## 宇宙・素粒子スプリングスクール2016 プロジェクト研究

## ートリノ物理学

大塚 竣太 狩野 芳樹 北出 智巳 中嶋 武 藤本 みのり 目的

## <u>ニュートリノ振動を追検証する</u>



梶田所長のノーベル賞受賞理由 「ニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノに質量があること を示した」

Q. なぜニュートリノが「振動する」と質量があると言えるのか? Q.「振動する」とはどういうことか? Q. どうしたら確かめられるのか?

## <u>ニュートリノとは</u>

弱い相互作用と 重力にのみ反応 →検出が大変

3つのフレーバー がある

## ELEMENTARY PARTICLES



フレーバーを 固有値とする 固有関数 α=e,μ,τ

 $|\nu_{\alpha}\rangle = \sum U_{\alpha i}^{*} |\nu_{i}\rangle$ 

## ニュートリノ振動

## 質量を固有値と する固有関数 i=1, 2, 3

## MNS(MAKI-NAKAGAWA-SAKATA)行列

## cij= $\cos \theta$ ij and sij= $\sin \theta$ ij



## Θ13、Θ23、Θ12、δCPで混合が決まる

ニュートリノの 質量を固有値とする 固有関数の時間発展

$$\begin{aligned} \left| \boldsymbol{v}_{\alpha} \right\rangle &= \sum_{i} U_{\alpha i}^{*} \left| \boldsymbol{v}_{i} \right\rangle \\ \rightarrow \sum_{i} U_{\alpha i}^{*} e^{-im_{i}^{2} z/2E} \left| \boldsymbol{v}_{i} \right\rangle &= \sum_{i} \sum_{\beta} U_{\alpha i}^{*} U_{\beta i} e^{-im_{i}^{2} z/2E} \left| \boldsymbol{v}_{\beta} \right\rangle \end{aligned}$$

## 2つのフレーバー間の振動

$$\left(\begin{array}{c} |\nu_{\alpha}\rangle \\ |\nu_{\beta}\rangle \end{array}\right) = \left(\begin{array}{cc} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{array}\right) \left(\begin{array}{c} |\nu_{1}\rangle \\ |\nu_{2}\rangle \end{array}\right)$$

生成点

エネルギーE

観測点

飛行距離L

$$egin{aligned} & 
u_eta(t)
angle &= (-sin heta cos heta e^{rac{-im_1^2}{2E}} + sin heta cos heta e^{rac{-im_2^2}{2E}}) |
u_lpha
angle \ &+ (sin^2 heta e^{rac{-im_1^2}{2E}} + cos^2 heta e^{rac{-im_2^2}{2E}}) |
u_eta
angle \end{aligned}$$

$$\langle \nu_{\beta} | \nu_{\beta}(t) \rangle^2 = 1 - sin^2 2\theta sin^2 (\frac{L}{4E} (m_1^2 - m_2^2))$$

フレーバーが βの状態から変わらない確率が求まった

## フレーバーが変化しない確率の式からわかること



## スーパーカミオカンデ



#### 20インチPMT11129本



水チェレンコフ型宇宙素粒 子観測装置。

太陽ニュートリノ、 大気ニュートリノ、 人エニュートリノなどを観測

1998年、大気ニュートリノの 観測により、ニュートリノ振 動を発見

2001年、太陽ニュートリノ振 動を発見

9

陽子崩壊の探索

超純水50kton

## ニュートリノの相互作用

ニュートリノは同ータイプの 荷電レプトンを伴う(レプトン 数の保存)

あるフレーバーのニュートリ ノを観測するには、 同じフレーバーの荷電レプ トンを観測すればよい



#### **Cherenkov**放射



β~1の荷電粒子に対し水中(n≈1.34)では0。~42°で一定 ・電荷量eの荷電粒子により単位長さ単位波長あたりに放出される光子数は  $\frac{d^2 N}{d\lambda dL} = 2\pi\alpha \left| 1 - \left(\frac{1}{\beta n}\right)^2 \right| \frac{1}{\lambda^2}$ 

3

## チェレンコフリング

> チェレンコフ光を PMTで検出



## チェレンコフリングから、 電子とミューオンが99%識別できる!

電子

ミューオン



もやっとしたリング

縁のはっきりしたリング

## 大気ニュートリノ

#### 宇宙線と大気の原子核の衝突により、ニュートリノが生じる過程

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \overline{\nu_{\mu}}$$

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \overline{\nu_{\mu}} + \nu_{e}$$

$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \nu_{\mu} + \overline{\nu_{e}}$$

$$\frac{(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu})}{(\nu_{e} + \bar{\nu}_{e})} \approx 2$$



## 大気ニュートリノとニュートリノ振動

上からくるニュートリノ: 大気の厚さ分進む

## 下からくるニュートリノ: 地球と大気の厚さ分進む



# 大気ニュートリノを水チェレンコフ型検出器で測ってわかること

### チェレンコフ光が出始めた場所、時間、電荷

ニュートリノの運動方向 (進んだ距離) ニュートリノのエネルギー →振動の位相

リングの形 →ミューオンか 電子か

## <u>ニュートリノ振動検出の追検証のために</u>

スーパーカミオカンデと同様の検出原理のま めカミオカンデを用いて、 ①チェレンコフ光を観測し、 ②電子ニュートリノとミューニュートリノが判別 できるか確かめたい!

## まめカミオカンデ(水チェレンコフ型検出器)

#### まめカミオカンデでチェレンコフ角を測定してみる。







## チェレンコフ光の検出

## まめカミオカンデのセットアップ



シンチレータ(1)

シンチレータ2

まめカミオカンデ

### まめカミオカンデのセットアップ

様々な方向から来る 荷電粒子を検出する ことができないので、 鉛直方向から来たも のだけを使う。





シンチレータ2



















## 解析アルゴリズム

#### 荷電粒子が通った位置と推定

1. PMTの電荷の最大の位置を 光が通過した位置とした。

2. 10以上の電荷の最小の地点 をリングの端とした。

3. この2点の距離と水の深さ からチェレンコフ角を求めた。



## 解析アルゴリズム

#### 荷電粒子が通った位置と推定

1. PMTの電荷の最大の位置を 光が通過した位置とした。

2. 10以上の電荷の最小の地点をリングの端とした。

3. この2点の距離と水の深さ からチェレンコフ角を求めた。



底辺と推定

## 解析アルゴリズム

#### 荷電粒子が通った位置と推定

1. PMTの電荷の最大の位置を 光が通過した位置とした。

2. 10以上の電荷の最小の地点 をリングの端とした。

3. この2点の距離と水の深さ からチェレンコフ角を求めた。



## 実験結果



計数

## 実験結果



計数

### 予想値と実験値の差

#### 荷電粒子が通った位置と推定

## チェレンコフ角を求めるのに 使う底辺を小さく設定してし まった。



## 斜めに入ってくる宇宙線







観測できる チェレンコフリング 大きさ 小 <sup>34</sup> 宇宙線の中心点©

## 角度を持って入ってくる宇宙線

Event 35 hpmt Entries Mean 7.098 RMS 2.222 



## PMTの分解能の限界 直系分の長さ3.11cmは区別できない。

## 3.11cm

## まめカミオカンデによる 電子とミューオンの判別

モチベーション

ニュートリノ振動を見るためには電子ニュートリノとミューニュートリノを判別する必要がある。

レプトンフレーバー保存則から2種のニュートリノの判別するには 電子とミューオンの判別が出来ればよい

まめカミオカンデでも電子とミューオンを判別できないか? レプトンフレーバーがわかるパラメータを求めたい!

⇒ミューオンの崩壊で出てくる電子を利用











シンチレータ1層目



## ミューオン崩壊による電子放出の確認



イベント数

fitting結果 寿命:

460-108+201ns

文献値との比較

2.1µs(真空中) 860ns(AI中)

Time [ns] ⇒電子が放出されているのは間違いない! ではどうやってミューオンと電子を見分けるか?

## 電子・ミューオンの判別

スーパーカミオカンデでは電子かミューオンかを Cherenkov Ring の輪郭が はっきりしているかで判別している →PMTが1列状に並んだまめカミオカンデでもエッジがでる ようなパラメータが判別に適すると考えられる



## 角度分布



電子の方が小さい角度が出ていることが分かる ⇒水に入る際の散乱の影響を電子の方が強く受ける と考えられる

考えたパラメータX

電荷Q



電荷量Qがしきい値10の端に 該当するチャンネルを二つ (A,Bとする)

(Q(A+1)+Q(A-1)-2\*Q(A))\*\*2
と
(Q(B+1)+Q(B-1)-2\*Q(B))\*\*2
のうち小さい方をXとする

45

エッジがしっかり見えているようなイベントだとXの値も 大きくなる ⇒Xが大きいほどミューオンlikeと予想できる

likehood1 likehood1 h1 h1 Entries 74 102 Entries 16 25 292.3 271 Mean Mean RMS 245 RMS 262.7 14 20 12-ミューオン イベント数 電子 10-15 10 0 0 100 200 200 0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 10 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 800 900 1000 e-like μ-like e-li<u>ke</u> u-like パラメータX

ミューオンの方が大きい値のところに多めに出ている しかしイベント数がとても少ないため、十分に判別できる かは言えない。



パラメータX

## 水のCHERENKOV角 測定解析

- 水のCherenkov角: 42degrees
- マメカミオカンデCherekov角に関する 観測可能な量
   1.vertex(相互作用の起こった時空)
   2.運動方向
   3.エネルギー
- PMTより

## マメカミオカンデの観測からみ図

#### ここまでのまとめ

チェレンコフ角の特定ができるようになった
ミューオンと電子の識別ができるようになった

# 準備万端! いざ、ニュートリノ振動解析へ

#### ニュートリノの飛来距離

入射角々にsよって、 ニュートリノの飛行距離Lが変わる

 $L(\cos\phi)=-R\cos\phi + sqrt\{(R\cos\phi)^2+r^2+2rR\}$ 

距離が違えば、ニュートリノ振  
動によりフレーバーが変わる  
例えば 
$$\Delta m^2$$
  
 $\langle \nu_{\beta} | \nu_{\beta}(t) \rangle = 1 - sin^2 2\theta sin^2 \left(\frac{L}{4E} \left(m_1^2 - m_2^2\right)\right)$ 



□:スーパーカミオカンデ
 ●:ニュートリノ発生源
 ④:入射角 L:発生源からSK
 R:地球の半径 6371km
 Γ:大気の厚さ 15km

#### 1998年、大気ニュートリノ振動の発見

どれくらいの信頼度だったのか? U:上方向に向かうµニュートリノ D:下方向に向かうµニュートリノ

> U-D/U+D=-0.296 $\sigma = 0.0481$

この値は、6.16 σもずれていて、ニュート リノ振動の発見といえる!



### スーパーカミオカンデの最新データ(去年9月まで) では…



cosθ	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1
SK (233 9.25 日)	83	67	74	81	83	130	148	139	160	152

U=305 D=599 U-D/(U+D)=0.325  $\sigma$  = 0.0315

10.3 σの信頼度! ニュートリノ振動は 間違いなくある!

#### ニュートリノ振動パラメータの決定

- ニュートリノ振動が確かに起こっていることが分かった
- ・次は、データを基にニュートリノ振動における重要なパラ メータである混合角 $\theta$ と質量二乗の差 $\Delta$ m<sup>2</sup> を求めたい
- ここでは、μニュートリノとτニュートリノの二つの世代間のニュートリノ振動を仮定

#### ニュートリノパラメータの決定における仮定

- すべての要素を考慮することは厳しいので、簡単のため以下の仮定をした。
- 統計誤差は実験データのみ考え、MCの統計誤差は小さいので無視
- 系統誤差は非常に小さいので無視
- エネルギーはすべて5GeV仮定
- cos θ =0.2 ごとのMCによるニュートリノのデータとスーパーカミオカン デの測定値を用いる

соsф	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1
SK(2339. 25日)	83	67	74	81	83	130	148	139	160	152
mc(500 年)	12337.7	12827.3	12985.9	13548.1	13972.8	13725.3	13656.8	12990.2	12532.4	12483

#### ニュートリノパラメーターの決定方法

梶田さんの論文では、次の x<sup>2</sup> が小さくなるようにパラメータを決めていた。

 $\chi^2 = \sum_{\cos\Theta,p} (N_{\text{DATA}} - N_{\text{MC}})^2 / \sigma^2 + \sum_j \epsilon_j^2 / \sigma_j^2$ 統計誤差 SKのデータ 系統誤差 ニュートリノ振動で、 μニュートリノから  $\frac{\mathcal{L}_{\text{DATA}}}{\mathcal{L}_{\text{MC}}}$ 変化しない確率を代入  $N_{\rm MC} =$ W. MC events 55 各イベントの確率

系統誤差の

パラメータ

#### 実験結果

ニュートリノ振動を考慮しない 場合(青)の時よりも、ニュート リノ振動を考慮した場合(赤) のほうが、良く実験データに フィットしている

しかし、θ が0度付近では、 予測値と実験データの差が 大きかった



multi GeV 1R mu-like



#### フィッテイングの精度が落ちてしまった原因としては

- 系統誤差を考慮していない
- 各イベントごとに見るべき、エネルギーと距離を一定にしてしまっている
- $\phi = 0$ 付近からのニュートリノの不定性

#### 混合角と質量の二乗差

•  $\sin 2\theta^2$  7.10764e-001± 3.52892e-00 2

- △ m<sup>2</sup> 8.04801e-004 ± 2.64240e-005 であったが 現在決定されている値は
- $\sin 2\theta^2 = 0.999 \pm 0.018$
- Δm<sup>2</sup>=(2.44±0.06)\*e-3
   誤差のオーダーは同じであるが、
   両ニュートリノ振動パラメータとも、
   決定されている値の誤差の範囲からも
   外れてしまっている



フィッティングが完全にはう まくいかなかったのは、ど うしてか?



### ニュートリノパラメーターの決定方法

梶田さんの論文では、次の χ<sup>2</sup> が小さくなるようにパラメータを決めていた。

 $\chi^2 = \sum_{\cos\Theta,p} (N_{\text{DATA}} - N_{\text{MC}})^2 / \sigma^2 + \sum_j \epsilon_j^2 / \sigma_j^2,$ 統計誤差 SKのデータ

 $N_{\rm MC} = \frac{\mathcal{L}_{\rm DATA}}{\mathcal{L}_{\rm MC}} \sum_{\rm MC \ events} w \,.$ 

各イベントの確率

系統誤差の

パラメータ

系統誤差

## 詳しいモンテカルロシミュレーションの補正

本来なら、多くのパラメータがフィッテイ ングに使われている。 特に、今回はエネルギーやエネルギー を平均しているので影響が大きいと考え られる

$$N_{\rm MC} = \frac{\mathcal{L}_{\rm DATA}}{\mathcal{L}_{\rm MC}} \sum_{\rm MC \ events} w \,.$$

$$w = (1 + \alpha) (E_{\nu}^{i}/E_{0})^{\delta} (1 + \eta_{s,m} \cos \Theta)$$

$$\times f_{e,\mu}(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, (1 + \lambda L/E_{\mu}))$$

$$\times \begin{cases} (1 - \beta_s/2) & \text{sub-GeV } e\text{-like}, \\ (1 + \beta_s/2) & \text{sub-GeV } \mu\text{-like}, \\ (1 - \beta_m/2) & \text{multi-GeV } e\text{-like}, \\ (1 + \beta_m/2)\left(1 - \frac{\rho}{2}\frac{N_{PC}}{N_{\mu}}\right) & \text{multi-GeV } \mu\text{-like}, \\ (1 + \beta_m/2)\left(1 + \frac{\rho}{2}\right) & \text{PC}. \end{cases}$$



#### ニュートリノと反応後の荷電粒子の進行方向には、不定性がある ⇒面積の広い横からの θ =0の入射が一番影響を受けるはず



#### まとめ

今回の実験を通して

- 水チェレンコフ光を観測した
- 電子とミューオンを個別に観測した
- ニュートリノ振動が確かにあることを解析によって確認し、
   ニュートリノ振動パラメーターを決定した

私たちは、自分たちの手によって、 ニュートリノ振動することを全員で確認 し、追検証することができた!!!



## Supervisorの西村康宏先生、TAの Tsui Ka Mingさん、阿久津良介さん、 本当にありがとうございました!



[1]Super-KamiokandeCollaboration, Phys.Rev 81,8(1998)
[2]Particle Data Group
[3]The T2K Collaboration 2013. http://t2k-experiment.org/ja/