

ニュートリノ振動研究の展開

T2K実験の最新結果、そしてハイパーカミオカンデ計画

市川 温子 いちかわ・あつこ

京都大学大学院理学研究科 准教授

中家 剛 なかや・つよし

京都大学大学院理学研究科 教授、Kavli IPMU 客員上級科学研究員

1. はじめに

2017年夏、ニュートリノ振動研究に二つの大きな進展があった。一つはT2K実験の最新結果が発表され、ニュートリノで粒子と反粒子の間の対称性（CP対称性）が破れている兆候が 2σ の有意度として報告されたことである。二つ目は、スーパーカミオカンデの後継実験であるハイパーカミオカンデ計画が文部科学省の「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想・ロードマップの策定（ロードマップ2017）」に採択され、計画の実現に向けて大きく前進したことである。この暑い夏の進展について報告する。

2. T2K実験の最新結果

2.1 加速器ニュートリノ振動実験とCP対称性の破れ

ニュートリノ振動は大気ニュートリノや太陽ニュートリノの観測を通して発見され、ニュートリノに質量がある場合にニュートリノの種類が変化する（振動する）現象である。3種類のニュートリノ（電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ）が、3種類の質量の波（波動関数）の重ね合わせ状態であるために起こる波の干渉、うなり現象である。面白いことに、量子力学的に3種類の波が重なる際には、粒子と反粒子でそのうなりの様子が異なる、いわゆるCP対称性を破ることが可能となる。ニュートリノ振動において「CP対称性の破れ」は見つかっておらず、その破れ

の大きさを表すパラメータCP位相角はまだ測られていない。CP対称性を調べるには、ニュートリノがどの種類に変化したか、つまり変化後のニュートリノ出現事象を測定することが必要で、加速器で作り出すニュートリノビームを使った実験で測定が可能となる。加速器ニュートリノビームの最大の特徴は素性（種類、エネルギー、飛行距離）がそろっていることで、検出の難しい稀な出現事象を観測することができる。

2.2 T2K (Tokai-to-Kamioka)実験

T2K実験は、茨城県東海村にあるJ-PARC陽子加速器でミューオンニュートリノないし反ミューオンニュートリノのビームを生成し、295 km離れた岐阜県飛騨市神岡のスーパーカミオカンデ検出器でニュートリノを観測している。生成した時にはミューオンニュートリノであったものが電子ニュートリノに振動した割合と、反ミューオンニュートリノであったものが反電子ニュートリノに振動した割合を測定し、比較することでCP対称性の破れを調べる。CP対称性が破れていると、その割合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。または、CP位相角がゼロの場合（CP対称性が破れていない場合）のこの割合の予想値からのずれを見ることでもCP位相角を測ることができる。反ニュートリノと物質との反応頻度がニュートリノに比べて約3分の1と小さいため、ニュートリノビームで実験を行う方がより多くの電子ニュートリノへの振動事象を観測できる。

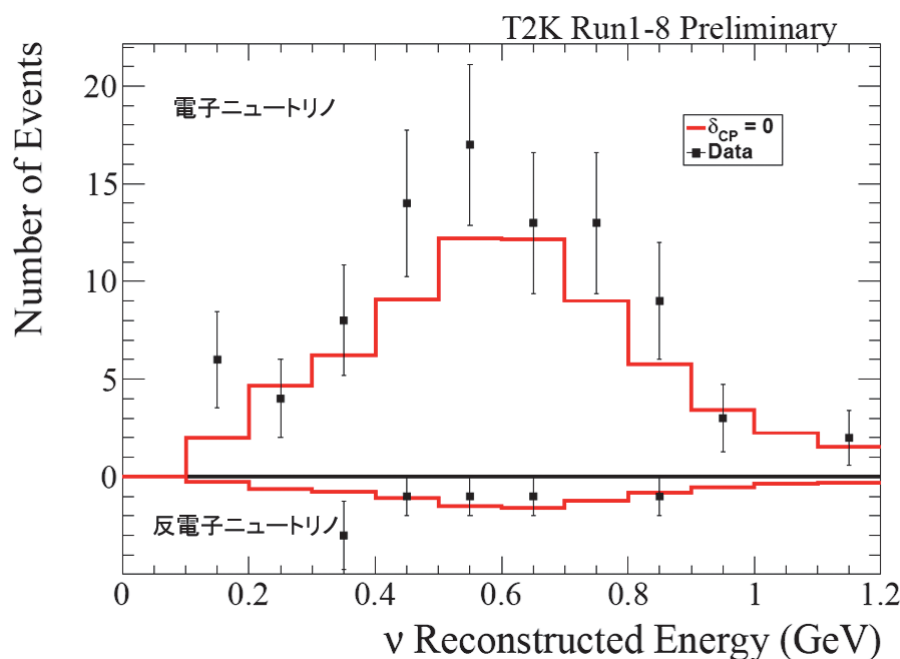


図1 電子ニュートリノ（上側）と反電子ニュートリノ（下側）のエネルギー分布。赤線はCP位相角がゼロの場合の予想値。

2010年にニュートリノビームで実験を開始し2013年に7 σ の信頼度で電子ニュートリノ出現事象を確立した。その後、2016年前半まで反ニュートリノビームで実験を行い、CP対称性が破れていそうな兆候が見えてきた。2016年の10月から2017年4月は、ニュートリノビームでデータを取得し、加速器のビーム強度が480キロワットにパワーアップしたことで、1年でニュートリノビームのデータを倍増することができた。

2.3 CP対称性の破れが見えてきた？

今回の新しい解析では、従来に比べて電子ニュートリノ事象を選ぶ効率を30%向上させることに成功した。その主な改善点は検出器内で使える体積を増やしたことである。これまでに取得したすべてのデータから、電子ニュートリノとして観測されたのは89個あった。「CP対称性の破れがない」場合の予想数は約67個で、観測数はこの予想を上回る。一方、反電子ニュートリノについても、「CP対称性の破れがない」場合の予想数は約9個であるのに対し、観測数は7個と、こちらは予想よりも少なめだ。図1は観測された電子ニュートリノ事象と反電子ニュートリノ事象のエネルギー分

布である。これに加えて、ミューニュートリノと反ミューニュートリノの観測結果、また原子炉や太陽ニュートリノ実験の結果も考慮し、総合的な解析を行った結果、データを最も再現するCP位相角は -105° となった。そして、統計的に95% (2 σ)で許容される範囲は、 -171° から -70° という結果が得られた。これは、CP対称性が破れていない（CP対称性が保存している）仮説を95%の信頼度で棄却したということである。T2K実験では、今後データ量を増やして、CP対称性が大きく破れている場合には、3 σ の信頼度で発見することを目指している。この秋からは反ニュートリノビームで更なるデータ取得を行う予定である。

3. ハイパーカミオカンデ計画の現状

ハイパーカミオカンデ計画は、スーパーカミオカンデの10倍の有効体積をもつ26万トン（有効体積は19万トン）の超大型水チェレンコフ検出装置を岐阜県飛騨市神岡町に建設し、ニュートリノ研究を広く発展させると共に、大統一理論の証拠となる陽子崩壊を世界最高感度で探索する実験の計画である。日本学術会議の

「学術の大型計画に関するマスタープラン（マスタープラン2017）」に選択され、このたび文部科学省のロードマップ2017にも採択され、いよいよ予算化が近づいてきた。

3.1 ハイパーカミオカンデ実験の目標

今夏、T2K実験が 2σ の有意度でCPの破れを観測したが、より明確な答えを得るためには、ハイパーカミオカンデ実験で 5σ を超える測定が期待されている。また、ハイパーカミオカンデ実験では大気ニュートリノの地球内部での振動を観測することで、3種類の質量の順序に関して明確な答えが得られると予想される。さらに、ハイパーカミオカンデ実験で精密にニュートリノ振動を測定することで、ニュートリノが3世代を超えて存在する可能性も探求できる。太陽ニュートリノの観測による太陽内部でのニュートリノ振動の測定も可能である。その他、我々の銀河で起こる超新星ニュートリノを観測できれば、超新星の爆発メカニズムに関して重要な情報が得られると期待できる。より遠方では、アンドロメダ銀河くらいまでの超新星爆発の探索が可能となる。さらに、宇宙に漂う過去の超新星爆発ニュートリノを捉えることで、宇宙の進化史にも重要な観測が可能となる。

これらのニュートリノ研究に加えて、ハイパーカミオカンデ実験の重要な物理の目標が、「陽子は壊れるか？」という、素粒子物理学の最重要課題に挑むことである。素粒子の大統一理論は、陽子の崩壊を予言する。これまでスーパーカミオカンデでは陽子の崩壊は見つかっておらず、大統一理論の証拠はまだ見つからない。しかし、素粒子物理学者の多くは大統一理論を信じている。ハイパーカミオカンデ実験では、その大規模を有効活用し、陽子崩壊をこれまでの10倍以上の感度で探ることが可能となる。

以上のように、ハイパーカミオカンデ計画は、ニュートリノ物理に残った問題を解決し、ニュートリノを使った宇宙観測を進展し、素粒子物理学者の夢である「大統一理論」の発見可能性を秘めた、他に類のない実験提案である。

3.2 ハイパーカミオカンデ実験装置

ハイパーカミオカンデ実験装置の概略図を図2に示

す。26万トンの超純水を蓄えたタンクに約4万本の光センサーが設置され、ニュートリノの信号や陽子崩壊の信号を、チェレンコフ光を使って観測する。光センサーはその直径が50 cmあり、光に対する感度、時間応答性、エネルギー分解能がスーパーカミオカンデのものに比べて2倍の性能を誇る。この光センサーが内面の40%をカバーしていて、微弱なニュートリノや陽子崩壊の信号を捉えるのである。

3.3 ハイパーカミオカンデ計画の現状と予定

ハイパーカミオカンデ実験は、宇宙線研究分野と高エネルギー物理学研究分野で、重要計画と位置付けられている。実験グループは世界15カ国・総勢300名からなる国際共同研究グループである。実験の草案（Letter of Intent）は2011年に出され、2015年にデザインレポートがまとめられた。現在、東京大学から予算要求が行われている。予算が認められるには、文部科学省においてハイパーカミオカンデ計画の重要性を確認する必要があり、今回文部科学省のロードマップ2017に採択されたことは、その実現に向けての大きな一歩を踏み出したと言える。ハイパーカミオカンデ計画の予算が2018年度に認められれば、そこから8年の建設期間を経て、実験は2026年に開始できる予定である。

4. まとめ

ニュートリノ研究は日本がこれまで世界をリードしてきた研究分野である。2017年も、T2K実験からCP対称性の破れに関する重要な研究結果が世界に向けて発信された。近年、基礎研究を取り巻く日本の財政状況は厳しいが、基礎研究は未来への投資であり、将来の日本のために今こそ大きな研究の進展が望まれる。ハイパーカミオカンデ実験は、建設に8年、その後10年以上の観測と、非常に長期の計画であるが、それゆえ重要な未来への投資となっている。若い研究者に夢を与え、日本の基礎研究が10年、20年先でも発展していくように、関係する方々の協力を得て、近い将来にハイパーカミオカンデ計画が実現することを期待している。

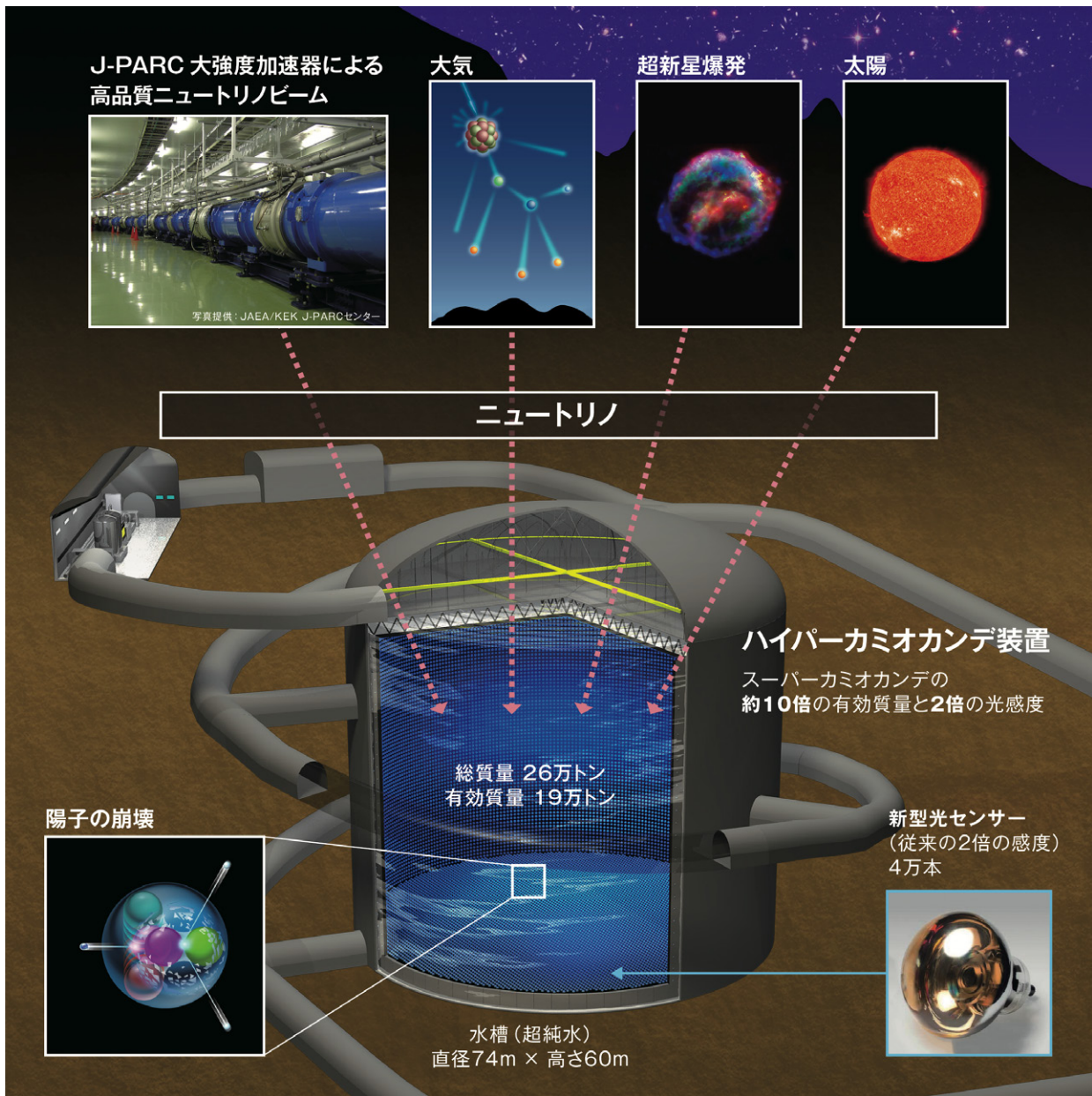


図2 ハイパーカミオカンデ実験装置の概略図とその研究対象