

# ニュートリノ振動における CP 対称性の破れの探索とその意義

**Keyword:** レプトンにおける CP 対称性の破れ

## 1. はじめに

2016年夏、ニュートリノ振動における物質と反物質の間の対称性 (CP 対称性) が90%の信頼度で破れているという結果を T2K 実験グループが報告した.<sup>1)</sup> 90%という信頼度は統計的には十分ではないが近い将来レプトンセクターにおける CP 対称性の破れが発見される可能性が大きく高まったことは間違いない。本稿ではニュートリノ振動における CP 対称性の破れの意義、宇宙における物質反物質非対称性の起源との関わり、そして測定の実状と展望について解説する。

## 2. 反粒子, CP 対称性とその破れ

素粒子には、質量とスピンの等しく電荷の符号が逆の反粒子が存在する。これは相対論的場の量子論において必然でありすべての素粒子には対応する反粒子が存在する。

粒子と反粒子の入れ替え変換 (C 変換) に対して物理法則が不変である場合その法則は C 対称性を持つという。実際電磁相互作用および強い相互作用は C 対称性を持つことが知られている。一方で弱い相互作用はクォーク、レプトンは左巻きの粒子および右巻きの反粒子に限られている。ここで左巻き、右巻きとはカイラリティと呼ばれるもので光速に近い場合には運動量方向に射影した粒子のスピンの向き (ヘリシティ) と一致するものである。そのため弱い相互作用は C 変換 (= 左巻きの粒子の左巻きの反粒子への変換) に対する不変性を持ち得ない。同様に電磁相互作用および強い相互作用が持つ鏡像 (P) 変換対称性についても粒子および反粒子の左巻き、右巻きをそれぞれ入れ替えるため弱い相互作用においては対称性にはなり得ない。

ここで C 変換と P 変換を組み合わせた CP 変換を考えてみる。この CP 変換は左巻きの粒子を右巻きの反粒子、右巻きの反粒子を左巻きの粒子に変換する。そのため CP 変換は弱い相互作用の対称性になり得る。そして実際に CP 対称性は弱い相互作用においてはわずかに破れているのみで近似的に良い対称性となっていることが分かっている。そのため素粒子標準模型では粒子反粒子対称性といった際には実質的に CP 対称性を意味し、その対称性はわずかに破れているのみであるというのが現状である。

素粒子標準模型の CP 対称性には2通りの破れのパラメータが存在する。それらは

- ・弱い相互作用における3世代クォーク混合効果
  - ・強い相互作用における strong CP の破れの効果
- によるものである。前者は小林-益川理論であり中性 K 中

間子崩壊などで観測されている CP 対称性の破れを説明する。一方 strong CP の破れの効果は理論的には存在することが期待されているにもかかわらず実際には観測されておらず未解決問題となっている。

上記の議論はニュートリノに質量がない場合であり、ニュートリノの質量を考慮すると新たな CP の破れのパラメータ (レプトンセクターの CP 位相) が登場する。特にニュートリノ振動実験で観測され得る CP の破れの効果はクォークセクターの3世代混合効果に対応するものでありそのパラメータはディラック CP 位相,  $\delta_{CP}$  と呼ばれる。

ニュートリノ振動における CP 対称性の破れが確立されればクォーク混合効果とは完全に独立な CP 対称性の破れの存在が初めて確認されることになる。strong CP の破れの効果が期待よりも非常に小さい現状を考えると新たな CP 対称性の破れの確認は CP 対称性およびその破れのより深い理解に対する重要な示唆を与え得る。またニュートリノ振動における  $\delta_{CP}$  の決定はフレーバー構造の起源のモデルや大統一模型にとって重要なインプットとなる。このようにニュートリノ振動における CP の破れの発見は標準模型を超える物理に対し大きな意味を持っている。

## 3. 宇宙の物質反物質非対称性とレプトジェネシス

我々の身の周りの宇宙は陽子、中性子および電子といった物質で構成されており反陽子、反中性子、反電子といった反粒子からなる反物質は殆ど存在しない。これは宇宙においては粒子と反粒子の間に非対称性が存在していることを意味している。

ビッグバン元素合成による軽元素粒子数密度の解析から宇宙の物質数 (= 核子数) と光子数の比は  $\sim 6 \times 10^{-10}$  であることが要求される。粒子と反粒子の間に対称性が存在した場合には核子と反核子は宇宙初期にほとんど対消滅してしまう。またクォーク混合効果による CP 対称性の破れのみでは消えずに残った物質密度を説明できない。したがって初期宇宙において未知の粒子反粒子間の非対称性が生じている必要がある。

そのような物質反物質非対称性の起源の最も有力な候補と考えられているのがレプトジェネシス機構である。ニュートリノの質量が非常に小さいことを自然に説明するモデルとしてシーソー機構が挙げられる。レプトジェネシス機構ではその機構に現れる重い右巻きニュートリノの崩壊における CP 対称性の破れによって宇宙の物質反物質の非対称性が説明される。レプトジェネシスは軽いニュートリ

ノの質量と宇宙の物質反物質非対称性の起源を統一的に説明する機構であり、レプトンセクターにCP対称性の破れが存在することを要請している。

ただしレプトジェネシスに必要なCP対称性の破れには複数のCP位相が寄与するため一概に $\delta_{CP}$ とレプトジェネシスを関連づけることは難しい。しかしながらレプトンセクターにおけるCP対称性の破れの実験的な確認はレプトジェネシス機構の解明に向けての重要な一步となることは間違いない。また、さらに踏み込んだ仮定として、レプトンセクターのCP対称性の破れがニュートリノ振動に現れる $\delta_{CP}$ のみであったと仮定すると $|\sin\theta_{13}\sin\delta_{CP}| > 0.09$ であることが要求される( $\sin\theta_{13}$ はニュートリノ混合角 $\sin\theta_{13} \approx 0.15$ )。<sup>2)</sup> こういった仮説についても近い将来のニュートリノ振動実験によって検証されていくことが期待される。

#### 4. CPの破れの測定の現状と展望

T2K実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器J-PARCからニュートリノビームを295 km離れた岐阜県飛騨市神岡にあるスーパーカミオカンデ検出器に打ち込みニュートリノ振動を測定するという実験である。陽子を標的物質に打ち込むとパイ中間子が放出される。パイ中間子はやがてミューオンとミューオンニュートリノに崩壊する。電磁石で $\pi^+$ ないし $\pi^-$ を選択的に収束することで、ミューオンニュートリノビームないし反ミューオンニュートリノビームを作ることができる。ミューオンニュートリノは、わずかに質量の異なる三種類の波の重ね合わせ状態にあり、長距離走行するうちに波の位相にずれが生じて、電子ニュートリノやタウニュートリノ状態が混じってくる。これがニュートリノ振動である。CP位相 $\delta_{CP}$ が $0^\circ$ または $180^\circ$ と異なる値を持つと、ミューオンニュートリノのうちどれだけが電子ニュートリノへ振動するのかが、ニュートリノの場合と反ニュートリノの場合で異なる、すなわちCP対称性が破れることになる。スーパーカミオカンデでは、(反)ミューオンニュートリノ事象と(反)電子ニュートリノ事象を識別することができるため、(反)電子ニュートリノへの振動確率を測定することができる。

図1は、T2K実験で観測された(反)電子ニュートリノ事象数である。実は今回の結果は純粹にニュートリノと反ニュートリノを比較したものではない。太陽ニュートリノや原子炉ニュートリノの測定結果、そしてミューオンニュートリノの消失の測定を用いると $\delta_{CP}$ 以外を除けば振動確率を予測することができる。図1で赤線はそのようにして予測した $\delta_{CP}=0$ の場合の予測事象数である。電子ニュートリノではこの予測よりも多く、また反電子ニュートリノでは少なく観測されている。これらの情報を組み合

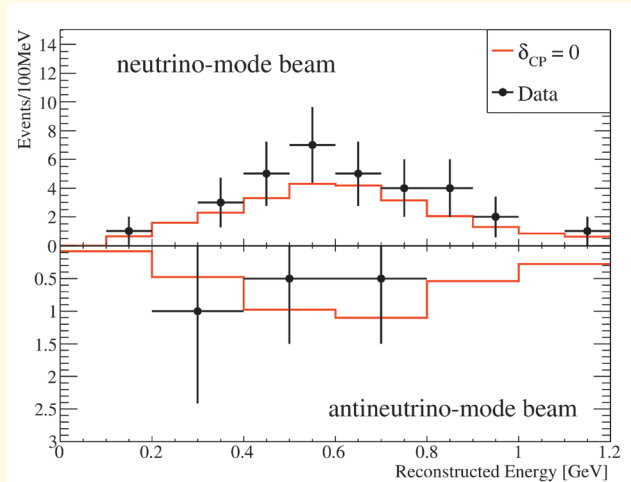


図1 2016年夏に公表されたT2K実験での電子ニュートリノ事象(上図)と反電子ニュートリノ事象(下図)のエネルギースペクトラム。赤線は、 $\delta_{CP}=0$ の場合の予測である。

わせた結果、 $\delta_{CP}$ の90%信頼度区間として $-171^\circ < \delta_{CP} < -27^\circ$ という結果が得られている。すなわちCP対称性を保存する $\delta_{CP}=0^\circ, 180^\circ$ が90%信頼度で棄却された。<sup>\*1</sup>

結論を出すには、より高統計での測定が必要である。また、純粹に $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と反 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の比較によるCP対称性の破れの測定も望まれる。T2K実験では2026年頃までに統計を約20倍増やし、CP対称性が最大に破れる $\delta_{CP}=-90^\circ$ の場合に、 $3\sigma$ の信頼度でCPの破れを発見することを目指している。一方、陽子崩壊探索やニュートリノの観測、測定を行うことを目的とした次世代の大型ニュートリノ検出器として日本ではハイパーカミオカンデ実験、米国ではDUNE実験が提唱されている。ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデの約10倍、有効質量190キルトンの水チェレンコフ検出器であり、<sup>3)</sup> またDUNEでは10キルトンタンク4基の液体アルゴン検出器の建設を目指している。<sup>4)</sup> ニュートリノビームを生成する陽子加速器の増強も行い、 $\delta_{CP}$ の広い範囲でCP対称性の破れの探索が行われると期待される。

#### 参考文献

- 1) K. Abe et al. [T2K Collaboration], Phys. Rev. Lett. **118**, 151801 (2017).
- 2) S. Pascoli, S. T. Petcov, and A. Riotto, Nucl. Phys. B **774**, 1 (2007).
- 3) <http://www.hyper-k.org/>
- 4) <http://www.dunescience.org/>

伊部昌宏 (東京大学宇宙線研究所 [ibe@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:ibe@icrr.u-tokyo.ac.jp))

市川温子 (京都大学大学院理学研究科 [ichikawa@sephys.kyoto-u.ac.jp](mailto:ichikawa@sephys.kyoto-u.ac.jp))

(2017年4月30日原稿受付)

\*1 2018年夏には、CP対称性保存を95%信頼度で棄却する結果がT2K実験により公表されている。