

「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究の新展開

① 計画の概要

スーパーカミオカンデ (SK) は 50,000 トンの水チェレンコフ検出器であり、水タンク内で発生したニュートリノ事象によるチェレンコフ光を約 11,000 本の口径 50cm 光電子増倍管によって捉える。これまでは純水を使用して観測をおこなってきたが、本計画ではガドリニウム (Gd) を溶解し、中性子を同時計測することにより、反電子ニュートリノ観測感度を格段に向上させる。それにより宇宙の初期から起きてきた超新星爆発によって蓄積されたニュートリノ (超新星背景ニュートリノ) の世界初観測が期待できる。反電子ニュートリノは水中の陽子と反応し、陽電子と中性子を生成する。陽電子によるチェレンコフ光と Gd が中性子を捕獲して生成するガンマ線が発生するチェレンコフ光を遅延同時計測で測定することにより、バックグラウンドを格段に除去でき、年間に数事象程度しか起こらない超新星背景ニュートリノ事象を同定できるようになる。一方、天の川銀河での超新星爆発に対しては中性子の情報によりその方向決定精度を向上させることができる。また、超近傍での超新星に対してはその出現を予知することができる。ニュートリノ事象と反ニュートリノ事象の識別を中性子の生成数の違いを利用して向上させることができ、T2K 実験においては CP 非保存の探索に寄与し、大気ニュートリノ観測においてはニュートリノ質量階層性の解析に寄与する。また、陽子崩壊事象の識別能力も向上させることができ、陽子崩壊の感度向上も期待できる。

② 学術的な意義

世界のどの実験もまだ超新星背景ニュートリノの観測に成功していない。1万トンの水に対して年間に反応する事象数が数個程度であるため、観測のためにはそもそも SK クラスの巨大な検出器を必要とする。SK においてバックグラウンドを低減することによってはじめて観測が可能となる。超新星背景ニュートリノのスペクトルは、超新星爆発の頻度、大質量星生成の歴史、爆発時の平均ニュートリノエネルギーによって決まる。したがって、超新星背景ニュートリノが観測できれば、これらに関する知見を得ることができる。特に、ニュートリノによって得られた超新星爆発の頻度と光学観測によって得られた頻度を比較すれば、重力崩壊によりブラックホールを形成する割合を知ることができる。我々の近傍 (天の川銀河や近傍の星雲) での超新星爆発に対しては、1987 年にカミオカンデが大マゼラン星雲での SN1987A からのニュートリノを捉えて以降、超新星ニュートリノは観測されていない。現在では、世界に数百トンから千トンクラスを中心として約 10 の観測装置が超新星ニュートリノ事象をとらえることができるが、SK が最も詳細に爆発過程をとらえることができる。また、方向性をもつチェレンコフ光を使って観測している SK だけが超新星の方向を決定することができる。そして、Gd を加えることにより更にその性能を向上させることができる。反ニュートリノ反応の方がニュートリノ反応に比べてより多くの中性子を生成するため、中性子の同時計測は両反応を識別する情報を与え、大気ニュートリノによるニュートリノ質量階層性の決定、T2K 実験における CP 非保存の探索に寄与する。また、陽子崩壊においては中性子の発生がほとんどないことを使い、陽子崩壊に対するバックグラウンドを低減させることができる。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

超新星背景ニュートリノの観測においては、20,000 トンの液体シンチレータを使用する JUNO 実験が 2021 年から中国でスタートし、装置の質量も SK に匹敵することから大きな競争相手となる。SK では 2019 年度に 0.01% の濃度で Gd を溶かし、いち早く初観測を目指したいと考えている。その後も Gd の濃度をあげ、観測を先行させていきたいと考えている。我々の近傍での超新星爆発ニュートリノ観測においては、世界の他の装置は液体シンチレータを使った装置がほとんどであり、ニュートリノの方向を捉えることができない。それに対して SK は全反応の 3~5% 程度ではあるが方向性を維持したニュートリノと電子との散乱事象をチェレンコフ光によってとらえることによって、ニュートリノの方向、つまり超新星の方向を捉えることができる。

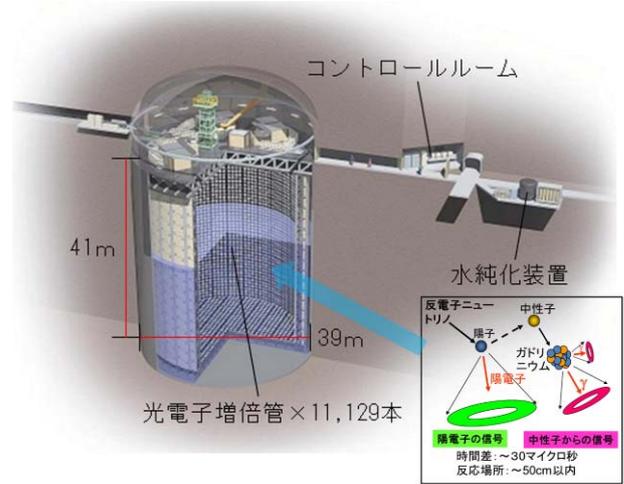


図 1 スーパーカミオカンデ検出器とガドリニウムによる中性子同時計測の様子

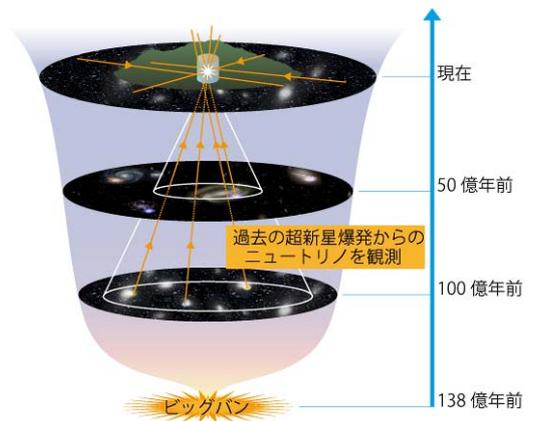


図 2 超新星背景ニュートリノ

陽子崩壊においては世界にSKと並ぶ感度を持つ観測装置はないが、本計画によりその性能をさらに向上させることができる。

④ 実施機関と実施体制

実施の中心となる機関：東京大学宇宙線研究所、役割：観測装置・施設の維持運転。附属神岡宇宙素粒子研究施設には、スタッフが23名（教授3名、准教授4名、助教6名、特任准教授/助教10名、（2019年3月時点））おり、本計画の推進に携わる。体制について機関レベルでの合意がとられている。

参加機関：（日本）KEK、神戸大学、京都大学、岡山大学、東京大学[理学系研究科、カブリIPMU]、東京工業大学、名古屋大学、東海大学、宮城教育大学、岐阜大学、大阪大学、横浜国立大学、東京理科大学、福岡工業大学、静岡福祉大学、役割：ニュートリノデータの解析。（アメリカ）カリフォルニア大学アーバイン校/デービス校、ボストン大学、ストーンブルック大学、デューク大学、ハワイ大学、カリフォルニア州立大学、役割：外水槽検出器の維持運転。（韓国）ソウル大学校、全南大学校、光州科学技術院、成均館大学、役割：水質モニターの維持運転。ポーランド：National Center for Nuclear Research, NCBJ、役割：暗黒物質の間接探索。（カナダ）トライアンプ研究所、ブリティッシュコロンビア大学、トロント大学、役割：光電子増倍管の応答計測。中国：清華大学、役割：中性子遅延同時計測の測定。（スペイン）マドリッド自治大学、役割：Gdのバックグラウンド評価。（イギリス）インペリアル・カレッジ・ロンドン、クィーンメリー大学、リバプール大学、オックスフォード大学、シェフィールド大学、ラザフォード・アップルトン・ラボラトリー、役割：較正装置の維持運転。（イタリア）INFNパドバ大学、INFNナポリ大学、INFNローマ支部、INFNバリ支部、役割：新規較正システムの開発。（フランス）エコールポリテクニーク、低エネルギー事象の再構成プログラムの開発。

⑤ 所要経費

本計画は大規模学術フロンティア促進事業の一環として進められている現行計画「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」が最終年度を迎える2022年度の次の年度（2023年度）からハイパーカミオカンデが安定運転に入る予定の2027年度までの5か年間おこなうこととしており、総経費として35億円（年間運用経費7億円×5か年間）を必要とする。ただし、ハイパーカミオカンデの運転開始が遅れた場合には本計画の観測運転を継続する。年間経費の内訳は、SKの運転経費：1.85億円、実験経費：3.00億円、人件費：0.99億円、安全管理関係等：0.83億円、T2K実験関係：0.28億円、研究・技術力の強化：0.09億円。なお、本計画は後継計画であり、現行計画にかかる総経費は2021年度から2022年度まで14億円である。

⑥ 年次計画

本計画は現行計画「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」の後継計画として位置づけられており運用を中心とした計画であるため、大規模な装置の開発・製作・設置は必要としない。ただし、Gdの量を増やし中性子捕獲効率をあげることを本計画期間内におこなう可能性はある。超新星爆発ニュートリノ観測においては超新星の方向を決定できる水チェレンコフ型検出器が世界に少なくとも一機は必要である。そのため、本計画はハイパーカミオカンデ実験が安定稼働に入るまで行う必要がある。

⑦ 社会的価値

神岡でのニュートリノ研究は2002年の小柴昌俊氏、2015年の梶田隆章氏のノーベル物理学賞の受賞を通して国民の理解を頂いていると考えられる。今後も世界最先端のニュートリノ研究を継続し、広報活動もさらに充実させ、国民への理解をさらに深めていきたい。これまでのSKの研究によってニュートリノが質量を持つという発見があり、素粒子の分野で大きな知的価値があった。これからは更に「ニュートリノを使って宇宙を見る」というニュートリノ天文学の分野を開拓し、知的価値を高めていきたい。

⑧ 本計画に関する連絡先

中畑 雅行（東京大学宇宙線研究所）