現代物理入門
本郷、2005．7．4

ニュートリノの研究

梶田　隆章
東大宇宙線研究所宇宙ニュートリノ観測情報融合センター（@柏）
kajita@icrr.u-tokyo.ac.jp, http//www-rccn.icrr.u-tokyo.ac.jp/kajita/index.html

内容

- イントロ
- ニュートリノ振動の現状
- 物理の背景
- 今後のニュートリノ（振動）研究
- まとめ

イントロ

QUANTUM UNIVERSE

THE REVOLUTION IN 21ST CENTURY PARTICLE PHYSICS

DOE / NSF

HIGH ENERGY PHYSICS ADVISORY PANEL

QUANTUM UNIVERSE COMMITTEE

Quantum Universe で取り上げられた9個の重要問題

Einstein's dream or Unified Forces

1. Are there undiscovered new symmetries, new physical laws ?
2. How can we solve the mystery of Dark Energy ?
3. Are there extra dimension of space?
4. Do all the forces become one ?

The Particle World

5. Why are there so many kinds of particles?
6. What is dark matter?

How can we make it in the laboratory?

7. What are neutrinos telling us?

The Birth of the Universe

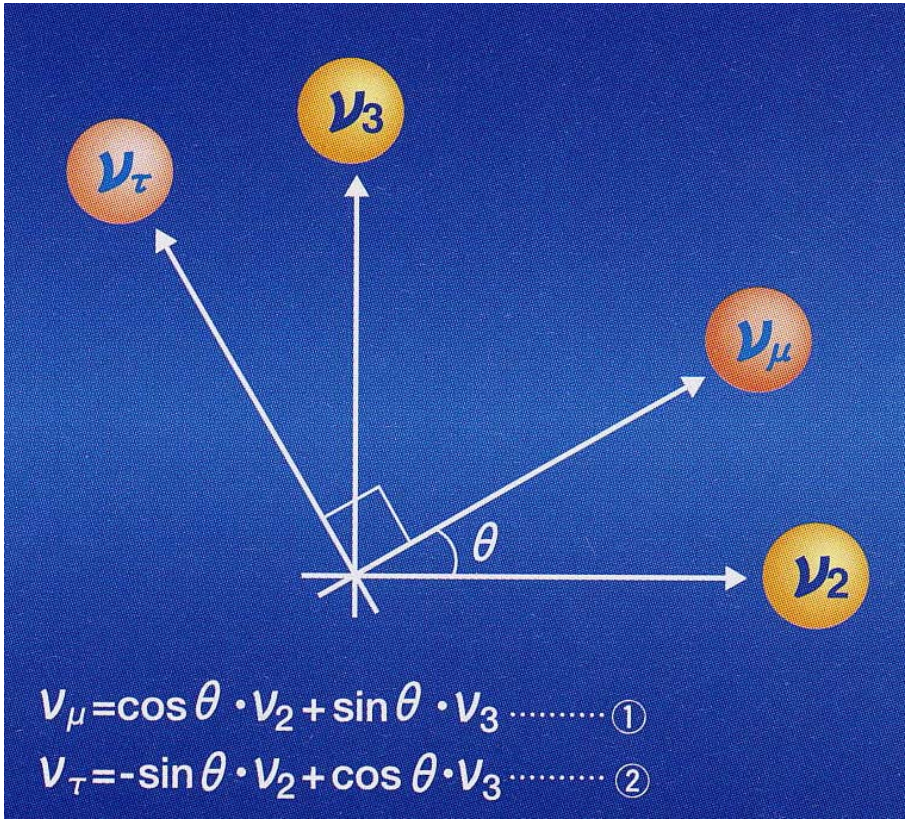
8. How did the Universe come to be?
9. What happened to the antimatter?

2004年アメリカ物理学会 Study of the Future of Neutrino Physics 報告

ニュートリノの質量とニュートリノ振動

（牧、中川、坂田,1962）

ミューニュートリノ(ν_μ)やタウニュートリノ(ν_τ)は固有の質量を持っているわけではなく、固有の質量を持った状態をν_2, ν_3とすると、ν_μはν_2とν_3を重ね合わせたものとしてあらわせる。

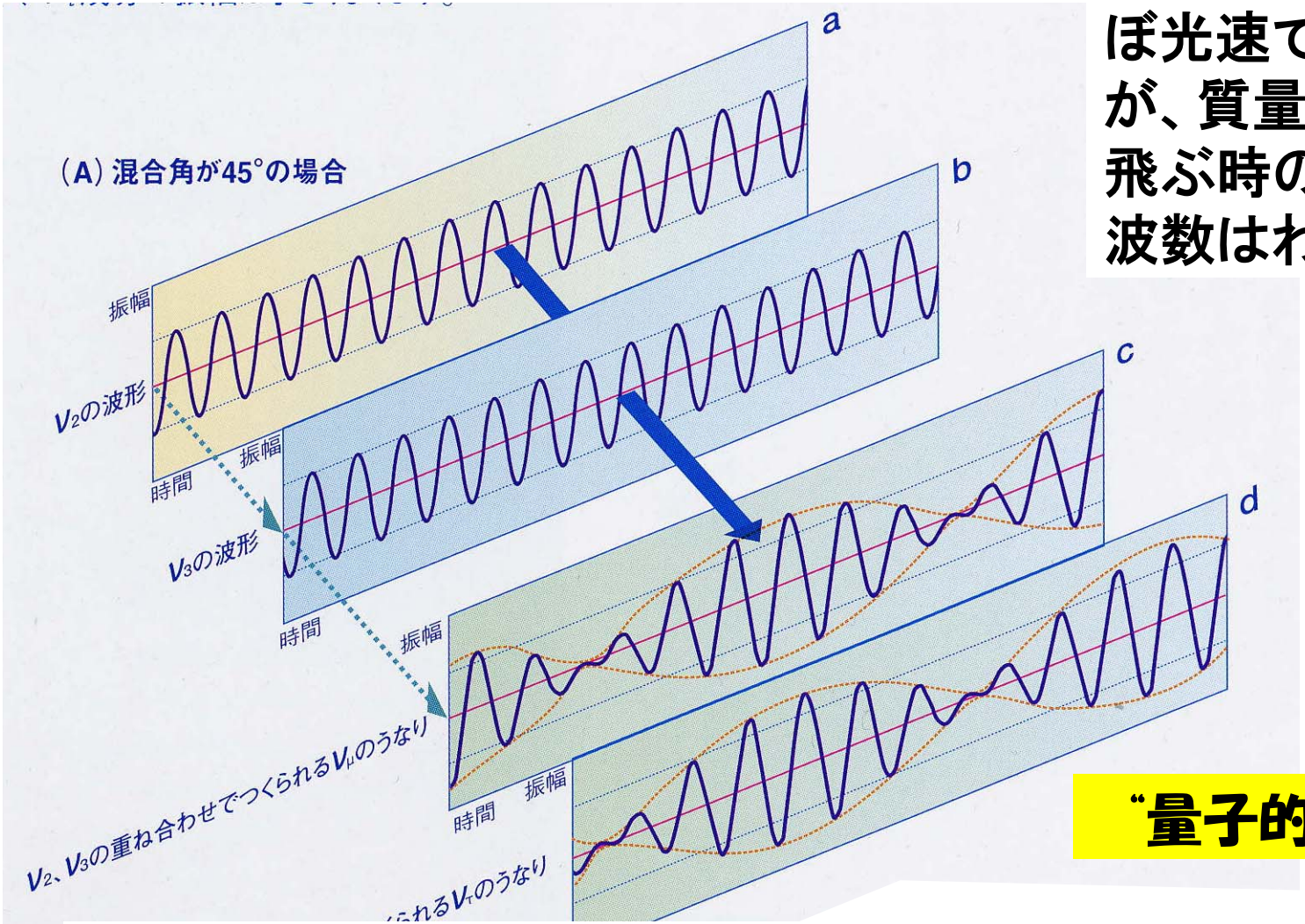


この場合、ν_μが真空中を飛ぶとは、ν_2とν_3の重ね合わさった状態が飛ぶということになる。

また、素粒子は粒子であると同時に波（物質波）である。

ニュートリノ振動

ところで、ν_2とν_3はほぼ光速で飛んでいるが、質量が違うので、飛ぶ時の物質波の周波数はわずかに違う。



“量子的うなり”

最初はミューニュートリノだったものが時間と共にミューニュートリノが減ったり増えたりする。

➔ ニュートリノ振動 （消えた分はタウニュートリノに）

2世代ニュートリノ振動確率

（今のところ、多くの場合2世代の式でOK）

$$P(\nu_\mu \to \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cdot \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 L_\nu}{E_\nu}\right)$$

ここで

$P(\nu_\mu \to \nu_\mu)$: ν_μ が ν_μ のまま残る確率

θ_{23} : 23世代ニュートリノ間の混合角

Δm^2 : 2種のニュートリノの質量の2乗の差 $(m_{\nu 3}^2 - m_{\nu 2}^2)$

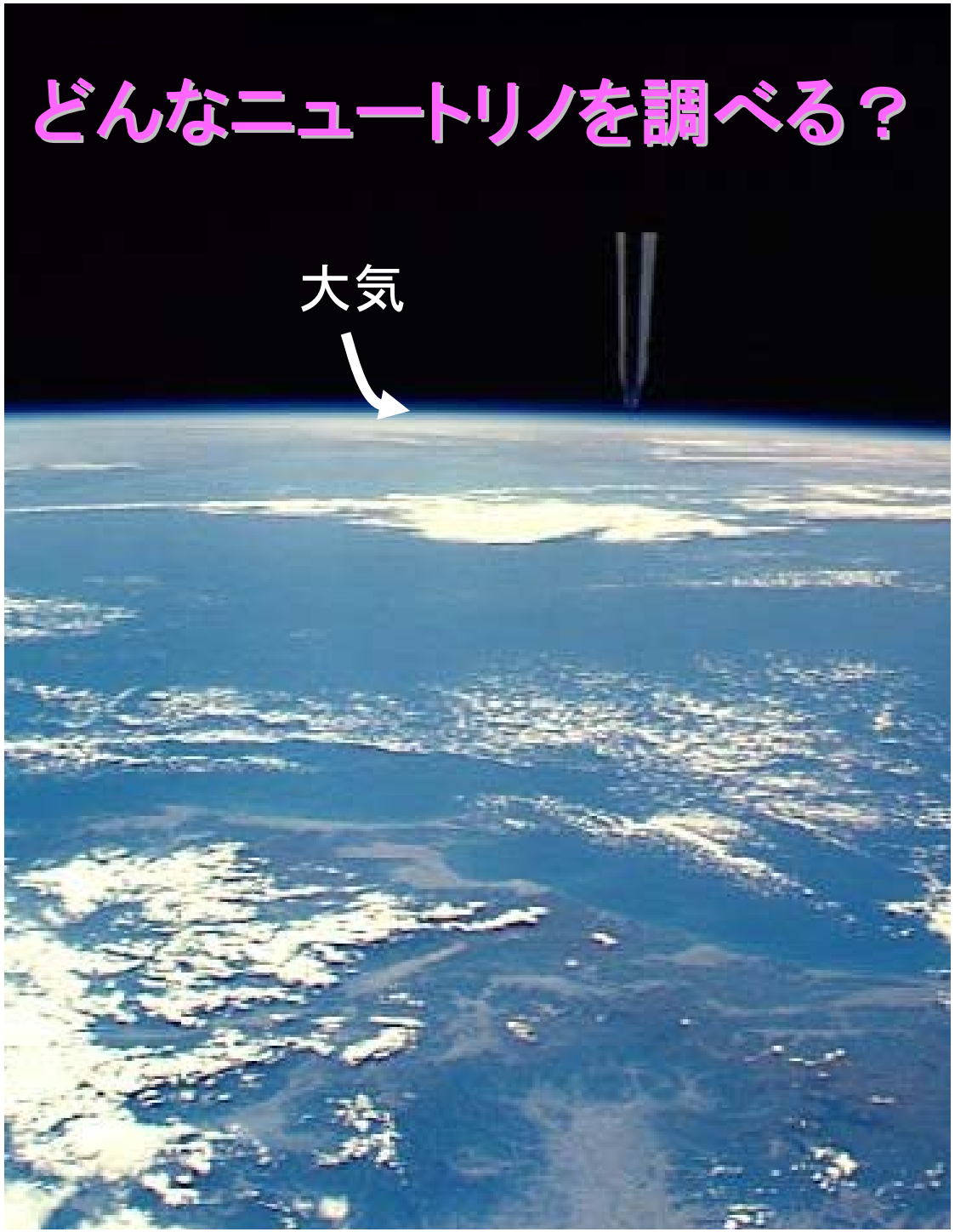
L_ν, E_ν : ニュートリノの飛行距離（km）とエネルギー（GeV）

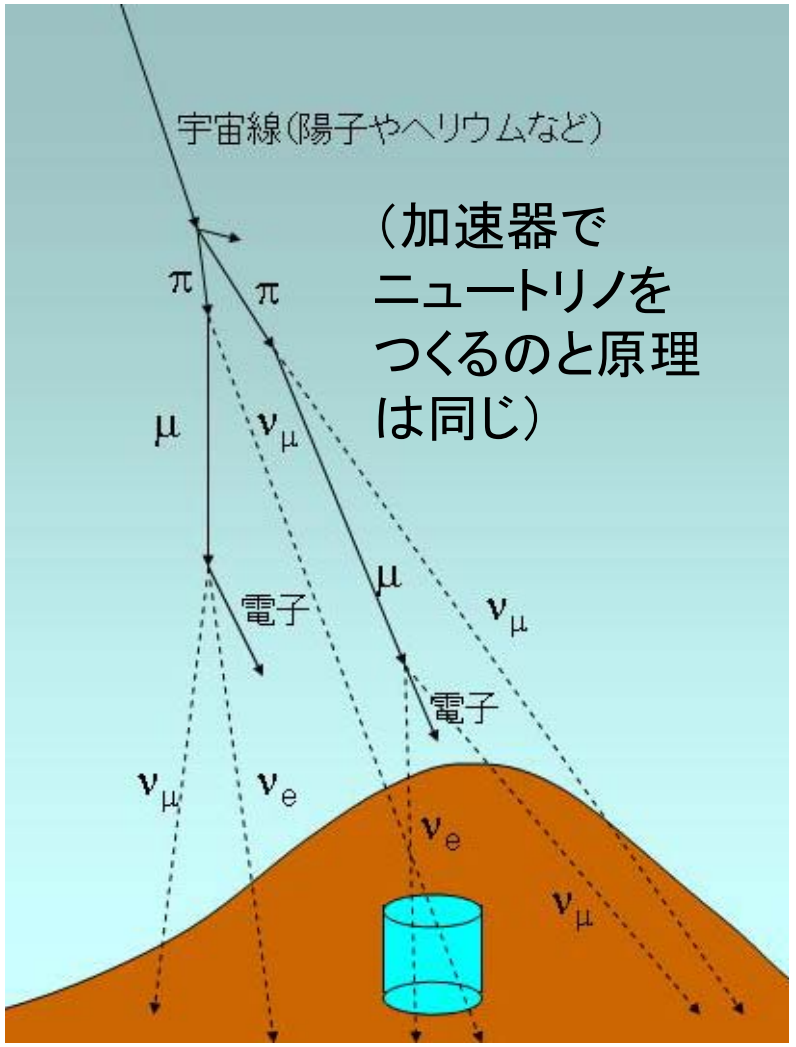
さらに、

$$P(\nu_\mu \to \nu_\tau) = 1 - P(\nu_\mu \to \nu_\mu)$$

ニュートリノ振動研究の現状

どんなニュートリノを調べる？

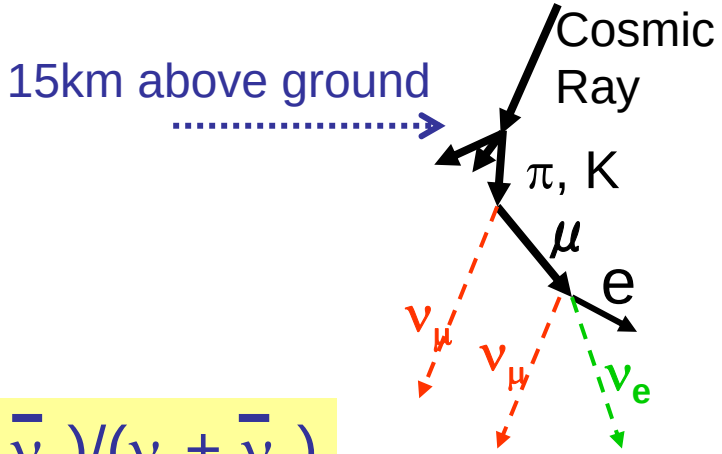




（加速器で
ニュートリノを
つくるのと原理
は同じ）

地球の反対側でも同じことがおこっているので、下からもニュートリノが来る。

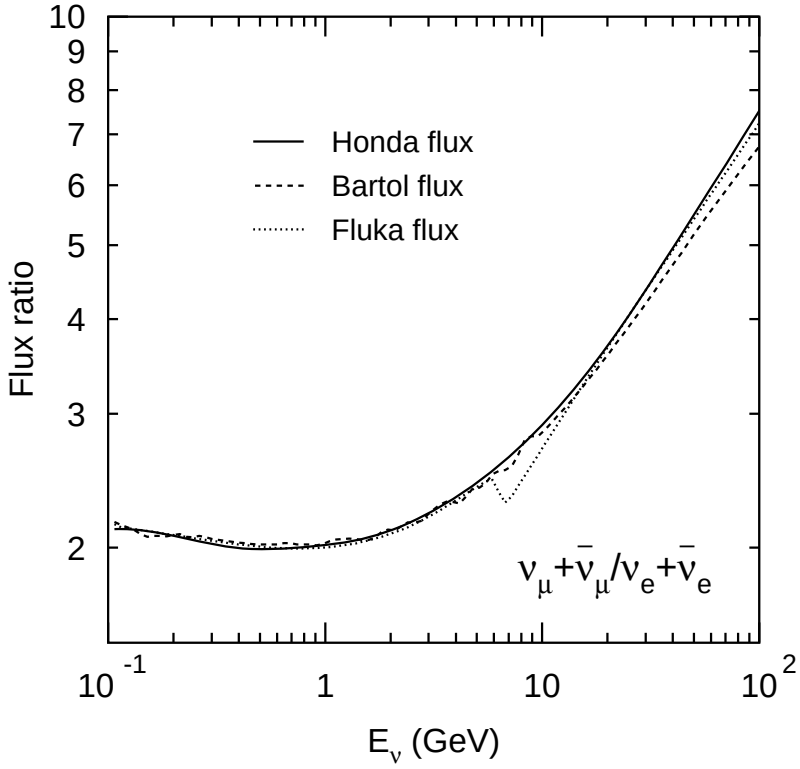
大気ニュートリノフラックスの特徴

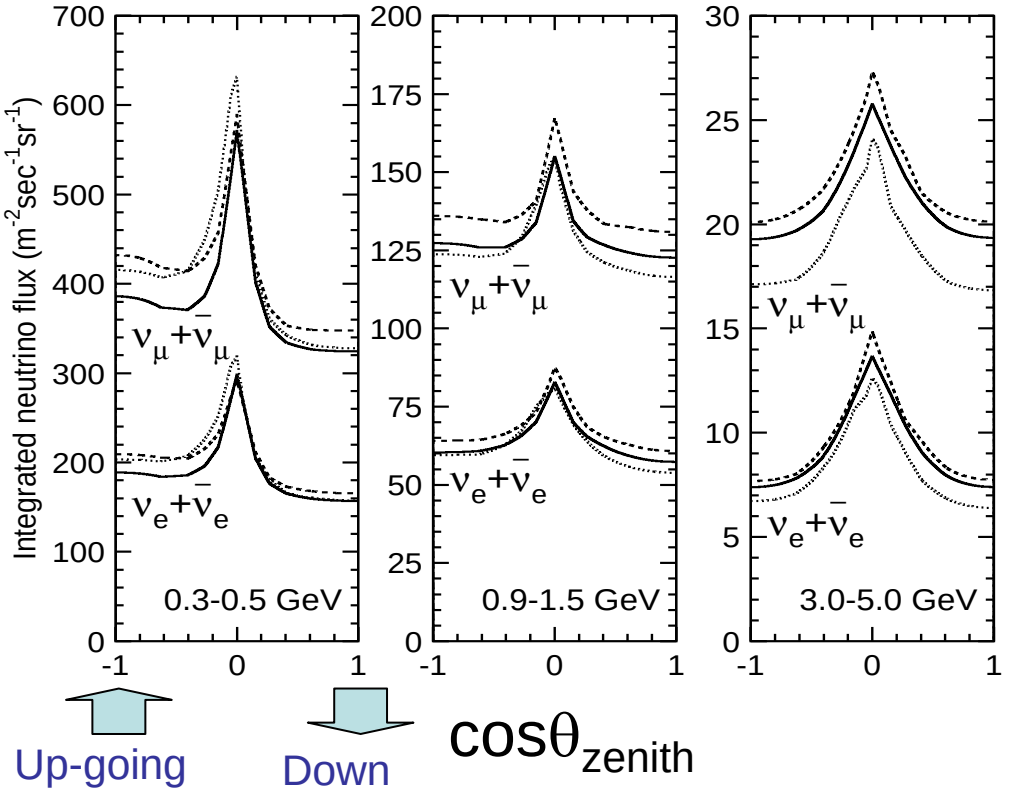


天頂角

Up-down asymmetry at low energy: geomagnetic field

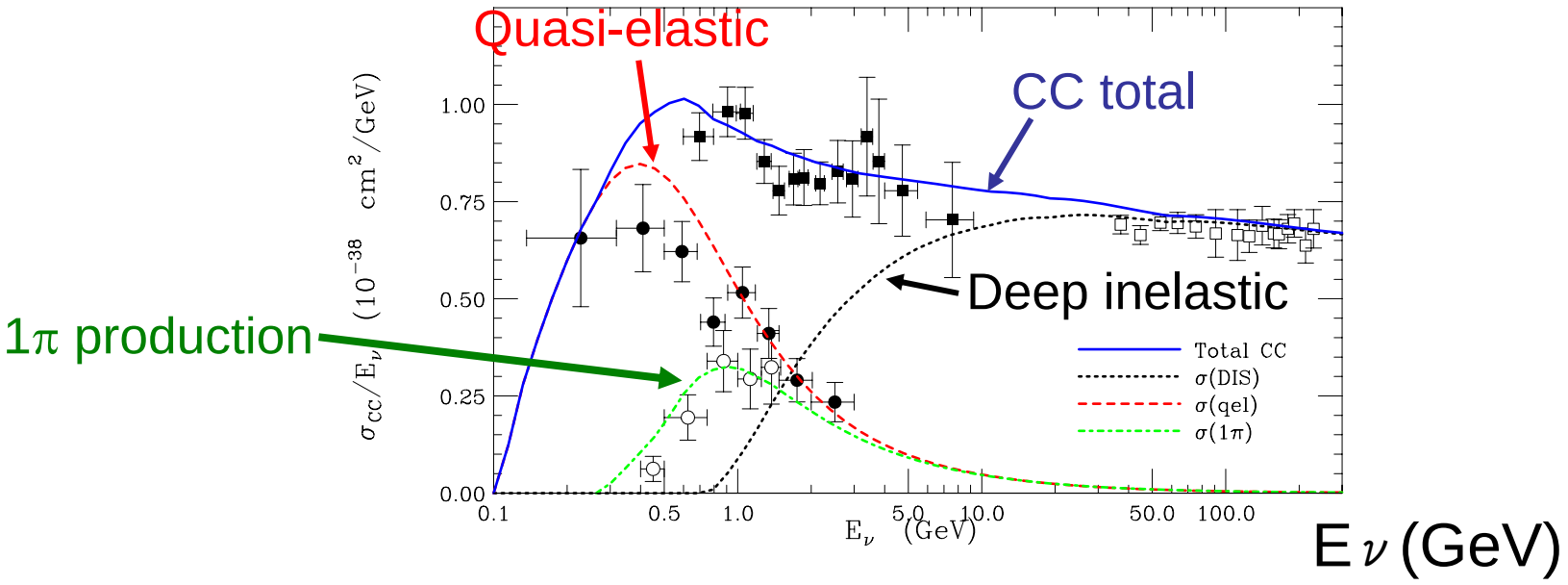
$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$





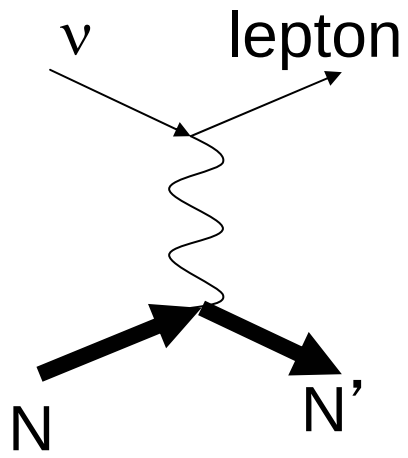
ニュートリノ相互作用

σ / E_ν

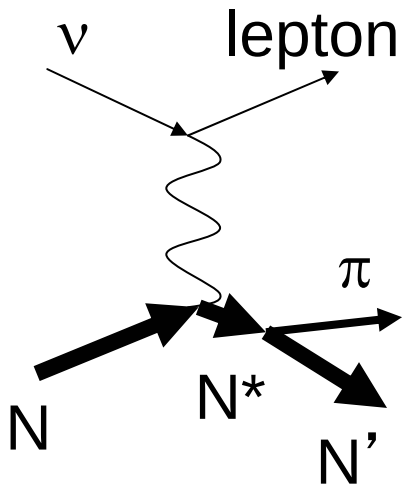


Eν (GeV)

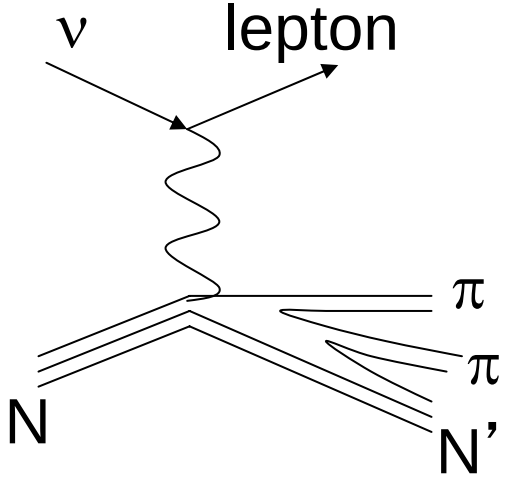
Quasi-elastic



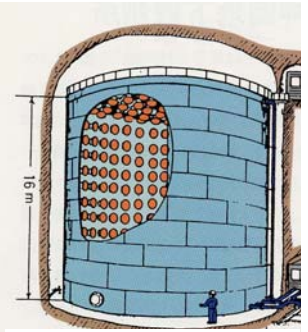
1π production



Deep inelastic



スーパーカミオカンデ
(50,000トン水チェレンコフニュートリノ検出器)



カミオカンデ

エレクトロニクス室

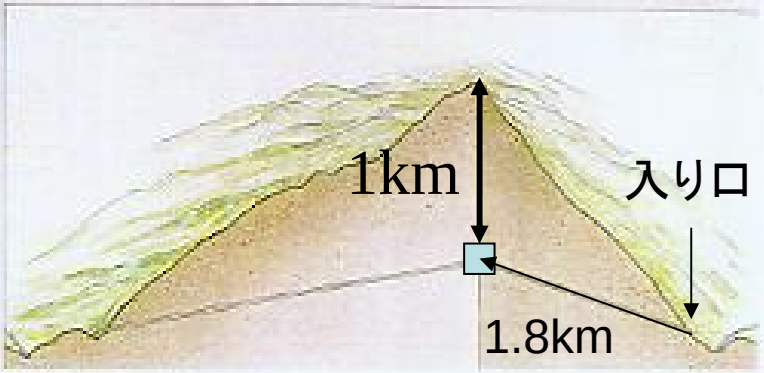
光電子増倍
管11,000本

42m

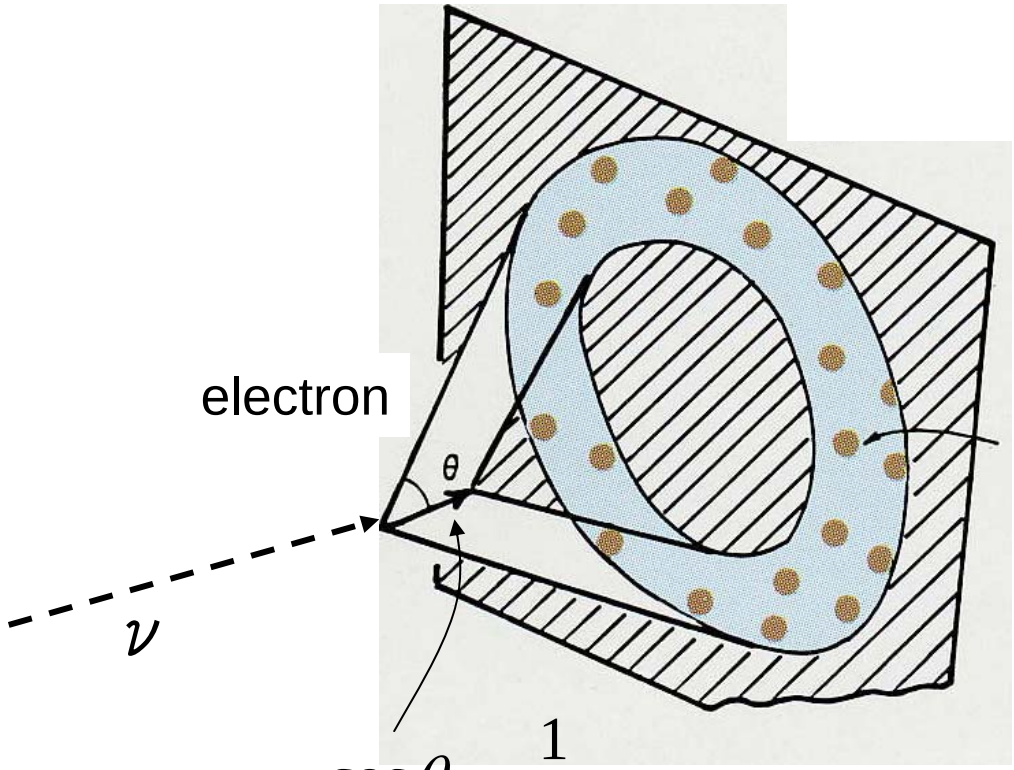
39m

入り口

純水装置



チェレンコフ光の検出によるニュートリノ相互作用の測定



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

n (refractive index)=1.34 in water

⇨ θ =42deg. for β =1

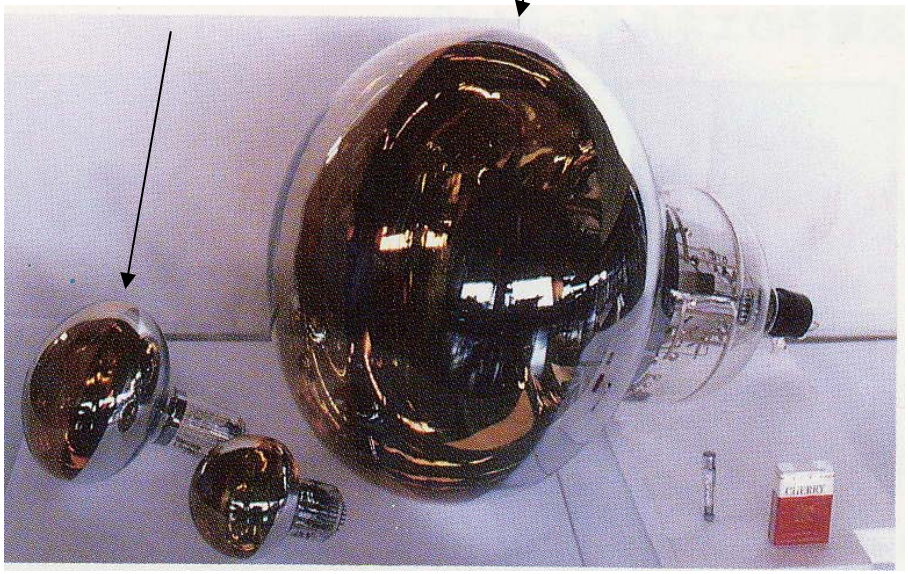
Time: vertex position

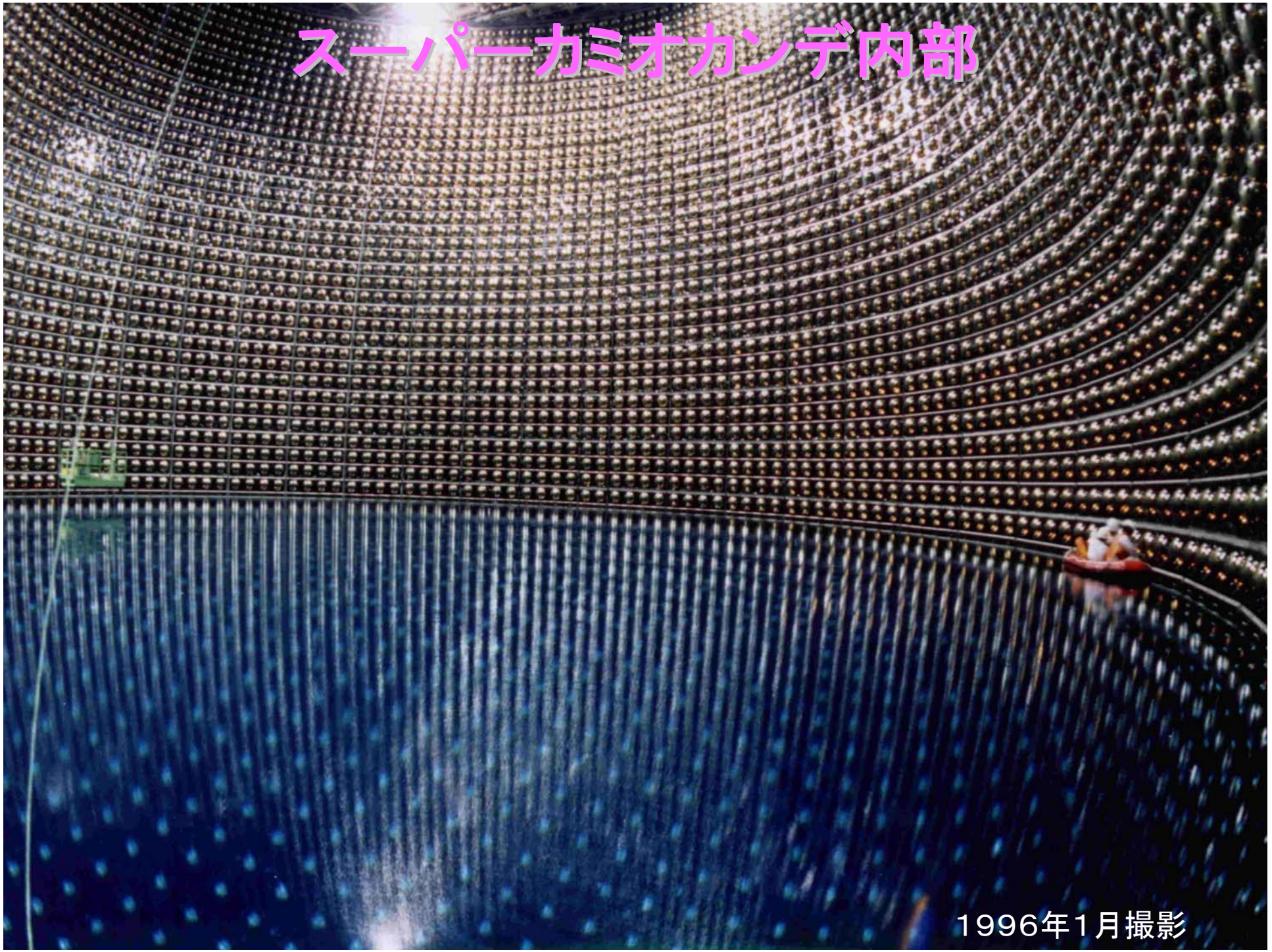
➔ direction

Pulse height (number of pe's): energy

Photomultiplier tube (PMT)

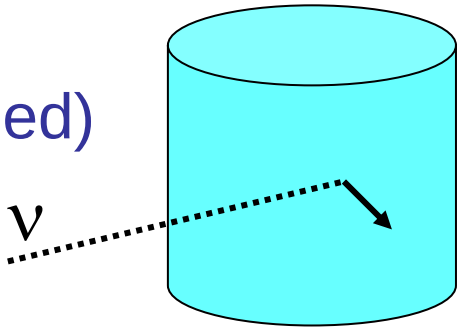
50cm ϕ (Super-K)




スーパーカミオカンデ内部
1996年1月撮影

スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノ相互作用事象の例

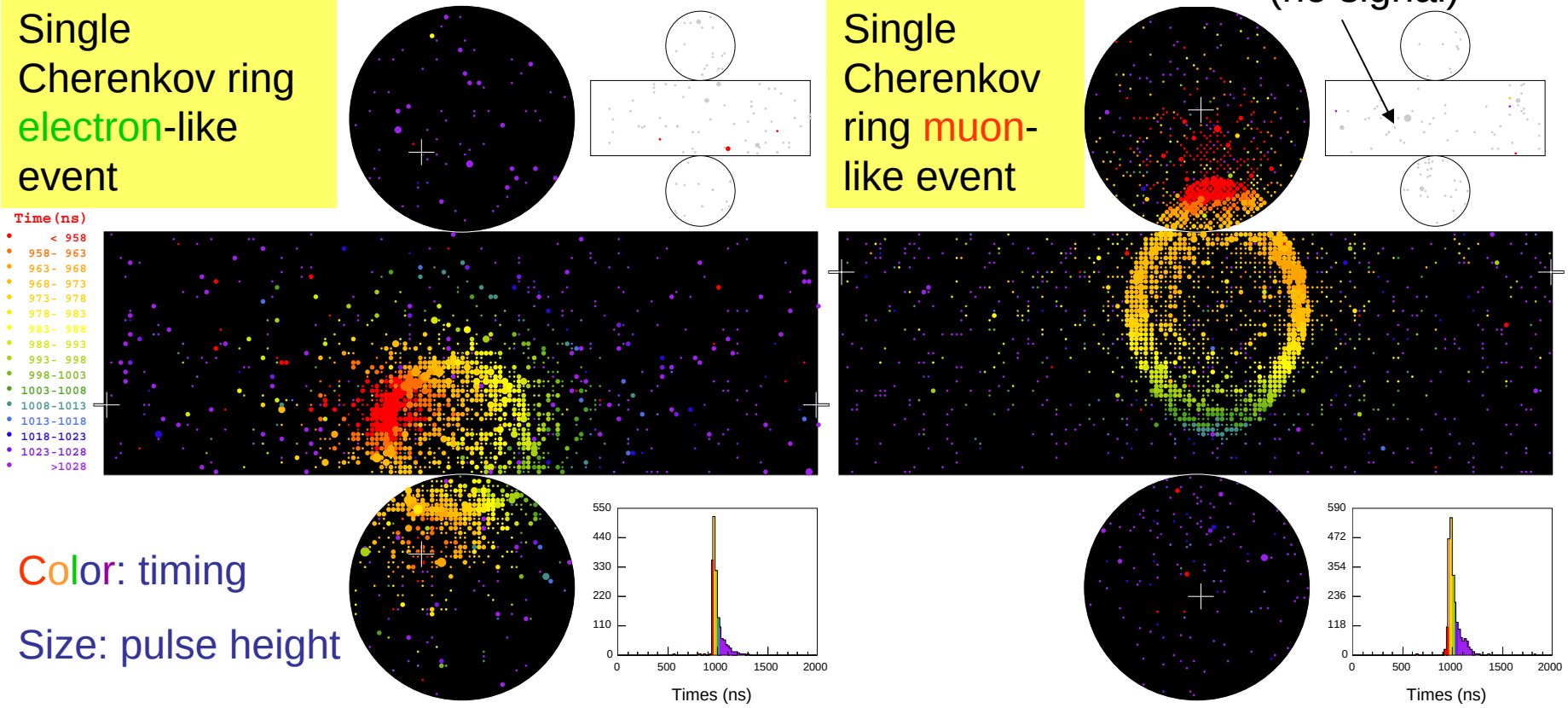
FC
(fully contained)



Outer detector
(no signal)

Single Cherenkov ring electron-like event

Single Cherenkov ring muon-like event

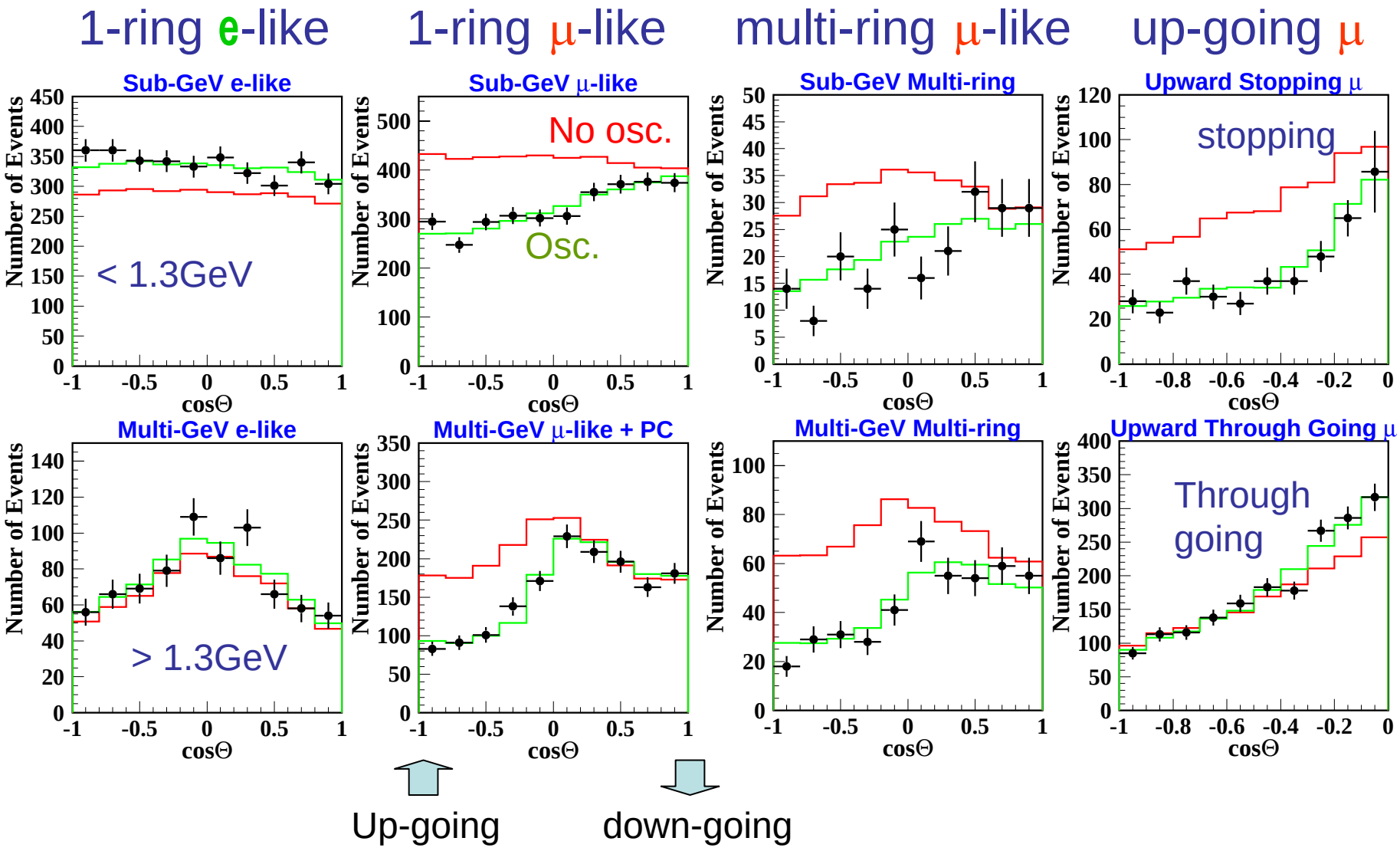


Color: timing

Size: pulse height

天頂角分布

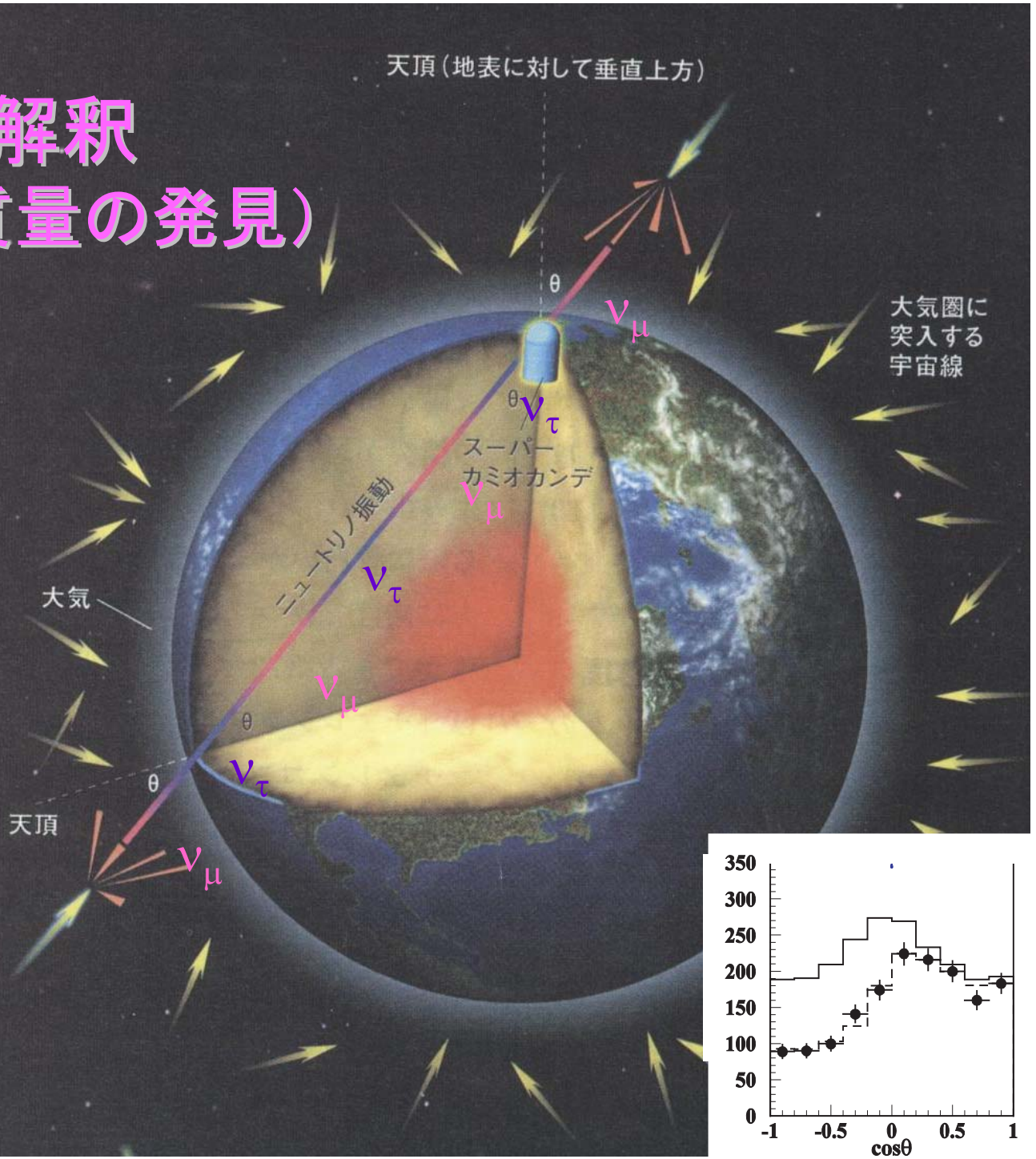
1489day FC+PC data + 1646day upward going muon data



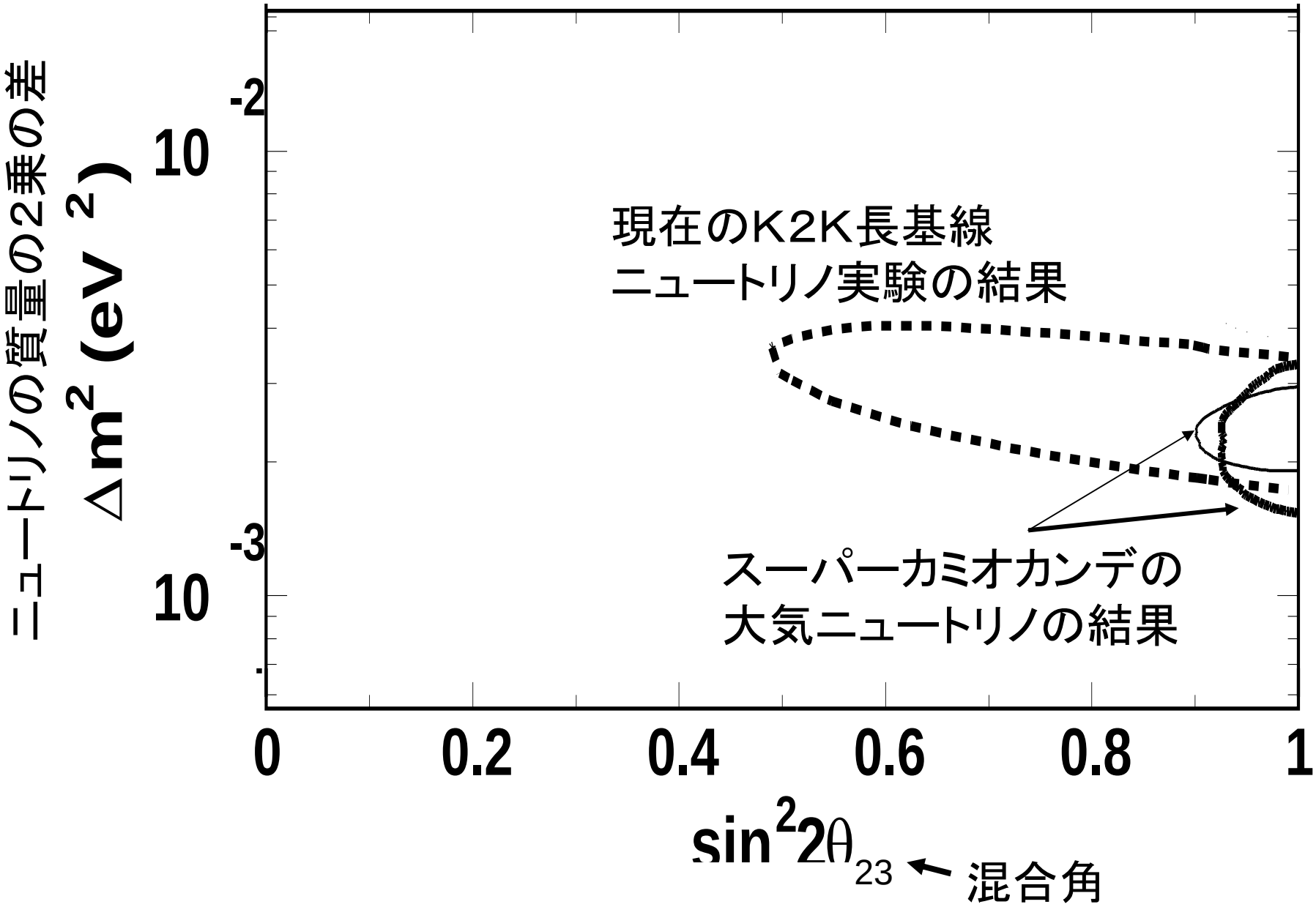
データの解釈
（ニュートリノの質量の発見）

（1998年）

ニュートリノは質量をもち、地球の反対側から来るミューニュートリノは長い距離を飛んでいる間に半分別なニュートリノ（タウニュートリノ）になって観測されていない。

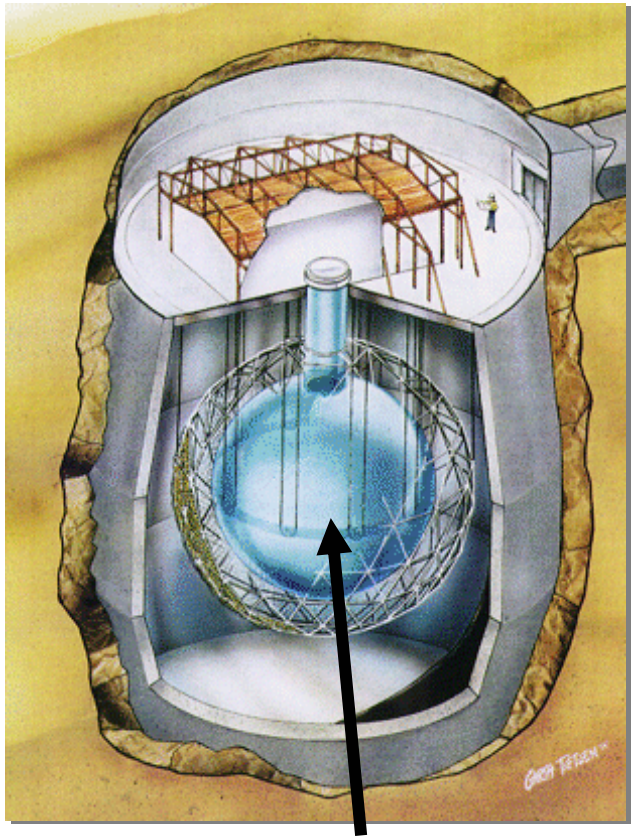


$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$振動パラメータの領域



寄り道：太陽ニュートリノ問題の解決とニュートリノ振動

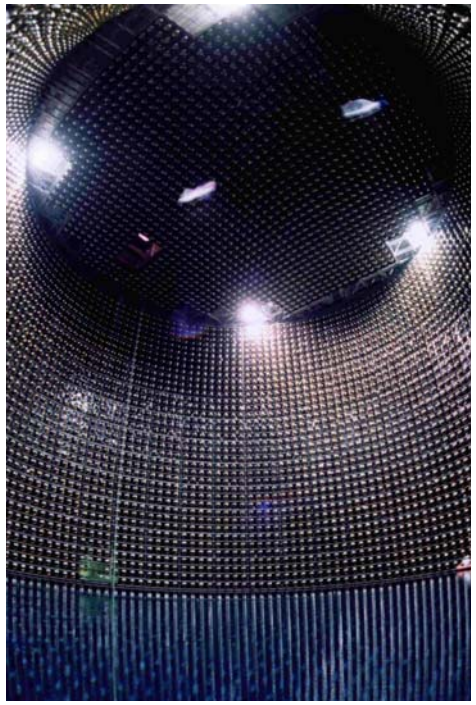
SNO（カナダ）



1000 トンの重水

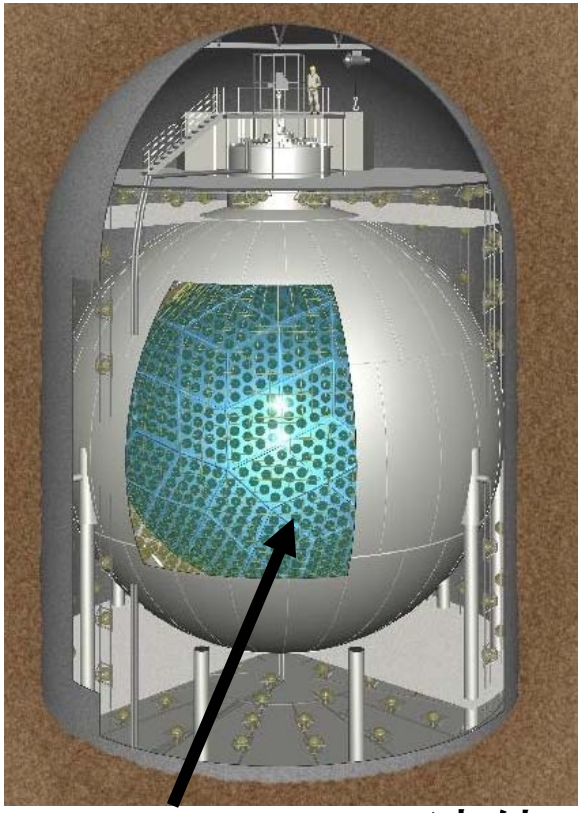
＋

スーパーカミオカンデ



＋

カムランド



1,000トンの液体シンチレーター

太陽ニュートリノの謎
＝電子ニュートリノがニュートリノ振動で他のニュートリノになっている。

(2001 - 4年)

物理の背景　ー超対称性を取り入れた大統一理論ー

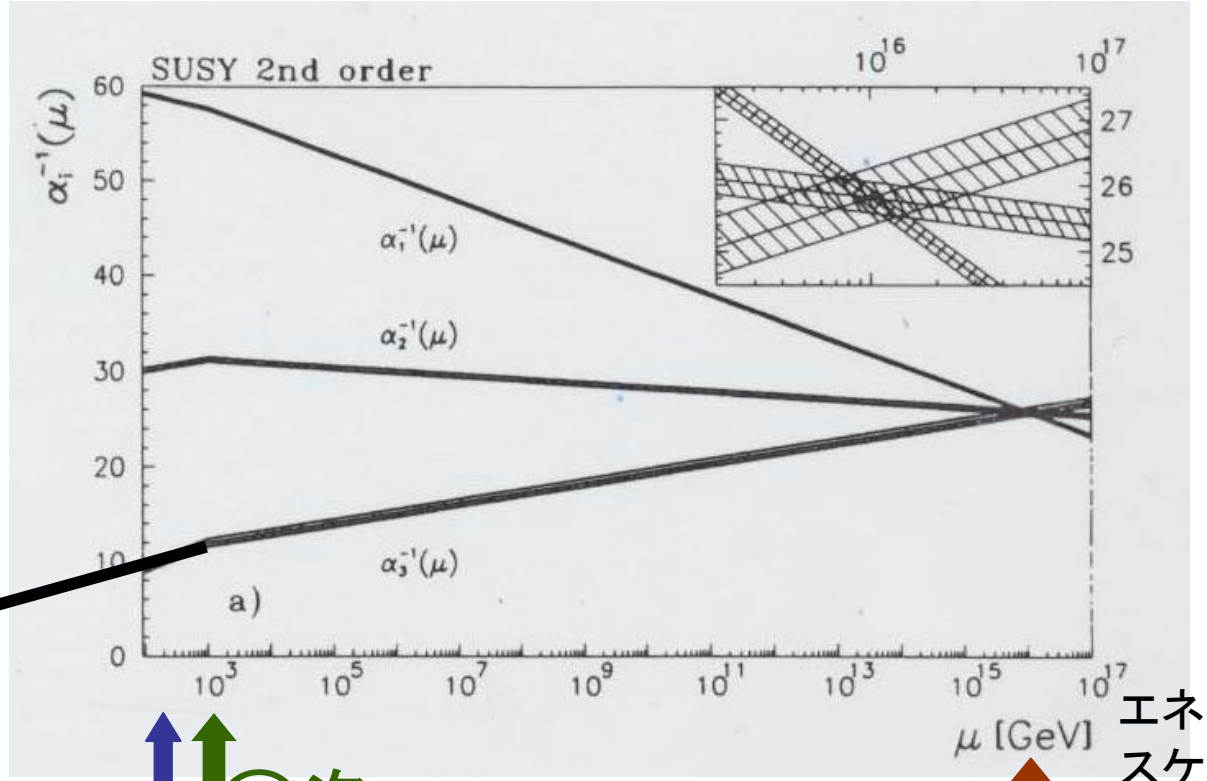
力の強さの逆数

電磁力

＋

弱い力

強い力



現在までの加速器(LEP, TEVATRON)

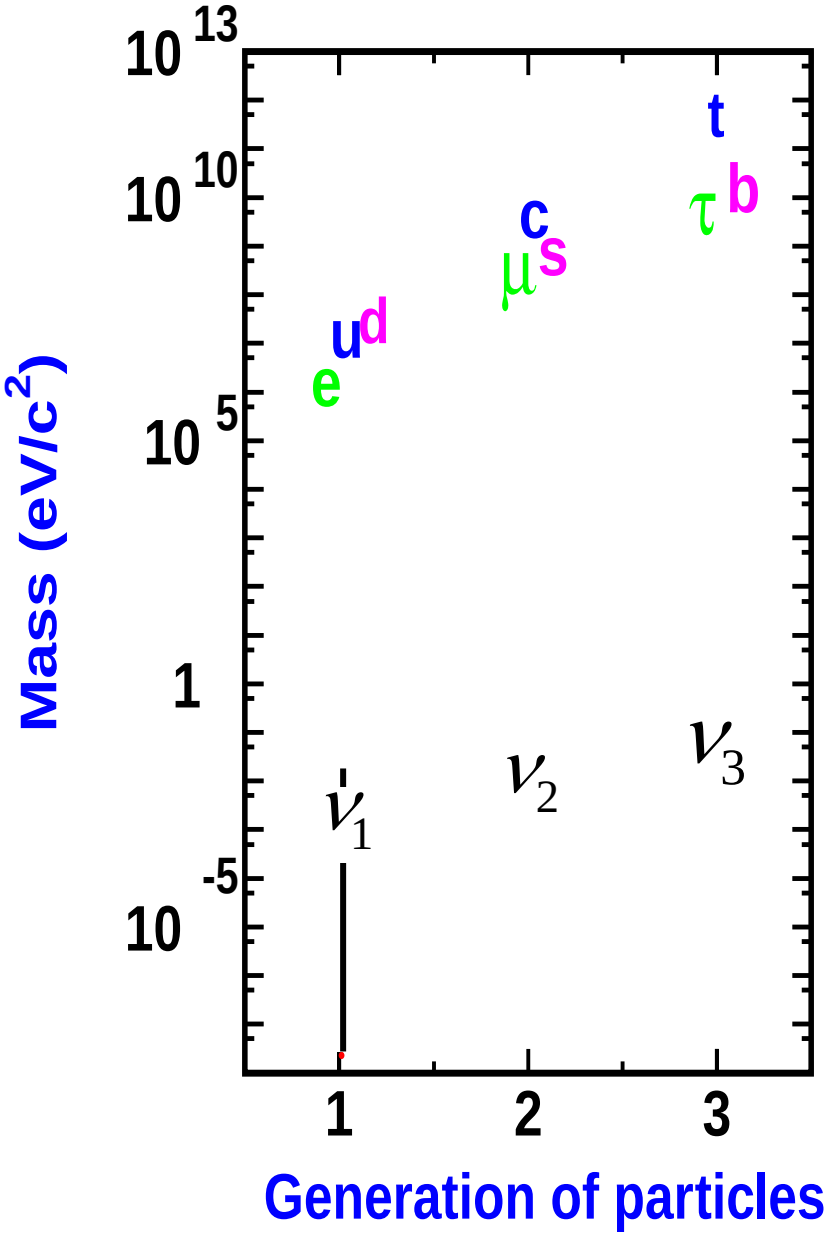
次世代の加速器(LHC)

エネルギースケール

大統一？

陽子崩壊の予言

ニュートリノと他の素粒子の質量



$$m_\nu = \frac{m_q^{\,2}}{m_N}$$

Seesaw mechanism (Yanagida、& Gelmann Ramond, Slansky, 1979)

Small neutrino mass implies the existence of super-heavy neutral particles

$m_{\nu 3}$=0.05eV, m_{top}=175GeV,

$m_N = O(10^{15}\text{GeV})$

大統一理論に関係?

物理の背景(2)

大統一理論:

素粒子の力の統一, クォークとレプトンの統一

クオークとレプトンの混合の類似性？

クォーク混合

ニュートリノ混合

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{CKM} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{MNSP} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$V_{CKM} \approx U_{MNSP} \ ?$$

（混合行列は3個の角度（と1個のCP位相）で表せるのでそれを比べる）

クォーク

$\theta_{12}=13^o$

$\theta_{23}=2.4^o$

$\theta_{13}=0.21^o$

全然違う！
何か理由？
もっと調べる

ニュートリノ

$\theta_{12}=33\pm3^o$

$\theta_{23}=45\pm8^o$

$\Theta_{13}<11^o$

1）どこまで45度に近いのか？

2）この角度はどのくらい小さいか？

3）νでもCPは破れているか？

今後のニュートリノ振動実験

近未来のニュートリノ振動実験

Δm^2を今までの実験
より数倍精度良く決定

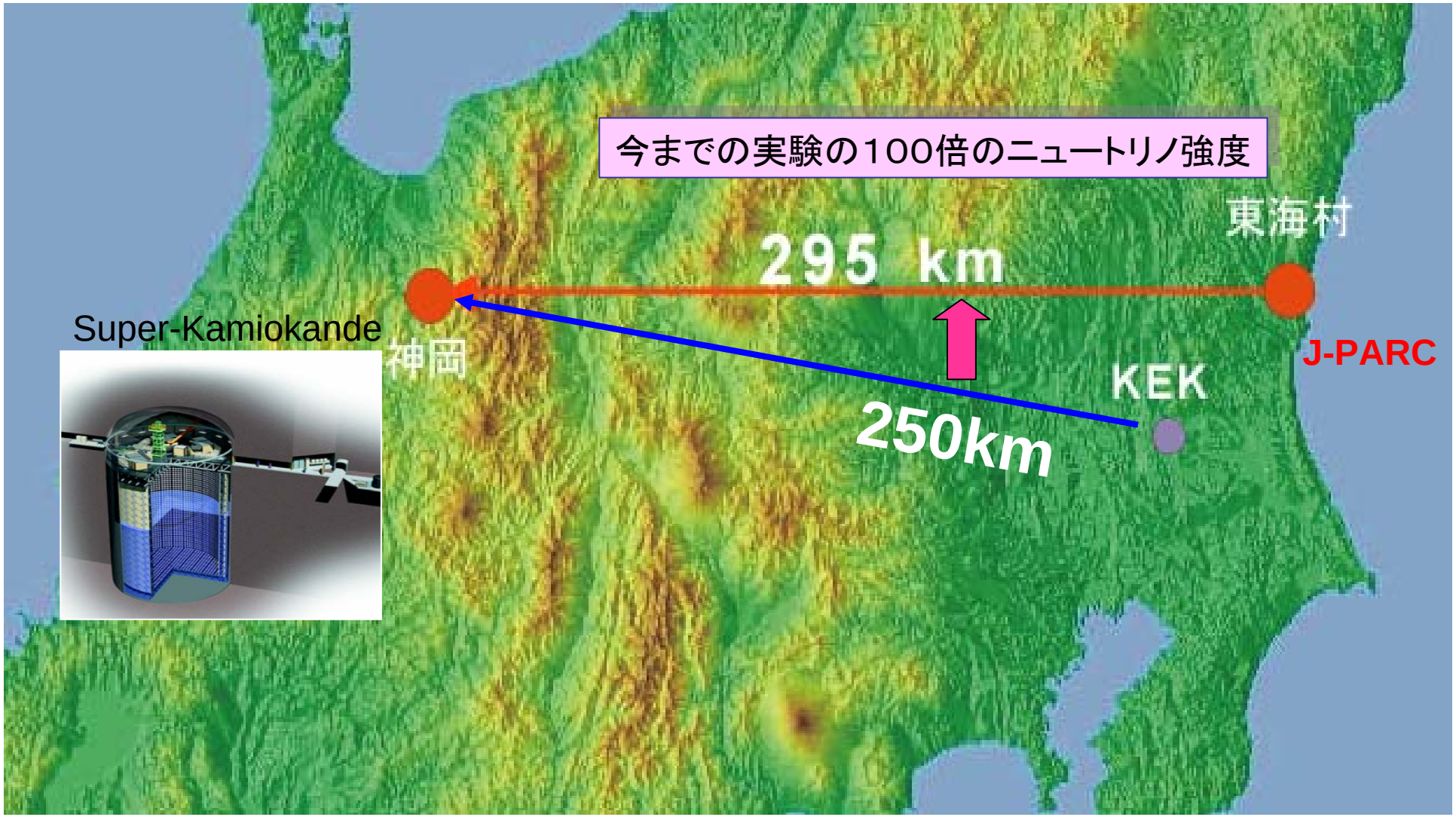
アメリカ:
2005年

ν_μが振動してできた
ν_τを測定(5年で約
10事象観測予定)

ヨーロッパ:
2006年

日本:
(1999年)
2009年

東海村と神岡間のニュートリノ振動実験
（次期T2K実験　2009年春～）

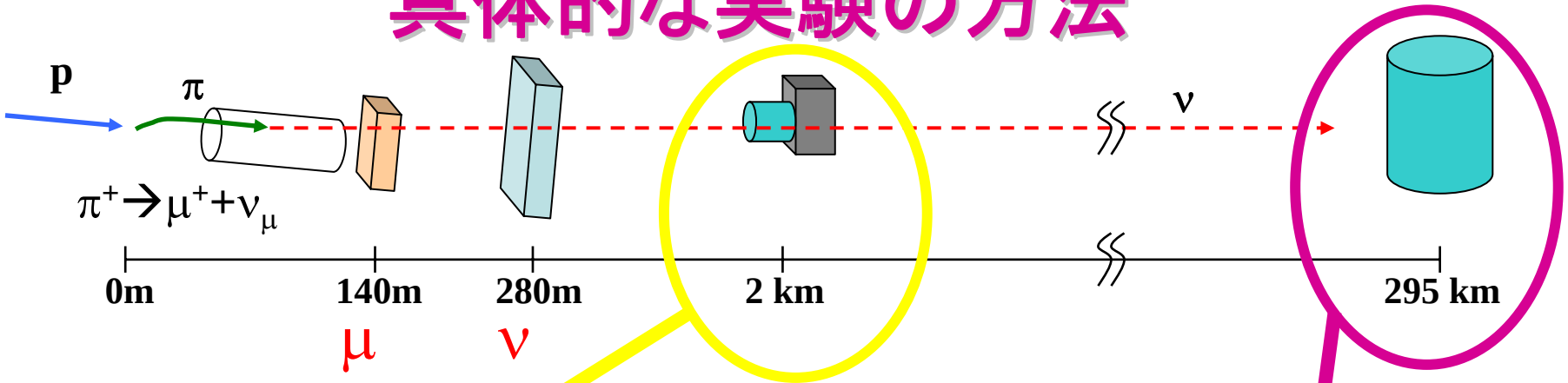


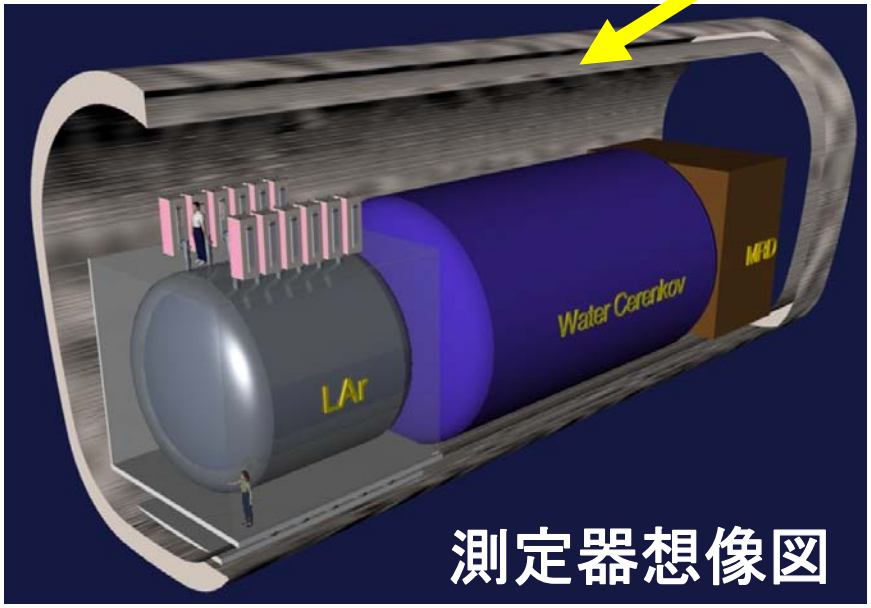
大強度陽子加速器（JPARC）

茨城県東海村

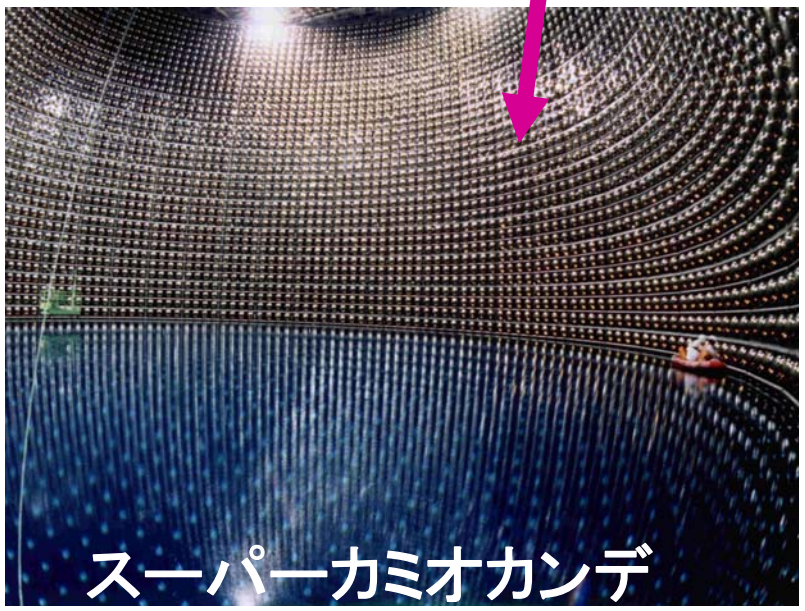
J-PARC 加速器建設風景

具体的な実験の方法



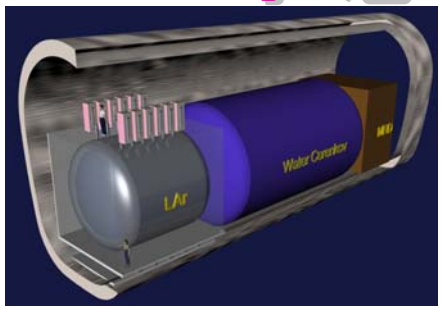


ニュートリノ振動する前のニュートリノを測定（特に電子ニュートリノ）

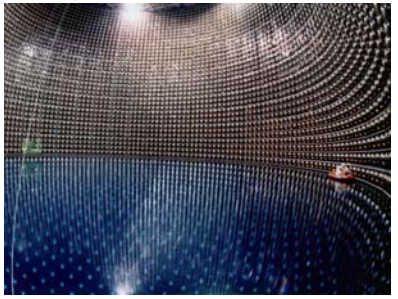


ニュートリノ振動後のニュートリノ反応（約10,000例）を調べる。

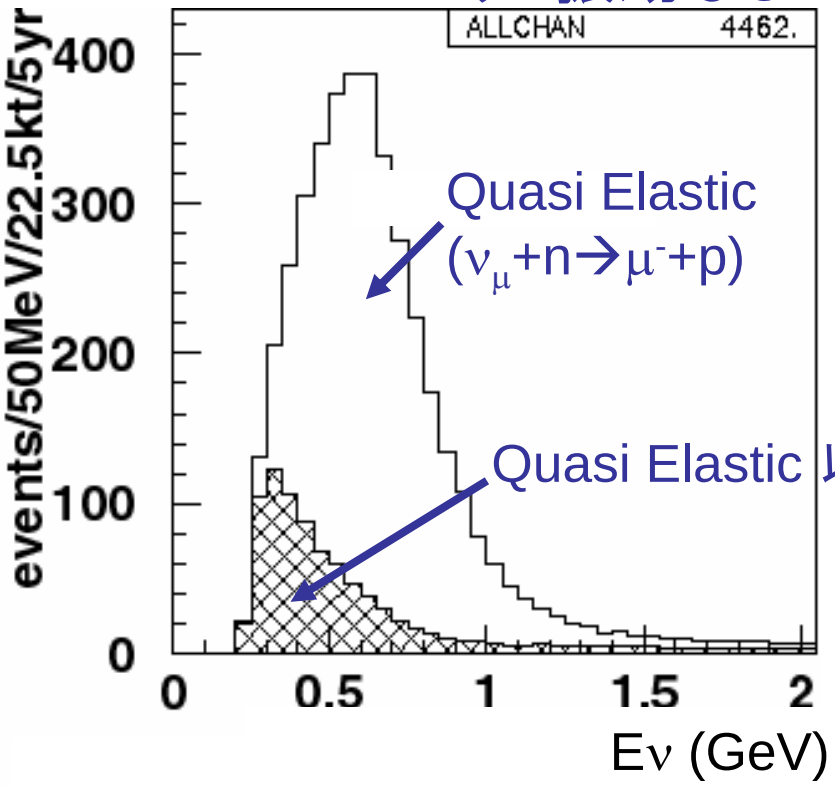
予想感度(1)($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$振動, θ_{23}の測定)



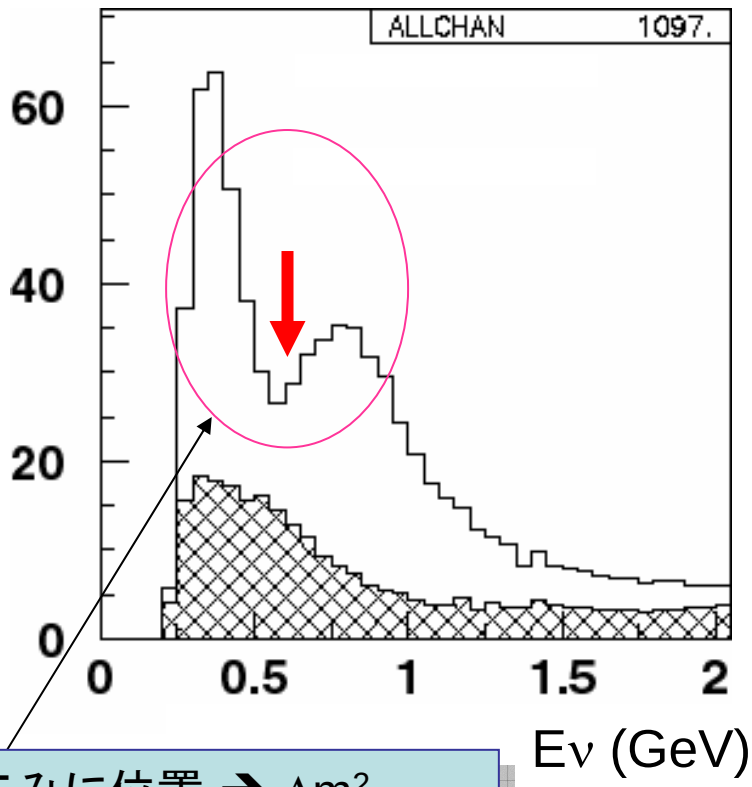
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cdot \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 L_\nu}{E_\nu}\right)$$



ニュートリノ振動なし



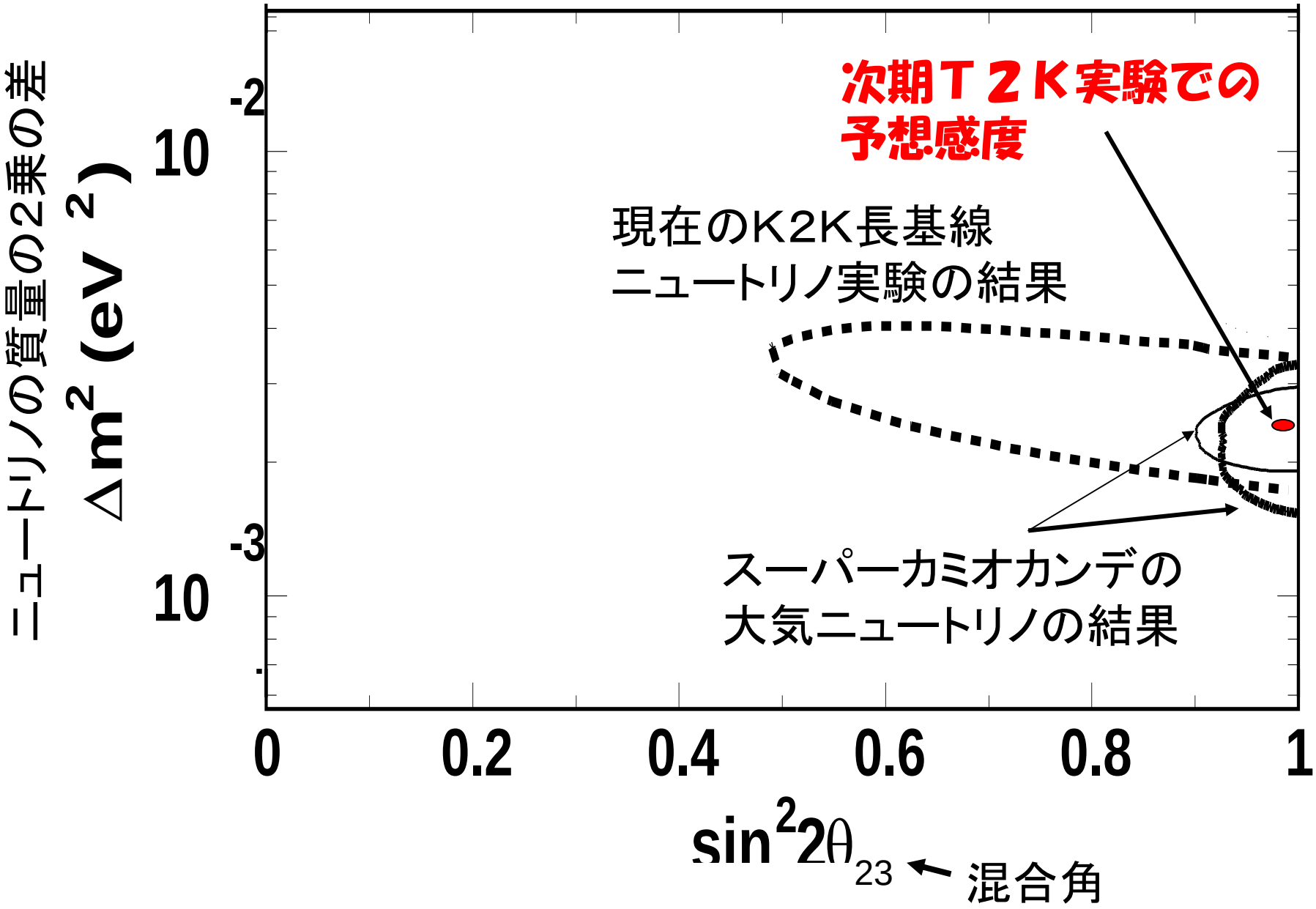
$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3}$ eV^2



へこみに位置 ➔ Δm^2

へこみの深さ ➔ $\sin^2 2\theta_{23}$

予想感度（1）（$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$振動, θ_{23}の測定）

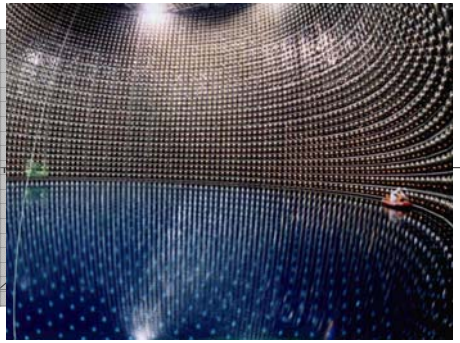


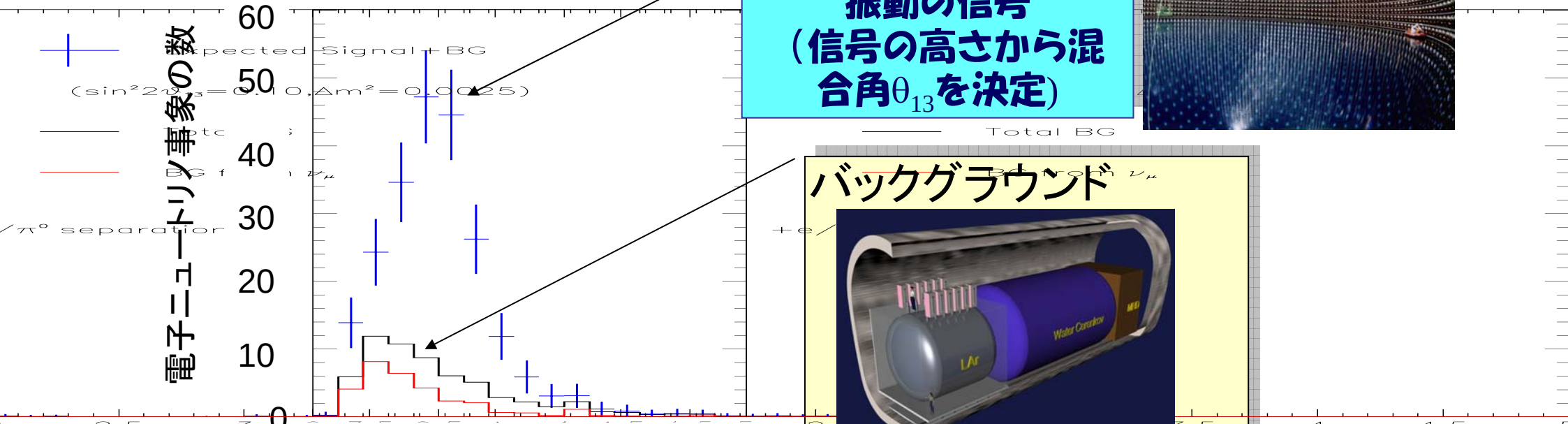
予想感度(2)($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$振動, θ_{13}の発見)

もし未発見の第3の混合角θ_{13}があれば(どのくらいの大きさかは別として) ν_μからν_eへのニュートリノ振動として観測されるはず。 ➔これを探す。(今までの実験の20倍の感度)

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

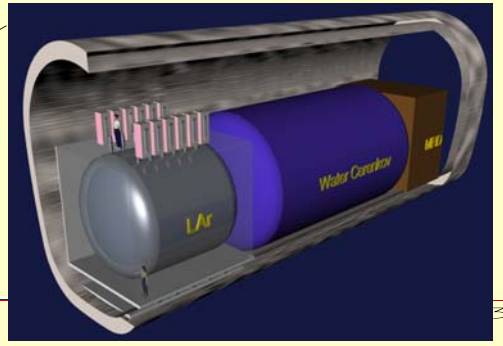
予想される$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$振動の信号(信号の高さから混合角$\theta_{13}$を決定)





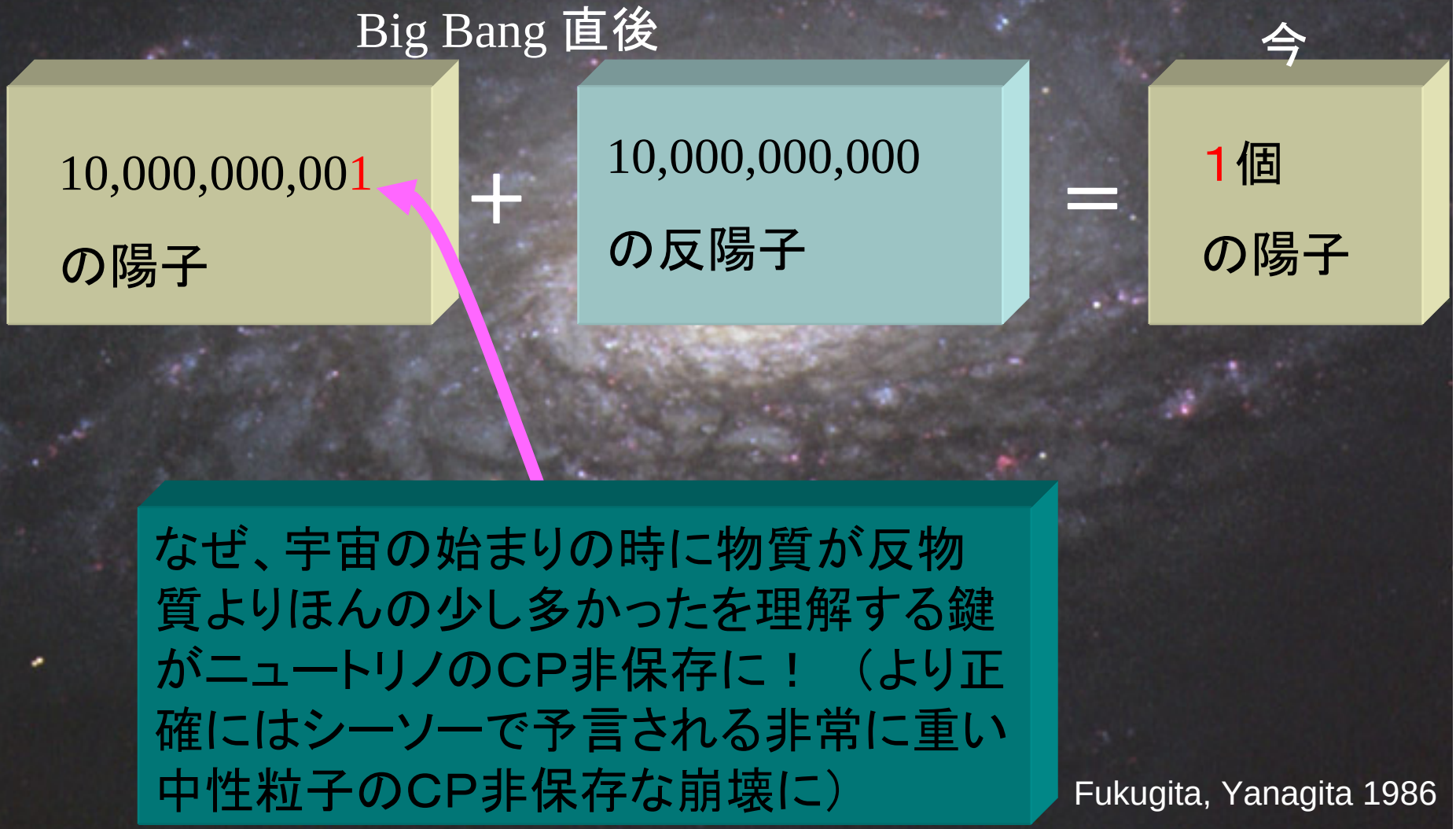
ニュートリノのエネルギー(GeV)

バックグラウンド



で振動がおこる前に測定

その先の研究：
なぜ宇宙は物質でできていて反物質はないのか？



ニュートリノ振動確率とCP非保存

いろいろ測定の方法はあるが、$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$と反ニュートリノの振動で調べる

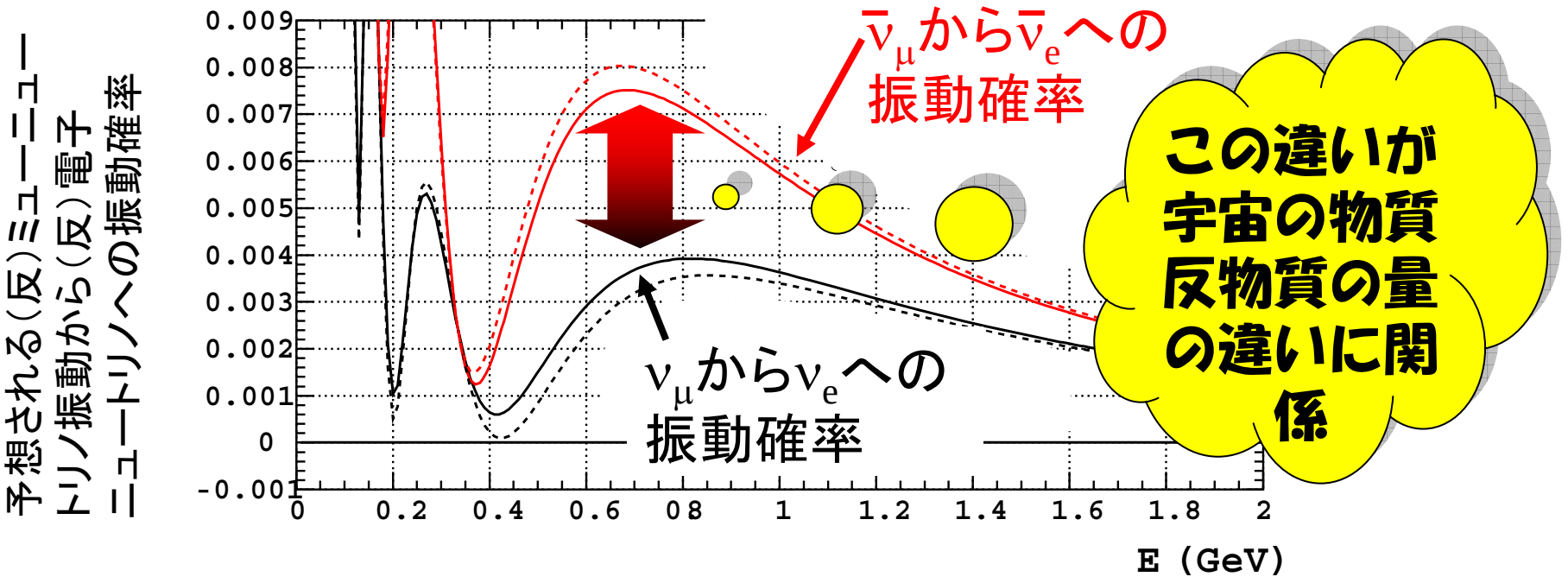
最も荒い近似

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

もう少し精度よい近似

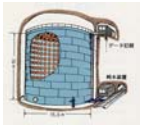
$$\begin{aligned}
P[\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e(\bar{\nu}_e)] &= \sin^2 2\theta_{13} s_{23}^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) - \frac{1}{2} s_{12}^2 \sin^2 2\theta_{13} s_{23}^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E}\right) \\
&+ 2J_r \cos\delta \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E}\right) \mp 4J_r \sin\delta \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) \\
&\pm \cos 2\theta_{13} \sin^2 2\theta_{13} s_{23}^2 \left(\frac{4Ea(x)}{\Delta m_{31}^2}\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) \\
&\mp \frac{a(x)L}{2} \sin^2 2\theta_{13} \cos 2\theta_{13} s_{23}^2 \sin\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E}\right) + c_{23}^2 \sin^2 2\theta_{12} \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)^2
\end{aligned}$$

ニュートリノと反ニュートリノの振動確率



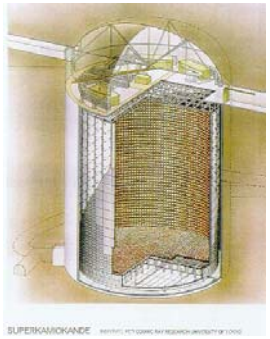
約100万(今のK2K実験の1万倍！)のニュートリノ反応と反ニュートリノ反応を調べて宇宙の物質と反物質の非対称性の原因となっている自然法則の研究をする。

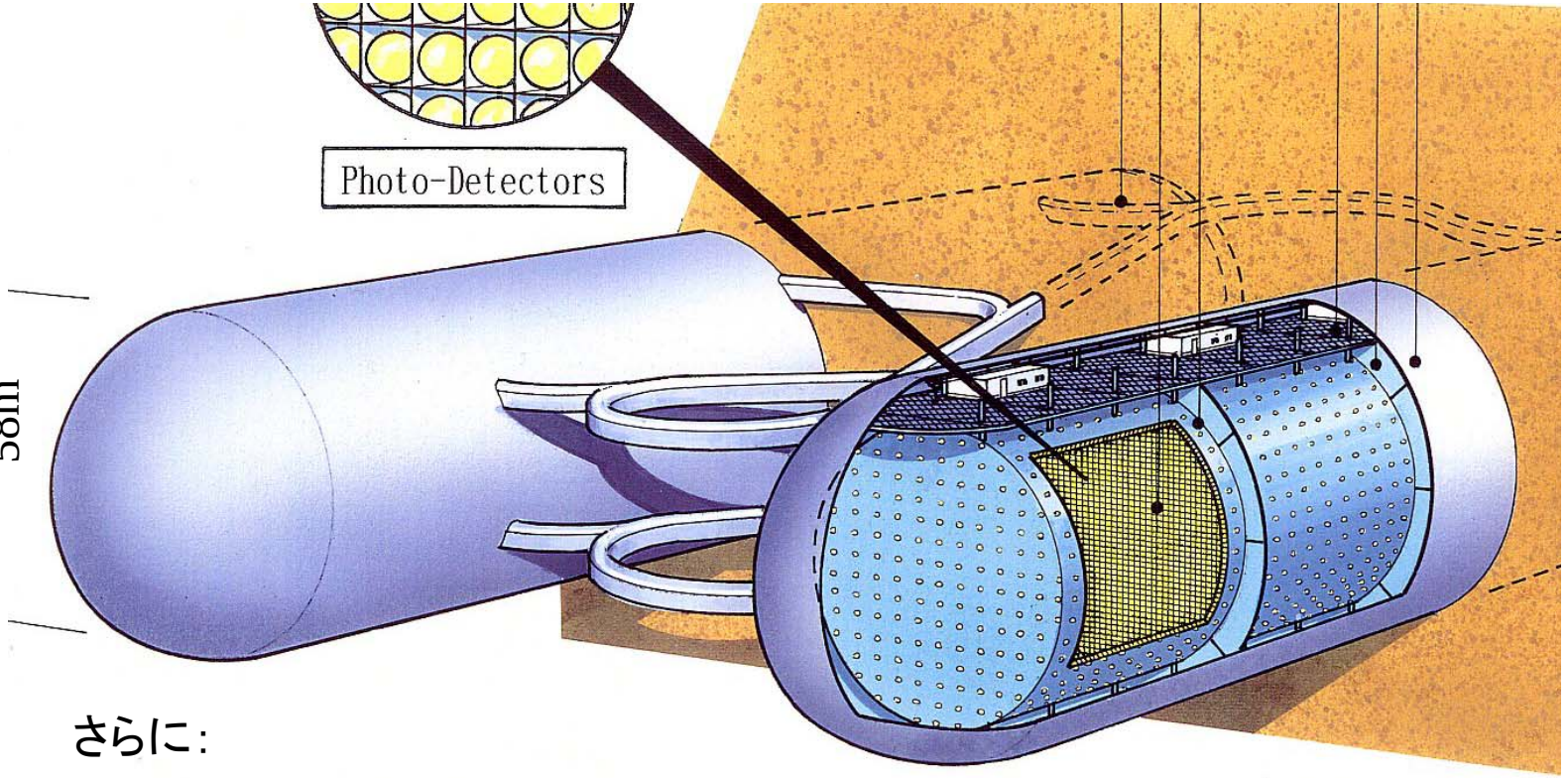
ニュートリノのCP非保存を測定するための装置：
100万トンニュートリノ検出器
ハイパーカミオカンデ



カミオカンデ

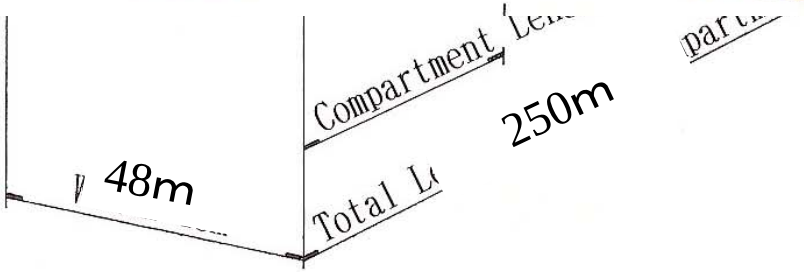
スーパー
カミオカンデ





さらに：

陽子崩壊、超新星ニュートリノ、
大気ニュートリノによるニュートリノ
振動研究、 などなど



まとめ

- ニュートリノ物理は質量発見の時代から、ニュートリノの質量と混合を通して、新たな物理を探る時代へ。
- また、ニュートリノのCP非保存は宇宙のバリオン数にも関連している可能性。
- 日本は、今後もこの分野で世界の先端を走ると思われる。

もし、質問等あれば下記まで:
梶田　隆章
東大宇宙線研究所宇宙ニュートリノ観測情報融合センター（@柏）
kajita@icrr.u-tokyo.ac.jp, http//www-rccn.icrr.u-tokyo.ac.jp/kajita/index.html

End