

■ 研究紹介

ハイパーカミオカンデの物理

東京理科大学理工学部

石塚 正基

ishitsuka@rs.tus.ac.jp

東北大学ニュートリノ科学研究センター

清水 格

shimizu@awa.tohoku.ac.jp

京都大学大学院理学研究科

Roger Wendell

wendell.roger.4s@kyoto-u.ac.jp

東京大学宇宙線研究所

矢野 孝臣

tyano@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

2019年(平成31年)2月8日

1 はじめに

1998年のスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノが非常に小さいものの有限の質量を持つことが明らかになった。その後多くのニュートリノ振動実験において予想以上の成果が得られ、ニュートリノの性質に対する理解は飛躍的な発展を遂げた。一方で、ニュートリノが他の素粒子と比べて極端に軽いことやニュートリノの性質が宇宙の物質生成に決定的な役割を果たした可能性など、究明すべき謎が新たに生じている。ニュートリノ研究は標準理論を超えた新しい素粒子・宇宙物理学への突破口として世界の注目を集めており、日本が主導する次世代計画である「ハイパーカミオカンデ」の早期実現が世界中の研究者から待ち望まれている。

ニュートリノ振動は、3種類あるニュートリノの混ざり具合を表す混合角3つ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$)、ニュートリノの質量の二乗差2つ($\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$)、CP位相1つ(δ_{CP})、合計6つのパラメータで記述される。大気ニュートリノ振動の観測では、このうちの θ_{23} と $|\Delta m_{32}^2|$ が測定された。ただし、 m_2 と m_3 の大小は未決定であり、その測定は今後の研究課題である。他のフェルミオンとの対比から、 $m_3 > m_2$ の場合を正常階層、 $m_3 < m_2$ の場合を逆階層と呼んで区別する。1970年頃より問題となっていた太陽ニュートリノの観測結果と標準太陽模型による予測の不一致は、スーパーカミオカンデとSNO実験の結果とを組み合わせることでニュートリノ振動により説明できることが明らかにされた。2002年にカミオカンデの跡地で原子炉からの反電子ニュートリノの観測を開始したカムランド実験は、太陽ニュートリノ実験の測定結果と合わせて θ_{12} と Δm_{21}^2 の値を決定し、 Δm_{21}^2 を精度良く測定することに成功した。最後に残された混合角

θ_{13} については、ゼロなのか、それとも小さいながらも有限な値を持つのか、長らく未解明であった。しかし、東海村のJ-PARC大強度陽子加速器を用いて生成した強力なニュートリノビームを295km離れたスーパーカミオカンデで観測するT2K実験が、 θ_{13} による混合の兆候を2011年に捉えた。震災の影響で1年間の実験停止を余儀なくされたことが響いて、この混合角の存在の確定こそ中国や韓国で行われていた実験に先を越されたが、この混合により引き起こされるミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの遷移（電子ニュートリノ出現現象）を、T2K実験が2013年に世界で初めて観測した。電子ニュートリノ出現現象の発見により、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを測定してニュートリノ振動の全容を解明する道への扉が開かれた。

カミオカンデによる超新星ニュートリノの初観測は、ニュートリノ天文学という新分野を創出した。ニュートリノでは、光による観測では知ることのできない天体内部のユニークな情報が得られる。将来の超新星ニュートリノ観測では、大型で高性能な検出器によってカミオカンデが観測した11事象を遥かに超える数のニュートリノを捕え、ニュートリノの放出量やエネルギーの細かな時間変化から内部の様子を調べ、爆発機構やブラックホール生成の仕組みを明らかにすることが期待されている。2017年の中性子連星合体からの重力波と電磁波の同時観測は、複数の信号から総合的に天体现象を解明するマルチメッセンジャー天文学として注目を集めている。超新星においても重力波・電磁波・ニュートリノの連携が実現すれば、さらに画期的な成果が得られると期待される。また、過去の超新星爆発で作られたニュートリノは現在の宇宙を満たしていると考えられており、この超新星背景ニュートリノを観測し、星の形成や生命誕生の元ともなった重元素の合成といった宇宙の進化の理解へ

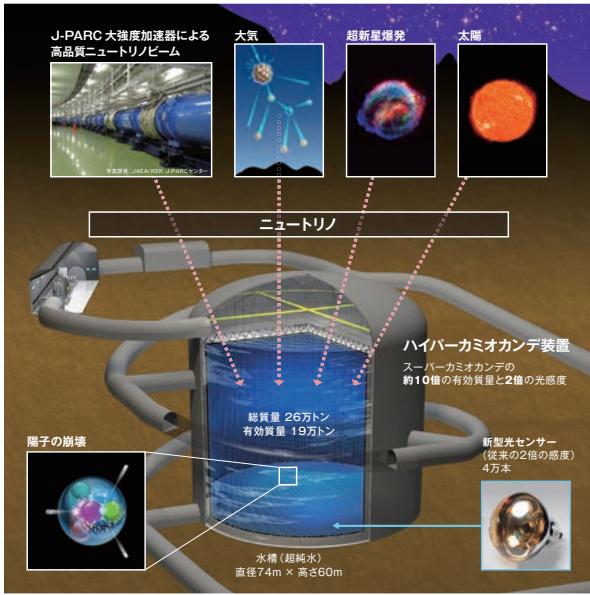


図 1: ハイパーカミオカンデ実験計画。

とつなげることも重要な課題である。

カミオカンデとスーパーカミオカンデの最大の目的の1つは、大統一理論が予想する陽子の崩壊を発見することであった。しかし、残念ながら現在までに陽子崩壊の証拠は見つかっていない。スーパーカミオカンデでは、例えば陽子崩壊モード $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ について約20年分のデータを用いて寿命の下限値 1.6×10^{34} 年を得ている。多くの大統一理論が予測する寿命に発見感度を持ち、寿命を測定して理論の検証を進めるためには、より大型で高性能な検出器が必要である。

このように、神岡の地下に設置された大型水チエレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデにより、多彩な研究分野で重要な成果が得られている。これらの研究成果をさらに発展させ、ニュートリノ混合の全容解明、陽子崩壊の発見、宇宙からのニュートリノの観測などを目指す次世代計画がハイパーカミオカンデである。

2 実験概要

ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande) はスーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande) で確立した基幹技術をもとに、その規模と性能を大幅に改良した次世代水チエレンコフ検出器である。ハイパーカミオカンデの物理目標は、J-PARCからのニュートリノビームを用いたCP位相の測定、陽子崩壊探索による大統一理論の検証、大気ニュートリノ観測によるニュートリノ質量階層の決定、太陽や超新星爆発などで生成される宇宙起源ニュートリノの観測と多岐にわたる。次世代ニュートリノ実験では国際競争が予測されるが、検出器の建設と平行してハイパーカミオカンデに向けたJ-PARCニュー

トリノビームのさらなる大強度化も進め、実験開始から数年以内でレプトンセクターにおけるCP対称性の破れの発見を目指す戦略である。図1にハイパーカミオカンデ実験計画の概要を示す。

ハイパーカミオカンデ計画では、スーパーカミオカンデより南に約8km離れた二十五山の地下650mを候補地として大空洞を掘削し、高さ60m×直径74mの円筒形の水槽を設置する。水槽は26万トンの超純水で満たされ、物理的(有効体積)はスーパーカミオカンデの10倍規模の19万トンに達する。検出器は2層構造を持ち、外水槽によりニュートリノ観測のバックグラウンドとなる宇宙線ミューオンを識別する。内水槽には50cm径の高性能光センサー(光電子増倍管)を約4万本設置し、ニュートリノ反応や陽子崩壊で生成された荷電粒子が発する微弱なチエレンコフ光を計測する。高性能光センサーはハイパーカミオカンデ実験グループと浜松ホトニクスが共同で開発したものであり、現在スーパーカミオカンデで用いられている同サイズの光センサーに比べて、光検出効率と時間分解能が約2倍に改良されている。さらに、新しい光センサーは耐圧強度も約2倍に改善されている。この改良によって水槽の構造の自由度が増し、コストの大幅な削減に繋がった。光センサーの一部に7.8cm径の光電子増倍管を19本並べてモジュール化したMulti-PMTと呼ばれる別のタイプの光センサーを用いる計画もあり、国際協力により開発が進められている。検出器と光センサーの改良については別の記事でより詳しく解説する予定である。

ハイパーカミオカンデ実験計画は、世界15か国から300名以上の研究者が参加する国際研究プロジェクトである。2015年1月には正式な共同研究グループを結成し、2020年代後半の実験開始を目指して準備を進めている。

3 ニュートリノ観測

3.1 加速器ニュートリノ

加速器ニュートリノを使った研究の主要な目的であるレプトンセクターにおけるCP対称性の破れは、その存在が予測される未知の現象¹であり、CP位相の値はクォークセクターとの比較により背後に存在する対称性の破れのメカニズムを推察する目的において重要なパラメータである。クォークセクターでのCP対称性の破れはすでに測定されているが、その効果は宇宙に存在する物質と反物質の非対称性(反粒子に比べて粒子が過剰に存在するという観測事実)を説明するには十分でな

¹T2K実験から、 2σ の信頼度でレプトンセクターでもCP対称性の破れを示唆する結果が報告されている [1]

い。したがって、現在の宇宙を説明するためには、別のメカニズムが必要になるが、その可能性のひとつとしてレプトンセクターにおける CP 対称性の破れをもとに、ニュートリノを起源として、物質が反物質より過剰にあることを説明する理論（レプトジェネシス）が提唱され、注目を集めている [2]。ニュートリノのマヨラナ性²など、必要な条件は他にもあるが、宇宙における物質・反物質の非対称性の起源を理解するための足がかりとして、 δ_{CP} の測定は重要な研究課題である。

陽子加速器を用いて人工的にニュートリノビームを生成することができる。陽子を加速してターゲットの原子核に衝突させることで荷電パイ中間子を生成し、ホーンで前方に収束した荷電パイ中間子が飛行中に崩壊することでミューオンニュートリノビームが得られる。ホーンの磁場の向きを変えることにより、同じビームラインでニュートリノビーム ($\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+$) と反ニュートリノビーム ($\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-$) を生成することができる。東海村の J-PARC で生成したニュートリノビームを 295 km 離れたハイパーカミオカンデで観測し、ニュートリノと反ニュートリノで $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率の非対称性を測定されれば、レプトンセクターにおいても CP 対称性の破れが存在する証拠となる。図 2 に示されるように、 δ_{CP} の効果は電子ニュートリノ出現確率の「ずれ」として観測されるため、高統計のニュートリノデータが必要である。これまでの実験を大幅に上回る精度でのニュートリノ振動の測定を実現するため、世界最高レベルの強度（2018 年時点で約 500 kW）で運転する J-PARC Main Ring 加速器とビームラインをさらに増強し、1.3 MW まで強度を上げるアップグレード計画が進められている。

高統計ニュートリノデータを最大限に生かしてニュートリノ振動確率を精密に測定するためには、ニュートリノのフラックスと断面積を高い精度で把握することが重要である。T2K 実験では、ビーム標的から 280 m の距離に前置検出器（ND280）を設置してニュートリノ振動が起こる前のニュートリノの種類やエネルギーを測定し、後置検出器であるハイパーカミオカンデの測定結果と比較することにより系統誤差を抑えている。ND280 については、現在アップグレード計画が進められている。ハイパーカミオカンデでは、ND280 検出器を引き続き利用し、さらに系統誤差を抑えるためにビーム標的から 1 km 程度の距離に 1,000 トン規模の中間距離水チェレンコフ検出器を建設する計画が提案されている。立坑を掘削して水チェレンコフ検出器を上下に移動させ、異なるオファクシス角度（ビーム中心からのズレの角度）でのニュートリノビームを測定することにより、ニュートリノ反応に起因する系統誤差を削減することができる。水チェレンコフ検出器における光センサーの大きさはデ

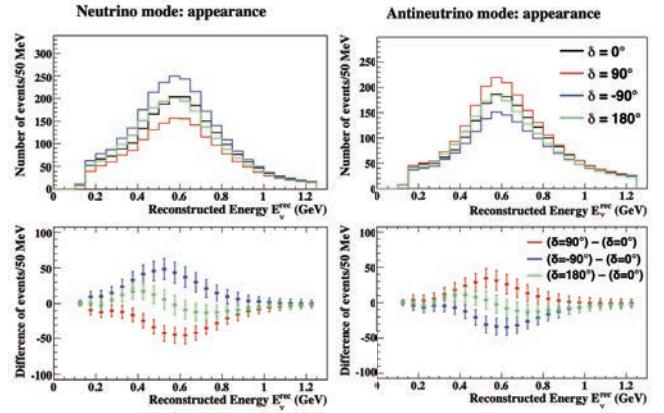


図 2: 上図: ν_μ ビーム時 (左) と $\bar{\nu}_\mu$ ビーム時 (右) の ν_e または $\bar{\nu}_e$ 出現事象の再構成エネルギー分布。色の違いは異なる δ_{CP} の値を示す。 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ で正常階層を仮定している。下図: 各 δ_{CP} の値について、 $\delta_{CP} = 0$ を仮定した場合からのずれ。誤差棒は 10 年間の観測で予測される測定データの統計誤差を表す。

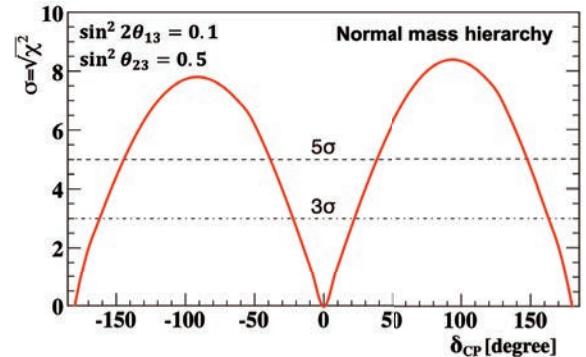


図 3: 各 δ_{CP} で、 $\sin \delta_{CP}$ が 0 でない（CP 対称性が破れている）と言える有意度（正常質量階層性を仮定）。

ジタルカメラでの画素サイズに相当するものである。小型の水チェレンコフ検出器では壁に近い位置で荷電粒子が発生するため、一般にリングの測定が難しいが、前述の Multi-PMT を用いることで精度よくチェレンコフ光のリング情報を得ることができる。

図 3 は 10 年間の測定で $\sin \delta_{CP}$ が 0 でない、つまり CP 対称性が破れていることを示す有意性をそれぞれの δ_{CP} について表す。確実に発見と言える 5σ を超える δ_{CP} の領域は全体の 57% を占め、T2K 実験の示唆する -90° 付近の領域を含む。10 年間の測定により、 δ_{CP} の値に応じて、 7° から 23° の精度で CP 位相を測定することができる。

²ニュートリノは粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子である可能性がある

3.2 大気ニュートリノ

地球には、主に陽子とヘリウム原子核から成る宇宙線が降り注いでいる。これらの宇宙線と大気中の原子核との衝突により、主にパイ中間子とK中間子から成る二次粒子が生成され、さらにその崩壊から大気ニュートリノが生まれる。大気ニュートリノは、よく制御された加速器ニュートリノと異なり、発生場所や時間といった基本情報を制御することができない。一方で、大気ニュートリノのエネルギーは約100 MeVから1 TeV以上まで広く分布し、その飛行距離も10 kmから10,000 km程度までの範囲を取りうるため、幅広いパラメータ領域で新物理を探索するのに適している。このような背景があり、大気ニュートリノ観測により $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の発見がなされた。ハイパー・カミオカンデでは高統計の大気ニュートリノデータを用いて、より詳細な3世代間ニュートリノ振動確率の測定が進められる。

前述のように、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノは質量を持っていることが知られており、それらの二乗差が測定されているが、三種類のニュートリノの質量の順番はまだ解明されていない。次世代計画では、質量階層性の決定が目的の一つであるが、その有力な手法は物質効果(MSW効果)を用いるものである。ニュートリノは飛行中に物質と相互作用を行う可能性があるが、物質内に存在する電子は、電子ニュートリノのみが受けける反応を引き起こす。このような三種類のニュートリノの間の非対称な相互作用により、 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ の振動確率が増幅もしくは抑制される効果を物質効果と呼ぶ。振動確率に対する影響は、ニュートリノのエネルギーと飛行距離、そして通過物質の密度で決まり、質量階層性にも依存する。

アメリカで進められているDUNE実験計画では、フェルミ研究所で生成したエネルギーの高いニュートリノビームを1300 km離れた液体アルゴン検出器で測定し、飛行中の物質効果によるエネルギースペクトルの歪みから質量階層性を決定する方針である。一方、ハイパー・カミオカンデでは大気ニュートリノが地球内部を通過する際の物質効果から質量階層性を決定する。特に、2-10 GeVのエネルギーを持つニュートリノが地球の中心付近を通過した場合に共鳴による振動確率の大きな増幅が起り、その効果は質量階層性によってニュートリノと反ニュートリノで異なる(図4)。

大気ニュートリノは幅広いエネルギーと飛行距離、地球内の物質効果により、質量階層性を含む複数の振動パラメーターへの感度を持ち、加速器ニュートリノによる測定とは相補的な関係にある。加速器ニュートリノと大気ニュートリノのデータを合わせた解析によりパラメーターの縮退を解決して測定精度を向上できる点がハイパー・カミオカンデの強みである。図5に質量階層性決定

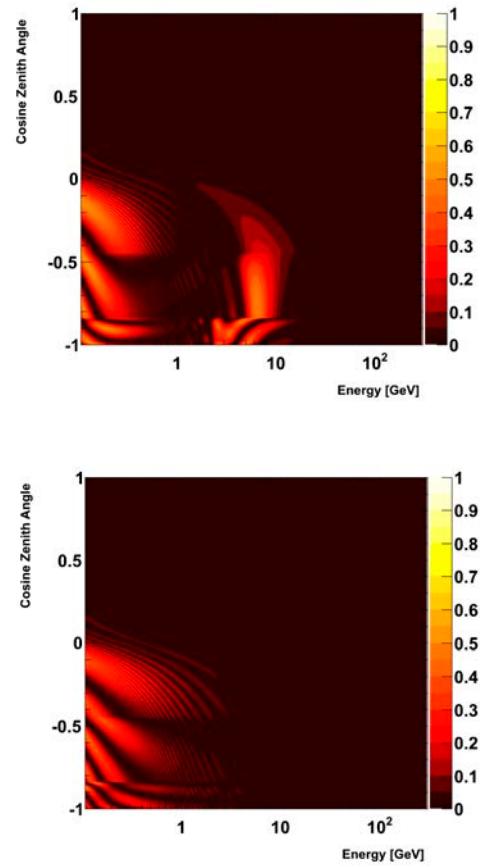


図4: 正常階層性を仮定した大気ニュートリノの振動確率。縦軸がニュートリノ飛来方向の天頂角、横軸がエネルギーを示す。上の図は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 、下の図は $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率を表している。上の図で上向き($\cos \theta < 0$)、2-10 GeVの領域に共鳴的な振動が確認できるが、逆階層性の場合は同様の共鳴的な振動が反ニュートリノのみに現れる。

の測定感度を示す。測定感度は θ_{23} の値に依存するが、もっとも感度が悪い領域でも10年間の観測で 3.8σ で質量階層性が決定できる。

その他のニュートリノ振動パラメータについても、これまでの研究を大きく上回る精度での測定が可能である。測定対象の一つである θ_{23} は、これまでの測定から 45° に近い値が得られている。これは ν_2 と ν_3 が最大近く混合していることを表すが、 θ_{23} が 45° よりも大きいか小さいかは未決定である(θ_{23} のオクタント問題)。ハイパー・カミオカンデでは幅広いパラメータ領域で θ_{23} のオクタントを決定することができる。精度を上げた測定の結果、 θ_{23} 混合角がより狭い範囲で 45° に収束することもあり得るが、いずれにせよ θ_{23} の精密測定は世代間混合の解明に重要な知見をもたらす。

また、事象ごとの識別は難しいが、統計的な手法を用

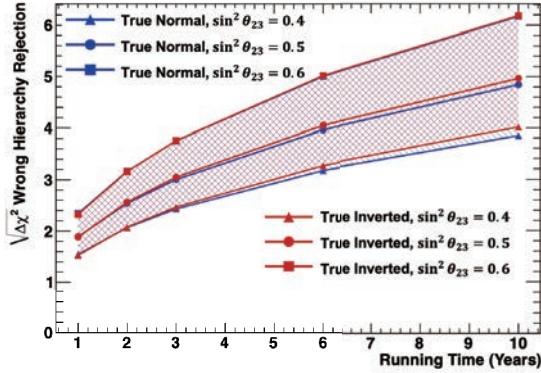


図 5: ハイパーカミオカンデの加速器ニュートリノと大気ニュートリノを合わせた解析により期待される、質量階層性決定の測定感度。測定感度は θ_{23} の値に依存し、3種類の点は $\sin^2 \theta_{23} = 0.4$ (三角), 0.5 (丸), 0.6 (四角) の場合を示す。実線と点線は、正常階層の場合と逆階層の場合にそれぞれ正しく決定できる有意さを示す。

いて $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動によるタウニュートリノ出現事象も測定可能である。すでにスーパーカミオカンデでは有意なタウニュートリノの信号を観測しており、ハイパーカミオカンデではより正確なタウニュートリノへの振動確率と反応断面積の測定が期待される。

3.3 太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノは太陽中心付近の核融合反応 ($4p \rightarrow He + 2e^+ + 2\nu_e$) によって生成され、その観測は太陽物理とニュートリノ物理の進展に大きく貢献してきた。ニュートリノは光と異なり物質とほとんど反応しないため、リアルタイムな太陽ニュートリノ観測によって現在の太陽中心部の状態をモニターできる。さらに、太陽ニュートリノは太陽内部の高密度な物質を通過して地球に到達するため、物質中におけるニュートリノ伝搬の研究も可能にする。太陽ニュートリノフラックスは標準太陽模型によって予測されている（図 6）。1990 年代に入るとスーパーカミオカンデや SNO 実験など大型検出器によって、高精度な太陽ニュートリノ観測が実現した。CPT 対称性を仮定し、太陽ニュートリノとカムランド実験による原子炉反ニュートリノのデータを組み合わせることで、 θ_{12} と Δm_{21}^2 が測定されている（図 7）。混合角の θ_{12} は太陽ニュートリノと原子炉反ニュートリノで一致している一方、 Δm_{21}^2 には 2σ 程度の違いがある。太陽ニュートリノの場合、太陽または地球の内部における MSW 物質振動によって Δm_{21}^2 を制限しているが、天頂角とエネルギーに依存した太陽ニュートリノフラックスを高精度で測定するスーパーカミオカンデのデータが支配的な

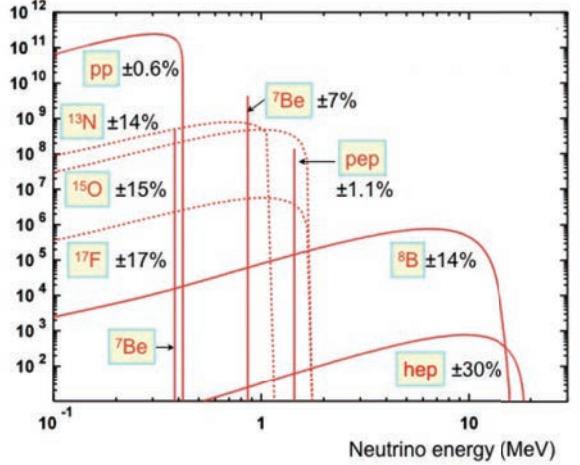


図 6: 標準太陽模型から予測される太陽ニュートリノエネルギースペクトル [3]。実線が pp チェイン、点線が CNO サイクルと呼ばれる恒星内部での核融合反応過程により生成されるニュートリノを示す。

制限を与えている。観測されているフラックスにおける昼夜非対称度の約 4% は原子炉反ニュートリノからの予測よりも大きく、これが 2σ の食い違いの大きな要因となっている。ハイパーカミオカンデでは昼夜非対称度の測定精度を改善することで、この違いが真の効果か否かを 4σ 以上の感度で検証し、新物理の可能性を探ることができる。

さらに、検出器の高性能化によってエネルギーしきい値を下げることができれば、現時点では観測されていない太陽内部の MSW 物質振動によるエネルギースペクトルの歪みの観測も期待できる。ハイパーカミオカンデによる高精度なスペクトル測定が実現すれば、ニュートリノ振動における新現象を作る候補となる非標準相互作用 [5], MaVaN [6], ステライルニュートリノ [7] などの仮説を検証できる。また、 ${}^3He + p \rightarrow {}^4He + e^+ + \nu_e$ の過程で生成される hep ニュートリノの初観測、太陽内部の化学組成の検証、短期間でのニュートリノフラックス変動など、多くの研究テーマにおいて、ハイパーカミオカンデでの高統計を活かした飛躍的な進展が期待されている。

3.4 超新星ニュートリノ

宇宙にはニュートリノ源となる様々な天体が存在しており、光による観測では得られないユニークな天体内部の情報がニュートリノ観測によって得られる。超新星爆発によって生成されるニュートリノはその代表的なものであり、その観測によって超新星内部の状態や爆発の時間発展について情報を得ることができる。

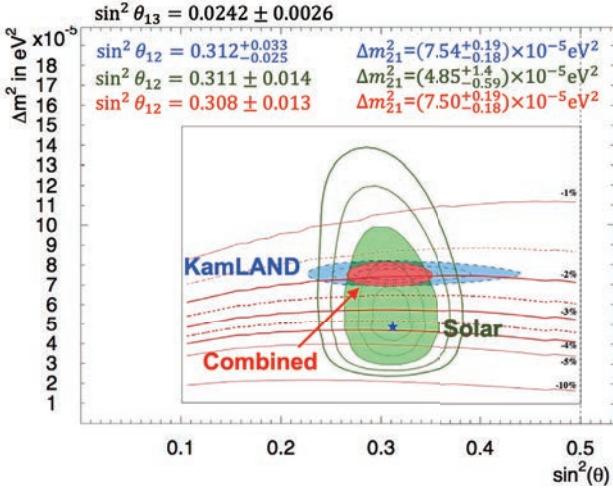


図 7: ニュートリノ振動パラメータ (θ_{12} , Δm_{21}^2) の許容領域 [4]。緑が太陽ニュートリノ、青が KamLAND による原子炉ニュートリノ、赤が両者を融合した結果を示す。塗りつぶしの部分が 3σ 領域。赤線は、太陽ニュートリノフラックスの昼夜変動の予測値（昼と夜のフラックスの差を昼と夜の平均で割ったもの）。

1987 年 2 月 23 日、カミオカンデ、IMB、Baksan の三つの実験によって超新星 SN1987A からのニュートリノが世界で初めて観測された。観測されたニュートリノ事象は全ての実験を合わせても 24 事象にすぎなかったが、重力崩壊による超新星爆発の理論が基本的には正しいと証明することに成功した。しかしその後の 30 年間、他の超新星爆発からのニュートリノは観測されておらず、光による観測や理論が示唆する爆発機構の多様性を理解するまでには至っていない。近年では計算機の能力の向上によって、超新星内部の状態を 2 次元・3 次元で再現した現実に近いシミュレーションが行われるようになった。これらの計算モデルによって示唆される爆発メカニズムの一例が SASI (Standing Accretion Shock Instability) [9] である。超新星の爆発過程では、原始中性子星の生成に伴い生じたニュートリノが衝撃波面を再加熱し、爆発に十分なエネルギーを与えることが重要だと考えられている（図 8）。以前の 1 次元のシミュレーションでは再加熱の過程が再現できなかったが、超新星中心部の非対称な物理的運動が加わることによって再加熱が起こるとしたのが SASI の特徴である。この中心部の物理的な運動は、放出されるニュートリノ量の変動としてハイパーカミオカンデで直接観測することが可能である。たとえば我々の銀河系中心で超新星爆発がおこった場合、ハイパーカミオカンデ内ではおよそ 5 万から 7 万のニュートリノ事象が予想される。これは SASI 等のモデルを検証するのに十分な統計量である。また銀河中心の超新星に対しては $1^\circ \sim 1.3^\circ$ の精度で超新星の方向を、1 ミリ秒の精度で超新星爆発が開始した瞬間を決定

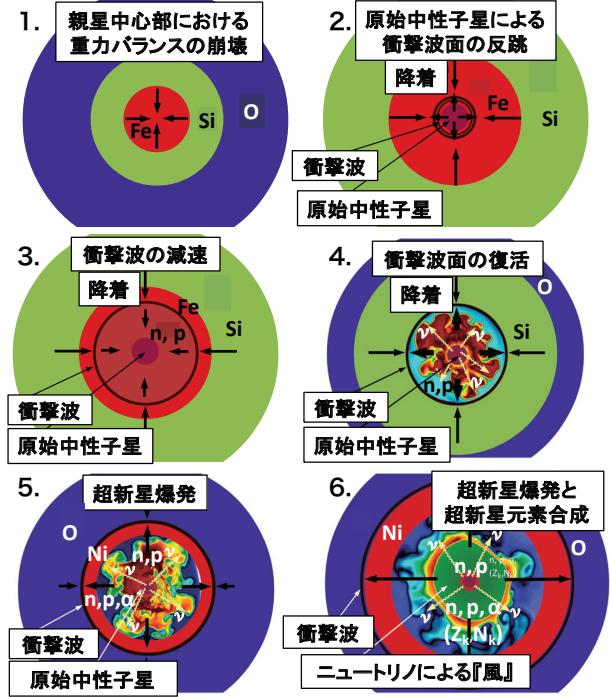


図 8: 超新星背景爆発のプロセスの概観 [8]。超新星の重力崩壊（左上図）から、原始中性子星の形成と反跳による衝撃波面の形成（右上図、超新星中心部を拡大）、衝撃波の減速（左中図）、ニュートリノ加熱による衝撃波の復活（右中図）、超新星の爆発と波面の加速（左下図）、爆発の広がりと超新星元素合成の様子（右下図）を順に示す。右下図においてはニュートリノによって加熱された物質がつくる泡とそれを縁取るニュートリノによる「風」が形成されている。これらは超新星元素合成の観点からも重要である。

することができる。これらの情報を光学や重力波の観測と共有・統合するマルチセンジャー観測により超新星爆発のより深い理解が得られると期待されている。

上記の超新星爆発の直接観測の他に、超新星背景ニュートリノの観測も重要な課題である。超新星爆発は宇宙の初期から起こっており、我々の身体を形作る重い元素は超新星内部での核反応（超新星元素合成）によって生まれたと考えられている。これら過去の超新星爆発から放出されたニュートリノは超新星背景ニュートリノとして、宇宙膨張による赤方偏移をうけたのち現在も地球に降りそそぎつづけている。この超新星背景ニュートリノを見つける試みは現行実験のスーパーカミオカンデでも行われており、このために 2018 年 6 月から 2019 年 1 月にかけて検出器の改修が行われた（SK-Gd）。代表的な理論モデルを仮定した場合、SK-Gd により 10 年間で 4σ の信号が観測される見通しである。ハイパーカミオカンデでも引き続き観測を進めることにより、超新星内部の温度・恒星の生成頻度やブラックホール形成といった超

新星爆発の多様性など、宇宙の歴史を系統的に理解するための新たな知見が得られると期待される。

4 陽子崩壊探索

現在の宇宙における物質と反物質の非対称性を説明するためには、上記の CP 対称性の破れに加え、バリオン数の破れも必須である。サハロフは粒子と反粒子が同数に存在していたと考えられている初期宇宙の進化に必要な条件を挙げ、陽子崩壊をバリオン数を破る過程として提唱したが、この現象は未だに観測されていない。また、素粒子の標準理論は電弱スケールまでの物理を非常に高い精度で再現できているが、バリオン数を明確に保存しているだけでなく、陽子と電子の電荷の大きさが何故等しいか（電荷の量子化の問題）といったような自然界に関する基本的な問い合わせを出せないことから、より包括的な理論の一部でしかないと考えられている。大統一理論は、標準理論のゲージ群を含む、より大きな対称性を持つ構造の中でクォークとレプトンを統一的に扱うことにより、電荷の量子化の問題に自然な答えを与える。電磁力・弱い力・強い力のそれぞれの結合定数が 10^{16} GeV 程度の高いエネルギー領域で収束するように見えることからも、大統一理論の存在が有力視されている。

大統一理論は非常に長寿命ではあるが核子崩壊（陽子または束縛した中性子）を予言する。異なるゲージ対称性をもとにする大統一理論（例えば、SU(5) や SO(10)）が複数提唱されているが、有力なものは陽子の寿命を $\tau_p \sim 10^{35}$ 年と予言している。現在の下限値はスーパーカミオカンデ実験により得られているが、まだ一桁短い。仮に陽子の寿命が上記の予言値だとすると、一個の陽子が崩壊するまでには平均的に 10^{35} 年かかることになるが、 10^{35} 個の陽子を集め、一年観測すれば平均で一個の陽子が崩壊する。ハイパーカミオカンデは、有効体積内に 6×10^{34} 個の陽子 (5×10^{34} 個の中性子) を含む巨大な検出器であり、大統一理論の多くのモデルに対して、陽子崩壊の発見感度を持つ。

大統一理論が予言する主な陽子崩壊モードの一つは $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ である。 π^0 は即座に二個の光子へと崩壊し水中で電磁シャワーを形成するため、ハイパーカミオカンデでは終状態の粒子を観測して陽子の質量を再構成することができる。図 9 にハイパーカミオカンデの 10 年間の観測で期待される再構成された陽子の不変質量分布を示す。 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ で崩壊する寿命が $\tau_p < 6 \times 10^{34}$ 年である場合、10 年間の観測により 3σ の有意度で陽子崩壊を発見することができる。

一方、超対称性を仮定した大統一理論では、 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ のような崩壊モードを予言する。この場合、終状態

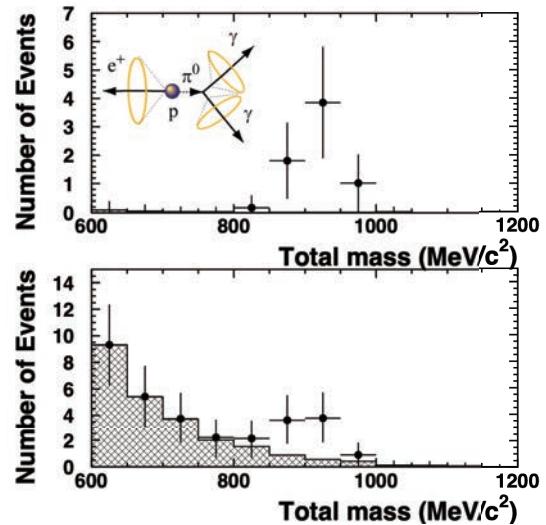


図 9: ハイパーカミオカンデの 10 年間の観測で期待される再構成された陽子の不変質量分布。網掛けヒストグラムは大気ニュートリノ反応によるバックグラウンド事象、点は期待される観測量（陽子崩壊の信号とバックグラウンド事象の和）を示す。陽子の寿命はスーパーカミオカンデによる現在の寿命下限値を超える 1.7×10^{34} 年と仮定した。上図は再構成された陽子の運動量が $100 \text{ MeV}/c$ 未満の領域、下図は $100 \sim 250 \text{ MeV}/c$ (酸素原子中のフェルミ運動量を持つ陽子) の領域を示す。

のニュートリノは観測されず、崩壊で生成される K^+ も運動量がチエレンコフ発光のしきい値以下であるため、ハイパーカミオカンデで直接捉えることはできない。したがって、この崩壊モードの探索では $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (分岐比 64%) と $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (分岐比 21%) の崩壊により発生する荷電粒子を捉える。観測される荷電粒子の運動量から K^+ の同定は可能であるが、前述の $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の探索に比べて効率は低くなる。これを補う工夫として、陽子崩壊後の原子核の脱励起により約 40%程度の割合で放出される 6 MeV のガンマ線を観測することでバックグラウンドを識別する。陽子崩壊後、即座に起こる原子核の脱励起と K^+ の崩壊 ($\tau \sim 12 \text{ ns}$) の連続した信号を識別する必要があるが、ハイパーカミオカンデに用いる新しい光センサーでは時間分解能が約 2 倍に改善されているため、脱励起によるガンマ線の検出効率が向上する。 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ で崩壊する寿命が $\tau_p < 2 \times 10^{34}$ 年である場合、10 年間の観測により 3σ の有意度で陽子崩壊を発見することができる。

上記の二つの崩壊モード以外に、大統一理論は様々な崩壊モードを予言し、モデルとパラメータにより分岐比も異なる。このため、大統一のエネルギー・スケールでの物理を理解するには、幅広い崩壊モードを探索すること

が重要である。ハイパーカミオカンデは、予言されている崩壊モードのほとんどに対して、現在までに得られている寿命の下限値を大きく超える感度を持つ。

5 おわりに

スーパーカミオカンデが1996年に稼働を開始してから20年になるが、その間、ニュートリノ研究における歴史的な研究成果の多くが、日本の実験施設もしくは日本の研究者が中心的な役割を果たす研究グループにより生み出されている。ニュートリノは反応断面積が小さく、測定が困難な研究対象であるが、スーパーカミオカンデはそれまでの実験を大きく超える精度で、多様なメカニズムにより生成されたニュートリノを観測し、素粒子と宇宙に対する理解を深めてきた。自然ニュートリノだけでなく、K2K実験・T2K実験ではスーパーカミオカンデを標的として人工ニュートリノのビームを打ち込み、300kmも離れた検出器でその変化を観測している。次世代計画では国際競争が予測されるが、スーパーカミオカンデとT2K実験による実績がハイパーカミオカンデの強みである。

ハイパーカミオカンデは2020年の建設開始に向けて、着実に準備を進めています。ハイパーカミオカンデの目的とする物理は幅広く、ここに挙げた以外にも多彩な研究テーマが期待されています[10]。また、前人未到の高統計・高精度のニュートリノデータにより、予測を超える新しい研究成果が生まれる可能性もあります。ハイパーカミオカンデの物理に興味のある方は、是非ご参加ください。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **121**, 171802 (2018).
- [2] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. **B174**, 45 (1986).
- [3] A. M. Serenelli, W. C. Haxton, C. Pena-Garay, ApJ. **743**, 24 (2011).
- [4] Y. Koshio, AIP Conf. Proc. **1666**, 090001 (2015).
- [5] A. Friedland, C. Lunardini, C. Pena-Garay, Phys. Lett. B **594**, 347 (2004).
- [6] M. Barger, P. Huber, D. Marfatia, Phys. Rev. Lett. **95**, 211802 (2005).
- [7] P. C. de Holanda and A. Yu. Smirnov, Phys. Rev. D **69**, 113002 (2004).
- [8] H. T. Janka, K. Langanke, A. Marek, G. Martinez-Pinedo and B. Mueller, Phys. Rept. **442**, 38 (2007).
- [9] I. Tamborra, F. Hanke, B. Müller, H. T. Janka and G. Raffelt, Phys. Rev. Lett. **111**, no. 12, 121104 (2013).
- [10] "Hyper-Kamiokande Design Report", K. Abe *et al.* (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration), <https://arxiv.org/abs/1805.04163> (2018).