SK-I 大気ニュートリノにおける ニュートリノ振動の発見

石塚正基(東京工業大学) 2016年2月20日 第29回宇宙ニュートリノ研究会 東京大学宇宙線研究所





◎ "100MeV" から ">TeV" まで広く分布



M. Honda et al., Phys.Rev.D92, 023004 (2015)

From SK website





◎ 生成過程から v_µ: v_e = 2 : 1



From SK website



- ・大気ニュートリノ生成 ・p → π → μ + V_μ └→ e + V_μ + V_e
 - ◎ 生成過程から v_µ: v_e = 2 : 1



Kamiokande (1988),
 IMB (1991) が予想より
 も低いv_µ/v_e ratioを報告



・大気ニュートリノ生成 ・p → π → μ + V_μ └→ e + V_μ + V_e

◎ 幾何学的な関係から上下対称





もともとは陽子崩壊探索のバックグラウンド ⇒ ニュートリノ振動の研究へ



スーパーカミオカンデ

・水チェレンコフ型検出器

- 5万トンの超純水(有効質量 22.5kton)
 〇 高統計(世界最高)



スーパーカミオカンデ

・水チェレンコフ型検出器

- 5万トンの超純水(有効質量 22.5kton)
 〇 高統計(世界最高)

• 事象再構成

- ・電子とミューオンの識別
- ・電子とミューオンの方向

・電子とミューオンのエネルギー





Times (ns)

スーパーカミオカンデ

- ・水チェレンコフ型検出器
 - 5万トンの超純水(有効質量 22.5kton)
 〇 高統計(世界最高)
- 事象再構成 ⇒ ニュートリノ
 - ・電子とミューオンの識別
 ⇒ ニュートリノフレーバーの決定
 - ・電子とミューオンの方向
 ⇒ ニュートリノ飛来方向(飛行距離)と相関
 - ・電子とミューオンのエネルギー
 ⇒ ニュートリノエネルギーと相関





スーパーカミオカンデ



大気ニュートリノ観測データ(1998年)

Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562



ニュートリノ振動(2世代)

 ニュートリノはフレーバー固有状態(v_α)と質量固有状態(v_i)が PMNS行列(U)により混合していると考えられる

$$\begin{pmatrix} |\nu_{\alpha}\rangle \\ |\nu_{\beta}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_{1}\rangle \\ |\nu_{2}\rangle \end{pmatrix} \equiv U \begin{pmatrix} |\nu_{1}\rangle \\ |\nu_{2}\rangle \end{pmatrix}$$

質量固有状態の時間発展

$$\left| \boldsymbol{v}_{i}(t) \right\rangle = e^{-i(E_{i}t - \vec{p} \cdot \vec{x})} \left| \boldsymbol{v}_{i}(0) \right\rangle$$

 v_{α} の時間t(距離L)後の生存確率

$$P_{\alpha \to \alpha} = \left| \left\langle v_{\alpha} \left| v_{\alpha}(t) \right\rangle \right|^{2} = 1 - \sin^{2}(2\theta) \sin^{2} \left(1.27 \frac{\Delta m^{2} [\text{eV}^{2}] L[\text{km}]}{E_{v} [\text{GeV}]} \right)$$

質量が0でない場合、フレーバーの遷移が予言される = ニュートリノ振動

ニュートリノ振動(2世代)

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}} = \left| \left\langle \nu_{\mu} \left| \nu_{\mu}(t) \right\rangle \right|^{2} = 1 - \sin^{2}(2\theta) \sin^{2} \left(1.27 \frac{\Delta m^{2} [\text{eV}^{2}] L[\text{km}]}{E_{\nu} [\text{GeV}]} \right)$$



・上向きミューオンニュートリノの欠損はニュートリノ振動によって説明される

大気ニュートリノ観測データ(1998年)

Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562



SKによるニュートリノ振動の発見

Slides from Neutrino'98 梶田先生





上向きミューオン事象

Thr-µ: Phys. Rev. Lett 82 (1999) 2644 *Stop-µ: Phys. Lett.* B467 (1999) 185



上向きミューオン事象でもニュートリノ振動の存在を確認

Full osc.

1/2 OSC.

50

40

() 30 Э) Э 20

大気ニュートリノ計算モデルの検証: 東西効果

Phys. Rev. Lett 82 (1999) 5194



・地磁気の影響で大気ニュートリノフラックスは西向きが少ないことが予測される

• 大気ニュートリノデータがフラックス計算と一致していることを確認

→ フラックス計算により予測される角度依存性が妥当であることを検証

考察:いかにして発見をなしえたか

- ・大気ニュートリノ
 - E(エネルギー): 100MeV ~ >TeV
 - L(飛行距離): 10km ~ 10000km
 ⇒ 幅広いL/E ⇒ 広い範囲のΔm²を探索可能
 系統誤差をキャンセル
 - ・フレーバー比
 - ・上下対称性(振動有り無しの比較)





 (カミオカンデ⇒) スーパーカミオカンデ
 高統計(世界最大)+高性能(11000本のPMT)
 チェレンコフリングからニュートリノのフレーバー、 エネルギー、方向(飛行距離)を再構成 ※ニュートリノ振動の研究に必要な全ての情報

ニュートリノ振動モードの検証: $V_{\mu} \leftrightarrow V_{\tau} VS. V_{\mu} \leftrightarrow V_{s}$

Phys. Rev. Lett 85 (2000) 3999



- v_µ↔v_s振動を仮定した場合
 - single-ringで予測されるパラメーラ領域をtest sampleにより99%CLで否定
- v_µ↔v_τ振動を仮定した場合
 - すべての大気ニュートリノデータを矛盾なく説明

ニュートリノ振動の検証:振動確率の測定

Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 101801 $P_{\nu_{\mu} \to \nu_{\mu}} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L[\text{km}]}{E_{\nu} [\text{GeV}]} \right)$ Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562 Prob.(v_µ→ v_µ) 1998 1.5 1 o G 0.8 Δm² 0.6 0.4 **Neutrino oscillation** e-like **Neutrino decay** 0.2 Neutrino decoherence o μ-like 0 10² 10³ 10⁴ 10 0 10² 10⁵ 10³ 10⁴ 10 1 L/E (km/GeV) L/E, (km/GeV)

ニュートリノ振動による生存確率はL/Eの正弦関数で表される ⇔ 分解能の問題

Slides from NOON 2004, MI

ニュートリノ振動の検証:振動確率の測定



・ニュートリノ振動による生存確率はL/Eの正弦関数で表される ⇔ 分解能の問題
 ・L/E分解能の良いデータのみを選別することにより、振動パターンを直接測定

ニュートリノ振動の検証:振動確率の測定



・ミューオンニュートリノの生存確率がニュートリノ振動で予言される正弦関数に
 従うことを確認 → ニュートリノ振動のより直接的な証拠



ニュートリノ振動モードの決定: V_T appearance

 Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 171801
 2.4σ

 Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 181802
 3.8σ



Input variables based on energy, PID, decay-e, # rings and PMT hit pattern \rightarrow Select hadronic decays of tau



・ニューラルネットにより統計的にv_τ信号を選別 (60% efficiency)

• $v_{\mu} \leftrightarrow v_{\tau}$ 振動による "tau-like" 事象を確認 (3.8 σ) $\Rightarrow v_{\mu} \leftrightarrow v_{\tau}$ 振動の証拠

25

Neutrino vs. Anti-neutrino

Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 241801



ニュートリノ・反ニュートリノで独立に2世代振動を仮定してCPTを検証
 ・反ニュートリノ振動のパラメータを制限
 ・ニュートリノ・反ニュートリノで振動パラメータが一致

ニュートリノ振動の発見 ⇒ 現在の知見

Standard Model





ニュートリノ質量:0ではないが極端に小さい

- ・ヒッグス機構で解釈するとヒッグスとの結合が12桁以上も小さいことに
 ・ニュートリノに質量を与える別の機構?
 - ・マヨラナ粒子?

⇒ 右巻きの重いニュートリノが存在?(シーソー機構)

⇒物質・反物質非対称性の起源の鍵を握る?(レプトジェネシス)

・次世代ニュートリノ実験の研究課題

- ・ 質量階層性(大気ニュートリノ、長基線ニュートリノ、原子炉ニュートリノ)
- ・CP対称性の破れ(大気ニュートリノ、長基線ニュートリノ)
- マヨラナ vs. ディラック (二重ベータ崩壊)

大気ニュートリノ振動研究の発展

- スーパーカミオカンデ (⇒ ハイパーカミオカンデ)
 - ・3世代ニュートリノ振動解析
 - 質量階層性
 - ・CP対称性の破れ
 - θ_{23} octant
 - Test of exotic models
- ➔ Next talk
- ・長基線ニュートリノ振動実験によるニュートリノ振動の検証・ パラメータの精密測定(K2K, MINOS, T2K)
- v_u↔v_τ振動によるタウ事象の直接検出(OPERA)
- ・3世代混合の測定(T2K, Double Chooz, Daya Bay, RENO, NOvA)
- 大気ニュートリノ観測(IceCube-DeepCore)

まとめ

・カミオカンデがミューオンニュートリノの欠損を報告 ⇒ 大気ニュートリノ異常 (1988)

スーパーカミオカンデによる高統計・高精度の測定の結果、上向きミューオン
 ニュートリノの有意な欠損が明らかに

⇒ ニュートリノ振動の発見 (1998)

- ・スーパーカミオカンデではさらにニュートリノ振動の研究を進め
 - ・ミューオンニュートリノの生存確率が正弦関数に従うことを確認
 - ⇒ ニュートリノ振動のより直接的な証拠 (2004)
 - v_u↔v_τ 振動によるタウ粒子の有意な信号を観測 (2013)
 - ・ニュートリノと反ニュートリノの振動パラメータの一致を確認 (2011)
- 今後はスーパーカミオカンデ (⇒ ハイパーカミオカンデ)により3世代ニュートリノ 振動の研究を進め質量階層性・CP対称性の破れを明らかにする
 - 長基線ニュートリノ、原子炉ニュートリノなども含めた多方面からの研究