

スーパーカミオカンデ実験における 宇宙線ミュオンの電荷比測定

岡山大学 北川 芙西音

第2回 地下宇宙若手研究会

講演日：2021年11月26日

中野佑樹*、小汐由介

東大宇宙線研*、岡山大学、他 Super-Kamiokande collaboration

目次

- 宇宙線ミュオン⁺の電荷比
- スーパーカミオカンデ実験
- ミュオン⁻崩壊電子事象の解析
 - 事象再構成
 - 宇宙線ミュオン⁺のMC
 - 識別条件の選定
- 電荷比の測定結果
- まとめ

宇宙線ミュオンの電荷比

□ 電荷比

- 一次宇宙線が大気中の原子核に衝突することで生成される μ^+/μ^- の割合

□ 地下実験における電荷比測定

- 一次宇宙線(陽子~93%)の影響により電荷比 $R(\mu^+/\mu^-) \sim 1.3$
- π/K 中間子成分の生成割合とそのエネルギーに依存する

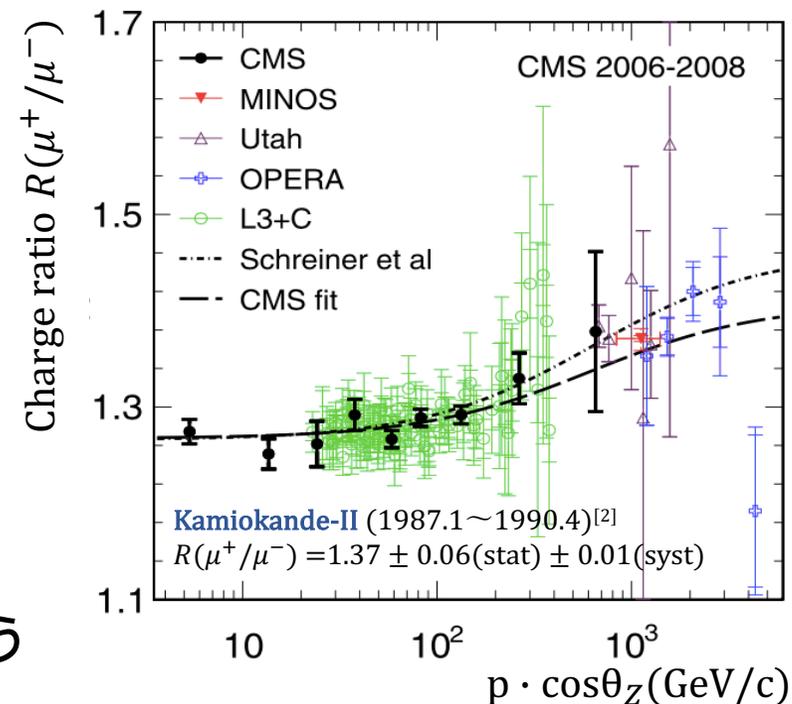
→ 宇宙線と大気原子核の反応モデルの検証

→ ニュートリノ解析における大気ニュートリノMCの不定性・精度向上

研究目標

スーパーカミオカンデ検出器を用いた μ -e崩壊事象の観測より、1.2 TeV/c領域における電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の測定を行う

[1] CMS Collaboration : Physics Letters B 692 (2010) 83-104



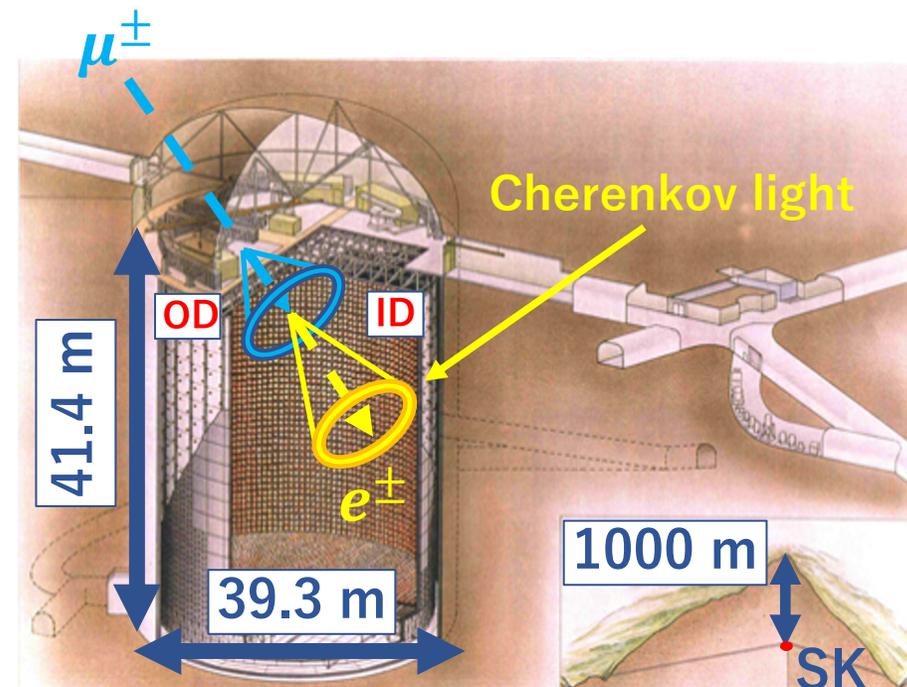
スーパーカミオカンデ実験

□ スーパーカミオカンデ(SK)検出器

- 地下1000 m (2700 mwe)に設置された水チェレンコフ型検出器
- 超純水5万トンの2層式タンク(内水槽・外水槽)
- タンク壁面に光電子増倍管(PMT)が設置
- PMTで荷電粒子から生じるチェレンコフ光を検出
→ 位置情報・エネルギーの再構成
- SK-VI以降、超純水にガドリニウム(Gd)を導入

□ 物理観測

- 超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、宇宙線ミュオンなど
- 陽子崩壊



Phase	SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV	SK-V	SK-VI
Period	1996/04 ~ 2001/07	2002/10 ~ 2005/10	2006/07 ~ 2008/08	2008/09 ~ 2018/05	2019/01 ~ 2020/07	2020/07 ~ Gd導入
Livetime [days]	1496	791	548	2970	379	Running
ID PMTs	11,146	5,182	11,129	11,129	11,129	11,129
OD PMTS	1,885	1,885	1,885	1,885	1,885	1,885
PMT coverage [%]	40	19	40	40	40	40

ミューオン-崩壊電子事象の再構成

観測されるミューオン-崩壊電子の特徴 (約2000 event/day)

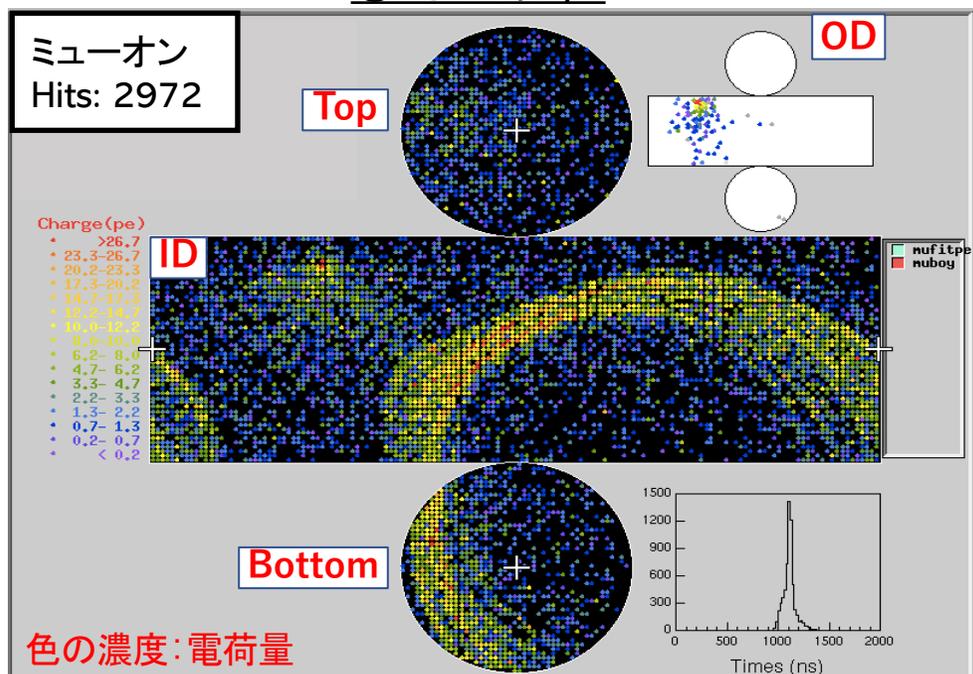
□ 宇宙線ミューオン

- PMTのヒット数が多く(1000 hits以上)、観測される光量が大きい(1500 p.e.以上)
- PMTのヒット時間情報・光量により事象再構成を行う

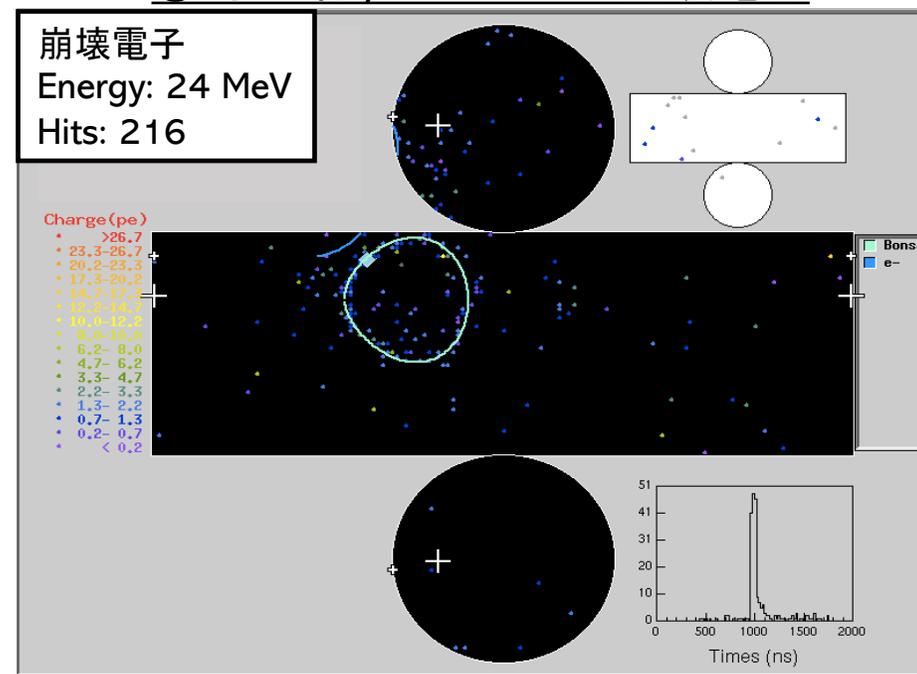
□ 崩壊電子

- 100 MeV未満の低エネルギー事象では観測される光子数が少ない(平均 30 MeVで280 hits)
- PMTのヒット数・時間情報からエネルギー、位置再構成を行う

① 宇宙線 μ

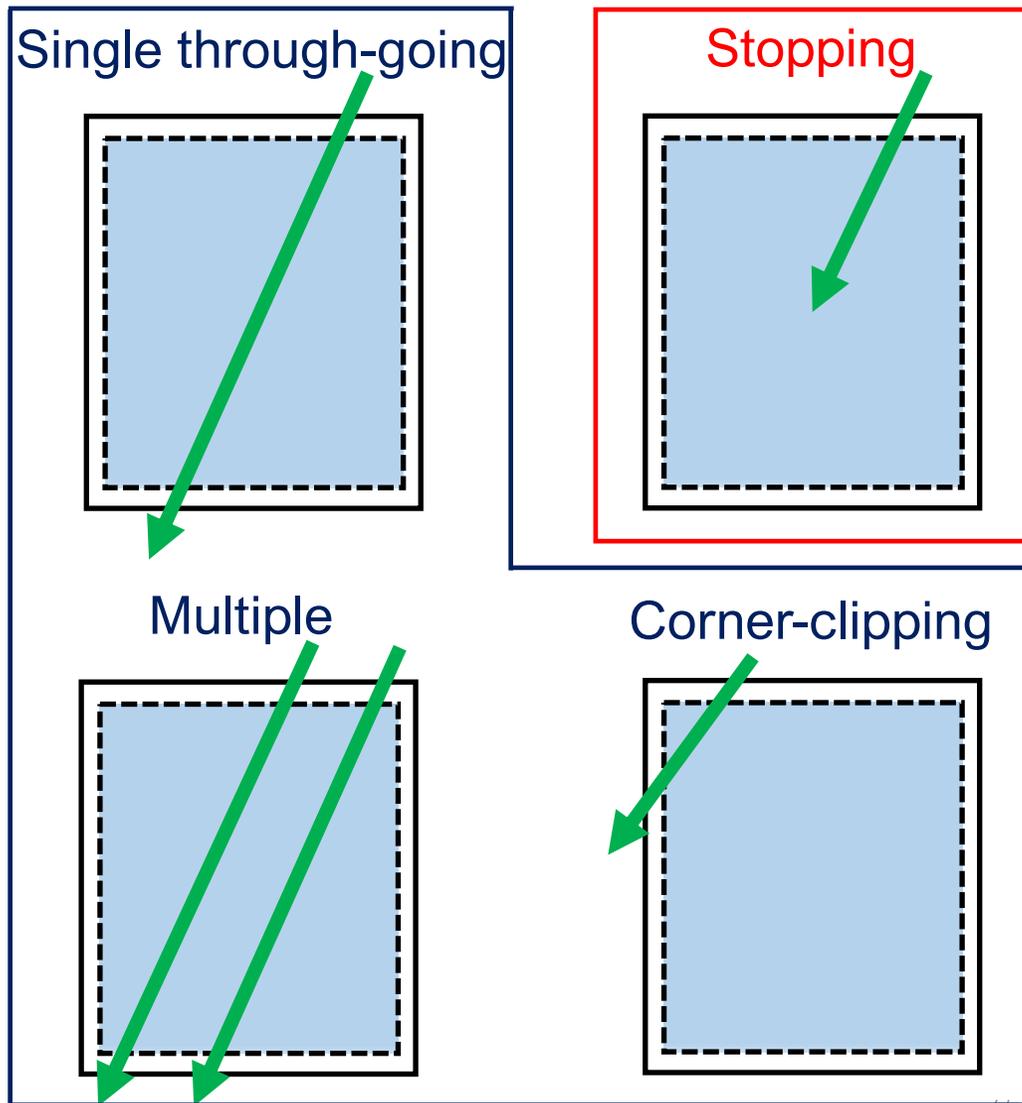


② 宇宙線 μ から生じた崩壊電子



宇宙線ミュオンの分類

□ 観測される宇宙線ミュオンは4種類に分類される

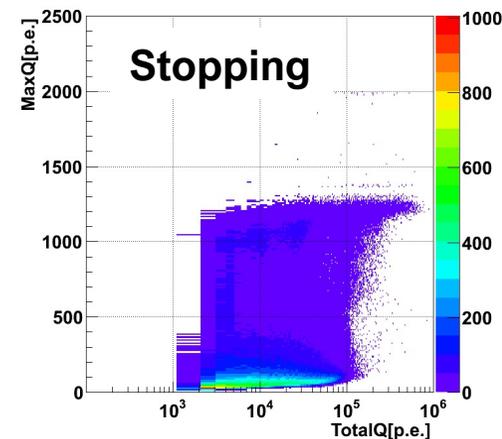


信号事象

• Stopping muon

1個のミュオンが検出器に入射し、検出器内部でエネルギーを失い静止する
→ 崩壊電子を伴う事象

- 水中でミュオンが損失する電荷の総量と最大電荷量
→ 観測される総電荷量は $10^3 < Q_{\mu} \text{ (p.e.)} < 10^5$ の領域に分布



→ 観測データの事象選別の妥当性を評価するためMCを実施

宇宙線ミューオンのフラックス計算

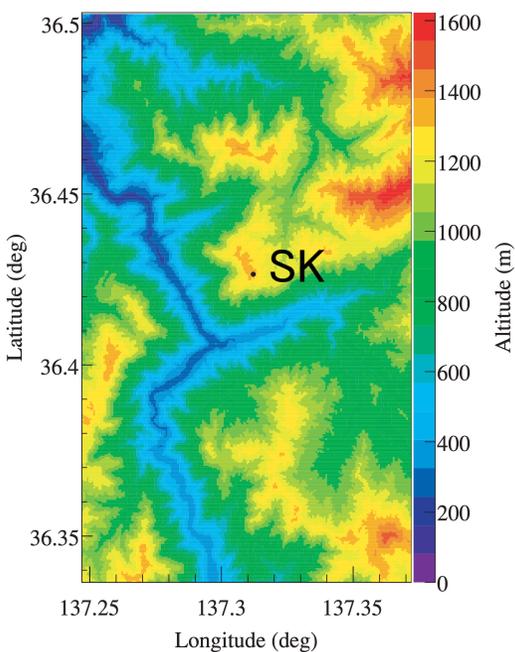
- 宇宙線ミューオンのMCによりミューオン-電子崩壊事象の事象選別を行う
→ SKで観測されるミューオンフラックスを考慮したMC

- MUSIC(Muon Simulation Code)^[2]

神岡鉱山近辺の地理情報から地下で観測されるミューオンのエネルギーおよび角度分布を計算

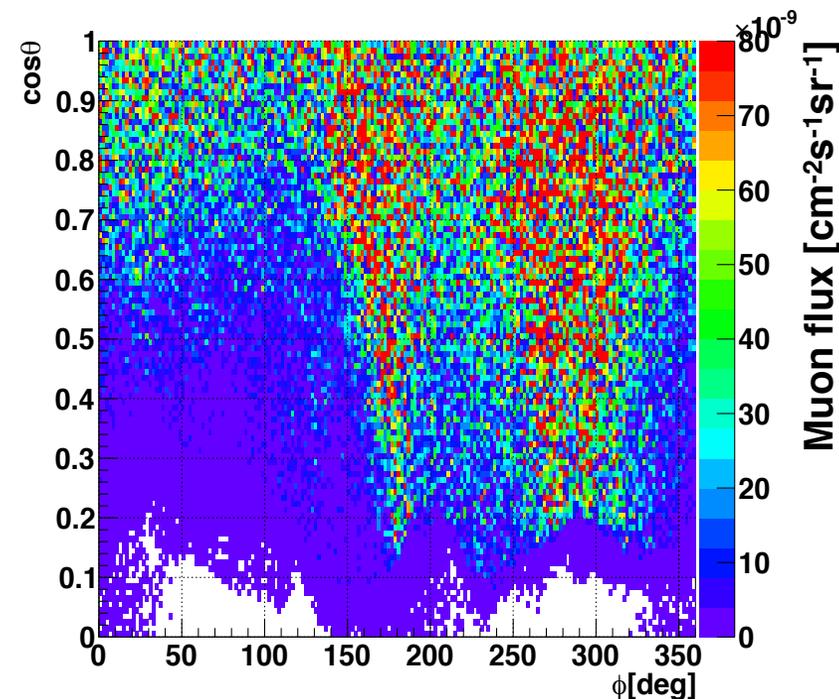
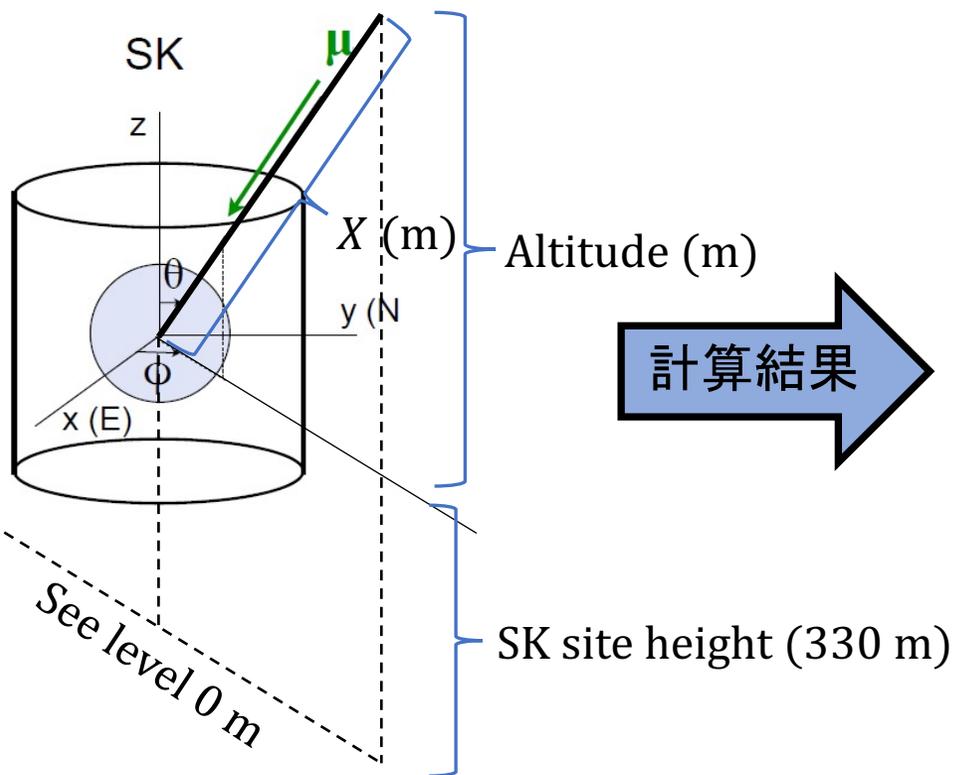
μ が岩盤を通過する距離 χ に応じてフラックスを計算

Digital Map 50 m Grid



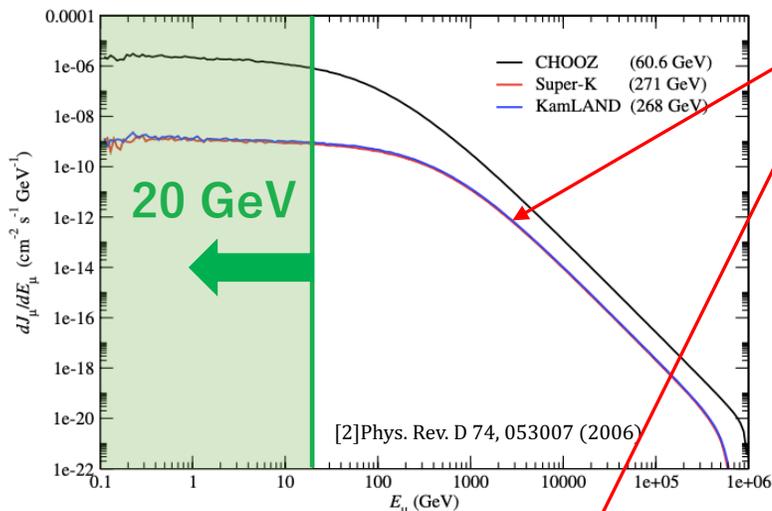
国土地理院(1997)

[2] Phys. Rev. D 74, 053007 (2006)

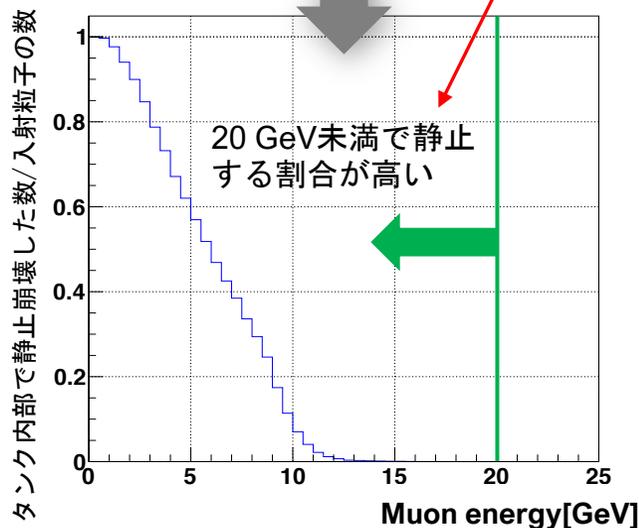


宇宙線ミューオンのMC

SKにおけるミュオンフラックス



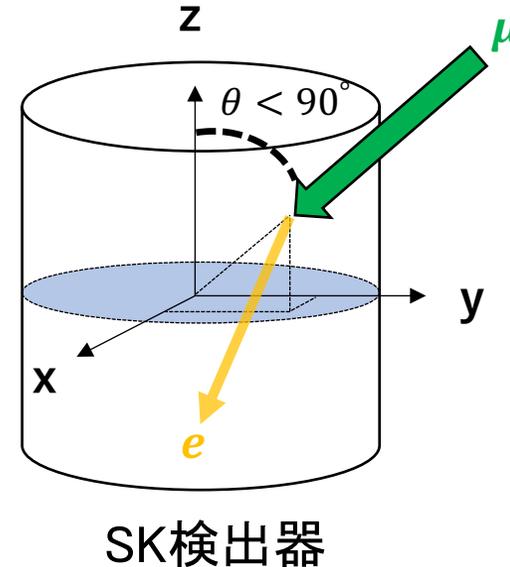
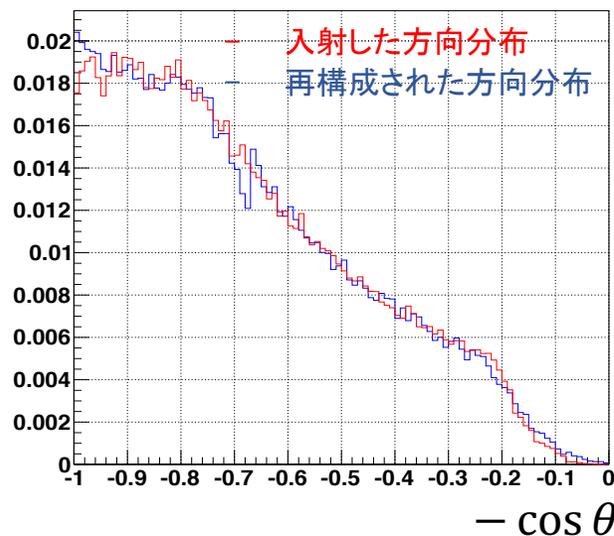
[2] Phys. Rev. D 74, 053007 (2006)



タンク内部で静止崩壊するミューオンの確率

① MUSICよりタンク内部でミューオンが静止するエネルギー領域 (0.1 GeV - 20 GeV) を推定

② ミュオンフラックスの天頂角分布に沿って粒子を入射



SK検出器

⇒ 上記をもとに崩壊電子を伴うミュオン事象を生成し、事象選択条件を求める

ミューオンー崩壊電子事象の選別

□ 宇宙線ミューオン

- ・ 検出器内で崩壊電子を伴う天頂角 $\theta < 90^\circ$ を持つイベント

□ 崩壊電子

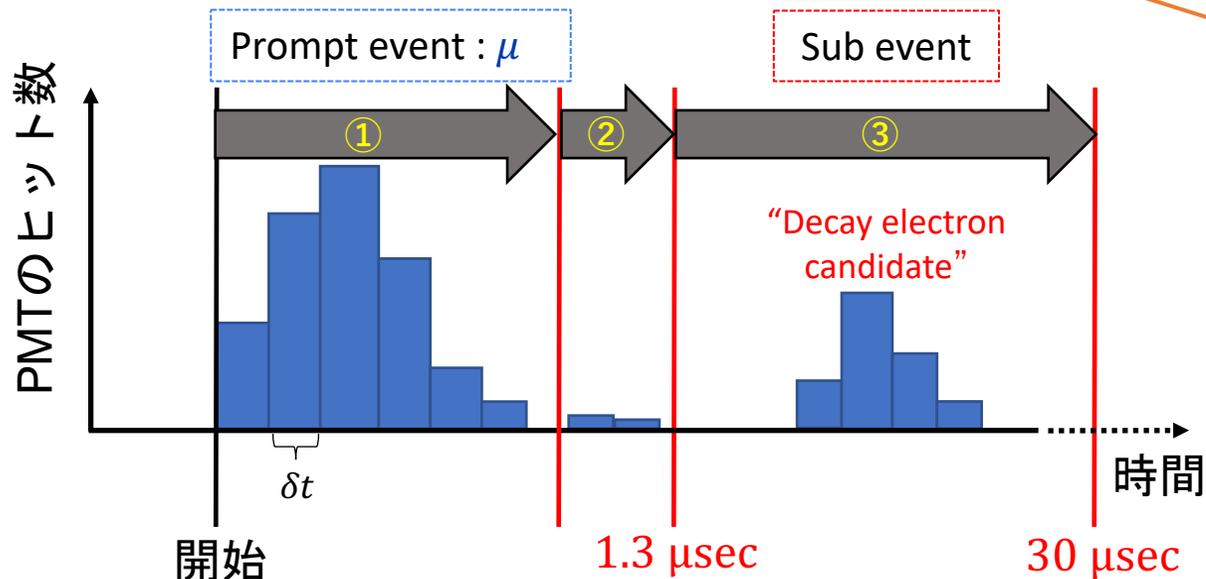
先発信号(ミューオン)と崩壊電子の時間差

① ミューオン事象によるヒット情報を取得

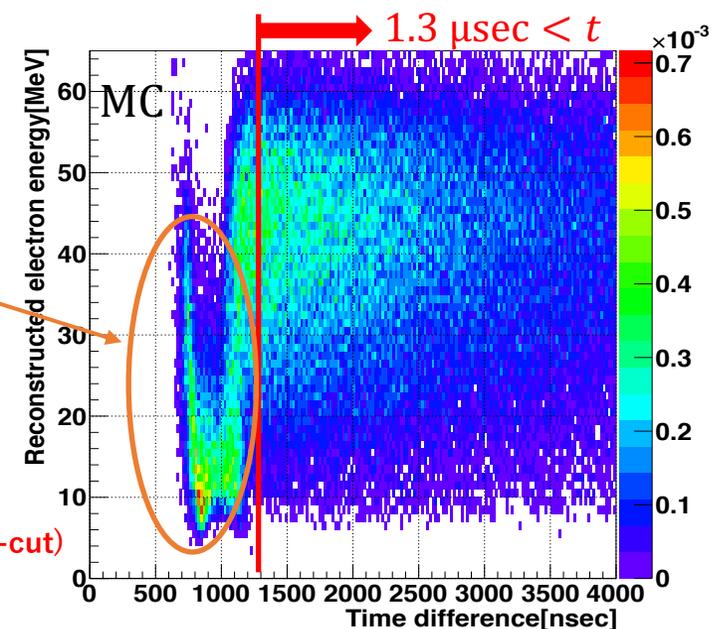
②+③ 先発事象から **1.3 μsec 未済** を取得

ミューオン事象のヒット情報(長時間領域)が含まれる

→ 事象再構成に影響を及ぼす



$\mu - e$ 崩壊の時間差とエネルギー



1.3 μsec 未済での
事象再構成

→ ③ 1.3 μsec 以上の範囲でデータ取得を行う

ミューオンー崩壊電子事象の選別

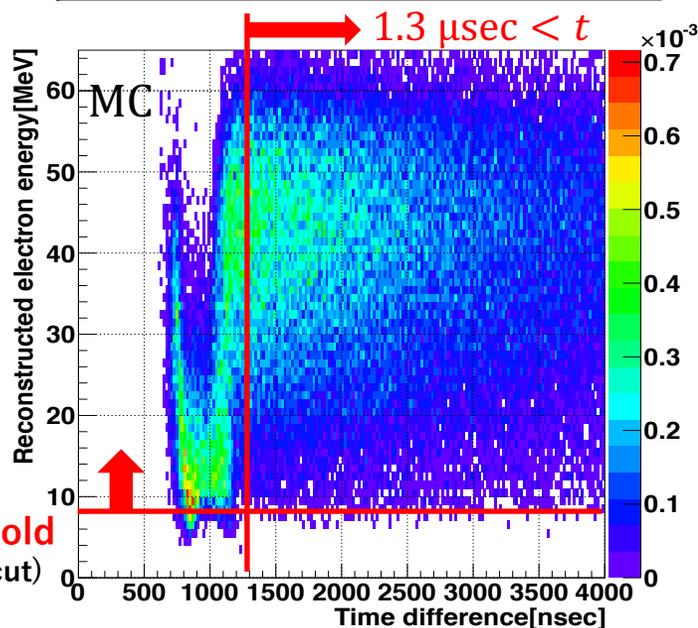
□ 宇宙線ミューオン

- 検出器内で崩壊電子を伴う天頂角 $\theta < 90^\circ$ を持つイベント

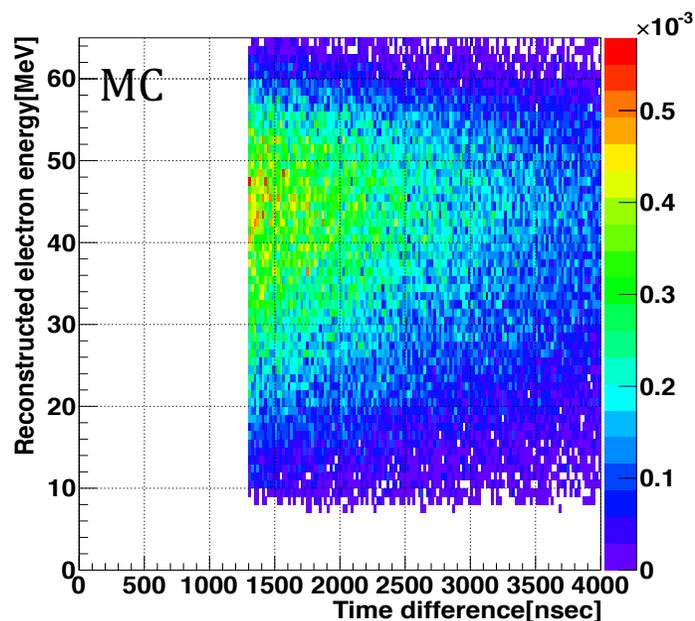
□ 崩壊電子

- 先発信号との時間差が $1.3 \mu\text{sec} < t < 30 \mu\text{sec}$
- 8 MeVカットにより μ^- 原子核捕獲で生成される放射性原子核からの γ 線を除去
- タンク内でミューオンが静止した位置と崩壊電子との距離は $\text{distance} < 300 \text{ cm}$

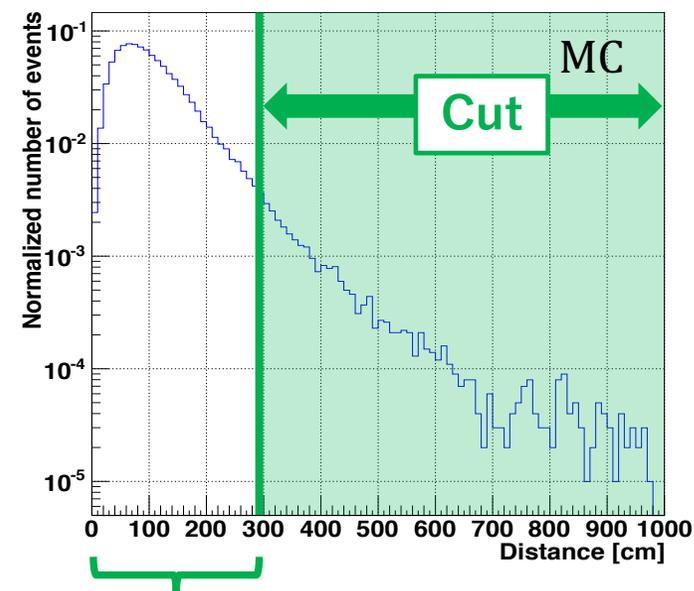
$\mu - e$ 崩壊の時間差とエネルギー



Cut後



μ 静止位置と崩壊電子の距離



98% efficiency $\sim 300 \text{ cm}$

電荷比の測定結果

□ 電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の算出方法

- $\mu - e$ 崩壊事象の時間差から粒子数(N_{μ^+}/N_{μ^-})を算出
→ 水中での μ^+ , μ^- の寿命 τ の違いを利用

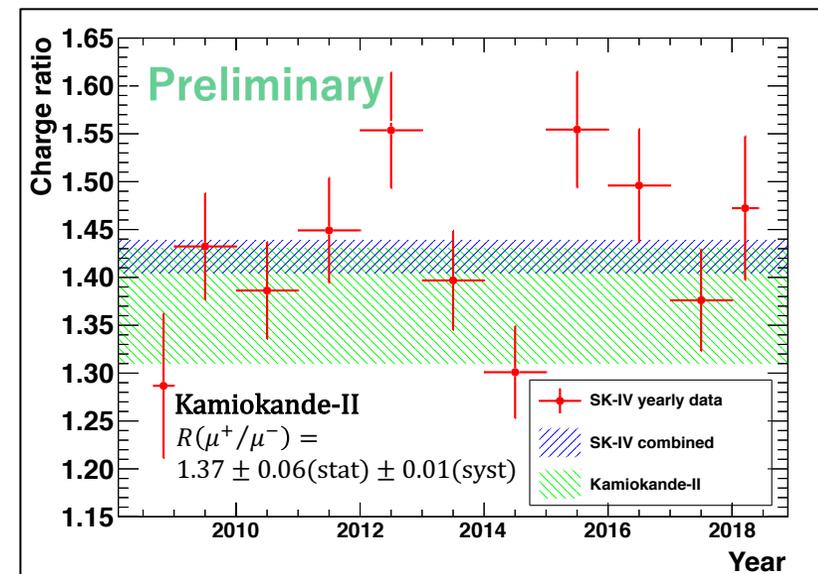
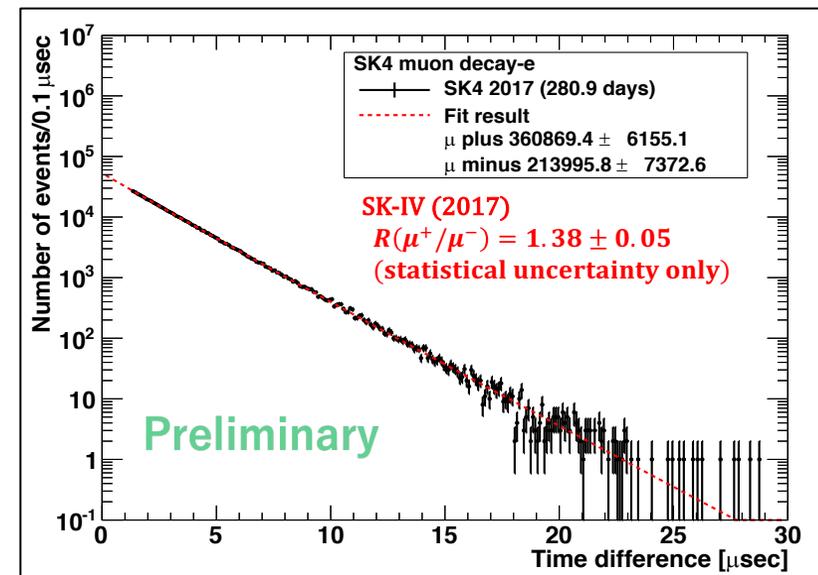
$$N(t - (t + \Delta t)) = N_+ \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^+}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right) + N_- \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^-}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right)$$

$$R(\mu^+/\mu^-) = \frac{N_+}{N_- / (1 - \Lambda_c)}$$

$$\left[\begin{array}{l} \tau_{\mu^+}: 2.1969811 \pm 0.0000022 \mu\text{sec} [3] \\ \tau_{\mu^-}: 1.7954 \pm 0.020 \mu\text{sec} [4] \\ \Lambda_c: \text{水中における}\mu^- \text{原子核捕獲の割合 (18.4\%)} [4] \end{array} \right]$$

□ 電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の結果

- 2008年～2018年までの電荷比の年変化を取得
SK-IV全期間での平均値
→ $R(\mu^+/\mu^-) = 1.42 \pm 0.02$ (statistical uncertainty only)
- $R(\mu^+/\mu^-) \approx 1.27$ (~ 200 GeV領域)^[1]から値が増加
→ TeV 領域にかけて K 中間子からの成分がより
寄与していることを示す



[1] CMS Collaboration : Physics Letters B 692 (2010) 83–104

[3] P. A. Zyla, et al.: (Particle Data Group), Prog.Theor.Exp.Phys.2020, 083C01 (2020)

[4] T. Suzuki, D.F. Measday, and J.P. Roalsvig, Phys. Rev. C 35, 2212 (1987)

まとめ

- 宇宙線ミュオン電荷比の測定により、
 - 宇宙線と大気原子核の反応モデルの検証
 - ニュートリノ解析における大気ニュートリノMCの精度向上の評価が可能となる

- SK-IVで観測されたミュオン一崩壊電子事象を用いて、電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の測定を実施
SK-IV全期間での平均値
$$R(\mu^+/\mu^-) = 1.42 \pm 0.02 \text{ (statistical uncertainty only)}$$

→ $R(\mu^+/\mu^-) \approx 1.27$ (~200 GeV領域)から増加
TeV 領域にかけてK中間子からの成分が大きく寄与

- 今後の展望
 - 大気原子核の衝突過程での π/K 中間子成分の生成割合の見積もりと反応(π/K)モデルの評価
 - 同観測期間におけるスピン偏極度の追加測定