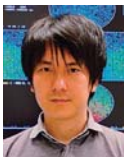
長基線ニュートリノ振動実験 T2K による $\nu_\mu \to \nu_e$ 振動の発見

坂下　健
高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所



西村康宏
東京大学宇宙線研究所

南野彰宏
京都大学大学院理学研究科

素粒子の一種であるニュートリノは，フレーバーと呼ばれる3つの種類（ν_e, ν_μ, ν_τ）に分けられる．これら電荷を持たないニュートリノは，電荷を持つ電子・ミューオン・タウの3つの素粒子と対応し，合わせてレプトンと称されている．「ニュートリノ振動」は，ニュートリノが質量を持つため，あるフレーバーから別のフレーバーに変化する物理現象である．この解明は素粒子物理学において重要な研究テーマの1つである．

東海－神岡間長基線ニュートリノ振動実験（T2K）は，3種間のニュートリノ振動のうち，ただ1つ未発見であった ν_μ と ν_e の間の振動「$\nu_\mu \to \nu_e$ 振動」の長期測定を2010年から開始した．茨城県東海村にある大強度陽子加速器を用いて生成された ν_μ が，295 km先の岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデで ν_e として出現する事象を探索する．

この $\nu_\mu \to \nu_e$ 振動の確率は，ニュートリノのフレーバー混合具合を表す3つの混合角のうちの1つ，θ_{13} の大きさでほぼ決まる．もし θ_{13} がゼロでなければ，まだレプトンでは知られていない「粒子・反粒子と空間対称性（CP）の破れ」が探索可能となり，ニュートリノ振動の測定によって宇宙創生の謎を解き明かす可能性を秘めている．しかし，θ_{13} は他の2つの混合角より値が小さく，どこまで大きさを持つか詳細は不明であった．

T2K実験では，2013年4月までに 6.39×10^{20} 個の陽子から生成された ν_μ ビームから，28事象の ν_e 出現事象候補を測定し，背景事象数は $\theta_{13}=0$ の時に4.6事象と見積もられた．ここから，7.5σ の有意度で θ_{13} がゼロでない大きさを持つ結果となり，$\nu_\mu \to \nu_e$ 振動の発見となった．

一方，原子炉から生じる反電子ニュートリノ（ν_e の反粒子）が別のニュートリノになり消失する量を測定する3つの実験グループが，2011年のT2K実験最初の結果に続いて θ_{13} の測定値を報告した．これらの実験はCP対称性の破れの大きさに依存せずに θ_{13} を測ることができるため，ここ数年で混合角 θ_{13} は精度よく分かってきた．

残された課題であるレプトンCP対称性の破れの探求には，原子炉ニュートリノ実験によるさらに精密な θ_{13} の測定と，CP対称性の破れの大きさにも感度を持つ加速器ニュートリノ測定の双方が重要となる．また，T2K実験ではこれに加えて，ν_μ の反粒子ビームを使い，単独でもCP対称性の破れを測定する予定である．

T2K実験では，ニュートリノ振動で ν_μ から ν_τ や ν_e へ変化しなかった ν_μ 残存量も測定して，他の混合角 θ_{23} などを詳細に決定できる．2012年6月までの 3.01×10^{20} 個のビーム陽子数のデータを解析して，$\sin^2\theta_{23}=0.514\pm0.082$，$|\Delta m^2_{32}|=2.44^{+0.17}_{-0.15}\,\mathrm{eV}^2$ と世界最高レベルの精度を達成した．

—Keywords—

θ_{13} と δ_{CP}：
ニュートリノの3つの質量固有状態（ν_1, ν_2, ν_3）と3つのフレーバー固有状態（ν_e, ν_μ, ν_τ）は互いに混合しており，牧－中川－坂田行列（MNS行列）で関係づけられる．MNS行列は3×3のユニタリー行列であり，3つの実数（$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$）と1つの複素数（$e^{i\delta_{CP}}$）の計4つのパラメータを持つ．$\delta_{CP}$ が0度や180度でない場合は $e^{i\delta_{CP}}$ が虚部を持ち，CPの破れを引き起こす．

ニュートリノ振動：
上記のようにニュートリノの質量固有状態とフレーバー固有状態は同一ではない．ニュートリノ生成時のフレーバー固有状態はMNS行列を用いて質量固有状態の重ねあわせで書ける．ニュートリノの質量が異なると，飛行に伴い次第に質量固有状態の間で位相のずれが生じ，もう一度香りの固有状態に戻すと別のフレーバーが現れる．ニュートリノ生成点から離れた位置でニュートリノを観測し，ニュートリノフレーバーの変化を調べる実験をニュートリノ振動実験という．

©2014 日本物理学会