

Measurement of the charge ratio of cosmic-ray muons in Super-Kamiokande

素粒子物理学研究室
41502208 北川芙西音
2022/02/15 修士論文発表会

[研究業績]

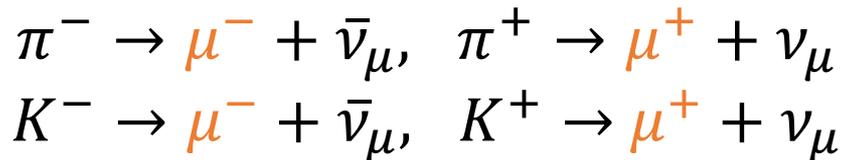
- 国内学会発表 (5回) :
日本物理学会 (2回), 「地下宇宙」研究会 (2回), 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
- 国際学会発表 :
The 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021)
- 出版物 :
Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021)

目次

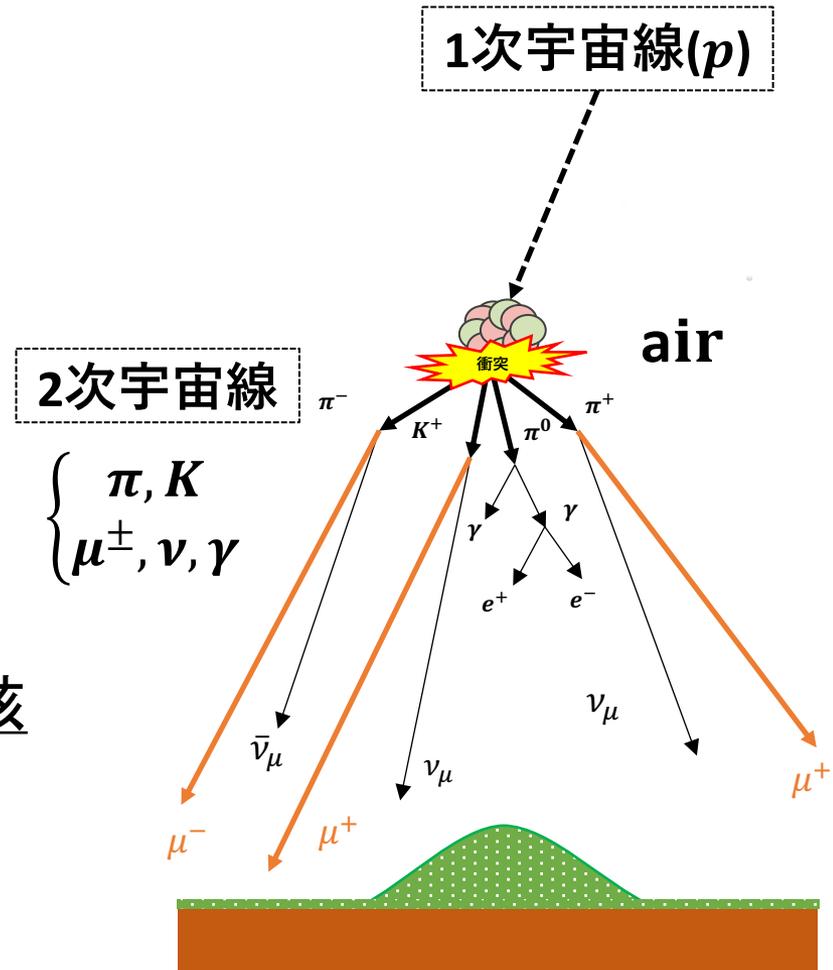
- 宇宙線ミュオン
- スーパーカミオカンデ検出器
- ミュオン-崩壊電子事象
- 事象選別
- 粒子数の算出
- 電荷比の測定結果
- まとめ

宇宙線ミュオン

1次宇宙線と大気原子核が相互作用し、
 π/K 中間子が多数生成される



ミュオン μ の観測から間接的に
高エネルギー領域の素粒子・原子核
反応を探る



宇宙線ミューオンの電荷比

□電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ ： μ^+/μ^- の生成比

1次宇宙線の主成分が陽子であるため μ^+ が多く生成される

宇宙線と大気原子核の 反応モデルからの電荷比予測

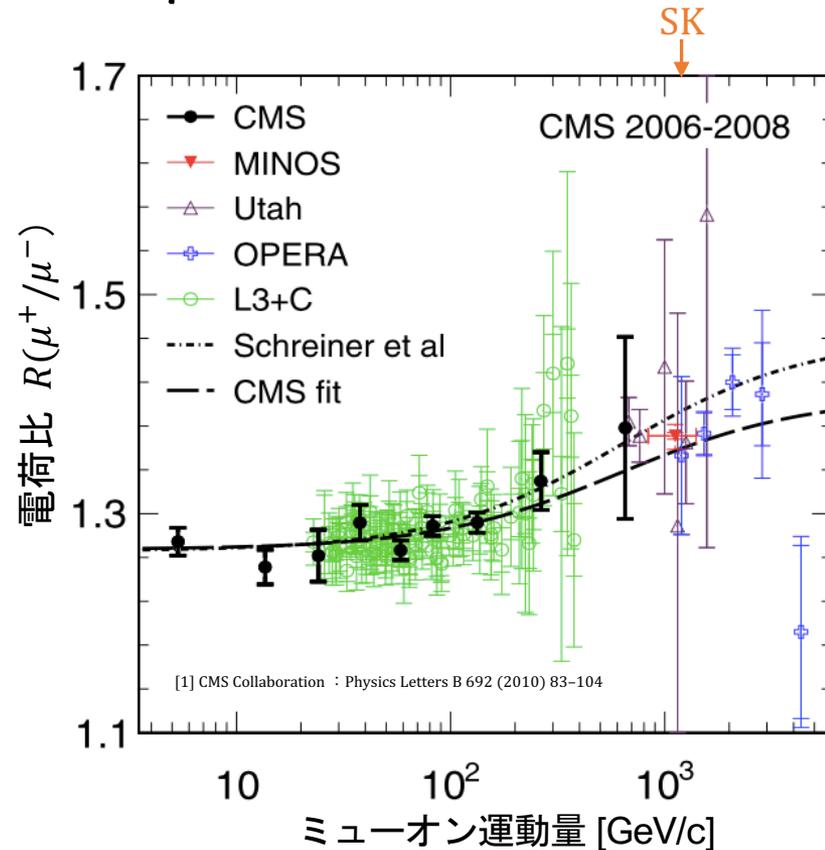
- π/K 中間子の生成割合に依存
- TeV領域での K 中間子生成
 $p + air \rightarrow \Lambda^0 + K^+ + anything$
- 宇宙線核種の組成

→ TeV領域での観測データが少ない



高エネルギー領域にかけての電荷比測定が重要

→ スーパーカミオカンデにおける宇宙線ミューオンの観測

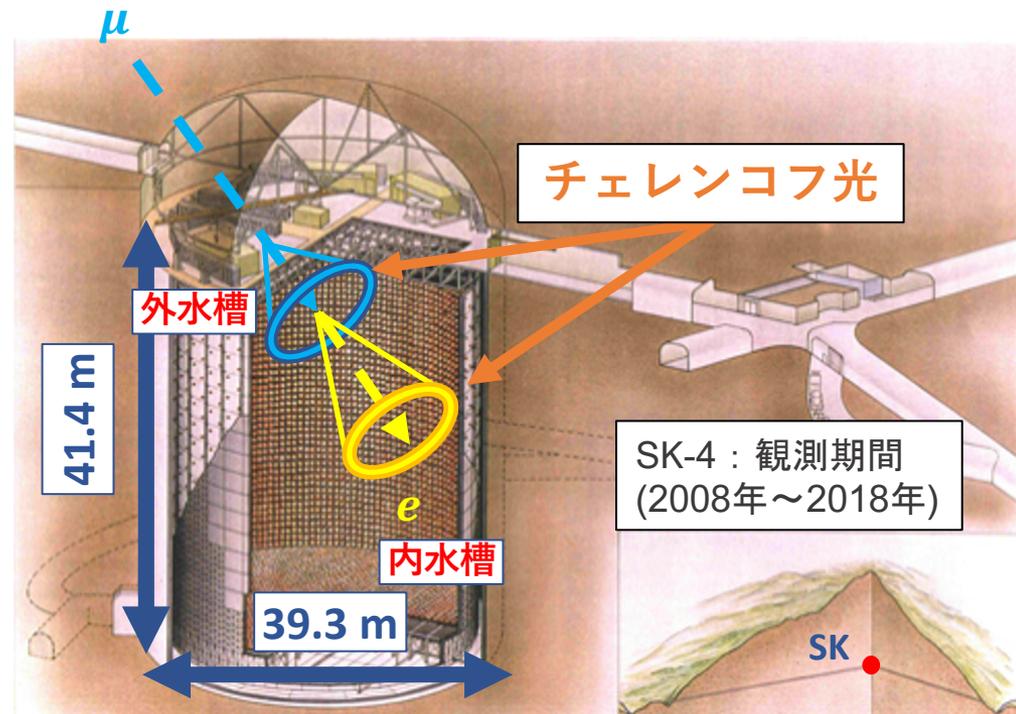


スーパーカミオカンデ(SK)検出器⁵

- 神岡鉱山地下1000 mに設置
- 超純水50 ktonの2層式タンク (内水槽・外水槽)
- PMTのヒット情報から事象選別が可能



高エネルギーミューオン
(~ 1.3 TeV)の観測が可能



電荷比の測定方法

$\mu - e$ 崩壊事象を用いた独自の測定手法

ミューオン-崩壊電子事象

- (1) 1 個のミューオンが入射してタンク内で静止
- (2) 静止したミューオンの約 $2.2 \mu\text{sec}$ 後に崩壊電子が発生

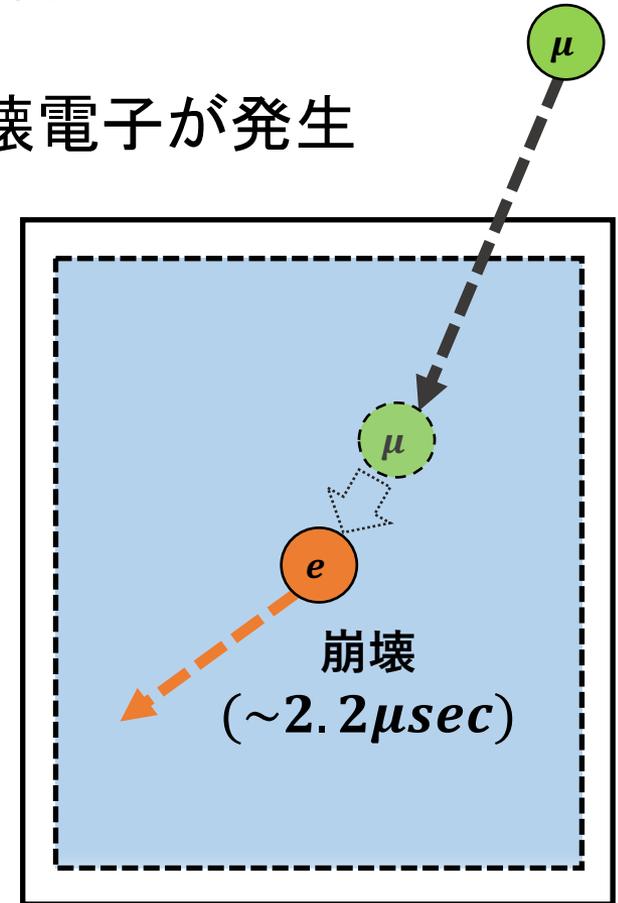
$\mu - e$ 崩壊事象の探索



観測データには背景事象が含まれる



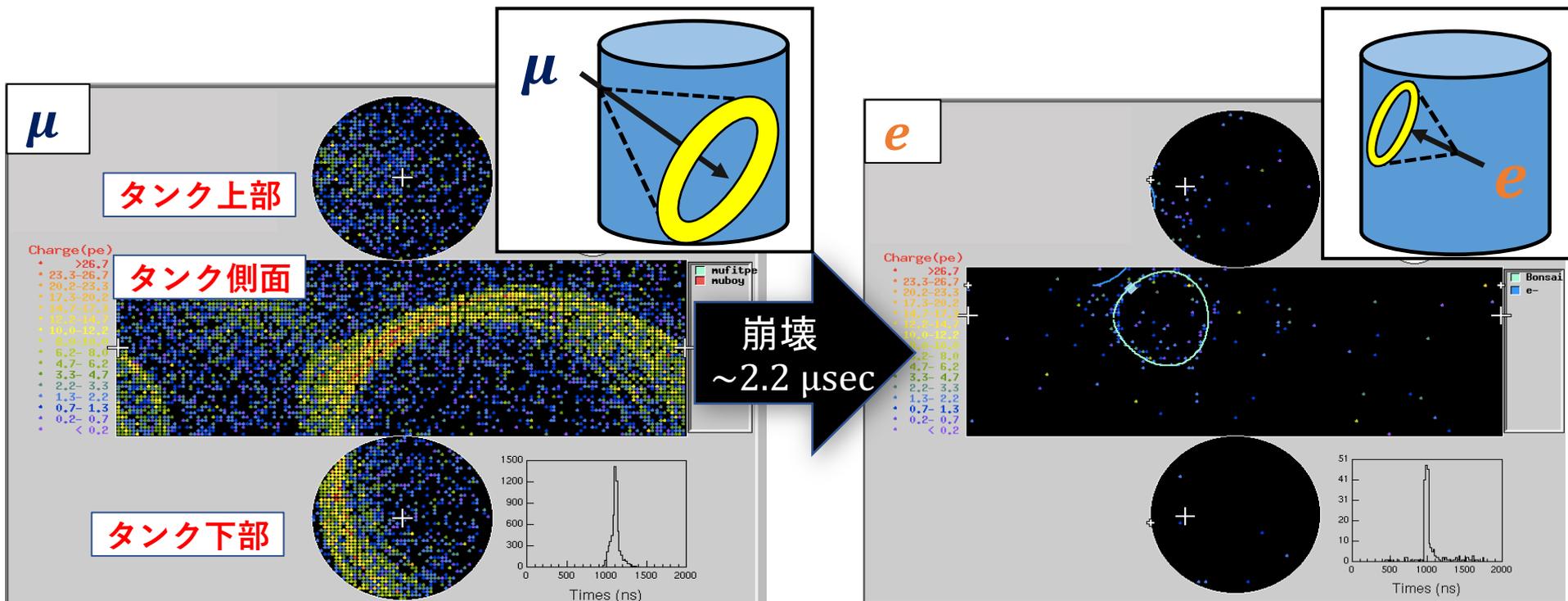
ミューオンと崩壊電子の典型的な特徴から
識別を行う



ミューオン-崩壊電子事象

ミューオン μ : PMTのヒット数が多く、観測される光量が大きい
 → 光量による事象選別が可能

崩壊電子 e : 観測される光子数が少ない

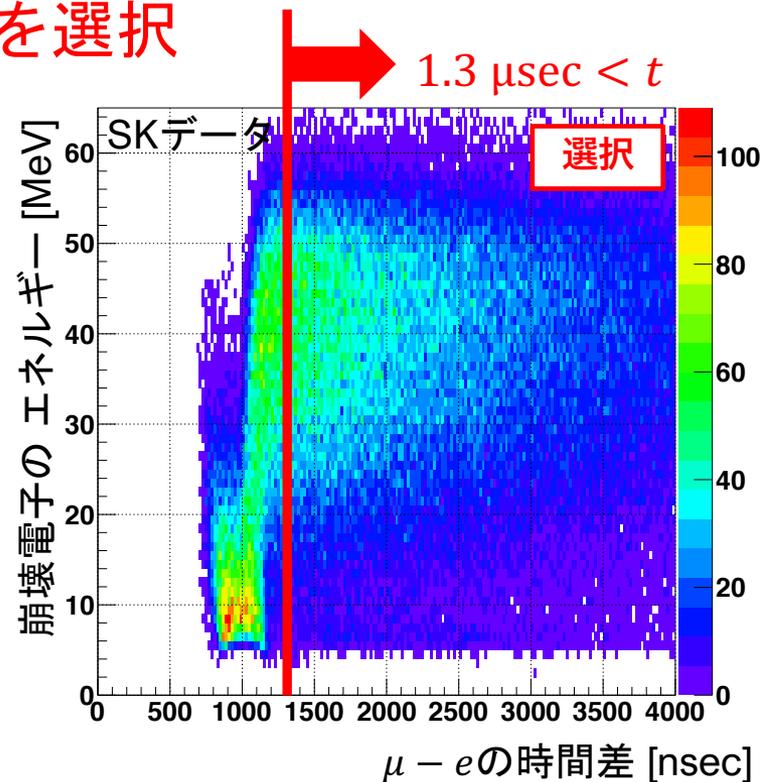
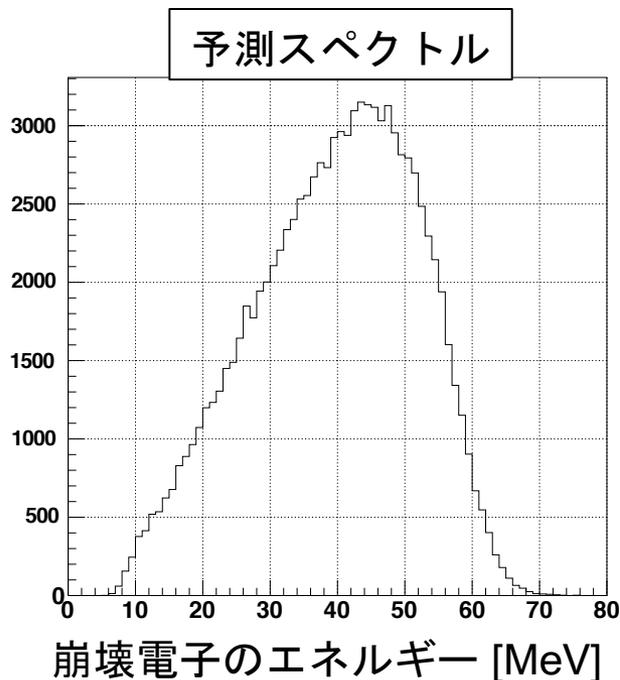


事象選別の条件 ①

ミューオン信号と崩壊電子信号が時間的に近いと
崩壊電子の事象再構成が困難



ミューオンと崩壊電子の時間差で除去
→ 1.3 μsec 以上を選択

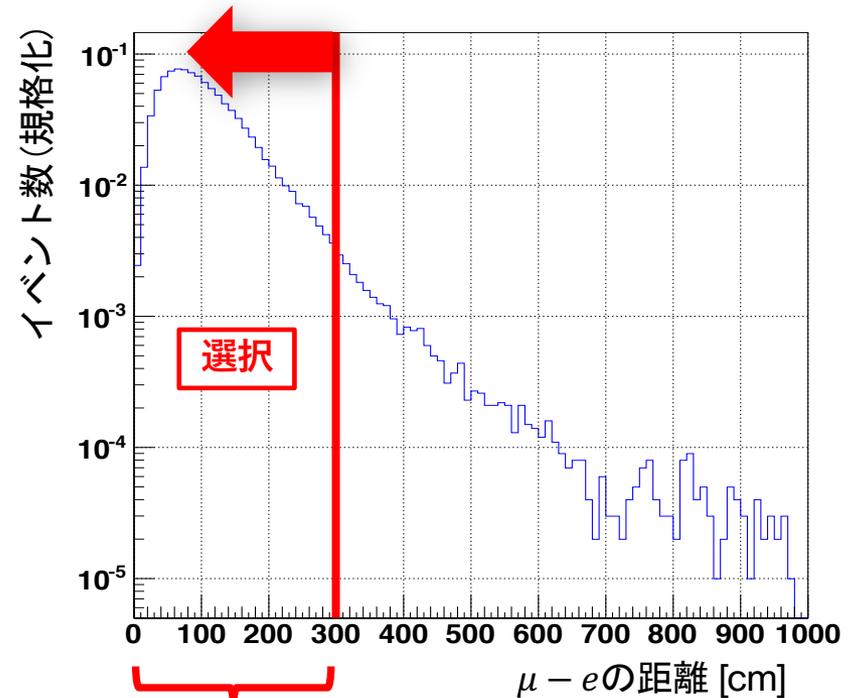
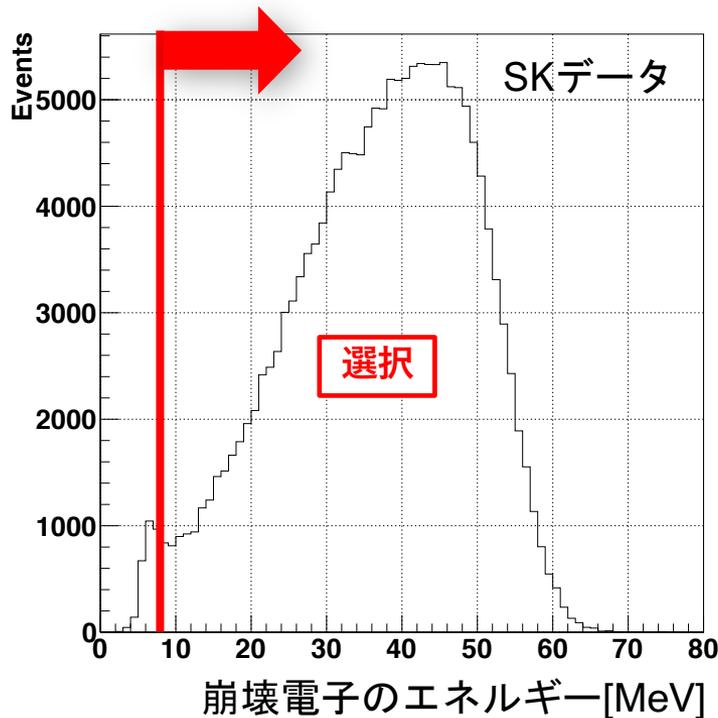


事象選別の条件 ②

1. ミューオンと崩壊電子の時間差 : $1.3 \mu\text{sec}$ 以上
2. 低エネルギー事象のバックグラウンドを取り除く : 8 MeV 以上
3. 静止ミューオンと崩壊電子の距離 : 300 cm 以内



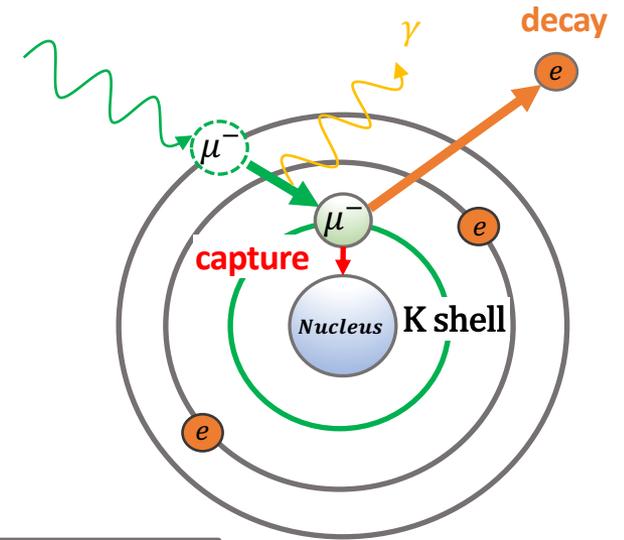
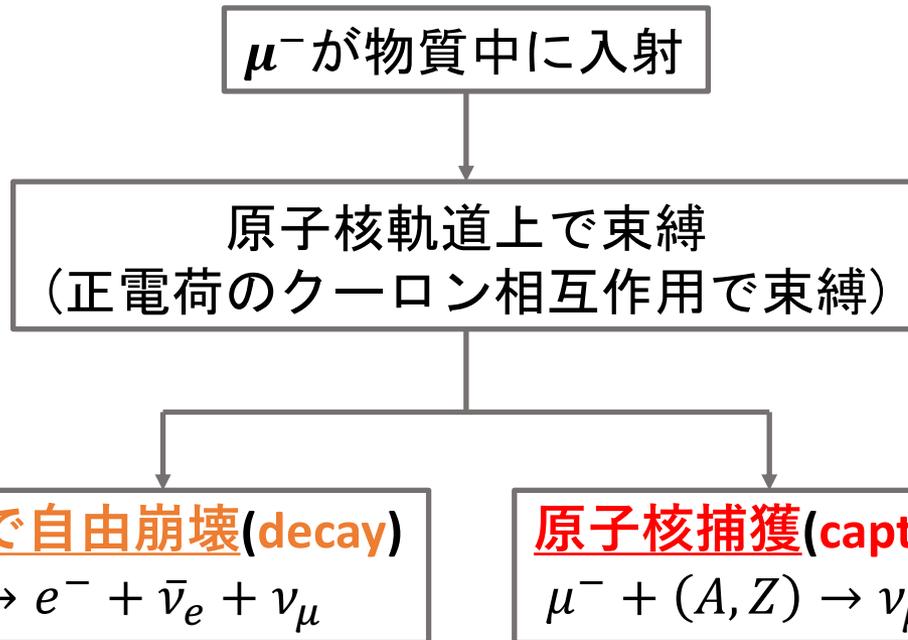
全ての条件を満たす事象を選択



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

ミューオンの寿命

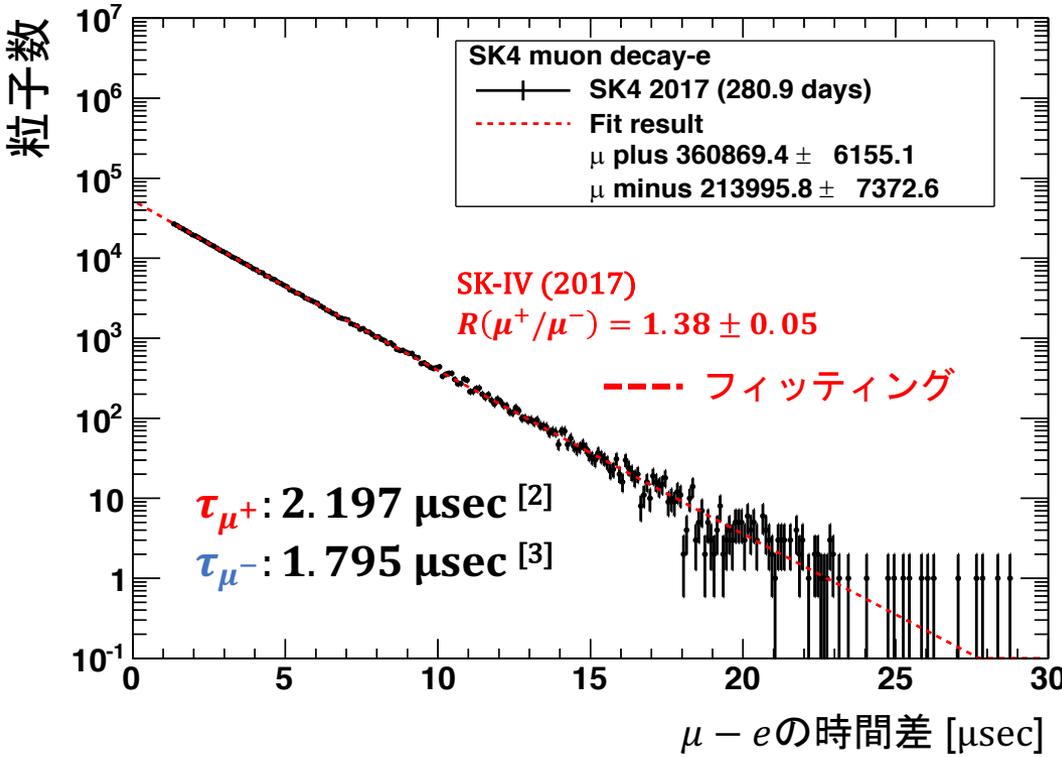
物質中では原子核捕獲効果が加わり μ^- の見かけの寿命 τ_{μ^-} が短くなる



$$\Gamma_{\text{全崩壊確率}} = \Gamma_{\text{自由崩壊確率}} + \Gamma_{\text{捕獲確率}} = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} \Rightarrow \tau_{\mu^-} \text{より短い}$$

μ^\pm 粒子数の算出

観測粒子数の合計 = N_+ $\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^+}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right)$ + N_- $\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu^-}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right)$



関数フィッティングにより N_+, N_- を求める
 → 水中での μ^+, μ^- の寿命 τ_{μ^\pm} のパラメータを固定

N_+, N_- を算出



電荷比

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

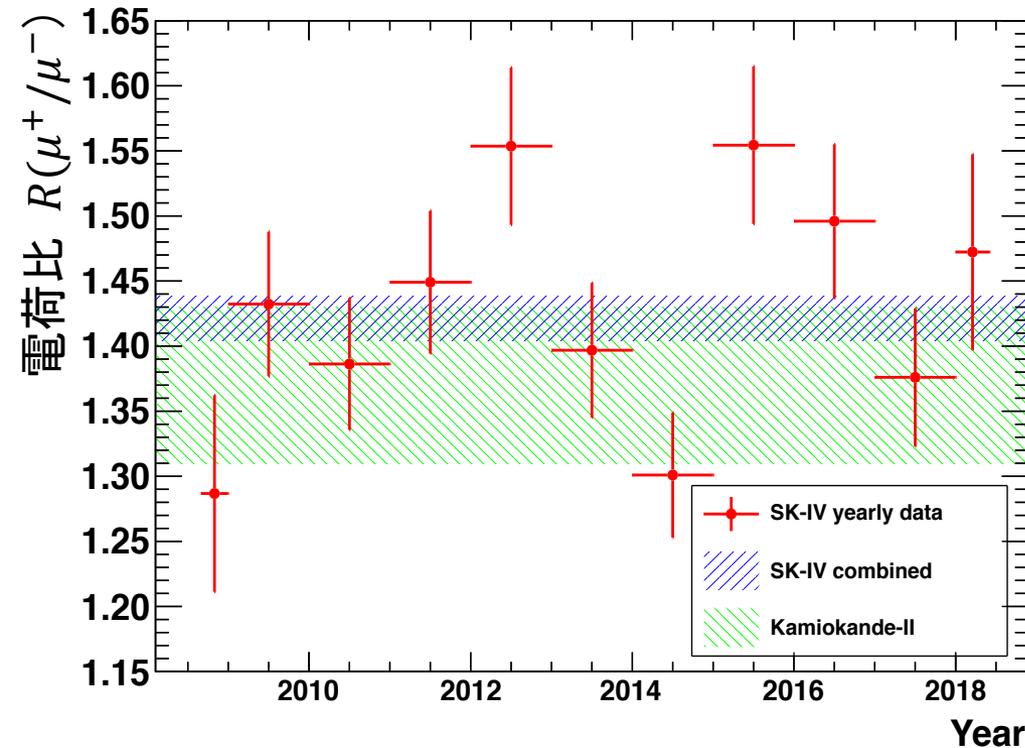
↑
原子核捕獲の補正

[2] P. A. Zyla, et al.: (Particle Data Group), Prog.Theor.Exp.Phys.2020, 083C01 (2020)
 [3] T. Suzuki, D.F. Measday, and J.P. Roalsvig, Phys. Rev. C 35, 2212 (1987)

電荷比 $R(\mu^+ / \mu^-)$ の結果

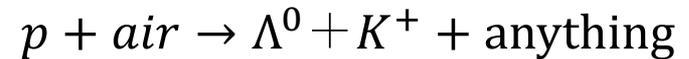
2008年～2018年までの電荷比の年変化を算出

全期間での平均値 → $R(\mu^+ / \mu^-) = 1.42 \pm 0.02$



π/K 成分のみを考慮した電荷比

- TeV領域にかけてK中間子からの崩壊が寄与
 $R(\mu^+ / \mu^-) \approx 1.27$ から増加



1.3 TeV付近ではK中間子生成が影響
→ TeV範囲の電荷比予測の改善が期待できる

まとめ

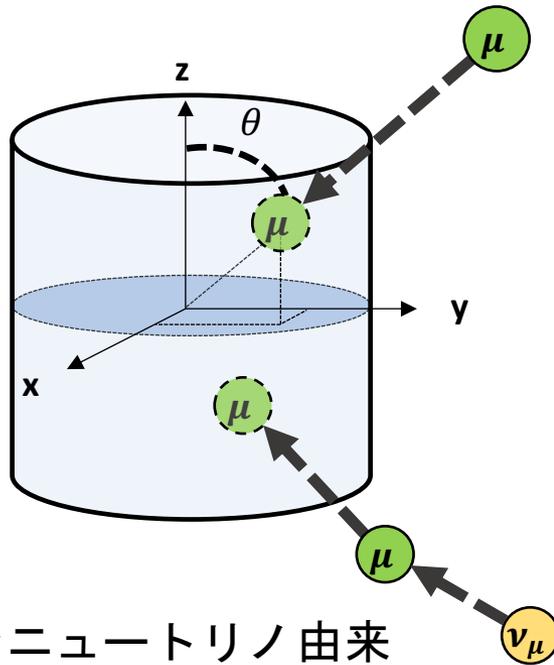
- 宇宙線と大気原子核の反応プロセスの理解には
TeV領域の宇宙線ミューオンの電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ 測定が重要
- SKの観測データを用いた電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ の測定
→ $\mu - e$ 崩壊事象による μ^\pm の粒子数の算出
- 約10年間のSKの観測データの解析結果
→ $R(\mu^+/\mu^-) = 1.42 \pm 0.02$
- 独立な手法で、TeV領域で K 中間子生成が寄与することを示した
→ TeV領域での電荷比 $R(\mu^+/\mu^-)$ 予測の改善に期待できる

Back up

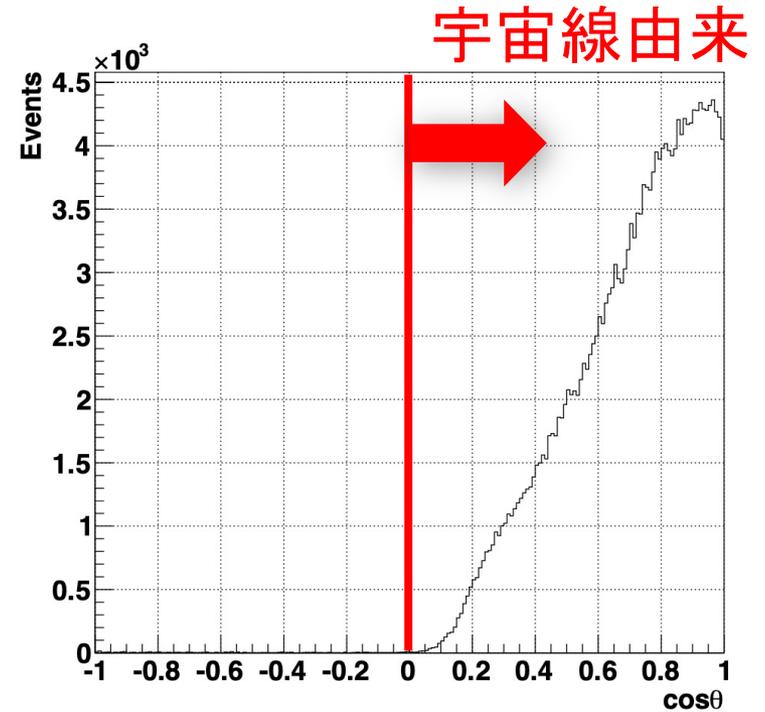
事象選別の条件： μ

検出器内に静止するミューオン天頂角分布

宇宙線由来 ($\theta < 90^\circ$)

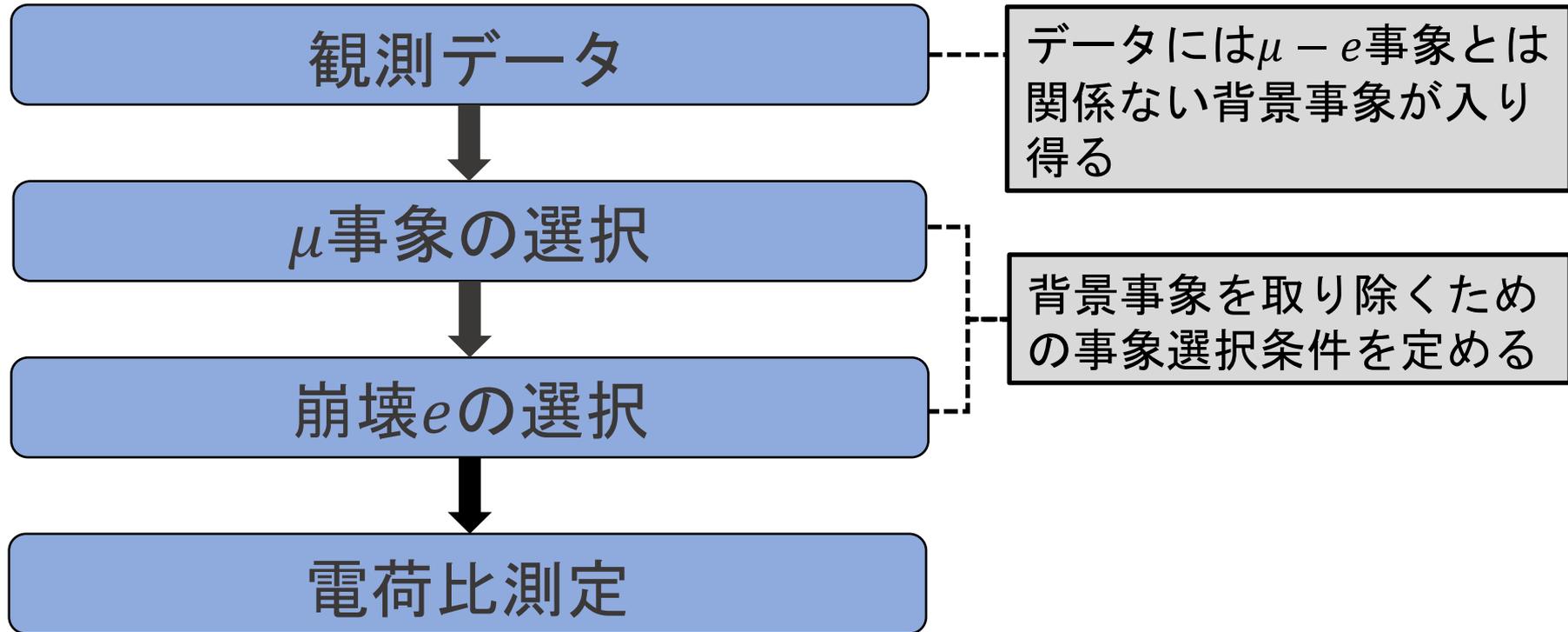


上向きニュートリノ由来
($\theta > 90^\circ$)



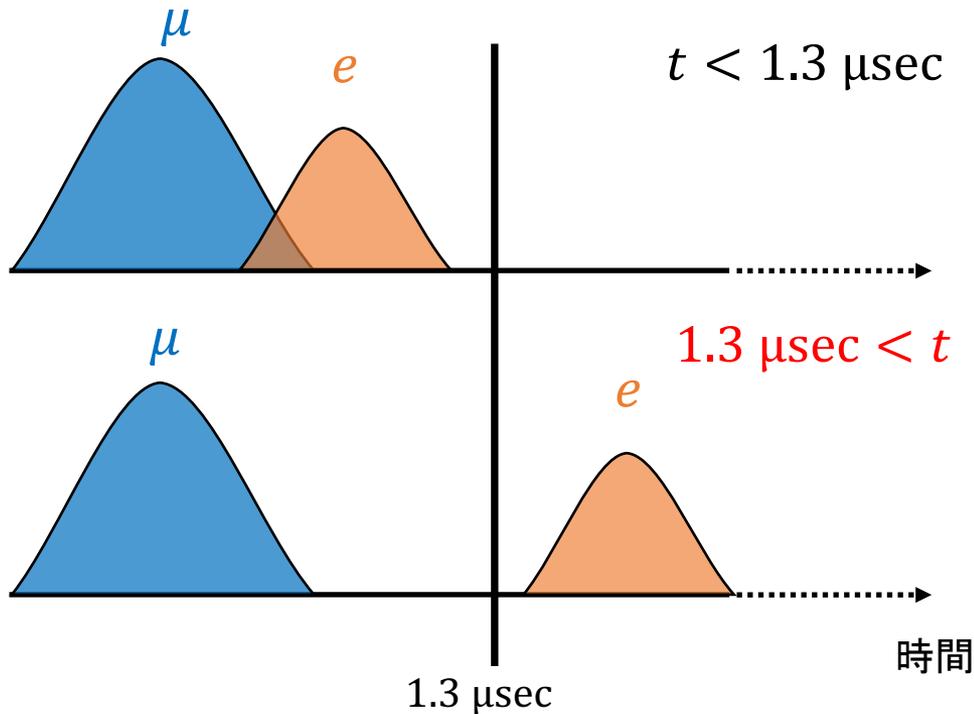
天頂角 $\theta < 90^\circ$ 以内の宇宙線由来の事象を選択

電荷比測定 of 解析

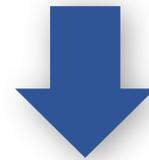


事象選別の条件

1. ミューオンと崩壊電子の時間差が $1.3 \mu\text{sec}$ 以上のイベント



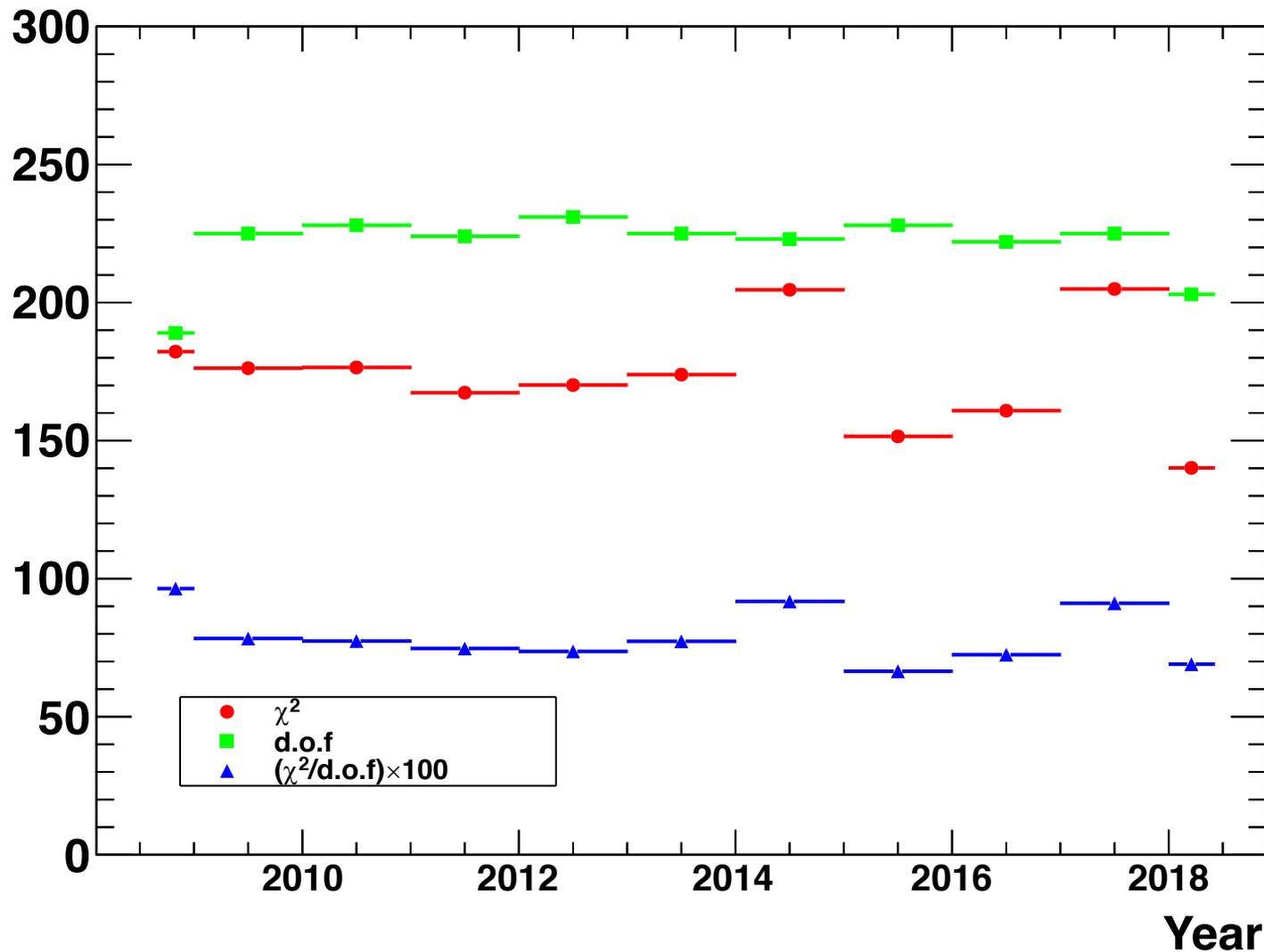
両信号が重なる
→ 崩壊電子の事象再構成が困難



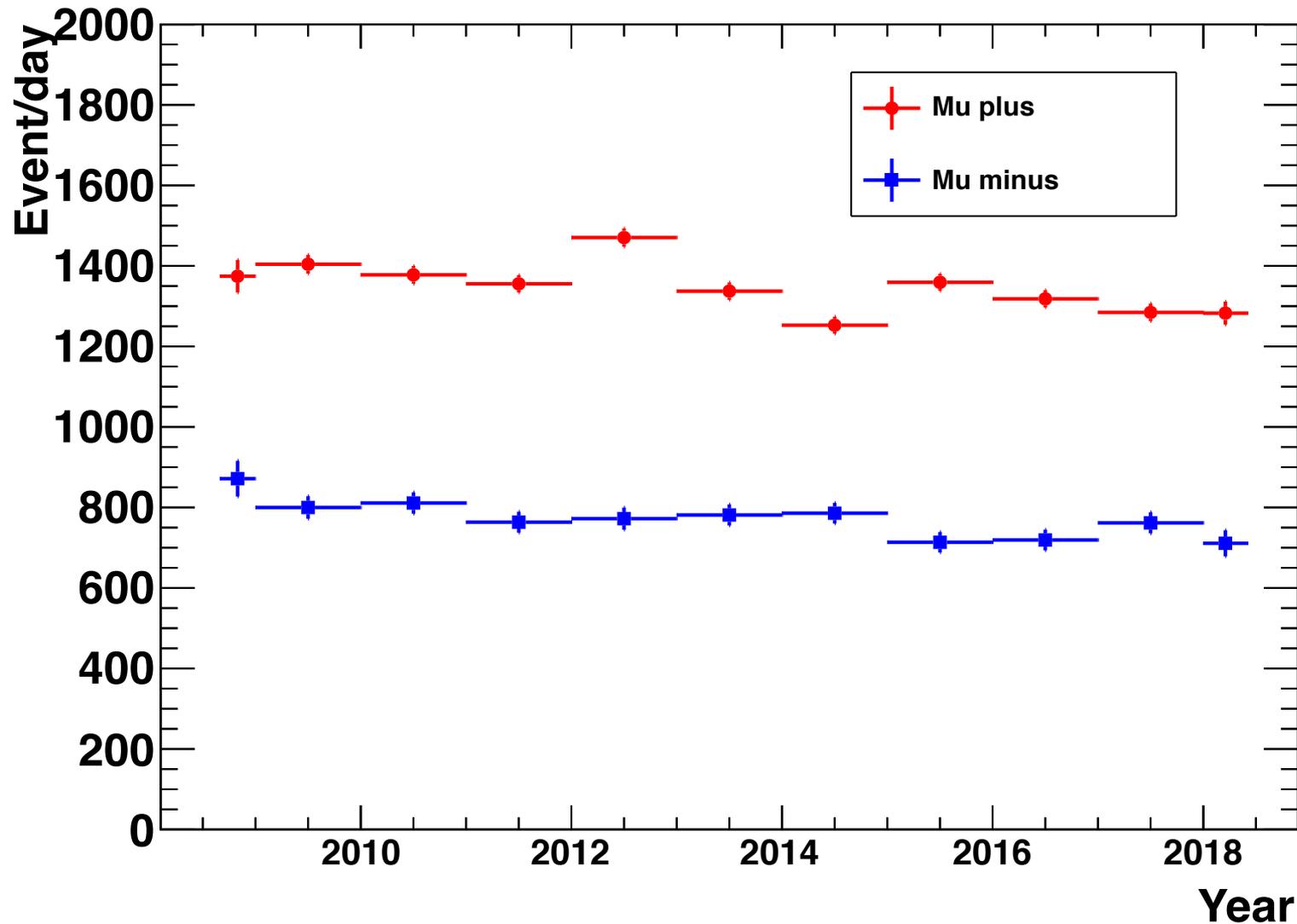
時間差を確保することで
 $\mu - e$ の区別が可能

(*) ミューオンの寿命 $\tau_\mu = 2.2 \mu\text{sec}$

電荷比のフィッティング結果



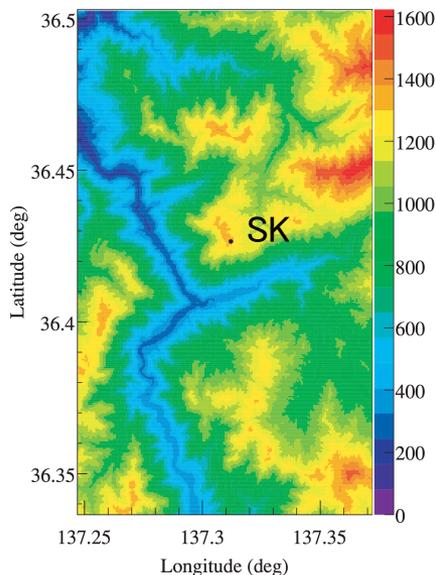
宇宙線ミューオンのイベント数 19



宇宙線ミューオンのフラックス計算²⁰

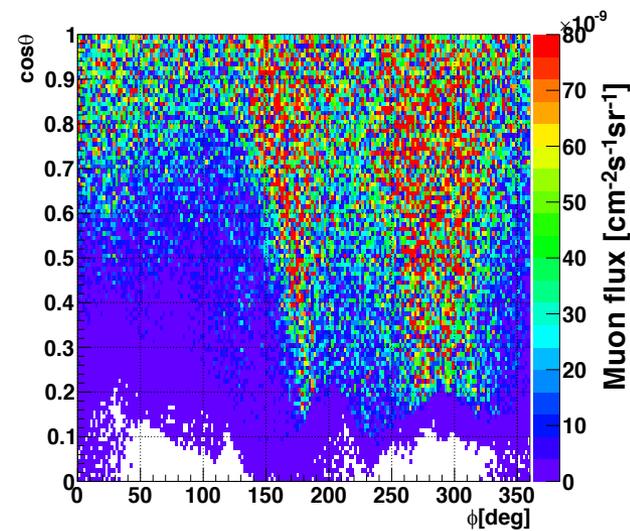
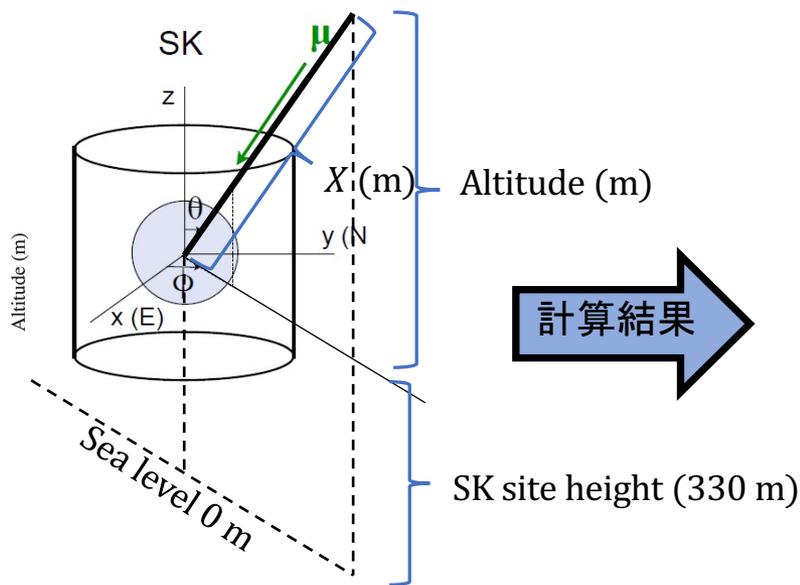
- 宇宙線ミューオンのMCによりミューオン-電子崩壊事象の事象選別を行う
→ SKで観測されるミューオンフラックスを考慮したMC
- MUSIC(Muon Simulation Code)^[*]
神岡鉱山近辺の地理情報から地下で観測されるミューオンのエネルギーおよび角度分布を計算

Digital Map 50 m Grid



国土地理院(1997)

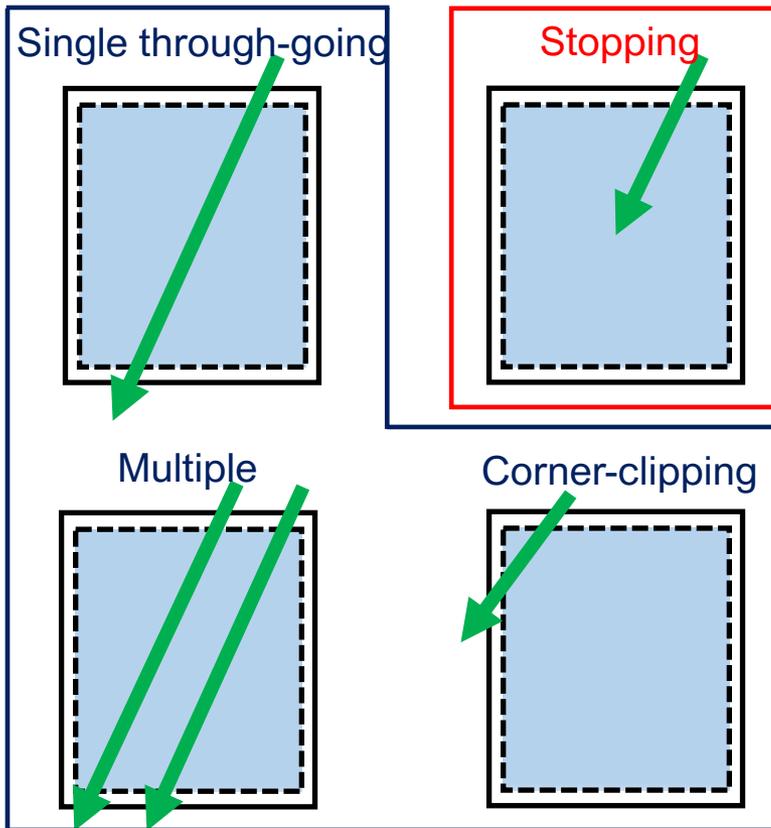
μ が岩盤を通過する距離 χ に応じてフラックスを計算



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

宇宙線ミューオンの分類

- 観測される宇宙線ミューオンは4種類に分類される



信号事象

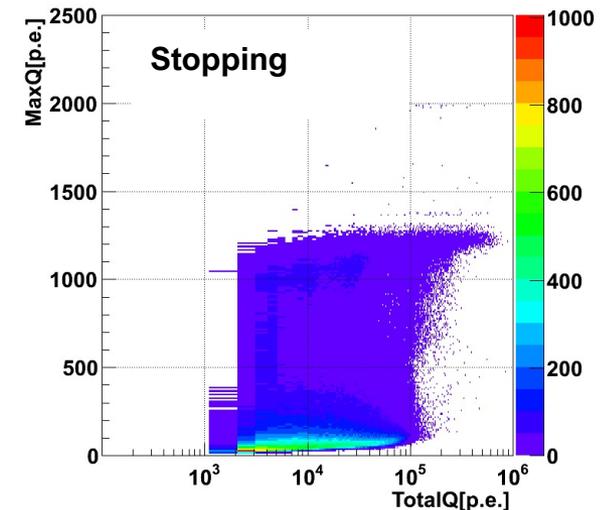
- Stopping muon**

1個のミュー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

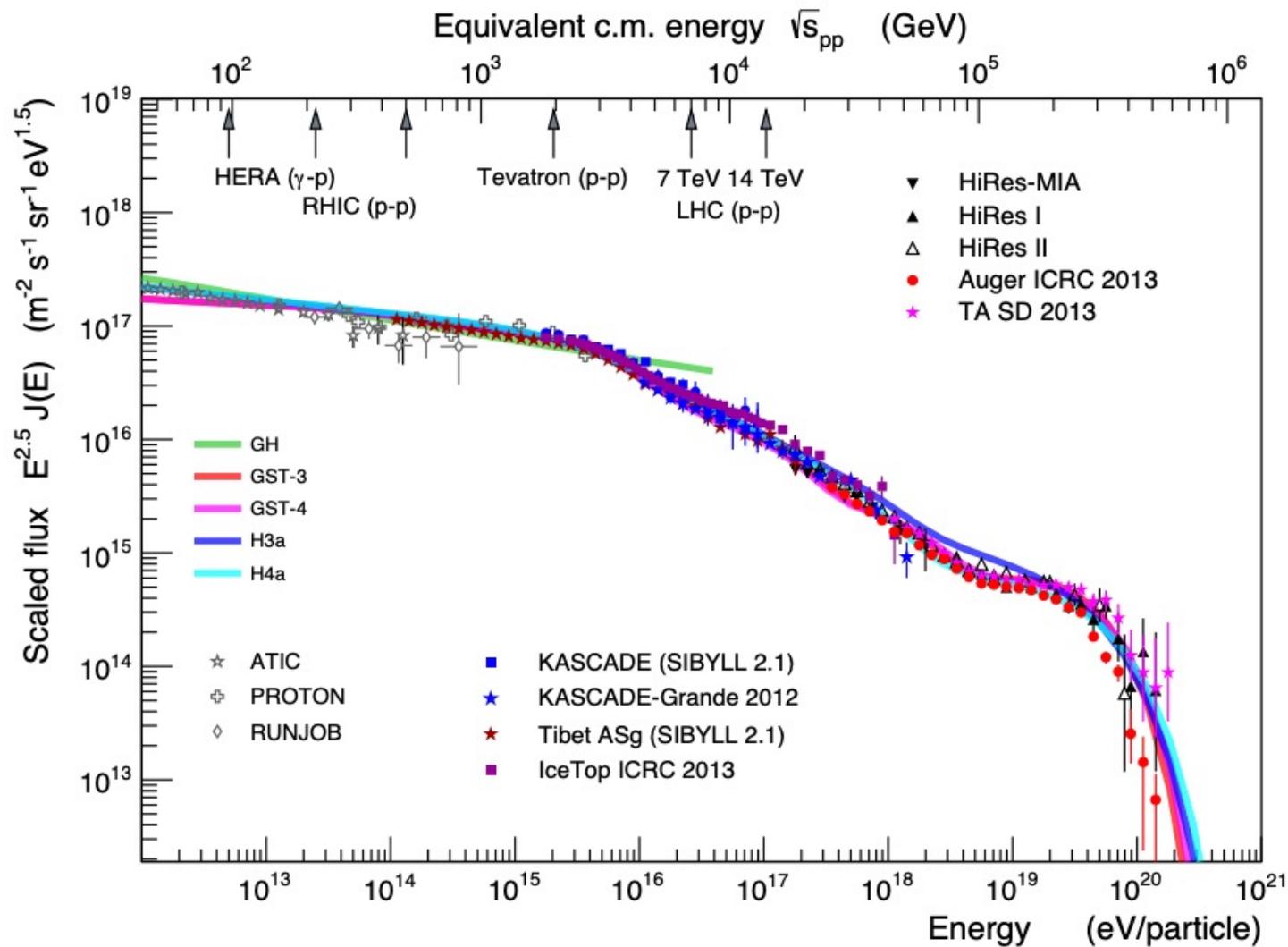
- 水中でミューオンが損失する電荷の総量と最大電荷量

→ 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

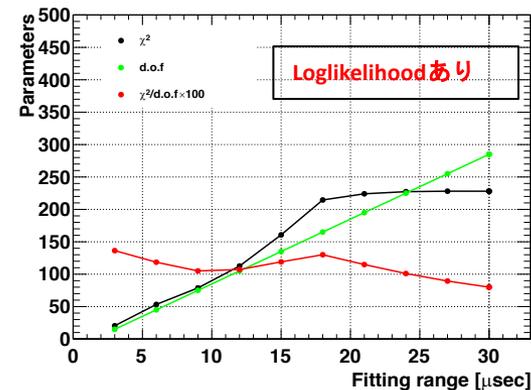
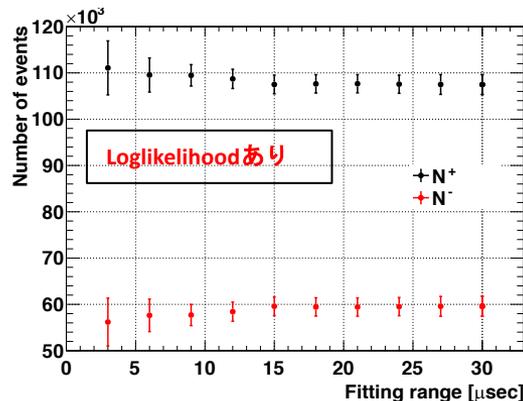
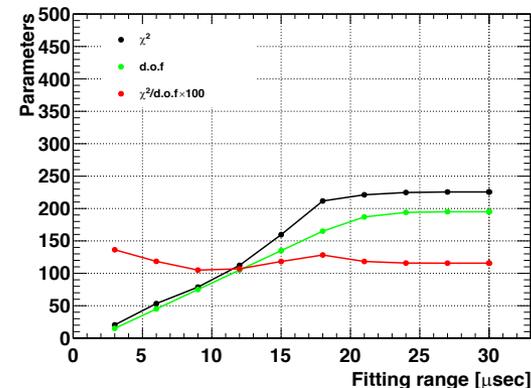
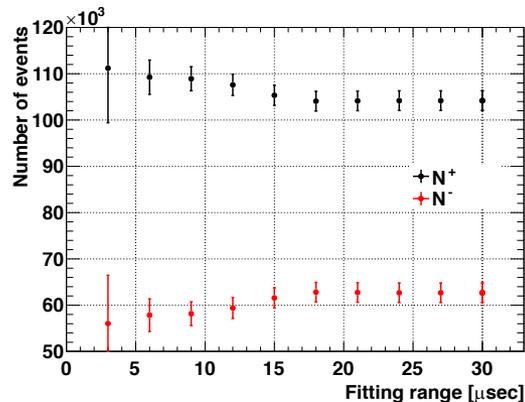


宇宙線のエネルギーフラックス



Fitting範囲を変更した場合の N_+ , N_-

- Fitting範囲の上限値を3 μsec ~30 μsec (3 μsec 毎)に設定した場合の N_{\pm} , χ^2/dof の値を確認
- Loglikelihoodを使用した場合(下図)と比較

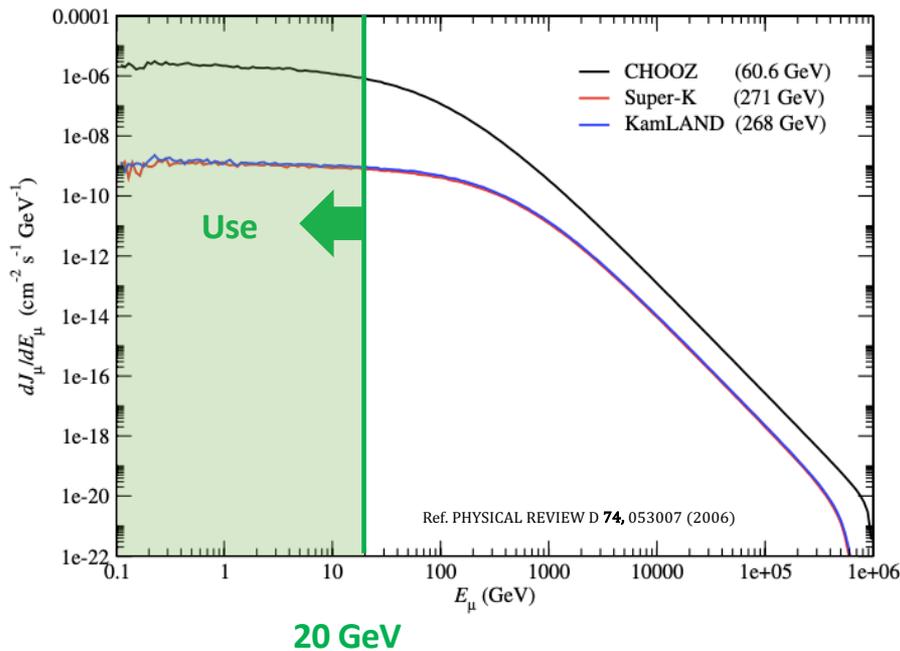


→ 各fitting方法による誤差の見積もりが必要(系統誤差)

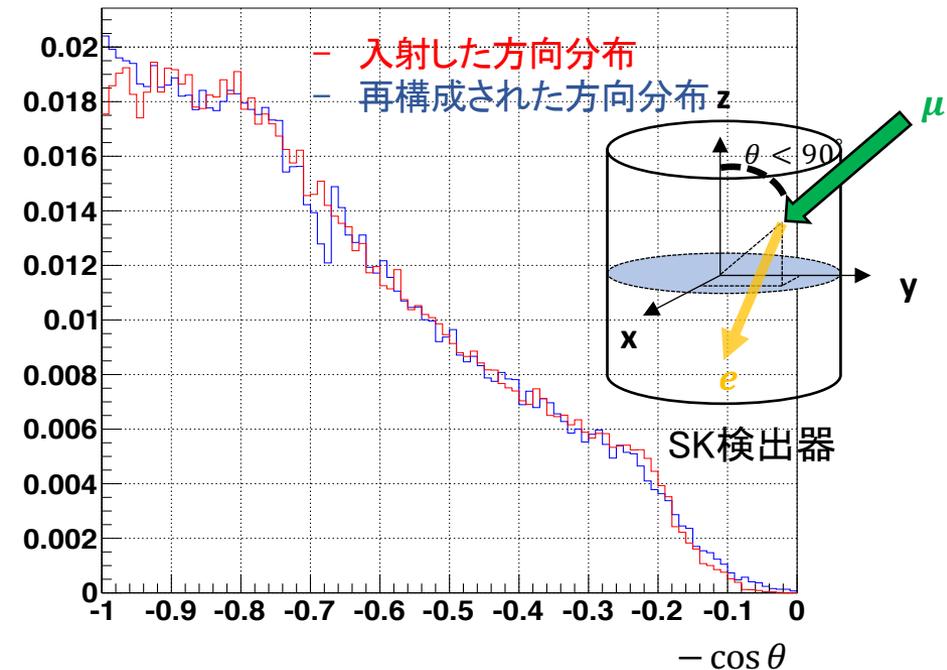
宇宙線ミューオンのMC

- SKで観測されるミュ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

Muon energy flux @ SK

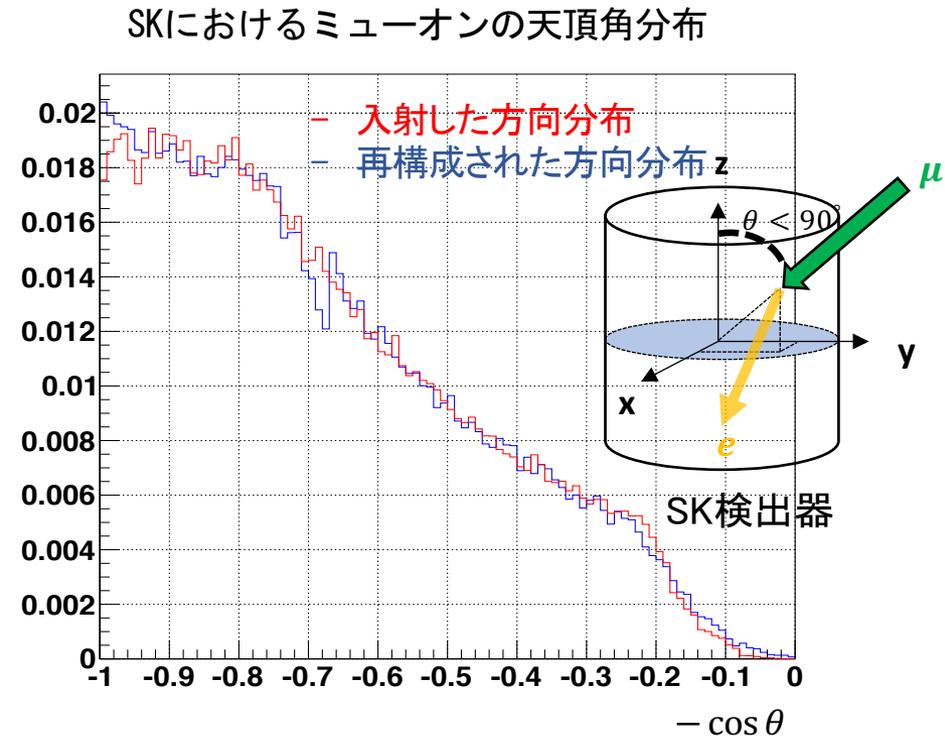
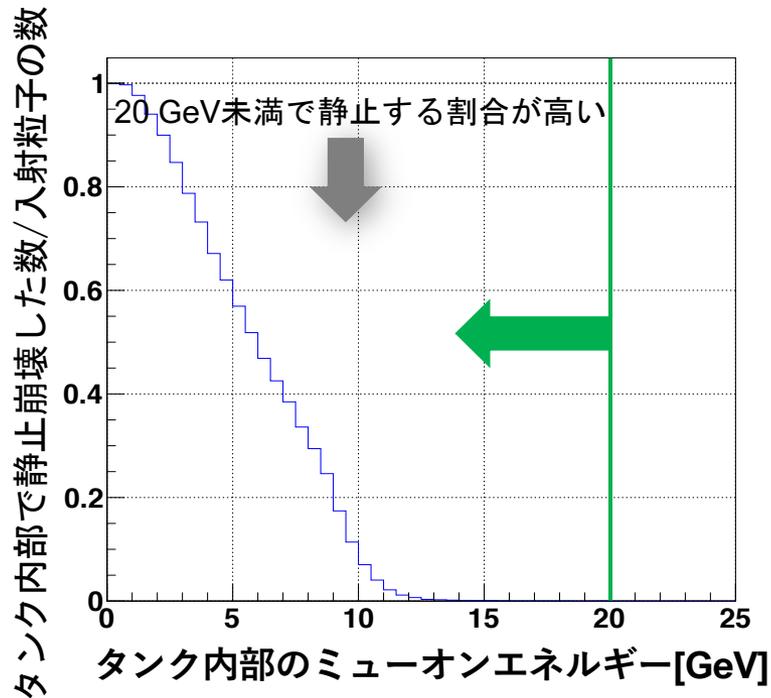


SKにおけるミューオンの天頂角分布



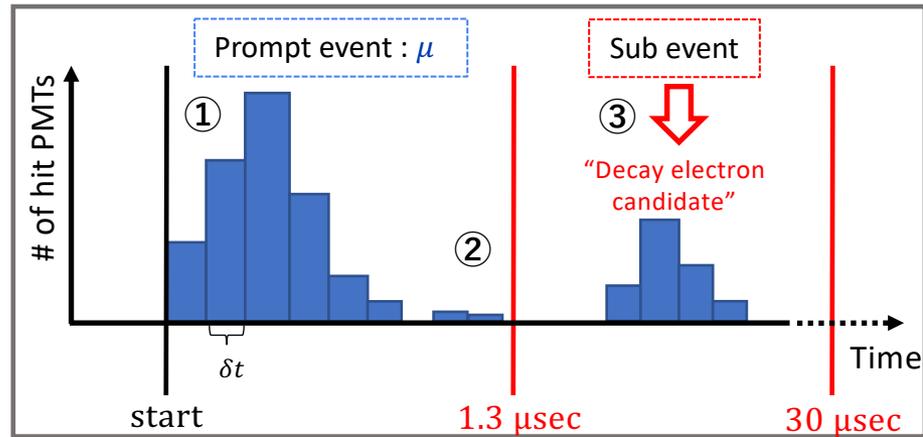
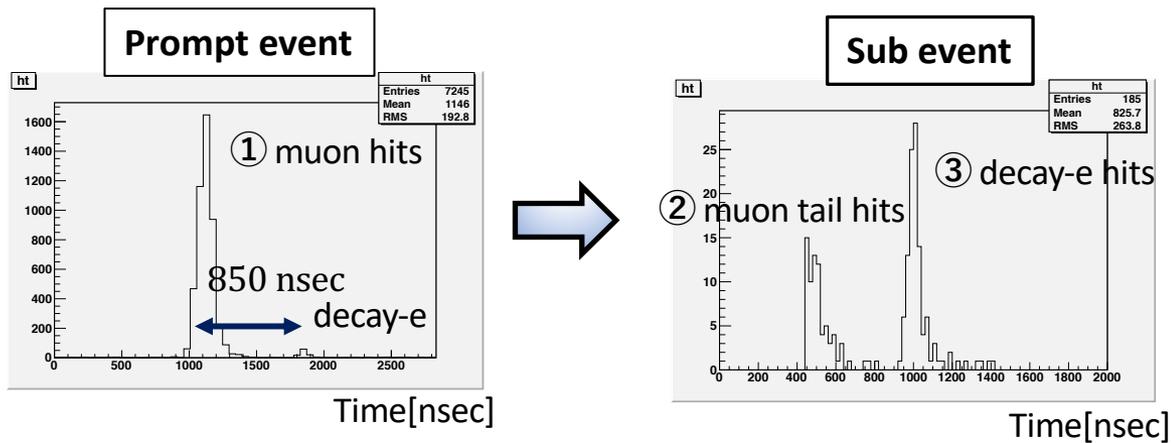
事象選別の条件

SKで観測されるミュオンフラックスの天頂角分布に沿って μ を入射



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



負ミューオンの寿命

$$\frac{1}{\tau_{total}} = \frac{1}{\tau_{capture}} + \frac{1}{\tau_{decay}}$$

τ_{total} : 物質中における μ^- の寿命(実験で観測される値)

τ_{decay} : μ^- の自由崩壊時の寿命(この値は真空中での μ^+ の寿命と一致)

$\tau_{capture}$: 原子核捕獲による μ^- の寿命(物質により異なり、原子番号が大きいほど $\tau_{capture}$ は小さくなる)

$$\Lambda_{total} [s^{-1}] = \frac{1}{\tau_{capture}} = \frac{1}{\tau_{total}} - \frac{1}{\tau_{decay}} = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} - \frac{1}{\tau_+}$$

Particle	τ_{decay}	τ_{total}	$\tau_{capture}$	Λ_C
muon-	2197 nsec	1795 nsec	9809 nsec	0.184

(Phys.Rev.C.35, 2212(1987))

検出原理

荷電粒子の速度 v が物質中(屈折率 n)での光の速度 c/n を超えるとチェレンコフ光が放射される

チェレンコフ光の発生条件

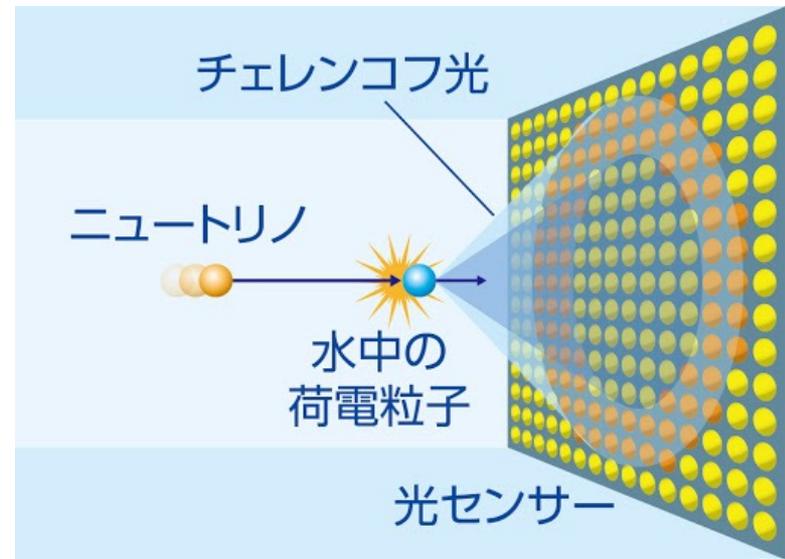
$$v > \frac{c}{n}$$

波面は荷電粒子の進行方向に対して円錐形となる

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

特に水の屈折率 $n \cong 1.33$ の場合

チェレンコフ光の放射角度 $\theta \cong 42^\circ$



チェレンコフ光の発生原理

π/K モデル

1. π/K 成分のみを仮定

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未満で影響しない)

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

(η : Gaisser constant 0.054)

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

r_{π}, r_K の結果と大気MCを比較することが可能

