

Kavli IPMU のニュートリノ予報： 概ね晴れ、超新星の可能性大

なぜとても深刻なのか?

超新星ニュートリノとは愛すべきものである。星の一生で最も劇的と言える過程について、他に類を見ない情報をもたらすものであり、その過程とは宇宙においてヘリウムより重いあらゆる重元素を生成させ四散させる役割を果たし、従って単に我々が知る宇宙の外観や手触りに限らず、生命それ自体にもまさしく不可欠なものなのである。

この特別の素粒子に研究者社会が抱く関心の程度を測る物差しとして、カミオカンデとIMBとバクサン各実験により観測された、超新星1987Aから飛来した世界中で高々20個のニュートリノサンプルに基づき、過去25年に渡り平均10日に1篇の論文が出版されていることを指摘する価値があると思われる。四半世紀後の今に至るまで、我が太陽より遠方に起源を持つことが知られているニュートリノとして記録されたものは、これらたった一握りの事象のみなのである。因

みに、そのニュートリノがやってきた距離は、太陽・地球間の 10^{10} 倍という覚え易いものである。

我が天の川銀河で確実な超新星が最後に観測されて以来、今や408年を超えている。それはケプラーの超新星として知られる超新星1604であった。無論、1604年の10月中旬のその日、ニュートリノ観測装置が稼働していたはずはないが、いずれにせよその超新星はIa型の爆発であり、恐らくさほど多くのニュートリノは生成しないものであった。

近傍で発生する次の重力崩壊型超新星を実験、観測、理論の各研究者がこぞって待ちわびている事実は、驚くべきことではない。残念ながら過去1800年間に我が天の川銀河で記録されたこの種の超新星は僅か6例を数えるのみである。従って、「次に起きるのはいつか」が大問題なのである。最も深刻な問題は、図1に明らかな如く、我々誰一人として無限には待てないという事実である。

然り、超新星ニュートリノを待って長く冷たい冬が続いてきたのである。しかしながら、弱い力で相互作用する素粒子の如く、ただ待ち続けるだけの諸兄弟よ、私はここに宣言する。希望の存在を証しすると。

良い報せ

さて、私を知る者はことごとく、私が常日頃、なにかんづく、そばにケーキがあれば(図2を見よ)、いかに愉快で楽観的な人間か、知るところである。ケーキについて私が嘘を言った験しがあったであろうか?



図1 超新星ニュートリノで辛いのは待つことである。死ぬまで待っても来ないかもしれないからである。右の男性のようにはなりたくない。恐らく他方の男性にも残された時間は少ない。



図2 IPMUの発足1周年記念パーティーにおいて、ケーキを持ってご機嫌な筆者（写真：Kai Martens）。

否!である。

しかしながら、私はケーキに関して楽観的なだけでなく、間もなく、多少ではあるが新たに超新星ニュートリノを捉えて研究に供することが極めて確実であるとも考える次第である。しかも、事実上、その流れは決して尽きないと予測しているのである。如何にしてこれが可能であるか? 過去1800年間に我が天の川銀河で、ニュートリノを発生するタイプの重力崩壊型超新星が、肉眼でたった6例見出されただけではなかったか? まず第一に、6個の事象の持つ力を侮ってはならない。幸運にも長寿命中性K中間子の2重ダリツ崩壊に関する私の博士論文は、正に6個の事象で書かれたものである[1]。既に名高いT2K実験の「零に非ざる θ_{13} 」の論文[2]も丁度6個の「基準体積内」事象で書かれたものである。

これら6個の超新星は、肉眼で記録され、かつ重要な点であるが、その記録が現代まで残ったものだけであることを忘れてはならない。疑いもなく、この間にはもっともっと多数の超新星爆発があったはずであり、例えばヨーロッパの暗黒時代にたった1基でもニュートリノ観測装置が稼働していたとすれば、それら全てが極めて容易に観測されたはずである。

実のところ、天の川銀河における重力崩壊型超新星

爆発の頻度は1世紀あたり1回から3回の間と信じられている。長生きすれば観測できるかどうかという意味ではまだそれほど大きな値ではないが、もし300年に1回であったら、ほとんどの場合、死に神側の勝ちとなることが確実であり、それよりは遙かにましである。

しかしそれがどうした。ただ待つだけなど忘れてしまおうが良い! 私には良い考えがある。

一緒にケーキを

我々の天の川銀河で起きる超新星は、人間の時間スケールでは比較的希な現象かもしれない。しかし超新星自体は決して希なものではない。宇宙全体では平均して毎秒1回超新星が爆発しているのである。しかも、宇宙で星の形成が開始されて以来、あらゆる超新星爆発で放出されたニュートリノ全てがこの宇宙に満ち満ちているのである。これがいわゆる「拡散した超新星背景ニュートリノ(DSNB)」であり、「過去の超新星爆発からの残存ニュートリノ」としても知られているものである。未だに観測されていないが、もし観測可能であることが証明された場合、星の重力崩壊と元素合成だけにとどまらず、宇宙の大きさ、膨張速

度、性質の進化に関する情報を定期的にもたらすであろう。さらに地球外ニュートリノ予報に関しては、「晴れ」がキーワードである。ホウ素 8 の崩壊からの太陽ニュートリノの強度は、微弱な DSNB の強度のおよそ 100 万倍にもなるのである。

2003 年に、スーパーカミオカンデ実験が過去の超新星爆発からの残存ニュートリノの探索結果を論文として公表した[3]。しかしながら、この研究はバックグラウンドの影響を強く受けており、バックグラウンドを超えるような統計的に意味のある事象数の超過は見られず、従って残存ニュートリノの強度について世界で最も厳しい上限値を与えることができたに過ぎない。2012 年には、スーパーカミオカンデから残存ニュートリノに関して、改善された新しい解析法と、遙かに多くのデータを誇る新たな論文[4]が公表されたが、データ解析でのカットの効率を改善し、エネルギーのしきい値を下げたにもかかわらず、未だにバックグラウンドが卓越し、結果として得られた残存ニュートリノの強度については、8 年前とがっかりするくらい良く似た制限しか得られなかった。残念無念。

しかし、私はこのパーティーにはケーキが出ると言わなかったか？ 然り、ケーキが 1 個近づいて来つつあるのだ。

(ニュートリノ) 天気まかせを何とかする

捉え難い DSNB の信号を決定的に観測するため、理論家のジョン・ビーコムと私は水溶性のガドリニウム (Gd) 化合物である塩化ガドリニウム、 $GdCl_3$ 、またはそれより反応性は低い溶解度も低い硫酸ガドリニウム、 $Gd_2(SO_4)_3$ 、のスーパーカミオカンデ測定器(図3)への導入を提案している。ガドリニウムによる中性子捕獲は、エネルギーの高いガンマ線を続けてカスケード的に放射するため、ガドリニウムを加えたスーパーカミオカンデ中での逆ベータ崩壊 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ は陽電子の信号と中性子捕獲の信号を同時発生する。これを用いればバックグラウンドの大幅な低減が可能となり、超新星ニュートリノ(我々の銀河で発生したものと残存ニュートリノの両方)と原子炉反ニュートリノのいずれに対しても測定器の応答が非常に強化される。

ガドリニウムは水の中で中性子捕獲を水素と競うことになる。水素による中性子捕獲は低エネルギーのガンマ線を一つ発生するが、スーパーカミオカンデでは事実上検出されない。そこで、100 トンのガドリニウム化合物を用いる。するとスーパーカミオカンデのタンクの中身の質量比 0.1% をガドリニウムにできるであろう。そして、90% 強の逆ベータ崩壊からの中性子がガドリニウムによって捕獲され、観測可能となる

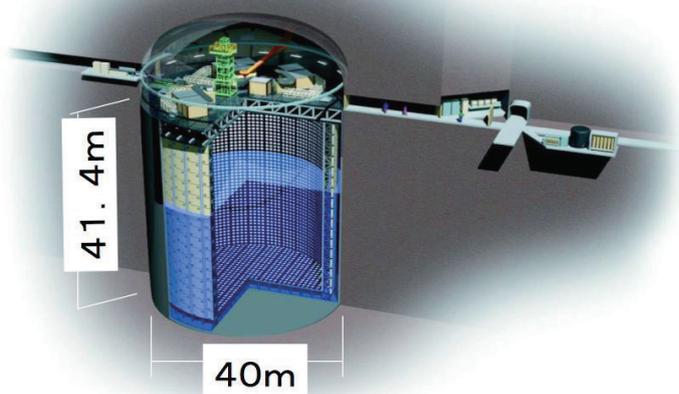


図3 岐阜県の神岡鉱業茂住坑の地下 1 km に設置されたスーパーカミオカンデ測定器。50,000 トンもの水を蓄える大きさと、内側に自由の女神がちょうど収まる。

図4 「俺、トラックからこの50キロのやつを、こいつの他に1999個も運び出したぞ。いや、まったく、でっかいトラックだよ。」



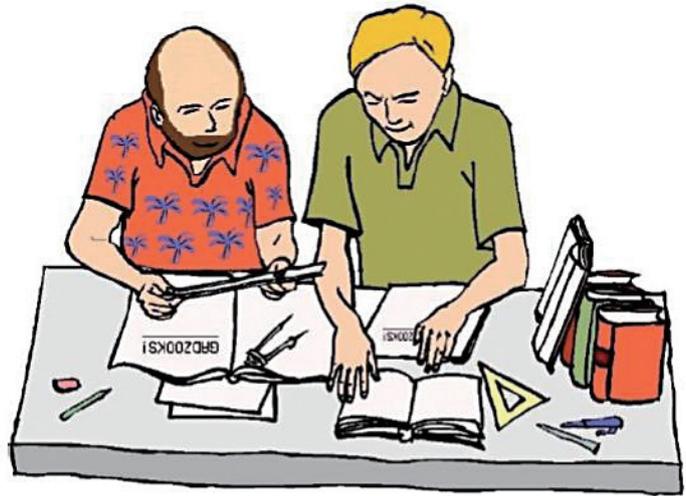


図5 GADZOOKS! 計画作成中のマーク・ヴェイギンズとジョン・ビーコム。念のため、この図は2003年の我々2人の姿である。はあー…。

であろう。図4はガドリニウムの運搬方法についての概念図である。これだけのガドリニウムをスーパーカミオカンデに導入するのにかかる費用は、今日では値崩れのためたった100万ドルのはずである。スーパーカミオカンデが計画された当初では、この金額は4億ドルという驚異的なものになったであろう。

我々はこの新プロジェクトを“GADZOOKS!”と名付けた。「ガズークス」と読む。「ウワーッ!」という驚きを表現する英語であると共に、1694年に遡る捨て台詞のような古語（とはいえ、我が天の川銀河で最後に観測された超新星より1世紀近くも新しい）であるが、ここでは Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super! の略称で「古いカミオカンデよりも、スーパーカミオカンデよりも、とんでもなく優れた素晴らしいガドリニウム反ニュートリノ測定器」という意味をもつ。この「スーパーカミオカンデにガドリニウムを混ぜる」提案の基本原理は *Physical Review Letters* に発表した我々の論文[5]に詳述されている。図5に示したのは漫画風に描写した論文作成中の我々である。スーパーカミオカンデに硫酸ガドリニウムを加えることは、単にこれまで観測されていない残存ニュートリノを検出可能とするだけでなく、超新星からのニュートリノ放出に関するパラメーターという重要且つ（我が天の川

銀河での超新星を除けば）唯一この観測からのみ得られる情報を抽出することを可能とするものである。スーパーカミオカンデにガドリニウムを加えることにより、毎年、5個程度の残存ニュートリノが観測されるはずである。最終結果は何か？ いつでもやってくる超新星ニュートリノを手に入れ、もはや苛々しながら待つ必要が無いことである。

勿論、我々が幸運に恵まれ、今後数十年の間に近傍で発生する超新星を観測できるとしよう。放出されたニュートリノの波が地球を通り過ぎる際に、稼働中の大型水チェレンコフ測定器の純水中に硫酸ガドリニウムが混入されているなら、最も効果的であろう。その主たる理由は、検出される超新星ニュートリノの信号のうち、約88%までもが逆ベータ崩壊によるためである。もし個々の事象毎に中性子捕獲信号により「反電子ニュートリノ」を特定できれば、超新星爆発の時間的構造とニュートリノ振動によるフレーバー（種類）転換を精密に調べることができ、爆発機構について貴重な洞察を得ることができよう。

ガドリニウムのR&D – または、いかにして私は配管工になったか

水チェレンコフ測定器の優れた光透過性能を維持することは決定的に重要な要請であり、どんなものであ

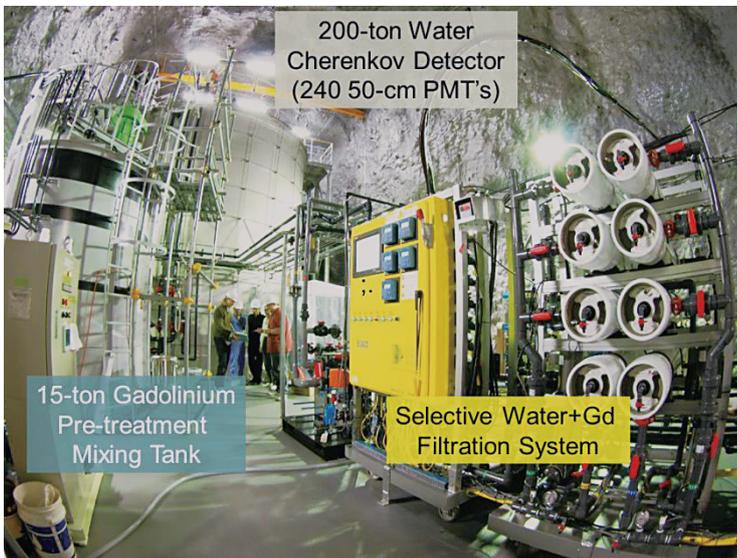


図6 神岡鉱山内の新しいガドリニウム試験装置、EGADS。

れ化合物を加えることは困難な仕事となる。さらに、GADZOOKS! を実現させようとする、直ちにもう一つの困難がもち上がる。スーパーカミオカンデのような測定器では、100メートル級という長い光の平均自由行程は、常に水を循環精製することにより維持される。現在使用されているスーパーカミオカンデの精製装置は、光学的透明度を維持するために除去される不純物と共に、混入したガドリニウム全てを忠実に素早く排出してしまうであろう。なんともはや!

この重大問題を解決するため、2006年に私は根本的に新しいタイプのフィルターシステムを組み立てることができるかと仮説を立てた。(因みに、「仮説」とは、「当て推量」を意味する幻想的な科学用語である。) 私の「分子帯域フィルター」は、水流中から選択的に硫酸ガドリニウムを分離し、タンクに戻し、同時に他の全ての不純物を除去するであろうと考えられた。2007年に、私はカリフォルニア大学アーバイン校（現在も私の併任先）でプロトタイプシステムを組み立てた。驚いたことに、そのがらくたが動いたのである。次のステップに進む時であった。

2008年早々、私はIPMUで最初の外国人教授として採用される光栄に浴した。私の雇用契約書には実質的には次のように書かれていた。「スーパーカミオカ

ンデにガドリニウムを導入するために来たれ。」

神岡鉱山内のスーパーカミオカンデ近傍に新しい実験室が掘削され、そこに図6に示す専用の大規模ガドリニウム試験装置と水チェレンコフ測定器（実質的にはスーパーカミオカンデの200トン縮小模型）が建設された。EGADS（イーガズと読む。Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systemsの略称で、「ガドリニウムが測定器システムに及ぼす作用の評価」の意味）と名付けられたこの装置を利用して、最終的にスーパーカミオカンデにガドリニウムを導入するために必要な条件に合致することを検証する。即ちガドリニウムが測定器を構成する物質と反応しないことを完璧に確認し、また、大規模なガドリニウムの混入技術の実行可能性を証明する。

この新しい設備のために日本で大枚3億9千万円（当時の為替レートで約430万ドル）の予算が得られ、2009年9月に建設が開始された。それから9ヶ月でおよそ2500トンの岩盤を掘削し、実験装置を置く準備が整い、200トンのステンレスタンクが完成した。その6ヶ月後、カリフォルニア大学アーバイン校での選択的水濾過システムをかなりの程度スケールアップした装置の組み立て・据え付けが行われた。2011年1月には純水を用いて運転が開始され、その年の8月か

らは硫酸ガドリニウムを溶かして濾過を続けている。現在、目標のガドリニウム濃度で、超純水の場合の15%以内の透過率を得ている。恐らくこれは既に十分な値であるが、この結果を改善するべく試験が続けられている。更に、2013年には200トンタンクにガドリニウムを混入した場合と混入しない場合を比較する研究を実施する。全てがうまく行けば、今後数年内にスーパーカミオカンデにガドリニウムを導入する準備が整うはずである。最終目標は、2016年までに世界初の決定的な残存ニュートリノ観測が可能となることである。正に「ウワーッ!」である。

最後に、数ヶ月前、私は日本の科学研究費補助金おおよそ160万ドル相当を得たことを記す。この経費によって、R&D フェーズの終了後、EGADS 試験装置を世界最先端の超新星ニュートリノ測定器に転換し、日本の光学、X線、ガンマ線、赤外、重力波の観測ネットワークと連携させる予定である。

大胆な長期予報

GADZOOKS! の概念は既に世界中で相当に勢いを増している。この方法が、中性子検出を合理的なコスト（測定器建設の総経費のたった3%が加わるのみ）で数百キロトン、及びそれ以上の規模に拡大できる唯一の方法であることに注意されたい。中性子検出により追加的に可能となる物理（超新星の研究、及びそれとは関係ない陽子崩壊のような他の研究テーマ）の到達限界を考えれば、この能力が最小限のコストで得られることは魅力的な可能性である。多分、提案されている主要な次世代水チェレンコフ測定器全てが、ガドリニウム混入を公式にオプションとして採用したり（アメリカのLBNE計画[6]）、単に基本デザインの一部として仮定したり（日本のハイパーカミオカンデ計画[7]）及びヨーロッパのMEMPHYS計画[8]）しているのは、これが理由であろう。昨年のハイパーカミオカンデの予備的合意書(Letter of Intent)[7]の報告概要においては、ガドリニウムの利点について記述する所まで踏

み込んだ。

これらの新しい測定器は、ガドリニウムを混入すればどれも過去の超新星爆発からの残存ニュートリノを1年当たり100個のオーダーで記録できるであろう。従って、これらの測定器は、運転している限り、毎月カミオカンデが観測した超新星1987Aからのニュートリノの全事象数と同等の統計を積み上げることになるであろう。それでも目のくらむような楽観主義に陥るのはまだ早い。ガドリニウムで能力を拡大した巨大測定器が次の天の川銀河で発生する超新星を待ち受けているという展望には、全くもって興奮させられる。言い換えれば、全員が美味しいケーキを味わえるのだ。

従って、私は超新星ニュートリノの長期的展望は極めて明るい晴天続きと予言して差し支えないと考える。

文献

- [1] M. R. Vagins, R. K. Adair, H. B. Greenlee, H. Kasha, E. B. Mannelli, K. E. Ohl, M. P. Schmidt and E. Jastrzembski et al., "Measurement of the Branching Ratio for $K_L \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$," *Phys. Rev. Lett.* **71**, 35 (1993).
- [2] K. Abe et al. [T2K Collaboration], "Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam," *Phys. Rev. Lett.* **107**, 041801 (2011) [arXiv:1106.2822 [hep-ex]].
- [3] M. Malek et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Supernova Relic Neutrinos at Super-Kamiokande," *Phys. Rev. Lett.* **90**, 061101 (2003) [hep-ex/0209028].
- [4] K. Bays et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande," *Phys. Rev. D* **85**, 052007 (2012) [arXiv:1111.5031 [hep-ex]].
- [5] J. F. Beacom and M. R. Vagins, "Antineutrino Spectroscopy with Large Water Cherenkov Detectors," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171101 (2004) [hep-ph/0309300].
- [6] T. Akiri et al. [LBNE Collaboration], "The 2010 Interim Report of the Long-Baseline Neutrino Experiment Collaboration Physics Working Groups," arXiv:1110.6249 [hep-ex].
- [7] K. Abe, T. Abe, H. Aihara, Y. Fukuda, Y. Hayato, K. Huang, A. K. Ichikawa and M. Ikeda et al., "Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential —," arXiv:1109.3262 [hep-ex].
- [8] A. de Bellefon, J. Bouchez, J. Busto, J. -E. Campagne, C. Cavata, J. Dolbeau, J. Dumarchez and P. Gorodetzky et al., "MEMPHYS: A Large Scale Water Cerenkov Detector at Frejus," hep-ex/0607026.