証

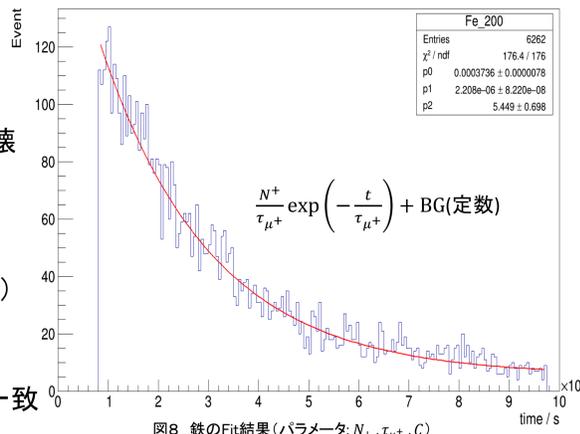
(a) 鉄中 μ^+ の寿命測定 (96時間)

① μ^- は寿命が0.21 μs と短く、測定開始 0.8 μs でほぼ全て崩壊
0.8 μs 以降、 μ^+ のみと仮定

② Fit (0.8~10 μs) により、 $N_+, \tau_{\mu^+}, \text{BG(定数)}$ を決定 (図8)

$$\tau_{\mu^+} = 2.21 \pm 0.08 \mu\text{s}$$

文献値(2.2 μs)と誤差の範囲で一致



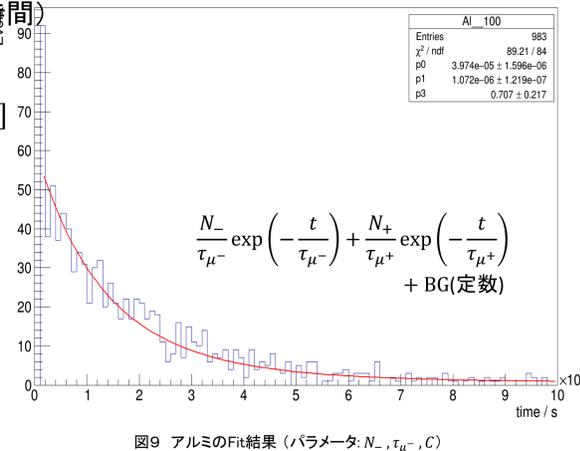
(b) アルミ中の μ^- の寿命測定 (90時間)

① 水と同様に
 $\tau_{\mu^+} = 2.1969811 \times 10^{-6} \text{ [2]}$
 $N_+/N_- = 1.28 \text{ [3]}$
を仮定

② Fit により、 $N_-, \tau_{\mu^-}, \text{BG(定数)}$ を決定 (図9)

$$\tau_{\mu^-} = 1.07 \pm 0.13 \mu\text{s}$$

文献値(0.86 μs)と24%のずれ
⇒ 装置の改善が必要



6. 結論

水中における負ミューオンの寿命測定を行い、アクリル板中でミューオンが崩壊するバックグラウンドを考慮した解析により、 $\tau_{\mu^-} = 1.3 \pm 0.6 \mu\text{s}$ を得た。

鉄、アルミ中の測定において、誤差は μ^+ (Fe)では0.08 μs 、 μ^- (Al)では0.13 μs であったことから、水中においても、統計数を増やすことで誤差を0.1 μs 程度にまで減らすことができると考えられる。

測定精度向上のためには、検出器のPMTノイズなどのバックグラウンドを抑制することが挙げられる。

参考文献

- [1] T.Suzuki, et al., "Total nuclear capture rates for negative muons", Physical Review C35, 2212.
- [2] M.Tanabashi, et al., (Particle Data Group), Physical Review D98, 030001(2018) and 2019 update.
- [3] G.D.Badhwar, et al., "Analytic representation of the proton-proton...", Physical Review D Vol.15 No.3.