

超新星ニュートリノをとらえるために ——スーパーカミオカンデのいま



関谷 洋之

東京大学宇宙線研究所
sekiya@icrr.u-tokyo.ac.jp



原田 将之

東京大学宇宙線研究所
mharada@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

2026年4月1日、スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande, SK) は観測開始から30周年を迎える。1996年の稼働以来、太陽ニュートリノ・大気ニュートリノ・加速器ニュートリノの観測を通じて、**ニュートリノ振動**の発見など重要な成果を挙げた。特に、大気ニュートリノによるニュートリノ振動の発見は「ニュートリノに質量がある」ことを示す決定的証拠となり、素粒子物理学の標準理論を超える新しい物理像を開く契機となった。この成果により、2015年には梶田隆章氏がノーベル物理学賞を受賞している。

ニュートリノ振動の観測が成立した背景には、地球の大気や地球のスケールがニュートリノの性質を測定するのに偶然にも適していた、という幸運があったことも指摘できる。宇宙の中で私たちの環境がこのような測定に理想的であったことは、ある種の必然性を感じさせる興味深い側面である。また、先代のカミオカンデでは1987年、幸運にも大マゼラン雲で発生した超新星SN1987Aからのニュートリノをとらえ、ニュートリノ天文学という新しい分野を切り開いた。この成果により、2002年に小柴昌俊氏がノーベル物理学賞を受賞している。

しかしその後30年以上、銀河系内での**重力崩壊型超新星爆発**は観測されておらず、爆発に伴う膨大なニュートリノ放出を直接とらえる貴重な機会はいまだ訪れていない。超新星ニュートリノの検出は、爆発機構の理解や高密度核物質の状態方程式への洞察などに直結する、ニュートリノ天文学最大級の課題のひとつである。

この挑戦に向けて、SKでは2020年以降、

逆ベータ崩壊を通じた反電子ニュートリノへの感度向上を目的として、水にガドリニウム (Gd) を導入する「SK-Gd プロジェクト」を推進している。中性子捕獲断面積の大きいGdにより、逆ベータ崩壊で生成される中性子を高効率に検出できるようになり、反電子ニュートリノの識別能力が飛躍的に向上した。これにより、過去の宇宙に由来する**超新星背景ニュートリノ** (Diffuse Supernova Neutrino Background, DSNB) の世界初検出にも挑戦している。DSNBの観測は、重力崩壊型超新星の平均的な描像を与えるだけでなく、超新星爆発発生率に関わる、光では観測できないブラックホール形成の履歴や、宇宙における星形成率・初期質量関数といった重要な天体物理パラメータを、ニュートリノの観点から独立に検証する手がかりを与える。

さらに、もし銀河系内で超新星爆発が発生すれば、ニュートリノは光よりも早く放出されるため、その即時検出が**マルチメッセンジャー天文学**において決定的に重要となる。ニュートリノの到来方向を測定可能な検出器は現時点でSKが唯一であり、NASAのGCN (Global Coordinates Network) や国際天文学連合 (IAU) のTNS (Transient Name Server) といった国際的観測ネットワークの中でも中心的な役割を果たしている。

このように、太陽ニュートリノ観測に加え、超新星ニュートリノ、そしてDSNBの探索に至るまで、スーパーカミオカンデはニュートリノ天文学においても唯一無二の役割を担っている。30周年を迎える今、その「望遠鏡」としての科学的意義はますます大きくなっている。

用語解説

ニュートリノ振動:

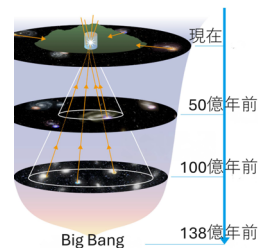
ニュートリノが飛行する途中で種類 (ν_e, ν_μ, ν_τ : フレーバー) を変える現象。質量固有状態と弱い相互作用の固有状態が異なるため、量子力学的に混ざり合い、時間とともにフレーバーが変化する。

重力崩壊型超新星爆発:

太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星が一生涯の最期に起こす大爆発。この際、爆発エネルギーの約99%がニュートリノとして放出される。

超新星背景ニュートリノ:

宇宙の歴史を通じてこれまでに起きたすべての重力崩壊型超新星爆発から放出されたニュートリノが重ね合わさり、背景放射として存在しているもの。



過去~130億年にわたる超新星爆発からのニュートリノが時間をかけて現在のスーパーカミオカンデに届いている様子。

マルチメッセンジャー天文学:

宇宙から届く異なる種類のシグナルを「メッセンジャー」としてとらえ、天体現象を研究する手法。可視光やX線などの電磁波観測だけでなく、重力波、ニュートリノ、宇宙線といった情報も組み合わせ天体現象の全体像の解明を目指す。