



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

東京大学・宇宙線研究所・教授

なかはた まさゆき
中畑 雅行

研究課題番号： 21H04989

研究者番号： 70192672

研究期間： 令和3年度～令和7年度 研究経費（期間全体の直接経費）： 153,000千円

キーワード： ニュートリノ、超新星爆発

【研究の背景・目的】

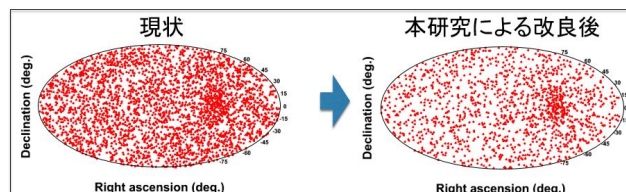
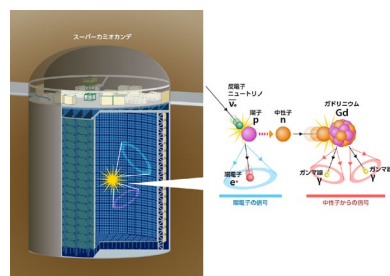
太陽の8倍以上の質量をもつ大質量星はその進化の最終段階で中心核が重力崩壊し、超新星爆発をおこすと考えられている。その際には10秒程度の間に 10^{46} ジュールもの莫大なエネルギーが生まれ、その99%がニュートリノによって星の外に放出されると考えられている。実際、1987年に大マゼラン星雲でおきた超新星爆発では、カミオカンデを始めとする観測装置が24個のニュートリノ事象をとらえ、そのシナリオが基本的には正しいことを示した。しかし、事象数が少なかったため爆発の詳細なメカニズムは解明されなかった。一方、超新星爆発の理論的な研究が日本を含む世界のいくつもの拠点で進められてきているが、最新の素粒子、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

スーパーカミオカンデ(SK)は5万トン水槽に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。

【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。右下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。

【期待される成果と意義】

超新星爆発のメカニズムを解明するためには、爆発の際のニュートリノ事象をたくさん捕え、爆発過程を詳細に観測する必要がある。我々の銀河系で超新星爆発が起きればSKの高統計観測によってそれが可能となる。ニュートリノ放出時刻から光が観測されるまでの遅延時間、爆発後の光度変化など、光学望遠鏡ともタイアップした多様な方法による観測も重要である。本研究によって爆発天体の早期特定が可能となればそれらが実現できる。また、ベテルギウス、アンタレスなどの超近傍星爆発においては、Gdの信号を使ってその爆発を事前に予知することができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・“Real-Time Supernova Neutrino Burst Monitor at Super-Kamiokande”, *Astropart. Phys.* 81 (2016) 39-48.
- ・“Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission”, *Astrophys. J.* 885, 2 (2019).

【ホームページ等】

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kakenhi-kibanS>
nakahata@icrr.u-tokyo.ac.jp