

超新星ニュートリノと SK-Gd, ハイパーカミオカンデ

池田 一得¹・中里 健一郎²

〈¹ 東京大学宇宙線研究所 〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456〉

〈² 九州大学基幹教育院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744〉

e-mail: ¹motoyasu@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp, ²nakazato@artsci.kyushu-u.ac.jp



池田



中里

SK-Gd計画は、スーパーカミオカンデ検出器の超純水に硫酸ガドリニウムを溶解させ、超新星ニュートリノに対する検出器性能を飛躍的に向上させる計画である。10年以上にもわたる研究開発の後、いよいよ本年度(2020年度)よりガドリニウム導入が始まろうとしている。ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデの次を担う有効体積にして約10倍の検出器である。昨年度、ハイパーカミオカンデの建設が正式に認められ、建設準備が着々と進んでいる。本特集は、超新星ニュートリノのレビューと、それぞれの計画における超新星ニュートリノ観測の展望について述べる。

1. はじめに

スーパーカミオカンデ(SK)では1996年の観測開始以降、不純物を極限まで取り除いた、純水よりも綺麗な超純水をニュートリノに対する標的として観測を行ってきた。今年度より、超新星ニュートリノの検出性能向上と超新星背景ニュートリノの発見を目指して、超純水に硫酸ガドリニウムを溶解させる計画(SK-Gd計画)がいよいよ始まろうとしている。一方でハイパーカミオカンデ(HK)の建設が正式に認められ、建設準備が着々と進んでいる。これらの計画により、神岡の現場は今、非常に活気づいている。本特集は、2章で超新星ニュートリノのレビューを行い(中里)、3章ではSK-Gd計画の展望について、一般読者の方向けにスーパーカミオカンデの原理から解説をする。4章では、HKの概要と超新星ニュートリノ観測の展望について紹介する(池田)。

2. 超新星ニュートリノ

2.1 重力崩壊型超新星爆発

夜空に突然、明るく輝き出す天体にはいくつかの種類が知られているが、なかでも超新星は極大の明るさ(絶対光度)が銀河1つ分に相当することもある極めて明るい天体である。その正体は星がその一生の最期に起こす大爆発であり、白色矮星の爆発であるIa型超新星と、本稿で取りあげる重力崩壊型超新星の2つに大きく分類することができる[1]。

恒星はその内部で起こる核融合反応によって輝いている。身近に観測される恒星のほとんどは水素を燃料にヘリウムを合成する反応で輝いているが、中心部で水素が枯渇するとヘリウムから炭素・酸素…と質量数のより大きな元素を合成する核融合が起こる。特に太陽の8-10倍以上の質量を持つ恒星では、最終的に最も安定な元素である鉄までが合成され、それ以上の核融合は起こらなくなる。核融合反応には星を輝かせるほかに、エネルギーを放出することで星が自分自身の重力

によって潰れないように支える役割がある。そのため、中心に鉄を主成分とする高密度の芯（コア）が形成されると、星は核融合反応による支えを失って重力崩壊を始める。これが重力崩壊型超新星爆発の引き金となる。

ひとたび重力崩壊を始めた鉄のコアは一気に収縮して、中心部では原子核と同程度の密度（ $\sim 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ ）にまで達する。すると、核子どうしが密接に近づいたときに生じる斥力が働き、重力崩壊を跳ね返して衝撃波を発生する。この衝撃波が星の表面まで到達すれば、吹き飛ばされた物質が超新星として明るく輝くことになる。例えばかに星雲は1054年に出現した超新星の残骸である。一方、中心で重力崩壊を跳ね返したコアは高密度のまま冷えていき中性子星となる。実際、かに星雲の中心には中性子星がパルサーとして観測されている。

実は、衝撃波の発生から超新星爆発までに至るプロセスが、多くのシミュレーションでは再現できていない。この問題に関しては、過去の月報にも記事[2, 3]があり、日本語の教科書[4, 5]も出ているので詳しくは立ち入らないが、ネックとなっているのは衝撃波が星の内部を伝搬する過程で、外側から降ってくる物質とぶつかって相互作用することで失速してしまう点である。今のところ、衝撃波が一旦は失速してしまうのはやむを得ないとして、その後で衝撃波を復活させるプロセスが働いて爆発に至るだろう、と考えられている。

2.2 超新星爆発からのニュートリノ放出

可視光でも極めて明るく輝く超新星だが、エネルギーという観点では、光（電磁波）として放出されるのはごく一部であり、重力崩壊型超新星の放出するエネルギーのほとんどはニュートリノが担っている。爆発のエネルギー源は重力崩壊する物質の解放する重力エネルギーだが、超新星内部では非常に密度が高くなるため、光子は物質と相互作用して閉じ込められてしまう。一方でニュー

トリノは物質との相互作用が弱いため、より中心付近から放出される。さらにニュートリノは、衝撃波が星の表面に到達するよりも先に星内部から抜け出てくるため、超新星爆発が光で観測できるようになるよりも早く地球に到達する。実際、1987年に出現した超新星SN 1987Aの場合、最初に増光が確認される3時間前にカミオカンデなどでニュートリノが検出されていた。つまり、電磁波観測では探れない超新星深部にアプローチできること、電磁波に先立って観測することで他の望遠鏡のためのアラートに使える（詳しくは3.6節）こと、これらが超新星をニュートリノで観測することの意義である。以下、この節では超新星から放出されるニュートリノの特徴について説明する。

重力崩壊型超新星から放出される全エネルギーは、最後に残される中性子星の重力束縛エネルギーで見積もることができる。それは大雑把に

$$|E_g| \sim \frac{GM_{\text{NS}}^2}{R_{\text{NS}}} = 5 \times 10^{53} \text{ erg}, \quad (1)$$

となる。ただし G は万有引力定数であり、中性子星の半径 R_{NS} と質量 M_{NS} には典型的な値としてそれぞれ、 10 km と $1.4M_{\odot}$ （ M_{\odot} は太陽質量）を代入した。一方、超新星残骸の運動や光度曲線から推定される爆発の運動エネルギーは 10^{51} erg 程度、光として放射されるエネルギーにいたっては 10^{49} erg 程度で、解放される重力エネルギーよりじゅうぶん小さい。つまりエネルギーのほとんどがニュートリノによって放出されることになる。そのため、物質との相互作用が弱いとはいえ、ニュートリノの持つエネルギーの一部を受け渡して、失速した衝撃波を後押し（いわゆる再加熱）するというシナリオが、超新星爆発のメカニズムとして有望と考えられている。

図1は単位時間あたりに超新星からニュートリノによって放出される総エネルギー（ニュートリノ光度）とそのニュートリノ1個あたりの平均エネルギーの時間変動である。この図では、最初の

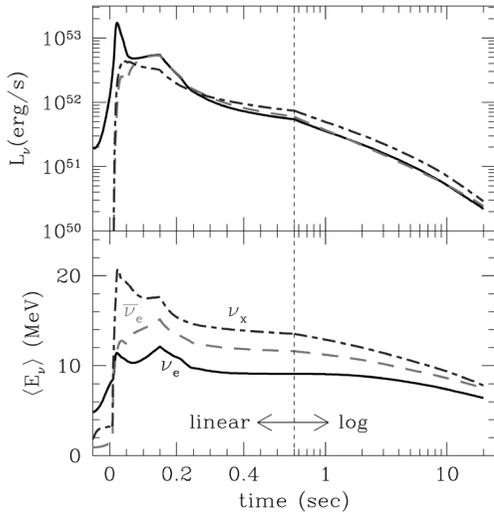


図1 超新星ニュートリノの光度曲線(上段)と平均エネルギー(下段). 文献 [6] より転載.

重力崩壊が跳ね返された時間をゼロにとっている。電子、 μ 粒子、 τ 粒子とそれらの反粒子に対応して、ニュートリノも ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$, ν_τ , $\bar{\nu}_\tau$ の6種類が存在するが、超新星ニュートリノでは ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$, ν_τ , $\bar{\nu}_\tau$ の4種類にはあまり大きな差はないとして、まとめて ν_x と扱われることが多い*1。なお、ニュートリノは重力崩壊の開始前からじわじわと放出され始めるが、これについては今回の特集や過去の月報 [7] にある別記事を参照されたい。

図1の平均エネルギーを見ると、衝撃波発生後は ν_x , $\bar{\nu}_e$, ν_e の順に高くなっていることが分かる。これは、各種類のニュートリノが放出される場所の温度を反映している。多くの反応プロセスを持ち反応断面積も大きい ν_e は、それだけ超新星コアから抜け出にくい。結果として ν_e は、より外側の温度の低い領域から放出されることになり、平均エネルギーが低くなる。逆に、 ν_x はより中心に近

い領域から到来する。このように異なる種類のニュートリノを観測することで、超新星内部についてより多くの情報を引き出すことができる。

さて、超新星から放出されるニュートリノは、時系列で見ると大きく3つの段階に分類できる。図1のニュートリノ光度において、まず ν_e のピークが現れることが分かる。これは中心コアの反発により打ち出された衝撃波が、星の内部を伝搬する過程で原子核を分解し、解放された陽子が電子捕獲反応 ($p+e \rightarrow n+\nu_e$) を起こすためである。そのため、このピークは中性子化バーストと呼ばれる。加えて、原子核とニュートリノの散乱断面積は原子核の質量数の2乗に比例するため、原子核が分解されることでニュートリノは透過しやすくなる。結果として、衝撃波の発生に伴って ν_e がバースト的に放出されることになる。

続いて、数百ミリ秒程度にわたり比較的ニュートリノ光度が高いフェーズが現れる。これは失速した衝撃波に外側から物質が降り積もっている段階(降着フェーズ)に対応する。この段階のニュートリノは、主に物質が衝撃波にぶつかって加熱されることで放出される。反応プロセスとしては、先ほど挙げた電子捕獲反応のほかに、中性子による陽電子捕獲反応 ($n+e^+ \rightarrow p+\bar{\nu}_e$) や、電子と陽電子の対消滅 ($e+e^+ \rightarrow \nu+\bar{\nu}$)、核子制動輻射 ($N+N' \rightarrow N+N'+\nu+\bar{\nu}$) なども起こる*2。特に、電子・陽電子対消滅や核子制動輻射といった反応は、 ν_e , $\bar{\nu}_e$ だけでなく、全種類のニュートリノを生成するため、 ν_x の放出量を評価するうえで重要となる。

失速していた衝撃波が復活して星の外側に伝搬していくと、それ以上の物質降着は起こらなくなる。放出されるニュートリノのエネルギー源は

*1 ただし、後からニュートリノ振動によって別の種類のニュートリノに変換されることまで考慮すると、 ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ あるいは ν_τ と $\bar{\nu}_\tau$ の差は無視できなくなり、 ν_μ と ν_τ をまとめて ν_x , $\bar{\nu}_\mu$ と $\bar{\nu}_\tau$ をまとめて $\bar{\nu}_x$ と記すこともある。

*2 衝撃波によって加熱された物質は10 MeV以上の温度に達し、これは電子・陽電子の静止質量(0.511 MeV)よりじゅうぶん高いため、対生成反応により陽電子も物質中に存在している。ただし、コアの中心付近では密度が高く、電子が縮退するため陽電子の存在は抑制される。

降ってくる物質の解放する重力エネルギーなので、それ以降はニュートリノ光度も下がっていく。このフェーズは、中心に残されたコアがニュートリノを放出して冷えていく段階（冷却フェーズ）に対応する。また、この中心コアは中性子星の前駆天体という意味で原始中性子星と呼ばれる。冷却フェーズは、いわば原始中性子星が余熱で光っている状況で、そのタイムスケールは数十秒程度と見積もられている [8, 9].

降着フェーズから冷却フェーズへと遷移する過程は、超新星爆発のメカニズムにおいて謎とされている衝撃波復活のプロセスに対応する。そのため、この遷移領域においてニュートリノ光度や平均エネルギーの詳しい観測ができれば、爆発メカニズムの解明に向けての大きな手掛かりとなる。一方、冷却フェーズのニュートリノ観測からは、残された中性子星について質量などの情報が読み取れると期待されている [10].

2.3 超新星背景ニュートリノ

ひとたび身近で起こればたくさんのニュートリノが検出できると期待されている超新星爆発だが、その出現頻度は実はあまり高くない。われわれの銀河系内では概ね100年に1回程度と見積もられている。しかし、宇宙の歴史をさかのぼれば、超新星爆発は過去いたるところで起こっており、その都度ニュートリノを放出してきた。こうして蓄積されてきたニュートリノは現在でも背景放射として存在しているはずで、これを超新星背景ニュートリノと呼ぶ。図2は超新星背景ニュートリノのフラックスの理論予想と観測からの制限である。

理論予想に大きな不定性を与えるのは、超新星爆発のモデルそのものよりも超新星の発生数である。1つの超新星が放出するニュートリノのエネルギーは、形成される中性子星の質量にあまりばらつきがないとすれば、概ね式(1)で与えられた値に定まる。一方で超新星の発生数の方は、宇宙進化のなかで各時代にどれだけの星が形成された

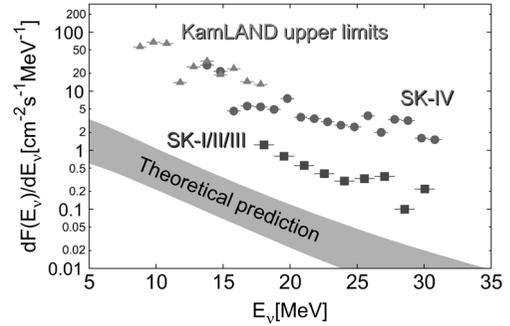


図2 超新星背景ニュートリノのフラックス。理論予想は文献 [11, 12] のモデルに基づく。観測からの制限は文献 [13–15] に基づく。

か（宇宙の星形成史）に始まり、形成された星のうち重力崩壊型超新星になるような大質量星が占める割合を決める初期質量関数や恒星進化のモデルにも依存する。特に宇宙の星形成史は過去にさかのぼるほど不定性が大きくなっていくが、過去の宇宙から到来するニュートリノは宇宙論的な赤方偏移を受けてエネルギーが下がるため、低エネルギーでの背景ニュートリノフラックスにより大きな不定性を与える。

背景ニュートリノフラックスを見積もる際の不確定要素のうち、これまで述べてこなかったものに、中性子星ではなくブラックホールを形成する場合がある。通常、重力崩壊がコアによって跳ね返されることで生じる衝撃波は、一旦は失速するもののいずれ復活して超新星爆発を起こすと考えられている。しかし、重力崩壊した星が非常に重い場合は、降り積もる物質の量も多く、衝撃波が押し戻されてブラックホールになってしまう可能性もある。この場合もニュートリノは放出される。むしろ、放出量は通常の超新星爆発を起こす場合よりも多い。

中性子星が形成される場合に放出されるニュートリノのエネルギーは式(1)で与えられたが、ブラックホールが形成される場合は、典型的な中性子星の質量より大きな質量が降り積もって重力エネルギーを解放する。ニュートリノ放出は物質降

着により中心コアが臨界質量に達してブラックホールが形成されるまで続くため、その分、ニュートリノの総放出エネルギーは上がる。さらに、降着フェーズでは加熱も続くためニュートリノの平均エネルギーも高くなる。よって、ブラックホールを形成する星の重力崩壊が無視できない割合で起こる場合には、高エネルギーでの背景ニュートリノフラックスに超過を与える。また、ブラックホールになる臨界質量は、中性子星の場合の最大質量に対応するもので、高密度な原子核物質の状態方程式に依存する。つまり、重力崩壊からのニュートリノ放出量は状態方程式にも依存することになる。ちなみに、原始中性子星は温度が高いため、ここでいう臨界質量は温度ゼロの中性子星の最大質量とは異なる値になる。

どういった星がブラックホールになるかは恒星進化のモデルとも関係する。初期質量の大きい星ほどブラックホールになりやすそうだが、そういった星は進化の過程で大量の質量放出をすることで考えられ、進化を終えて重力崩壊を起こす時点で必ずしも重いとは限らない。さらに、進化中の質量放出量は星の金属量にも依存し、一般に金属量が多いほど質量放出が多くなると考えられている。ここで、「金属」とは水素・ヘリウムよりも質量数の大きいすべての元素を指し、こういった元素は恒星の内部で合成されて超新星爆発によって宇宙空間に供給されるため、古い星ほど金属量は少なくなる。つまり、過去に形成された星はあまり質量放出をせずに進化し、重いまま重力崩壊を起こしてブラックホールになりやすいと考えられる。

実際の検出器における超新星背景ニュートリノの事象数を見積もる際には、ニュートリノ振動も考慮する必要がある。3.2節で述べるとおり、スーパーカミオカンデで検出される超新星ニュートリノは主に $\bar{\nu}_e$ であるが、超新星内部で生成された $\bar{\nu}_e$ がニュートリノ振動により地球に到達したときには別の種類のニュートリノに変わっていた

り、逆に生成されたときは別の種類であっても地球で $\bar{\nu}_e$ として検出されることもあり得る。

いまだニュートリノ検出器での発見には至っていない超新星背景ニュートリノだが、これまで多くの理論予想がなされてきた。宇宙の星形成史の概念を導入して、最初に超新星背景ニュートリノのフラックスを評価したのは文献 [16] で、ほかにも初期の研究としては文献 [17, 18] があり、星形成史をより多角的に検討している研究に文献 [19] がある。またニュートリノ振動の影響を考慮して事象数予測をした初期の研究では文献 [20] が挙げられる。一方、ブラックホール形成からの寄与を状態方程式の不定性も含めて考察したものとして文献 [21] が挙げられるほか、文献 [22] では通常の超新星爆発とブラックホール形成の閾値について考察されている。文献 [11, 12] では、以上のさまざまな要素に加えて宇宙の金属量進化まで考慮して背景ニュートリノのフラックスを評価している。

まとめると、背景ニュートリノのフラックスには、超新星・ブラックホール形成からのニュートリノ放出をはじめ、宇宙の星形成史・化学進化、宇宙論的赤方偏移、恒星進化のモデル、核物質の状態方程式といったさまざまな要素が含まれている。そのため、背景ニュートリノの観測によって各要素の不定性にピンポイントに制限を与えることは難しいが、現在の上限值は極端なモデルが排除されうるような、もう一步のところまで来ている。いずれにしろ、まずは発見によってこれらの謎に一石が投げられることの意義は非常に大きい。

3. スーパーカミオカンデにおける超新星ニュートリノ観測

3.1 スーパーカミオカンデ検出器

スーパーカミオカンデ検出器 (SK) は岐阜県飛騨市神岡町神岡鉱山内で、池の山の山頂下1,000メートルに建設された総体積約5万トンの超純水を満たした検出器である [23]。ニュートリノは

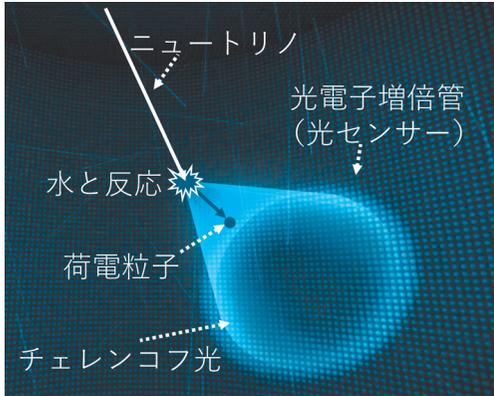


図3 スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ観測の概念図. ニュートリノはごく稀に検出器内の水と反応し、生成された荷電粒子から出るチェレンコフ光という微弱な光を光電子増倍管 (光センサー) でとらえる.

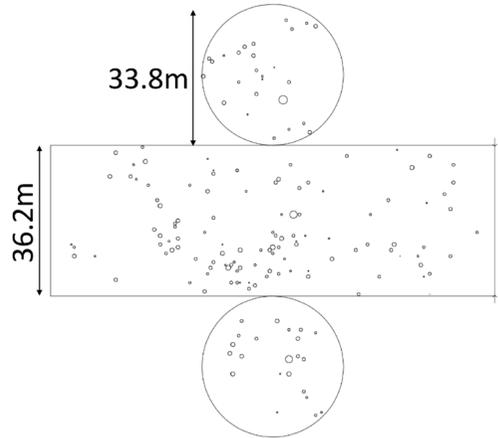


図4 シミュレーションによる超新星ニュートリノの1つを観測した事象. 円筒形の検出器の展開図となっており直径高さは検出器の内側の大きさを示す. 小さい丸は、光を受け取った光電子増倍管の位置を示し、丸の大きさは各光電子増倍管が受け取った光量を示す (数光電子程度).

SK検出器内の水と反応し、その際に生成される高速の荷電粒子が水中で放つ微弱な光であるチェレンコフ光を約1万1千本の直径50 cm光電子増倍管で観測するという検出器である. 図3にあるように、事象毎に光を受け取った光電子増倍管の位置や時間を解析し、検出器内で反応が起こった位置、ニュートリノ反応によって放出された荷電粒子のエネルギー、荷電粒子の放出された方向等を得ることができる. 図4は、超新星ニュートリノ信号の予想である (ニュートリノ1個の反応). 超新星ニュートリノのエネルギー領域 (10から20 MeV程度; 図1参照) では、1事象あたりの光を受け取る光電子増倍管の数は数百本 (1万1千本中) に過ぎず、図3のような綺麗なリングではなく図4のようにまばらなパターンになる. このパターン等から検出されたニュートリノの情報を引き出すのが、それほど容易ではないことをご理解いただけたと思う. とはいいつつも、15 MeVの電子事象 (超新星ニュートリノのエネルギー領域の事象) に対する検出器のパフォーマンスは、反応位置分解能が50 cm, エネルギー分解能が12%, 到来角度分解能が20度程度を達成できているのは20年以上にわたる努力の結晶である (も

ちろん、現状に満足せずにもっと上を目指している).

3.2 超新星ニュートリノのSKにおける反応

超新星爆発では、すべての種類のニュートリノがほぼ同数放出され、地球に到達すると考えてよい. 超新星ニュートリノのエネルギー領域で最も多く起こる反応は、水分子に含まれる陽子と反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ との反応 (図5のA) で逆ベータ崩壊反応といわれ、観測される超新星ニュートリノ事象のうち90から95%が逆ベータ崩壊反応による. 次に多いのがニュートリノと電子との弾性散乱 (図5のB) で事象数は全体の数%である. 逆ベータ崩壊反応で放出される陽電子はニュートリノが飛んできた方向とは、あまり相関のない方向に放出される一方で、電子散乱事象で蹴とばされる電子はニュートリノの進行方向と同じ方向に飛ばされやすい. つまり、超新星爆発のニュートリノバーストを観測した際に、電子散乱事象が含まれることにより超新星爆発の方向が分かるため、電子散乱反応は大事な情報を伝えてくれる反

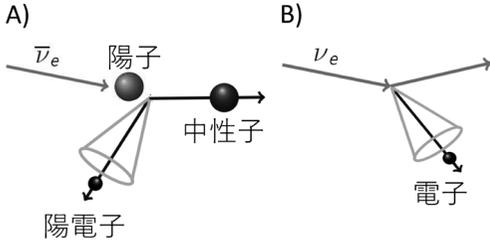


図5 A) 陽子と反電子ニュートリノとの逆ベータ崩壊反応, B) 電子とニュートリノ（ここでは電子ニュートリノ）との電子散乱反応。

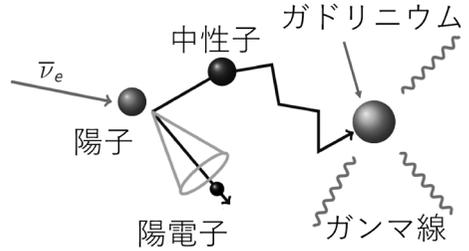


図6 SK-Gdにおける、超新星爆発からの反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊反応。

応である。

3.3 SK-Gd計画

すでに述べたとおり、SKでは1996年の観測開始以降、5万トンの超純水をニュートリノ標的として観測を行ってきた。水と超新星ニュートリノとの反応のなかで、最も多い反応である反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊反応において、SKで検出されるのは主に陽電子のみである。そのため、特に超新星背景ニュートリノ探索のような、ごく稀な信号の探索ではバックグラウンド事象との区別がつきにくい。その問題を解決するためにSK純水中にガドリニウムを添加する計画がSK-Gd計画である [24]。ガドリニウムは熱中性子捕獲断面積が大きく、中性子捕獲後に放出されるガンマ線のエネルギーが比較的高いため、SKで検出可能である(図6)。ニュートリノの逆ベータ崩壊反応より放出された中性子をガドリニウムが捕獲し放出されるガンマ線をとらえることで、陽電子の信号に加えて中性子信号を観測する、いわゆる遅延同時計測が可能となる。この遅延同時計測により、バックグラウンド事象を大きく削減することができるようになる。

3.4 SK-Gdの準備状況

ガドリニウムは、硫酸ガドリニウム八水和物(以降、硫酸ガドリニウムと表記する)として、純水に溶解させることができる。これまでさまざまな試験を行うによって硫酸ガドリニウムが検出器に悪影響を与えないことを詳細に確認してきた



図7 SK-Gd用の新しい水循環装置。右にガドリニウム投入口が見える。

[25]. さらに、放射性不純物を極限まで低減させた硫酸ガドリニウムの開発にも成功し、超純水と同じレベルの極低バックグラウンド環境の下で観測を行うことができる見込みである。一方で、環境中にガドリニウムが漏れ出ないようにするため、2018年にはSK検出器のタンクの止水性能を強化させるための大がかりな工事を無事に終えた。昨年度(2019年度)より、新しい水循環装置(図7)が本格的に稼働しており、硫酸ガドリニウム溶解後の透過率も純水同等に保つことができるようになってきている。2020年7月14日より最初の硫酸ガドリニウム13トンの溶解がついにスタートし、現在4トン近くをすでに投入している(7月末執筆時の状況)。この調子で13トンを溶解させればガドリニウムの中性子捕獲確率50%を達成して8月下旬には物理観測をスタートできる予

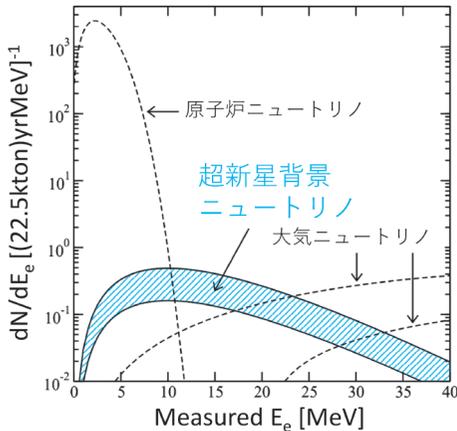


図8 SK-Gdにおける予想事象数とその他のニュートリノ事象数 [24].

定である。その後、順次濃度を上げていき、ガドリニウムの中性子捕獲確率が90%となるトータルで約130トンの硫酸ガドリニウムを溶解させるのが最終目標である。

3.5 超新星背景ニュートリノ観測

SK-Gd計画における、最も重要な物理目標が超新星背景ニュートリノを発見することである。図8にあるように、およそ10 MeVから20 MeVまでの探索エネルギー領域で、観測されるのは年間数事象という稀な信号をバックグラウンド事象のなかから探し出すことになる。主なバックグラウンドは、大気ニュートリノ起源の事象である。SK-Gdでは多くの場合、中性子捕獲信号による遅延同時計測により超新星背景ニュートリノの逆ベータ崩壊反応と区別がつけられる。しかし、高エネルギーの大気ニュートリノと水分子中の酸素原子との中性カレント反応は非常に厄介なバックグラウンドである。反応によって励起された酸素原子核が脱励起する際に放出するガンマ線のエネルギーが、超新星背景ニュートリノのエネルギー領域と重なり、さらに反応の際に中性子が放出さ

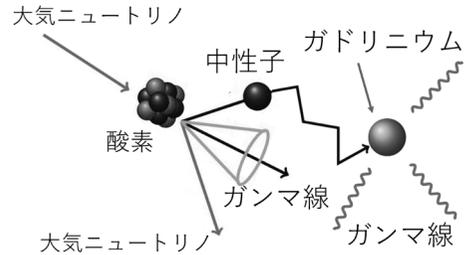


図9 SK-Gdにおける超新星背景ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる大気ニュートリノの中性カレント反応。ガンマ線を信号の陽電子と見間違え、中性子も放出されると信号(図6)となかなか区別がつかない。

れることがあり、信号とほとんど区別がつかない(図9)。しかしながら、まったく太刀打ちできないかというそうではない。T2K実験^{*3}の加速器ニュートリノをSKに打ち込むことにより、実際にSK内でこの反応を起こすことができる[27]。つまり、厄介なバックグラウンドを別途測定して、その頻度や反応の特徴を理解し、削減することが可能である[28]。これまでの測定を基に見積もられた、SK-Gdの感度を図10に示す。約10年の観測により、理論予測されている超新星背景ニュートリノフラックス領域の大部分を探索することができ、 3σ での発見を目指す。

3.6 超新星ニュートリノバースト観測

銀河系内超新星爆発が起これば、約10秒間に数千から1万事象という高統計のニュートリノ事象がSKで観測されると期待されており、超新星爆発機構の理解にとって必要不可欠な情報が得られる。また、SKの一番の強みは上述のように、図5B)の電子散乱事象を含めて各事象の方向が分かるので、超新星爆発の方向が得られるということである。例えば、銀河系内10 kpcの超新星爆発については約5度の精度で指し示すことができ、超新星爆発の観測を受け、1時間以内に公

*3 T2K実験 [26] は、茨城県東海村のJ-PARC加速器で人工的に作られたニュートリノをスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノの基礎的な性質や物質との反応を調べる実験。

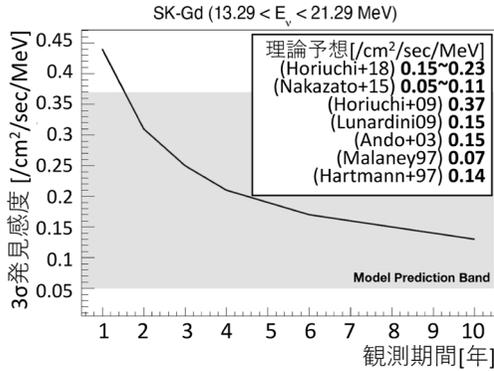
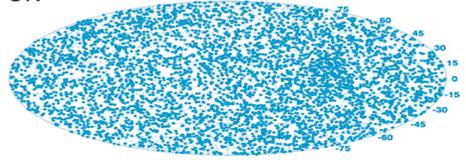


図10 SK-Gdにおける超新星背景ニュートリノ観測の感度と観測時間の関係 [28]. 硫酸ガドリニウム濃度は0.2%, 中性カレント反応はSKと比べて30%削減, 中性カレント反応の不定性は40%と仮定している. 灰色の帯は四角枠内のモデル予想の範囲を示している. 黒線の上側の領域が 3σ での発見が見込まれる領域となる.

開^{*4}できる体制が整えられている [30]. ニュートリノは光よりも早く親星から抜け出し地球に到達するため, SKがいち早く超新星方向を公開することで, 超新星爆発の光(電磁波)が届く前に世界中で稼働している望遠鏡を超新星の方向に向けて, 爆発の瞬間を観測することができるのである. そして, 衝撃波が星の表面に達した瞬間(ショックブレイクアウト)を多波長でとらえることによって, 星の進化の最終段階や爆発する直前の星の構造に新たな理解がもたらされると期待されている. 超新星爆発を観測する際に最も事象数の多い逆ベータ崩壊反応の事象からは超新星爆発方向を得るのは難しく, 逆ベータ崩壊反応は方向を求める際には電子散乱事象のバックグラウンドになってしまう. SK-Gdでは, 逆ベータ崩壊反応を分離することができるので, 図11のように超新星爆発の方向が分かりやすくなる. シミュレーションでは, 10 kpcで起こった超新星爆発に対して, これまで5度だった方向決定精度が3度

A) SK



B) SK-Gd

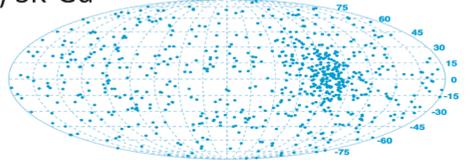


図11 SK-Gdにおける超新星爆発方向決定精度の向上. 銀河系内(10 kpc)の超新星爆発ニュートリノ事象の方向を天球座標に図示した図. A)はSKの場合で, 逆ベータ崩壊反応と電子散乱反応の分離ができていない. B)はSK-Gdで, 電子散乱事象が選択できるようになる(0.2%硫酸ガドリニウム濃度の場合). 点の集まっているところが超新星爆発の方向である.

に向上すると期待できる.

4. ハイパーカミオカンデ

4.1 ハイパーカミオカンデの概要

ハイパーカミオカンデ実験(HK)は世界15カ国以上の参加による国際共同実験である [31]. 2020年度から建設を開始するための予算が成立し, 正式にプロジェクトが開始した. すでにいくつかの試験や準備工事がスタートしており, 現場の活気が日に日に増しているのを実感できる. これまで神岡をはじめ, 世界中で培ったニュートリノ実験技術を結集させ, 2027年度観測開始するために建設を進めていく. 検出器の本体は, 直径68 m, 深さ71 mの円筒形の検出器で, 体積は26万トン, 観測に用いる有効体積は19万トンでSKの約10倍である(図12).

4.2 HKでの超新星ニュートリノ観測

HKは, 陽子崩壊探索やニュートリノ観測等の

*4 公開は, SNEWS [29], The Astronomer's Telegram (ATel), Gamma-ray Burst Coordinate Network (GCN), 国際天文連合の運営する Transient Name Server (TNS) を通して行われる. SKからの超新星爆発速報を受け取るにはいずれかを受信されたい.

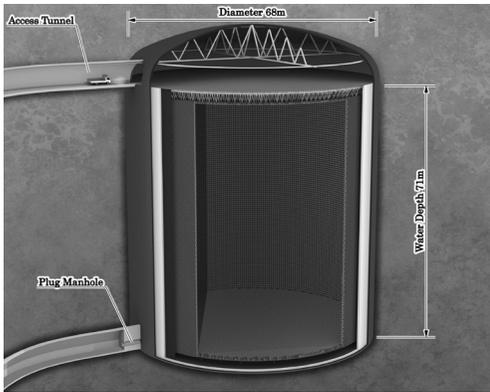


図12 HK 検出器の概念図。

素粒子を観察する「顕微鏡」であると同時に、宇宙より飛来するニュートリノを用いて太陽や超新星爆発を見る「望遠鏡」でもある（より詳細には、[32]等を参照されたい）。例えば、銀河系中心における超新星爆発に対してHKでは5万から7万のニュートリノ事象が観測されると予想され、この高統計により、超新星爆発機構の詳細にまで迫れると期待できる。その一例が、SASI (Standing Accretion Shock Instability) [33]の検証である。2.2節にあるとおり、超新星爆発過程ではニュートリノによる衝撃波の再加熱が重要だが、SASIではさらに超新星中心部の非対称な物理的揺動を加えることよって、より強力な爆発が起こるとされている。この物理的揺動によって、放出されるニュートリノ量がミリ秒単位で変動すると予想され、HKにおいて直接観測することが可能である。また、銀河系内10 kpcの超新星に対して方向決定精度は約1度の精度で得られ、爆発開始の瞬間は1ミリ秒の精度で決定することができる。これらの情報を重力波望遠鏡も含めて世界の天文台と共有し、マルチメッセンジャー観測を行うことで超新星爆発の全貌を理解することができる。

一方で、超新星背景ニュートリノ観測についても、先に述べたとおりSK-Gdで発見を達成したのち、HKでは10年間の観測で100事象を超える超新星背景ニュートリノ信号をとらえることがで

きると予想される。それにより、「平均」としての超新星爆発の理解や、宇宙の星形成の歴史、さらにはブラックホール形成の歴史にまで、まさに宇宙全体の理解のために重要な知見を得ることができる。

5. まとめ

本特集では、スーパーカミオカンデの次期計画であるSK-Gd計画におけるガドリニウム投入開始と、ハイパーカミオカンデ計画の正式な開始を記念して、それらの計画の主な物理目標の1つである超新星ニュートリノの理論的な背景と観測の展望について解説した。理論的な背景では、超新星爆発の基礎から超新星ニュートリノ観測の重要性、特に超新星背景ニュートリノの観測が解き明かすべき課題について、超新星・ブラックホール形成からのニュートリノ放出をはじめ、宇宙の星形成史・化学進化、宇宙論的赤方偏移、恒星進化のモデル、核物質の状態方程式まで、多岐にわたることを紹介した。SK-Gd計画では、今年度前半には最初の13トンのガドリニウムを投入し観測を開始する予定である。10年の観測で、超新星背景ニュートリノの発見を目指す。また、昨年度末に正式に建設が決定したハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデの約10倍の感度で2027年より観測を開始する予定である。SK-Gd計画やハイパーカミオカンデでの物理（もちろん超新星爆発だけでなくその他の物理でも）に興味のある方は、是非ご参加いただき一緒に研究できると嬉しく思います。

謝辞

本稿はスーパーカミオカンデ実験、特にSK-Gd計画推進メンバーのこれまでの活動をまとめて執筆しました。すべてのスーパーカミオカンデ共同研究者に感謝いたします。とりわけ芦田洋輔氏、関谷洋之氏、矢野孝臣氏には執筆中にたくさんのアドバイスをいただき、本当にありがとうございます。

ました。また、本研究の一部は、新学術領域研究「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」、「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」の支援の下に行われました。この原稿を作るにあたっては、天文月報編集委員の滝脇さんに大変お世話になりました。ここでお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 田中雅臣, 2015, 星が「死ぬ」とはどういうことか (ベレ出版)
- [2] 諏訪雄大, 2011, 天文月報, 104, 276
- [3] 滝脇知也, 2017, 天文月報, 110, 710
- [4] 山田章一, 2016, 超新星 (日本評論社)
- [5] 住吉光介, 2018, 原子核から読み解く超新星爆発の世界 (共立出版)
- [6] Nakazato, K., et al., 2013, ApJS, 205, 2
- [7] 加藤ちなみ, 2020, 天文月報, 113, 14
- [8] Nakazato, K., & Suzuki, H., 2019, ApJ, 878, 25
- [9] Nakazato, K., & Suzuki, H., 2020, ApJ, 891, 156
- [10] Suwa, Y., et al., 2019, ApJ, 881, 139
- [11] Nakazato, K., et al., 2015, ApJ, 804, 75
- [12] Nakazato, K., et al., 2017, JPS Conf. Proc. 14, 010705
- [13] Bays, K., et al., 2012, Phys. Rev. D, 85, 052007
- [14] Gando, A., et al., 2012, ApJ, 745, 193
- [15] Zhang, H., et al., 2015, Astropart. Phys., 60, 41
- [16] Totani, T., et al., 1996, ApJ, 460, 303
- [17] Malaney, R. A., 1997, Astropart. Phys., 7, 125
- [18] Hartmann, D. H., & Woosley, S. E., 1997, Astropart. Phys., 7, 137
- [19] Horiuchi, S., et al., 2009, Phys. Rev. D, 79, 083013
- [20] Ando, S., et al., 2003, Astropart. Phys., 18, 307
- [21] Lunardini, C., 2009, Phys. Rev. Lett., 102, 231101
- [22] Horiuchi, S., et al., 2018, MNRAS, 475, 1363
- [23] Fukuda, Y., et al., 2003, Nucl. Instrum. Meth. A, 501, 418
- [24] Beacom, J. F., & Vagins, M. R., 2004, Phys. Rev. Lett. 93, 171101
- [25] Marti, L., et al., 2020, Nucl. Instrum. Meth. A, 959, 163549
- [26] Abe, K., et al., 2011a, Nucl. Instrum. Meth. A, 659, 106
- [27] Abe, K., et al., 2019, Phys. Rev. D, 100, 112009
- [28] Ashida, Y., Ph.D thesis, Kyoto University, 2019
- [29] Vigorito, C., 2011, J. Phys. Conf. Ser. 309, 012026
- [30] Abe, K., et al., 2016, Astropart. Phys. 81, 39
- [31] Abe, K., et al., 2011b, arXiv:1109.3262
- [32] Ishitsuka, M., et al., 2019, 高エネルギーニュース, 37, 183
- [33] Tamborra, I., et al., 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 121104

Prospect of Supernova Neutrino Observation with SK-Gd and Hyper-Kamiokande

Motoyasu IKEDA and Ken'ichiro NAKAZATO

¹Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, 456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-city, Gifu 506-1205, Japan

²Faculty of Arts & Science, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

Abstract: The status and prospects of the Super-Kamiokande gadolinium phase (SK-Gd) and Hyper-Kamiokande (HK) for supernova neutrino observations are reviewed. Observing burst and cosmic background of supernova neutrinos will provide clues to the mechanism of supernova explosion, properties of high-density matter, and history of cosmic star formation. Gadolinium sulfate will be dissolved in ultra-pure water for SK-Gd to dramatically improve the performance for supernova neutrino detection. After more than 10 years of research and development, the introduction of gadolinium will begin this year (2020). HK has about 10 times larger effective volume than Super-Kamiokande. Construction of HK was officially approved last year and preparations are progressing.