

ニュートリノ・ファクトリの の目指す物理

高エネルギー加速器研究機構
吉村浩司

01.11.09

ニュートリノ研究会

内容

- Ω ニュートリノ・ファクトリの概要
 - 歴史、原理等
- Ω ニュートリノ・ファクトリで可能な物理
 - パラメータの精密決定
 - $\text{Sin}^2\theta_{13}$, δm^2_{32} , δ
- Ω デザイン、R&D
- Ω 国際協力と最近の動向



ニュートリノ・ファクトリの概要

159

01.11.09

ニュートリノ研究会

ニュートリノ・ファクトリとは

- Ω リングに蓄積されたミュオンの崩壊から大強度のニュートリノビーム
 - $10^{20} \sim 10^{21}$ $\mu\text{s}/\text{year}/\text{straight section}$
 - 数GeV ~ 数10 GeV
 - バックグラウンド $\sim 10^{-4}$
- Ω ミュオンコライダのR&Dから派生
- Ω ニュートリノ振動の混合行列の精密決定、CP非保存の観測

νファクトリ計画

大強度陽子加速器1 4 MW

強磁場による二次粒子捕獲

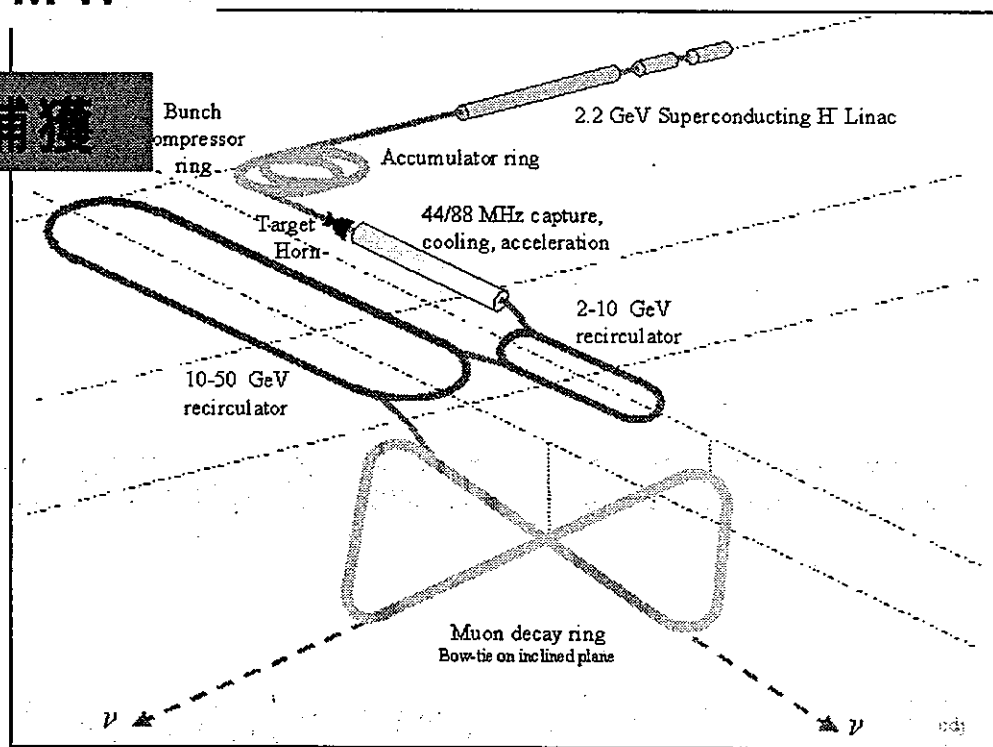
位相回転

ミューオン冷却

加速

蓄積リング

01.11.09



ニュートリノ研究会

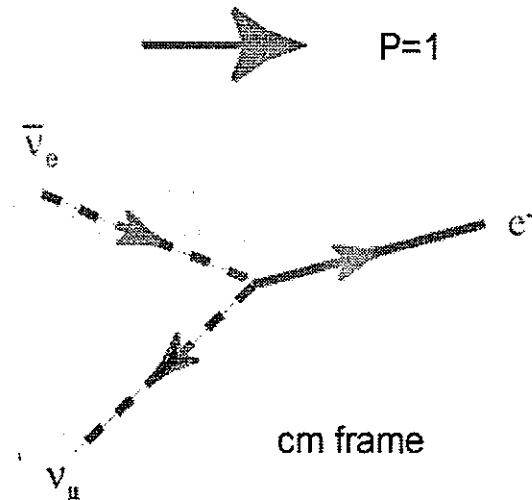
ミューオンの崩壊によるニュートリノの生成

$$\frac{dN(\nu_\mu)}{dx d \cos \theta_{CM}} = 2x^2 [(3-2x) \mp P_\mu (1-2x) \cos \theta_{CM}]$$

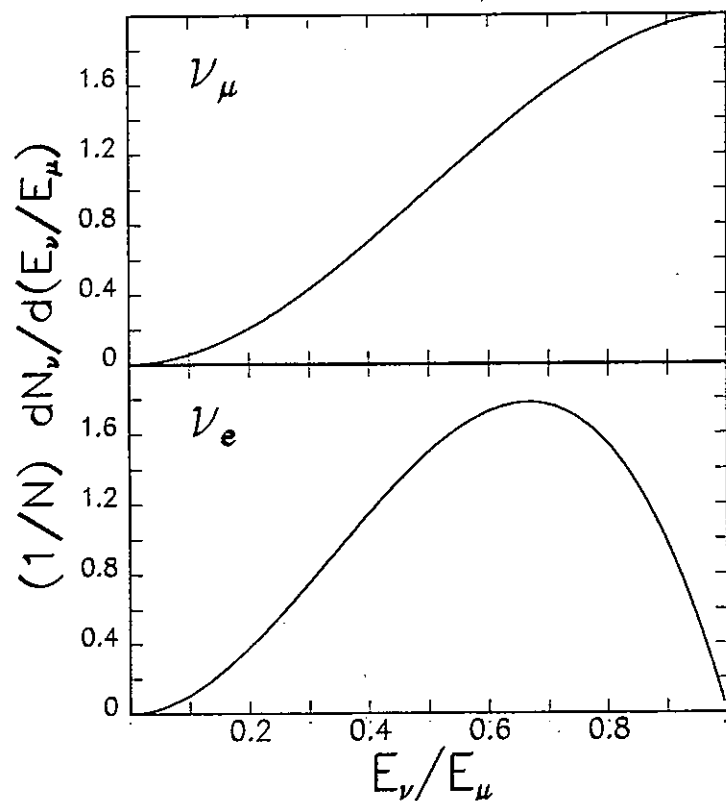
$$\frac{dN(\nu_e)}{dx d \cos \theta_{CM}} = 6x^2 [(1-x) \mp P_\mu (1-2x) \cos \theta_{CM}]$$

$$x = \frac{E_\nu}{E_{\max}}, \text{ where } E_{\max} = m_\mu / 2$$

唯一の崩壊モード



ν のエネルギースペクトル



$$\frac{d^2 N_{\nu_\mu, \nu_\mu}}{dy d\Omega} = \frac{4n_\mu}{\pi E^2 m_\mu^6} E_\mu^4 y^2 (1 - \beta \cos \varphi) \left[\{3m_\mu^2 - 4E_\mu^2 y (1 - \beta \cos \varphi)\} \right]$$

$$\propto P_\mu \{m_\mu^2 - 4E_\mu^2 y (1 - \beta \cos \varphi)\}$$

$$\frac{d^2 N_{\nu_e, \nu_e}}{dy d\Omega} = \frac{24n_\mu}{\pi E^2 m_\mu^6} E_\mu^4 y^2 (1 - \beta \cos \varphi) \left[\{m_\mu^2 - 2E_\mu^2 y (1 - \beta \cos \varphi)\} \right]$$

$$\propto P_\mu \{m_\mu^2 - 2E_\mu^2 y (1 - \beta \cos \varphi)\}$$

精密に予測可能

νビームの角度

Muon Storage Ring as a Neutrino Source

50 GeV Muons in many bunches

$1/\gamma$

Medium baseli

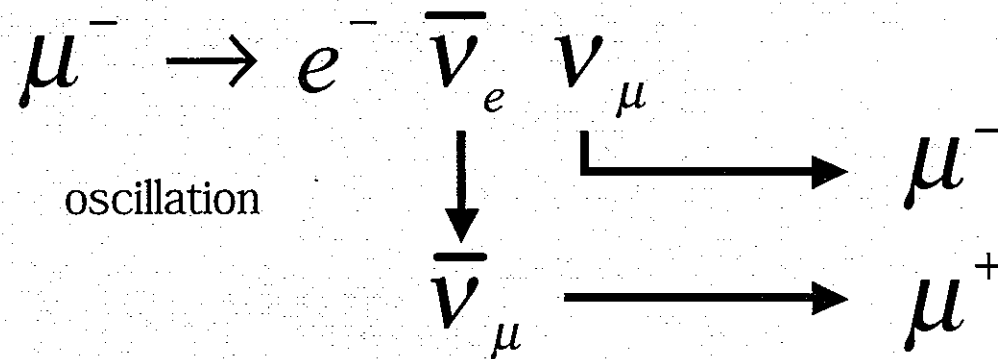
Parameters for the Muon Storage Ring

Cooling designed for inv. Emitt.	m*rad	0.0016
β in straight	m	160
typical decay angle of $\mu = 1/\gamma$	mrad	2.0
Beam angle $(\sqrt{\epsilon/\beta_0}) = (\sqrt{\epsilon}\gamma)$	mrad	0.2

01.11.09

ν ファクトリにおける ν 振動

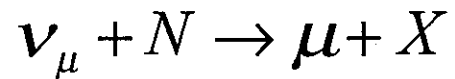
Ω ν 振動のシグナル



- 電荷が反対の事象を探す

ν の荷電反応断面積

② Deep inelastic

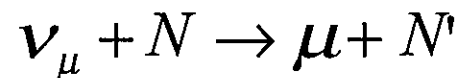


$$\sigma(\nu) \approx 0.67 \times 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_{\nu} (\text{GeV})$$

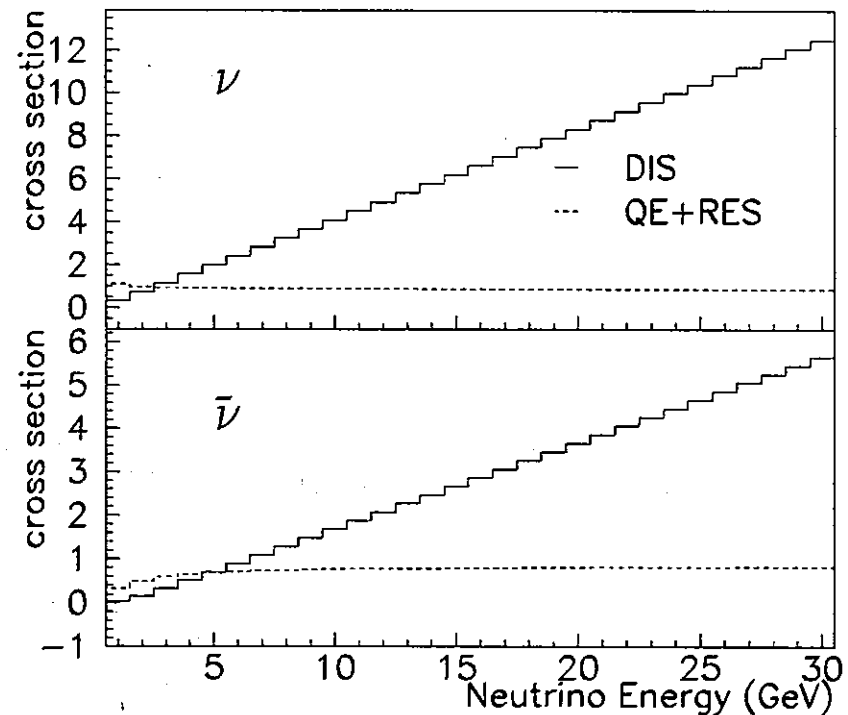
$$\sigma(\bar{\nu}) \approx 0.34 \times 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_{\nu} (\text{GeV})$$

$$\sigma(\bar{\nu}) / \sigma(\nu) \approx 0.5$$

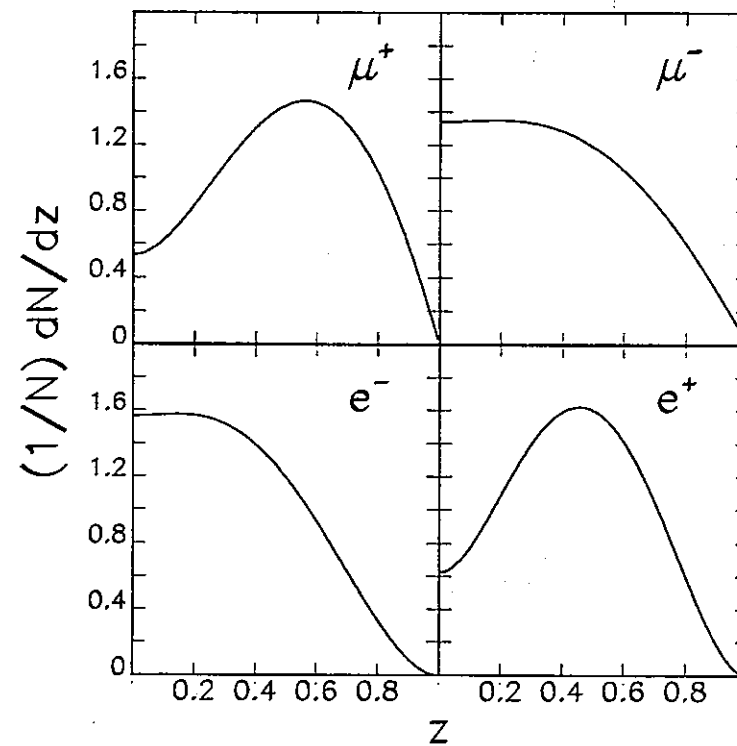
② Quasi elastic & Re



$$\sigma(\bar{\nu}) / \sigma(\nu) \approx 1$$



検出されるスペクトラム



01.11.09 低エネルギーの測定が重要

CCイベントレート

Ω Flux $\Phi_{\nu_\mu} = \gamma^2 \frac{n_\mu}{\pi L^2} \{2y^2(3-2y)\}$

$\Phi_{\nu_e} = \gamma^2 \frac{n_\mu}{\pi L^2} \{12y^2(1-y)\}$

$\propto (E_\mu / L)^2$

$\gamma = E_\mu / m_\mu, y = E_\nu / E_\mu$

Ω Event Rate

$N_\nu = \Phi \cdot \sigma \cdot M$

$\approx f \times \frac{n_\mu [10^{21}] E_\mu^3 [GeV] N_k [kt]}{L^2 [1000 km]} \propto E_\mu^3 / L^2$

01.11.09

$f = 8, 7, 4, 3.5$, for $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$

イベントレート

Event rates for a 10 kton detector

Mario Campanelli

		Rates		
		L=732 km	L=2900 km	L=7400 km
10^{21} decays	ν_μ CC	226000	14400	2270
	ν_μ NC	67300	4120	680
	$\bar{\nu}_e$ CC	87100	5330	875
	$\bar{\nu}_e$ NC	30200	1990	300
10^{21} decays	$\bar{\nu}_\mu$ CC	101000	6380	1000
	$\bar{\nu}_\mu$ NC	35300	2240	350
	ν_e CC	197000	12900	1980
	ν_e NC	57900	3670	580

No oscillations

$E_\nu = 30$ GeV

No polarization

No beam divergence

ニュートリノ研究会

01.11.09

ν ファクトリのための測定器

Ω 大きいこと

- 感度 \propto 測定器の質量 * ビーム強度

Ω 電荷の判別が可能であること

- 磁場が必要

Ω 低エネルギーにも感度がある

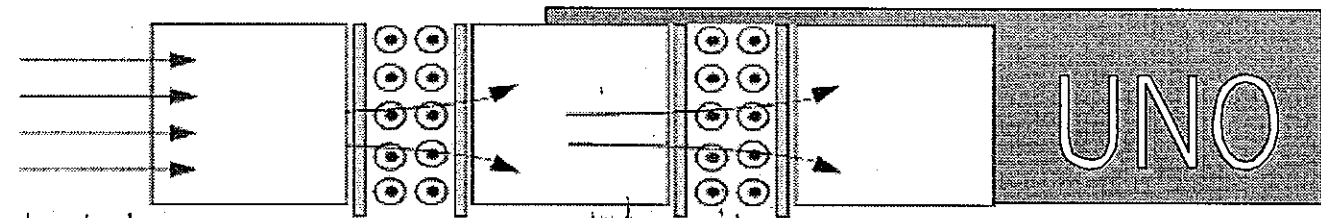
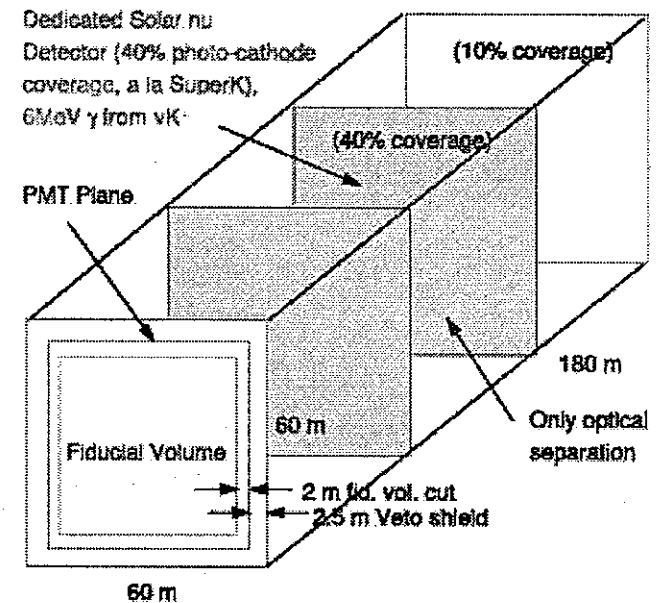
Ω バックグラウンドに強い

Ω 多目的

- 核子崩壊
- 大気, 太陽, Super Beam, Cosmic-ray ν

水チェレンコフ

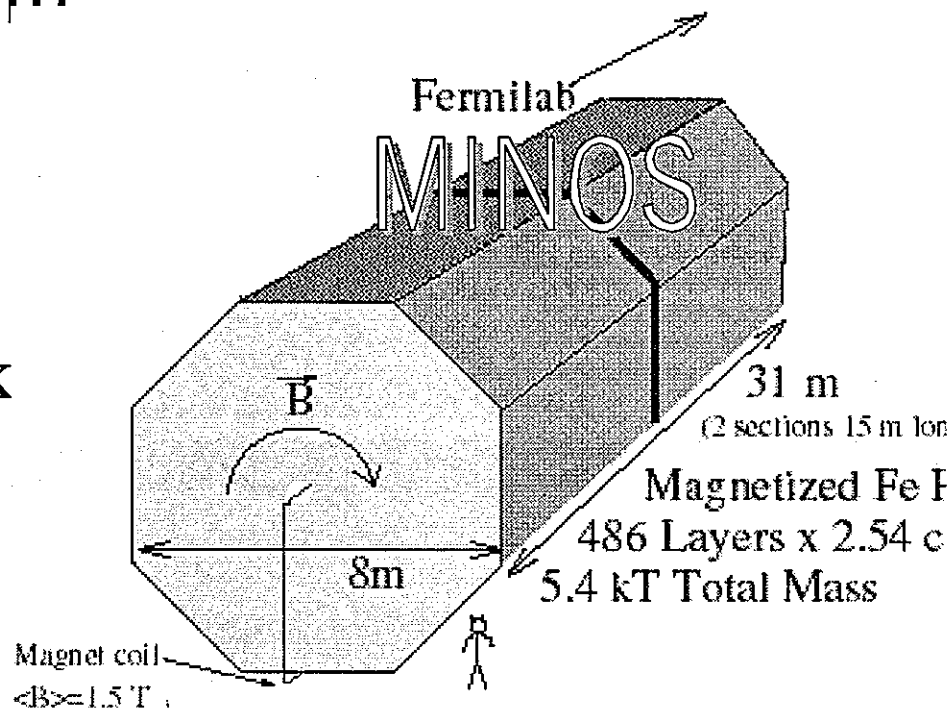
- Ω 大きい ~ 1000 kton
- Ω エネルギー分解能よい
- Ω 安価 1~2億円/kton
- Ω 磁場を作りにくい
 - 外部磁場 (UNO)
- Ω バックグラウンド
 - 波形解析によりさらに精度を上げることが可能



01.11.09

鉄シンチレータ

- Ω やや大きい ~50 kton
- Ω エネルギー分解能 \uparrow
 - 細かくセグメント化
 - チャンネル数の増大
- Ω 磁場かけやすい
- Ω コスト中 10億円/k

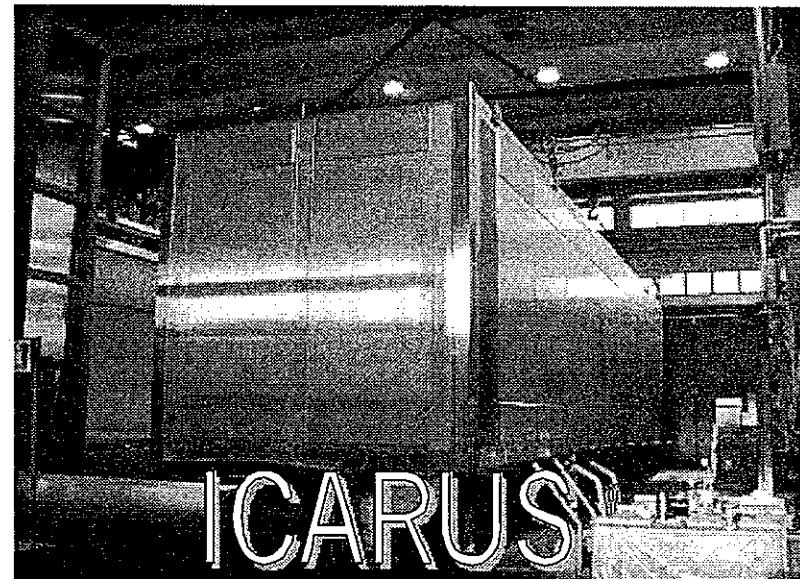


01.11.09

ニュートリノ研究会

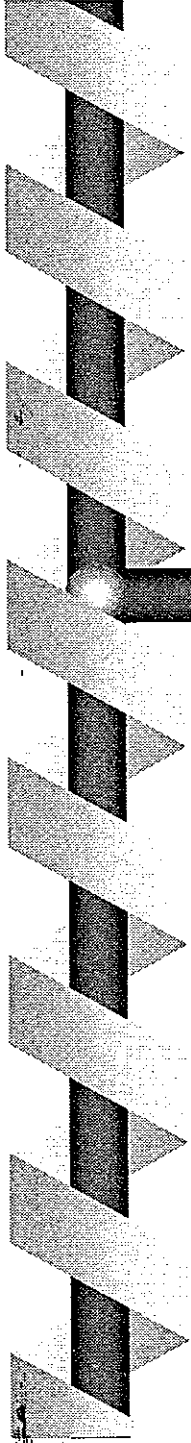
液体アルゴンTPC

- Ω 大きいものは困難
~10kton
- Ω 高い 30億円/kton
- Ω エネルギー分解能
- Ω 低スレシヨルド
- Ω 磁場OK
- Ω 電子のcharge ID!



01.11.09

ニュートリノ研究会



ν ファクトリにおける ν 振動の物 理

174

01.11.09

ニュートリノ研究会

ν 振動の現状

Ω Atmospheric neutrino

$$\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{atm}^2 \approx 3.5 \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} \approx (0.9 - 1.0)$$

Ω CHOOZ

$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$$

Ω Solar neutrino

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{solar}^2$$

large angle MSW solution
small angle MSW solution
vacuum oscillation solution

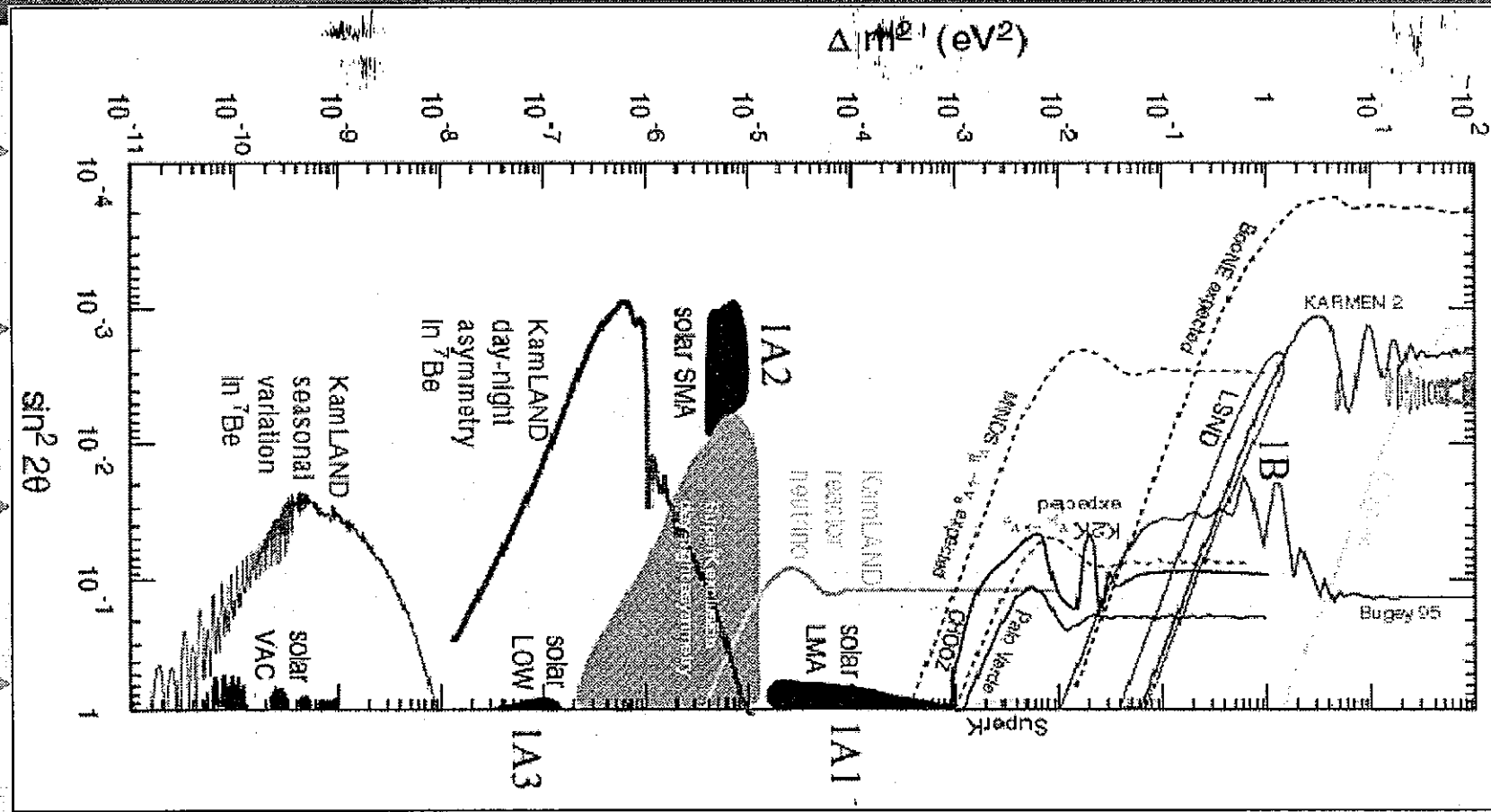
$$\sin^2 2\theta_{12}$$

Ω CP phase δ unknown

01.11.09

ニュートリノ研究会

ν 振動の現状



01.11.09

ニュートリノ研究会

ν ファクトリの目標

Ω ν の質量混合行列の精密測定

- θ_{13}
- δm^2 の符号

Ω CP violation

- $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \neq P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$
- 基線長とエネルギーの最適化

Ω T violation

- $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \neq P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

Ω Short base line ?

ν ファクトリの利点

- Ω 大強度
 - $10^{20} \sim 10^{21}$
- Ω 高エネルギー
 - ν_e を生成可能
- Ω 低バックグラウンド
 - 10^{-4}
- Ω ビームの精密な予測
 - 強度、Emittanceが正確にわかる

ν 振動確率

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

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta_{13}) \cos^2(\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E_\nu}\right)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E_\nu}\right)$$

$\nu^e \rightarrow \nu^\mu$ 振動レート

∂ CC Rate

$$N_{CC}(\nu_e \rightarrow e) \propto \theta_\nu^2 \cdot \sigma \propto \frac{E_\mu^2}{L^2} \cdot E_\mu = \frac{E_\mu^3}{L^2}$$

∂ Oscillation Rate

$$N_{osc}(\nu_e \rightarrow \mu) \propto \theta_\nu^2 \cdot \sigma \cdot P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \\ \propto \frac{E_\mu^3}{L^2} \cdot \frac{L^2}{E_\mu^2} = E_\mu$$

01.11.09

High Energy is Better!

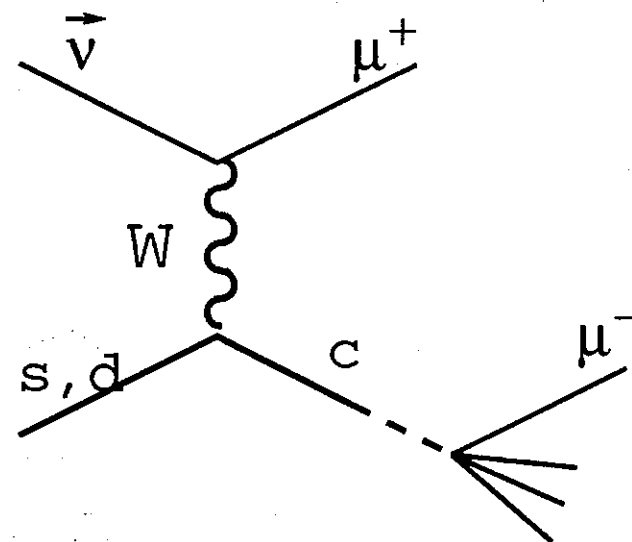
バックグラウンド

Ω ハドロンシャワー

- Punch through
- 中間子の崩壊
- $\pi, K \rightarrow \mu$

Ω チャーム

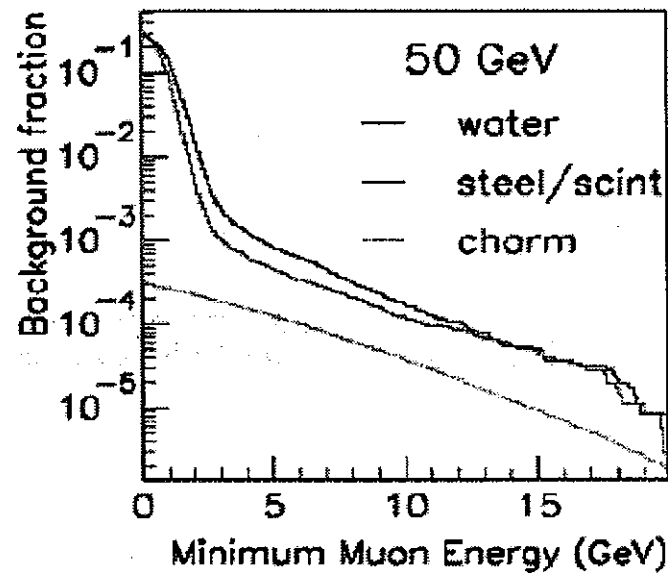
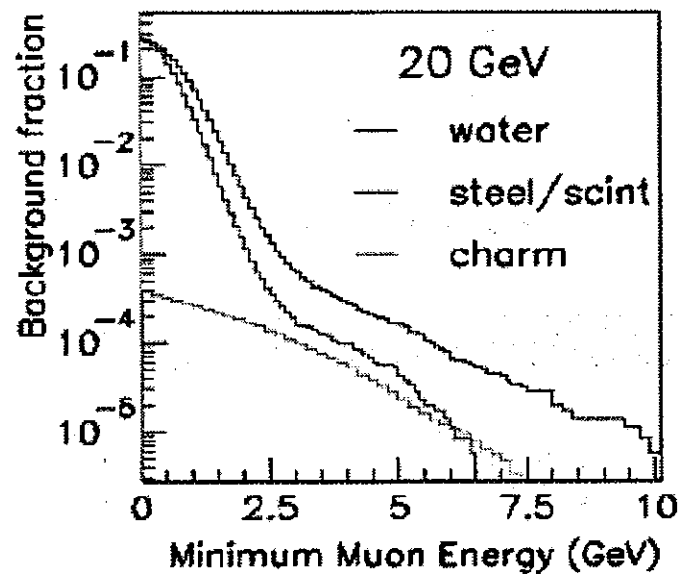
- プライマリミュオンをニハ



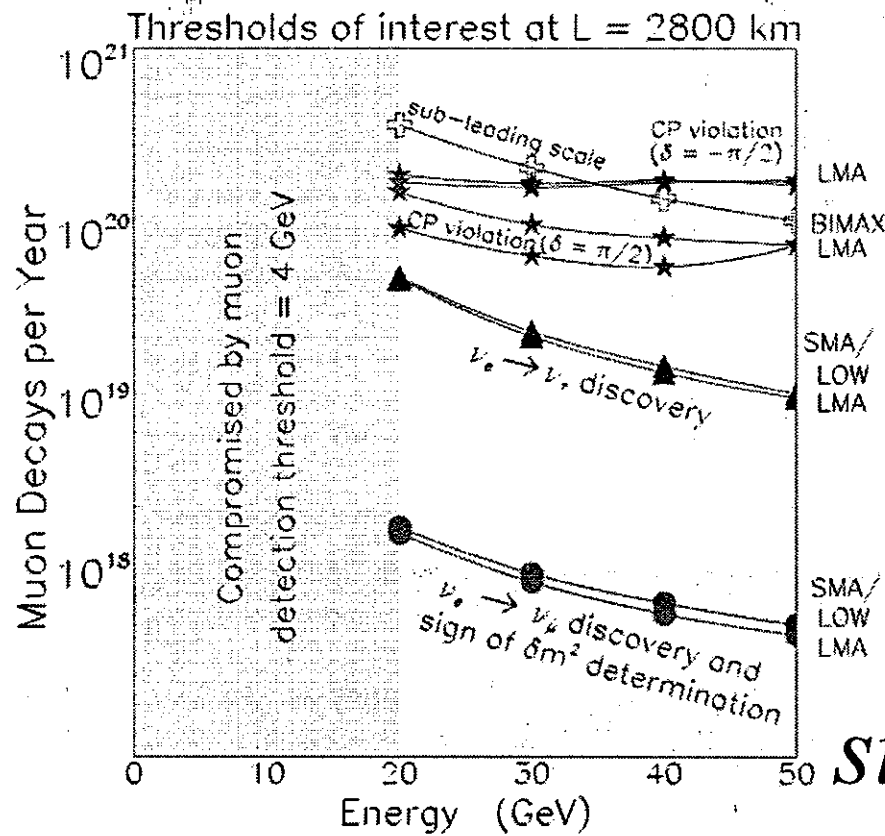
パイオンバックグラウンド

Backgrounds to $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \mu^+$

Pions which do not interact!



ν 振動に対する感度



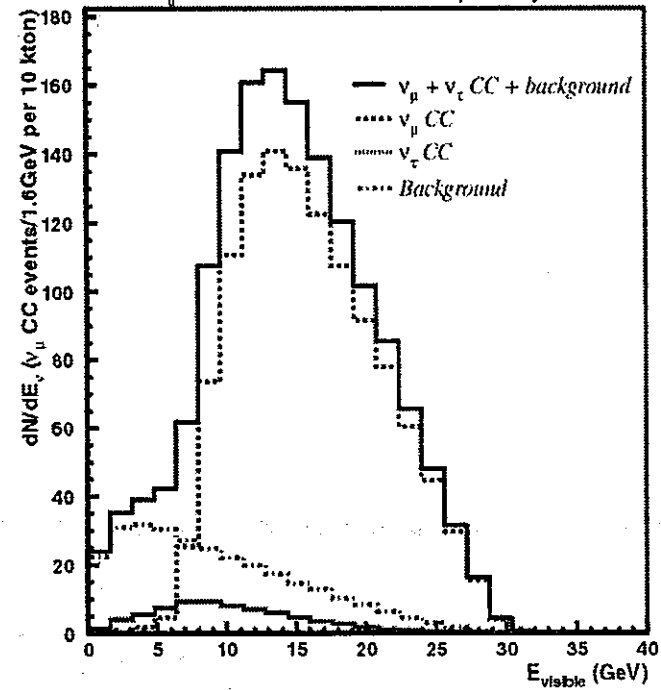
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.04$$

$\nu e \rightarrow \nu \mu$ の観測

Can measure
 $\sin^2 2\theta_{13}$ to 0.005
 with $2 \times 10^{20} \mu$

'Wrong Sign' Muons $\nu_e \rightarrow \nu_\mu \rightarrow \mu^-$

$E_\mu = 30 \text{ GeV}, L = 7400 \text{ km}, 10^{21} \mu^+$ decays



10kT ICANOE Detector

Note that Background dominates at low E

01.11.09

ニュートリノ

Entry level of $\text{Sin}^2 2\theta_{13}$

$\Omega 10^{19} \mu$

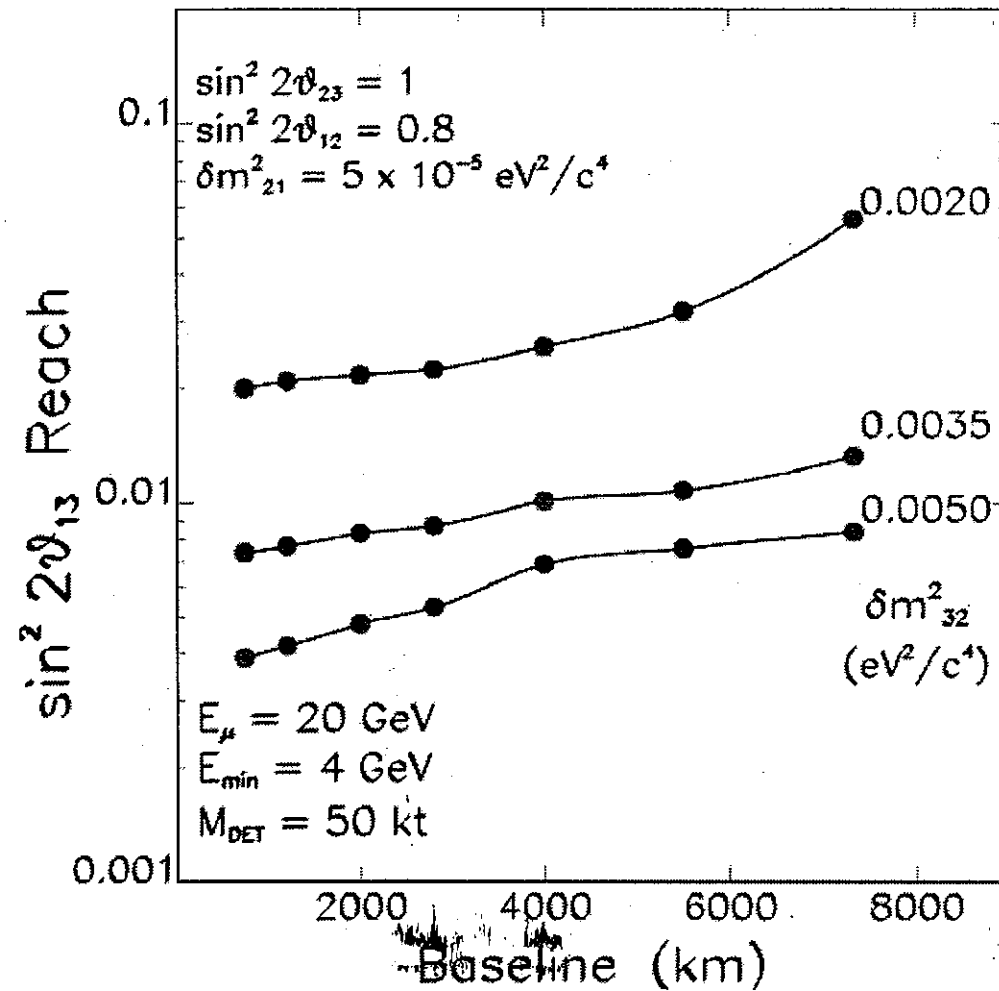
$\Omega 50 \text{ kt}$

$\Omega 20 \text{ GeV}$

Barger et.al

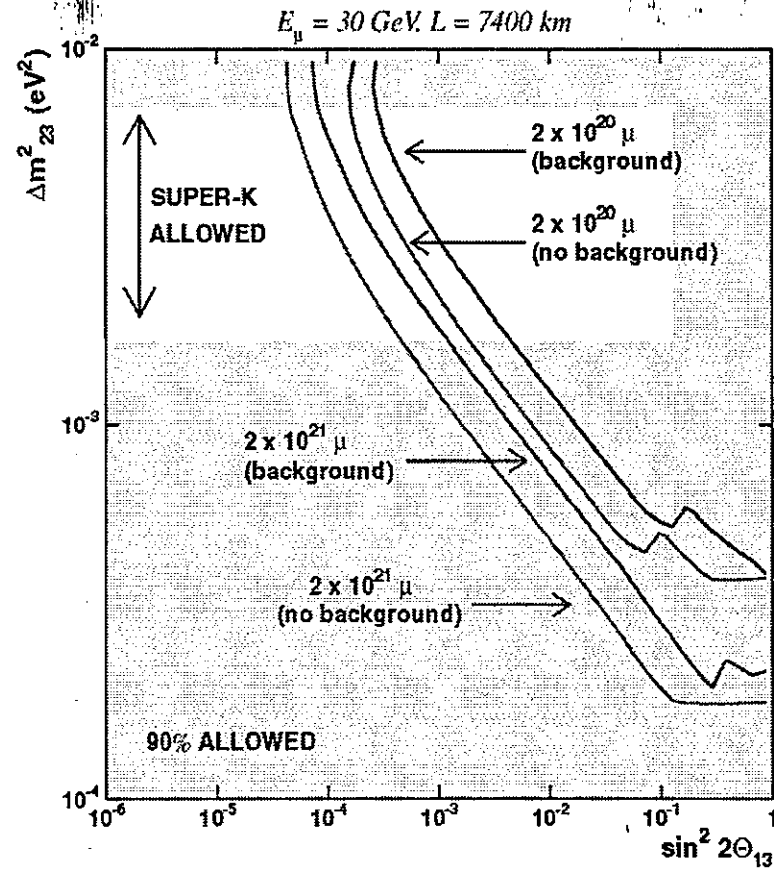
01.11.09

$\text{sin}^2 2\theta_{13}$ yielding $10 \mu^- \text{ evts}/10^{19} \mu^+ \text{ Decays}$



θ_{13} に対する制限

10kt ICANOE limits on $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$



10 kt ICANOE
30 GeV

01.11.09

M. Campanelli et al.

Matter Effect

Ω Matter effects

- have charged-current scattering with electrons.
- Induced effective mass $\mu = \pm 2E_\nu A$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \cong \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}^{M(-)}) \sin^2\left(\frac{B^{(-)}L}{2}\right)$$

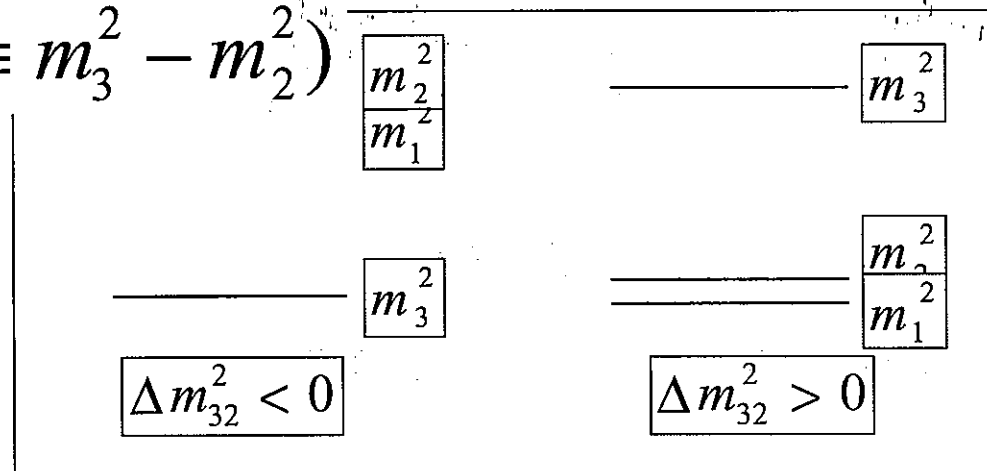
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) \cong \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}^{M(+)}) \sin^2\left(\frac{B^{(+)}L}{2}\right)$$

$$\sin(2\theta_{13}^{M(\pm)}) \cong \frac{\Delta_{32} \sin(2\theta_{13})}{B^{(\pm)}}, \quad \Delta_{32} \cong \frac{\Delta m_{32}^2}{2E_\nu}$$

$$B^{(\pm)} \cong \sqrt{(\Delta_{32} \cos(2\theta_{13}) \pm A)^2 + (\Delta_{32} \sin(2\theta_{13}))^2}$$

Matter Effect

Sign of $\Delta m_{32}^2 (\equiv m_3^2 - m_2^2)$



Matter effect

if $\Delta m_{32}^2 > 0$, $\sin^2(2\theta_{13}^{M(-)})$ is enhanced,
 $\Rightarrow P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ increases.

if $\Delta m_{32}^2 < 0$, $\sin^2(2\theta_{13}^{M(+)})$ is enhanced,
 $\Rightarrow P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$ increases.

Matter effect

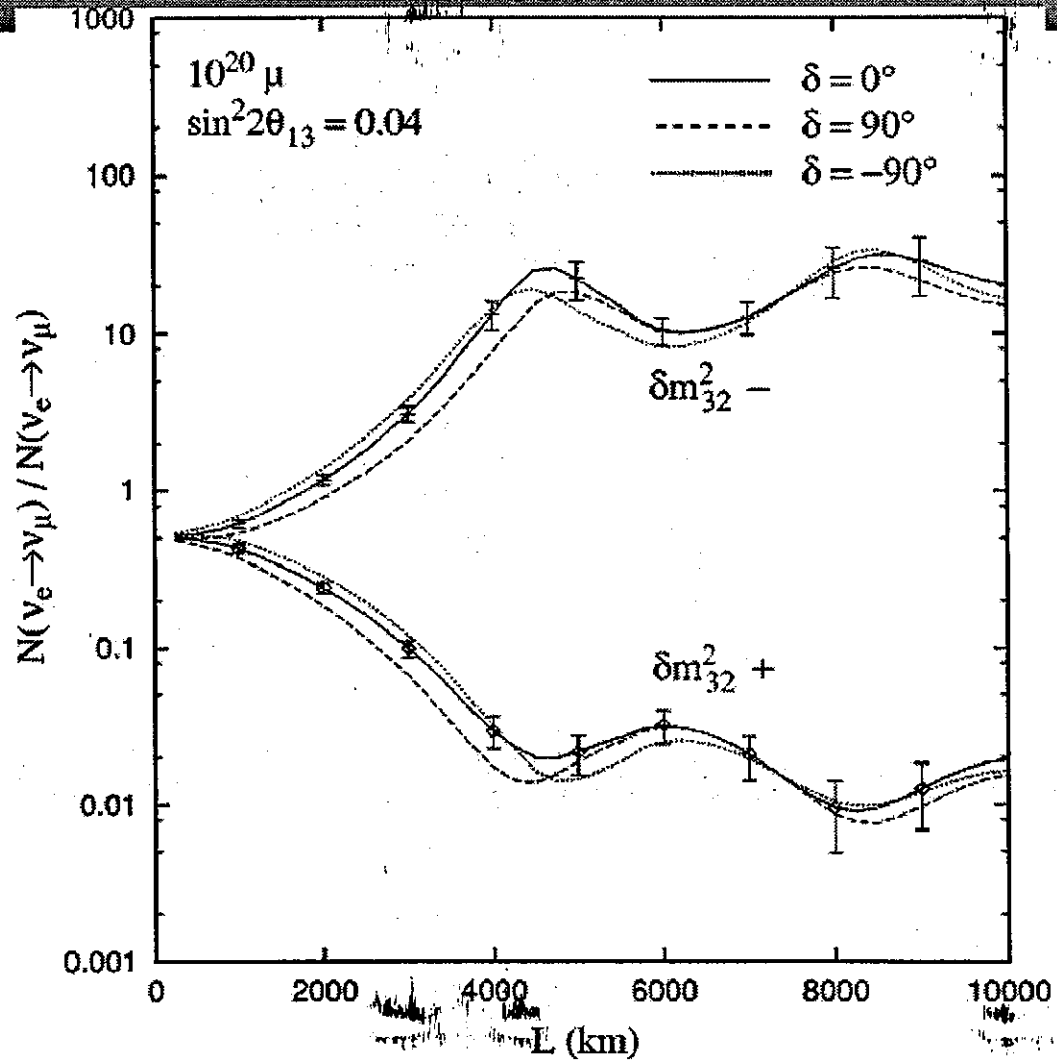
$10^{20} \mu$

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.04$

$E = 20 \text{ GeV}$

Barger et.al

01.11.09



Matter effect in μ Appearance

V. BARGER, S. GEER, R. RAJA, AND K. WHISNANT

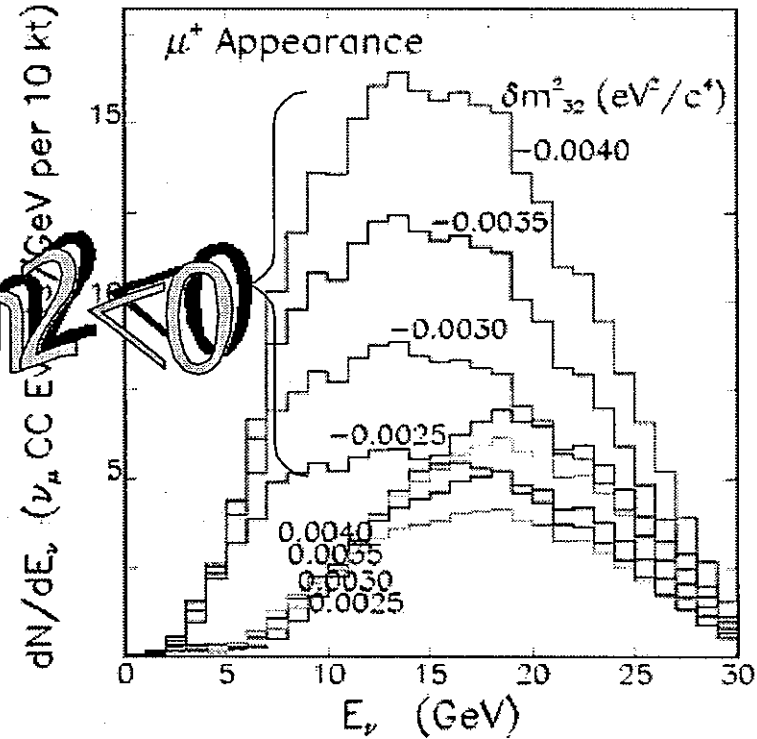
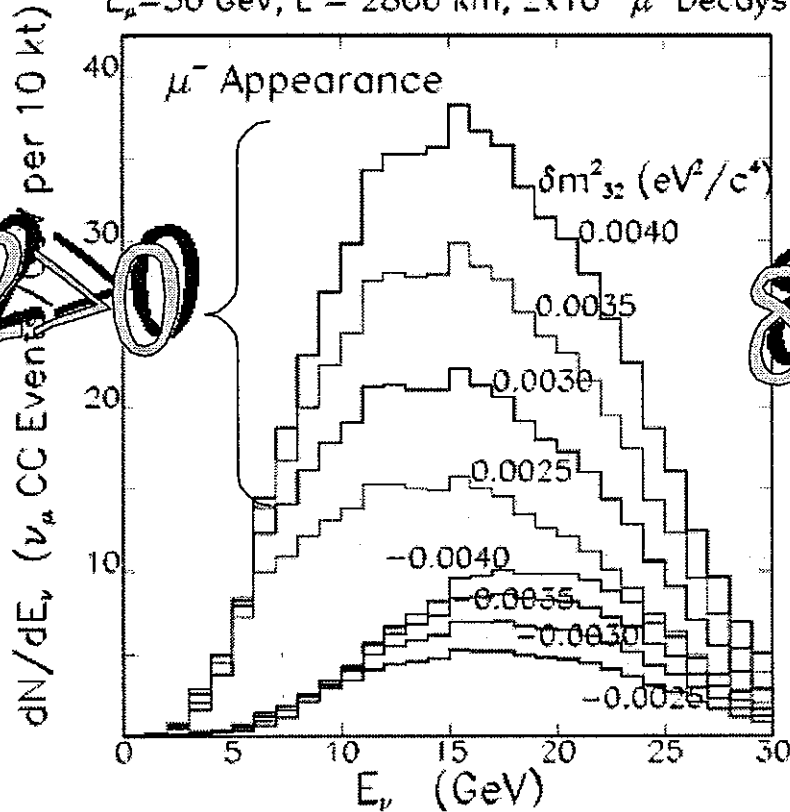
30 GeV, 2800km, $2 \times 10^{20} \mu^-$

$E_\mu = 30 \text{ GeV}, L = 2800 \text{ km}, 2 \times 10^{20} \mu^+ \text{ Decays}$

PHYSICAL REVIEW D 62 (

μ^+

$E_\mu = 30 \text{ GeV}, L = 2800 \text{ km}, 2 \times 10^{20} \mu^- \text{ Decays}$



190

$\delta m^2_{32} > 0$

$\delta m^2_{32} < 0$

01.11.09

ニュートリノ研究会

χ^2 test for sign of δm^2

Ω Quasi χ^2

$$R = \sum_j \frac{(N_\nu^j - 2N_{\bar{\nu}}^j)^2}{N_\nu^j + 4N_{\bar{\nu}}^j}$$

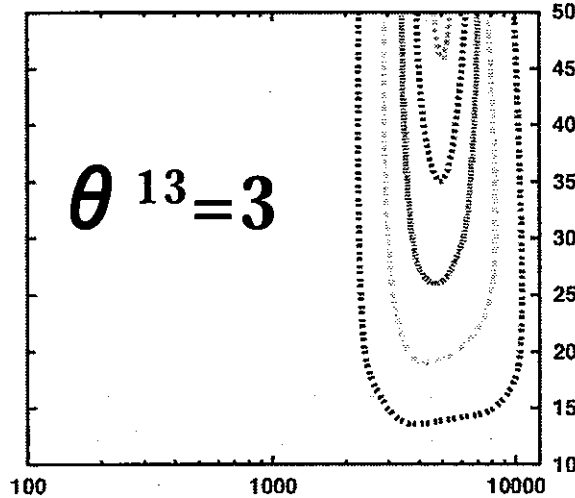
- Examine $\text{sign}(\Delta m_{32}^2)$
- Require $R > 3$

Ω Analysis result:

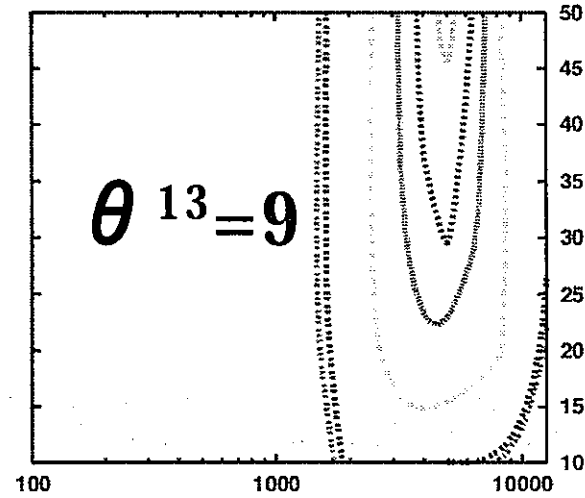
- For $\theta_{13} > 3^\circ$, 10^{19} μ decays/year and 50 kton detector, 1 year

χ^2 test for sign of δm^2

$R(\theta_{13}=3^\circ, 10^{19}\alpha/\text{yr} \propto 50\text{kt} \propto 1\text{yr})$



$R(\theta_{13}=9^\circ, 10^{19}\alpha/\text{yr} \propto 50\text{kt} \propto 1\text{yr})$



$10^{19} \mu$ 50kton で OK

01.11.09

ニュートリノ研究会

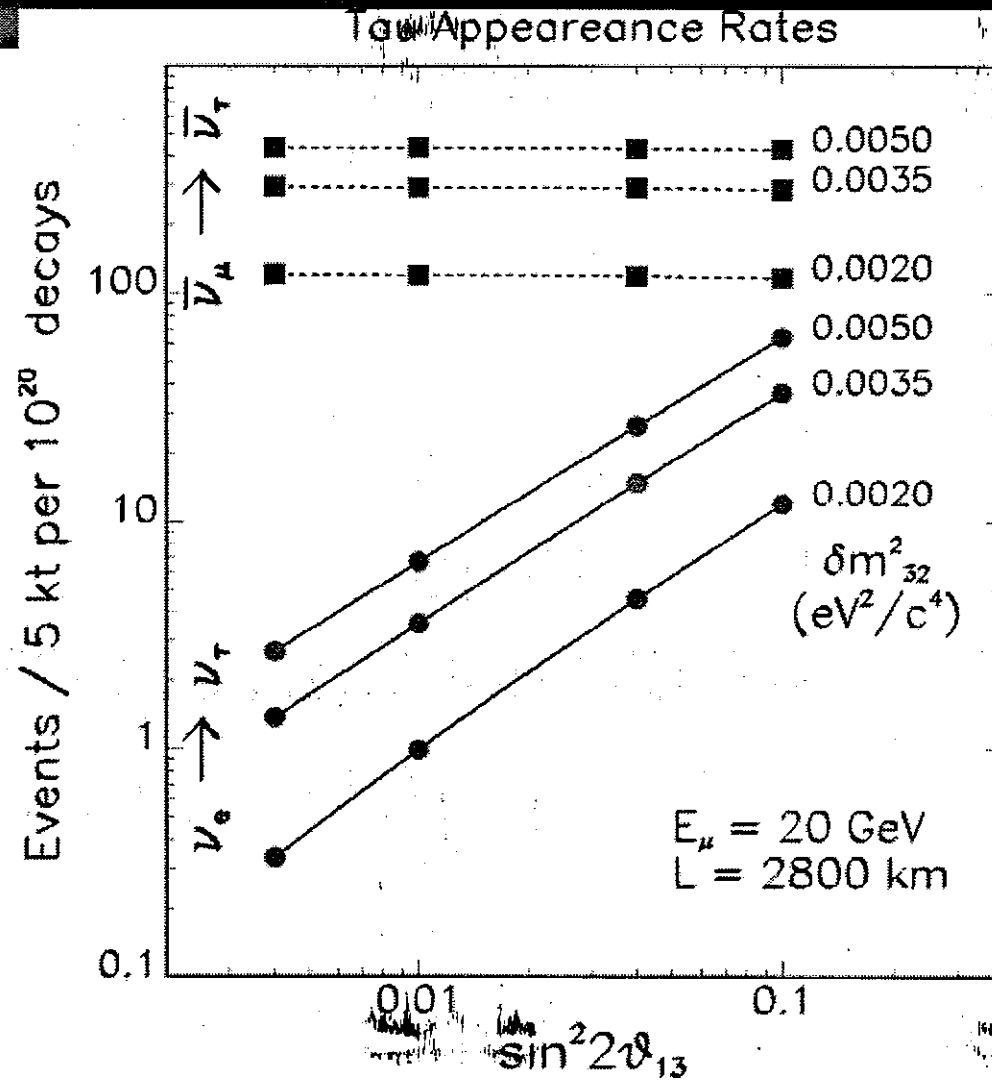
a. I. Yasuda

$\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の初めての観測

5kt 10^{20}

Barger et.al

01.11.09



Search for CP Violation

Ω Indirect CP search

$$\kappa^2 \approx \sum_j \frac{[N_j(\delta) - N_j(\delta=0)]^2}{\sigma_j^2}$$

- Sensitive to $\sin(\delta)$, $\cos(\delta)$
- Higher sensitivity, but indirect measurement.
- Higher neutrino energy is preferred.
- O. Yasuda works

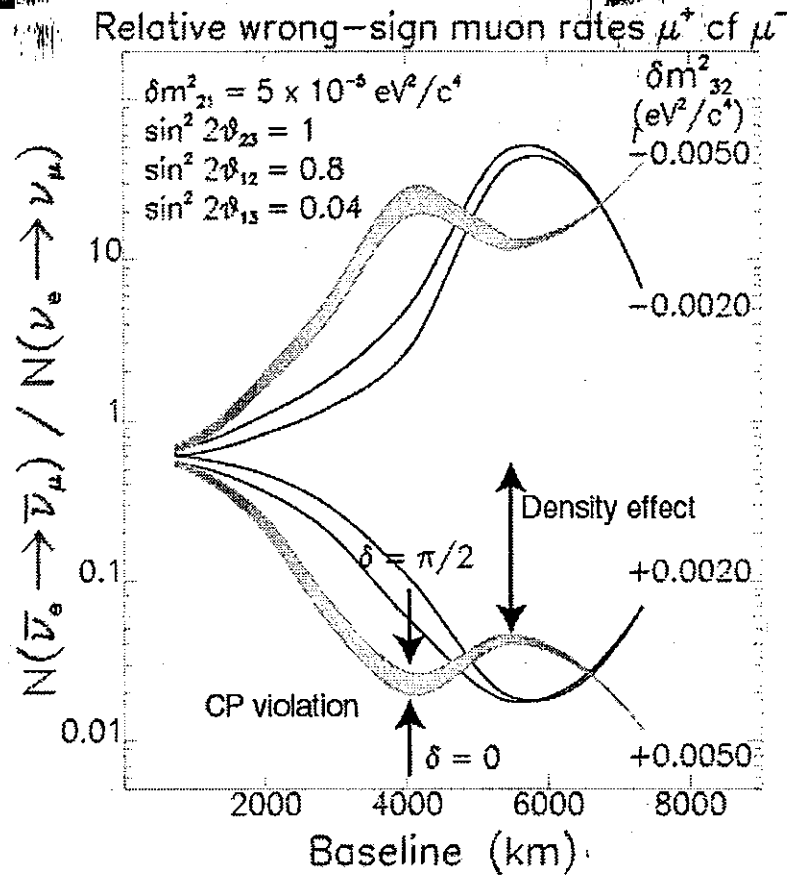
Ω Direct CP search

$$\kappa^2 \approx \sum_j \frac{[N_j(\delta) - 2\bar{N}_j(\delta)]^2}{\sigma_j^2}$$

- Sensitive to $\sin(\delta)$
- Lower sensitivity, but direct measurement
- Lower neutrino energy is preferred.
- J. Sato talk.

CP Violation Vs Matter Effect

195

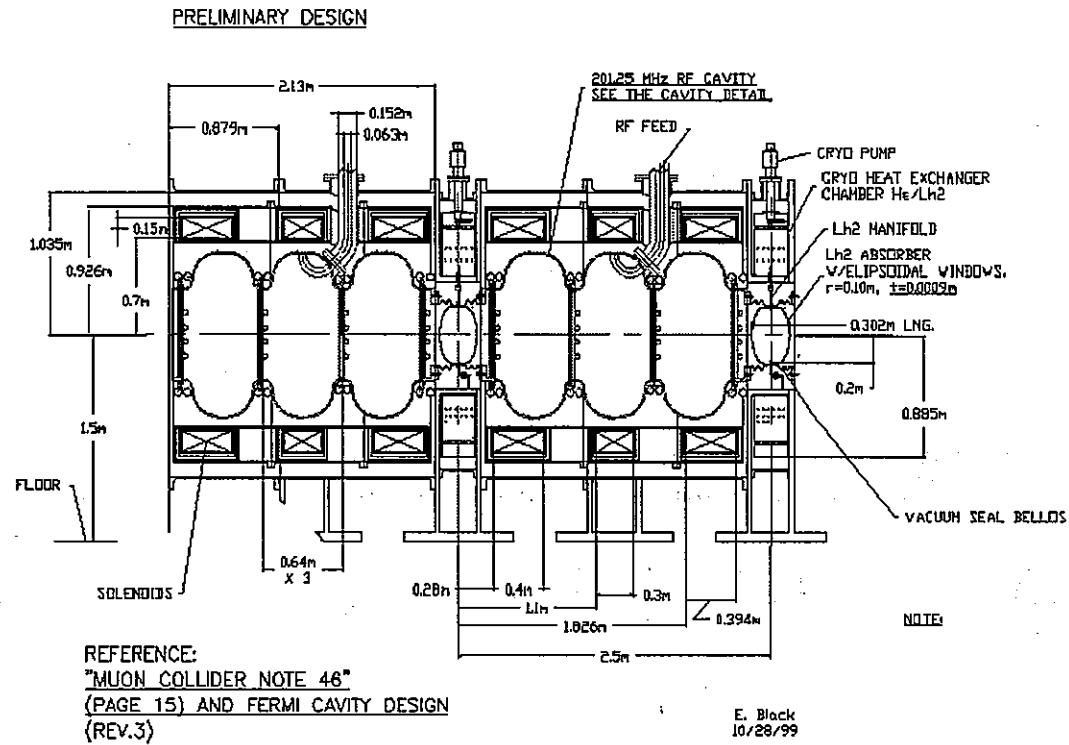


01.11.09

V. Barger, S. Geer, R. Raja, K. Whisnant

Phase rotation & Cooling

196

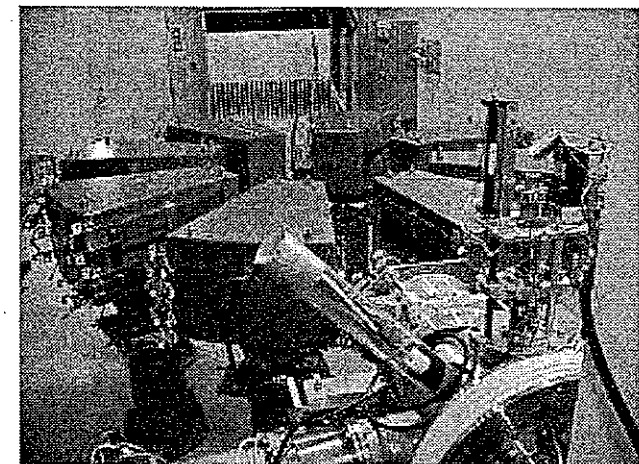


01.11.09

日本のFFAGスキーム

Ω FFAG (強収束サイクロトン)

- アクセプタンスが大きいいため、お金がかかる位相回転、冷却を必要としない
- RF繰り返し利用することができる。
 - 低コスト
 - 加速勾配を小さくできる



FFAG based ν ファクトリ

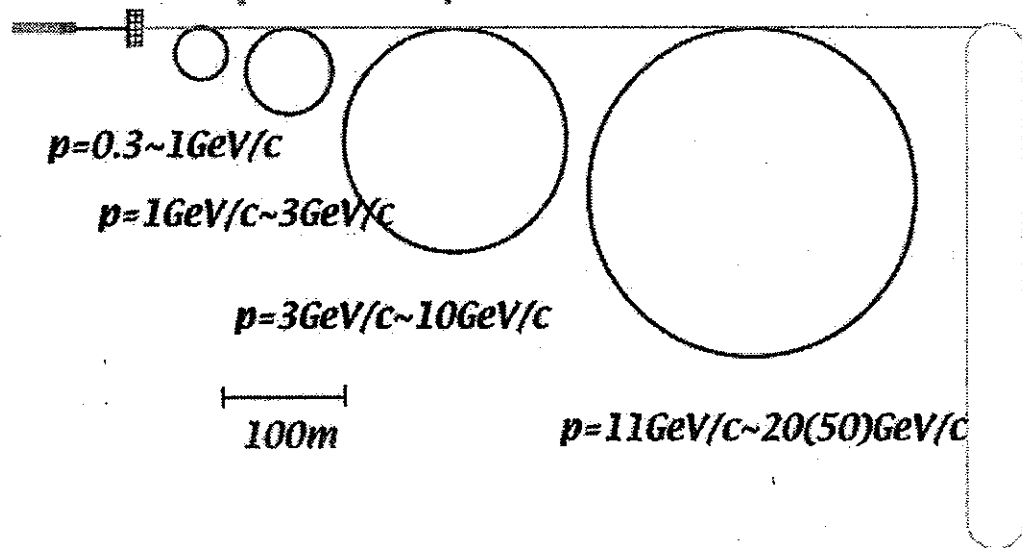
AMC 701, May 24-26, 2001, Tsukuba

Accelerator Scenario - FFAG Option

(1) Low Freq. (~MHz) & High Gradient RF $E > 1\text{MV/m}$

(2) Acceptance : Trans.: $0.01-0.02\pi\text{m.rad}$, Long. $\Delta P/P \sim \pm 50\%$

@ $p=0.3\text{GeV/c}$



$p=0.3\sim 1\text{GeV/c}$

$p=1\text{GeV/c}\sim 3\text{GeV/c}$

$p=3\text{GeV/c}\sim 10\text{GeV/c}$

$p=11\text{GeV/c}\sim 20(50)\text{GeV/c}$

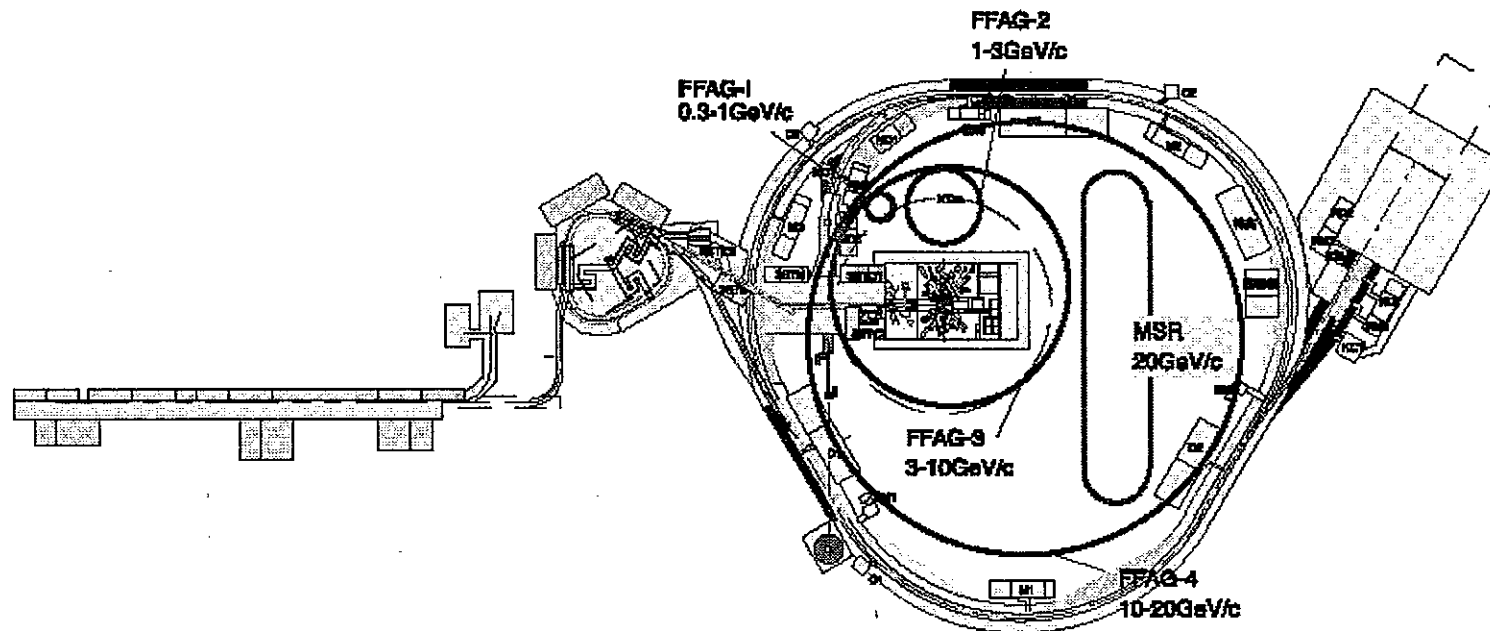
100m

Mori

muon storage

ν ファクトリ at JHF

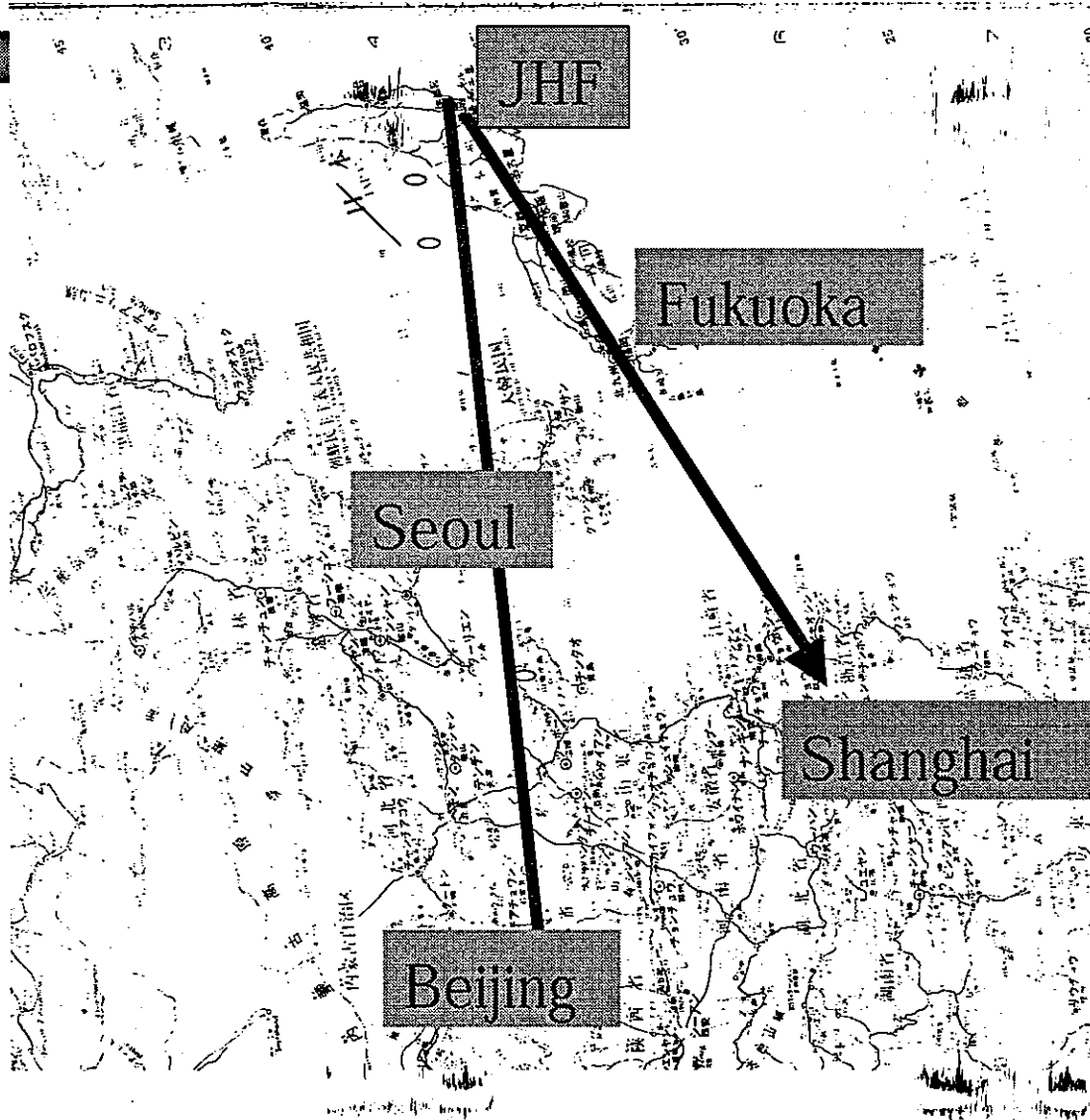
FFAG based neutrino factory in Japan



01.11.09

ニュートリノ研究会

Long Baselines ?



Or Hawaii ?



PRISM-I

∞ High-intensity low-energy muon source (for rare muon decays)

– 10T pion capture

– Phase rotation at PRISM-FFAG

∞ $P_{\mu}=68 \text{ MeV}/c$ (KE=20 MeV)

Injection momentum: $\Delta p/p = 50\%$

∞ 10^{19} muons/(10^7 sec) in the ring

∞ Based on 1-MW 50-GeV PS

PRISM-II

- ∩ Acceleration with an additional accelerator (FFAG)
- ∩ 10^{20} muons/(10^7 sec) in the ring
- ∩ Give a modest neutrino source



NuFACT-I

- 1×10^{20} muon decays/year at one straight section
- Based on 1-MW 50-GeV PS
- Muon energy: 20 GeV
 - Energy is determined by cost and physics topics.
- Location: JAERI Tokai campus

NuFACT -II

○ 4.4×10^{20} muon decays/year at one straight section

○ Based on upgraded 4.4-MW 50-GeV PS

○ Muon energy: 50 GeV

最近の動向

∞ Nufact99,00,01

- 次はロンドン

∞ Design report

- US, Europe, JAPAN

∞ Cooling collaboration

- Ionization Coolingの実践
- US-EU-JP colalboration
- 2004 実験開始

まとめ

- Ω ν の振動パラメータを精度良く決定することができる
 - 10^{19} decay/year あれば、 θ_{23} , δm_{23}^2
 - θ_{13} , sign of δm_{23}^2 の可能性
- Ω エネルギー、基線長は物理により最適化する必要あり
 - 20~50 GeV, 1000 3000 km
- Ω 精力的な R & D が進められている
 - 中でも日本の FFAG スキームはユニーク
 - <http://www-prism.kek.jp/nufactj/index.html>