

2000. 5. 12 @ 宇宙線研

大気ニュートリノをもちいた

ステライルニュートリノへの

振動の可能性の解析

歳藤利行

(東大宇宙線研)

スーパーカミオカンデ共同実験

990日 大気ニュートリノデータ

大気ニュートリノの観測

上向き  $\nu_\mu$  の欠損を検出

天頂角分布の解析から

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m^2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 2\theta \sim 1 \end{array} \right.$$

•  $\nu_\tau$  の荷電カレント事象の同定が難しい

$$\frac{\nu_\tau \text{ の荷電カレント事象}}{\text{全事象}} < 1\%$$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  か  $\nu_\mu \rightarrow \nu_{\text{sterile}}$  か？

# 物質中の混合角

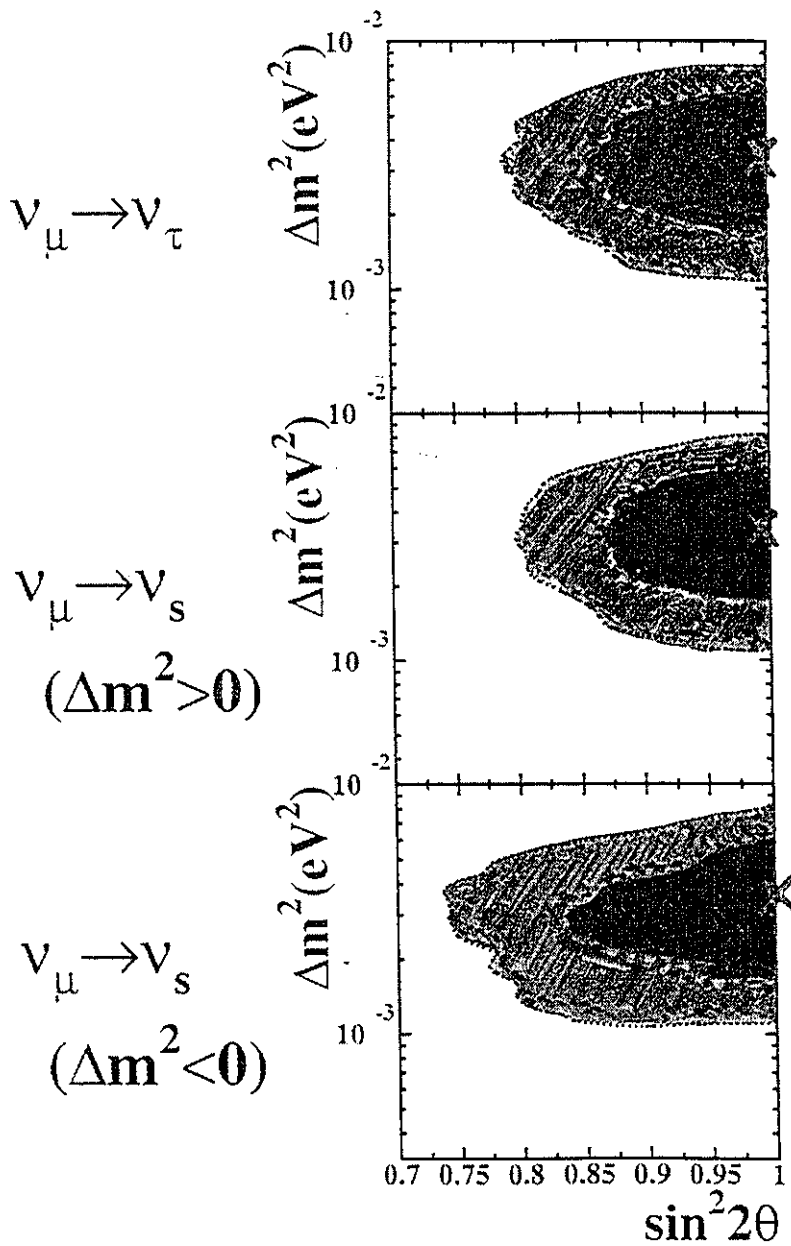
$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{\left(\frac{2V_{\mu s} E_\nu}{\Delta m^2} - \cos 2\theta\right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$V_{\mu s} = \mp 9.5 \times 10^{-5} \frac{\rho}{\rho_0} \left[ \frac{eV^2}{GeV} \right] \begin{pmatrix} - \text{for } \nu \\ + \text{for } \bar{\nu} \end{pmatrix}$$

$$\rho_0 = 5 \text{ g/cm}^3$$

地球:  $\rho = 2.7 \sim 12.5 \text{ g/cm}^3$

# Fully contained single ring 事象の 解析から得られた許容領域

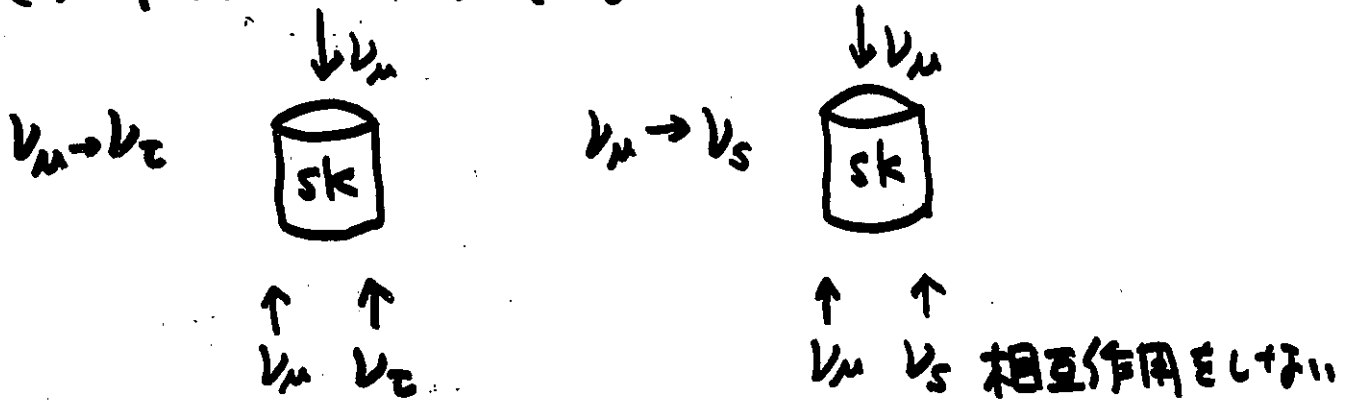


— 90% C.L.  
 = 99% C.L.

x best fit

$$\begin{cases}
 \Delta m^2 = 3.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\
 \sin^2 2\theta = 1
 \end{cases}$$

(1) 中性カレント事象 (NC)



上向き NC ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ) > 上向き NC ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\sigma$ )

(2) 地球による物質効果

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$   
物質効果なし

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\sigma$   
物質効果あり

振動が抑制される

$E_\nu \geq 20 \text{ GeV}$

上向き  $\nu_\mu$  ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ) < 上向き  $\nu_\mu$  ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\sigma$ )

# (1) 中性カレント事象

条件

1. Fully Contained multi-ring

2. 最も明るい  $\mu$  かつ  $e$ -like

3.  $E_{vis} > 400 \text{ MeV}$

$\Rightarrow 1375 \text{ eV}$

MC (no osc.)

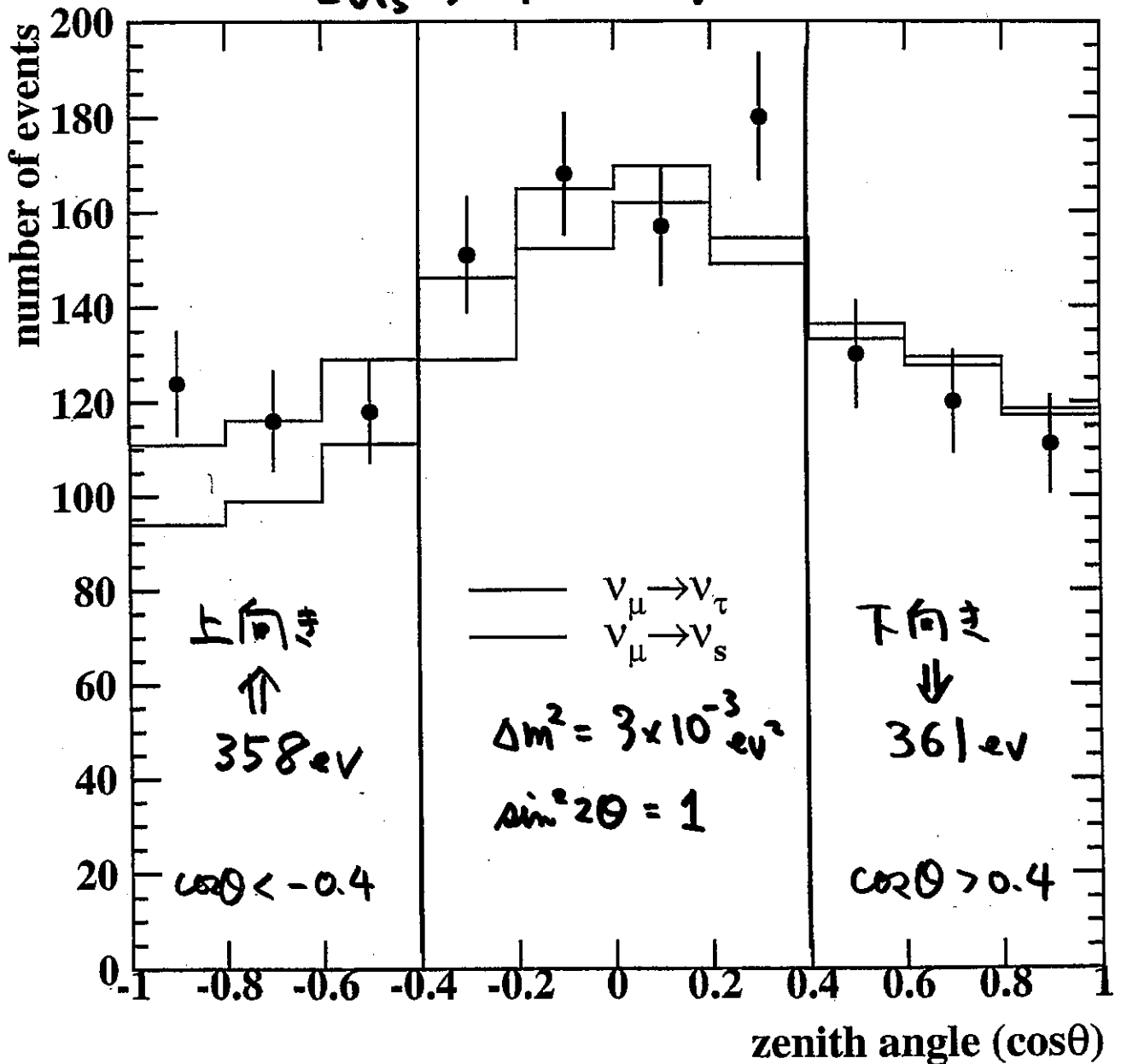
$\nu_e$  C.C. 44%

$\nu_\mu$  C.C. 27%

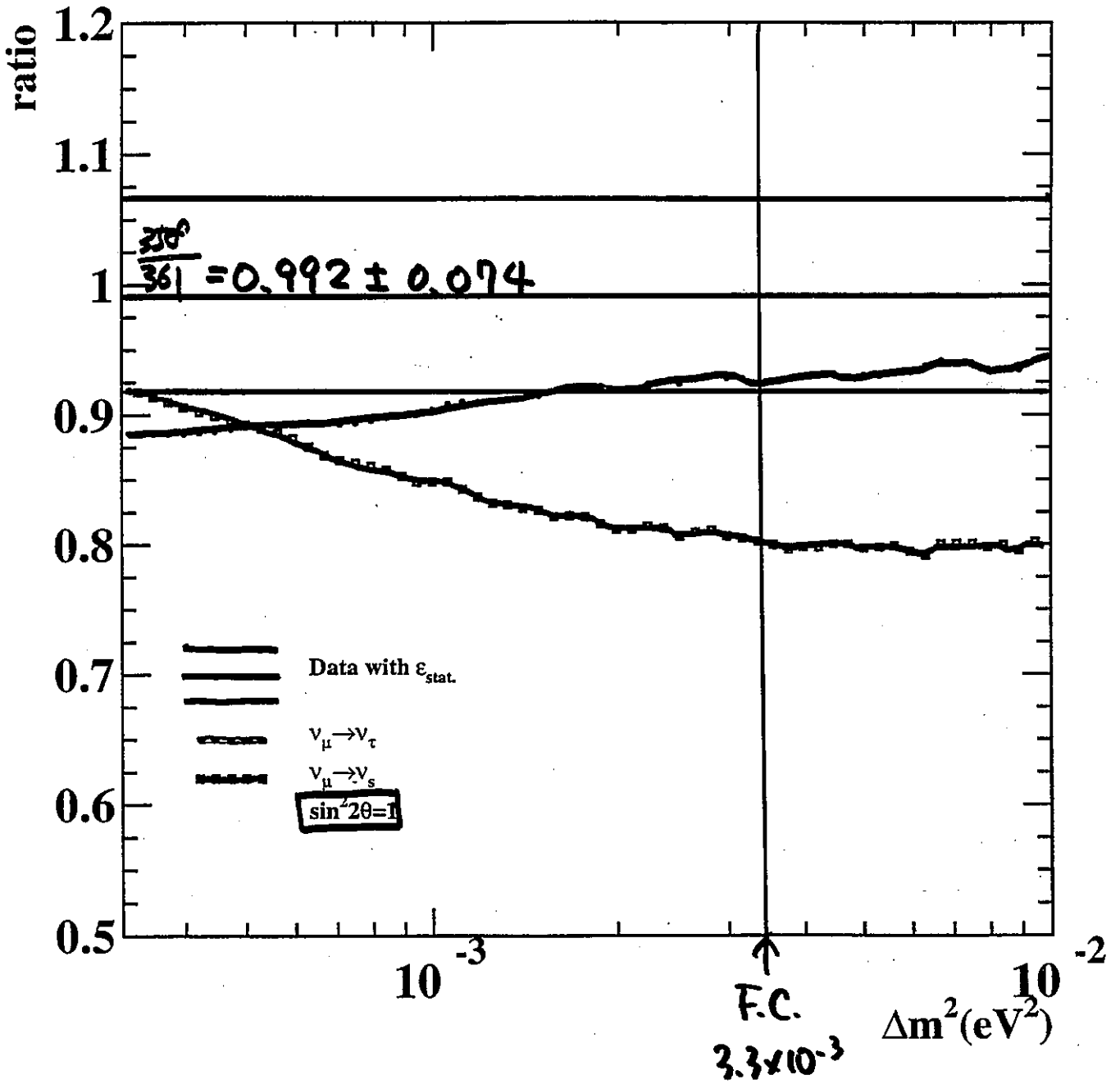
N.C. 29%

# Zenith angle 分布

- FC multi-ring
- e-like
- $E_{vis} > 400 \text{ MeV}$



up/down ratio of N.C. enriched multi-ring events





# hypothesis test

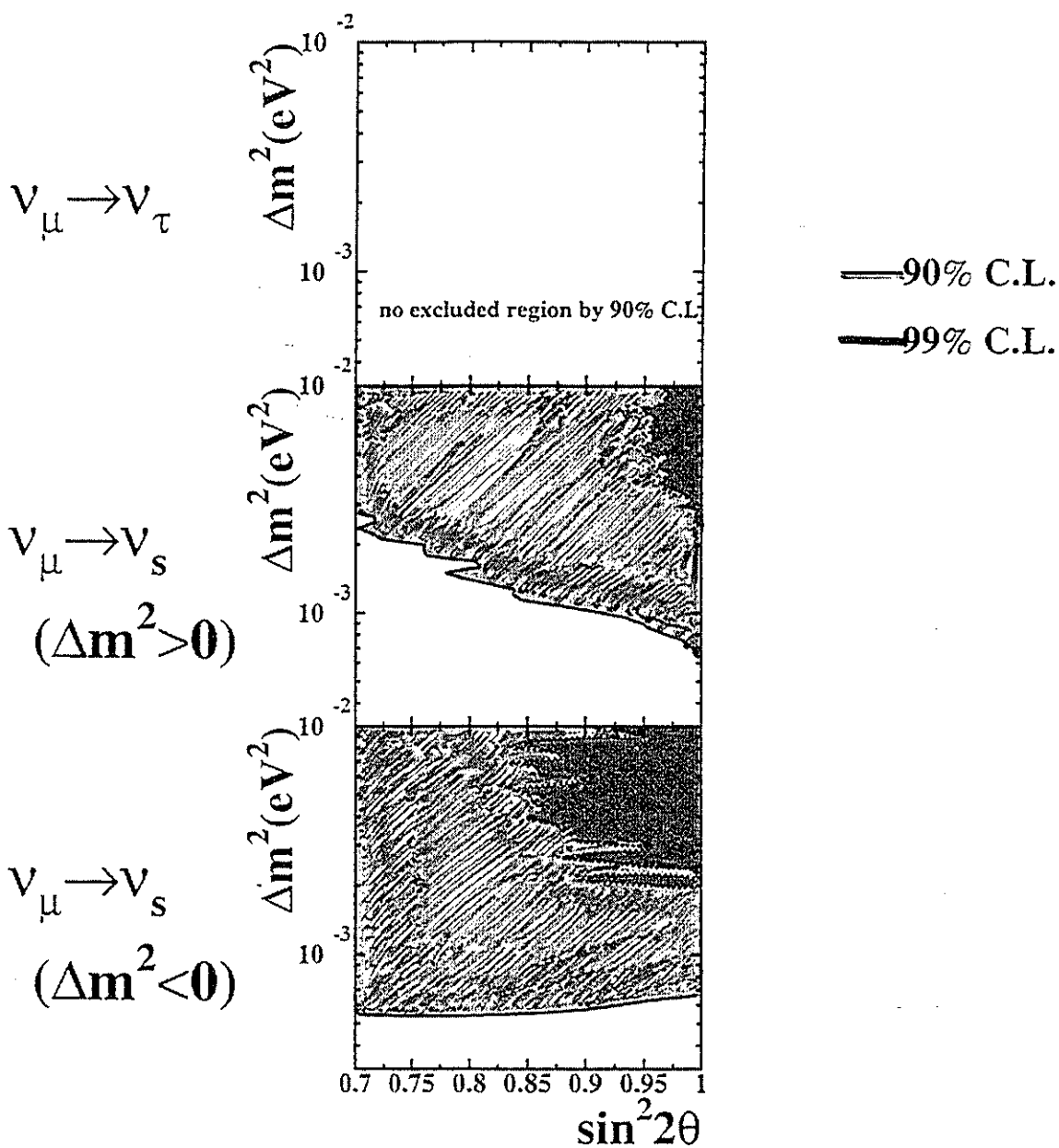
definition of the  $\chi^2$

$$\chi_{multi}^2 \equiv \frac{(N_{DATA}^{up} - \alpha N_{MC}^{up}(1 + \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2up}} + \frac{(N_{DATA}^{down} - \alpha N_{MC}^{down}(1 - \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2down}} + \frac{\epsilon^2}{\sigma_{sys}^2}$$

systematic errors for up/down ratio

	source	systematic error(%)
for DATA	B.G. contamination	$< \pm 0.3$
	energy scale	$\pm 0.4$
for MC	flux(Honda $\rightarrow$ Bartol)	$\pm 0.8$
	'Mt Ikenoyama' effect	$\pm 2.6$
	$E^{-\gamma}$	$< \pm 0.1$
	$\nu$ interaction	0.9

excluded region from multi-ring



(2) 地球に宇宙物質が (k=1) 高エネルギー-PC

条件

1. Partially Contained

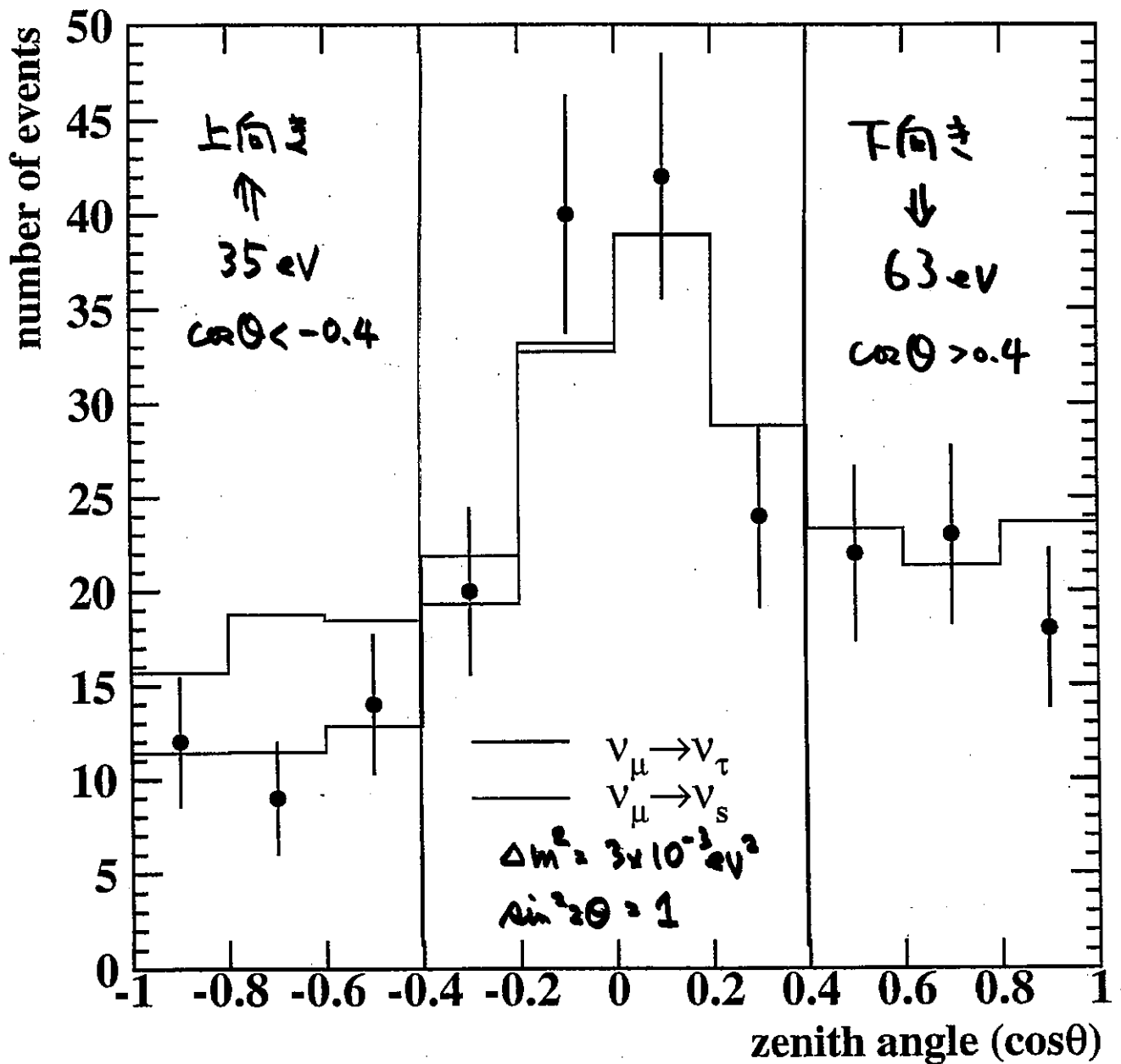
2.  $E_{vis} > 5 \text{ GeV}$

$\Rightarrow 224 \text{ eV}$

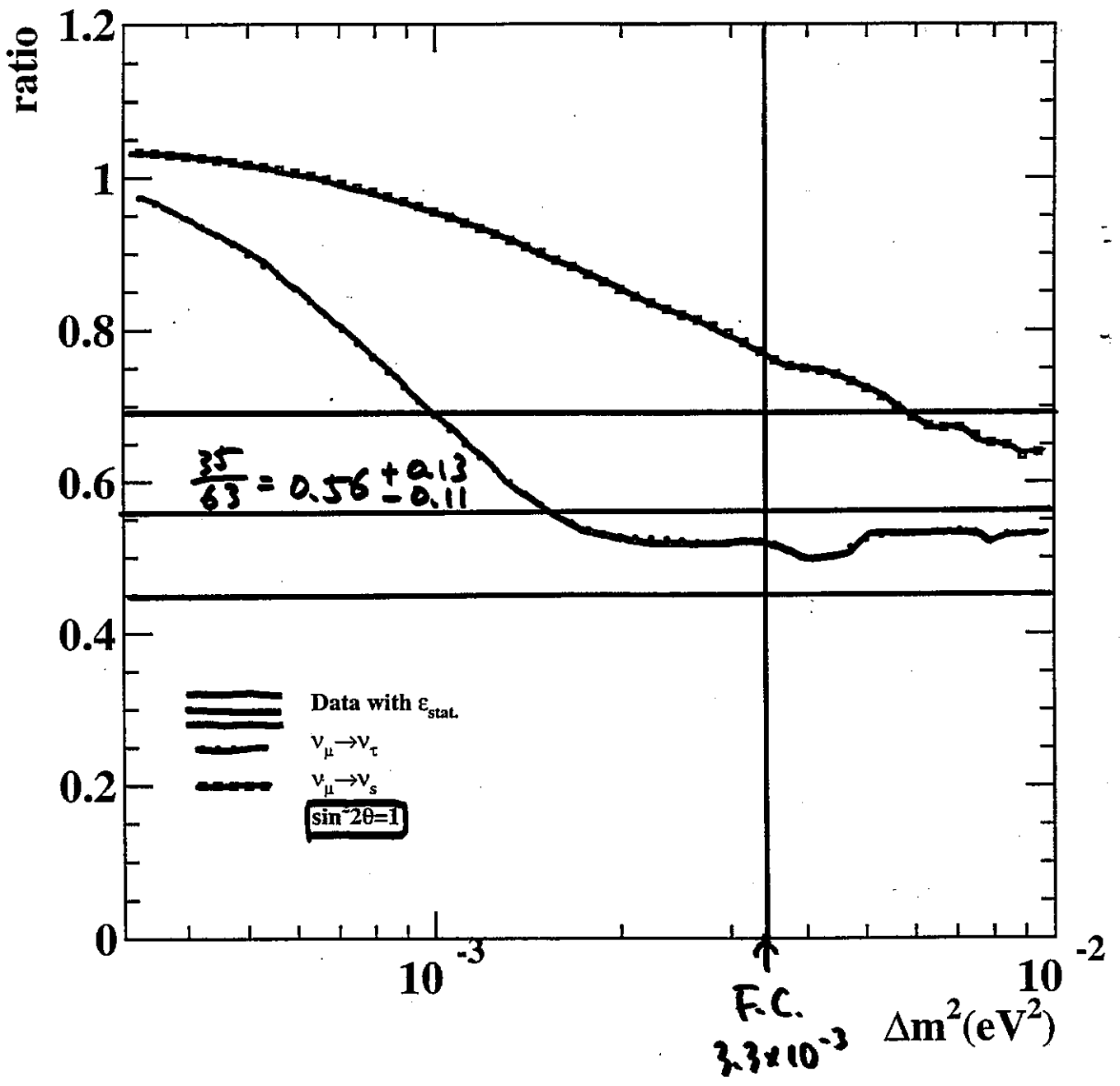
$\langle E_V \rangle \sim 25 \text{ GeV}$

# zenith angle 分布

- ( · ) PC
- ( · )  $E_{vis} > 5 \text{ GeV}$



up/down ratio of high E ( $E_{\text{vis}} > 5\text{GeV}$ ) PC events



# hypothesis test

definition of the  $\chi^2$

$$\chi_{PC}^2 \equiv \frac{(N_{DATA}^{up} - \alpha N_{MC}^{up} (1 + \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2up}} + \frac{(N_{DATA}^{down} - \alpha N_{MC}^{down} (1 - \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2down}} + \frac{\epsilon^2}{\sigma_{sys}^2}$$

systematic errors for up/down ratio

	source	systematic error(%)
for DATA	B.G. contamination	$\pm 2.0$
	energy scale	$\pm 0.9$
for MC	flux(Honda $\rightarrow$ Bartol)	$\ll \pm 0.1$
	'Mt Ikenoyama' effect	$\pm 3.4$
	$E^{-\gamma}$	$< 0.1$
	$\nu$ interaction	0.3

excluded region from PC

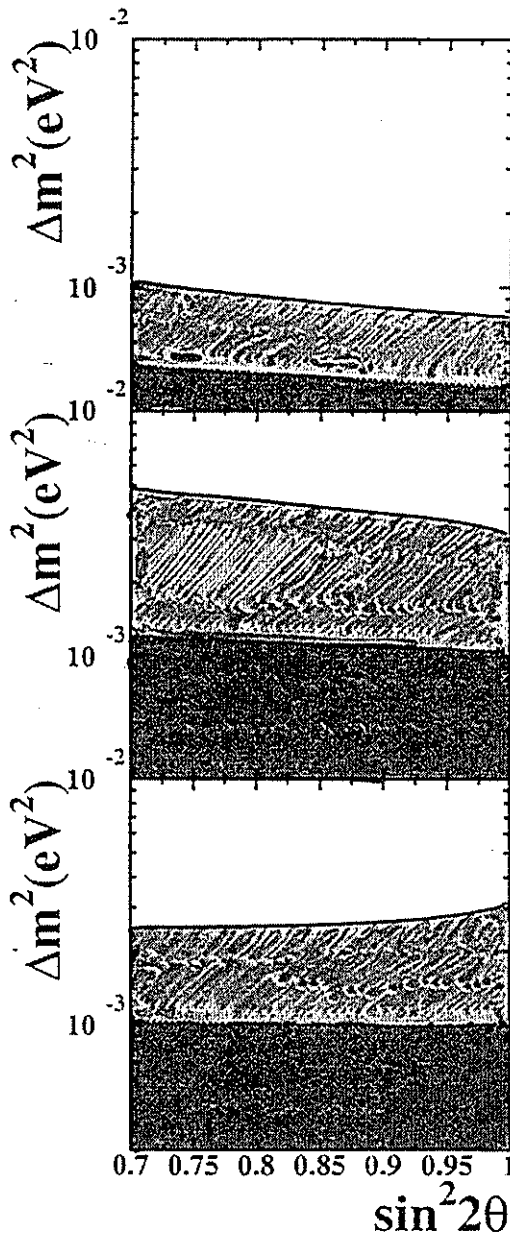
$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$$

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_s$$

$$(\Delta m^2 > 0)$$

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_s$$

$$(\Delta m^2 < 0)$$



— 90% C.L.

— 99% C.L.

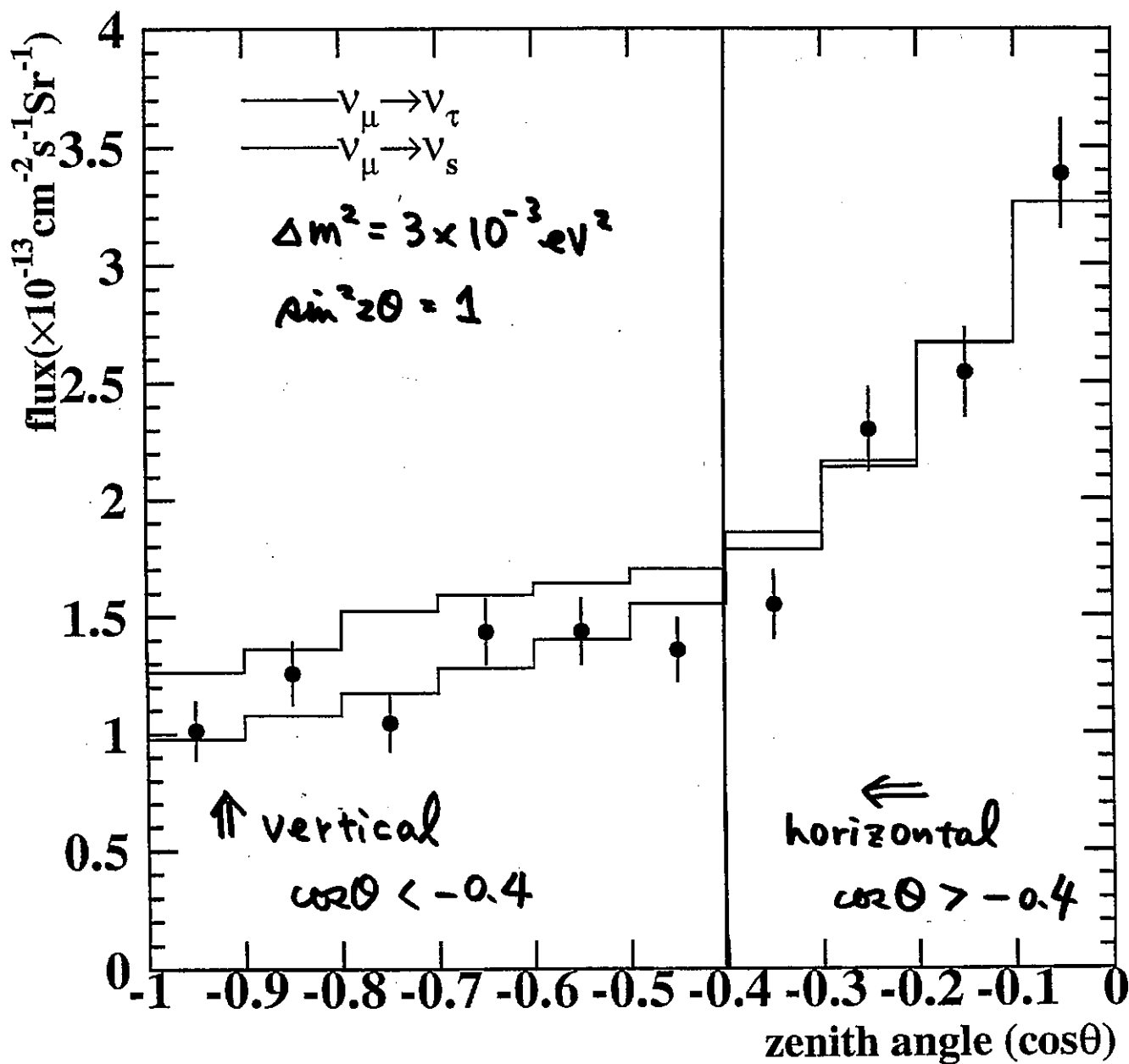
(2) 地球にニュートリノ衝突結果 (4a2) up-through  $\mu$

$$\sim 1190 \text{ eV}$$

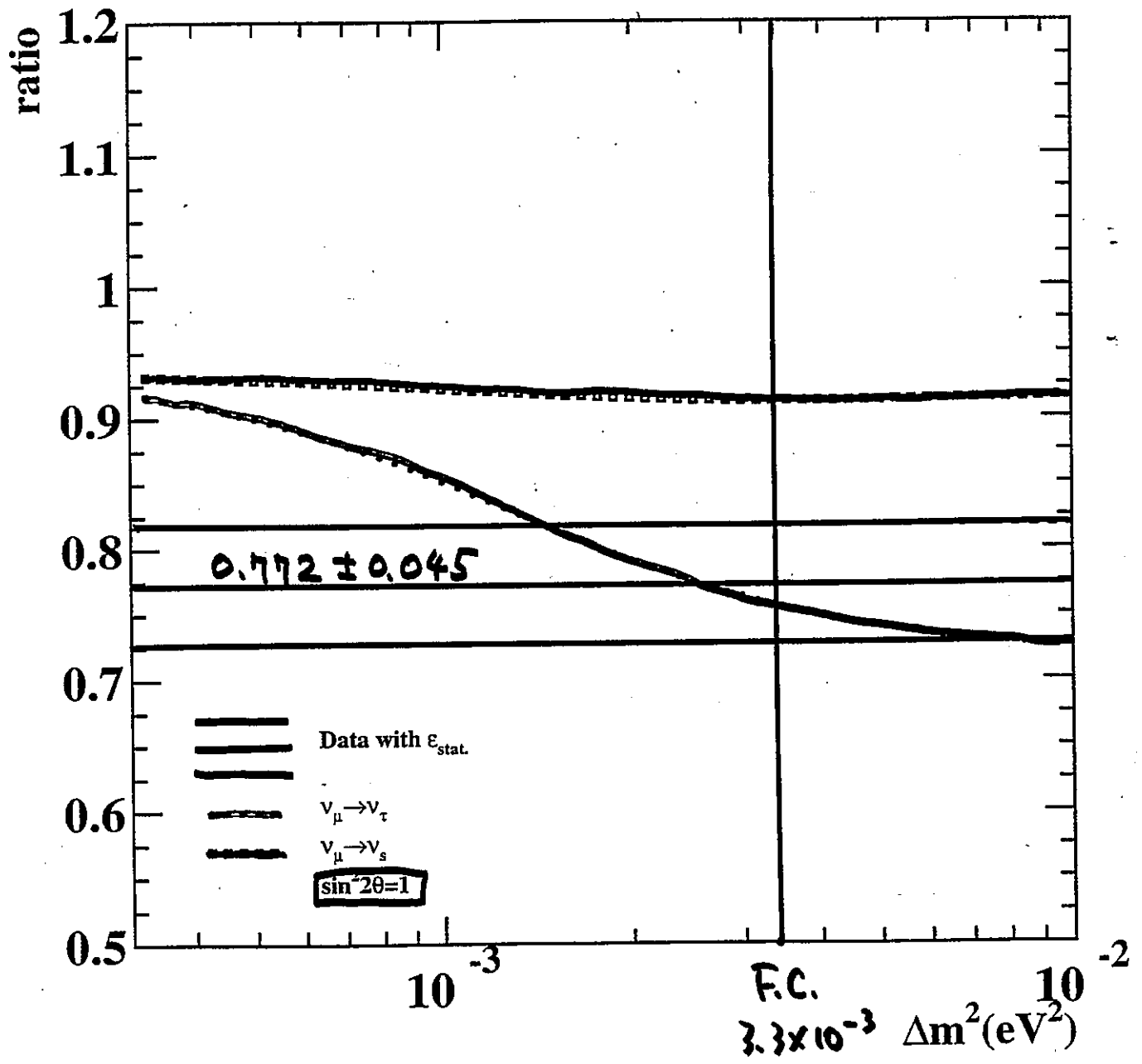
$$\langle E_\nu \rangle \sim 100 \text{ GeV}$$



# Zenith angle 分布 up through $\mu$



vertical/horizontal ratio of upward through going  $\mu$  events



# hypothesis test

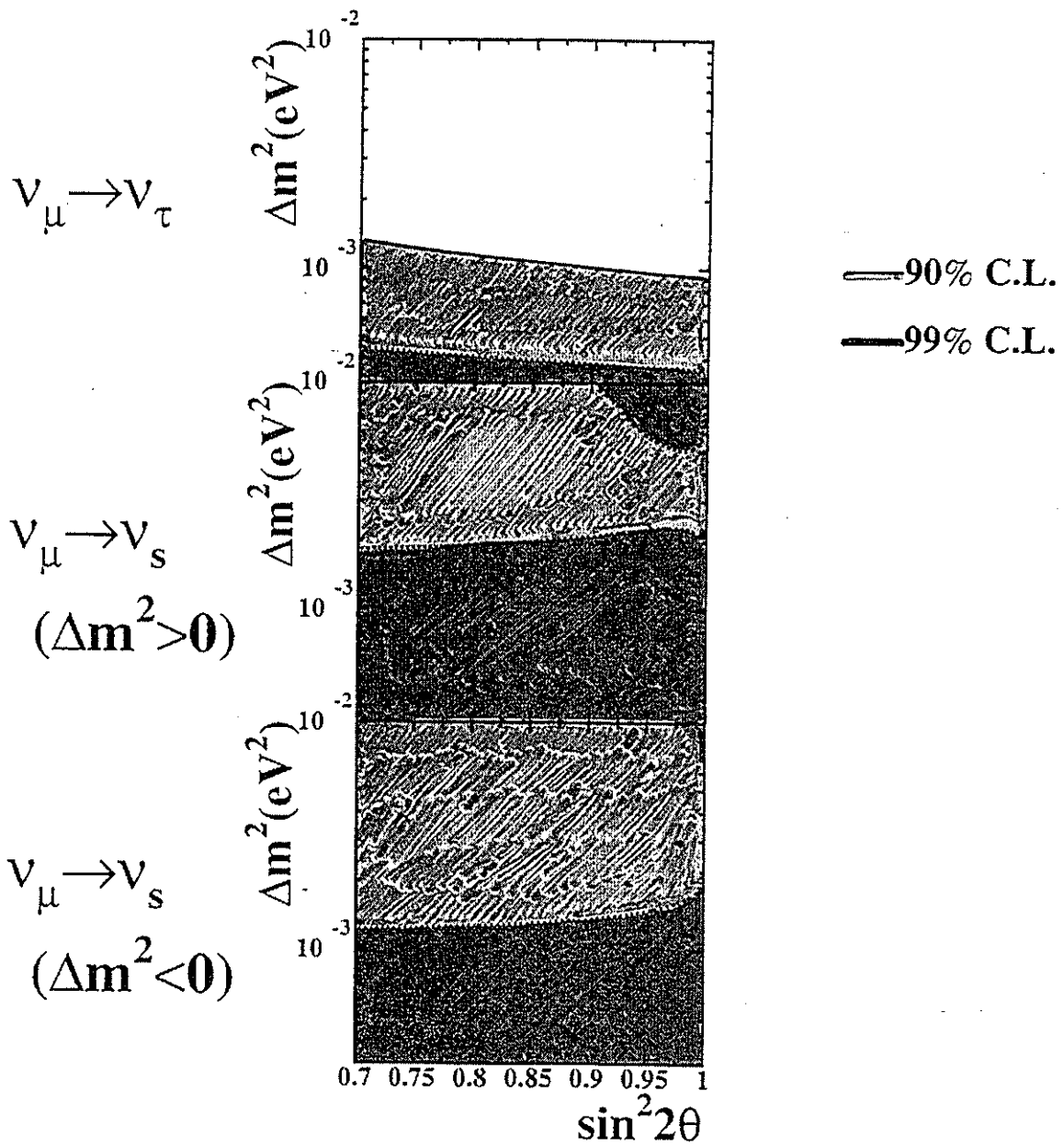
definition of the  $\chi^2$

$$\chi_{up\mu}^2 \equiv \frac{(\phi_{DATA}^{vertical} - \alpha \phi_{MC}^{vertical} (1 + \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2vertical}} + \frac{(\phi_{DATA}^{horizontal} - \alpha \phi_{MC}^{horizontal} (1 - \frac{\epsilon}{2}))^2}{\sigma_{stat}^{2horizontal}} + \frac{\epsilon^2}{\sigma_{sys}^2}$$

systematic errors for vertical/horizontal ratio

	source	systematic error(%)
for DATA	B.G. contamination	0.1
	detection efficiency	0.21
	reduction efficiency	0.92
for MC	$\pi/K$ ratio and the atmosphere model	3
	flux(Honda $\rightarrow$ Bartol)	0.5
	spectral index of primary cosmic ray	1.0

excluded region from upward through going  $\mu$



# Combined analysis

中性カレント事象

FC  
multi-ring

Up/Down

地球による物質効果

PC  
up the  $\mu$

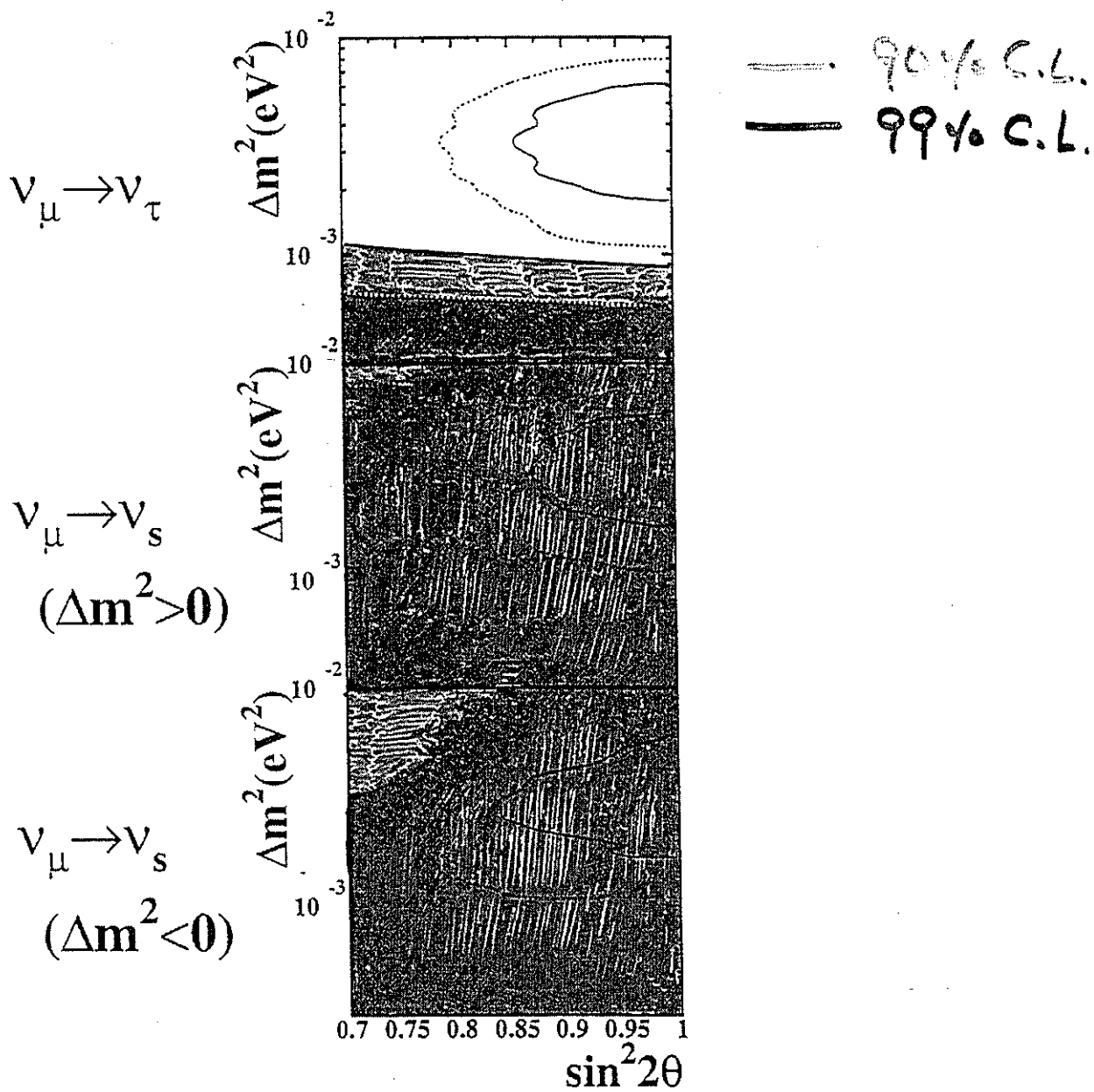
Up/Down  
~~Vertical~~  
horizontal

ratio を  $\bar{\nu}$ - $\nu$  と MC ( $\Delta m^2, \sin^2 2\theta$ ) で比較

$\chi^2$  検定を行った

排除した領域

preliminary!



まとめ

スーパーカミオカンデにおける

990日 大気ニュートリノデータの解析

- ・ 中性カレント事象
- ・ 地球による物質効果

を調べた

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  : consistent

$\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  : disfavored  $\sim 99\%$  C.L.

(preliminary!)