

Super-Kamiokandeにおける 崩壊電子による μ^+/μ^- 識別

名古屋大学 宇宙地球環境研究所

村瀬 美咲

for Super-Kamiokande collaboration

第23回ICEPPシンポジウム 2017.02.21



宇宙地球環境研究所

Institute for Space-Earth Environmental Research

研究目的

- ◆ Super-Kamiokandeにおける大気ニュートリノ振動解析の改良を目指し、既存データの $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ を識別するための解析方法を開発する

$\nu_e / \bar{\nu}_e$: すでに解析方法が確立されている

$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$: 本研究で解析方法開発

- ◆ $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ を分けるためには、 μ^- と μ^+ の崩壊時間やエネルギーなどの分布の違いを用いる



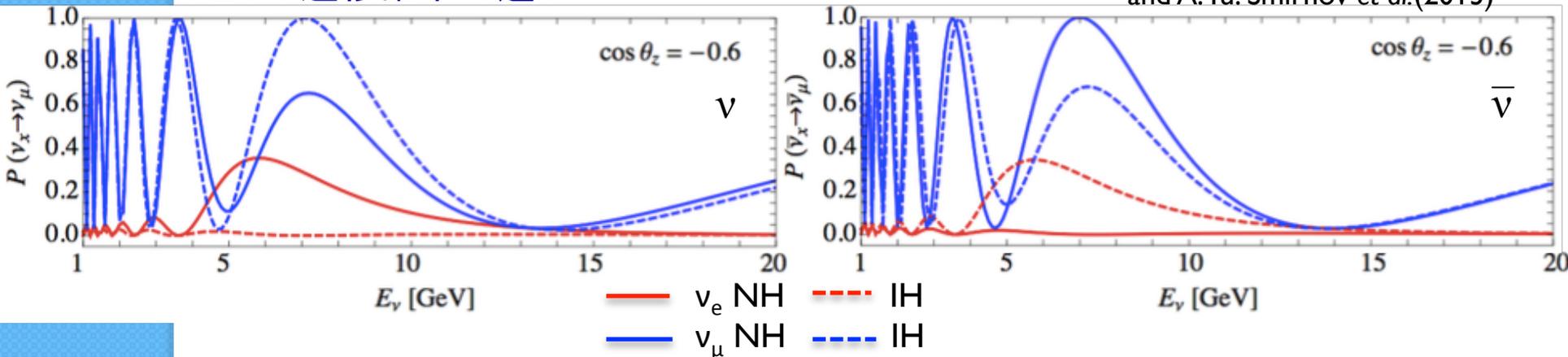
likelihoodにより1イベントごとに識別

ニュートリノ振動(物質中)

- ニュートリノ振動実験でわかることの1つは Δm^2 であるが、個々の質量の大小関係はわからない(質量階層性問題)
- 物質効果によりニュートリノ振動は真空中の場合とは変化し、その変化の度合いはニュートリノの質量階層性による
- Normal Hierarchy($m_1 < m_2 \ll m_3$)ならニュートリノ、Inverted Hierarchy($m_3 \ll m_1 < m_2$)なら反ニュートリノの出現が強められるため、2つで遷移確率は異なる

ν と $\bar{\nu}$ の遷移確率の違い

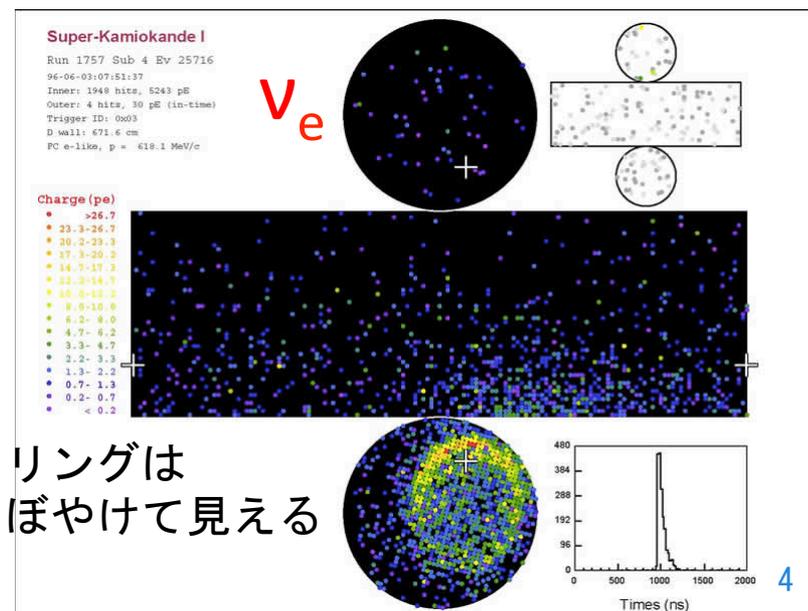
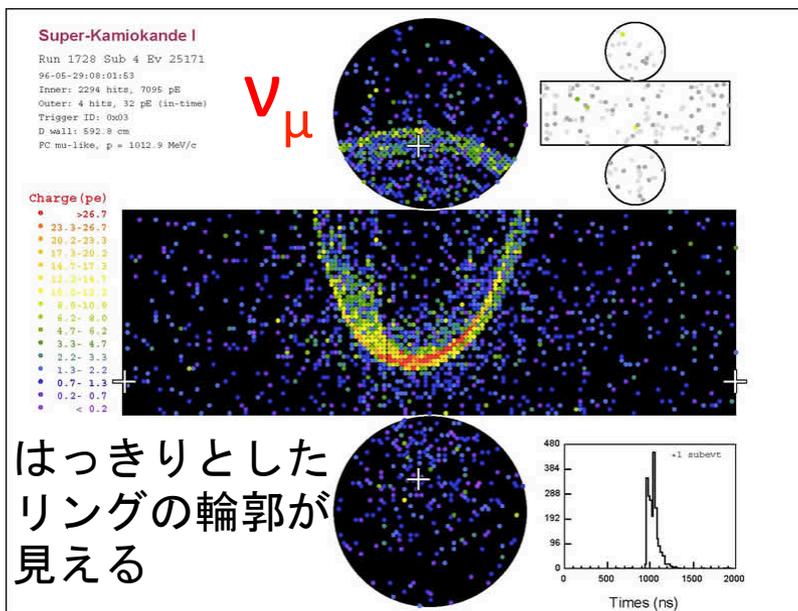
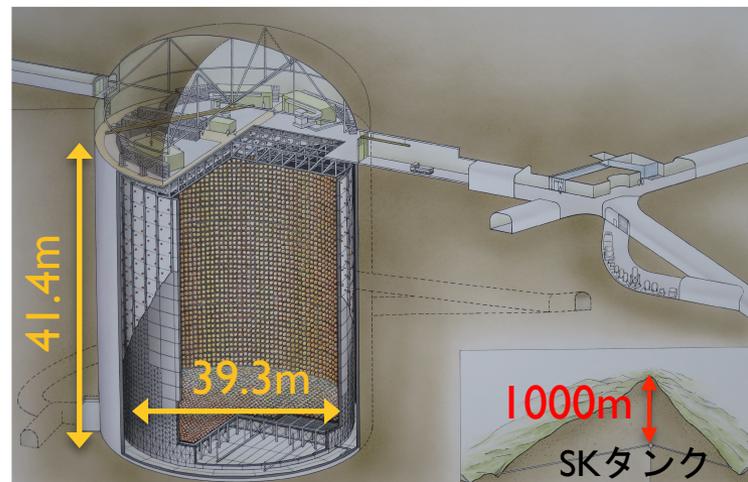
E. Kh. Akhmedov, Soebur Razzaque, and A. Yu. Smirnov et al. (2013)



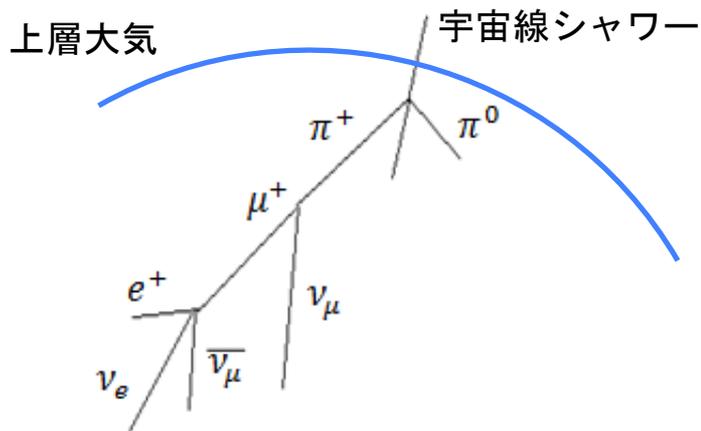
➡ ニュートリノと反ニュートリノを識別して確率の差を調べることで、質量階層性問題の解決につながる

Super-Kamiokande

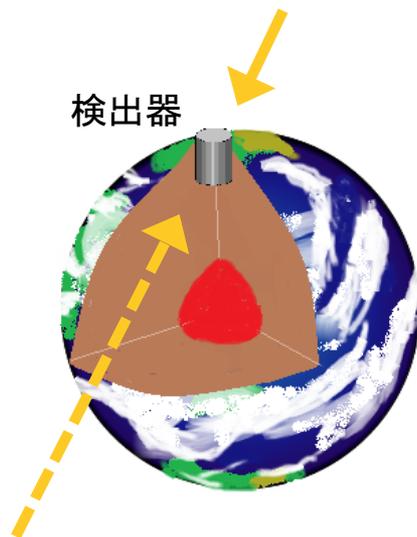
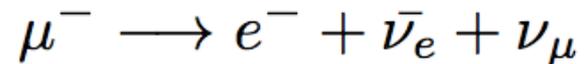
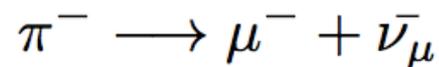
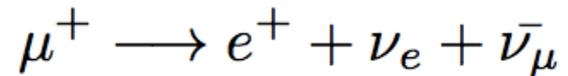
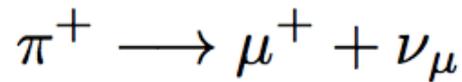
- 岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下1,000mに位置する水チェレンコフ型検出器
- 直径39.3m、高さ41.4mのタンクに5万トンの超純水
- チェレンコフリングパターンで $\nu_{\mu}(\mu^-)$ と $\nu_e(e^-)$ を識別
- 太陽、大気、加速器、超新星爆発などからのニュートリノを観測



大気ニュートリノ



宇宙線が地球の大気と衝突して
2種類のニュートリノを生成



検出器の上側から来たニュートリノ
➡そのまま

検出器の下側から来たニュートリノ
➡地球内部の物質効果を受けた
ニュートリノ振動が起きる

解析の流れ

- ①宇宙線 μ MC/dataを用いて、崩壊電子をタグする手法を確立
- ②大気 ν MCにおいて、 μ^+/μ^- 識別likelihoodを計算
 - *確立したタグ手法を用いて $\Delta \log \text{likelihood}$ 分布を作成
- ③宇宙線 μ MC/dataにおいても同様にlikelihoodを適用
 - *基本的な性能を確認
- ④実際に大気 ν dataにも適用

今回の発表では
ここまで



Super-Kamiokande大気ニュートリノ振動解析に導入

①宇宙線 μ MC/dataを用いて、
崩壊電子をタグする手法を確立

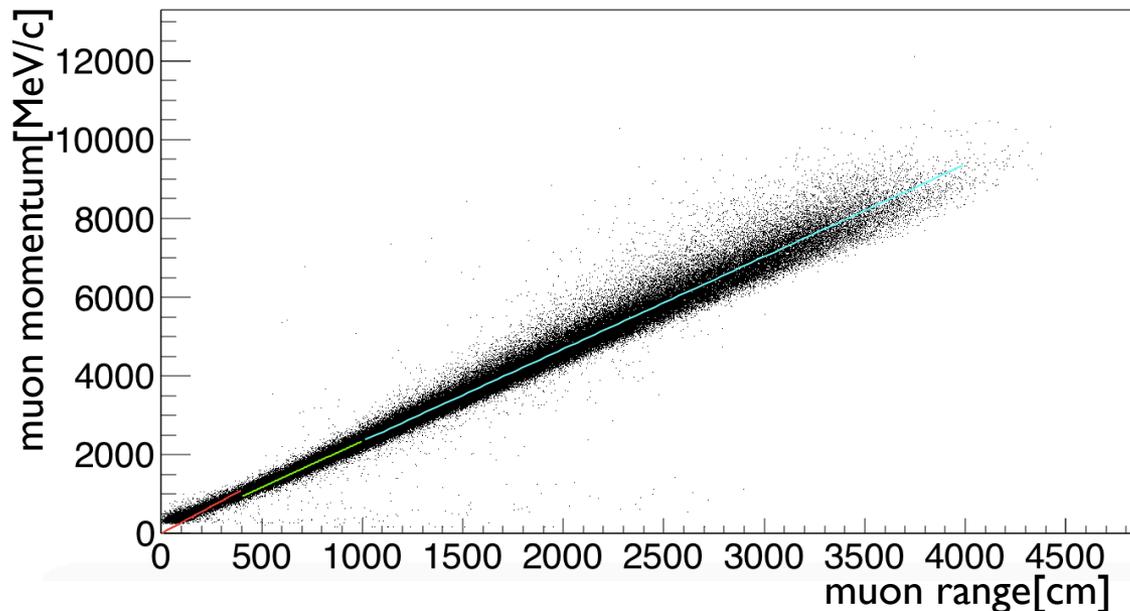
宇宙線 μ での崩壊電子選別

使用するMC/data(dataは2009年4月のものを使用)

* タンク上部から入射し、タンク内で止まって崩壊電子を出す
鉛直下向きの**宇宙線ストップミュオン**

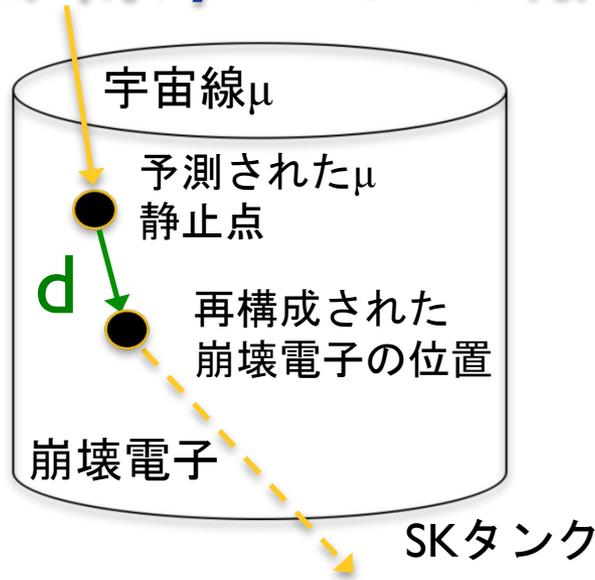
↓
これを用いて、位置情報から崩壊電子イベントを同定する手法を確立

ミュオン運動量と飛程の相関図(MCで見積もり)

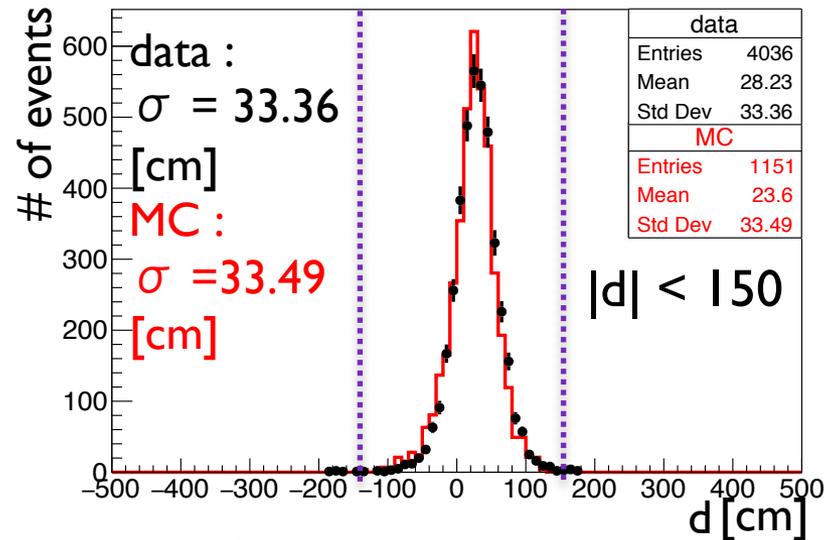


ミュオンの運動量から
ミュオンの飛程を予測
(3つの範囲に分け、それぞれフィットして定数を
決めて計算)

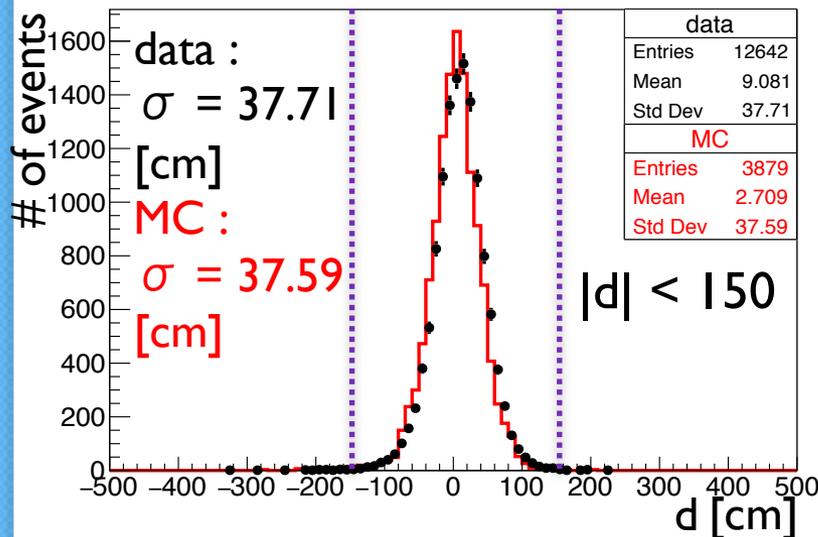
宇宙線 μ での崩壊電子選別



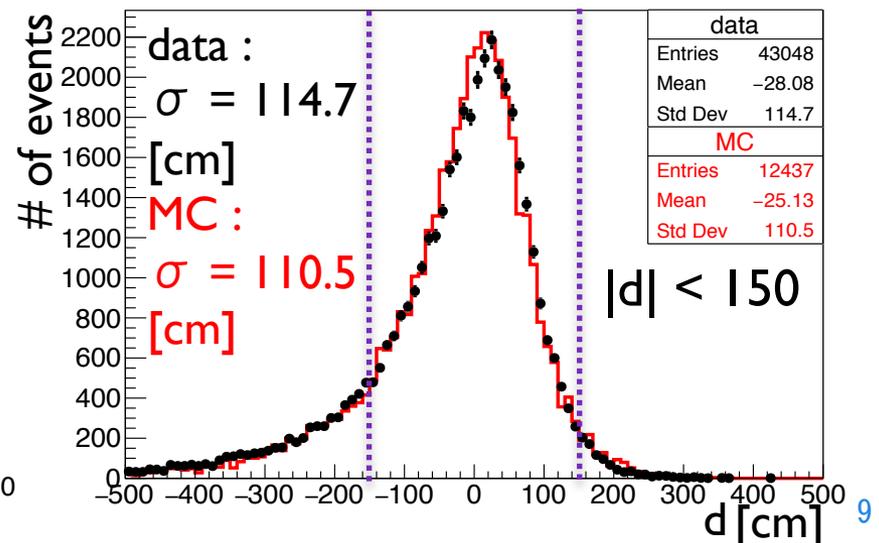
μ 飛程 < 400 [cm]



$400 \text{ [cm]} < \mu$ 飛程 < 1000 [cm]



μ 飛程 > 1000 [cm]



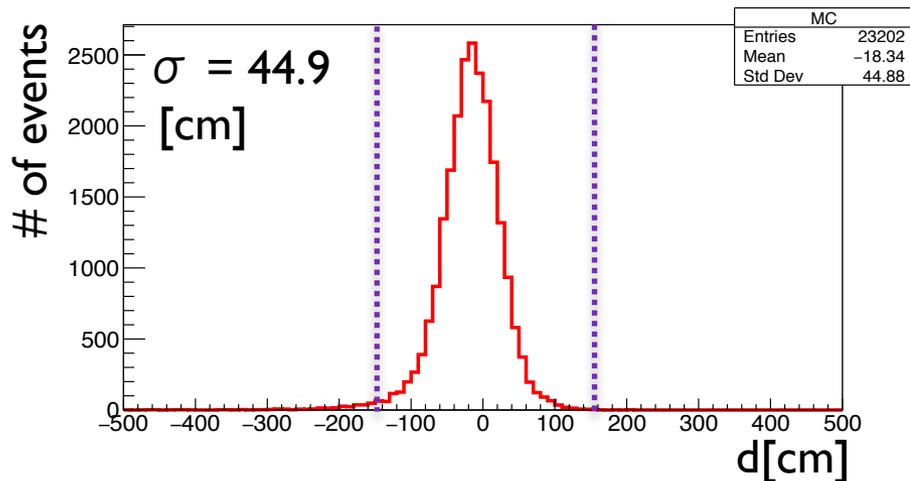
大気 ν MCでの崩壊電子選別

使用するMC

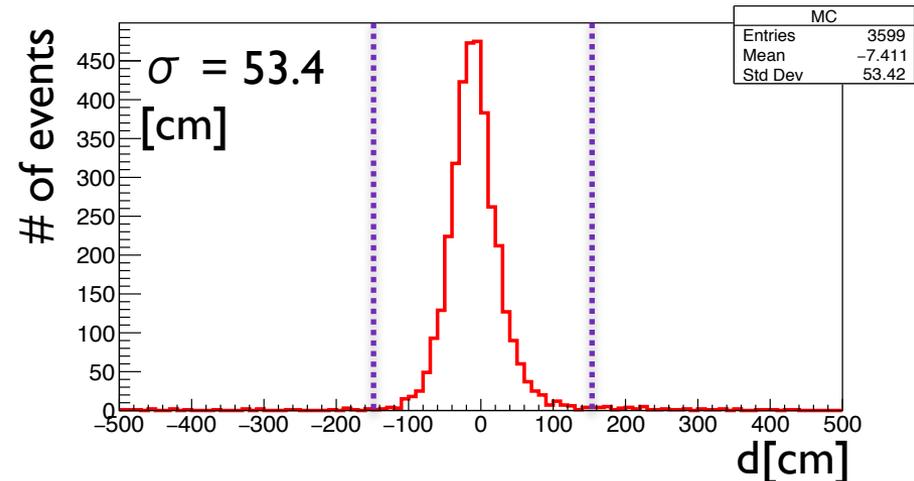
- * 1リングミュオンの荷電カレント準弾性散乱(CCQE)イベントである大気ニュートリノ

宇宙線ミュオンで定義した選別方法を適用すると...

$0 < \mu$ 飛程 < 400 [cm]



$400 < \mu$ 飛程 < 1000 [cm]



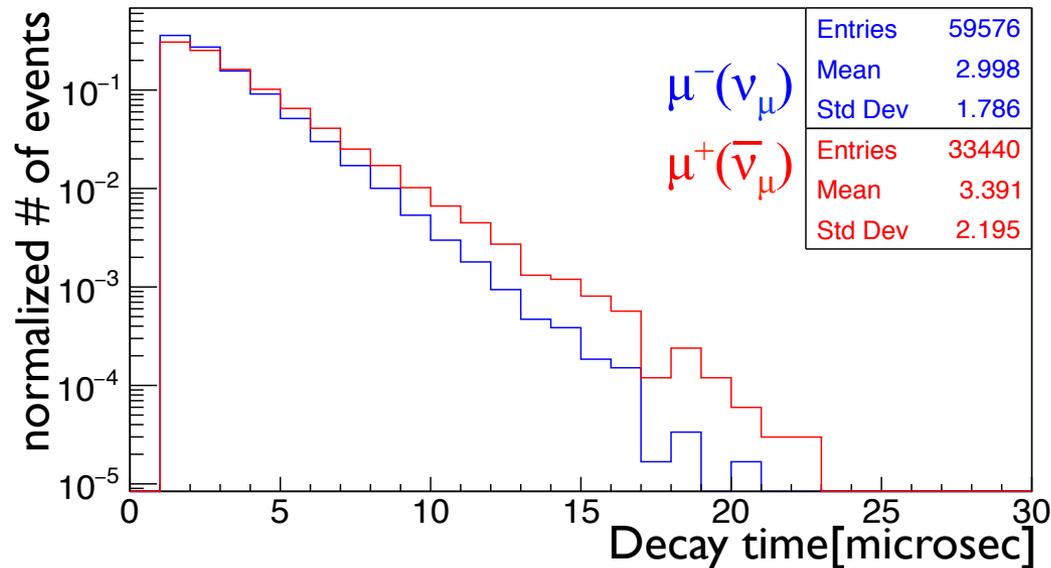
大気 ν でも同様の方法が使用できることを確認した

②大気 ν MCにおいて、 μ^+ / μ^-
識別likelihoodを計算

Input parameter 確率分布 (大気 ν MC)

Decay time

縦軸:log scale



* μ^- は原子核に捕獲されるため、
見かけの崩壊時間が短くなる

$$\mu^- : \tau = 1.7952 \pm 0.0094 \mu\text{s}$$

$$\tau = 1.7954 \pm 0.020 \mu\text{s}$$

T.Suzuki, D.F.Measday, and J.P.Roalsvig et al.(1987)

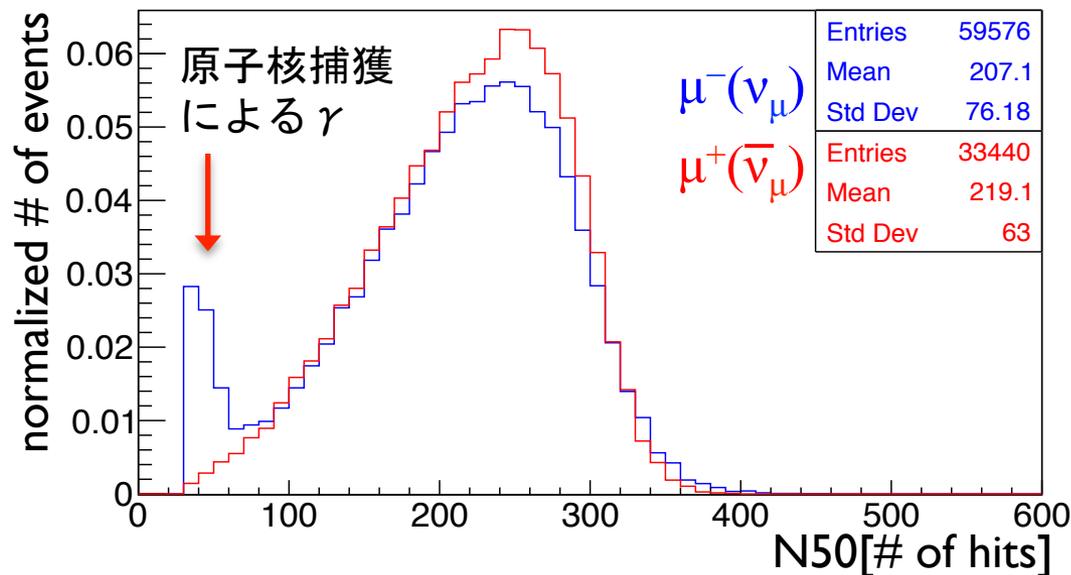
$$\mu^+ : \tau = 2.1913 \pm 0.0158 \mu\text{s}$$

$$\tau = 2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$$

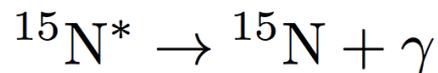
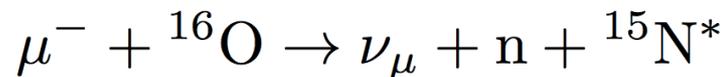
Particle Data Group,J.J.Hernandez et al.(1990)

Input parameter 確率分布 (大気 ν MC)

N50(50ns sliding timing window内の最大hit PMT数)



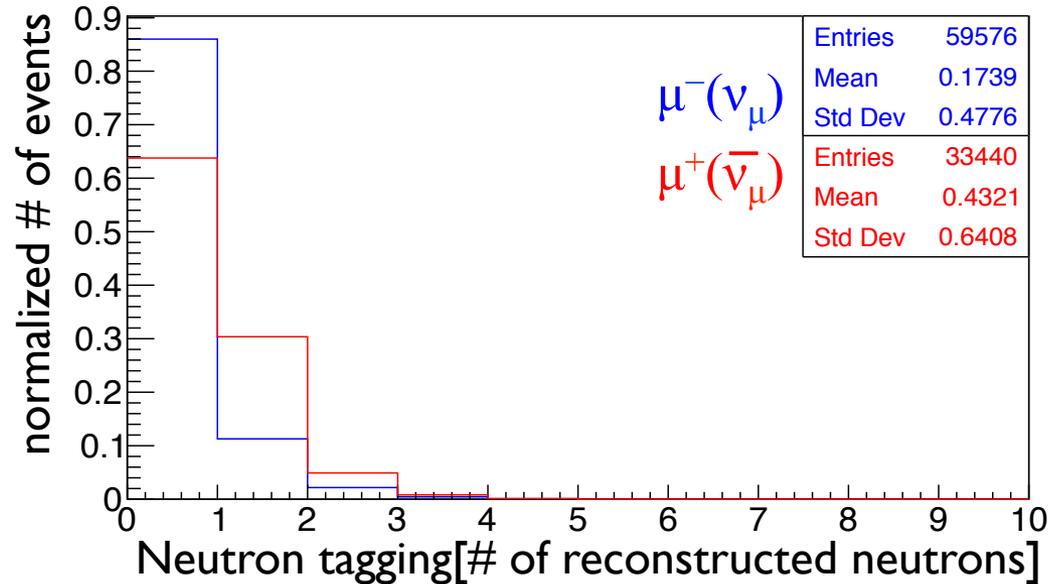
* μ^- は原子核捕獲による γ を放出することがある



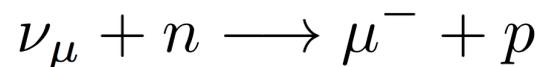
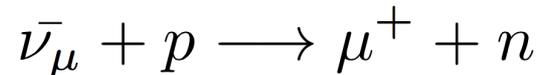
* N50分布の形はエネルギー分布の形とほぼ同じ

Input parameter確率分布 (大気 ν MC)

Neutron tagging



- * 崩壊電子は関係ないが、両者の差がはっきりしていて見えそうということで追加
- * CCQEイベントでは μ^+ のほうが中性子を放出する



log likelihood差分布 (大気 ν)

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

大気ニュートリノMC
 (計500年分)
 300年分 \Rightarrow MC
 200年分 \Rightarrow Fake data

μ^+ か μ^- か既知のMCを用いて、
 どの程度分けられるか調べる

$$P^{\mu^-} = P^{\mu^-}(\text{decay time}) \times P^{\mu^-}(\text{N50}) \times P^{\mu^-}(\text{N tag})$$

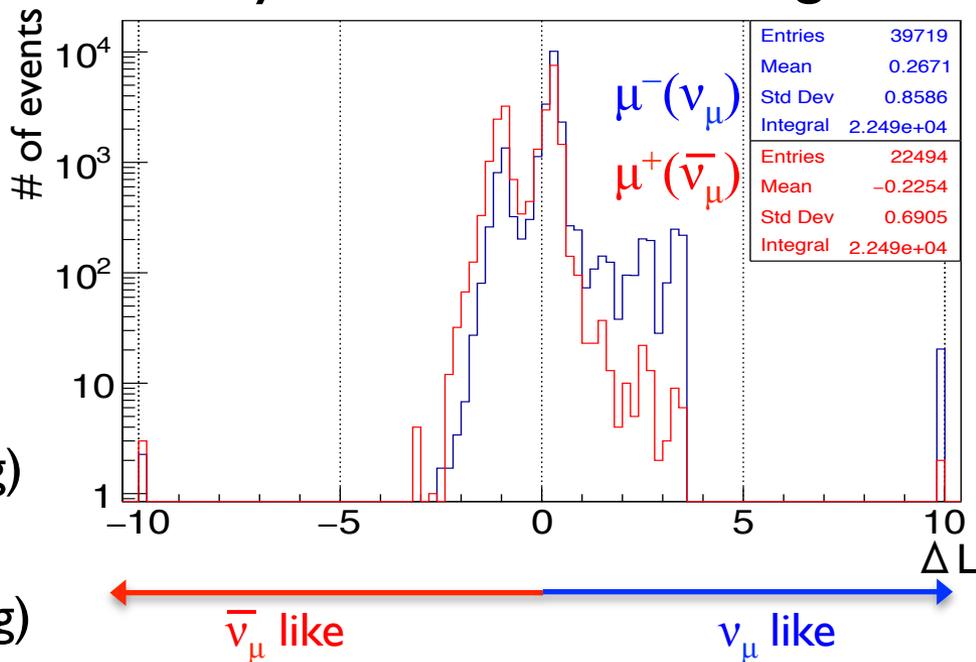
$$P^{\mu^+} = P^{\mu^+}(\text{decay time}) \times P^{\mu^+}(\text{N50}) \times P^{\mu^+}(\text{N tag})$$

$$\Delta L = \log P^{\mu^-} - \log P^{\mu^+}$$

※ $P^{\mu^+} = 0$ なら $\Delta L = 10$ 、 $P^{\mu^-} = 0$ なら $\Delta L = -10$ 、
 両方とも0ならそのイベントは使用しない
 とする

of $\nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \bar{\nu}_\mu / \# \text{ of } \nu_\mu)$

Decay time \times N50 \times N tag



ν_μ efficiency = 0.800 ± 0.003
 purity = 0.592 ± 0.003
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.448 ± 0.003
 purity = 0.692 ± 0.004

縦軸: log scale

まとめ

- 物質効果を受けたニュートリノ振動の遷移確率の差を調べるために、Super-Kamiokandeのデータにおいて μ^- / μ^+ 識別をすることによって $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 識別する方法の開発をおこなっている
- 宇宙線ストップミュオンを用いて、位置情報から崩壊電子イベントを同定する手法を確立した
- 崩壊電子の情報を用いて崩壊時間、エネルギー(N50)、さらに中性子数の分布を加え、likelihoodによって $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 識別をした
- 今後、この手法を大気ニュートリノ振動解析に適用する



Back Up

ニュートリノ振動

遷移確率(真空中)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2\theta_{23}\sin^2 2\theta_{13}\sin^2 \left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2[\text{eV}^2]L[\text{km}]}{E_\nu[\text{GeV}]} \right)$$

物質中では...

$$\sin^2 2\theta_{13}^m = \frac{\sin^2 2\theta_{13}}{\underbrace{(A/\Delta m_{32}^2 - \cos 2\theta_{13})^2 + \sin^2 2\theta_{13}}}$$

Normal Hierarchy : +

Inverted Hierarchy : -

ここで、 $A = 2\sqrt{2}G_F N_e E_\nu$

G_F : フェルミ定数

N_e : 物質中の電子数密度

$\nu_e / \bar{\nu}_e$ 識別 (multi-GeV electron-like events)

✧ 1 リングなら

ミューオン崩壊により遅れた信号の数 N_{dcy}

$N_{\text{dcy}} > 0 \Rightarrow \nu_e$ like

$N_{\text{dcy}} = 0 \Rightarrow \bar{\nu}_e$ like

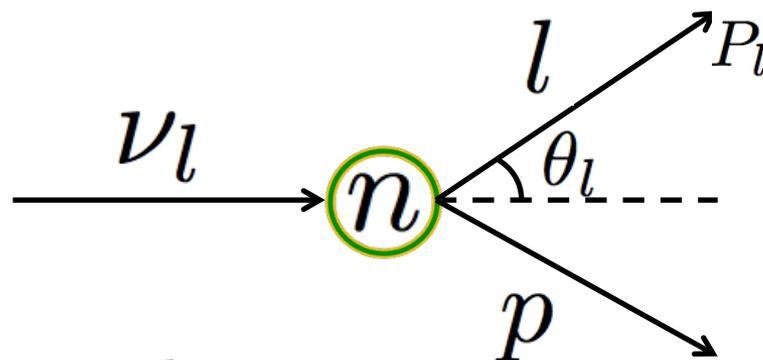
✧ 複数リングなら

- ・ 崩壊電子イベントの数
- ・ チェレンコフリングの数
- ・ 再構成された横成分の運動量

を用いて log likelihood を計算

※これらの方法は $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 識別においては不十分のため、使われていない

荷電カレント準弾性散乱(CCQE)



$$\nu_l + n \longrightarrow l + p$$

終状態の荷電レプトン(l)の運動量と方向から、ニュートリノのエネルギーを再構成することができる

$$E_\nu^{rec} = \frac{m_n E_l - m_l^2/2}{m_n - E_l + P_l \cos\theta_l}$$

Basic event selection

宇宙線 ミュオン

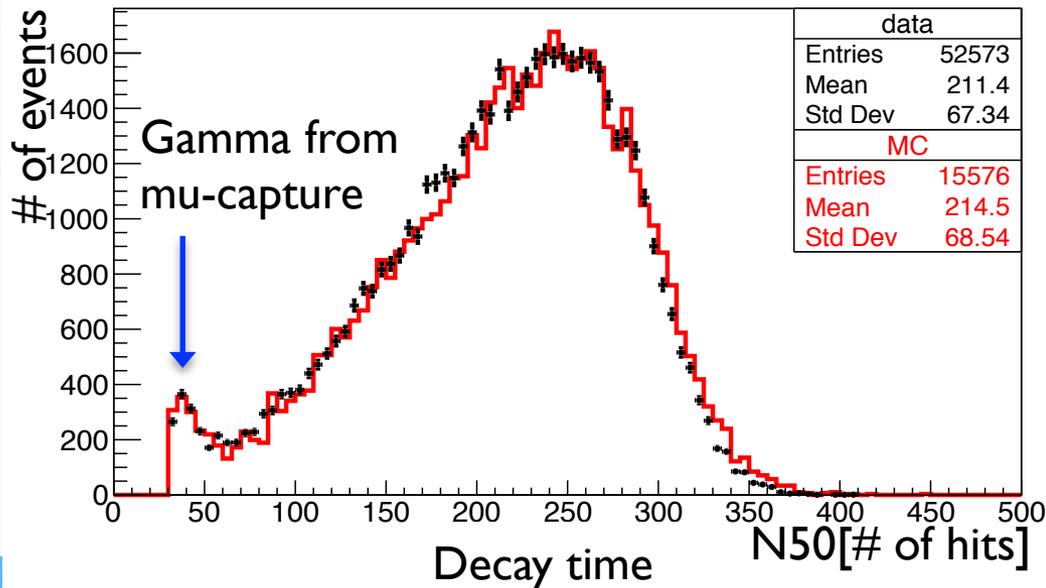
- μ 崩壊時間 > 1.2 [micro sec]
- μ 総電荷 > 1000 [p.e.]
- $1.5 < \mu$ 運動量 / μ 飛程 < 3.5 [MeV/c/cm]
- 鉛直下向き μ
- μ fitの良さ > 0.5 (Max : 1)
- 崩壊電子の数 = 1
- 崩壊電子の種類 = sub event
- e fit (Bonsai) の良さ > 0.5 (Max : 1)
- 壁際イベント除去

大気 ニュートリノ

- μ 崩壊時間 > 1.2 [micro sec]
- μ 総電荷 > 1000 [p.e.]
- 壁からの μ の距離 ≥ 200 [cm]
- μ または e like のタイプ = μ
- 崩壊電子の数 = 1
- 崩壊電子の種類 = sub event
- e fit (Kai) の良さ > 0.5 (Max : 1)
- visible energy > 30 [MeV]
- 外側のタンクでのヒット数 ≤ 15 [hits]
- リングの数 = 1
- 家電カレント準弾性散乱イベント選択
- 壁際イベント除去

MCでのInput parameter分布(宇宙線 μ)

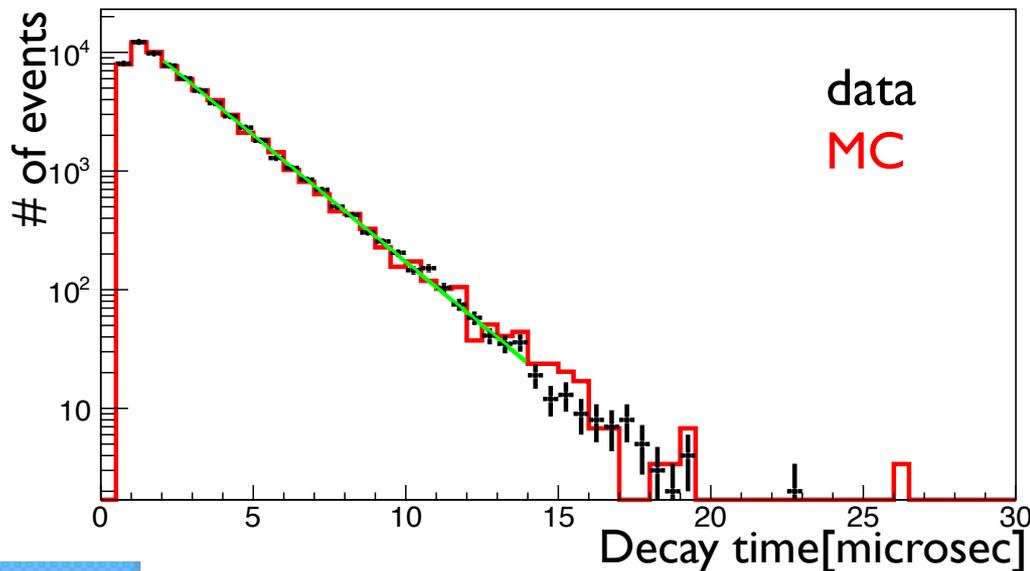
N50



MC / data = 1.013
(Mean value)

MC/dataでよく
一致している

Fit range : 1.2~12[microsec]



data	
Entries	65716
Mean	2.781
Std Dev	2.062
χ^2 / ndf	28.76 / 20
p0	$2.283\text{e}+04 \pm 1.780\text{e}+02$
p1	2.057 ± 0.009

(data)

$$\tau = 2.057 \pm 0.009 \mu\text{s}$$

MC	
Entries	19368
Mean	2.781
Std Dev	2.059
χ^2 / ndf	99.98 / 20
p0	$2.309\text{e}+04 \pm 1.791\text{e}+02$
p1	2.042 ± 0.009

(MC)

$$\tau = 2.042 \pm 0.009 \mu\text{s}$$

μ^+ / μ^- 識別 likelihood 計算方法

Input parameterの分布をもとに、それぞれの値に対して
 $v_\mu \cdot \bar{v}_\mu$ である確率を計算

手順 分布がnormalizeされているので、
値の含まれるbinのイベント数=確率となる



MCにおいて
input parameter
分布(μ^+ と μ^- 別)
を作成

1イベントごと
にFake dataの値
を読み、その値
を含むbinをとる
確率を求める

他のparameter
に対しても同様に
確率を求めて
掛け合わせる

μ^- と μ^+ それぞれ
において求め、
logをとったもの
の差を調べる

$$P^{\mu^-} = P^{\mu^-}(\text{decay time}) \times P^{\mu^-}(\text{N50}) \times P^{\mu^-}(\text{neutron tagging})$$

$$P^{\mu^+} = P^{\mu^+}(\text{decay time}) \times P^{\mu^+}(\text{N50}) \times P^{\mu^+}(\text{neutron tagging})$$

$$\Delta L = \log P^{\mu^-} - \log P^{\mu^+}$$

$$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(v_\mu)\text{like}$$

$$\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{v}_\mu)\text{like}$$

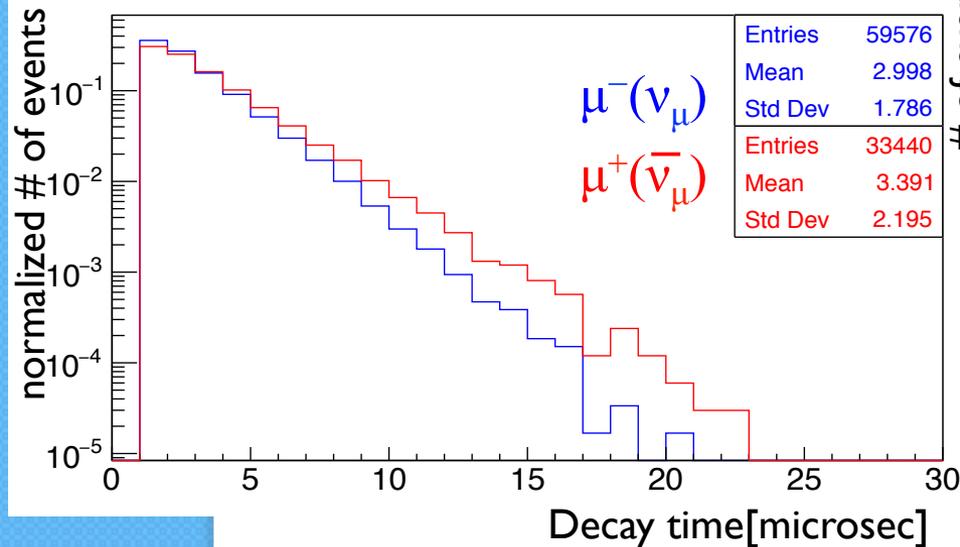
※もし $P^{\mu^+} = 0$ なら $\Delta L = 10$ 、 $P^{\mu^-} = 0$ なら $\Delta L = -10$ 、
両方とも0ならそのイベントは使用しない とする

Decay time (大気 ν)

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

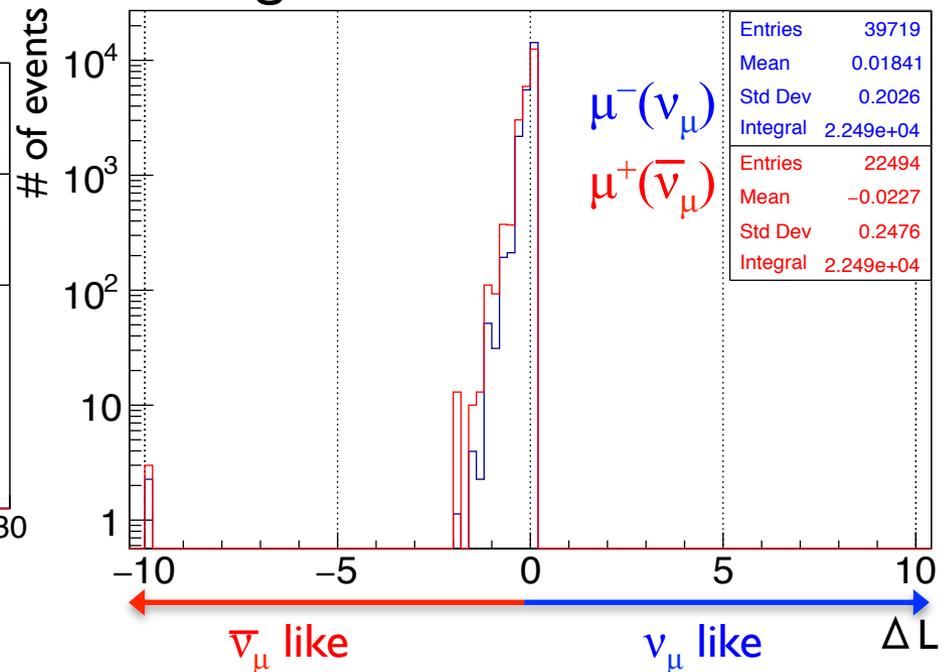
Input parameter

縦軸: log scale



$\Delta \log$ likelihood

縦軸: log scale



$$\nu_\mu \text{ efficiency} = 0.635 \pm 0.003$$

$$\text{purity} = 0.532 \pm 0.003$$

$$\bar{\nu}_\mu \text{ efficiency} = 0.443 \pm 0.003$$

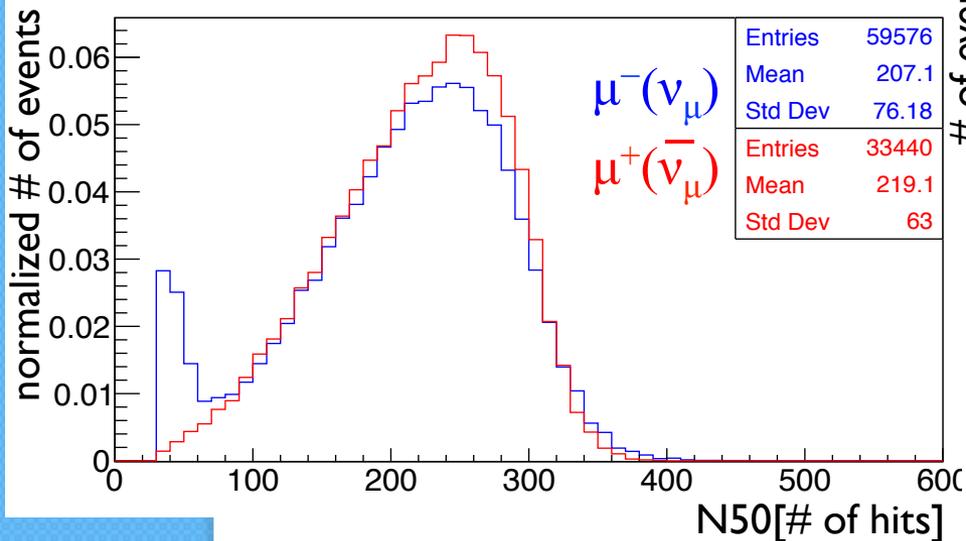
$$\text{purity} = 0.548 \pm 0.004$$

$$\# \text{ of } \nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \nu_\mu / \# \text{ of } \bar{\nu}_\mu)$$

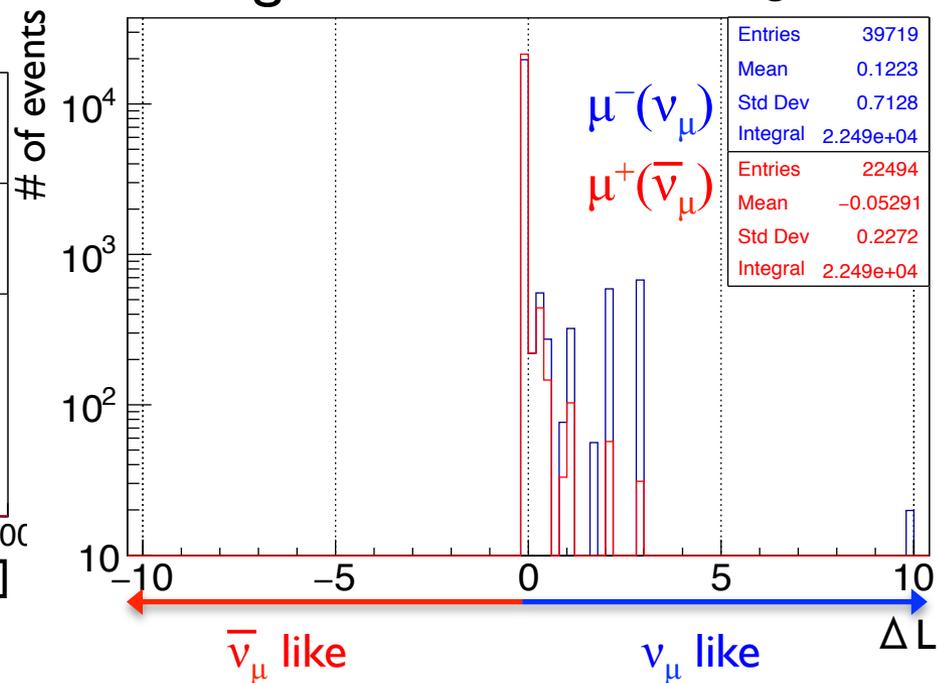
N50 (大気 ν)

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

Input parameter



$\Delta \log$ likelihood 縦軸: log scale



ν_μ efficiency = 0.124 ± 0.002

purity = 0.728 ± 0.007

$\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.954 ± 0.001

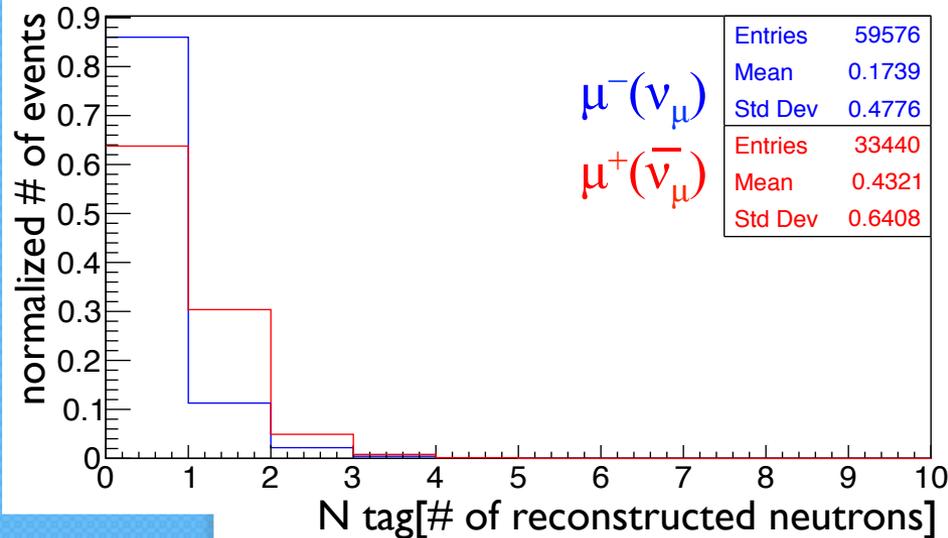
purity = 0.521 ± 0.003

of $\nu_\mu \Rightarrow \times$ (# of ν_μ / # of $\bar{\nu}_\mu$)

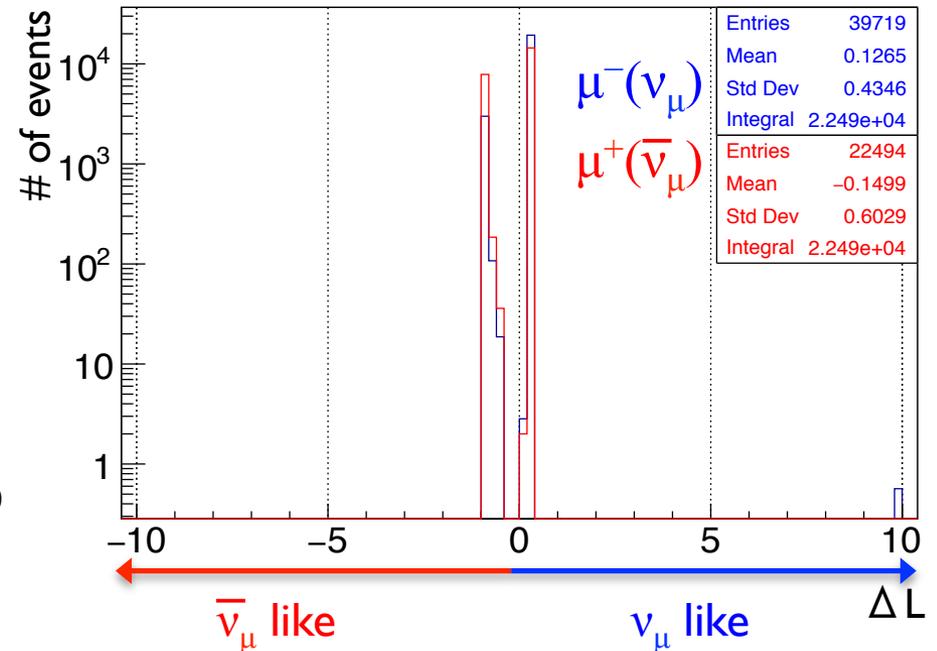
Neutron tagging (大気 ν)

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

Input parameter



$\Delta \log$ likelihood 縦軸: log scale



$$\nu_\mu \text{ efficiency} = 0.861 \pm 0.002$$

$$\text{purity} = 0.573 \pm 0.003$$

$$\bar{\nu}_\mu \text{ efficiency} = 0.358 \pm 0.003$$

$$\text{purity} = 0.721 \pm 0.004$$

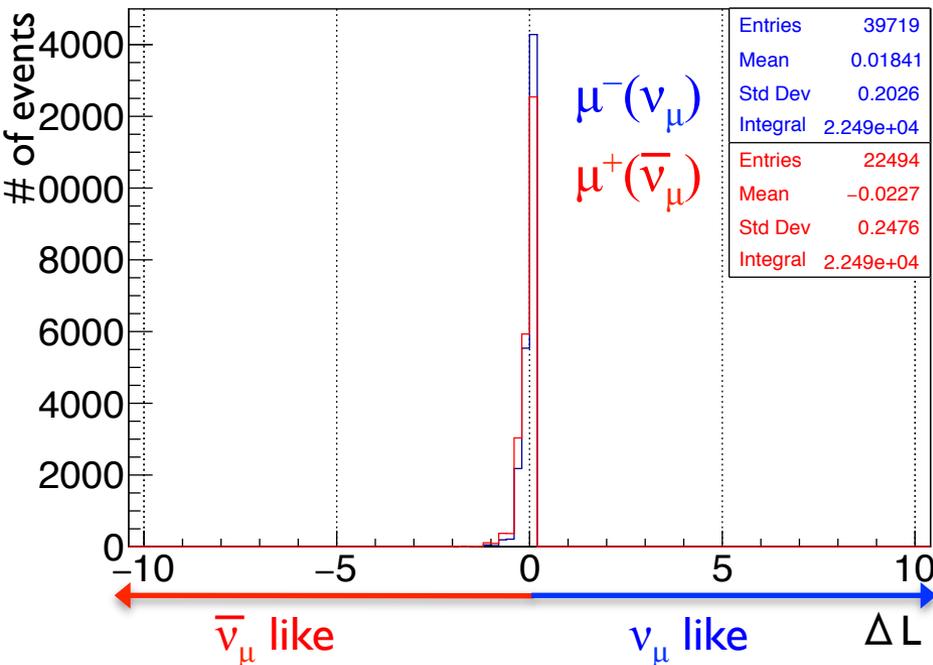
$$\# \text{ of } \nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \nu_\mu / \# \text{ of } \bar{\nu}_\mu)$$

log likelihood 差分布 (大気 ν) not log scale

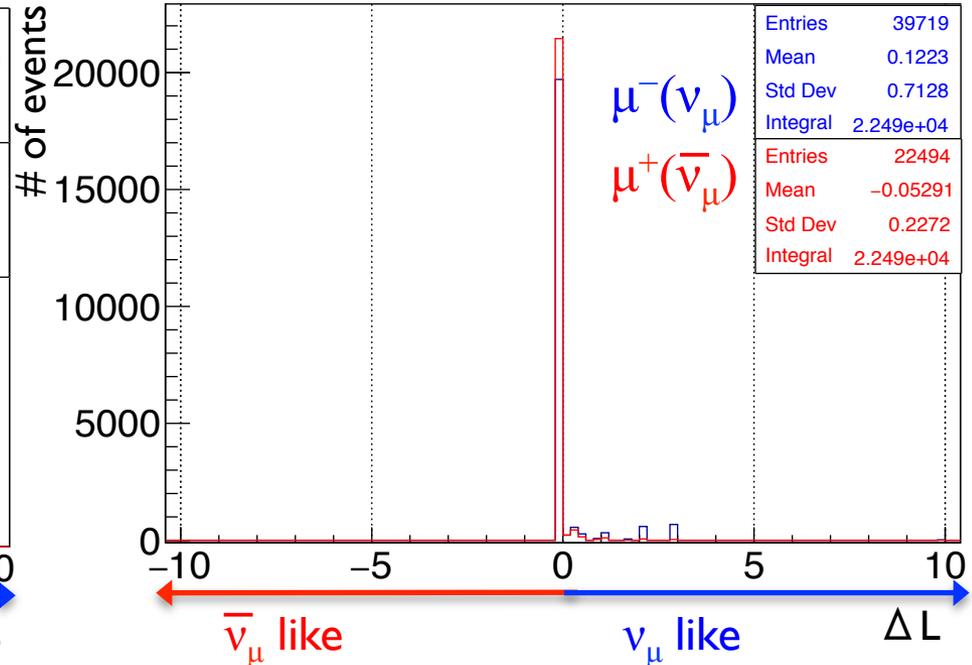
$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

Decay time

N50



ν_μ efficiency = 0.635 ± 0.003
 purity = 0.532 ± 0.003
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.443 ± 0.003
 purity = 0.548 ± 0.004



ν_μ efficiency = 0.124 ± 0.002
 purity = 0.728 ± 0.007
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.954 ± 0.001
 purity = 0.521 ± 0.003

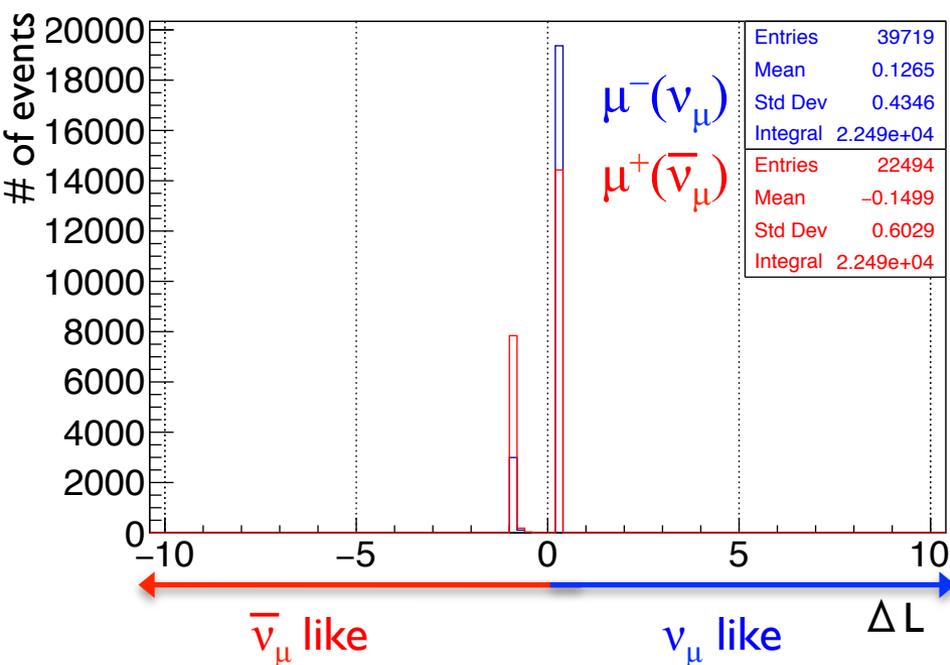
of $\nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \bar{\nu}_\mu / \# \text{ of } \nu_\mu)$

log likelihood差分布

(大気 ν) not log scale

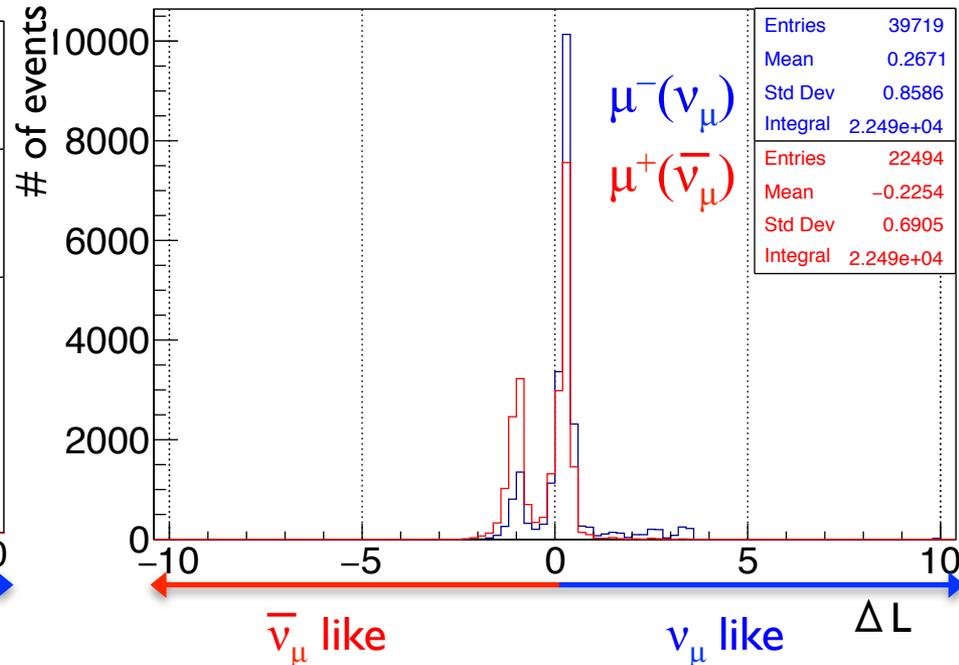
$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

Neutron tagging



ν_μ efficiency = 0.861 ± 0.002
 purity = 0.573 ± 0.003
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.358 ± 0.003
 purity = 0.721 ± 0.004

Decay time \times N50 \times N tag



ν_μ efficiency = 0.800 ± 0.003
 purity = 0.592 ± 0.003
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.448 ± 0.003
 purity = 0.692 ± 0.004

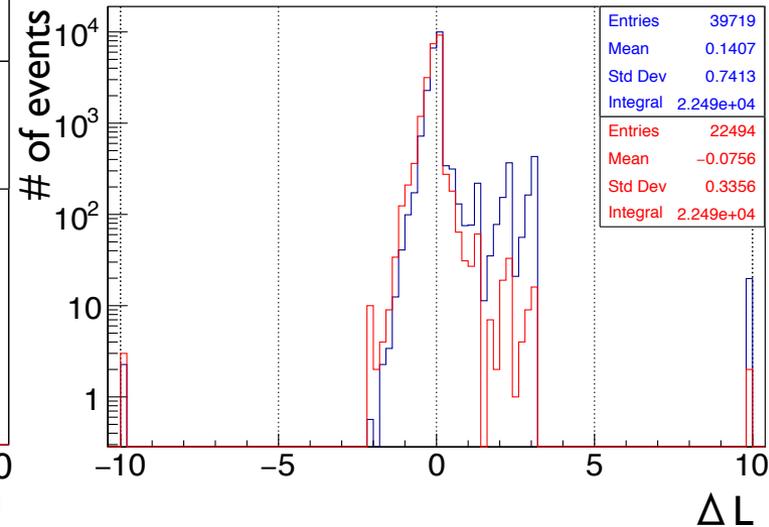
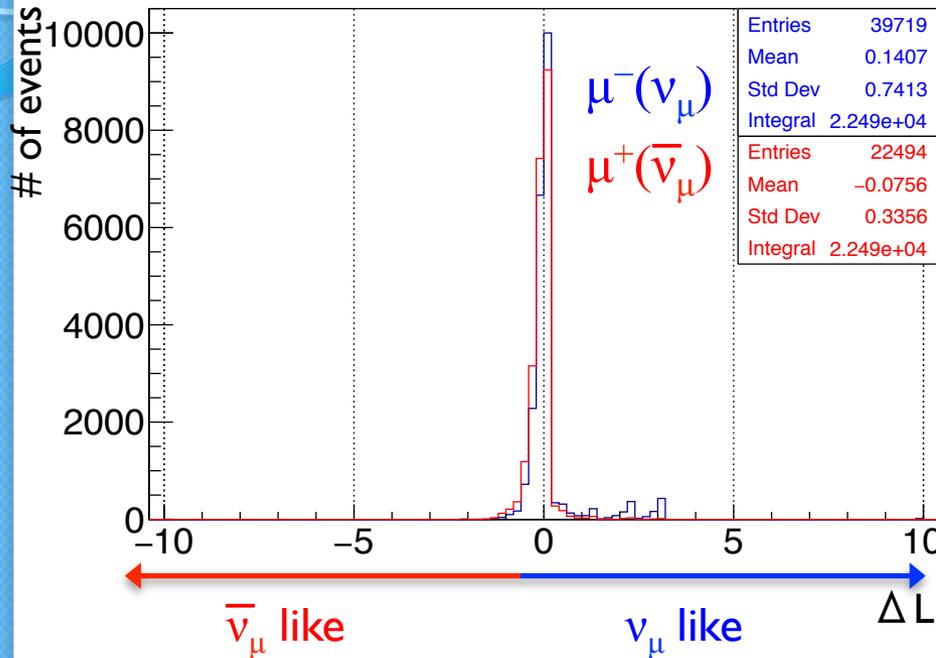
of $\nu_\mu \Rightarrow \times$ (# of $\bar{\nu}_\mu$ / # of ν_μ)

log likelihood差分布 (大気 ν)

Decay time \times N50

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$ like
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$ like

縦軸: log scale



ν_μ efficiency = 0.555 ± 0.003
 purity = 0.556 ± 0.003
 $\bar{\nu}_\mu$ efficiency = 0.557 ± 0.003
 purity = 0.556 ± 0.003

of $\nu_\mu \Rightarrow \times$ (# of $\bar{\nu}_\mu$ / # of ν_μ)