ニュートリノのCP非対称性に関する研究

島根大学(M2)

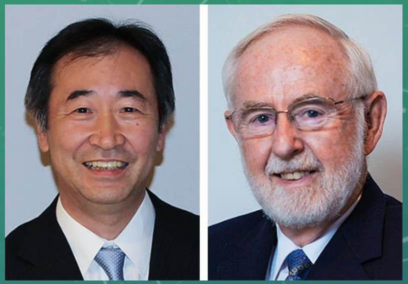
島田恭輔

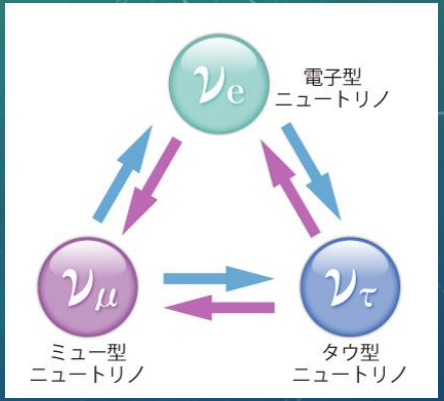
共同研究者

波場直之(島根大)、石田裕之(島根大)、山口雄也(島根大、北大)

2016/3/27 松江素粒子物理学研究会

ニュートリノには質量がある！
(2015年ノーベル賞-ニュートリノ振動)



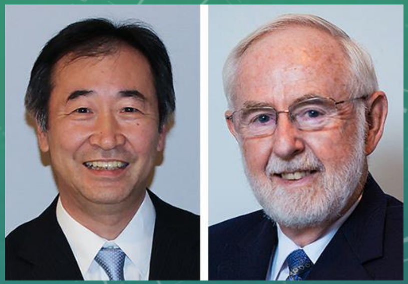


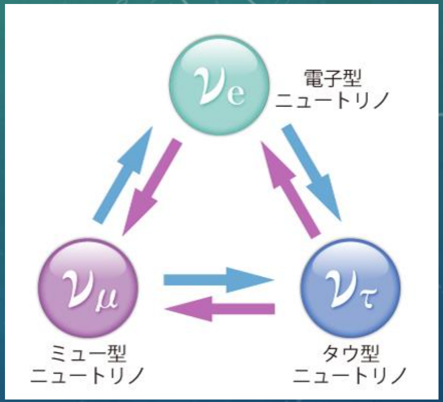
SMではニュートリノはmaslessだと仮定されている

ニュートリノ振動現象が発見
→ニュートリノに質量がなければ起こりえない現象

必然的に、ニュートリノには質量が存在することが判明

ニュートリノには質量がある！
(2015年ノーベル賞-ニュートリノ振動)

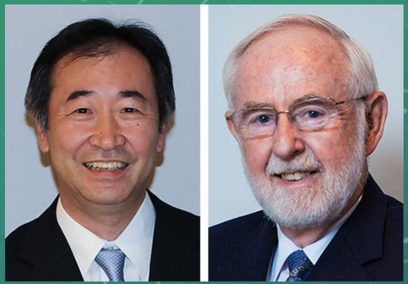




しかし

ニュートリノの質量生成機構は未解明。。

ニュートリノには質量がある！
(2015年ノーベル賞-ニュートリノ振動)



↓

ニュートリノの質量を生成する機構として、SMの粒子よりも重い粒子(高エネルギーの物理)を導入する場合

$$\delta\mathcal{L}^{d=6} = c^{d=6}_{\alpha\beta}(\overline{l_{L\alpha}\tilde{\phi}})i\gamma^{\mu}\partial_{\mu}(\tilde{\phi}^{\dagger}l_{L\beta})$$

一般的に有効理論での運動項に新たな項が加わり、運動項が修正されることが考えられる　[arXiv:0707.4058]

$$i\bar{\nu}_{L\alpha}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}(\delta_{\alpha\beta}+\epsilon_{\alpha\beta})\nu_{L\beta}$$

目的

ニュートリノ質量生成機構を考えた場合に起こりうる補正を考慮して、

$$i\bar{\nu}_{L\alpha}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}(\delta_{\alpha\beta}+\epsilon_{\alpha\beta})\nu_{L\beta}$$

CP非対称性という量を模型によらない数値解析によって評価する。

将来のニュートリノ実験やニュートリノ質量生成機構解明に向けての示唆を与える。

$$i\bar{\nu}_{L\alpha}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}(\delta_{\alpha\beta}+\epsilon_{\alpha\beta})\nu_{L\beta}$$

$$\left[\begin{array}{l} \epsilon_{\alpha\beta} = |\epsilon_{\alpha\beta}|e^{i\phi_{\alpha\beta}} \\ \\ \nu_{L\alpha} \to \nu'_{L\alpha} \equiv (\delta_{\alpha\beta}+\epsilon_{\alpha\beta})^{\frac{1}{2}}\nu_{L\beta} \end{array}\right.$$

$$|\nu_{\alpha}> = U_{\alpha j}|\nu_j>$$

$$\Downarrow$$

$$|\nu_{\alpha}> = (\mathbf{1}+\epsilon_{\alpha\beta})U_{\beta j}|\nu_j> = N_{\alpha j}|\nu_j>$$

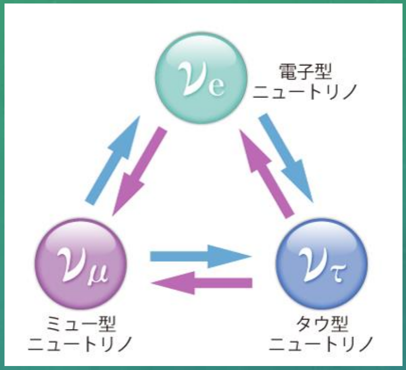
$$|\epsilon_{\alpha\beta}| = |(NN^{\dagger})_{\alpha\beta} - (UU^{\dagger})_{\alpha\beta}|$$

例）Unitarity violation due to heavy particles

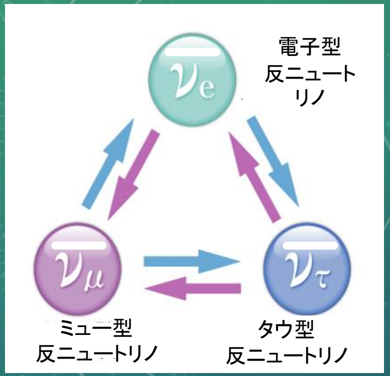
実験誤差 or 新物理からの寄与

CP 非対称性の定義

$$A^{CP}_{\alpha\beta} = \frac{P_{\alpha\beta} - P_{\overline{\alpha}\overline{\beta}}}{P_{\alpha\beta} + P_{\overline{\alpha}\overline{\beta}}}$$



−



$$P_{\alpha\beta} \;:\; P(\nu_\alpha \to \nu_\beta)$$

$$P_{\bar{\alpha}\bar{\beta}} \;:\; P(\overline{\nu_\alpha} \to \overline{\nu_\beta})$$

$$|\nu_\alpha >= U_{\alpha j}|\nu_j >$$

$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4\sum_{j>k} \mathrm{Re}(U_{\alpha j}U^*_{\beta j}U^*_{\alpha k}U_{\beta k})\sin^2\left(\frac{m_j^2 - m_k^2}{4E}L\right)$$

$$+2\sum_{j>k} \mathrm{Im}(U_{\alpha j}U^*_{\beta j}U^*_{\alpha k}U_{\beta k})\sin\left(\frac{m_j^2 - m_k^2}{2E}L\right)$$

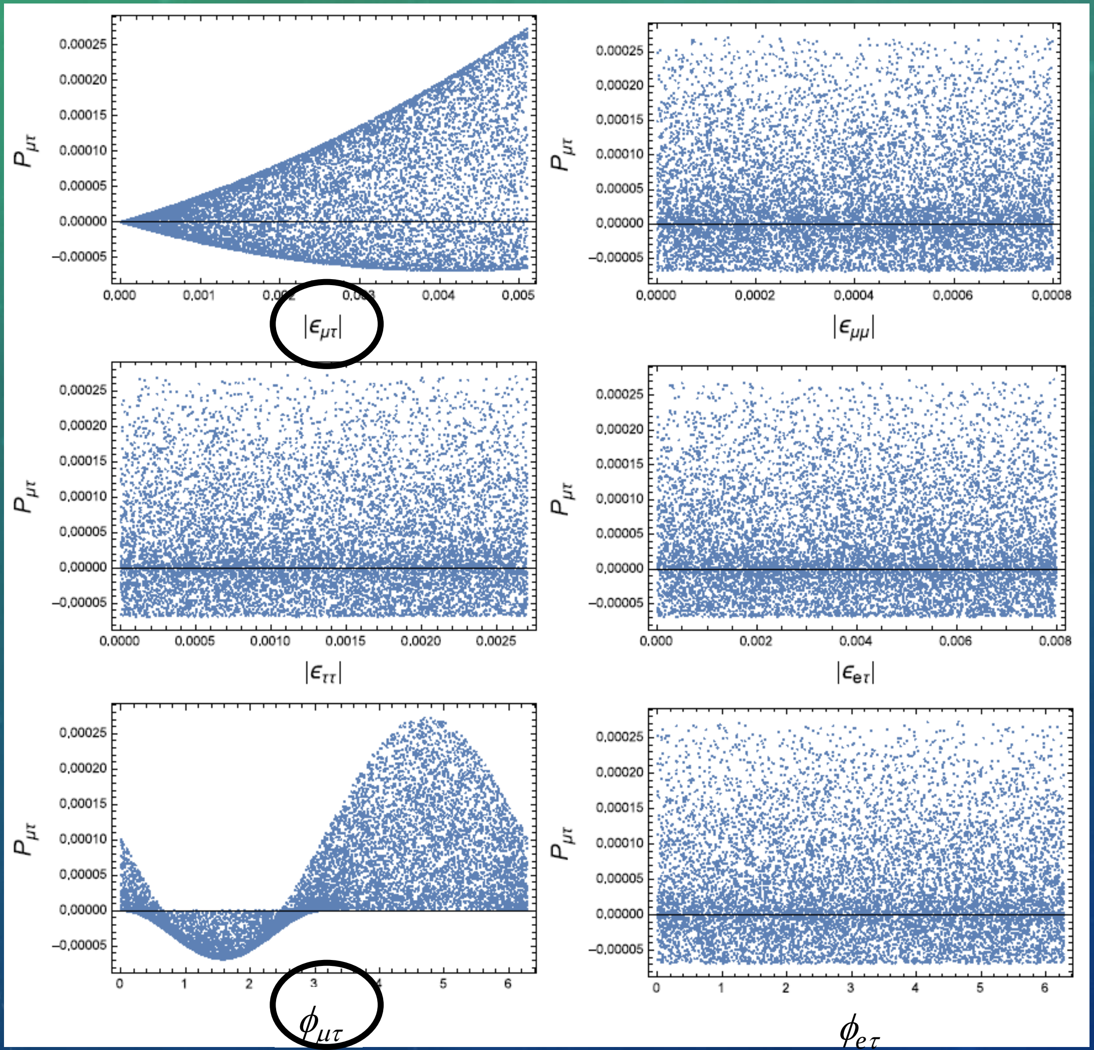
$$|\epsilon_{\alpha\beta}| = \begin{pmatrix} |\epsilon_{ee}| < 2.0\cdot10^{-3} & |\epsilon_{e\mu}| < 3.5\cdot10^{-5} & |\epsilon_{e\tau}| < 8.0\cdot10^{-3} \\ |\epsilon_{\mu e}| < 3.5\cdot10^{-5} & |\epsilon_{\mu\mu}| < 8.0\cdot10^{-4} & |\epsilon_{\mu\tau}| < 5.1\cdot10^{-3} \\ |\epsilon_{\tau e}| < 8.0\cdot10^{-3} & |\epsilon_{\tau\mu}| < 5.1\cdot10^{-3} & |\epsilon_{\tau\tau}| < 2.7\cdot10^{-3} \end{pmatrix}$$

[arXiv:0807.1003]

$\sin^2 2\theta_{12}$	0.846 ± 0.021
$\sin^2 2\theta_{23}$	$0.999^{+0.001}_{-0.018}$ (NH) $1.000^{+0.000}_{-0.017}$ (IH)
$\sin^2 2\theta_{13}$	0.085 ± 0.005
$\Delta m^2_{21}[\mathrm{eV}^2]$	$(7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5}$
$\Delta m^2_{32}[\mathrm{eV}^2]$	$(2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ (NH) $4(2.49 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ (IH)

[K. A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. **C38**, 090001 (2014)]

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$に関するCP非対称性の$\varepsilon_{\alpha\beta}$依存性

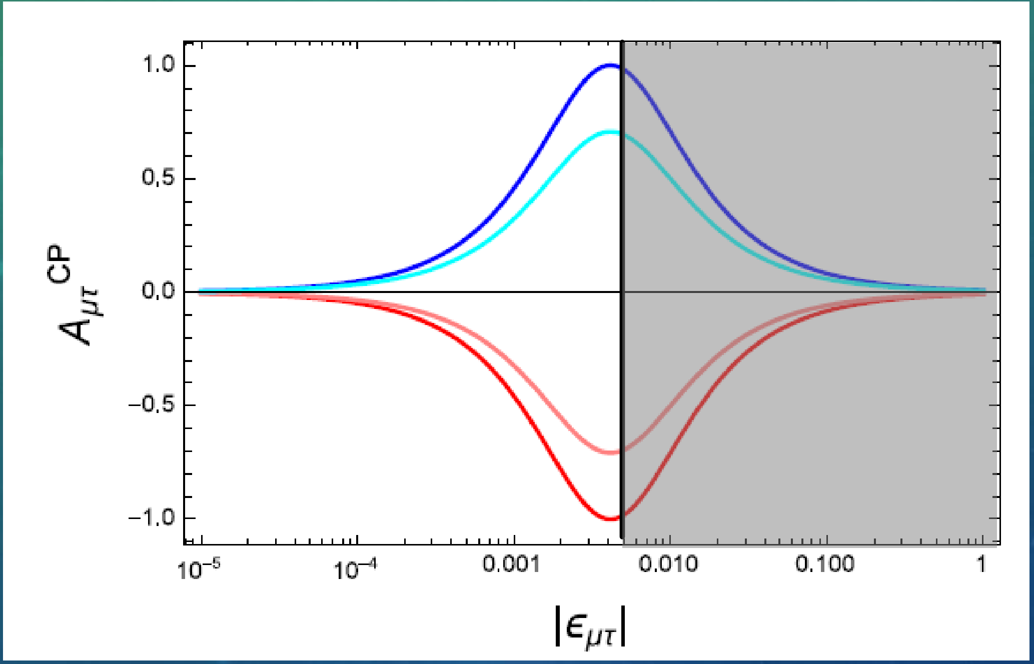


$$\epsilon_{\alpha\beta} = |\epsilon_{\alpha\beta}| e^{i\phi_{\alpha\beta}}$$

$\nu_\mu \to \nu_\tau$に関するCP非対称性の$\varepsilon_{\mu\tau}$依存性

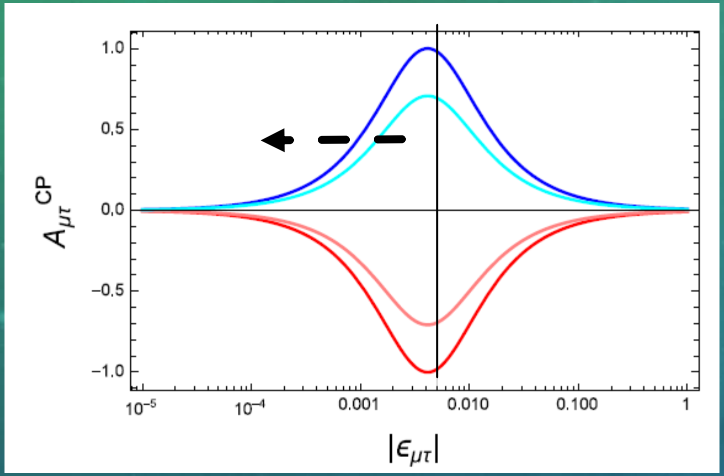
↓実験による制限

CP 非対称性



新物理からの寄与 $\epsilon_{\alpha\beta} = |\epsilon_{\alpha\beta}| e^{i\phi_{\alpha\beta}}$

今後のニュートリノ実験



標準模型からずれない

ニュートリノ実験では新物理は見えない

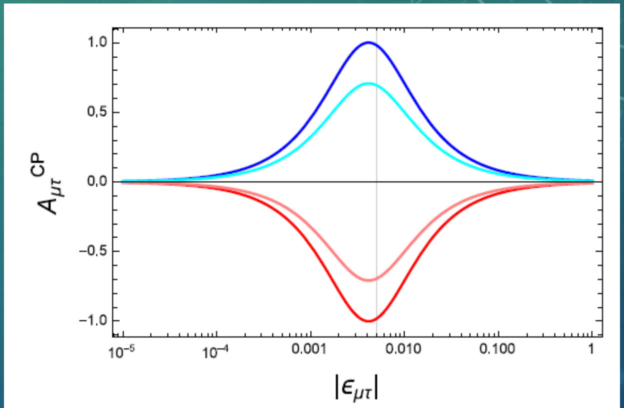
クォーク等の現象を見るべき

今後のニュートリノ実験

標準模型からずれる

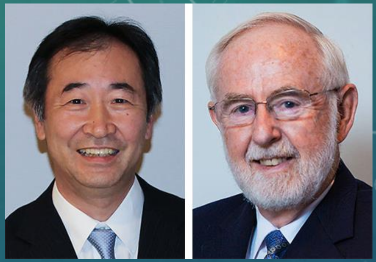
新物理がある
ニュートリノへの影響が大きい

我々の結果が、具体的な模型の解析に役立つ



まとめ

近年の実験によって、ニュートリノについてようやくわかり始めた



↳ ところが、

ニュートリノの質量の起源は不明

CP 位相の不定性は大きい

↳ そこで、

模型によらない方法で、ニュートリノのCP 非対称性を解析

↳ 新物理発見への道標として重要な役割を果たす

Backup Slides

$$\delta\mathcal{L}^{d=6} = c^{d=6}_{\alpha\beta}(\overline{l_{L\alpha}}\tilde{\phi})i\gamma^\mu\partial_\mu(\tilde{\phi}^\dagger l_{L\beta})$$

$$c^{d=6} = Y_N^\dagger \frac{1}{M_N^\dagger}\frac{1}{M_N} Y_N$$

$$i\bar{\nu}_{L\alpha}\gamma^\mu\partial_\mu(\delta_{\alpha\beta} + \epsilon_{\alpha\beta})\nu_{L\beta}$$

$$\epsilon \equiv \frac{v^2}{2} c^{d=6}$$

$$|\nu_\alpha> = U_{\alpha j}|\nu_j> \quad \text{（混合行列 } U_{\alpha j} \text{ ）}$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{13} - s_{12}c_{23}c_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -s_{12}c_{23} - s_{12}c_{23}c_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin\theta_{ij},\ c_{ij} = \cos\theta_{ij},\ (i,j = 1,2,3)$$

$$\Downarrow$$

$$\theta_{12},\ \theta_{23},\ \theta_{13},\ \delta$$

$\nu_\mu \to \nu_\tau$

$\nu_\mu \to \nu_e$

$\nu_\mu \to \nu_\mu$