

# 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<sup>+</sup>の電荷比
- スーパーカミオカンデ実験
- ミュオン<sup>-</sup>崩壊電子事象の解析
  - 事象再構成
  - 宇宙線ミュオン<sup>+</sup>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 $\mu^+/\mu^-$ 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 $R(\mu^+/\mu^-) \sim 1.3$
- $\pi/K$ 中間子成分の生成割合とそのエネルギーに依存する

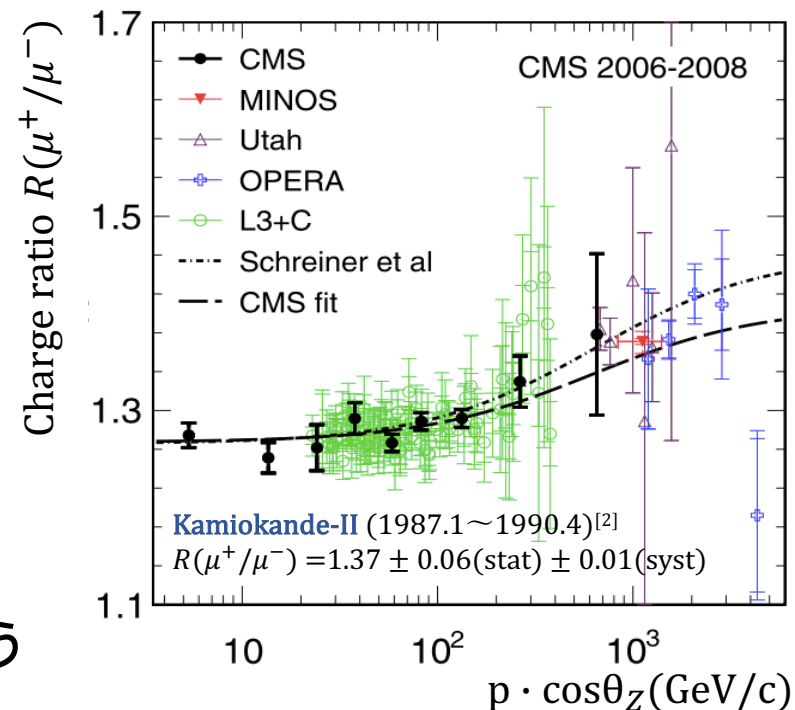
→ 宇宙線と大気原子核の反応モデルの検証

→ 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 $\mu$ -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



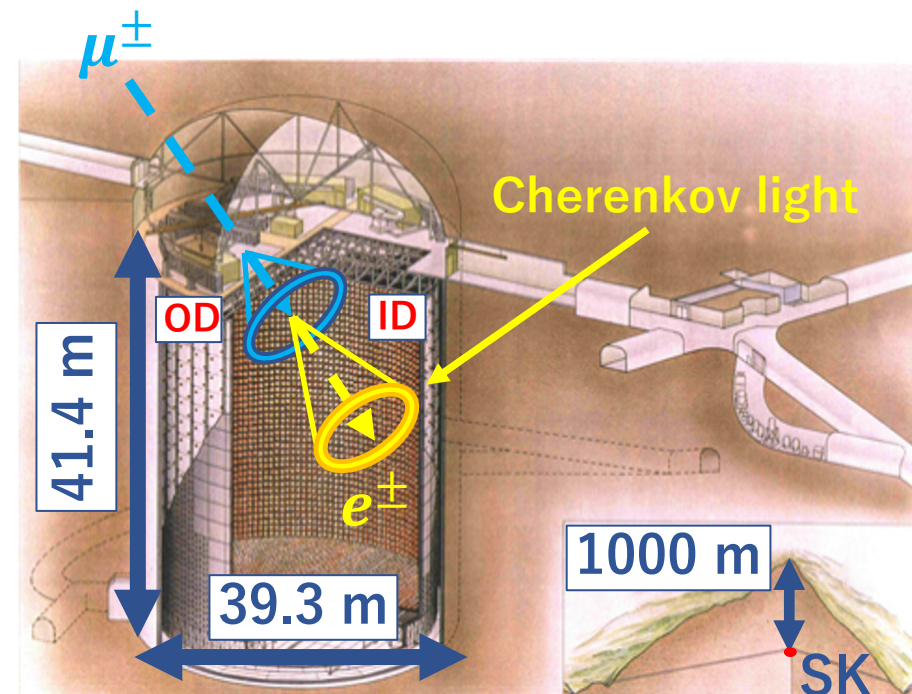
# スーパーカミオカンデ実験

## □ 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)

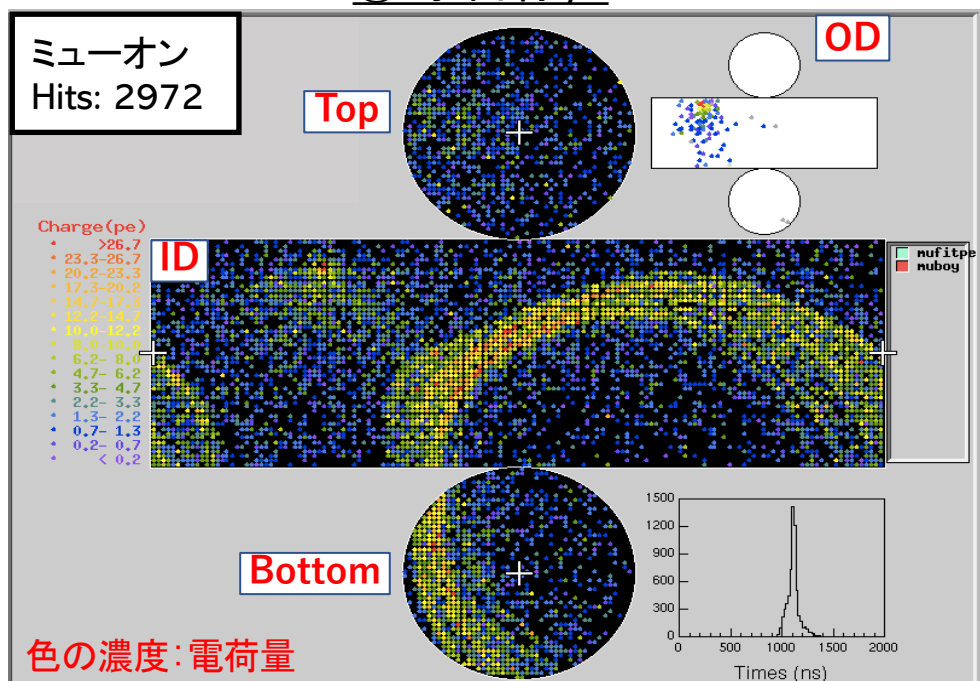
## □ 宇宙線ミューオン

- PMTのヒット数が多く(1000 hits以上)、観測される光量が多い(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

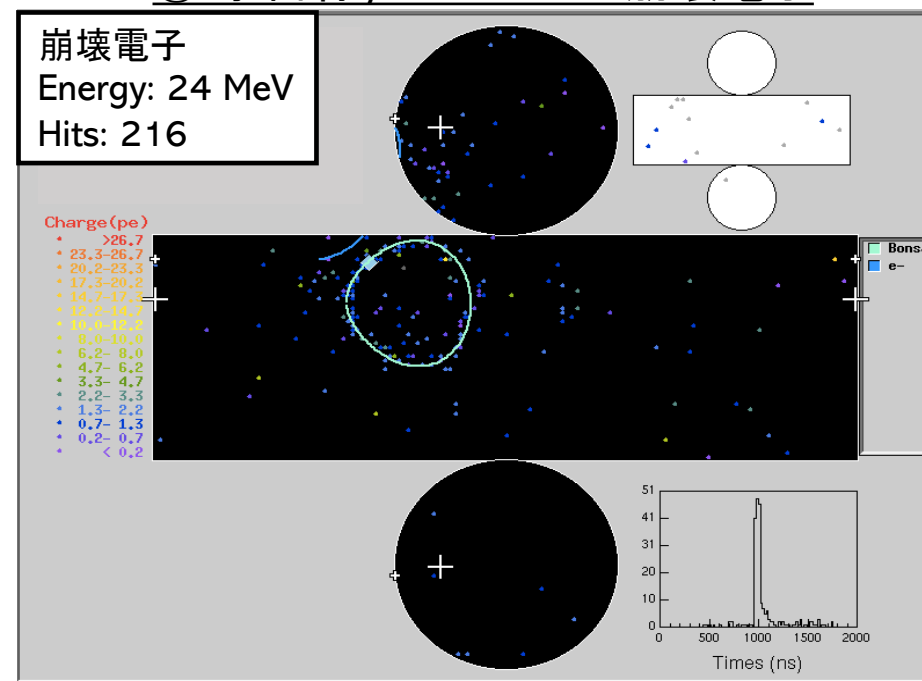
## □ 崩壊電子

- 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 $\mu$

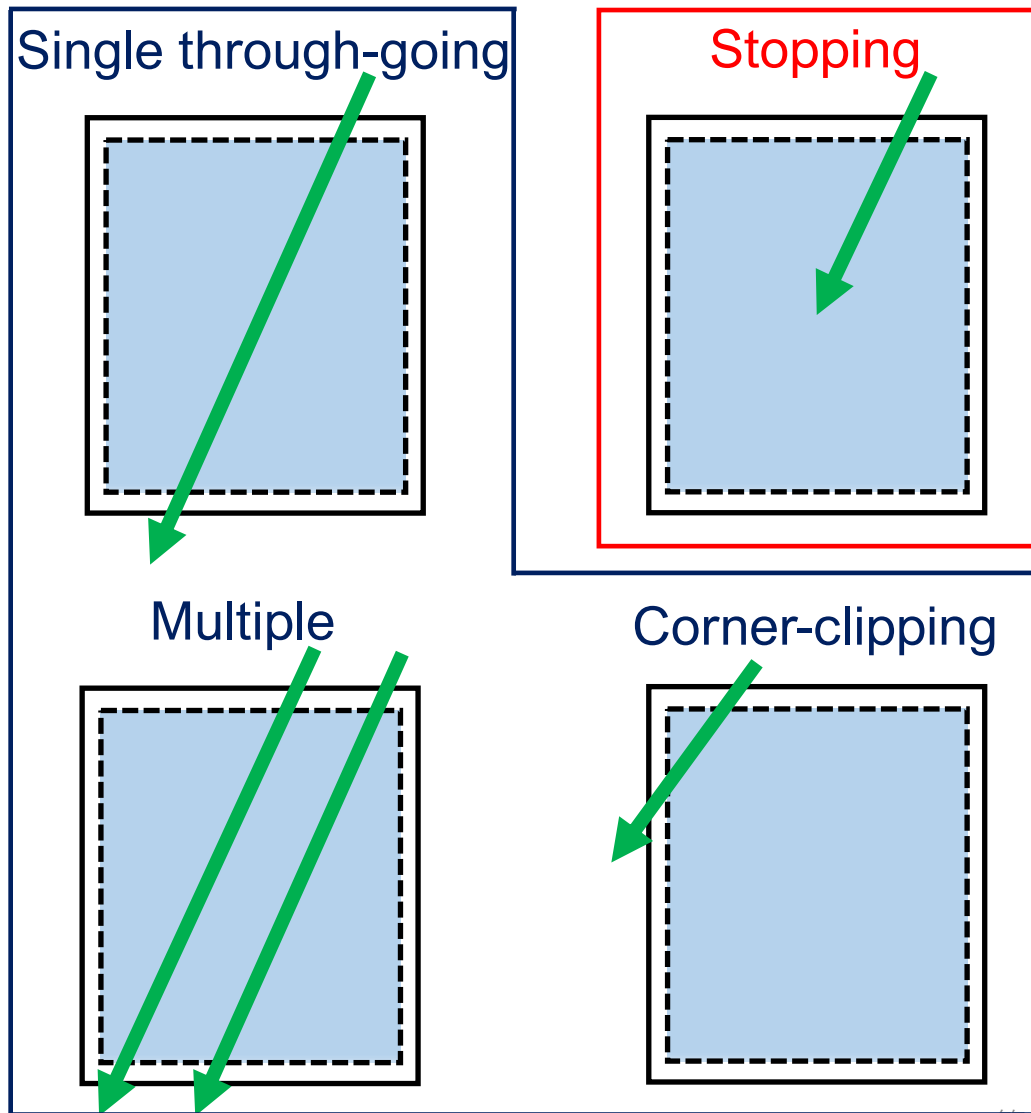


### ② 宇宙線 $\mu$ から生じた崩壊電子



# 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

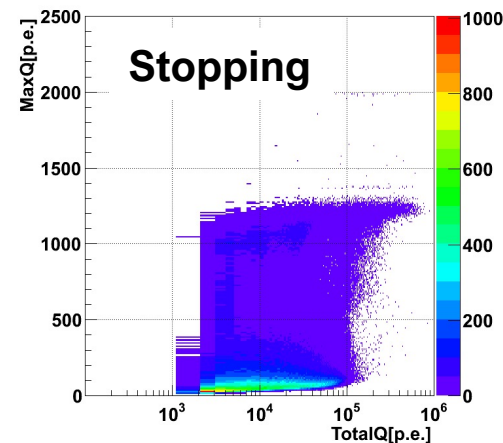


## 信号事象

### • 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

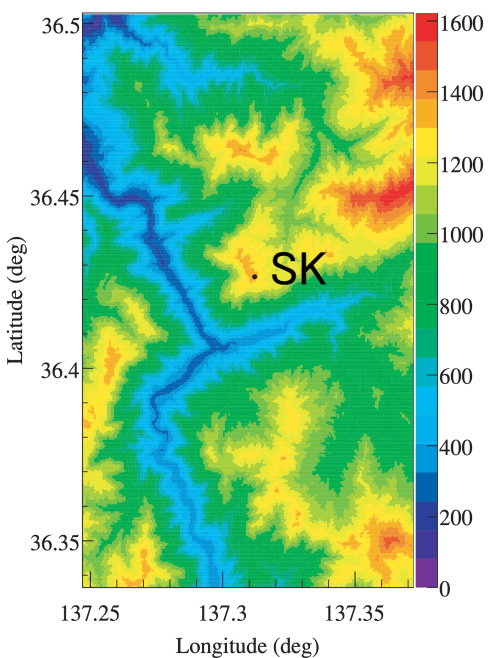
- 宇宙線ミューオンのMCによりミューオン-電子崩壊事象の事象選別を行う  
→ SKで観測されるミューオンフラックスを考慮したMC

- MUSIC(Muon Simulation Code)<sup>[2]</sup>

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

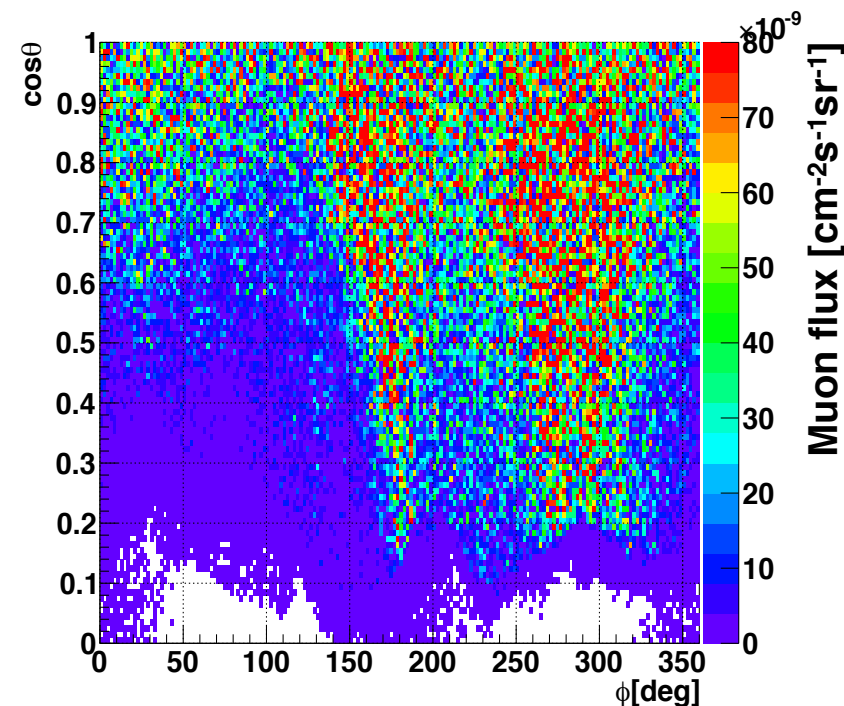
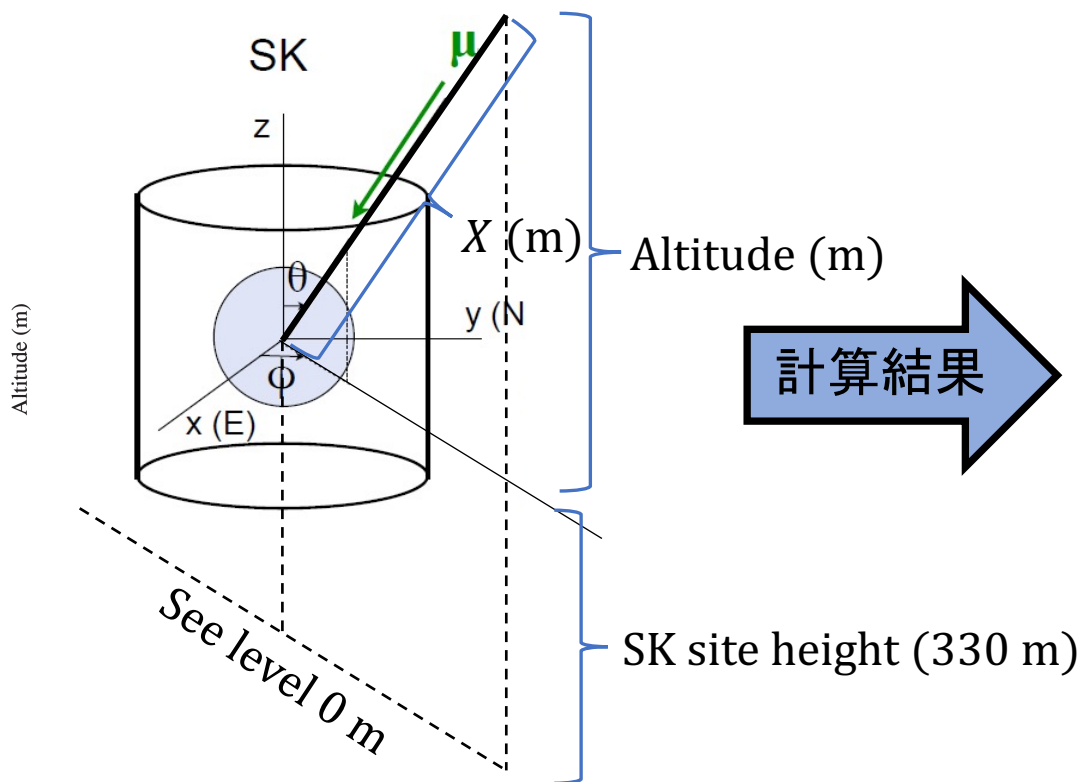
$\mu$ が岩盤を通過する距離  $\chi$  に応じてフラックスを計算

Digital Map 50 m Grid



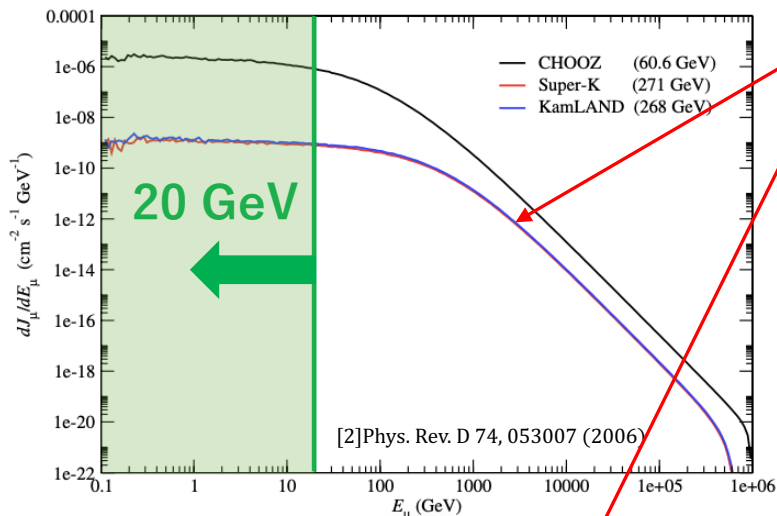
国土地理院(1997)

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



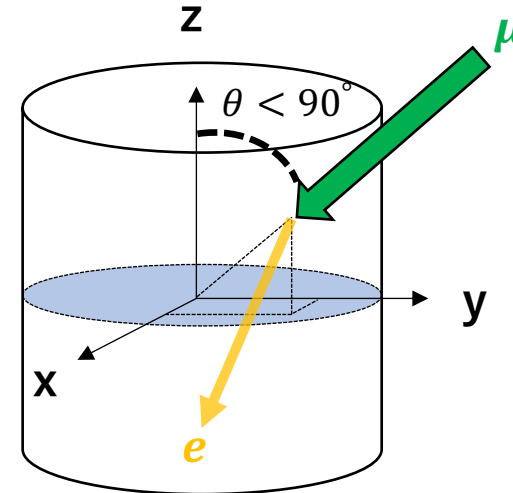
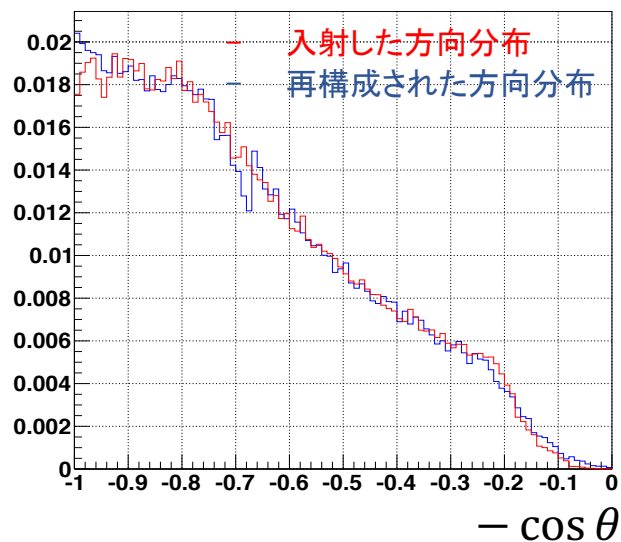
# 宇宙線ミューオンのMC

SKにおけるミュオンフラックス

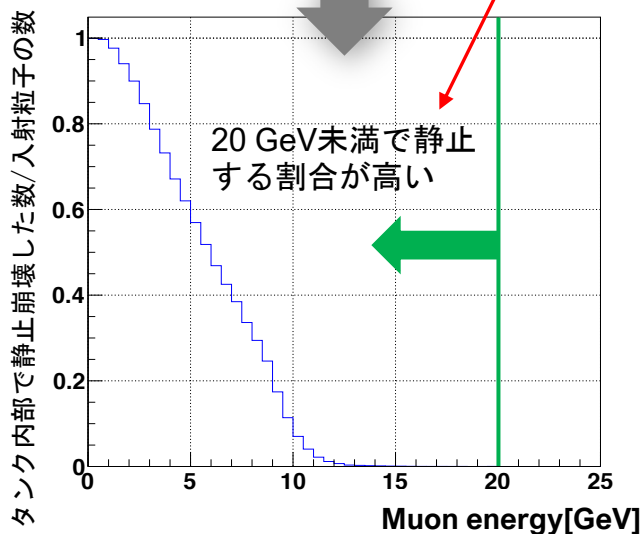


① MUSICよりタンク内部でミュオンが静止するエネルギー領域 (0.1 GeV - 20 GeV) を推定

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

タンク内部で静止崩壊するミュオンの確率



# 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

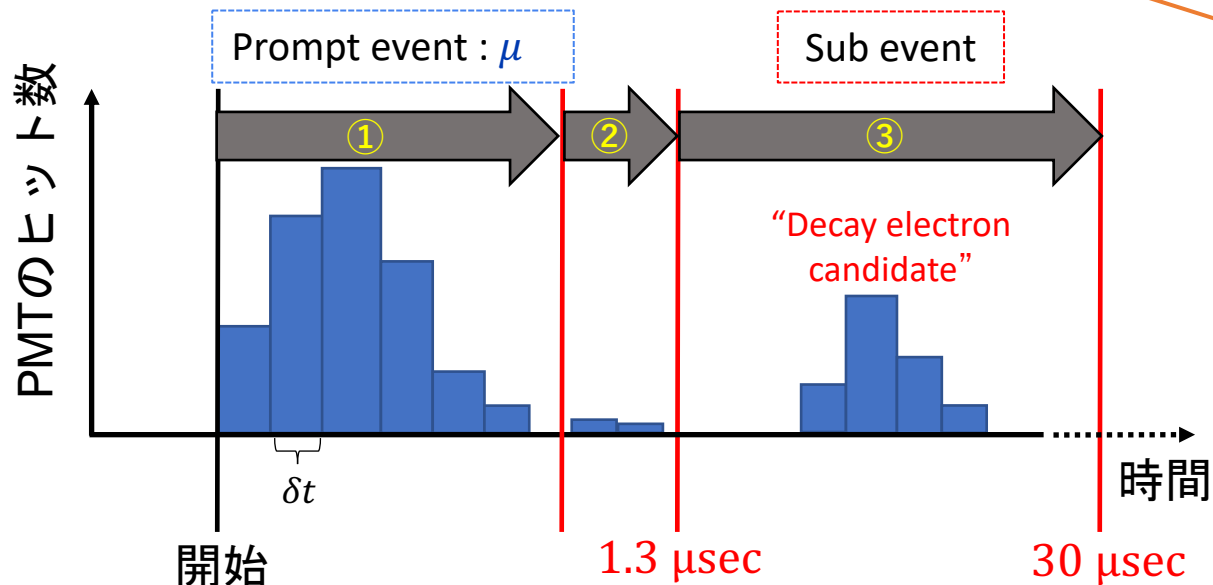
先発信号(ミューオン)と崩壊電子の時間差

① ミューオン事象によるヒット情報を取得

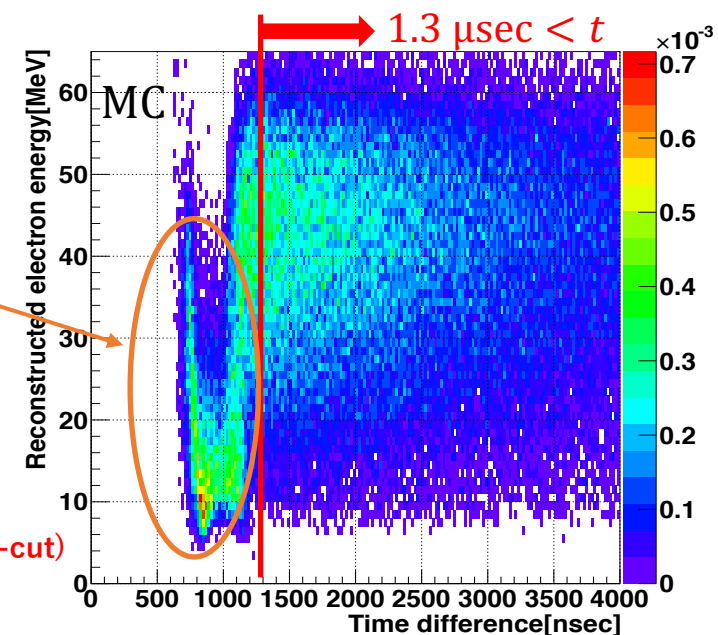
②+③ 先発事象から1.3  $\mu\text{sec}$ 未満を取得

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  $\mu\text{sec}$  未満での  
事象再構成

→ ③ 1.3  $\mu\text{sec}$ 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

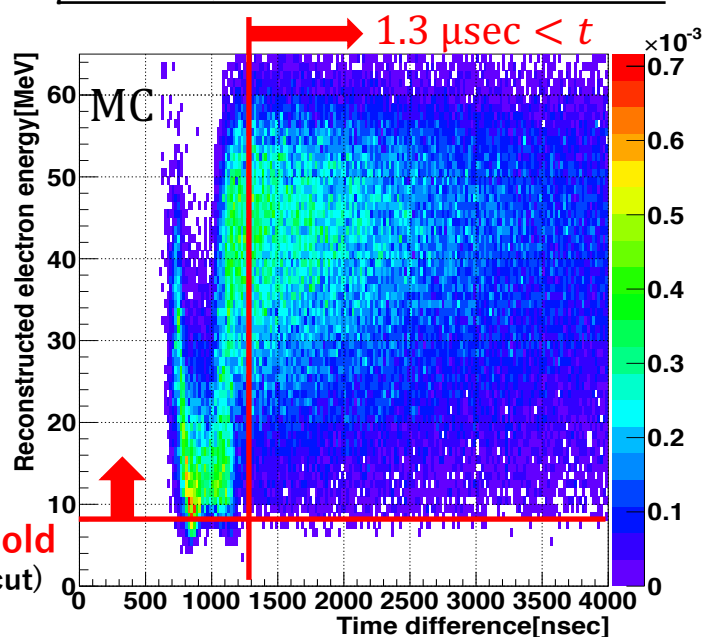
## □ 宇宙線ミューオン

- 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

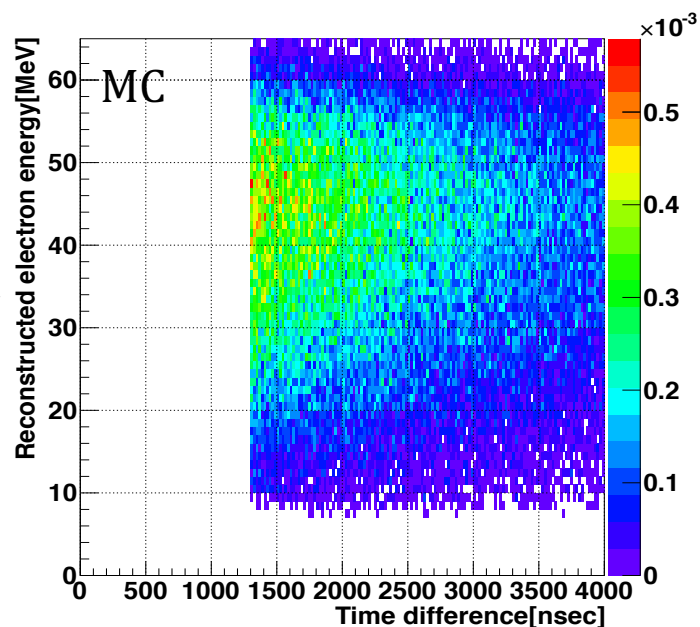
## □ 崩壊電子

- 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 $\mu^-$ 原子核捕獲で生成される放射性原子核からの $\gamma$ 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 $\text{distance} < 300 \text{ cm}$

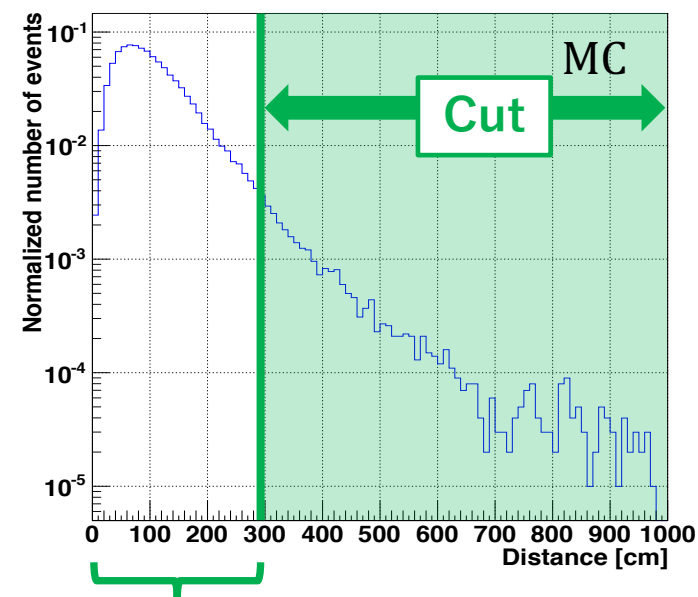
$\mu - e$ 崩壊の時間差とエネルギー



Cut後



$\mu$ 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( $N_{\mu^+}/N_{\mu^-}$ )を算出  
→ 水中での $\mu^+$ ,  $\mu^-$ の寿命 $\tau$ の違いを利用

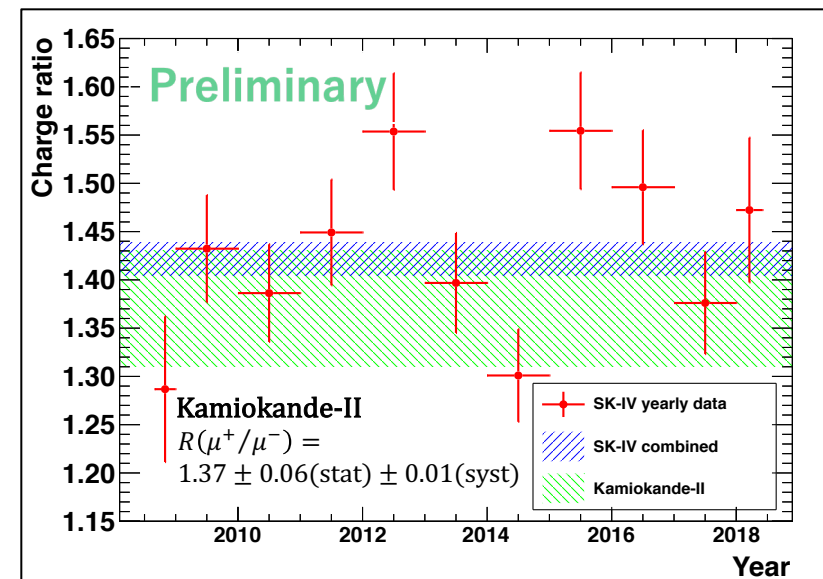
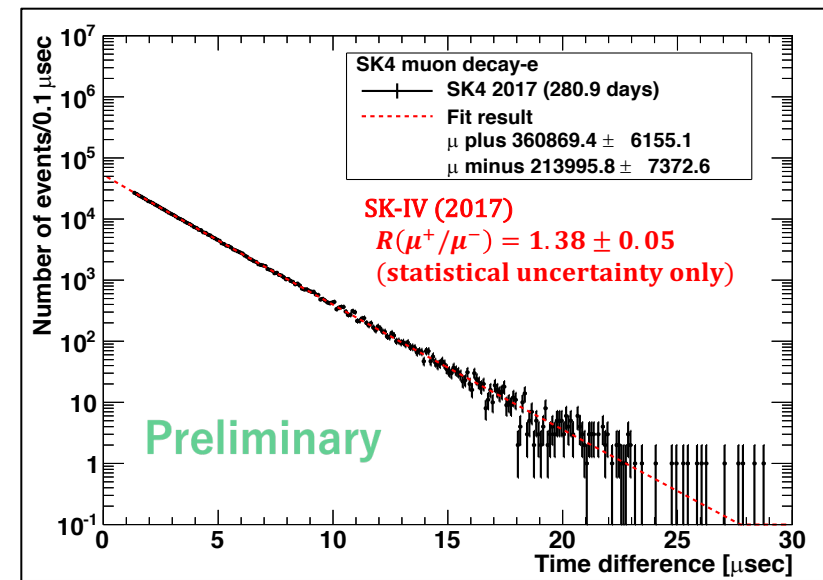
$$N(t - (t + \Delta t)) = N_+ \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^+}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right) + N_- \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^-}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right)$$

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

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

## □ 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)
- $R(\mu^+/\mu^-) \approx 1.27$  ( $\sim 200$  GeV領域)<sup>[1]</sup>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 $\pi/K$ 中間子成分の生成割合の見積もりと反応( $\pi/K$ )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