ニュートリノ物理学と関連する物理

物理学特別講義B(東京理科大学)

梶田隆章 (宇宙線研究所)(4回目)

講義の概要

基礎

ニュートリノの質量とニュートリノ振動実験

大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ振動実験

太陽ニュートリノ、原子炉ニュートリノ

将来のニュートリノ振動実験

(ほとんど数式は使わないで講義)

前回までの復習

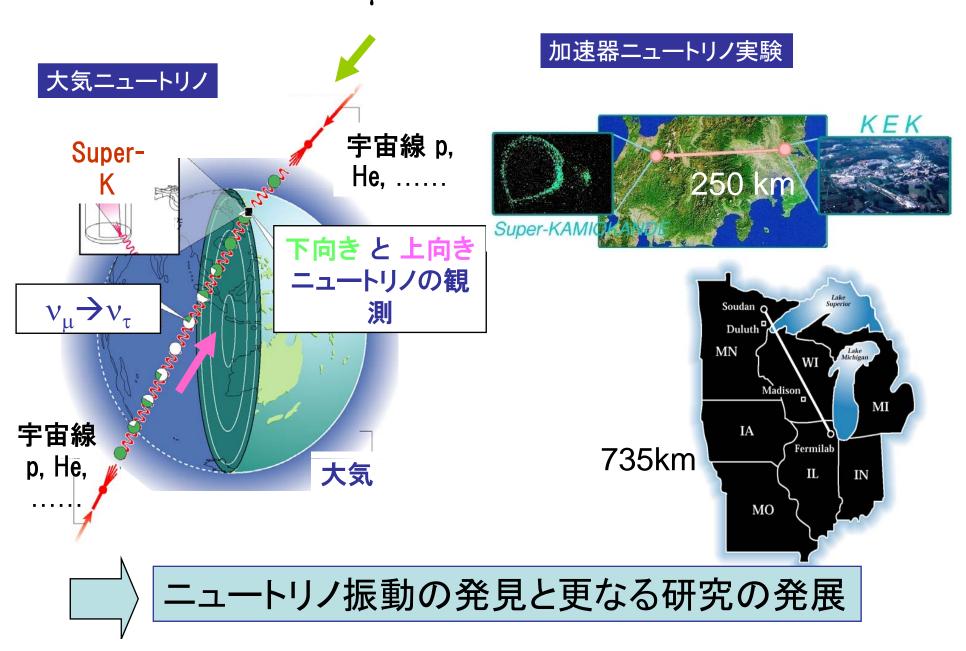
- ニュートリノの質量は標準理論ではOと仮定されて来たが、小さいニュートリノの質量は大統一理論などの大きいエネルギースケールの物理を示唆し、非常に大切。
- ニュートリノに質量があるとニュートリノ振動という現象が起こるはずであり、これを用いてニュートリノの質量を調べる。

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

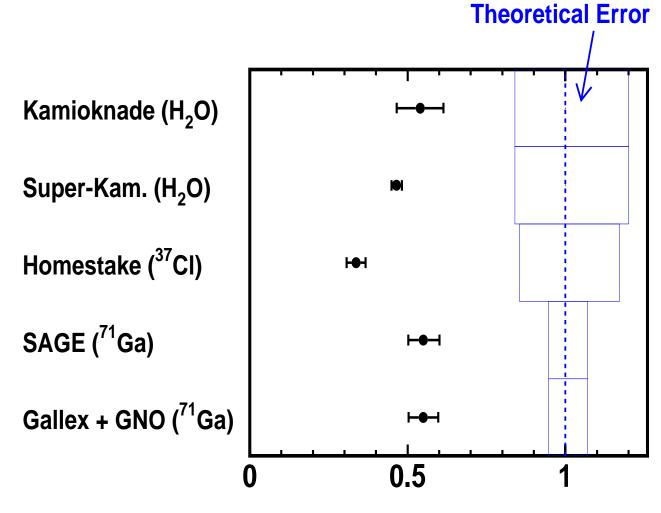
$$\Xi\Xi \mathcal{C}, \quad \Delta m^{2} = m_{\nu 1}^{2} - m_{\nu 2}^{2}$$

$$\theta : \text{mixing angle}$$

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動



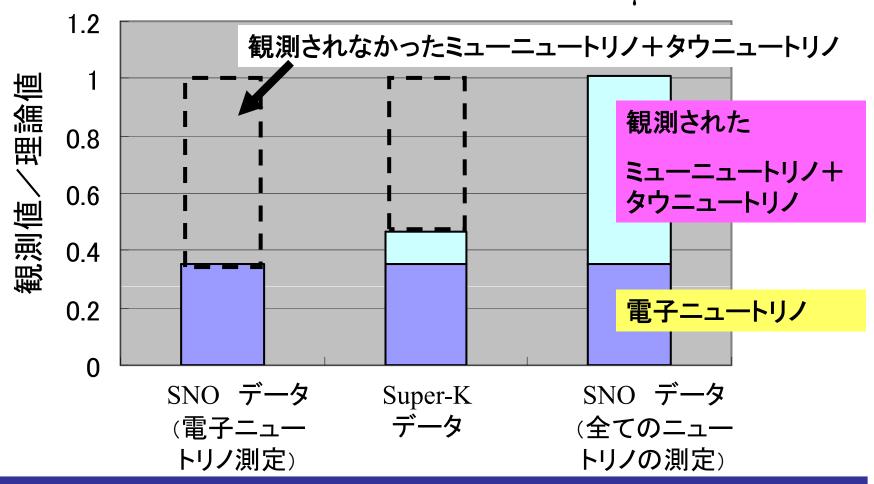
太陽ニュートリノ実験と $v_e \rightarrow (v_\mu, v_\tau)$ 振動



Data / Standard Solar Model

観測され太陽ニュートリノのフラックスが少ない -> 太陽ニュートリノ問題

太陽ニュートリノ実験と $v_e \rightarrow (v_u, v_\tau)$ 振動



太陽で生成されるニュートリノは絶対電子ニュートリノだけなので、 ミューニュートリノ+タウニュートリノが観測されたということは ニュートリノ振動以外にありえない。→ 太陽ニュートリノ問題が ニュートリノ振動によるものだったという間違いようのない証拠!

本日

原子炉ニュートリノ実験 (既に前回少し話しはじめてます)

原子炉からのニュートリノ

原子炉内:
$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow X_1 + X_2$$

 X_i : このとき、ほぼ常に中性子の数 > 陽子の数

一方、このような軽い原子核では安定なのはおおよそ、

中性子の数 = 陽子の数

従って:
$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X'+\beta^{-}+\overline{\nu}_{e}$$

のような崩壊をする。この際、反電子ニュートリノが放出される。

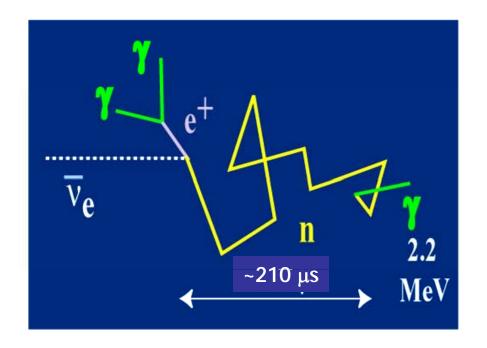
約8MeV以下の反電子ニュートリノ

反電子ニュートリノの観測(液体シンチレータ)

$$\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



(energy, Ev<8MeV)

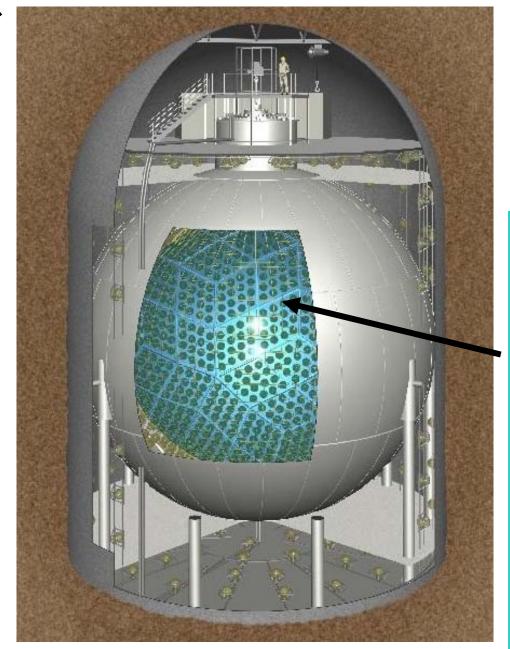


$$n + p \rightarrow d + \gamma(2.2 MeV)$$

e⁺ と γ の信号の観測

カムランド 実験

(カミオカンデ跡地に東北大学を中心に建設された高性能ニュートリノ検出器)



1,000トンの 液体シンチ レーター(発 光物質)

(チェレンコフ 光の50倍程 度の光量、 従って、低エ ネルギーの 観測がやり やすい)

カムランド実験

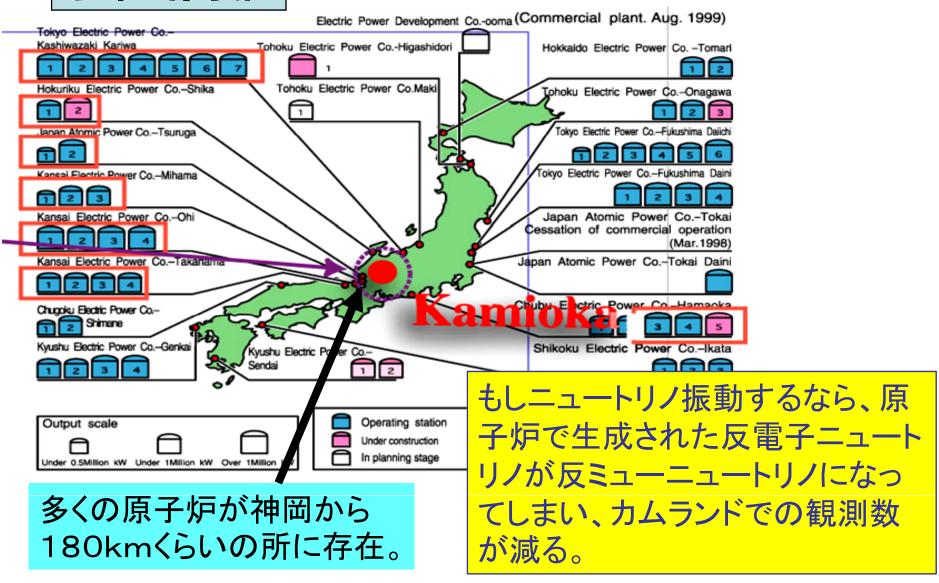


光電子増倍管

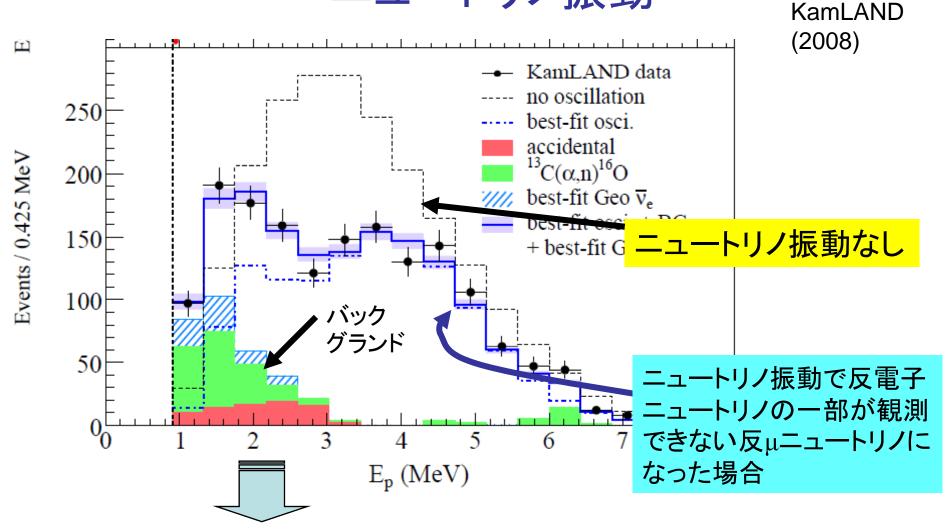
1,000トン液体シンチレータを保持するバルーン

カムランド実験とニュートリノ振動

日本の原子炉



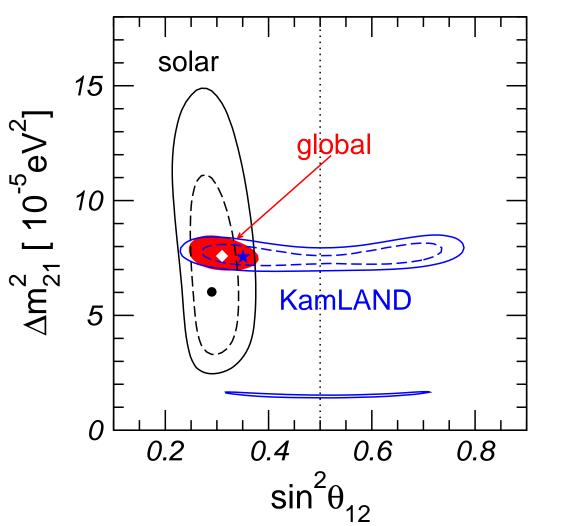
カムランドで観測されたニュートリノ信号とニュートリノ振動



この結果で最終的に太陽ニュートリノ問題の最終解決

ニュートリノ振動のパラメータ領域

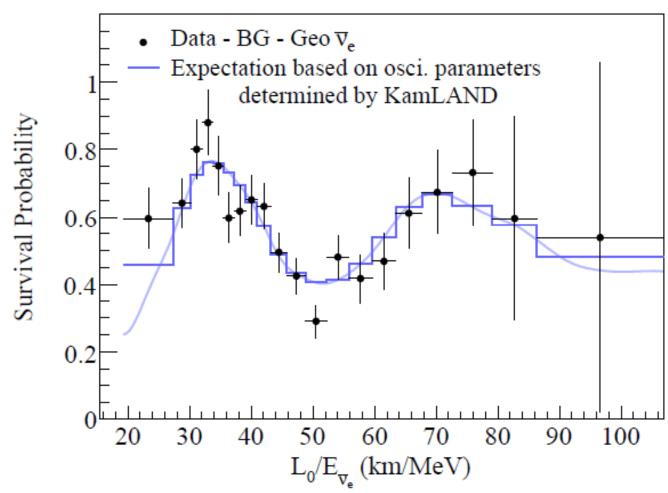
$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27\Delta m^2 L_{\nu}}{E_{\nu}} \right)$$



ニュートリノ振動!

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

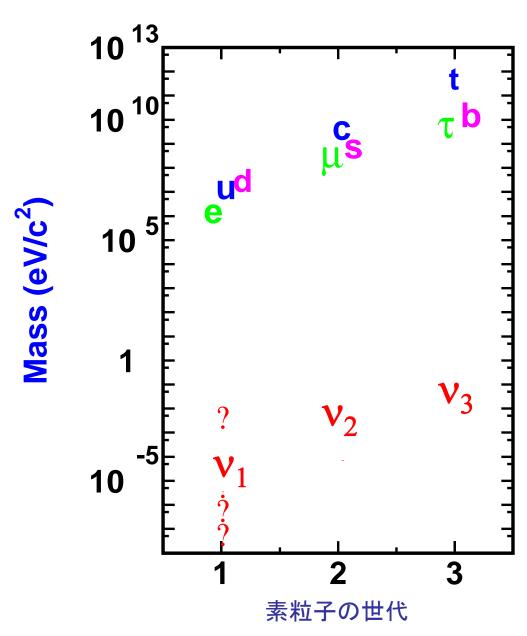
カムランド2008



太陽ニュートリノと原子炉ニュート リノ実験のまとめ

- 1960年代末からあった「太陽ニュートリノ問題」は塩素、ガリウム、水を使った実験で確認された。
- ニュートリノ振動の可能性が考えられたが、太陽理論の間違えという可能性を否定できず、決定的な結論が上記の実験からは得られなかった。
- 2001, 2002年に重水を用いたSNO実験(とスーパーカミオカンデ)実験により、太陽理論によらずにニュートリノ振動が太陽ニュートリノ問題の原因であることが理解された。
- 電子ニュートリノのニュートリノ振動は原子炉ニュートリ ノ実験カムランドよって明確に確認された。

ニュートリノと他の粒子の質量



ニュートリノは他の素粒子に比べて10桁以上軽い。



特別な理由?

シーソー機構
$$m_{_{\scriptstyle V}}^2=rac{m_{_{\scriptstyle D}}^2}{M_{_{\scriptstyle N}}}$$

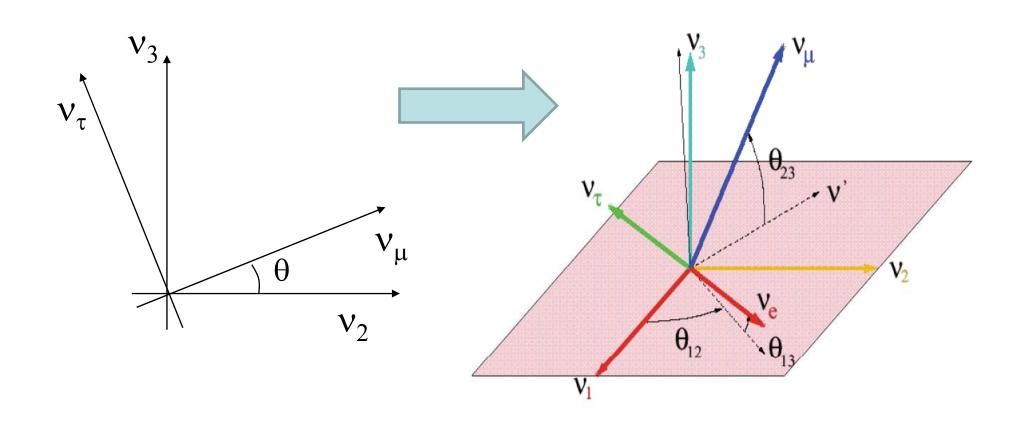
 m_D はクオークやレプトンの質量、 M_N は 重い中性粒子(非常に重いニュートリノ のような粒子)。観測されたニュートリノ の質量とクオークやレプトンの質量をを 代入すると、第3世代のニュートリノに対 しては、 M_H = 10^{13-15} GeV。この値は大統 一理論の値に近い。たぶんニュートリノ の質量は大統一理論に関係した物理。

将来

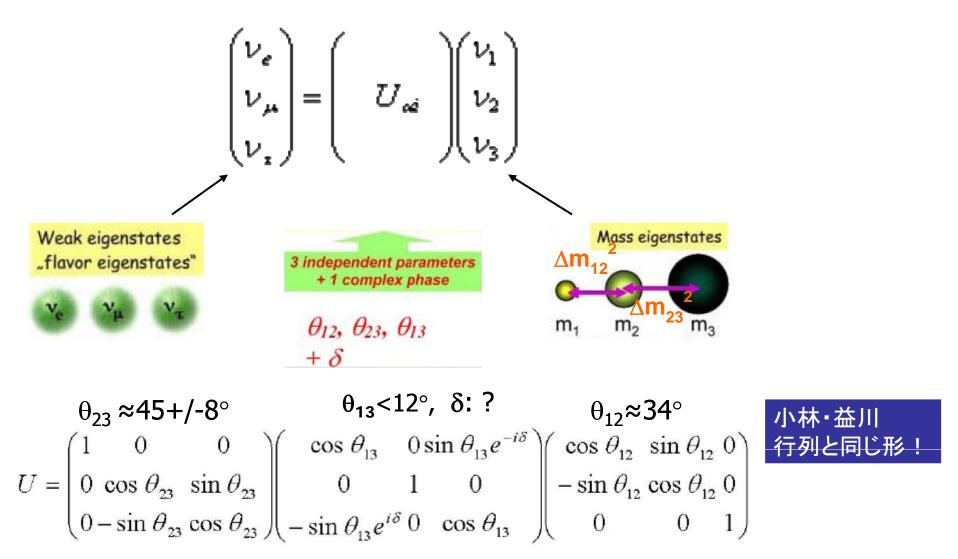
2世代振動から3世代振動へ

今までの議論:2世代 ニュートリノ振動 しかし、現実 にはニュート リノは3種類

3世代ニュートリノ振動



3世代 ニュートリノ振動



MNSP(Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo) 混合行列

いままでの振動実験の結果のまとめ

arXiv: hep-ph/0405172v6 (2007)

中心值 ±1σ

(この測定にもっとも貢献した実験)

$$\Delta m_{21}^2$$
 (7.6 ± 0.2) 10⁻⁵ eV²

 $\sin^2 \theta_{12} \quad 0.32 \pm 0.023$

 $|\Delta m_{31}^2| \quad (2.4 \pm 0.15) \, 10^{-3} \, \text{eV}^2$

 $\sin^2 \theta_{23} \quad 0.50 \pm 0.063$

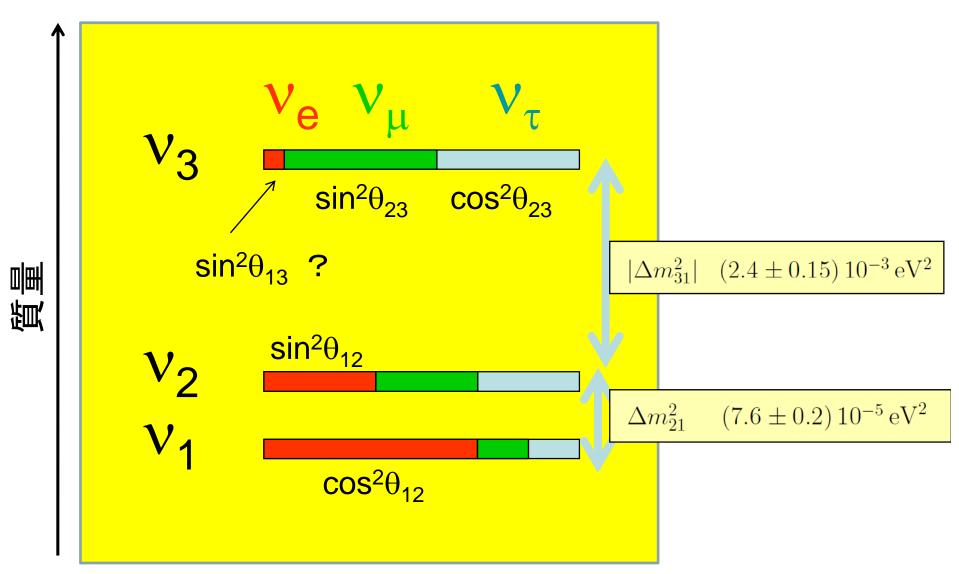
KamLAND

SNO

MINOS

SK atm

今までに得られた結果のまとめ(2)



θ_{13}

電子ニュートリノ消失実験

$$P(\nu_e \to \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 L}{E} \right)$$

→原子炉ニュートリノ振動実験

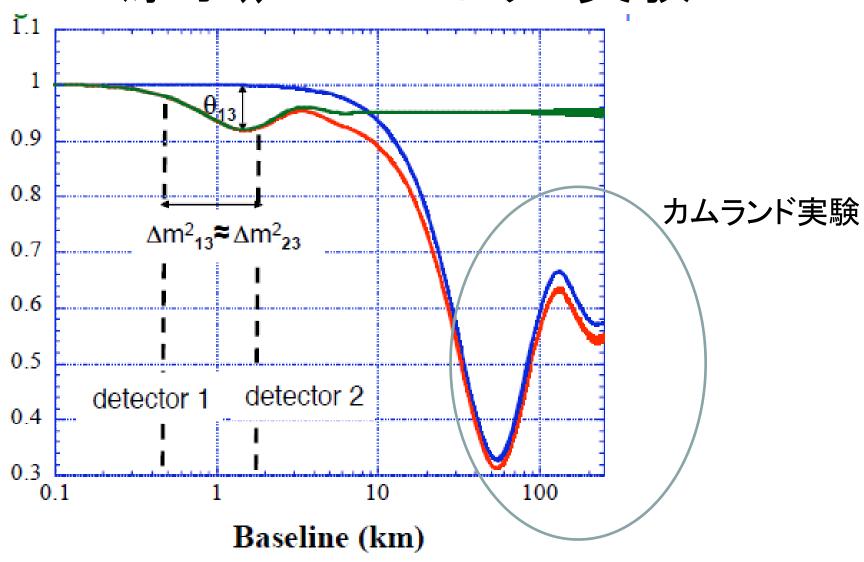
電子ニュートリノ出現実験

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

△m₁₂2の項を無視して

- →加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験
- →大気ニュートリノ実験

原子炉ニュートリノ実験

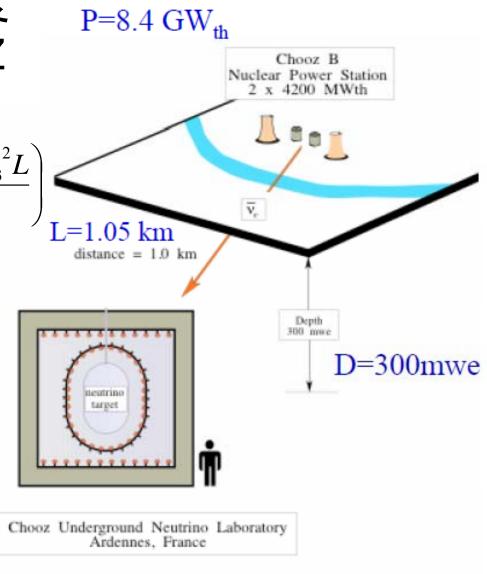


θ₁₃に現在まで最も感度 のあった実験:CHOOZ

 $P(\nu_e \to \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 L}{E} \right)$

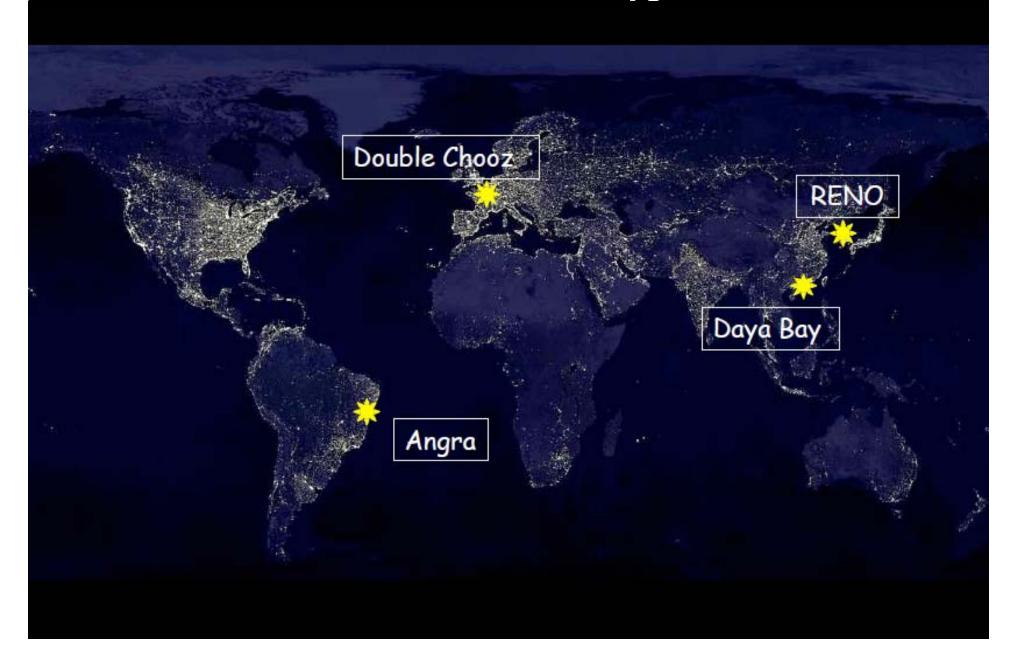
データ/振動なしの予想値 = 1.01±0.028(統計誤差) ±0.027(系統誤差)

飛距離1kmでは電子 ニュートリノが振動で 減っている証拠なし。 → 混合角(θ₁₃)の上限値 θ₁₃ はわりと小さい



m = 5 tons, Gd-loaded liquid scintillator

次世代原子炉 813 実験



どうやってよりよい実験を行うか?

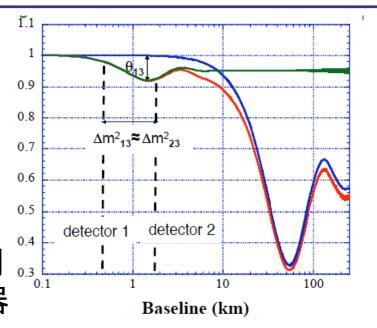
CHOOZ: データ/予想値 = 1.01±0.028(stat)±0.027(syst)

統計誤差:

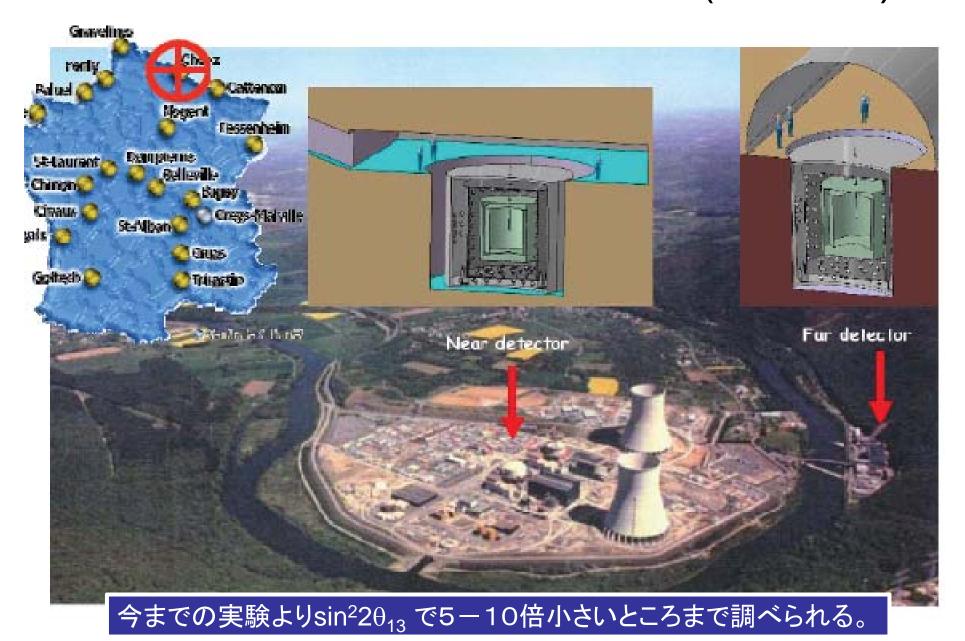
- ・より大きい測定器
- ・より長い実験期間
- •より強い原子炉をつかう

系統誤差:

- ・振動の前後でニュートリノを観測
- ・振動の前後でニュートリノ測定器 は同じものにする
- 宇宙線バックグラウンドを避けるために地下に
- 放射性不純物の少ない装置(物質)
-

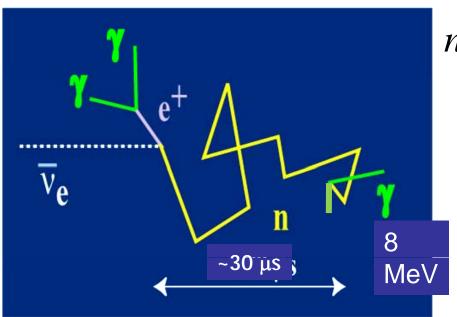


Double CHOOZ 実験提案 (例として)



反電子ニュートリノの観測(カムランドとの違い)

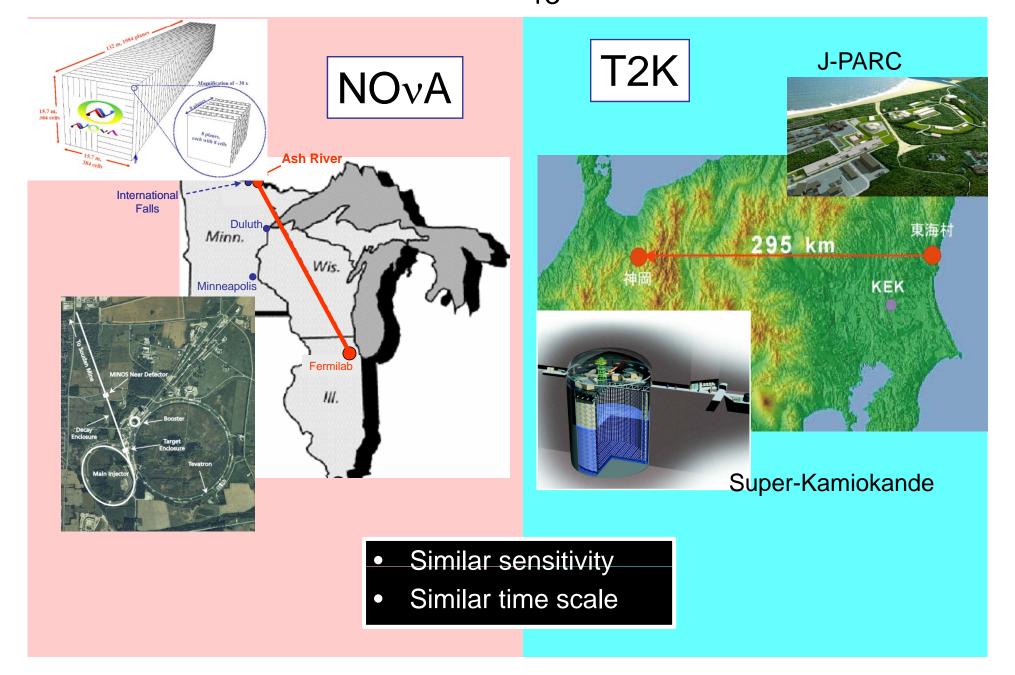
$$\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



$$n + Gd \rightarrow Gd + \gamma(\sum_{E_{-\gamma}} = 8MeV)$$

e⁺ と γ の信号の観測

近未来の長基線加速器 θ_{13} ニュートリノ振動実験



将来の長基線ニュートリノ振動実験 (例)T2K実験 2009年春-



J-PARC 加速器建設



K2K実験とT2K実験の違い(加速器)

| | T2K | MINOS | K2K |
|--------------------------|-------|------------------|--------|
| E(GeV) | 40 | 120 | 12 |
| 強度(10 ¹² ppp) | 330 | 40 | 6 |
| 繰り返し(Hz) | 0.292 | 0.53 | 0.45 |
| ビームパワー(MW) | 0.75 | 0.41(現 状0.18) | 0.0052 |

距離とエネルギーと測定器の大きさが同じなら、 ニュートリノ反応数はビームパワーに比例する

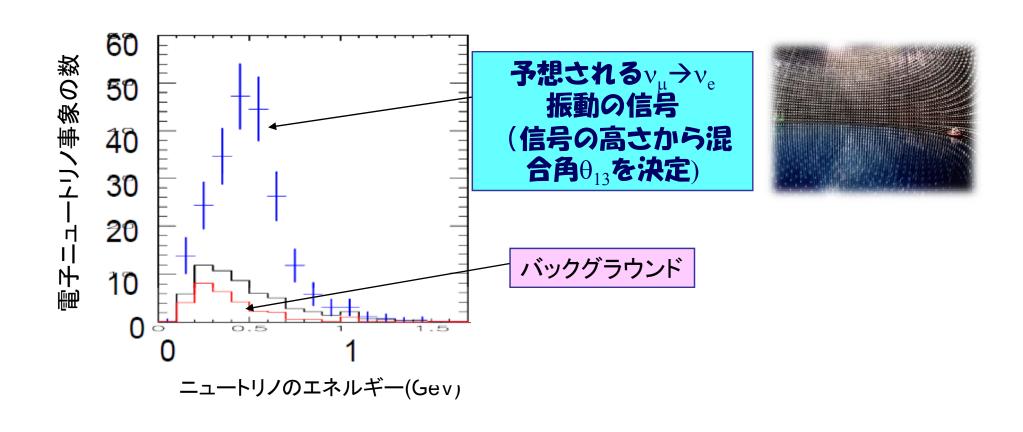
T2K 実験の準備 (@J-PARC) Target station Horn (test) Muon **Monitoring Pit** 295 km to Section **Preparation Section** Super Kamiokande 110m 2km detector (Lol submitted) SCFM at Arc Section **Near Neutrino Detector Beam Dump Decay Volume**

The experiment will start in 2009.

予想感度(未発見の第3の振動角(θ_{13})の発見)

もし未発見の第3の混合角θ₁₃があれば(どのくらいの大きさかは別として) **ミューニュートリ**/から**電子ニュートリ**/へのニュートリノ振動として観測されるはず。

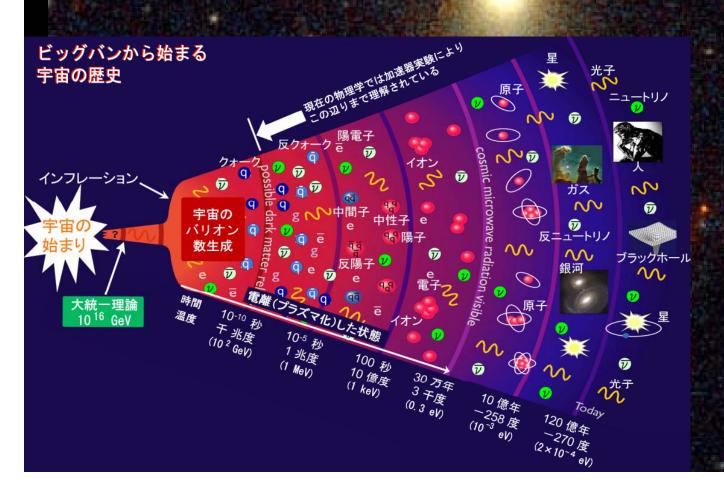
 \rightarrow これを探す。(今までの実験の10-20倍の感度 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$ 位)



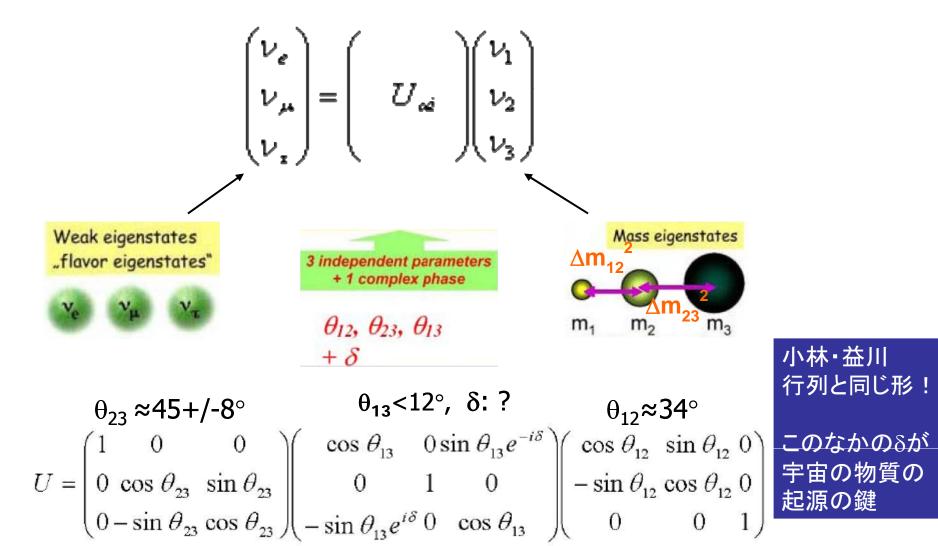
さらにその先の未来

大きな疑問: なぜ宇宙は物質でできていて反物質はないのか?

この疑問に答える鍵がニュートリノに! (ニュートリノの振動と反ニュートリノの振動の違いを探す)

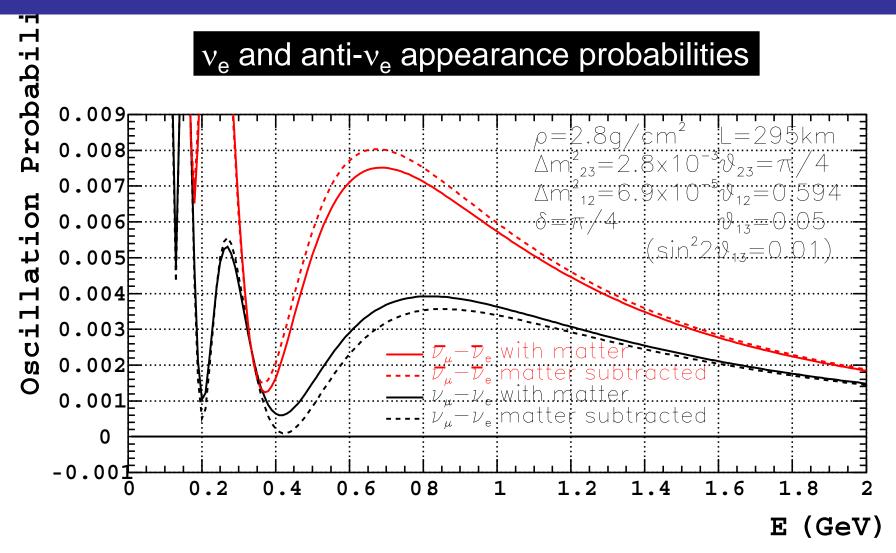


3世代 ニュートリノ振動



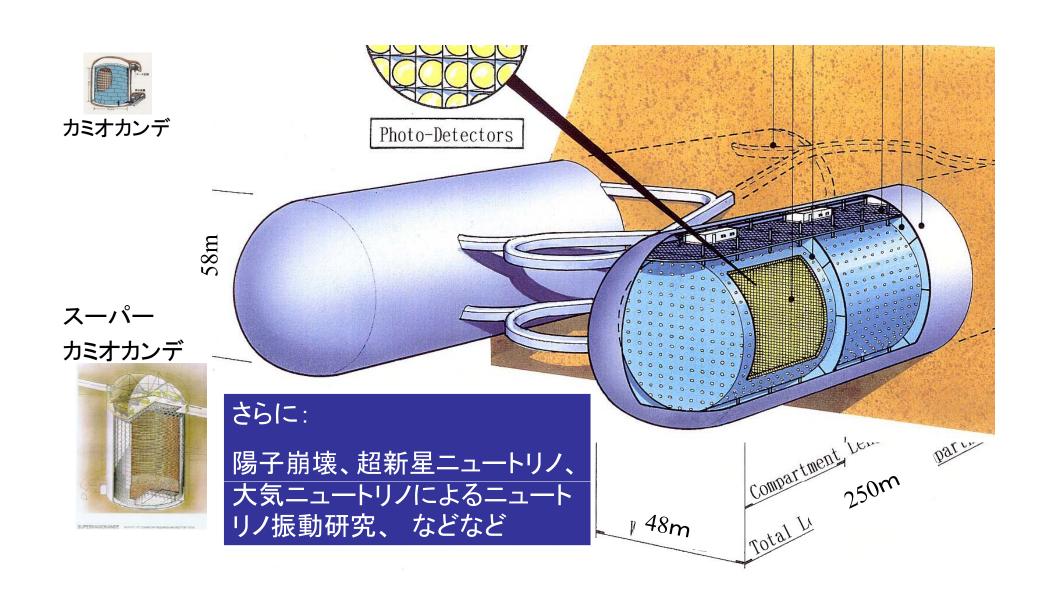
MNSP(Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo) 混合行列

ニュートリノと反ニュートリノ振動の違い?



このようなニュートリノ振動と反ニュートリノ振動の違いが測 定できれば宇宙の物質の起源の解明の大きな手がかりに!

100万トンニュートリノ検出器 ハイパーカミオカンデ



なぜ実験?

1990年頃の一般的な予想

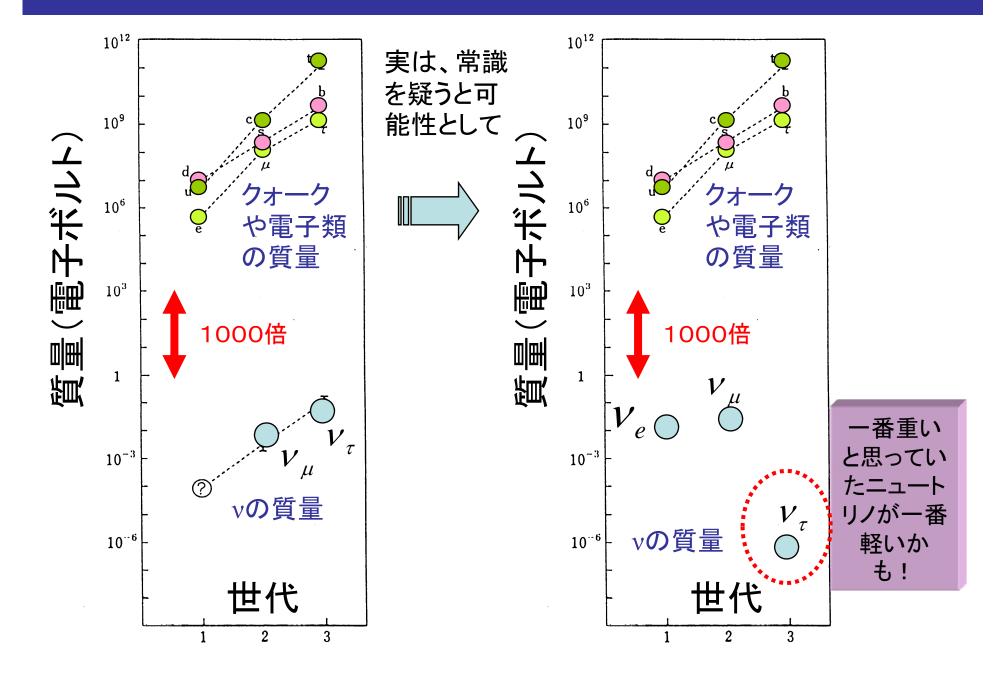
- → 大気ニュートリノ異常は実験のあやまりのはず。(ニュートリノ振動で数学的にはデータの説明できるかもしれないが、観測されたデータを説明するには「大きい混合角」が必要であり、考えられない)
- → 太陽ニュートリノ問題は、ニュートリノ振動かもしれないけど、「小さい 混合角」でおこるニュートリノ振動であろう。
- → 宇宙のダークマター(暗黒物質) はニュートリノかも。

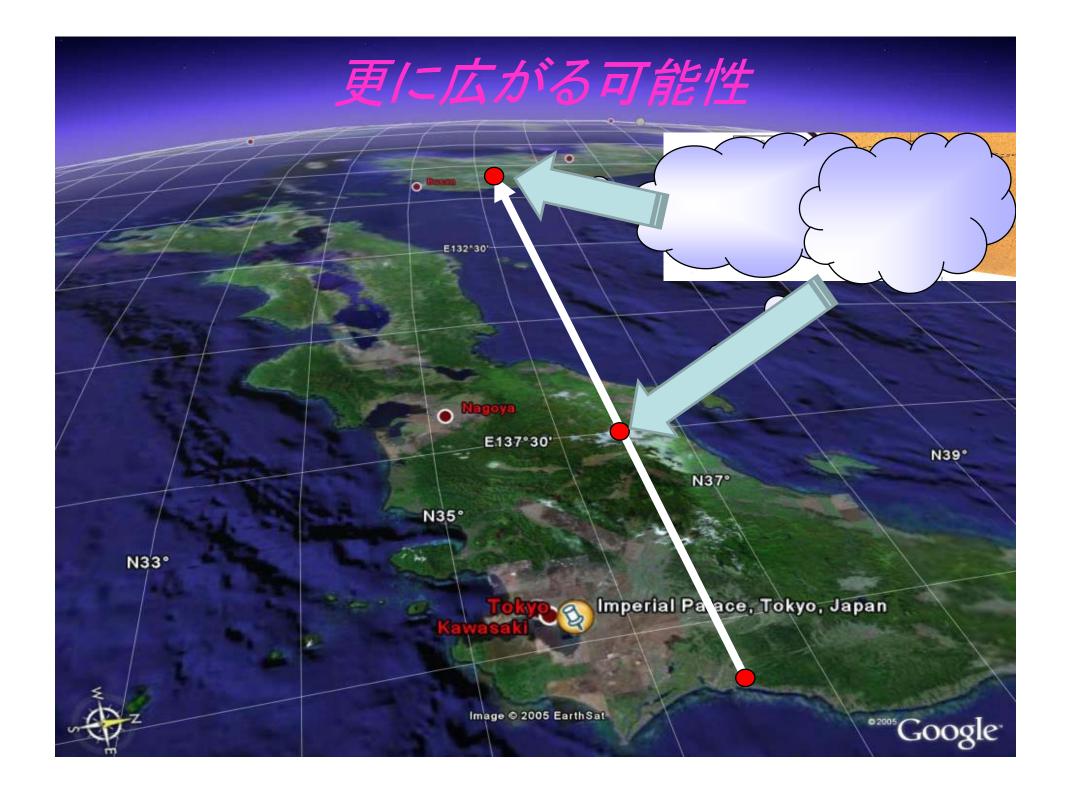
今知っていること

→この考えははずれ。実 験があっていて、「大きい 混合角」でのニュートリノ振 動だった。

- → ニュートリノ振動だった けど、「小さい混合角」の ニュートリノ振動の予想は はずれ。
- → はずれ。ニュートリノは 質量を持っていたけど、軽 すぎた。

ということで、常識をもう一度疑ってみると...





この講義のまとめ

- 非常に成功した素粒子の標準理論を超える物理の研究が世界中で行われている。
- ニュートリノの小さい質量が観測され、それは大統一理論などに関連する数少ない物理量として非常に重要と考えられている。
- 更にニュートリノの物理は宇宙の物質の起源に結び ついている可能性がある。
- 今後もニュートリノ質量に関連したいろいろな研究が進展するものと考えられる。

終り

ファイルは後ほど千葉先生に渡しておきます。

質問は、<u>kajita@icrr.u-tokyo.ac.jp</u>まで。