

ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—

Keyword: ニュートリノ振動

1. ニュートリノ振動とは

ニュートリノは、電氣的に中性で、弱い相互作用しかせず、かつ他の荷電粒子に比べて非常に小さい質量しか持たないため、その観測がきわめて難しい粒子である。ニュートリノの唯一の検出方法は、ニュートリノを別な粒子に衝突させて出て来る荷電粒子を観測することである。弱い相互作用により引き起こされる $\nu + \text{中性子} \rightarrow \ell + \text{陽子}$ の反応で、負電荷のレプトン $\ell (= e \text{ (電子)}, \mu \text{ (ミューオン)}, \tau \text{ (タウオン)})$ を生成するニュートリノは、それぞれ電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ と呼ばれている。これらはフレーバー固有状態と呼ばれ、実験的にはこれらのフレーバー固有状態を観測することになる。実はこれらのフレーバー固有状態は、ニュートリノの質量固有状態 (質量がそれぞれ m_1, m_2, m_3 の状態 ν_1, ν_2, ν_3) とは一致せず、質量固有状態の重ね合わせとなっていることが知られている。ニュートリノが量子力学的時間発展をする際、質量固有状態ではハミルトニアンが対角的であるため質量固有状態の始状態と終状態が同じとなるが、フレーバー固有状態ではハミルトニアンが非対角的となるため、始状態と終状態は一般には一致しない。簡単のため、ニュートリノが2種類しかない場合を考え、2種類のフレーバー固有状態 (ここでは仮に ν_μ と ν_τ とする) と質量固有状態 (ν_1 と ν_2 とする) が

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

と、混合角 θ で関係しているとする、エネルギー E を持つ ν_μ が距離 L だけ飛行した後に ν_τ に変化する確率は

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 (\Delta m^2 [\text{eV}^2]) (L [\text{km}]) / (E [\text{GeV}])]$$

で与えられる。ここで $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ である。確率 P が距離に関して振動的な振る舞いをするため、この現象はニュートリノ振動と呼ばれる。ニュートリノ振動は量子力学的干渉効果であり、後述するように、質量固有状態の質量二乗のわずかな差 ($\Delta m^2 = O(10^{-4} \text{ eV}^2) \sim O(10^{-3} \text{ eV}^2)$) が $10^2 \sim 10^4 \text{ km}$ という巨視的なスケールで初めて観測できるというユニークな現象である。

2. 物質効果

ニュートリノ振動の観測にはニュートリノの飛行距離を

長くする必要があるため、ほとんどの実験では地中を通過してきたニュートリノを観測する。物質中では、物質中の電子が、伝播するニュートリノの ν_e 成分のみと余分な弱い相互作用をするため、混合角 θ と質量二乗差 Δm^2 に補正が生じる: $\theta \rightarrow \tilde{\theta} \equiv (1/2) \tan^{-1} [(\Delta m^2 \sin 2\theta / (\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2} EG_F N_e))]$, $\Delta m^2 \rightarrow \Delta \tilde{m}^2 \equiv [(\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2} EG_F N_e)^2 + (\Delta m^2 \sin 2\theta)^2]^{1/2}$. ここで $G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ はフェルミ定数, N_e は物質中の電子数密度である (反ニュートリノの場合には電子数密度の項の-符号は+となる)。この補正のことを物質効果と呼ぶ。

現実には3種類のニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態があり、それらは 3×3 のユニタリー行列で関係付けられる。ユニタリー行列のパラメーターのうち、ニュートリノ振動現象により測定できるのは、 3×3 の直交行列の回転角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ と CP 非保存を表す位相 δ の4個のパラメーターである。 δ は、ニュートリノの振動 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ と、ニュートリノの反粒子である反ニュートリノの振動 $\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$ に違いを出すパラメーターであり、究極的には、宇宙における物質-反物質の非対称性の生成に役割を演ずると考えられている。3種類のニュートリノの質量固有状態に対しては独立な質量二乗差は2つあり、それらを $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ と $\Delta m_{32}^2 \equiv m_3^2 - m_2^2$ とする (一般性を失わず $|\Delta m_{21}^2| \leq |\Delta m_{32}^2|$ と仮定する)。3種類のニュートリノがある場合のニュートリノ振動の確率は一般に複雑となるが、実際には2つの質量二乗差に階層性がある ($|\Delta m_{21}^2| \ll |\Delta m_{32}^2|$) ことと、一つの混合角 θ_{13} が小さいことが実験的にわかっているため、小さな $|\Delta m_{21}^2|$ による振動と大きな $|\Delta m_{32}^2|$ による振動が実質的に分離でき、近似的に2種類のニュートリノの振動

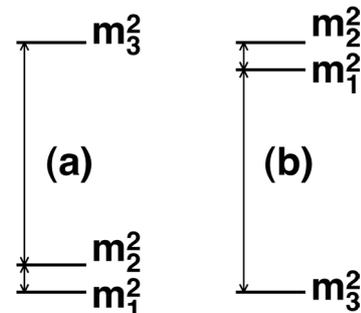


図1 現在許容されている2つの質量パターン: (a) 正常質量階層 (normal hierarchy), (b) 逆質量階層 (inverted hierarchy) はそれぞれ $\Delta m_{32}^2 > 0$, $\Delta m_{32}^2 < 0$ に対応する。

として議論できることが知られている。太陽ニュートリノの観測と KamLAND 実験（長基線原子炉の観測）から $(\sin^2 \theta_{12}, \Delta m_{21}^2) \sim (0.3, 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2)$ 、大気ニュートリノ・加速器ニュートリノの観測から $(\sin^2 \theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|) \sim (0.5, 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ 、短基線原子炉の観測から $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.1$ であることがわかっている。ここで、 Δm_{21}^2 の符号は太陽ニュートリノの物質効果のために正であることがわかっているが、 Δm_{32}^2 の符号は、大気ニュートリノが主に $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ の振動で、物質効果がほとんど効かないために、現時点では正負どちらも許されている（図1参照）。

3. 今後の課題^{*1}

1998年のスーパーカミオカンデ以来の多くの実験結果により、現在までに3つの混合角すべてと2つの質量二乗差の絶対値が決定されている。残る未定のパラメータは質量パターンとCP位相 δ であり、これらを決定することが現在のニュートリノ物理学の重要な課題となっている。

質量パターンに関しては、ニュートリノと反ニュートリノとで物質効果の符号が異なり、物質効果は長距離で顕著であることが知られているため、長距離（ $\geq 1,000 \text{ km}$ ）の長基線実験で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の違いを比較すれば決定できると考えられている。

一方、CP位相 δ に関しては、実はパラメータ縮退として知られる問題がある。振動確率 $P \equiv P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ と $\bar{P} \equiv P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ が一定のニュートリノエネルギーと基線長に対して与えられても、 $(\theta_{23}, \theta_{13}, \delta)$ を一意的に決めることは原理的にできない、という問題である。 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ からは $\sin^2 2\theta_{23}$ の値しか求まらず、 $\theta_{23} \neq \pi/4$ ならば $\theta_{23} < \pi/4$ か $\theta_{23} > \pi/4$ の不定性が残る。一方、 $P = \text{一定}$ かつ $\bar{P} = \text{一定}$ により与えられる軌跡は、 $(\sin^2 2\theta_{13}, 1/\sin^2 \theta_{23})$ 平面内で二次曲線となる。質量パターンが不明の場合には、2つの質量パターンそれぞれに二次曲線があるため、上記の $\theta_{23} < \pi/4$ 、 $\theta_{23} > \pi/4$ の不定性を考慮すると、図2のように、一般には8個の解が存在する。それぞれの点に対して δ の値が異なるため、このパラメータ縮退を解決することが必要となる。 δ の不定性に関しては、特に質量パターンの不定性による寄与が大きいため、当面は質量パターンの決定が重要な課題である。

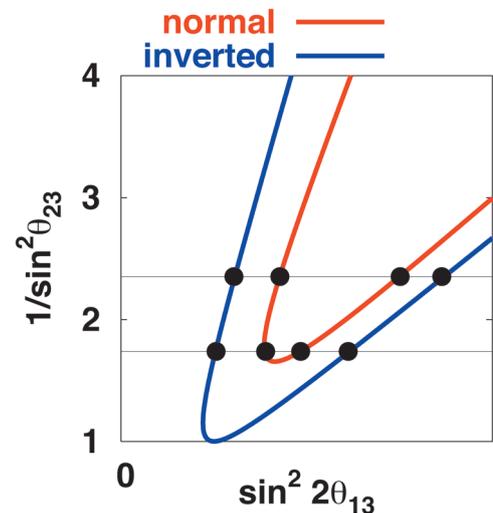


図2 パラメータ縮退： $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ 、 $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ が測定できても一般に8個の解が存在する。

4. ニュートリノ研究の将来

現行のT2K実験にはアップグレードの計画があるが、それら将来の高輝度長基線実験は、その統計精度の高さから素粒子の標準模型+質量のある3世代ニュートリノの枠組みからのずれを探索することにより、標準模型を超える物理の兆候を見つけることも可能にする。そのようなずれを予言する現象論的シナリオとしては、軽いステライルニュートリノ、フレーバーに依存する非標準相互作用、重い粒子の存在によるユニタリー性の破れなどが知られている。^{*2} ニュートリノの研究は、LHCやILCとは相補的な方法として、今後も標準模型を超える物理を探るのに重要な役割を果たすものと期待されている。

参考文献

- 1) 南方久和：日本物理学会誌 **68** (2013) 723.
- 2) A. Bandyopadhyay, *et al.*: Rept. Prog. Phys. **72** (2009) 106201.

安田 修（首都大学東京理工学研究科）

（2014年6月9日原稿受付）

^{*1} 参考文献などの詳しいことは、例えば最近の解説¹⁾を参照されたい。

^{*2} 例えば文献2の4章を参照されたい。