神岡でのニュートリノ物理の大躍進

中畑雅行 〈東京大学宇宙線研究所 nakahata@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp〉

1. はじめに

平成元年頃，カミオカンデ（Kamioka Nucleon Decay Experiment）は，「大気ニュートリノの異常」，「太陽ニュートリノ問題の確認」を発表した．当時はそれらの原因の可能性の1つとして「ニュートリノ振動」が考えられていた．平成時代にニュートリノ振動はゆるぎない事実となり，今ではニュートリノ振動を手段として宇宙の物質優勢の謎を探ろうとする実験も準備されている．まさに，平成時代はニュートリノ物理が大躍進をとげた時代であった．それも神岡が先陣を切って世界を引っ張ってきた時代であった．

2. カミオカンデ

昭和58年，カミオカンデは陽子崩壊を探索する実験としてスタートした．3,000トンの水を貯めたタンクに1,000本の50 cm口径光電子増倍管（PMT）を取りつけた装置であり，大統一理論の検証を目指して陽子崩壊を探索した．しかし，陽子崩壊は見つからず（現在のスーパーカミオカンデでもまだ見つかっていない），昭和59年から60年にかけて太陽ニュートリノ観測を目指して検出器の改造をすることになった．具体的には，岩盤からのガンマ線を遮蔽するために外水槽を設け，また，粒子の発生点を精度良く決めるために時間情報を記録する電子回路を導入した．太陽ニュートリノ観測の準備がほぼ整った昭和62年に，超新星SN1987Aからのニュートリノを検出した．この成果により平成14年にノーベル物理学賞が小柴昌俊先生に授与された．

カミオカンデは，口径の大きなPMTを使用したおかげで，電子事象とミュー粒子事象とを識別できた．それにより，大気ニュートリノ観測においては主たる反応である荷電カレント反応を使って電子ニュートリノ（ν_e）反応とミューニュートリノ（ν_μ）反応を識別できた．大気ニュートリノは一次宇宙線（高エネルギーの陽子やヘリウムなど）が大気中で反応し，その際に生まれるπやK中間子が$\pi(K)\to\mu\nu_\mu$と崩壊し，さらに$\mu\to e+\nu_e+\nu_\mu$と崩壊する過程で生成されるため，ν_μ/ν_eの比は1 GeV程度以下の低エネルギーにおいては2ぐらいであることが予想された．しかし，カミオカンデの観測では，この値が予想の60%程度しかないことがわかり（「大気ニュートリノ異常」と呼ばれる），昭和63年の論文[1]で発表した．

一方，太陽ニュートリノに対しては，その観測に成功し，平成元年に論文として発表した．[2] しかし，観測した太陽ニュートリノの強度は標準太陽モデル（SSM）からの予想の約半分しかなかった．それまで太陽ニュートリノを観測した実験はアメリカのデービス（R. Davis）らが1970年頃から行った塩素実験のみであった．その実験では塩素が太陽ニュートリノと反応して生まれるアルゴン原子の数を数えるという方法で観測が行われたが，SSMの予想の1/3から1/4しかカウントされないという報告があり，「太陽ニュートリノ問題」と呼ばれていた．カミオカンデは電子散乱により，かつリアルタイムでニュートリノを捉えた．しかも，太陽との方向相関をとることによって信号とバックグラウンドとを明確に区別して太陽ニュートリノを捉え，太陽ニュートリノ問題を確認したのである．

3. スーパーカミオカンデ始動

太陽ニュートリノ問題の解決，さらなる超新星ニュートリノの観測，大気ニュートリノ異常の解決，陽子崩壊の発見を目指した，スーパーカミオカンデ（SK）の建設予算が平成3年に認められた．SKは，50,000トンの純水をタンクに満たし，50 cm口径のPMTを11,146本使用した水チェレンコフ観測装置である．5年間の建設期間の後，平成8年に実験が始まった．カミオカンデの25倍という有効体積を持ち，圧倒的に多いニュートリノ事象数によって観測開始2年後の平成10年には大気ニュートリノ異常の原因がわかった．[3] ν_μ事象の天頂角度分布をみることによって，装置の上空で生まれ約20–30 km飛行してくるν_μは変化しないが，地球サイズぐらいの数千km飛行してくるν_μはν_τへ振動してSKでのν_μ事象が減ってしまうことがわかった．これがニュートリノ振動の最初の発見となった．これにより平成27年にノーベル物理学賞が梶田隆章先生にもたらされた．

平成13年には太陽ニュートリノ問題も解決した．SKが電子散乱を使って測定した太陽ニュートリノ強度[4]とカナダのSNO実験が重水素との荷電カレント反応を使って測定したν_eの強度とを比較することによって，ν_eが$\nu_{\mu/\tau}$に振動してしまうことが太陽ニュートリノ問題の原因であることがわかった．

4. K2K実験，カムランド実験

カミオカンデが提唱した大気ニュートリノ異常を人工的に作ったニュートリノによって調べるという実験が平成7年4月に提案された．つくばのKEKにある12 GeV陽子シンクロトロンのビームを神岡方向へ引き出し，アルミニウムの標的にぶつけてν_μビームを作り，250 km離れた神岡

©2019 日本物理学会

のSKで捉えるというK2K（KEK to Kamioka）実験である．平成8年に計画が認められ，ビームライン，KEKでの前置検出器が建設され，平成11年に実験がスタートした．平成16年まで実験が続けられ，前置検出器での測定から予想されるSKでの事象数が156に対して，実際に観測された事象数が112であり，人工ニュートリノを使った実験によって大気ニュートリノ振動を確認した．[5]

太陽ニュートリノ問題を人工的なニュートリノである原子炉ニュートリノによって確認したのは，東北大学が中心となって進めたカムランド実験である．実験装置は1,000トンの液体シンチレータをバルーンに満たし，その周りに1,879本の50 cm口径PMTを配置し，全体を18 m径の球形容器に入れた装置であり，カミオカンデがあった場所に建設された．平成11年に建設が始まり，平成14年に実験が始まった．同年の12月には最初の結果を発表し，原子炉ニュートリノが予想値に比べて約60%しかないことを示した．[6] 太陽ニュートリノはν_e，原子炉ニュートリノは$\bar{\nu}_e$であるので，CPT保存を仮定すれば同じ現象をみていることになる．カムランド実験はその後，平成17年には地球ニュートリノを発見して地球物理学にも貢献し，平成23年からは^{136}Xeを用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊において世界トップクラスの研究を進めている．

5. T2K実験

ニュートリノ振動はニュートリノが質量（正確には質量固有状態間の質量2乗差）と混合を持つ場合に起こる．ニュートリノには3つの種類があるため，ニュートリノ振動は2つの質量二乗差と3つの混合角，そしてCPフェーズによって表現される．大気ニュートリノ，太陽ニュートリノとカムランド実験によって2つの混合角が決まったが，残りの混合角（θ_{13}）が未定であった．それを測定すべく，東海村の大強度陽子加速器施設（J-PARC）でν_μビームを作り295 km離れたSKで観測する実験（T2K実験）が計画された．平成16年にビームラインの建設が始まり，平成21年に実験が始まった．ニュートリノビーム強度はK2K実験の30倍以上である．平成23年にはν_e出現の兆候をつかみ，θ_{13}が有限であることを示した．[7] また，大気ニュートリノ振動に関わる振動パラメータに対しては高い精度で測定が行われている．現在，T2K実験ではν_μビームと$\bar{\nu}_\mu$ビームとで振動の違い，つまりCPフェーズが有限かどうかを調べており，これまでのデータから既に2σレベルの兆候がみえている．

6. 平成時代の成果と将来展望

平成時代に得られたニュートリノの質量と混合に関する結果を図1に示す．標準階層性が正しいか逆階層性が正しいかはまだ決まっていないが，SKがこれまでに取得した

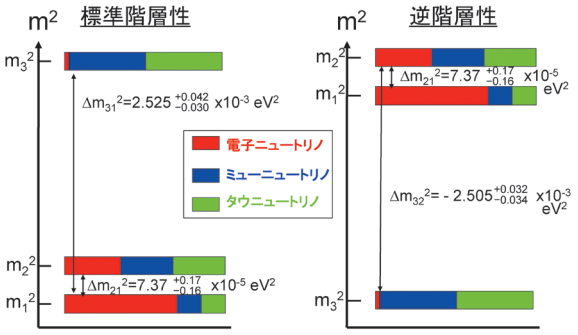

図1　今までに解明されたニュートリノの質量構造．

全大気ニュートリノデータを使った解析により91.9%から94.5%の信頼度で標準階層性が示唆されている．中国で建設中のJUNO実験では原子炉ニュートリノを精密に測定することによって質量階層性を決定しようとしている．また，建設が計画されている南極のIceCubeサイトでのPINGU実験や地中海でのKM3NeT/ORCA実験では，大気ニュートリノの高統計観測によって質量階層性を決定しようとしている．

CP非保存の兆候がT2K実験で見え始めているが，高い精度でそれを決定することは極めて重要である．レプトンセクターでのCP非保存が宇宙の物質優勢の原因であるとするレプトジェネシスが証明できるかもしれないからである．アメリカではFermilabでニュートリノを作り，1,300 km先のサウスダコタで4万トンの液体アルゴン検出器を使って測定する実験（DUNE実験）が予算化され，建設が進んでいる．日本でもSKの約10倍の容積を持つハイパーカミオカンデ（HK）が計画されている．HKはCP非保存の研究のみならず，究極の陽子崩壊探索装置，ニュートリノ望遠鏡としての機能も持ち，大きな期待がかかっている．

ニュートリノの絶対質量や質量の性質（マヨラナ質量かディラック質量）を探る実験も神岡でさらに発展していくことを期待したい．素粒子の標準理論ではニュートリノ質量がゼロであるとされているが，実際には質量を持つ．それも他の素粒子と比べて桁違いに小さな質量を持つことがわかった．標準理論はその書き換えが必要である．ニュートリノ物理を足がかりにして，新たな素粒子の全体像がみえてくるに違いない．

参考文献

1）K. S. Hirata et al., Phys. Lett. B **205**, 416（1988）.
2）K. S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **63**, 16（1989）.
3）Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 1562（1998）.
4）S. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 5656（2001）.
5）E. Aliu et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 081802（2005）.
6）K. Eguchi et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 021802（2003）.
7）K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 041801（2011）.

（2018年8月10日原稿受付）

©2019 日本物理学会