

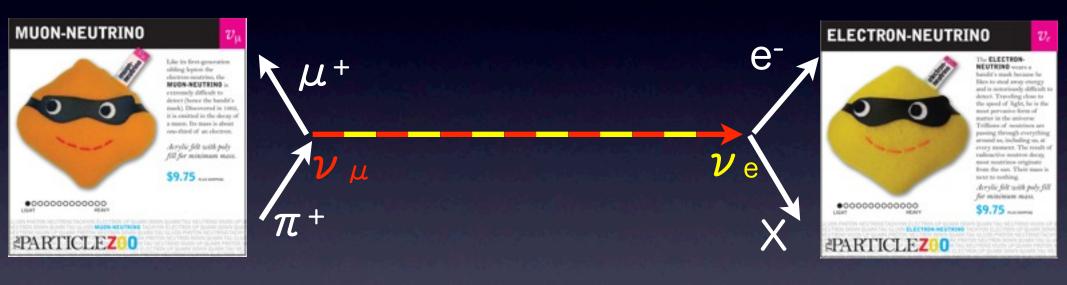


ニュートリノ振動

ニュートリノのフレーバー (弱い相互作用)の固有状態が 時間(飛行距離)とともに変わる現象

ニュートリノ振動

ニュートリノのフレーバー (弱い相互作用)の固有状態が 時間(飛行距離)とともに変わる現象



ニュートリノ振動

ニュートリノのフレーバー(弱い相互作用)の固有状態が <u>時間(飛行距離)とともに変</u>わる現象



フレーバーと質量の固有状態の混合により起こる

$$lpha$$
=e, μ , $f T$ $\ket{
u_{lpha}}=\sum_{m i}U_{lpham i}\ket{
u_{m i}}$ i=I,2,3 (質量固有状態) MNS混合行列

 $s_{ij} = sin\theta_{ij}, c_{ij} = cos\theta_{ij}$

$$U = \left(egin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight) \left(egin{array}{ccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{array}
ight) \left(egin{array}{ccc} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{array}
ight)$$

 $s_{ij} = sin\theta_{ij}, c_{ij} = cos\theta_{ij}$

$$U = \left(egin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight)$$

$$U = egin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} egin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} egin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

大気ニュートリノ

加速器ニュートリノ

$$\theta_{23} = 45 \pm 18^{\circ}$$

 $s_{ij} = sin\theta_{ij}, c_{ij} = cos\theta_{ij}$

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{X}$

$$U = \left(egin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight)$$

$$\left(egin{array}{ccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{array}
ight) \left(egin{array}{ccc} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{array}
ight)$$

大気ニュートリノ

加速器ニュートリノ

$$\theta_{23} = 45 \pm 18^{\circ}$$

しかし、<mark>vμ→v-</mark>は観測

されていなかった



━ OPERAで初観測!

 $s_{ij} = sin\theta_{ij}, c_{ij} = cos\theta_{ij}$

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{X}$

$$U = \left(egin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight)$$

$$\left(egin{array}{cccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{array}
ight)$$

大気ニュートリノ

加速器ニュートリノ

$$\theta_{23} = 45 \pm 18^{\circ}$$

しかし、vu→vrは観測

されていなかった



$$\left(egin{array}{ccc} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{array}
ight)$$

太陽ニュートリノ

原子炉ニュートリノ

(KamLAND)

$$\theta_{12} = 32 \pm 1^{\circ}$$



OPERAで初観測!

 $s_{ij} = sin\theta_{ij}, c_{ij} = cos\theta_{ij}$

$$v_{\mu} \rightarrow v_{\chi}$$

$$U = \left(egin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight)$$

$$\left(egin{array}{cccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{array}
ight)$$

$$V_e \rightarrow V_X$$

$$\left(egin{array}{ccc} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{array}
ight)$$

大気ニュートリノ

加速器ニュートリノ

$$\theta_{23} = 45 \pm 18^{\circ}$$

しかし、vu→vrは観測

されていなかった



■ OPERAで初観測!

太陽ニュートリノ

原子炉ニュートリノ

(KamLAND)

$$\theta_{12} = 32 \pm 1^{\circ}$$

残る混合角Ӈっと複素位相

δ(CP-violation)は未発見

- 有限のθ13の値を測定することが第一ステップ
- これが見つかると夢が広がる
 - ニュートリノ、反ニュートリノ間の比較
 - 異なる飛行距離での測定

- 有限の θ 13の値を測定することが第一ステップ
- これが見つかると夢が広がる
 - ニュートリノ、反ニュートリノ間の比較
 - 異なる飛行距離での測定



- 有限の θ_{13} の値を測定することが第一ステップ
- これが見つかると夢が広がる
 - ニュートリノ、反ニュートリノ間の比較
 - 異なる飛行距離での測定

レプトンセクターでのCPの破れの測定



- 有限の θ 13の値を測定することが第一ステップ
- これが見つかると夢が広がる
 - ニュートリノ、反ニュートリノ間の比較
 - 異なる飛行距離での測定



レプトンセクターでのCPの破れの測定

ニュートリノ質量構造の解明

- 有限の θ 13の値を測定することが第一ステップ
- これが見つかると夢が広がる
 - ニュートリノ、反ニュートリノ間の比較
 - 異なる飛行距離での測定



レプトンセクターでのCPの破れの測定

ニュートリノ質量構造の解明

+新物理が出てくるかも

813をめぐる競争

VS.

813をめぐる競争

V_μ→V_e 加速器ニュートリノ

VS.

長基線:300~800km

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) \approx \sin^{2}\theta_{23}\sin^{2}2\theta_{13}\sin^{2}\frac{\Delta m_{32}^{2}L}{4E_{\nu}}$$

T2K (日本)

NOvA (アメリカ)

(NOvAは出遅れちゃった)

日13をめぐる競争

V_µ→V_e 加速器ニュートリノ

長基線:300~800km

VS.

Ve→**V**x 原子炉ニュートリノ

短基線:~1km

$$P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) \approx \sin^{2}\theta_{23} \sin^{2}2\theta_{13} \sin^{2}\frac{\Delta m_{32}^{2} L}{4E_{\nu}}$$

$$P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

T2K (日本)

NOvA (アメリカ)

(NOvAは出遅れちゃった)

Double Chooz (フランス/日本も参加)

RENO(韓国)

Daya Bay (中国)

$$\mathcal{L}_{
m mass} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_{ ext{mass}} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

Dirac term

Majorana term

$$\mathcal{L}_{ ext{mass}} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

Dirac term Majorana term もしマヨラナ質量項を持てば・・・

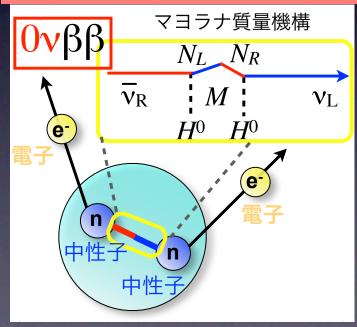
$$\mathcal{L}_{ ext{mass}} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

Dirac term

Majorana term

もしマヨラナ質量項を持てば・・・

Oニュートリノ ダブルβ崩壊が起こるはず



昨年のICEPPシンポジウム渡辺さんのスライドより KamLAND-Zenが他を圧倒?

$$\mathcal{L}_{ ext{mass}} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

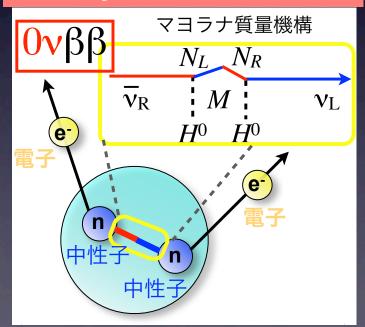
Dirac term

Majorana term

もしマヨラナ質量項を持てば・・・

0ニュートリノ

ダブルβ崩壊が起こるはず



See-Saw機構によりニュートリノ 質量の小ささが説明できる?

(ニュートリノ質量)~m_D²/m_R

m_R~GUTスケール?

昨年のICEPPシンポジウム渡辺さんのスライドより KamLAND-Zenが他を圧倒?

$$\mathcal{L}_{ ext{mass}} = -ar{
u}_R m_D
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_L m_L
u_L - rac{1}{2} \overline{
u^c}_R m_R
u_R + ext{h.c.}$$

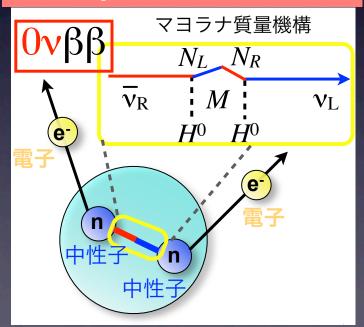
Dirac term

Majorana term

もしマヨラナ質量項を持てば・・・

0ニュートリノ

ダブルβ崩壊が起こるはず



昨年のICEPPシンポジウム渡辺さんのスライドより KamLAND-Zenが他を圧倒?

See-Saw機構によりニュートリノ 質量の小ささが説明できる?

 $(ニュートリノ質量)~m_D^2/m_R$ $m_R~GUTスケール?$

mRが十分小さければ

VL↔VR 混合が見える?

ステライルニュートリノ(v_R)の探索 SciBooNE/MiniBooNE

各実験のインパクトの大きさとその時期(中島の独断と偏見による) 2012 2013 2014 2016 2010 2011 2015 T2K θ_{13} (accele rator) NOvA Double Chooz θ_{13} RENO (reactor) Daya Bay **OPERA** $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ **KamLAND** Double -Zen beta decay Sci-/Mini-BooNE

