

2018年7月30日 吉田朋世(東工大) 高エネルギーQCD・核子構造勉強会

目次

- ・ 導入:ニュートリノ振動
- •太陽ニュートリノ実験
- 大気ニュートリノ実験
- 原子炉ニュートリノ実験
- 長基線ビームニュートリノ実験



ニュートリノ混合

ニュートリノのフレーバー固有状態は、質量固有状態の 重ね合わせとして記述される





質量固有状態



 $\left|\nu_{j}\left(t\right)\right\rangle = e^{-iE_{j}t}\left|\nu_{j}\left(0\right)\right\rangle$

QCD核子構造勉強会

ニュートリノ振動パラメータ

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

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$
(a) Normal hierarchy
(b) Inverted hierarchy
(c) Inverted hierarchy
(

真空中でのニュートリノ振動確率

$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>k} \Re \left(U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^{*} \right) \sin^{2} \left(\frac{L \left| \Delta m_{jk}^{2} \right|}{4E} \right)$$

 $-2 \sum_{j>k} \Im \left(U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^{*} \right) \sin \left(\frac{L \left| \Delta m_{jk}^{2} \right|}{2E} \right)$





物質中でのニュートリノ振動確率

- 物質中ではW, Zボソンを介してニュートリノが電子と
 コヒーレント散乱する
- Wボソンを介した散乱は電子ニュートリノみ可能
- ニュートリノ伝搬のハミルトニアンが変化し、
 振動確率が変わる

 $UH_0U^{\dagger} \rightarrow UH_0U^{\dagger} + V_{\rm MSW}$

 $\overline{\mathbf{v}} \setminus /\mathbf{e}$

太陽ニュートリノ実験

太陽ニュートリノ

核融合反応の副産物として生じる電子ニュートリノ



2018/7/30

QCD核子構造勉強会

太陽ニュートリノスペクトル



2018/7/30

10

太陽ニュートリノ振動

太陽中心で生じたニュートリノは地球に届くまでに振動 を繰り返し、地球では平均の振動確率が測定される



Super-Kamiokande

- ・岐阜県飛騨市神岡町池ノ山地下1,000m
- 純水50kton, 光電子増倍管11,146本 をもつ未ズチェレンコフ検出器





SKでの太陽ニュートリノ測定

- 電子との散乱でニュートリノを検出 $v_x+e^- \rightarrow v_x+e^-$
- 電子ニュートリノのみWボソンを介した散乱が可能







FIG. 26: SK-I+II+III+IV recoil electron spectrum compared to the no-oscillation expectation. The green (blue) shape is the MSW expectation using the SK (solar+KamLAND) bestfit oscillation parameters. The orange (black) line is the best fit to SK data with a general exponential/quadratic (cubic)

arXiv: 1606.07538

Borexino

• イタリア Gran Sasso 地下1780m



Borexinoでの太陽ニュートリノ測定



2018/7/30

QCD核子構造勉強会

KamLAND

原子炉ニュートリノを利用した太陽ニュートリノ振動 パラメータ測定

- 神岡鉱山は、約180kmの位置に強力な原子炉が あるのとほぼ同じ状況
- 原子炉からは100%反電子ニュートリノが 放出される

→ 太陽ニュートリノと同じ振動パラメータ が測定できる

 Kamiokande跡に 液体シンチレータ検出器

KamLANDの結果





2018/7/30 Phys. Rev. D 88, 0330分構造勉強会



17

大気ニュートリノ実験

大気ニュートリノ

- 宇宙線が大気中の原子核に衝突し、π, K 中間子を生成
- それらの崩壊でニュートリノ生成





19

大気ニュートリノ振動

- 大気ニュートリノは地球の周りで一様等方的に生成
- 幅広いエネルギー(MeV~TeV)と 飛距離(10km~13,000km)





2018/7/30

大気ニュートリノ振動

- 大気ニュートリノは地球の周りで一様等方的に生成
- 幅広いエネルギー(MeV~TeV)と
 飛距離(10km~13,000km)





2018/7/30



2018/7/30

SKにおけるイベントトポロジー



SKにおける大気ニュートリノ解析

エネルギー、リング数、粒子識別による19のサンプル



SKの最近の結果

 $\Delta \chi^2 = 3.48$ で順階層をfavor



質量階層決定に影響があるサンプル

まだ統計が足りず、順階層で決定とは言い切れない



2018/7/30

IceCube

南極の氷を利用した氷チェレンコフ検出器

最大の目的は PeV領域以上の 宇宙ニュートリノ 観測だが、SKでは 統計が足りない TeV以上の大気 ニュートリノ測定 も行っている





IceCubeの大気ニュートリノ測定

従来の実験より高エネルギーの フラックス測定 Phys. Rev. D91, 122004

DOMを密に配置したDeep Coreでの 振動測定 (6-56GeV) Phys. Rev. Lett. 120, 07180



原子炉ニュートリノ 実験

原子炉ニュートリノ

核分裂の副産物として反電子ニュートリノが生成



O(km)基線の原子炉ニュートリノ振動



原子炉ニュートリノによるθ₁₃測定

3つの実験がθ₁₃を測定







Double Chooz @France

RENO @South Korea Daya Bay @China



Gd入り液体シンチレータ、 液体シンチレータ、 オイルの3層構造

シンチレーション光を PMTで検出





ニュートリノの検出

逆ベータ崩壊を使って反電子ニュートリノのみを検出

・陽電子の対消滅によるprompt signal (~ E_v-0.8MeV)



ニュートリノスペクトル

delayed coincidenceによって、 非常にS/B比の良い測定が可能





長基線ビーム ニュートリノ実験



• J-PARCで(反)ミューニュートリノビームを生成し、 Super-Kで検出



T2Kニュートリノビーム

3つの電磁ホーンで 正/負電荷の粒子をフォーカス 炭素標的

280m 30GeV beam detectors π off-axis ‡2.5° [♥] dump р target decay station muon on-axis Super-Kamiokande pipe monitors 110m 120m 295km 280m 0m Neutrino Mode Flux at SK Antineutrino Mode Flux at SK Flux (/cm²/50MeV/10²¹p.o.t) Flux (/cm²/50MeV/10²¹p.o.t) 10^{6} 10^{6} ₩₩ OA 0.0° ₩ OA 2.0° 10^{5} 10^{5} Φ^{295km}(A.U.) ₩ OA 2.5° $-\overline{v}_{e}$ Ve 10^{4} 10^{4} 10^{3} 10^{3} 10^{2} 10^{2} 10 7 9 10 2 3 8 4 5 6 2 4 5 7 8 9 6 E_v (GeV) E_v (GeV) 40 2018/7/30 QCD核子構造勉強会 E_{v} (GeV)

T2K前置検出器

- 炭素標的から280m下流
- On-axis: ニュートリノ反応レートとビーム方向
- Off-axis: ニュートリノスペクトルと反応断面積









QCD核子構造勉強会

NuMI ニュートリノビーム



NOvA検出器

液体シンチレータ 飛跡検出器

- 前置検出器 0.3 kton
- 後置検出器 14 kton







2018/7/30

QCD核子構造勉強会

NOvA event classifier



NOvA data



QCD核子構造勉強会

最近の結果 – ミューニュートリノ消失



49



2018/7/30

QCD核子構造勉強会

50

まとめ

Neutrino Mixing

The following values are obtained through data analyses based on the 3-neutrino mixing scheme described in the review "Neutrino Mass, Mixing, and Oscillations" by K. Nakamura and S.T. Petcov in this *Review*.

$$\begin{split} & \sin^2(\theta_{12}) = 0.307 \pm 0.013 \\ & \Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ & \sin^2(\theta_{23}) = 0.421^{+0.033}_{-0.025} \quad (S = 1.3) \quad (\text{Inverted order, quad. I}) \\ & \sin^2(\theta_{23}) = 0.592^{+0.023}_{-0.030} \quad (S = 1.1) \quad (\text{Inverted order, quad. II}) \\ & \sin^2(\theta_{23}) = 0.417^{+0.025}_{-0.028} \quad (S = 1.2) \quad (\text{Normal order, quad. I}) \\ & \sin^2(\theta_{23}) = 0.597^{+0.024}_{-0.030} \quad (S = 1.2) \quad (\text{Normal order, quad. I}) \\ & \sin^2(\theta_{23}) = 0.597^{+0.024}_{-0.030} \quad (S = 1.2) \quad (\text{Normal order, quad. II}) \\ & \Delta m_{32}^2 = (-2.56 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Inverted order}) \\ & \Delta m_{32}^2 = (2.51 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (S = 1.1) \quad (\text{Normal order, order}) \\ & \sin^2(\theta_{13}) = (2.12 \pm 0.08) \times 10^{-2} \end{split}$$

HTTP://PDG.LBL.GOV 2018/7/30 Page 10 QCD核子構造勉強会 Created: 6/5/2018 18:58

まとめ

- ニュートリノ振動は6つのパラメータで記述され、様々 な実験で測定が進められている
- 質量階層は順階層、 δ_{CP} は- $\pi/2$ 付近を示唆する結果が 報告されているが、まだ決定には至っていない
- ・ θ₂₃は今のところ最大混合(45°)とコンシステント