

超新星背景ニュートリノの探索

Search for Supernova Relic Neutrinos

中畑 雅行 (NAKAHATA MASAYUKI)

東京大学・宇宙線研究所・教授



研究の概要

本研究では、宇宙の初めから起こってきた超新星爆発からのニュートリノ（「超新星背景ニュートリノ」）を観測することを目指す。具体的な手法としては、スーパーカミオカンデ実験装置に中性子を同時計測する機能を付加し、超新星背景ニュートリノによる反応の際に発生する陽電子と中性子を同時計測することによって真の現象を選び出す。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学（素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理）

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倍以上重い星は、その進化の最終過程として大爆発（超新星爆発）をおこし、星の内部の物質を宇宙空間に放出する。超新星爆発は星の中心核が重力崩壊することを引き金としておこる現象であり、密度の高い物質が星の内部にあるために爆発エネルギーの99%はニュートリノによって放出されると考えられている。実際、この超新星にもなうニュートリノは1987年にカミオカンデによって観測された。

2. 研究の目的

宇宙には10の20乗個の恒星があり、そのうちの0.3%、つまり約10の17乗個の星は太陽の8倍以上の質量を持ち、超新星爆発をおこしてきたと考えられている。それにもなうニュートリノ（超新星背景ニュートリノ（SRN））が宇宙に満ちていると考えられる。本研究の目的は、超新星背景ニュートリノを観測するための手段を開発することである。SRNを観測することができれば、宇宙の星形成の歴史を探ることができる。

3. 研究の方法

ニュートリノは物質との反応断面積が非常に弱いため、SRNを捉えるためにはスーパーカミオカンデ（SK）のような非常に大きい実験装置が必要である。SKでは、年間にSRNからの信号が0.8—5個期待できる。SRNのうち、反電子ニュートリノは陽子と反応して陽電子と中性子を発生する。そこで、陽電子による信号のみならず、中性子による信号

も捉えることができれば、他の現象と区別することができる。それをおこなうため、SKにガドリニウム（Gd）という物質を0.1%の濃度で加え、Gdの中性子捕獲から発生するガンマ線を捉える。

4. これまでの成果

本研究の最も主要な研究内容はSKを模擬したテストタンクを作り0.1%のGdを溶解した水を入れ、「ガドリニウム水チェレンコフ装置」の原理検証実験をおこなうことである。この実験をEGADS（Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems）と呼んでいる。EGADSの実験施設はSKから50m程度の距離のところにある。本研究の目的のために、SKを模擬した「200m³ステンレスタンク」、Gdを溶解させるための攪拌機付き「15m³溶解槽」、Gd溶液をフィルター、ウラン除去樹脂を通してきれいにする「前処理装置」、Gdを



EGADS 実験施設の写真。左が 15 m³溶解槽、奥が 200 m³タンク、右が循環装置。

含んだ水を循環させる「循環装置」、そして「透過率測定装置」を製作した。実験施設の写真を前頁の下に示した。水循環装置は Gd を保持したまま水を常に純化させる必要がある。そのためにウルトラフィルター (UF)、ナノフィルター (NF)、逆浸透膜 (RO) を使い、UF で荒いサイズの不純物を取り、NF を通過する小さいサイズの不純物を RO にて処理し、Gd を含む NF リジェクトはそのまま保持するというシステムを作った。SK で要求される水の透過率は 100m 近いレベルであり、それを評価できるような超高感度透過率測定器を自作した。

EGADS で試験を始める前に Gd 化合物の選択を行った。Gd には何種類か化合物があり、 $GdCl_3$ 、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ などがある。いずれの化合物もステンレス構造体の強度を弱めるような腐食性はなかったが、 $GdCl_3$ 溶液では鉄イオンの溶出により黄色に変色する可能性があることがわかった。しかし、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液ではそうした色の変化は見られなかった。一方、 $Gd(NO_3)_3$ 溶液には光の吸収において問題があり、350nm 以下の波長を光を強く吸収してしまうため、チェレンコフ光を 30% 近く吸収してしまうことが分かった。 $Gd_2(SO_4)_3$ には特に問題は見つからなかったため、それを選択することとした。

EGADS のセットアップは 2009、2010 年度に製作が完了し、2011 年度は Gd 水の循環試験がおこなわれた。まず、Gd 自身の透過率を測るために 15 m³ 溶解槽に 0.2% の $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液を作り、循環装置を通してまわして純化し、透過率測定器により 337, 375, 405, 445, 473, 532, 595nm の 7 種類の波長で透過率を測定した。その結果、SK での純水透過率と比較して、85% レベルの透過率を達成していることがわかった。(これはチェレンコフ光のスペクトルを仮定した場合の 20m の距離での光強度の値)

EGADS での実験と並行して、現在の純水を用いた SK を用いての SRN 探索もおこなった。この解析ではエネルギーしきい値を 16 MeV まで下げ、また宇宙線による核破砕によるバックグラウンドを効率よく除去して探索を行い、SRN 強度の上限値をえた。また、SK の第 4 フェーズではソフトウェアによる遅延トリガーを用いて中性子の陽子捕獲による 2.2MeV ガンマ線を約 20% の効率で捉えることができるようになった。この中性子タグを用いた解析も進めている。SK で中性子タグを用いた SRN 観測を行う上で究極的なバックグラウンドになるのは大気ニュートリノの中性カレント反応によるガンマ線放出である。このバックグラウンドを見積もるために断面積の計算、T2K 実験ももちいた見積もりも行った。

5. 今後の計画

これまでの研究によって「純粋」な 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ 水溶液は純水の 85% レベルの透過率を持つことが分かった。今後は、200 m³ タンクに 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ 水溶液を貯め、循環させ、ステンレス材料の影響を評価する。その後、光電子増倍管などの SK タンクの内部で使われている部材を取り付けて、SK を完璧に模擬したセットアップにおいて、統合的な試験を行う。また、EGADS での統合試験と並行して、SK の水漏れ対策の方策を示すこと、放射性バックグラウンドが十分低いことを示すこと、大気ニュートリノバックグラウンドの正確な見積もり、を進めていく予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande, K. Bays, T. Iida, Y. Koshio, L. Marti, M. Nakahata, H. Sekiya, A. Takeda, M. Vagins, Y. Takeuchi, H. Ishino, M. Sakuda, 他 94 名, Phys. Rev. D85, 052007-1-052007-15 (2012).
2. Analysis of γ -ray production in neutral-current neutrino-oxygen quasi-elastic interactions at energies above 200 MeV, A. Ankowski, O. Benhar, T. Mori, R. Yamaguchi and M. Sakuda, Phys. Rev. Lett. 108, 052505 (2012).
3. Research and Development for a Gadolinium Doped Water Cherenkov Detector, Andrew Renshaw for The Super-Kamiokande Collaboration, proceedings of TIPP 2011, Physics Procedia, p1-8 (2011).
4. Evaluating gadolinium for use in Super-Kamiokande, L. Marti for the Super Kamiokande collaboration, the 32nd ICRC proceedings, vol. 4, p232-235 (2011).
5. Status of the Gadolinium project for Super-Kamiokande, L. Marti for the Super-Kamiokande collaboration, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 217, 281-283 (2011).
6. Detectors for Supernova Neutrinos, M. Vagins, proceedings of Neutrino 2010, Athens, Greece (2010).
7. Gadolinium study for a water Cherenkov detector, Atsuko Kibayashi, for the Super-Kamiokande Collaboration, Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society (DPF2009), arXiv:0909.5528 (2009).

ホームページ等

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