科学研究費助成事業（基盤研究（Ｓ））公表用資料
〔令和５(2023)年度 中間評価用〕

令和５年３月３１日現在

研究期間	：２０２１～２０２５
課題番号	：２１Ｈ０４９８９
研究課題名	：スーパーカミオカンデ超新星爆発ニュートリノ観測による爆発天体の早期特定
研究代表者氏名（ローマ字）	：中畑　雅行（NAKAHATA Masayuki）
所属研究機関・部局・職	：東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号	：７０１９２６７２

研究の概要：
本研究では、スーパーカミオカンデのタンク水中の Gd 濃度を 0.01%から 0.03%に上げ、反電子ニュートリノ反応を高い感度で識別できるようにする。これにより我々の銀河系で起こる超新星爆発に対してその方向決定精度を向上させる。また、爆発天体の早期特定を格段に向上させ、電磁波観測等との連携により、超新星爆発におけるマルチメッセンジャー天文学を開拓する。

研究分野：天体物理学、ニュートリノ天文学、宇宙線

キーワード：超新星爆発、ニュートリノ

１．研究開始当初の背景

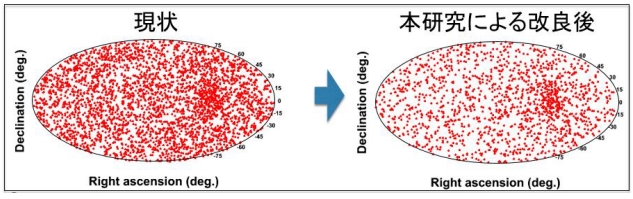
太陽の 8 倍以上の質量をもつ大質量星はその進化の最終段階で中心核が重力崩壊し、超新星爆発をおこすと考えられている。その際には 10 秒程度の間に 10^{46} ジュールもの莫大なエネルギーが生まれ、その 99%がニュートリノによって星の外に放出されると考えられている。実際、1987 年に大マゼラン星雲でおきた超新星爆発では、カミオカンデを始めとする観測装置が 24 個のニュートリノ事象をとらえ、そのシナリオが基本的には正しいことを示した。しかし、事象数が少なかったため爆発の詳細なメカニズムは解明されなかった。一方、超新星爆発の理論的な研究が日本を含む世界のいくつもの拠点で進められてきているが、最新の素粒子、原子核、宇宙の理論を駆使したシミュレーションでも「なぜ爆発するのか」がまだ理解できていない。

２．研究の目的

スーパーカミオカンデ(SK)は 5 万トンの水槽に 11,000 本の 50cm 径光電子増倍管を取り付けた観測装置であり、我々の銀河系で超新星爆発がおこれば、数千から 1 万ものニュートリノ事象が期待できる。また、「研究の方法」で述べるように SK は超新星の方向を観測から決めることができる。これができるのは世界でも SK のみである。SK は 2020 年度にタンクにレアアースの一種であるガドリニウム(Gd)を 0.01%の濃度で導入し、ニュートリノ反応を識別する計画をスタートした。本研究では Gd の濃度を 0.03%まで上げ、ニュートリノ反応の識別能力をあげ、超新星の方向決定精度を格段に向上させる。また、いち早くニュートリノ観測結果を世界に発信することにより、超新星爆発におけるマルチメッセンジャー天文学を構築する。

３．研究の方法

超新星ニュートリノのエネルギー領域では、反電子ニュートリノが水中の陽子と反応する逆ベータ崩壊反応（以下 IBD）の反応確率が最も高い。しかし、この反応で発生する陽電子は元のニュートリノの到来方向を保持していない。一方で、ニュートリノと電子の弾性散乱（以下 ES）による反跳電子は元のニュートリノの到来方向と強い相関を持つが、ES は IBD に比べて 5%程度の割合しかない。そこで着目したのが 、IBD で陽電子と同時に発生する中性子（n）信号を計測し IBD と ES を明確に区別することである。そうすれば、多くを占める IBD を「除去」し、ニュートリノの方向を保存する ES を効率良く抜き出すことが可能となり、それによって超新星爆発天体の方向決定精度を向上できる。本研究では右上図のように Gd による信号を使って IBD 事象を特定する。



右図は銀河系での超新星爆発をシミュレーションしたものであるが、各事象の方向を天球座標上にプロットしてある。左が現状であり、右が本研究によって Gd を増量し、中性子の捕獲効率をあげた場合である。このように ES 事象がより見やすくなっていることがわかる。実際、超新星方向決定精度を 3 度以内に改良できる。

また、本研究ではマシンラーニング等の技術を用いて超新星方向を算出する手法を開発し、数分以内で方向を決定するシステムを構築する。NASA が運用している GCN（Gamma-ray Coordinates Network）のソケット通信を使えば、全くのタイムラグ無しで世界中の天文台に通知が可能となる。

４．これまでの成果

SKでは、2020年に硫酸Gd八水和物（=$Gd_2(SO_4)_38H_2O$）の総重量にして約13トンを初導入して、0.01%のGd濃度で約50%の中性子捕獲効率を達成した。約2年間の安定したデータ取得の後、2022年6月から7月には、$Gd_2(SO_4)_38H_2O$の総重量にして約26トンを導入し、0.03%のGd濃度で75%の中性子捕獲効率を実現させた。

2回目の溶解に用いた$Gd_2(SO_4)_38H_2O$についても、１回目同様に、精製ロット毎に試薬メーカーと研究者の両方で放射性不純物量の分析を行い、全てのロットで我々の要求する放射性不純物量の基準値をクリアしていることを確認した。２回目の溶解用に新たに開発した精製方法を用いて、より放射性不純物の少ない$Gd_2(SO_4)_38H_2O$を安定して製造することができた。

AmBe線源（ガンマ線と中性子を放出して、先発信号と中性子捕獲信号を作ることができる）を用いた較正データによって、0.03%Gd濃度では観測される中性子捕獲信号の数がそれまでの約1.4倍に増加し、Gdによる中性子捕獲効率が向上していることが確認できた。一方で、水の透過率等、検出器状態は大きな変化はなく、安定したデータ取得を継続できている。

超新星爆発モニターについては、超新星爆発方向決定プログラムの改良を行っている。Gdによる中性子捕獲信号を使ってIBD事象をタグし、電子散乱事象と区別することで、方向決定精度を向上させた。モデルによっては10kpcの超新星方向決定精度を3度以内という目標を達成できた。また、15kpcよりも遠い超新星爆発に対して決定精度の向上が顕著であり、25kpcでは0.01%Gd濃度に対して、決定精度が約30%向上した。

超新星爆発方向を世界にアナウンスするまでにかかる時間の短縮にも成功している。超新星爆発信号に特有なIBD事象をGd信号の遅延同時計測を用いてタグできるようになったので、Gd信号を伴うIBD事象が短時間にバックグラウンド数よりも有意に多く観測される場合は、間違いなく超新星爆発を観測できたといえる。これまでは、エキスパートによるデータの確認作業によって、アナウンスまでに約１時間を要していたが、本研究の改良によりIBD事象数が基準値を超えればエキスパートの確認を待たずに観測から約１０分以内に世界に自動でアナウンスするシステムを構築した。さらに、多くの天文台が登録しているアラームネットワークであるGCN noticeを通してその方向を含む信号を自動で世界中にアナウンスすることで、登録されている天文台の望遠鏡を自動的に超新星爆発方向に向けることが可能になった。

一方で、方向決定プログラムの高速化のR&Dを進めている。HEALPIXという天文分野で広く使われているスカイマッピングツールを用いて、検出された事象方向をHEALPIX上にマッピングしその分布の形から超新星爆発方向を得ることができる手法を開発した。さらに、これまでの最尤法を用いたプログラムの改良を行い、先のHEALPIXを用いた手法を組み合わせることで、これまで約10分かかっていた計算を数秒で行うことができ、かつ方向決定精度もより良い結果を得ることに成功した。

５．今後の計画

超新星爆発が近傍で起こった場合に、その天体の方向などの情報を発生後 1 分以内に世界へアナウンスするシステムを構築する。高速化の準備は進んでおり、2023 年度中には目標の達成が見込まれている。

世界へのアナウンスをできるだけ早く行うシステムの構築に加え、より詳細なデータ解析の確立も同時に進めていく。それにより速報時には困難であった、より低いエネルギーのニュートリノ信号を取得すること、さらには、どの種類のニュートリノが、どれくらいのエネルギーを持ち、いつ、どの方向から到来したかをより正確に導出する。

国内外を問わず観測・理論の両面での超新星爆発研究コミュニティとの連携を強化し、ひとたび超新星爆発が起こった場合には、最大限の物理学・天文学的な成果を引き出す。それにより超新星爆発におけるマルチメッセンジャー天文学という新たな研究分野を確立する。

６．これまでの発表論文等（受賞等も含む）

“Development of ultra-pure gadolinium sulfate for the Super-Kamiokande gadolinium project”, M.Ikeda, Y.Koshio, H.Sekiya et al., Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2023, 1, 013H01 (2023)

“Searching for Supernova Bursts in Super-Kamiokande IV”, M.Mori, M.Ikeda, M.Nakahata, Y.Koshio et.al., The Astrophysical Journal, 査読有, 938, 35 (13pp), (2022).

“Pre-supernova Alert System for Super-Kamiokande”, L.N.Machado, M.Ikeda, M.Nakahata, Y.Koshio et. al., The Astrophysical Journal, 査読有, 935, 40 (14pp), (2022).

“First gadolinium loading to Super-Kamiokande”, M.Ikeda, M.Nakahata, H.Sekiya, Y.Koshio, et. al., Nucl. Instr. Meth., 査読有, A1027, 166248-166248, (2022).

“Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande”, M.Ikeda, M.Nakahata, S.El Hedri, Y.Ashida, Y.Koshio, PHYSICAL REVIEW D, 査読有 104, 122002-1-41 (2021).

7. ホームページ等

https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kakenhi-kibanS/