

# 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と スピン偏極度の測定

日本物理学会 2021年秋季大会 (オンライン)

講演日: 2021年9月14日

講演番号: 14aW1-5

北川芙西音、中野佑樹<sup>A</sup>、小汐由介

岡山大理, 神戸大理<sup>A</sup>、他 Super-Kamiokande collaboration

# 目次

- スーパーカミオカンデ実験
- 宇宙線ミュオン<sup>○</sup>の電荷比とスピン偏極度
- ミュオン<sup>○</sup>一崩壊電子事象の解析
  - 事象再構成
  - 識別条件の選定
- SK-IVにおける電荷比の測定結果
- まとめ

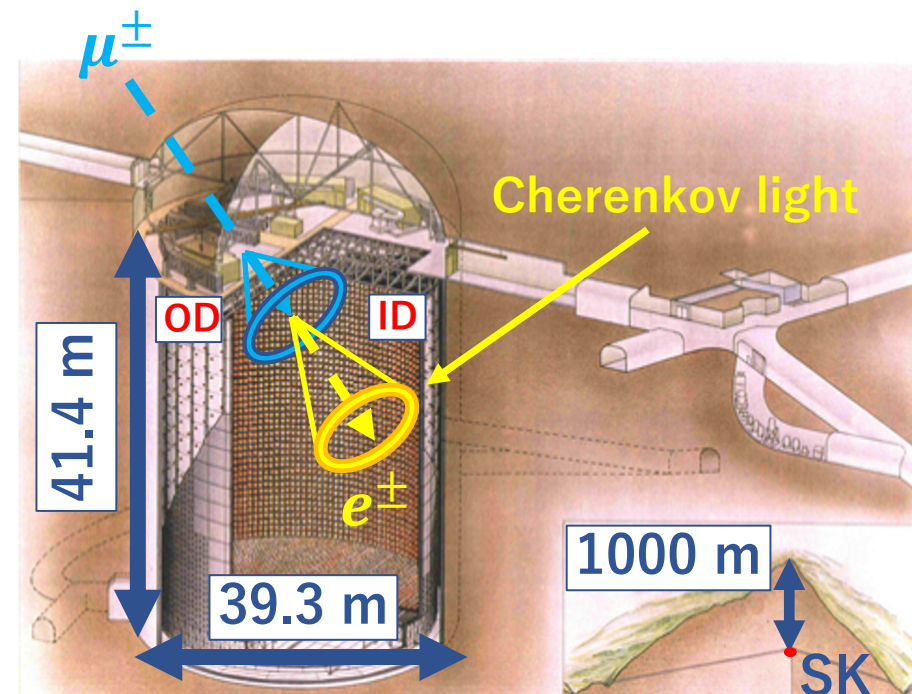
# スーパーカミオカンデ実験

## □ 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



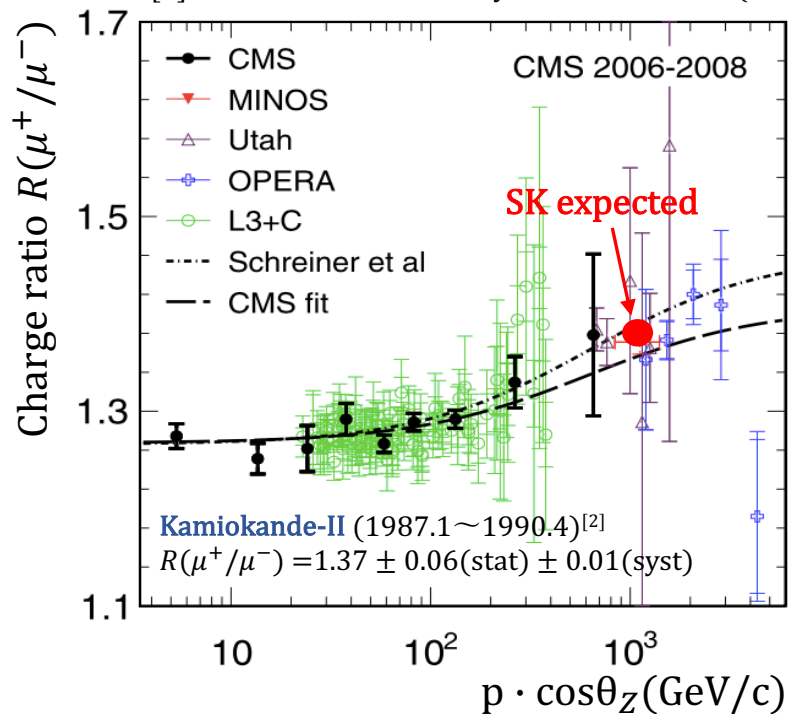
Phase	SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV	SK-V	SK-VI
Period	1996/04 ~ 2001/07	2002/10 ~ 2005/10	2006/07 ~ 2008/08	2008/09 ~ 2018/05	2019/01 ~ 2020/07	2020/07 ~ Gd導入
Livetime [days]	1496	791	548	2970	379	Running
ID PMTs	11,146	5,182	11,129	11,129	11,129	11,129
OD PMTS	1,885	1,885	1,885	1,885	1,885	1,885
PMT coverage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

# 宇宙線ミュオンの電荷比とスピン偏極度

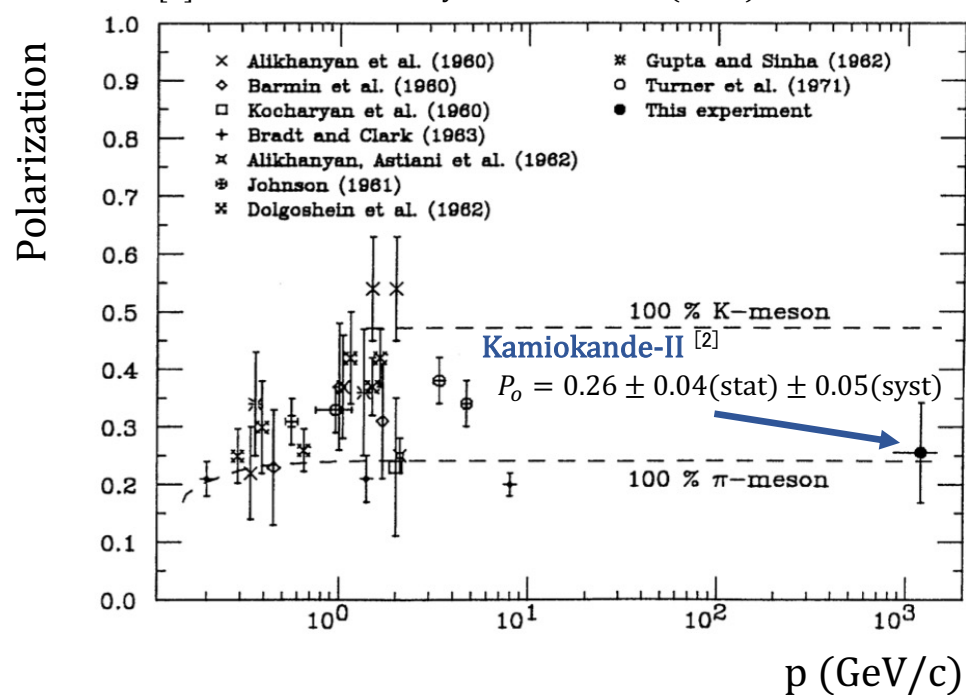
地下実験において電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ とスピン偏極度の測定が行われている

- 宇宙線と大気原子核の反応モデルの検証  
→ 一次宇宙線のエネルギーおよび $\pi/K$ 生成比に依存する
- 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

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



[2] M. Yamada et al. Phys. Rev. D 44, 617 (1991)



(今回)

SK-IVで取得された $\mu$ -e崩壊事象より、1.2 TeV/c領域における電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の測定を行なった<sup>4</sup>

# 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)

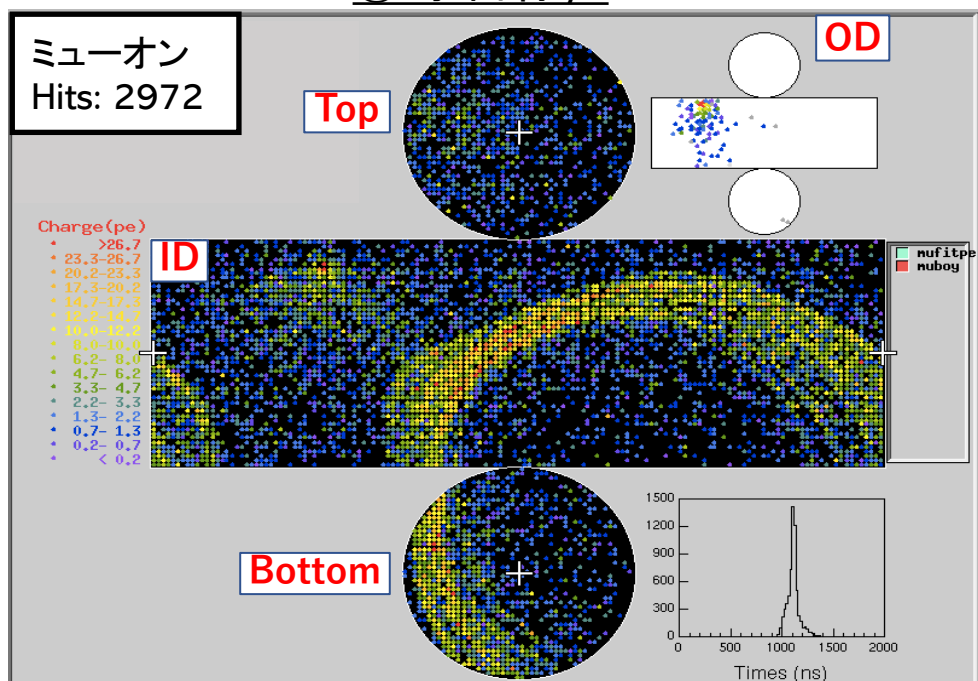
## □ 宇宙線ミューオン

- 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

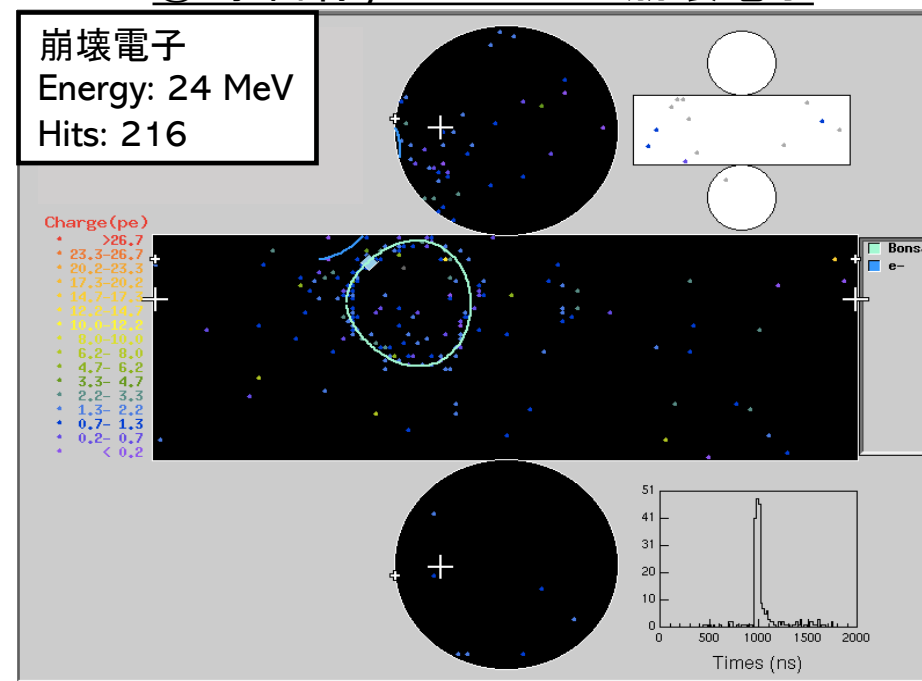
## □ 崩壊電子

- 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 $\mu$



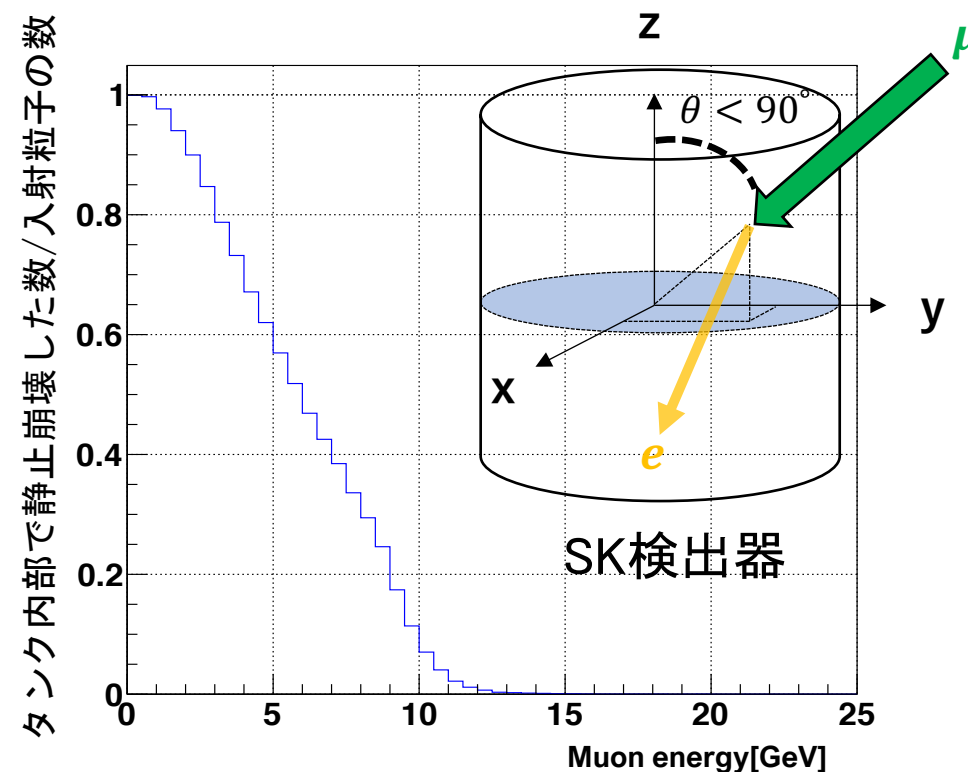
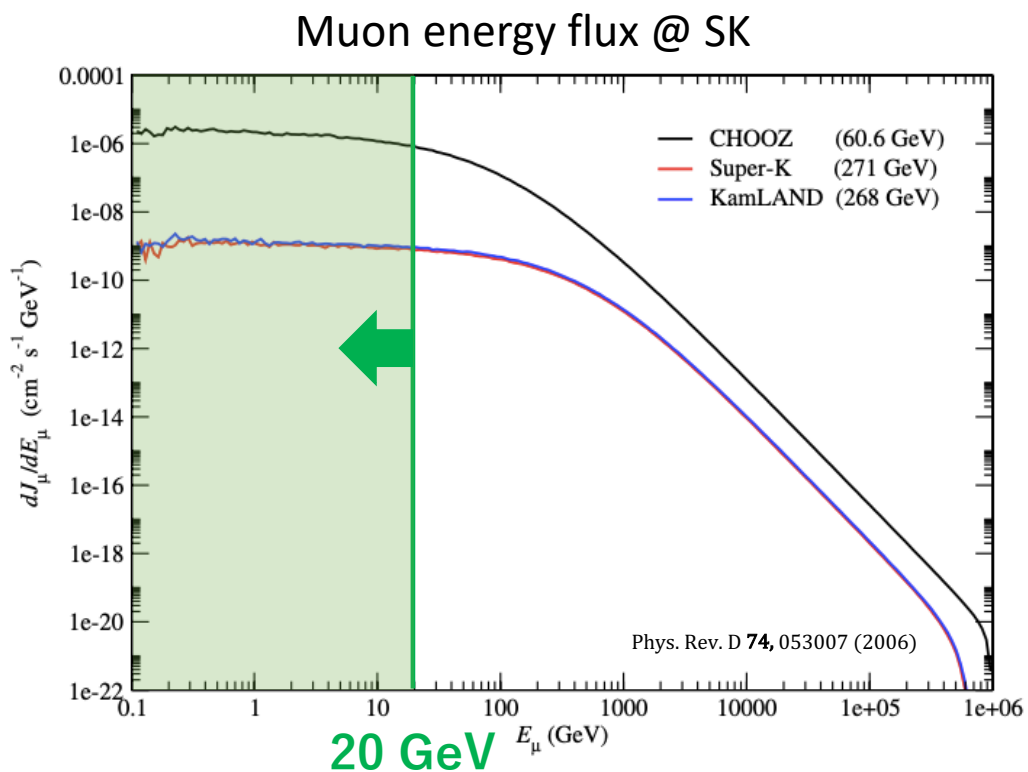
### ② 宇宙線 $\mu$ から生じた崩壊電子



# 宇宙線ミューオンのMC

宇宙線ミューオンのMCによりミューオン→崩壊電子事象の識別条件を決定する

- 検出器外部からミューオンフラックスの天頂角分布に沿って粒子を入射(0.1 GeV - 20 GeV)



→ タンク内部で静止し、崩壊電子を伴うミューオン事象のみを取得

# MCを用いたミュオンー崩壊電子事象の選別

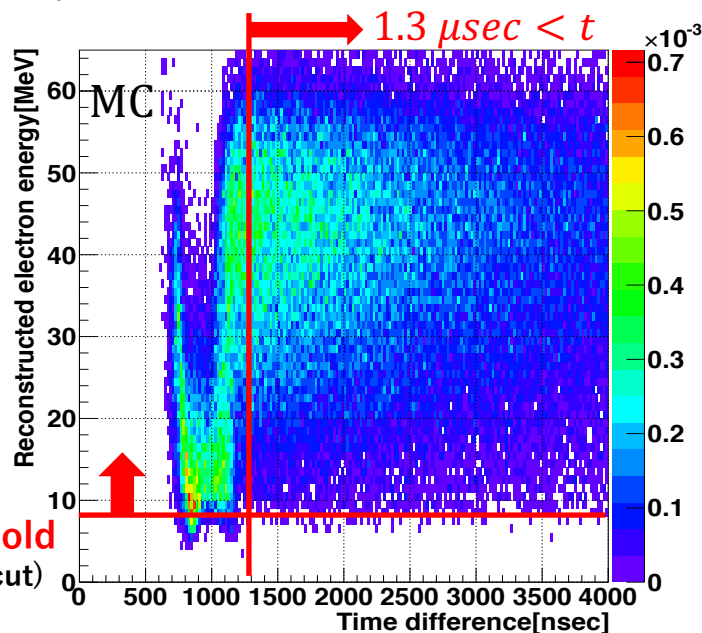
## □ 宇宙線ミュオン

- 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

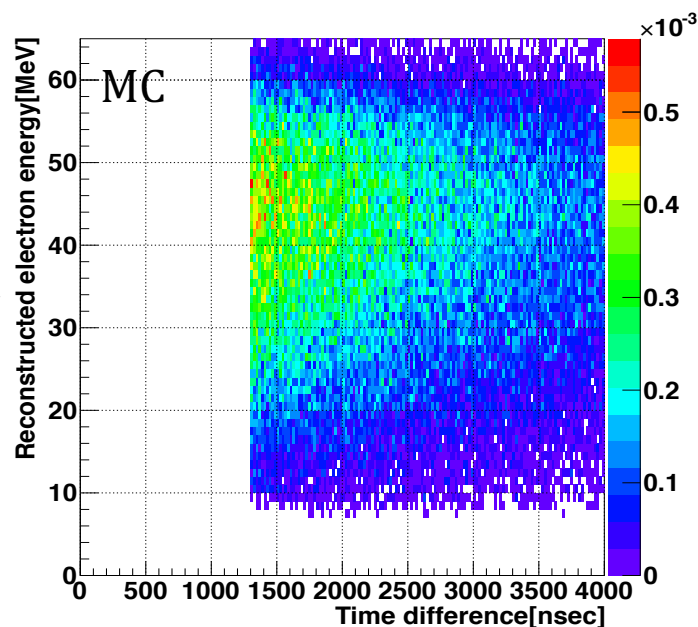
## □ 崩壊電子

- 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 $\text{distance} < 300 \text{ cm}$

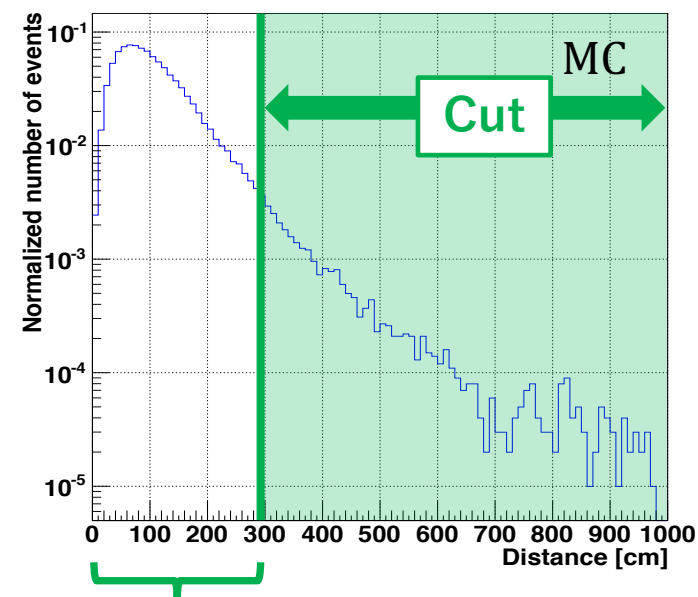
$\mu - e$ 崩壊の時間差とエネルギー



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

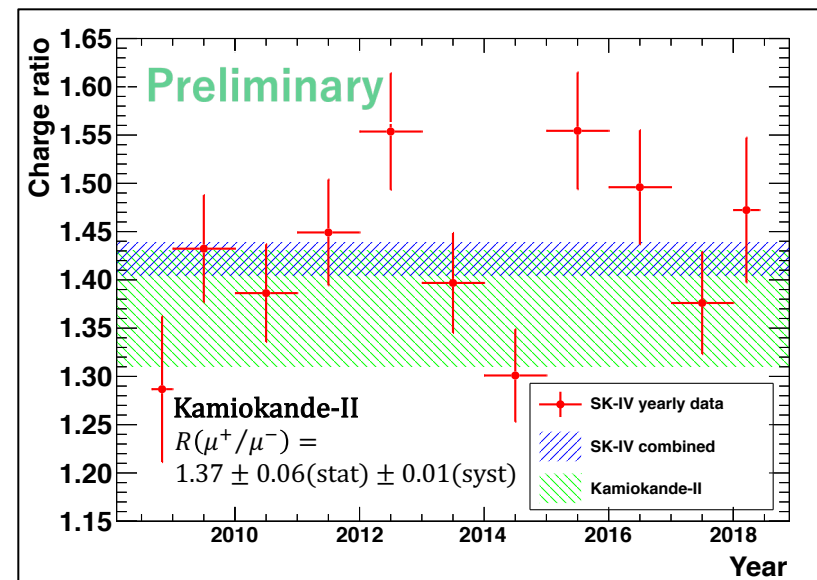
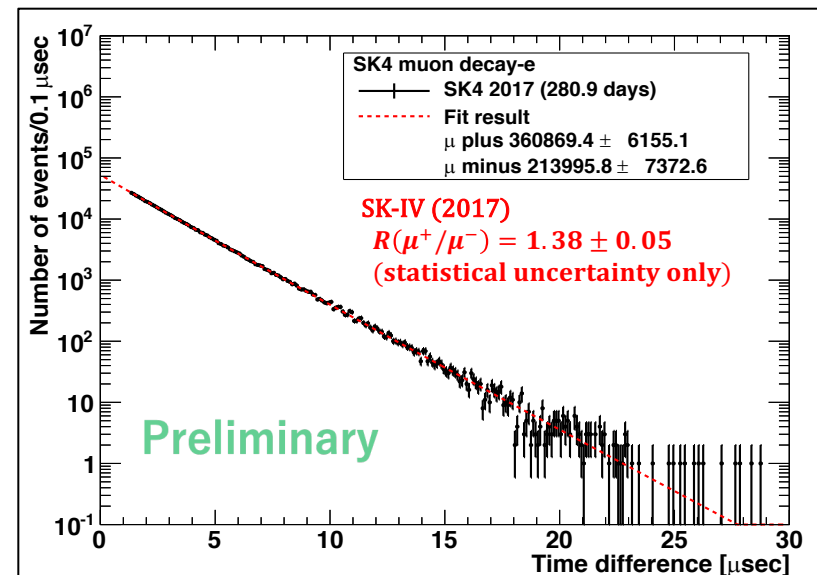
$$N(t - (t + \Delta t)) = N_+ \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^+}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right) + N_- \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^-}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right)$$

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

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

## □ 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)
- $R(\mu^+/\mu^-) \approx 1.27$  (~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

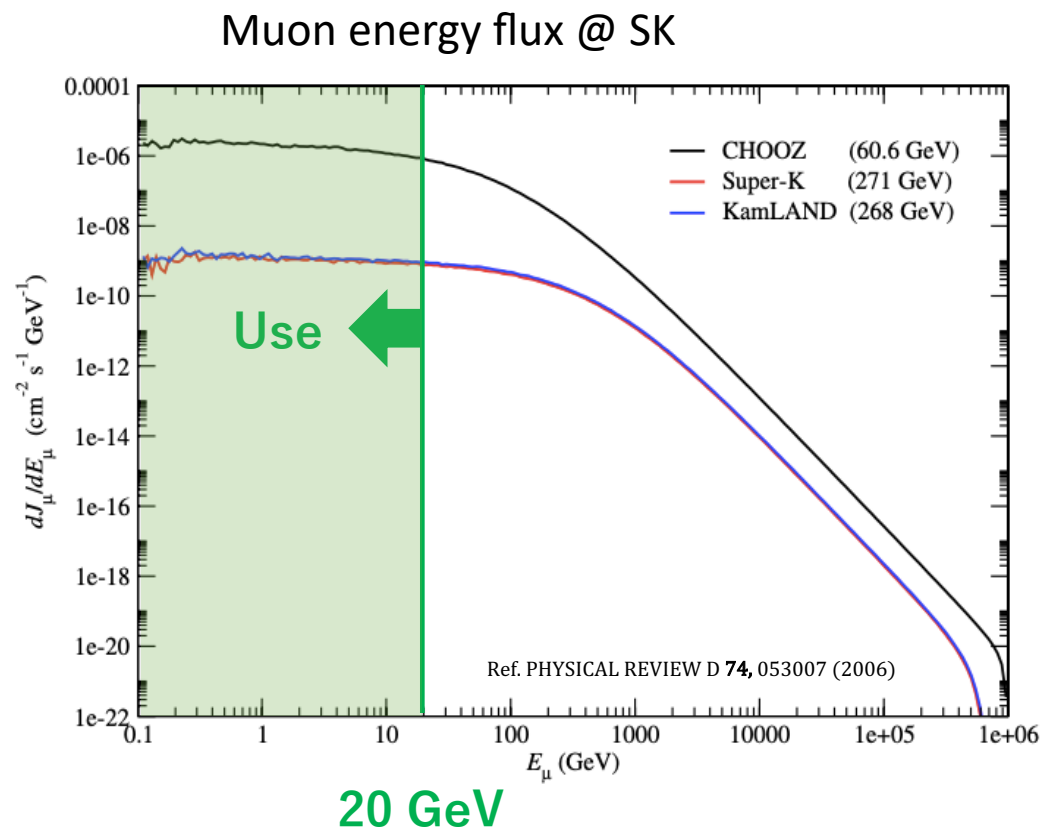
- 宇宙線ミューオンの電荷比・スピン偏極度の測定により、
  - 宇宙線と大気原子核の反応モデルの検証
  - ニュートリノ解析における大気ニュートリノMCの精度向上の評価が可能となる
- SK-IVで観測されたミューオン一崩壊電子事象を用いることで、電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の測定を行なった
  - SK-IV全期間での平均値
$$R(\mu^+/\mu^-) = 1.42 \pm 0.02 \text{ (statistical uncertainty only)}$$

→  $R(\mu^+/\mu^-) \approx 1.27$  (~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
- 今後は、SK-I~IVまでの観測期間(1996年~2018年)を含めた電荷比とスピン偏極度の測定を行う

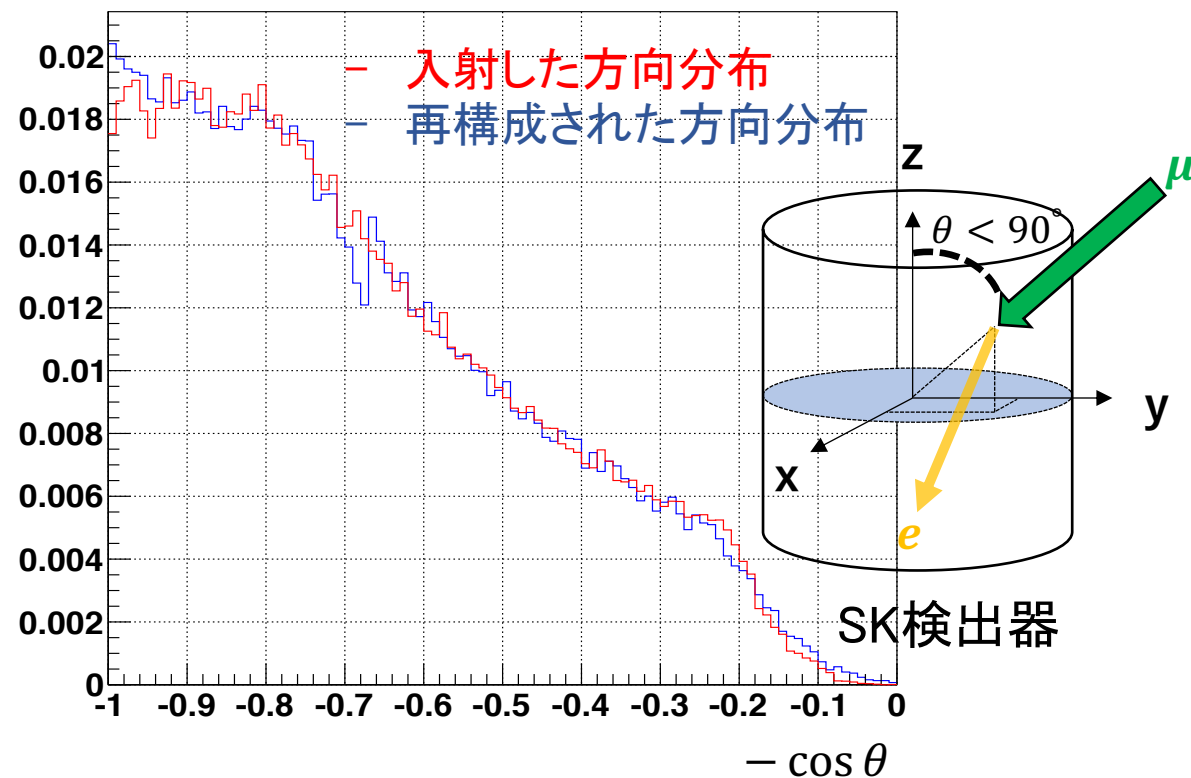
# Back up

# 宇宙線ミューオンのMC

- SKで観測されるミューオンフラックスの天頂角分布を考慮し、0.1 GeV - 20 GeVのエネルギー範囲で粒子を入射する



SKにおけるミューオンの天頂角分布



# ミュオン-崩壊電子事象の時間差

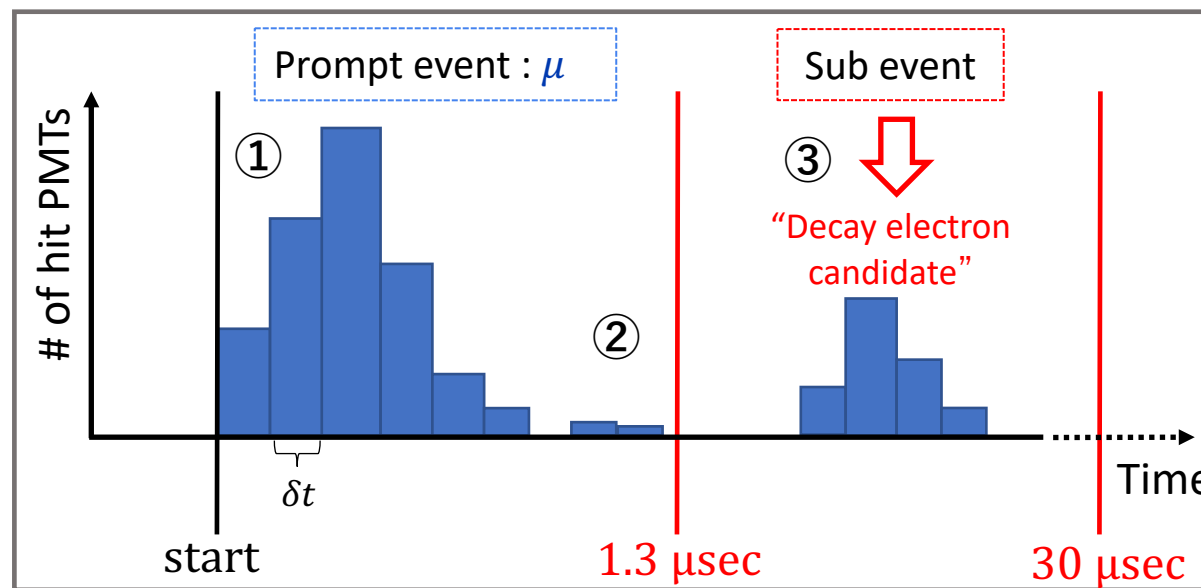
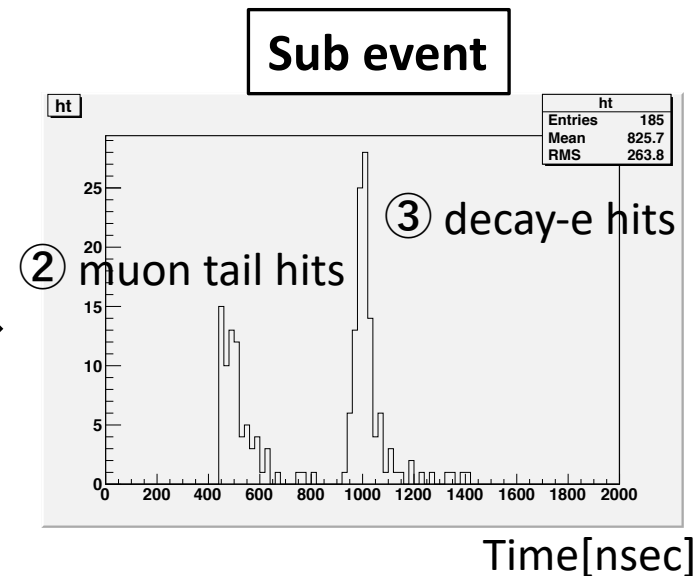
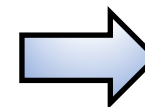
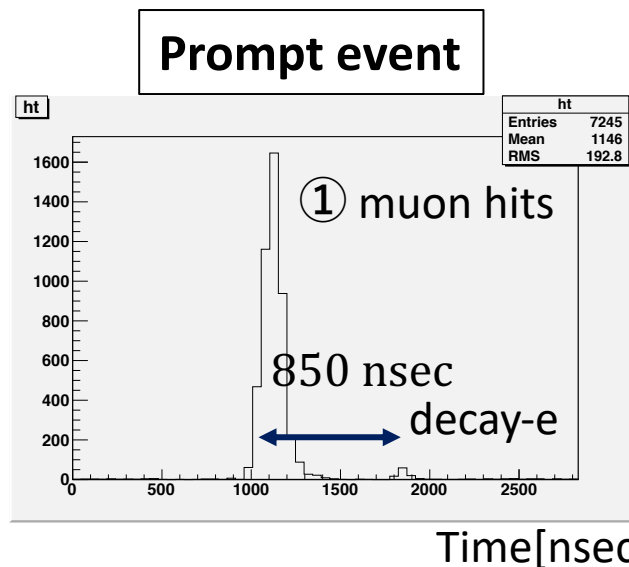
- **Prompt event**

① ミュオン事象によるヒット時間を取得

- **Sub event**

② Prompt eventから**1.3  $\mu\text{sec}$ 未満**ミュ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

③ Prompt eventから**1.3  $\mu\text{sec}$ 以上**崩壊電子事象によるヒット情報を取得  
→ 本研究での解析条件に使用



# 電荷比と中間子生成割合

- 電荷比における $\pi/K$ モデル [1]

- 1 GeV~10 TeV領域において $\pi/K$ 成分を考慮

2. エネルギー依存しない生成比

$$r_\pi = \frac{\pi^+}{\pi^-} (= \frac{f_\pi}{1-f_\pi}), r_K = \frac{K^+}{K^-} (= \frac{f_K}{1-f_K}) \text{を仮定}$$

3. チャーム粒子からの寄与は含めない

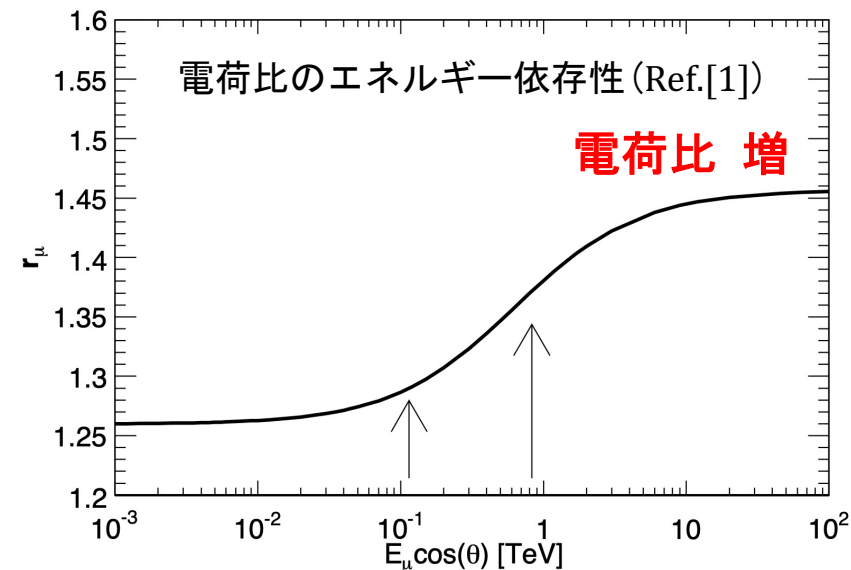
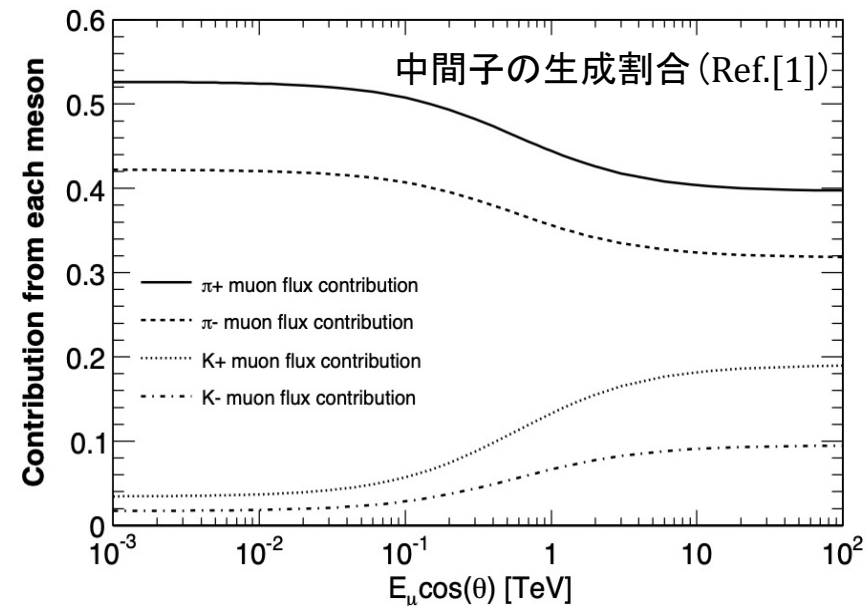
(10 TeV未満のエネルギー領域では影響は無視)

$$r_\mu = \frac{\left\{ \frac{f_\pi}{1 + 1.1E_\mu \cos\theta/115 \text{ GeV}} + \frac{\eta \times f_K}{1 + 1.1E_\mu \cos\theta/850 \text{ GeV}} \right\}}{\left\{ \frac{1-f_\pi}{1 + 1.1E_\mu \cos\theta/115 \text{ GeV}} + \frac{\eta \times (1-f_K)}{1 + 1.1E_\mu \cos\theta/850 \text{ GeV}} \right\}}$$

( $\eta$ : Gaisser constant 0.054)

→ 電荷比の測定結果から $f_\pi, f_K$ をフィッティングにより求める

$r_\pi, r_K$ の結果と大気MCを比較することが可能



[1] P.A. Schreiner, J. Reichenbacher, M.C. Goodman, Astropart. Phys. 32 (1) (2009) 61