

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2005 - 2008
 課題番号：17204016
 研究課題名（和文） 超新星爆発を起源とする背景ニュートリノの探索

研究課題名（英文） Search for Supernova Relic Neutrinos

研究代表者

氏名（アルファベット） 中畑 雅行（Masayuki Nakahata）
 所属機関・所属部局名・職名 東京大学・宇宙線研究所・教授
 研究者番号 70192672

研究成果の概要：

宇宙が 137 億年前に誕生してから、宇宙のいたるところで超新星爆発が起きてきた。その超新星爆発のエネルギーの 99% はニュートリノによって星から運びさらられるため、この宇宙の初めからの超新星ニュートリノを捕らえることができれば、宇宙の超新星の歴史を探ることができる。探索の結果、そうしたニュートリノの強度はあまり大きくないことがわかり、ニュートリノ強度の上限値を与えた。また、将来の本格観測に向けて、実際に観測を可能にする方法を確立した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2006 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2007 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2008 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

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、ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は宇宙の重元素（ヘリウムよりも重い元素）の源だと考えられている。宇宙はビッグバンによって生まれたが、ビッグバンの際には主に水素とヘリウムしか合成することできず、それ以上の元素は星の進化の過程（鉄までの元素）あるいは超新星爆発の瞬間（鉄よりも重い元素）に合成されると考えられている。したがって、超新星爆発を理解することは、宇宙の重元素合成の仕組みを探る重要な手掛かりとなる。超新星爆発とは、星の進化の最後に合成された鉄のコアが重

力崩壊する現象であり、その爆発エネルギーは、星の内部が光等の電磁波に対して不透明になっているために、ほとんどのエネルギー（約 99%）がニュートリノによって輸送される。したがって、超新星ニュートリノによって、爆発エネルギーの本質をみることができる。

宇宙には 10^9 個の銀河があり、ひとつの銀河には平均的に 10^{11} 個の恒星があるため、宇宙には全部で 10^{20} 個の恒星がある。そのうちの 0.3% は太陽の 8 倍以上の質量を持ち、超新星爆発に至ると考えられている。

したがって、 10^{17} 回の超新星爆発が宇宙のはじめから起きてきたことになる。これらの超新星爆発からのニュートリノは宇宙に漂っており（超新星背景ニュートリノとよばれる）その強度は数十個/cm²/sec程度だと考えられている。図1は、安藤らによって計算された超新星背景ニュートリノのスペクトル（文献：S.Ando, *Astrophys. J.*607:20-31,2004より）であり、宇宙はじめてからの各時期（赤方偏移により分類される）からの寄与を示している。図が示すように超新星背景ニュートリノのスペクトルを将来測定

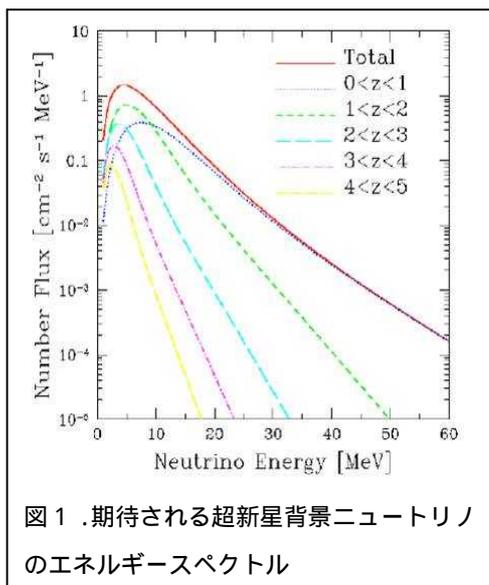


図1.期待される超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトル

することができれば、宇宙の超新星爆発の歴史を探ることができる。超新星背景ニュートリノの強度の予想値はモデルによって5倍以上の開きがあった。まずは超新星背景ニュートリノを捉えるか、あるいは強度の上限値を求めることによってモデルに制限を加え、また、将来の本格観測に向けて手法を確立することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、もし超新星背景ニュートリノの強度が大きければその発見を目指し、強度が弱ければ強度の上限値を求め、モデルに対する制限を加えることを目的とした。また、有意な信号を見つけない場合は、将来の観測に向けて観測手法を確立することを目指した。

3. 研究の方法

本研究は、以下の4つの方法により研究を遂行した。

(1) 観測データの増加

超新星背景ニュートリノの探索はスーパーカミオカンデの第1期(SK-I, 1996年5月から2001年7月)のデータを用いて以前行われたが、第2期(SK-II, 2002年12月から2005

年10月)のデータも加え、統計量を増やした。SK-IIでは光電子増倍管の数がSK-Iの時と比べて約半分に減っていたため、発生点再構成プログラムの改良とバックグラウンド事象の正確な見積もりによって、性能が劣化している部分をカバーした。(詳細は項目4に記載。)

(2) データ解析手法の改良

上記(1)の解析方法は厳しい選択条件を課して解析を行った。具体的には、核破碎にもなうバックグラウンドを減らすために40%強の観測時間を削っており、また壁外部からのバックグラウンドの進入を防ぐために壁から2mの領域で起きた現象は除いていた。これらの選択条件を詳しく見直し、より多くの観測時間を使い、より多くの体積を使うように改良をおこなった。具体的には核破碎事象をカットするための死時間を20%弱に抑え、また、壁から0.5m以内の事象も解析できるようにした。

(3) 新電子回路による2.2MeVガンマ線による中性子同時計測

探索している超新星背景ニュートリノ事象は反電子ニュートリノであるため、水中の自由陽子と衝突して陽電子と中性子を発生する。中性子は熱中性子までエネルギーが減少したのち、自由陽子に捕獲されて2.2MeVのガンマ線を出す。このガンマ線が発するチェレンコフ光の量は少なく、高々6本の増倍管に信号を与える程度であるが、時間的に同期しているため信号として取り出せる可能性がある。その可能性を調べるためにスーパーカミオカンデに導入された新電子回路を用いて研究をおこなった。

(4) ガドリニウムを用いた中性子同時計測法の開発

前項目(3)に書いたように超新星背景ニュートリノ事象は中性子を発生させるため、水中にガドリニウムを溶かしガドリニウムの中性子捕獲によるガンマ線を使えば、高いバックグラウンド除去が期待できる。ガドリニウム捕獲の信号がチェレンコフ光でどのように観測されるか、どのようなガドリニウム化合物が実験に使えるかを研究した。

4. 研究成果

「研究の方法」に掲げたそれぞれの項目について、研究成果を述べる。

(1) 観測データの増加

SK-Iの期間に取得された1496日分のデータとSK-IIの期間に取得された791日分のデータを図2、図3にしめす。超新星背景ニュートリノ(SRN)からの信号は図1のようにエネルギーが低くなるしたがって増えていく分布が期待できるが、図2、図3ではミュー粒子の崩壊電子スペクトルが見えており、特に有意なSRNの信号はみえていな

い。(SK-II においては一番低いエネルギービ

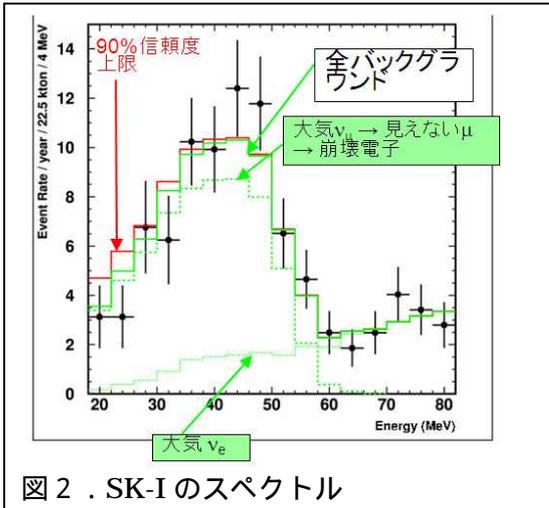


図 2 . SK-I のスペクトル

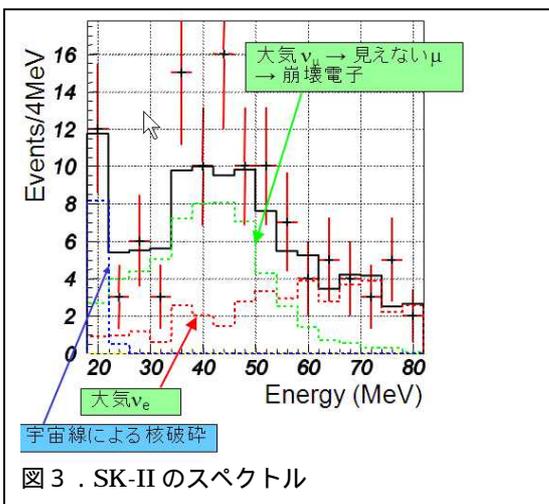


図 3 . SK-II のスペクトル

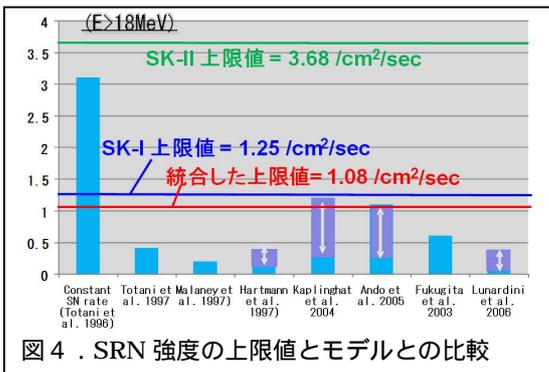


図 4 . SRN 強度の上限値とモデルとの比較

ンに超過があるが宇宙線が核破砕が作るバックグラウンドで説明がつく)この崩壊電子は、エネルギーの低い大気ミューニュートリノがチェレンコフ光を出さない低エネルギーのミュー粒子を発生し、それが崩壊する事象である。得られたスペクトルを「見えないミュー粒子」スペクトル、大気電子ニュートリノのスペクトル、期待される信号のスペクトルの形を用いて、フィッティングを行い、スペクトルの上限値を求めた。その結果を図4に示す。SK-I, SK-II の結果を統合した上限

値は 1.08/cm²/sec と得られた、この結果は主要なモデル予想値の 3 倍から同程度のレベルまで迫るものであった。

(2) データ解析手法の改良

前項(1)の結果の感度をあげるために、以下のような解析方法の改良をおこなった。

有効体積を壁から 0.5m まで使用し、約 20%統計を増やした。

(1)ではエネルギーしきい値が 18MeV であったが、それを 16MeV まで下げる。この下限は宇宙線核破砕によるバックグラウンドが見え始めるところで決まっており、核破砕の元となる宇宙線ミュー粒子の再構成を改良した。

の宇宙線ミュー粒子の再構成改良に伴い、それによる死時間を 20%程度改良した。

以上の改良を行い、SK-I のデータを再解析した結果、スペクトルは図 2 と同様に「見えないミュー粒子」で説明がつく分布をしており、有意な信号は見られなかった。解析手法の向上によって強度の上限値も改良されるが、現在系統誤差の見積もりを行っており、最終結果は SK 共同実験者グループの承認を得て本年秋頃に学術雑誌に投稿する予定である。

(3) 新電子回路による 2.2 MeV ガンマ線による中性子同時計測

SK の旧電子回路では 200ns 内に増倍管からのヒット数がある値を超えた場合にのみデータをとり込むという条件があったために、2.2MeV ガンマ線による信号を取り込むことができなかった。2008年に導入された電子回路では、PMT の暗ノイズも含めてすべてのヒット情報を一旦電子回路で取り込みその後ソフトウェアによりトリガーする。そこで、もし 10 MeV 以上の現象が内水槽の内部で起こり、かつ外水槽ではエネルギー放出がない場合には、そのイベントのあと 500 マイクロ秒間無条件にすべてのヒット情報を取り込むようにした。この条件により 2.2 MeV ガンマ線が取り込めるかどうかを試験するために、一辺が 5 cm の BGO 結晶の中央に Am / Be を配置した中性子線源を作り、中性子の検出効率を試験した。Am / Be 線源は 4.4MeV のガンマ線と中性子が同時に放出さえる。4.4MeV ガンマ線は BGO 内でシンチレーション光を出し、その光を SK の光電子増倍管で捉えることによって、500 マイクロ秒の無条件トリガーをスタートした。こうして捉えたヒット情報から 2.2MeV ガンマ線事象を探索する解析プログラムを開発した。基本的には現象が起きたと思われる場所から各増倍管までに距離を補正した後、短い時間(10ナノ秒程度)の間に同期するヒットを探索するが、光電子増倍管のガラスや衝撃波防止ケースからは常に U/Th 系列のベータ線/ガンマ線が同期するヒ

ットを作っている。こうしたバックグラウンドは壁際で起きているため、ヒットが空間的にはあまり広がりをもたない。一方、2.2MeVの信号は発生場所から見て42度のチェレンコフ光を作る広がりをもつ。こうしたパタ

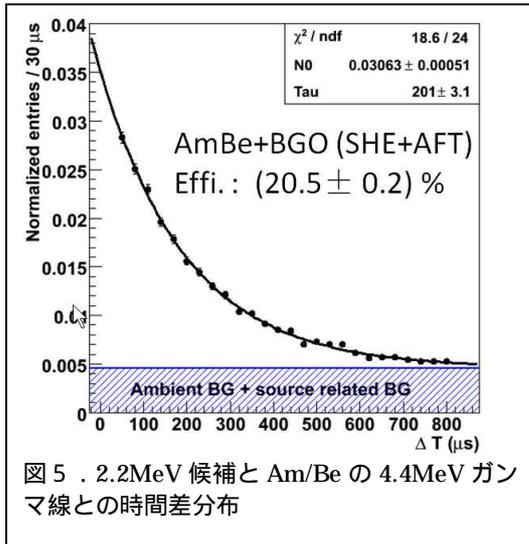


図5 . 2.2MeV 候補と Am/Be の 4.4MeV ガンマ線との時間差分布

ーン情報を使いニューラルネットワークによって解析プログラムを構築した。図5は解析プログラムが選んだ 2.2MeV 事象候補と Am/Be 線源の 4.4MeV 事象との時間差分布である。中性子が水の中で熱化され陽子に捕獲される現象は200マイクロ秒の時定数をもつがそれが観測されていることがわかる。この分布の指数減少分の面積から中性子の検出効率が約20% (タンク中央での場合)と得られ、一方、このプログラムを Am/Be 線源をタンクを入れていない場合のデータに適用し、間違っ事象を選んでしまう確率として4%が得られた。したがって、効率は20%程度しかないが、SRN探索においてS/N比を5倍向上させることができることがわかった。実際、この方法を適用して探索を行なった場合、(1)に記した方法と同程度の感度を得るのに5年近くのデータが必要であるため、今回の科研費期間中にこの方法を用いた探索結果は得ることはできなかった。

(4) ガドリニウムを用いた中性子同時計測法の開発

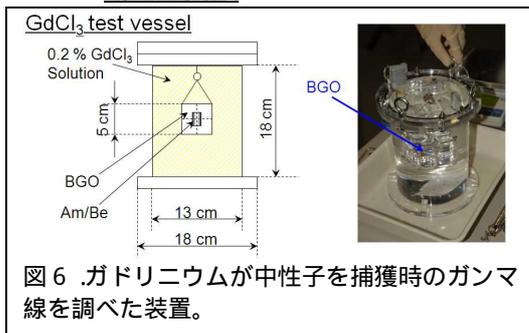


図6 ガドリニウムが中性子を捕獲時のガンマ線を調べた装置。

前項目(3)の方法では高い検出効率を得ることが難しく、また間違っ候補を選んでしまう確率が数%存在してしまう。そこで、ガドリニウムを水に溶かした場合、どのような信号が捉えられるか、間違っ候補の確率を調べた。そのために、図6のような装置を作りそれをSKタンクに降ろしてガドリニウム捕獲ガンマ線がSKでどのように見えるかを調べた。図7(左上)に Am/Be の 4.4MeV

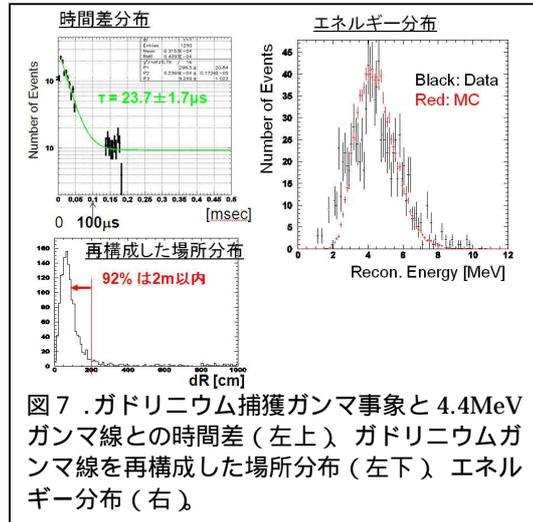


図7 . ガドリニウム捕獲ガンマ事象と 4.4MeV ガンマ線との時間差 (左上) ガドリニウムガンマ線を再構成した場所分布 (左下) エネルギー分布 (右)

ガンマ線とガドリニウム捕獲ガンマ線事象との時間差分布を示し、20数マイクロ秒の時間相関をもつことがわかった。また、ガドリニウム捕獲ガンマ線事象は平均4.3MeVのエネルギーを持つことがわかり(図7(右))それはガドリニウムの捕獲をGEANT4を使ったモンテカルロシミュレーションと良く合うことがわかった。また、ガドリニウム捕獲ガンマ事象はそれ自身で現象の発生場所を再構成することができ、その精度は2mの誤差範囲内に92%が収まることがわかった。

これらのガドリニウムのテスト結果を用いて、将来SKにガドリニウムを溶解させた場合の観測可能性について評価した。ガドリニウム捕獲ガンマ線候補は、(a)発生点が2m以内であること、(b)エネルギーが3MeV以上であること、(c)時間差が

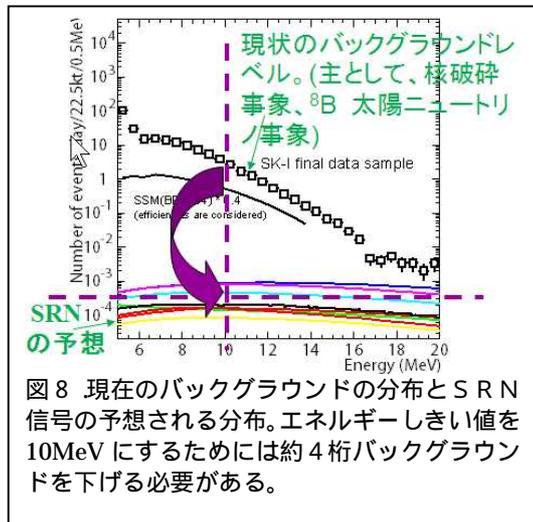


図8 現在のバックグラウンドの分布とSRN信号の予想される分布。エネルギーしきい値を10MeVにするためには約4桁バックグラウンドを下げる必要がある。

60 マイクロ秒以内であること、(d)リングのパターンが一樣に広がったパターンをしていること、という条件を課して、ガドリニウム捕獲ガンマ線の検出効率が67%(これには0.2%のガドリニウムを溶かした場合の捕獲効率(90%)も考慮されている)であり、間違い事象選択確率が約 2×10^{-4} であることがわかった。図8に現在のバックグラウンドの分布とSRN信号の予想される分布を示したが、以上の結果からガドリニウムを使えば、10MeVまで解析しきい値を下げられることがわかった。

また、本研究では各種ガドリニウム化合物がSKの主要構造体を作っているステンレス金属に与える腐食度を測定した。試験したガドリニウム化合物は、 $GdCl_3$ 、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ 、 $Gd(CH_3COO)_3$ であり、これらのうち、腐食性が極めて小さい化合物として、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ が選ばれた。しかし、 $Gd(NO_3)_3$ は340nm以下の短波長で大きな光の吸収があり、SKでは問題があることがわかった。 $Gd_2(SO_4)_3$ は現段階では大きな吸収はないことはわかっており、最も可能性のある候補である。 $GdCl_3$ は水によく溶け光の吸収は少ない物質であるが、ステンレスの溶接部を腐食させる可能性がある。しかし、SKの構造体の中にバルーンやアクリルケースを作れば使用することが可能である。これらの結果を踏まえて、将来ガドリニウムをSKに溶かして超新星背景ニュートリノを実際に捉える研究を進めていく。本研究はそうした将来の研究の足がかりを作った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

H.Watanabe, M.Nakahata, M.Siozawa, Y.Fukuda, 他 126 名, First Study of Neutron Tagging with a Water Cherenkov Detector, *Astroparticle Physics* 31(2009)320-328.

M.Nakahata, Supernova detection, *J. Phys. Conf. Ser.* 136(2008)022042.

H.Watanabe, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Neutron tagging Technique in Super-Kamiokande, *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*(2007).

T.Iida, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*(2007).

M.Ikeda, M.Nakahata, M.Siozawa, Y.

Fukuda, 他 141 名, Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande, *Astrophys. J.* 669 (2007)519-524.

M.Nakahata, Search for supernova neutrinos at Super-Kamiokande, *Proceedings of the International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe*, Kashiwa, Japan, (2006)243-250..

M.Nakahata, Supernova neutrinos and recent results from Super-Kamiokande, *Proceedings of the 59th Yamada conference: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology"* (2005).

[学会発表](計23件)

M. Nakahata, Supernova detection, the XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008), Christchurch, New Zealand, May, 2008.

T.Iida, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and the Super-Kamiokande collaboration, Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, poster presentation, the XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008), Christchurch, New Zealand, May, 2008.

H.Watanabe, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and the Super-Kamiokande collaboration, Neutron Tagging Technique for Relic Supernova Neutrinos in Super-Kamiokande, the XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008), Christchurch, New Zealand, May, 2008.

飯田崇史, 中畑雅行, 塩澤真人, 福田善之, 他 Super-Kamiokande Collaboration, 「スーパーカミオカンデにおける超新星背景ニュートリノ探索の現状と将来的展望」日本物理学会春季大会 近畿大学 2008年3月

渡辺秀樹, 中畑雅行, 塩澤真人, 福田善之, 他 Super-Kamiokande Collaboration, 「Super-Kamiokande-IIIにおける逆ベータ崩壊反応起源の中性子検出の研究」日本物理学会春季大会 近畿大学 2008年3月

飯田崇史, 中畑雅行, 塩澤真人, 福田善之, 他 Super-Kamiokande Collaboration, 「スーパーカミオカンデにおける超新星背景ニュートリノ探索3」日本物理学会年次大

会 北海道大学 2007年9月
渡辺秀樹、中畑雅行、塩澤真人、福田善之、他 Super Kamiokande Collaboration、「Super Kamiokande-IIIにおける逆ベータ崩壊反応起源の中性子検出の研究(III)」日本物理学会年次大会 北海道大学 2007年9月

M.Nakahata, Neutrinos of cosmic origin experiments, Lepton photon conference 2007, August 2007.

H.Watanabe, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Neutron tagging Technique in Super-Kamiokande, the 30th International Cosmic Ray Conference(2007).

T.Iida, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, the 30th International Cosmic Ray Conference(2007).

H.Watanabe M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Neutron tagging Technique for relic supernova neutrinos in Super-Kamiokande, International Nuclear Physics Conference, Tokyo, June 2007.

M.Nakahata, Super-Kamiokande, Twenty Years After SN1987A, Waikoloa, Hawaii, 2007.

T.Iida M. Nakahata, M. Shiozawa, Y. Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, poster presentation, Twenty Years After SN1987A, Waikoloa, Hawaii, 2007.

H.Watanabe, M.Nakahata, M.Shiozawa, Y.Fukuda, and Super-Kamiokande collaboration, Neutron tagging Technique in Super-Kamiokande, poster presentation, Twenty Years After SN1987A, Waikoloa, Hawaii, 2007.

中畑雅行, 「超新星ニュートリノ実験」, 「超新星爆発とニュートリノ原子核反応」研究会、大阪大学、2007年3月
中畑雅行, 「超新星とニュートリノ天文学」, 日本物理学会2007年春期大会、首都大学、2007年3月

飯田崇史、中畑雅行、塩澤真人、福田善之、他 Super Kamiokande Collaboration、「スーパーカミオカンデ2における超新星背景ニュートリノ探索2」日本物理学会春季大会 首都大学東京 2007年3月

渡辺秀樹、中畑雅行、塩澤真人、福田善之、他 Super Kamiokande Collaboration、「Super Kamiokande-IIIにおける逆ベータ崩壊反応起源の中性子検出の研究(II)」日本物理学会春季大会 首都大学東京 2007年3月

飯田崇史、中畑雅行、塩澤真人、福田善之、他 Super Kamiokande Collaboration、「スーパーカミオカンデ2における超新星背景ニュートリノ探索」日本物理学会秋季大会 奈良女子大学 2006年9月

渡辺秀樹、中畑雅行、塩澤真人、福田善之、他 Super Kamiokande Collaboration、「Super Kamiokande-IIIにおける逆ベータ崩壊反応起源の中性子検出の研究」日本物理学会 秋季大会 奈良女子大学 2006年9月

21 M.Nakahata, Search for Supernova Neutrinos at Super Kamiokande, International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, Tokyo, February 2006.

22 M.Nakahata, Supernova neutrinos and recent results from Super Kamiokande, the 59th Yamada conference: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology", Tokyo, June 2005.

23 M.Nakahata, Low energy astrophysical neutrino observations with megaton class detectors, Next Generation of Nucleon Decay and Neutrino Detectors, France, April 2005.

6. 研究組織

(1)研究代表者

中畑 雅行
東京大学・宇宙線研究所・教授
70192672

(2)研究分担者

塩澤 真人
東京大学・宇宙線研究所・准教授
70272523

(3)連携研究者

福田 善之
宮城教育大学・教育学部・准教授
40272520