

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224004

研究課題名(和文) 超新星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

中畑 雅行 (NAKAHATA, MASAYUKI)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：70192672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 159,900,000円、(間接経費) 47,970,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、宇宙の初めから起きてきた超新星爆発からのニュートリノ(Supernova Relic Neutrino(SRN))を捉えるための開発研究である。SRNを捉えるにはスーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを溶解させて反ニュートリノが反応した際に放出される陽電子と中性子を同時計測する必要がある。本研究ではSKを模擬したテストタンクを建設し、ガドリニウムを溶解し、水の透過率の測定、ガドリニウムを保持したまま水を純化させる方法の開発、放射性不純物の測定とその除去方法の開発をおこなった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is an R&D study for the detection of supernova relic neutrinos (SRN), which are neutrinos emitted from all past supernova bursts from the beginning of the universe. In order to detect SRN, it is necessary to dissolve gadolinium to Super-Kamiokande (SK) detector and observe positions and delayed neutrons from anti-neutrino interactions. In this research, a test tank which mimics SK was built and dissolved gadolinium. Transparency of Gd-loaded water was measured and a method to keep purify of water without removing gadolinium was developed. Also, radioactive background in gadolinium compound was measured and methods to remove the background was developed.

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

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、IMB、バクサングループによって観測された。しかし、観測された事象数はこれらの実験を合わせても24事例しかなく、確かに爆発エネルギーに相当する数のニュートリノが放出されたことは分かったが、超新星爆発の詳細までは探ることができなかった。また、そもそも観測されたのは、超新星爆発の1例でしかなかった。

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。SRNの探索は、スーパーカミオカンデ(SK)、カムランド、SNO実験などで今までに行われてきたが、SKがその大きな有効体積を生かして他の実験の10倍以上良い感度の上限值を与えてきた。SKの上限值はニュートリノエネルギーが19.3MeV以上に対して与えられており、それに対応するモデルから予想される強度は約1/3倍から1倍程度の間分布している。したがって、観測方法をもうすこし改良させれば有意な信号を捉えられそうなどころまできている。今までのSKの観測では、SRNが陽子と反応した際に発生する陽電子の信号を探索してきた。この方法は「単一の電子事象」という特徴しかないため、大気ニュートリノ起源や宇宙線による核破砕によるバックグラウンドによって、観測感度が制限されてきた。本研究では、ニュートリノの反応の際に発生する陽電子と中性子を両方捉えることによってバックグラウンドを低減させ、SRNによる真の信号を捉えるという方法を研究する。SRNの強度は数十/cm²/sec程度の強度しかないため、観測のためには、数万トンの有効質量と10MeV程度までの低エネルギー事象を捉えることができる実験装置が必要であり、それができるのはSKのみである。中性子を捉える方法としては、純水にガドリニウム化合物を溶かして、ガドリニウムによる中性子捕獲によるガンマ線を捉える。この方法は高い中性子検出効率を持ち、バックグラウンドを4桁以上落とすことができるため、今までのSKの探索で問題となっていたバックグラウンドの問題を解決できる。

すことができるため、今までのSKの探索で問題となっていたバックグラウンドの問題を解決できる。

本研究の具体的な目的は、100トンのテスト用タンクを作り、以下の項目を徹底的に調べ、ガドリニウムをSKタンクに導入できるかどうか原理検証実験を行うことである。

- ・ガドリニウム化合物を添加しても純水の透過率はSKの性能を維持するレベルの長さを持つ。
- ・ステンレスタンクや光電子増倍管のケーブルなどが腐食することはない。
- ・ガドリニウムが添加されている水を純化しながら循環させ、また回収できる。
- ・検出器による環境中性子やガンマ線のバックグラウンドを測定し、除去できる事を確認。
- ・人工中性子源を使い、検出効率を評価する。

3. 研究の方法

本研究の最も重要な課題はSKタンクを模擬したテストタンクを作り、0.1%のガドリニウムを溶解した水チェレンコフ検出器の原理検証実験を行うことであった。宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室lab-Eにテストタンクを建設し実験をおこなうこととした。また、SKタンク内で使用されている部材について、ガドリニウム水中において腐食が生じないかどうかを調べるため、500cc程度の小さな容器に0.2%のガドリニウム溶液を作り、それぞれの部材を入れて長期浸透試験をおこなうこととした。

テストタンクでガドリニウム水の透過率を測定するにあたっては、SKの純水レベルの100m近い透過率が達成されているか評価する必要がある。通常の分光器等では測定サンプルのサイズが10cm程度が限度であり、数メートルレベルの透過率しか測定できない。そこで、非常に長い透過率でも測定ができる透過率測定器を開発した。

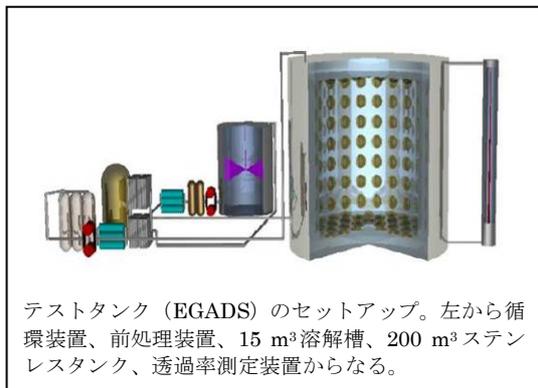
ガドリニウム水は純水と同様に常に水を循環させていなければ高い透過率を保つことができない。しかし、純水に使用している循環装置は水中のすべての不純物を取り除いてしまうためにガドリニウムも除去されてしまう。ガドリニウムを保持したまま、水を循環させるための装置の設計、製作をおこなうこととした。

ガドリニウム中に含まれる可能性があるウラン、トリウムといった放射性不純物はSKでの観測のバックグラウンドとなる可能性がある。その不純物の見積もりを高感度ゲルマニウム検出器を用いて評価することとした。

4. 研究成果

研究方法のところで述べたように、本研究ではSKを模擬した小型のテストタンクを作り、「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った。そのためのセッ

トアップの概念図を以下に示す。この実験は EGADS (Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems) と呼ばれている。EGADS の実験施設は、SKタンク、SK純水装置から 50m 程度の距離のところであり、純水、ラ



テストタンク (EGADS) のセットアップ。左から循環装置、前処理装置、15 m³溶解槽、200 m³ステンレスタンク、透過率測定装置からなる。

ドンフリーエアなどのユーティリティーはそれらから供給した。実験場は 10 m x 15 m の床面積をもち、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「15 m³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」を配置した。実験場の写真を以下に示す。

200m³ ステンレスタンクは直径 6.5m、高さ 6.2m のサイズで、中には 240 本の 20 インチ光電子増倍管を取り付けられるように構造体が組まれた。タンクの材質は SK と同じ SUS304 とした。タンクは気密構造であり、微



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。

圧 (50mmAq) ラドンフリーエアが供給されるようにした。このタンクは 2010 年 6 月に建設された。

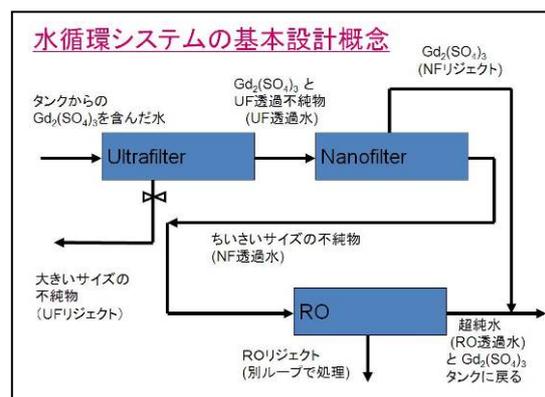
15 m³溶解槽は粉の状態である Gd 化合物 (具体的には硫酸ガドリニウム) を純水に溶かすための水槽であり、槽内には攪拌機がついている。タンクの材質はポリエチレンである。この溶解槽において約 1% の Gd 化合物溶液 (Gd 濃度は 0.5%) を作り、それと純水とを 1:4 の比でブレンドして、0.1% Gd 溶液を 200 m³タンクに給水することができるように設計された。(実際には、200m³タンク内の濃度が徐々に上がっていくようにするため、0.2%~

0.8% の Gd 化合物溶液を 15 m³溶解槽で作り、15 m³溶解槽からの流量と 200m³タンクからの戻り水を流量との比を微調整することによって、0.2% Gd 化合物溶液をタンクに戻すように運転をおこなった。) 15 m³溶解槽で Gd 化合物を溶かした水は前処理装置において、3 ミクロンフィルター、Amber jet4400 (AJ4400) 樹脂、紫外線殺菌灯、0.2 ミクロンフィルターを通して純化した。フィルター類は未溶解の粉を取り除くためであり、紫外線殺菌灯は水中のバクテリアを除くためである。AJ4400 は後述するように本研究において開発した Gd 化合物を保持したまま、ウランを取り除くことができる樹脂である。15 m³溶解槽、前処理装置は 2010 年 9 月に設置された。

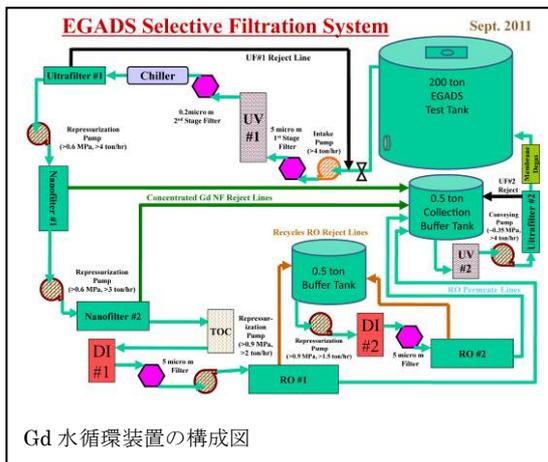
本研究で開発した最も主要なシステムは Gd を保持したまま水を常に純化させることができる Gd 水純化装置であった。その概念設計を 2009 年度に行い、2010 年度に装置の建設をおこなった。膜を用いて水を純化させるエレメントには、ウルトラフィルター (UF)、ナノフィルター (NF)、逆浸透膜 (RO) といったものがある。UF は、膜に微細な穴を開けたフィルターであり、分子量が数千から一万ぐらいの分子の分離が可能である。NF、RO は浸透速度の違いによって水と不純物を分離する膜であり、RO は 1 価のイオンも含めてすべてのイオンを分離できるのに対して、NF は価数の大きいイオンのみを分離することができる。Gd は水中で 3 価のイオンになっているので、NF では排除ラインへと進む。

そこで、下図に示すような UF、NF、RO の組み合わせを構築した。

まず、UF で大きいサイズの不純物は取り除かれる。次に NF において排除ラインへ行く Gd はそのまま素通しするが、NF の透過ライ



ンに行った水 (そこには 1 価、2 価の不純物イオンが含まれている) は通常の純水精製手法に従って RO、イオン交換樹脂を使って純化する。こうした設計概念に基づいてデザインした Gd 水循環装置の構成図を次図に示す。



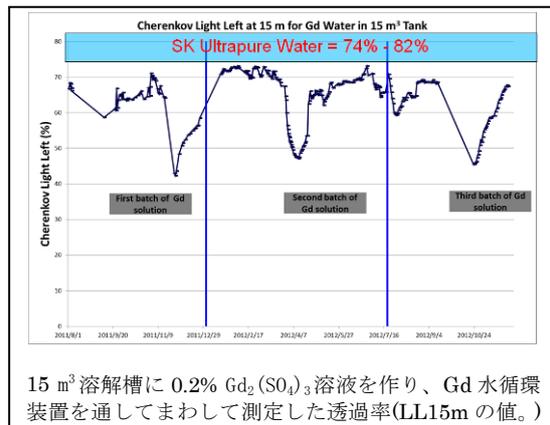
100m 近い透過率を10m 弱の基線長で測定する装置の概念設計を2009年度に行い、2010年度に装置を設置した。装置は長さ8.6m、直径225mmのポリプロピレン(PP)製のパイプを垂直に立て、そのパイプ中に満たす水の高さを変えながら、パイプ上から入射した光がパイプ下のアクリル窓を透過してきた光量を測るといのが測定器の原理である。入射する光の波長は、337, 375, 405, 445, 473, 532, 595nmの7種類であり、窒素レーザー光源、レーザーダイオード光源、パルス化レーザーポインター光源を使用した。

SKで使用されている部材がGd溶液によって溶けだしたり、腐食したりすることがないかどうかの試験を2009年度から2011年度にかけておこなった。ガドリニウムには何種類か化合物があり、塩化ガドリニウム($GdCl_3$)、硝酸ガドリニウム($Gd(NO_3)_3$)、硫酸ガドリニウム($Gd_2(SO_4)_3$)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。一方、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液ではそうした色の変化は見られなかった。しかし、 $Gd(NO_3)_3$ 溶液には光の吸収において問題があり、350nm以下の波長の光を強く吸収し、チェレンコフ光を30%近く吸収してしまう。 $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液にはステンレスからの溶出や光の吸収において特に問題はみつかっておらず、そこで $Gd_2(SO_4)_3$ を選択することとした。そこでSKのタンク内で使われている部材(全部で31種類)を $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液に何カ月も浸し、透過率の変化などを測定した。ほとんどの部材について問題はなかったが、PMTを固定しているゴムバンドだけはGd溶液により何からの溶出物があり変色することがわかった。しかし、サンプル量と溶液の比をSKタンクでの場合にスケールすると、観測に障害となるほどの影響を与えることはないと評価された。また、ゴムの弾性率を測定し、Gd溶液によって変質することはないことも確認した。

上記のように建設した15 m^3 溶解槽、前処理装置、200 m^3 ステンレスタンク、Gd水循環装置を用いて、以下の順にGd水の透過率の確認、純化方法の開発をおこなった。

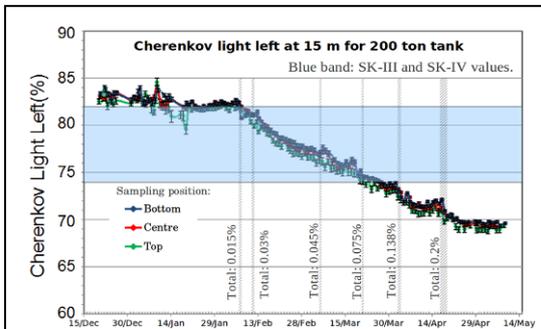
- (1) 200 m^3 ステンレスタンクに純水をため、Gd 水循環装置を通してまわし、透過率を測定することによって、「純水」を「純水」として保持できることを確認する。
- (2) 15 m^3 溶解槽に0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液を作り、Gd 水循環装置を通してまわすことにより、Gd 溶液固有の透過率を測定する。これは15 m^3 溶解槽がポリエチレン製プラスチックタンクであるため、溶液の影響をほとんど受けないこと、Gd 水循環装置は5時間程度でタンク水を1循環させることができるためである。
- (3) 200 m^3 ステンレスタンクに0.2%の $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液を作り、Gd 水循環装置を通して循環させ、透過率の測定をおこなう。このステップはまず光電子増倍管を取り付けずにおこなう。これによりステンレス材料の影響を調べる。
- (4) 光電子増倍管を取り付け、(3)と同様の試験をおこない、SKを完璧に模擬したタンクでの透過率測定をおこなう。

ステップ(1)は、2011年3月から6月にかけて行われ、SKでの純水レベルの透過率が得られることが確認された。ステップ(2)は、2011年8月から2012年11月の期間を要した。本来ならばこのステップはもっと短期間で進められたはずであったが、ナノフィルターの交換にともない透過率が悪くなることが分かり、その問題を解決するためにナノフィルター予備洗浄システムの建設、その運転により洗浄方法の確立に時間を要してしまい時間がかかってしまった。下図にこの期間の「透過率」プロットを示す。(以下、「透過率」の指標として示す値はチェレンコフ光が15m 走った時に光電子増倍管で受けられる光の強さを表し、その計算には波長に依存する水の透過率、光電子増倍管の量子効率も考慮されている。以下、この値を「LL15m」と表記する)



溶解試験は3回おこなったが、1回目、2回目で透過率が急に減少してところはナノフィルターを交換した時である。そして、2回目の試験で透過率が向上しているのは、AJ4400の樹脂を通してまわすようにしたためである。このようにナノフィルターからの溶出によって悪化した透過率は、AJ4400樹脂によって取り除くことができるということ

このステップの最中に発見できた。このようにして得られた 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液の LL15m の値は 70-72%であり、純水の LL15m 値(SK の値) 74-82%と比べてさほど悪い値ではないことが分かった。ステップ (3) は、2013年1月から4月にかけて行われた。その間の LL15m の変化を下図に示す。



ステップ (3) において、Gd を徐々に溶かしていった時の透過率 (光強度にて表現) の変化。薄青の帯は今までの SK の運転中に変化した範囲。

タンク内の 3 か所で透過率を測定し、ガドリニウムの濃度による変化をみた。最終的に 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液に対して LL15m の値として約 69%という値が得られた。この値はステップ (3) での値を 1-3%以内の違いであり、ステンレスタンクの影響はほとんどないことが分かった。

2013年夏にはステップ (4) に向けて光電子増倍管の取付がおこなわれた。その際の写真を以下に示す。



ステップ (4) に向けた光電子増倍管取り付けの様子。

そして、2013年9月から2014年2月にかけて純水の循環をおこなった。水の透過率は当初あまり良くなく LL15m の値が 70-73%であったが、TOCランプとよばれる炭素を含んだ不純物を紫外線光により分離し、その後 AJ4400 樹脂により取り除くという方法を試したところ 77-78%まで向上させることができた。そして、2014年3月から $Gd_2(SO_4)_3$ の溶解を始めた。0.015%溶解した段階での LL15m の値が 70-73%であり、今までの研究から予想される値に比べて悪い値であった。その後の調査により、これは上底面のシートを保持するために使ったワ

イヤがステンレス製ではなく鉄製であったことが原因だと分かり、これを入れ替えて再測定をおこなうこととした。

EGADS タンクでの研究と並行して放射性バックグラウンドの研究も進められた。以下にいくつかの会社、生産バッチからの $Gd_2(SO_4)_3$ に対する放射性バックグラウンドをゲルマ

Chain	Longest lived parent in sub-chain	Gd200904 Stanford (to SLG)	Gd201008 Stanford (BlueDrums)	Gd201208 Beijing Jinghongmen 0.4kg	Gd201302 Changshu 2kg	Gd201303 Beijing Jinghongmen 1kg (99.999%)
^{238}U	^{238}U	51 ± 21	< 33	292 ± 67	74 ± 28	242 ± 60
	^{226}Ra	8 ± 1	2.8 ± 0.6	74 ± 2	13 ± 1	13 ± 2
^{232}Th	^{226}Ra	11 ± 2	270 ± 16 (*)	1099 ± 12	205 ± 6	21 ± 3
	^{228}Th	29 ± 3	86 ± 5	504 ± 6	127 ± 3	374 ± 6
^{235}U	^{235}U	< 32	< 32	< 112	< 25	< 25
	$^{227}Ac/^{227}Th$	214 ± 10	1700 ± 20	2956 ± 30	1423 ± 21	1750 ± 42
Others	^{40}K	29 ± 5	12 ± 3 (*)	101 ± 10	60 ± 7	18 ± 8
	^{138}La	8 ± 1	<	683 ± 15	3 ± 1	42 ± 3
	^{176}Lu	80 ± 8	21 ± 2	566 ± 6	12 ± 1	8 ± 2

いくつかの会社、生産バッチからの $Gd_2(SO_4)_3$ に対する放射性バックグラウンドの値。単位は mBq/kg。

ニウム検出器を用いて測定した結果を示す。SRN に対する主要な放射性バックグラウンドのひとつは ^{238}U の自己核分裂である。これによりベータ、ガンマ線と中性子が生まれるため SRN 信号と間違える可能性がある。SRN 信号に比べて十分小さく抑えるためにはまず ^{238}U を 0.03mBq/kg 相当以下まで下げる必要がある。上記の数字と比較すると 3 ケタ近く減らす必要がある。企業と共同で ^{238}U を取り除く樹脂を開発した。10ppt の U と $Gd_2(SO_4)_3$ を溶解した溶液を作りそれを AJ4400 を通して U の濃度を測定し、0.1ppt 以下、つまり 1% レベル以下であるという結果を得た。これは樹脂を 1 回通した場合の結果であり、複数回通せば更に効率が上がる可能性があれば目的を達成できることがわかった。SRN 観測においては中性子を同時計測するため問題となるバックグラウンドは ^{238}U の自己核分裂のみであるが、太陽ニュートリノ観測と同時に観測を進めるためには ^{226}Ra や ^{228}Ra のバックグラウンドを 0.3mBq/kg 以下にしなければならぬ。そのための樹脂の開発を今後行う必要があることが分かった。

また、以上に述べた開発研究と並行して、既存の SK データを用いた SRN 探索、中性子の陽子への捕獲による 2.2MeV ガンマ線を用いた同時計測による観測もおこなった。後者の方法は 20% 程度の検出効率と 1% 程度のバックグラウンド率を持つため、バックグラウンドの多い観測ではあったが、論文として仕上げる事ができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① “Supernova Relic Neutrino Search with Neutron Tagging at Super-Kamiokande-IV”, H. Zhang, Y. Koshio, M. Nakahata, H. Sekiya, A. Takeda, M. Vagins, Y. Takeuchi, H. Ishino, M. Sakuda, 他 111 名, arXiv:1311.3738 [hep-ex] (査読無)、

- submitted to Apstoparticle Physics (査読有) .
- ② “Future of Super-kamiokande and Hyper-Kamiokande” , M. Nakahata, proceedings of 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2013), 査読無.
 - ③ “Latest Results from Super-Kamiokande” , H. Ishino for the Super-Kamiokande Collaboration, APCC12 Proceeding to be published in the Journal of the Physical Society of Japan, 査読無.
 - ④ “EGADS Progress” , Lluís Martí Magro for the Super-Kamiokande Collaboration, ICRC2013 Proceeding to be published in the Brazillian Journal of Physics, 査読無.
 - ⑤ “Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande” , K. Bays, T. Iida, Y. Koshio, M. Nakahata, H. Sekiya, A. Takeda, M. Vagins, Y. Takeuchi, H. Ishino, M. Sakuda, 他 95 名, Phys. Rev. D85, 052007-1-052007-15 (2012), 査読有.
 - ⑥ “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), 査読有.
 - ⑦ “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), 査読無.
 - ⑧ “Evaluating gadolinium for use in Super-Kamiokande” , Ll. Martí for the Super Kamiokande collaboration, the 32nd ICRC proceedings, vol. 4, p232-235 (2011), 査読無.
 - ⑨ “Status of the Gadolinium project for Super-Kamiokande” , Ll. Martí for the Super-Kamiokande collaboration, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 217, 281-283 (2011) .
 - ⑩ “Detectors for Supernova Neutrinos” , M. Vagins, proceedings of Neutrino 2010, Athens, Greece (2010), 査読無.
 - ⑪ “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), 査読無.
- [学会発表] (計 60 件)
多数にて全部を掲載することができないた

め、最近の主要な発表のみをここに掲載した。全 リ ス ト は <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kibanS/presentations.html> に掲載。

- ① A. Renshaw, “Gd doped water Cherenkov detectors” , NNN13: International Workshop on Next generation Nucleon decay and Neutrino Detectors, Kavli IPMU, Tokyo, Nov. 11-13, 2013.
- ② M. Nakahata, “Future of Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande” , 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2013), California, USA, Sep. 8-13, 2013.
- ③ 中畑雅行, 「超新星ニュートリノ及び低エネルギー宇宙ニュートリノ観測」, 研究会「ニュートリノフロンティアの融合と進化」東京大学 小柴ホール、2013 年 4 月 21 日.
- ④ 中畑雅行, “GADZOOKS!” , C R C 将来計画シンポジウム (拡大タウンミーティング)、東京大学 柏キャンパス 2012 年 11 月 24-25 日.
[その他]
ホームページ等
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kibanS/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
中畑 雅行 (NAKAHATA, Masayuki)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号: 70192672
- (2) 研究分担者
作田 誠 (SAKUDA, Makoto)
岡山大学・自然科学研究科・教授
研究者番号: 40178596
石野 宏和 (ISHINO, Hirokazu)
岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号: 90323782
(平成 25 年度より連携研究者)
- (3) 連携研究者
ヴァギンズ マーク (VAGINS, Mark)、
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授、研究者番号: 90509902
竹内 康雄 (TAKEUCHI, Yasuo)
神戸大学・理学研究科・教授
研究者番号: 60272522
小汐 由介 (KOSHIO, Yusuke)
岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号: 80292960
竹田 敦 (TAKEDA, Atsushi)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号: 40401286
関谷 洋之 (SEKIYA, Hiroyuki)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号: 90402768