

液体シンチレータ型 検出器による ニュートリノ天文学・ 地球科学



石徹白



渡辺



竹本

石徹白 晃治¹・渡辺 寛子²・竹本 康浩³

〈^{1,2} 東北大学ニュートリノ科学研究センター 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

〈³ 東京大学宇宙線研究所付属神岡宇宙素粒子研究施設 〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456〉

e-mail: ¹koji@awa.tohoku.ac.jp, ²hiroko@awa.tohoku.ac.jp, ³ytakemot@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

KamLANDやBorexinoなどの液体シンチレータ型ニュートリノ検出器は、原子炉ニュートリノ欠損の確認、ニュートリノ振動の精密観測、地球ニュートリノの観測とニュートリノ地球科学の創生、低エネルギー太陽ニュートリノの観測、および超新星前兆ニュートリノモニターの実現などで素粒子実験だけでなく、天文学・地球科学にも関係するユニークな成果を上げてきた。2020年代には、現在稼働中のKamLANDにプラスしてカナダのSNO+と中国のJUNOが稼働する。その他にも、Jinping地下実験室の3 kton検出器や海洋底ニュートリノ検出器が計画されている。それらにより、低エネルギー太陽ニュートリノの精密観測による太陽モデルの検証、超新星背景ニュートリノの観測、および地球ニュートリノの多地点観測など今まで以上に天文学・地球科学に関するユニークな結果が出てくることが期待される。

1. はじめに

ほとんどの読者の方は、ニュートリノ検出器と言えばSuper-Kamiokande (SK) やIceCubeを思い浮かべることだろう。しかし、日本にはKamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector (KamLAND) と呼ばれる1 ktonの液体シンチレータ (LS) 検出器がある。LSとは荷電粒子が通過するときに光る油とさせていただくのが良い。このプロセスで放出される光 (シンチレーション光) はチェレンコフ光と比べて一桁以上に発光量が多い。そのために、KamLANDはSKの32 ktonの大きさと比べると小さいが、SKでは見えない低いエネルギーのニュートリノに感度がある。実際、KamLANDのエネルギー閾値は300 keVで、これは

SKよりおおよそ1桁小さい値となっている。このことは、可視光での天文観測と電波での天文観測のような相補的な関係であることを意味している。実際、KamLANDは2002年の稼働以降、原子炉ニュートリノ欠損の確認 [1] を皮切りに、地球ニュートリノの観測とニュートリノ地球科学の創生 [2]、2周期にわたるニュートリノ振動の測定 [3]、低エネルギー太陽ニュートリノの観測 [4]、超新星前兆ニュートリノモニターの実現 [5] などでユニークな成果を上げている。

世界的には、イタリアのGran Sassoに建設されたBorexino (278 tonのLS検出器) が2019年に観測を終了したが、カナダの780 tonのLS検出器であるSudbury Neutrino Observatory+ (SNO+) が今まさに動き出そうとしている。中国では20

ktonの大きさを持つJiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)が2021年の観測開始を目指して、急速に開発が進んでいる [6]. さらに、中国ではJUNOと相補的に低エネルギー太陽ニュートリノや地球ニュートリノの高統計観測を目指した3 ktonの検出器も地下2,700 mのJinping地下実験施設で計画されている [7]. その他にも、東北大学と海洋研究開発機構を中心にマントルからの地球ニュートリノ観測を目指した海洋底ニュートリノ検出器の議論が始まっている.

そのような状況のなかで、本稿ではKamLANDを中心に、LS検出器の構造を説明し、LS検出器によるニュートリノ天文学・地球科学の成果と将来展望を概観する.

2. KamLAND 検出器

KamLANDは旧KAMIOKANDEを東北大学を中心としたグループがLSを使ったニュートリノ検出器に改良したものである(図1). 総量1 ktonのLSが、検出器の中心に設置された直径13 mのバルーンと呼ばれる薄いフィルムに内包されている. フィルムの外側はLSと密度差が0.1%以下になるように調整されたバッファオイルで満たされている. これにより、バルーンはバッファオイル中を浮いているようになっている. LSは荷電粒子が動くことで波長400 nm程度の光を放出する. この光を直径18 mのステンレスタンクの内側に取り付けられた約1,900本の光電子増倍管で測定している. タンクの外側の外水槽は、宇宙線ミュオンを識別して除去するためのチェレンコフ検出器となっている.

ニュートリノの検出は、反電子ニュートリノと陽子により陽電子と中性子が作られる逆ベータ崩壊 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) が中心である. 逆ベータ崩壊のエネルギー閾値は1.8 MeVで、陽電子の運動エネルギーと陽電子-電子の対消滅でできる511 keVの γ 線2本が先行して観測される(先発信号). その後、平均で約210 μ s後に中性子が陽子に捕獲さ

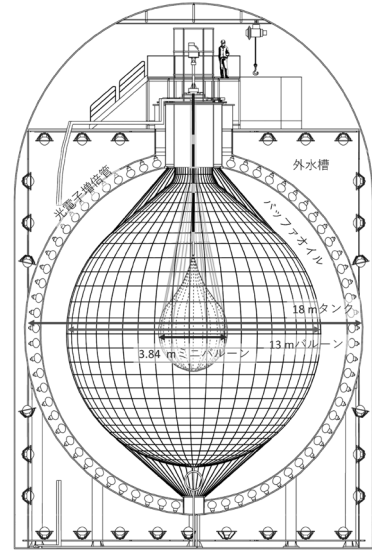


図1 KamLAND 検出器の概要. 東北大学ニュートリノ科学研究センターより許可を得て転載.

れて、2.2 MeVの γ 線が放出される事象が起こる(後発信号). 両者の空間-時間相関を取る遅延同時計測で、ほとんどバックグラウンドフリーで反電子ニュートリノの観測を行える.

電子散乱 ($\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$)でのニュートリノ観測も重要な意味を持つ. シンチレーション光が明るいという性質により、SKでは不可能な低エネルギー電子ニュートリノ(例えば ^7Be 太陽ニュートリノ)観測が可能なのである. しかしながら、逆ベータ崩壊と異なり遅延同時計測が使えない. そのために、LS中に含まれる放射性不純物や宇宙線ミュオンによる原子核破砕で生じる短寿命原子核の崩壊で生じる放射線などがバックグラウンドとなる.

上記説明はBorexino, SNO+やJUNOなどと大枠で共通するものである.

3. 太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノとは太陽の中心で生じる熱核融合で4つの陽子がヘリウムへ転換する際に生じる電子ニュートリノである. 核融合は大きく分け

て2種の反応連鎖に分けられる。陽子同士の核融合を端緒としHe, Li, Be, Bを介しながら核融合が続くpp連鎖, およびC, N, O (およびF)が触媒的に陽子と核融合を続けるCNOサイクルである。CNOサイクルが安定的に活動する温度は太陽の中心温度よりやや高いため, 太陽ではより低温から活動するpp連鎖が優勢で98%以上のエネルギー生成を担っていると考えられている。各反応過程で生成されるニュートリノのうち地球で観測されるフラックス(単位: $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)が大きいのは, pp連鎖の開始である $p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$ で作られるニュートリノ(pp ν)の 5.98×10^{10} , pp連鎖の分岐の1つ(分岐比15%)で経由する ${}^7\text{Be}$ の電子捕獲で作られるニュートリノ(${}^7\text{Be}\nu$)の 4.93×10^9 , 同じくpp連鎖の分岐の1つ(分岐比0.018%)で経由する ${}^8\text{B}$ のベータ崩壊で作られるニュートリノ(${}^8\text{B}\nu$)の 5.46×10^6 , CNOサイクル起源をまとめたニュートリノ(CNO ν)の 4.88×10^8 などとなっている。

“手のひらを太陽に透かしてみれば”, 大雑把に毎秒10兆個の太陽ニュートリノが手を通り抜けてくる計算である。

1960年代には太陽ニュートリノの観測が開始され, すぐに観測の結果が予測値の30%しかないことが明らかになった。これを**太陽ニュートリノ問題**と呼ぶ。太陽ニュートリノのフラックス量を予測するためには現在の太陽を光学的手法で観測した結果が用いられる。しかし, 太陽中心での核融合で生じたエネルギーが太陽表面から放出されるまでに100万年程度の時間がかかる。そのために, このような遅延に問題のカギであるのか, 或いはニュートリノの物理に全く想定されていないカギが隠されているのかが長く議論されていた。1990年代後半になると, SKが宇宙線と大気核の反応から生じるニュートリノを用いて地球の裏から来るニュートリノが有意に減少することを示した。次いで, カナダのSNO(はじめにで述べたSNO+の前身)が重水を用いたニュートリノの種

別(フレーバー)に依存しない観測で太陽ニュートリノ量が太陽モデルと一致することを示した。これらの結果, ニュートリノは有限の質量を持ち, 時間とともに異なる“フレーバー”のニュートリノに変化するニュートリノ振動が生じていることが明らかになった。このニュートリノ振動の発見により太陽ニュートリノ問題は解決したのである。これにより梶田先生がノーベル賞を取られたことは記憶にも新しいと思う。少し付け加えると, 太陽ニュートリノの振動パラメータの測定にはじめて成功したのは, 実はKamLANDによる原子炉由来反ニュートリノの欠損の観測によるものである[1]。

太陽ニュートリノ観測の次の目標は, ニュートリノ物理のさらなる追及, および天文学の推進, 特に恒星進化理論の高精度化にある。前者の例として, ニュートリノの非標準相互作用がある。ここでは詳細に立ち入らないが, 興味のある方には[8, 9]らを読んでもらうのが良い。

後者の例として, **太陽表面組成問題**がある。ニュートリノの予測フラックスは標準太陽模型(SSM)から導出される。SSMは5つの状態方程式により前主系列星の太陽を今の太陽まで計算したもので, 3つのフリーパラメータ(対流混合長, 初期ヘリウム量, 初期金属量)が与えられ, 3つの観測による制限(太陽半径, ルミノシティ, 表面の金属と水素の成分比)で束縛される。2000年代の太陽表面の分光観測の向上により, 表面の金属成分がこれまでの値より低いことがわかり, SSMが更新された。これにより表現される太陽は以前のモデルに対して音速, 輻射層-対流層境界深度や表面ヘリウム量の点で変化がある。この変化は, 太陽の表面振動から太陽内部構造を探る日震学の見地がこれまでのSSMと高い合致を見せていたことに反するものであった。

太陽ニュートリノ観測はこの違いを独立に検証することができる。そのために ${}^7\text{Be}\nu$ が観測目標とされた。 ${}^7\text{Be}\nu$ はSKなどで今まで観測されてい

た ${}^8\text{B}\nu$ と比べてフラックスが大きく、金属量の大小で予測されるフラックスが $(4.93 \pm 0.06) \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (GS98モデル) から $(4.50 \pm 0.06) \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (AGSS09モデル) まで変化する [10]. しかし、 ${}^7\text{Be}\nu$ のエネルギーは861 keVと低いため、実際の観測には放射性不純物起源のバックグラウンドの多い低エネルギー帯域で電子散乱イベントを探すという困難があった. 初期のKamLANDでは不純物の水とLSに対する溶解度の違いを利用して、LSを純水で洗うという方法で放射性不純物を除去していた. しかし、 ${}^7\text{Be}\nu$ の観測には不十分でさらなる不純物の除去が求められたのである. 特に予想される電子散乱イベントのスペクトルと類似した ${}^{210}\text{Bi}$ と ${}^{85}\text{Kr}$ は4桁から5桁の低減が必要であった.

このために、KamLANDは蒸留純化の方法を確立し [11], 2007年から2年をかけてLSの蒸留純化を行った. 当初の低減目標に近い低減を得られた段階で長期の観測に移った. しかし、温度バランスの悪化によるLSの対流という次なる困難に直面した. 対流に乗って検出器中心の非常に放射性不純物の少ない領域に検出器外側の比較的放射性不純物の多いLSが流れ込んできたのである. 検出器のデータを複雑な時空間で分割することによって、なんとか ${}^7\text{Be}\nu$ の成分を取り出すことに成功したのは2015年のことであった. 測定されたフラックスは $(5.82 \pm 1.02) \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった [4]. 予想されるフラックス量と一致するが、モデルを区別するのは困難であった. 図2に ${}^7\text{Be}\nu$ を評価するために最もS/Nが良い時空間分割データを示す.

一方、Gran SassoのBorexinoは278 tonとKamLANDより小さいながら、神岡より高い山の地下にあるために宇宙線が10分の1程度と恵まれた環境にある. Borexinoは低エネルギー太陽ニュートリノ観測に向けた検出器の建造やLSの純化を行い、2008年に初の ${}^7\text{Be}\nu$ の観測結果を発表した. BorexinoもKamLAND同様にLSの対流による放

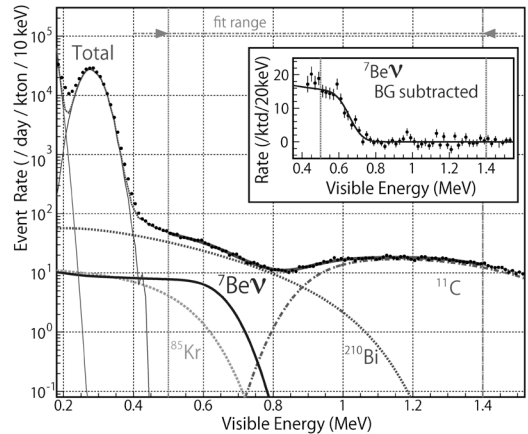


図2 KamLAND実験における ${}^7\text{Be}\nu$ のエネルギースペクトル評価. ${}^{210}\text{Bi}$ が ${}^7\text{Be}\nu$ に対し大きなBGとなっているが、データからBGを差し引くと ${}^7\text{Be}\nu$ の形状が明確に現れる(図中図). [4]の図を改変.

射性不純物混入に見舞われたが、検出器全体に多数の温度センサーと断熱カバーを設置することで検出器の温度勾配を安定させることに成功した. 極低放射能環境下での長期観測の結果、 pp 連鎖のその他の測定が難しいニュートリノ、 $pp\nu$, $pep\nu$ の初観測にも成功した [12]. 最終的に得られた ${}^7\text{Be}\nu$ のフラックス量は $4.99 \pm 0.11 \text{ (stat)}^{+0.06}_{-0.08} \text{ (syst)} \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [13]であった.

Borexinoは ${}^8\text{B}\nu$ の観測結果 [14] と合わせて、日震学同様に金属量の多い太陽モデル (GS98モデル) をやや好む (図3). なお、図3は参考にBorexino以外の結果も示してある. この図に含まれる2つの相反するSK ${}^8\text{B}\nu$ の結果に関しては、ニュートリノ振動の問題も含めてセクション6で説明する.

今年の6月に、BorexinoはCNOニュートリノの初検出を報告した [15]. 太陽でCNOサイクルが実際に起こっていることをニュートリノで確かめたのである. ニュートリノの量は 1σ の精度で pp 連鎖同様にGS98モデルを好む結果であった. 今後 pp 連鎖とCNOサイクル由来のニュートリノ全てを用いたSSMの高精度評価が行われると期

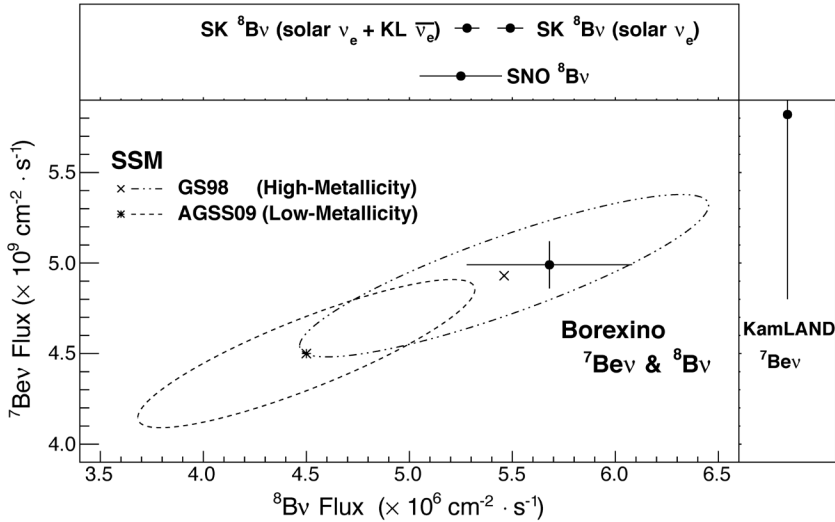


図3 SSM と太陽ニュートリノ観測の結果.

待される.

このように、LS検出器は直接観測ができない太陽中心の核融合の観測により恒星進化論に対する貢献を果たしている。最高感度を持つBorexinoは終了したが、SNO+はLSフェーズにおいて、世界最深の利点を活かして低エネルギー太陽ニュートリノの観測の準備を進めている。中国では超大型LS検出器であるJUNOによる高統計太陽ニュートリノの観測も目指している。さらに、Jinpingの3 kton LS検出器では5年の観測で、統計誤差1%以下での⁷Bevの検出などの高精度の観測が見込まれている [7].

4. 超新星ニュートリノ

質量が太陽質量の約10倍を超える大質量星は、進化の最終段階に重力崩壊型超新星爆発を起こす。重力崩壊の前と後の重力エネルギーの差 3×10^{53} ergの約99%がニュートリノとして放出される。これが超新星ニュートリノである。この事実は、KAMIOKANDEを中心としたSN1987A起源の超新星ニュートリノ検出から確認されている。

LS検出器は主に2個の反応チャンネルで超新星ニュートリノを検出できる。1個は2章で説明し

た逆ベータ崩壊である。遅延同時計測により、ほぼバックグラウンドフリーでの $\bar{\nu}_e$ 観測が可能である。

もう1個は陽子散乱 ($\nu + p \rightarrow \nu + p$) を通じたフレーバーに依存しないニュートリノ検出である。この反応でミューオン型やタウ型ニュートリノ (ν_x) の平均エネルギーや輝度を求められる [16]. SKでも陽子散乱の反応は起こるが、陽子の運動エネルギーがチェレンコフ閾値を超えないため、SKでの陽子散乱イベントの検出は不可能である。そのために、陽子散乱による ν_x 測定がLS検出器のユニークな点である。

銀河中心での超新星爆発の場合はKamLANDでは逆ベータ崩壊による $\bar{\nu}_e$ が約200-300イベント期待でき、陽子散乱では約60イベントが期待できる。また、JUNOでは逆ベータ崩壊、電子散乱、陽子散乱の全てを高統計で測定できるので、単一の検出器で $\bar{\nu}_e$, ν_e , ν_x の全てが測定可能になることが期待されている [17].

実は星は重力崩壊前の恒星進化の最終段階からニュートリノを放出していること、およびそのニュートリノ（超新星前兆ニュートリノ）の検出可能性が2004年から議論されていた [18]. 超新星

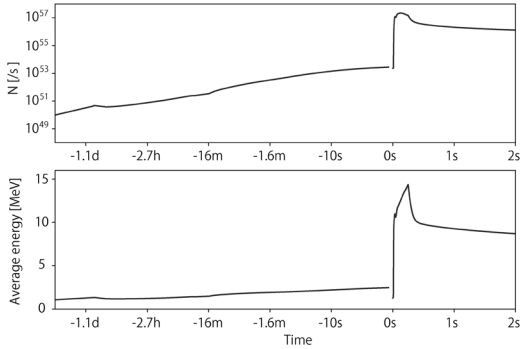


図4 星崩壊 ($t=0$) 前後での反電子ニュートリノの放出数の変化 (上図) と平均エネルギーの変化 (下図)。

前兆ニュートリノは、内部が高温高密度であることに起因する対生成反応 ($e^+ + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_e$) により主に生成される。図4は最新の理論計算 [19, 20] をもとにした反電子ニュートリノの崩壊前後でのニュートリノの放出数と平均エネルギーの時間変化を示したものである。放出されるニュートリノの数は少なく、平均エネルギーも1-2 MeV程度と超新星ニュートリノと比べて非常に低い。一部は、逆ベータ崩壊の閾値 (1.8 MeV) を超えるが、イベント数の少なさとバックグラウンドのために検出は現実的でないと考えられていて、当時はあまり注目されなかった。

その状況が変わったのが2015年である。測定されたバックグラウンドや検出効率を考慮すると、KamLANDはペテルギウスなどの近傍超新星爆発時には超新星ニュートリノを検出可能であることを定量的に示した [5]。逆ベータ崩壊の期待イベント数は、理論モデルやニュートリノ質量階層構造に依存するが、ペテルギウスの場合で最後の48時間で2-20程度であると考えられる。主たるバックグラウンドは原子炉由来反ニュートリノで、原子力発電所の稼働状況に依存するが、概ね1日1イベント以下である。最良の場合で660 pc離れた超新星爆発からの超新星前兆ニュートリノが検出可能である。ペテルギウス超新星爆発の場合には数10時間前に検出可能であると考え

られる。KamLANDでは登録ユーザーとリアルタイム情報を共有しており、今後は確度が高いときにはATelなどを介して天文コミュニティと広く情報を共有することを考えている。

これ以降、超新星前兆ニュートリノの理論研究は急速に進んだ。具体的な例としては天文月報の他の記事 [21] や近年のレビュー論文 [22] を参照されたい。

2020年になってJUNOでも超新星前兆ニュートリノに対する定量的な感度評価がなされた [23]。それによれば、モデルによる不定性が大きい 3σ での検出可能距離は0.34-1.23 kpc、ペテルギウス超新星爆発に対して0.3-3.2日前に 3σ のアラームを出すことができる。

上述のようにLS検出器は超新星ニュートリノや超新星前兆ニュートリノにユニークな特徴を持つ。しかし、超新星爆発の頻度を考えると、実際の観測がいつ実現されるかはわからない。そこで、個別の超新星爆発からのニュートリノでなく、過去の超新星爆発で放出されたニュートリノを全て重ね合わせた超新星背景ニュートリノを考えるのは自然であろう。超新星背景ニュートリノを観測することができれば、そこから星形成史などの情報を得ることができると考えられている。

現在までのところ、13 MeV以上の超新星背景ニュートリノに関してはSK [24] が、8-13 MeVに関してはKamLANDが最も強い制限を与えている [25]。KamLANDの解析により、LS検出器の場合は大気ニュートリノ中性カレント相互作用が最大のバックグラウンドとなることが明らかになった。この反応で作られる中性子が陽子や炭素を反跳させ、最終的には中性子は陽子に捕獲されて2.2 MeVの γ 線を放出する。この反応は $\bar{\nu}_e$ の逆ベータ崩壊反応で作られる先発信号と後発信号の組み合わせと区別できない。この事実はJUNOでの超新星背景ニュートリノ探索に強い影響を与えた。現在のJUNOの戦略は、逆ベータ崩壊の先発信号である陽電子 (e^+) と大気ニュートリノ

バックグラウンドの反跳陽子 (p) をLSの応答性の違いから区別することである。現在の見積もりでは、信号の誤除去率50%で大気ニュートリノバックグラウンドを1%程度まで落とすことができる。その結果、モデルの違いはあるが10年で3-6 σ 程度の超新星背景ニュートリノ検出が期待されている [6]。

5. 地球ニュートリノ

地震、火山の噴火、山脈の形成、プレート運動などの地球活動は、地球内に蓄えられている熱エネルギーの消費によって引き起こされる。我々の一番身近な存在である地球であるが、熱源の種類・量や地殻・マントル・核内の分布はよくわかっていない。また、宇宙の塵から現在の地球がどのような歴史を辿って形成されてきたかを知る上でも地球の熱は重要な役割を果たす。全熱量の約半分を占めると考えられている放射性物質起源の熱量を知ることは地球科学分野でも重要な課題であるが、地球形成時と同時代の隕石の化学分析や地震学・地質学的方法といった間接的手法に頼らざるを得なかった。地球内部の放射性物質の崩壊によって発生する反ニュートリノである「地球ニュートリノ」の観測は、地球内部の放射性物質質量やその分布、地球活動に直結する地球内熱量を直接的に観測することにつながり、「ニュートリノ地球科学」という素粒子物理と地球科学の分野横断的研究に発展している。1960年代から観測が期待され、2005年にKamLANDが世界初の実験的観測を実現 [2] し、それ以降も世界最高感度で観測を続けている。

地球ニュートリノは主に ^{238}U 系列、 ^{232}Th 系列および ^{40}K を起源とする β 崩壊によって生成される (図5参照)。

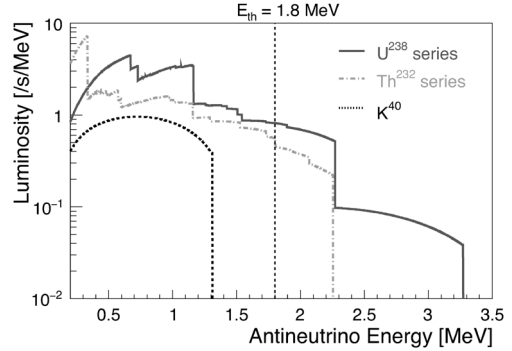
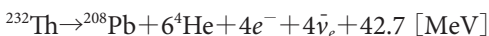
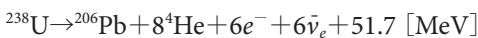
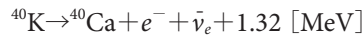


図5 地球ニュートリノのエネルギースペクトル。



LS検出器では逆 β 崩壊のエネルギー閾値である1.8 MeVを超えるエネルギーを持つ ^{238}U 系列 ($E_{\text{max}} = 3.3 \text{ MeV}$) と ^{232}Th 系列 ($E_{\text{max}} = 2.3 \text{ MeV}$) の一部を観測することができる。その観測数は放射性物質質量と崩壊による熱量に焼き直すことができる。

地球ニュートリノ観測はKamLANDのような大型LS検出器でも月に約1事象という少数統計観測であるため、バックグラウンドの正確な理解とその低減が重要課題である。原子炉由来反ニュートリノ (KamLANDの観測時間4,397日による2019年の予備結果 [26] : 629事象)、検出器内 ^{210}Po を起源とする (α, n) 反応 (212事象)、偶発事象 (122事象)、宇宙線ミューオンによる核破碎反応 (4.4事象)、高速中性子 (<4.1事象) といった事象がバックグラウンドとなる。地球ニュートリノのエネルギー領域をカバーし、約8.5 MeVまでの分布を持つ原子炉反ニュートリノは、地球ニュートリノ観測の最大のバックグラウンドであり、信号と同じ反ニュートリノであるので事象を分離することはできない。KamLANDでは、2011年の東日本大震災以降日本の原子炉が停止したことにより、最大時の約5%まで原子炉ニュートリノフラックスが減少し、観測精度の向上やより詳細なエネルギースペクトル測定が可能になった。

これまでに地球ニュートリノ観測を成し遂げた

のは、KamLANDとBorexinoの2実験のみである。両実験とも2019年に最新結果を発表しており、ここではそれらの結果を紹介し地球ニュートリノ観測による地球理解の現状を議論する。KamLANDでの観測は2011年以降の低原子炉運転期間のデータが全体の約40%を占め、地球ニュートリノ事象の観測精度が15.6%にまで向上したとともに、 ^{238}U と ^{232}Th の寄与の独立観測に成功した。これは、熱を放出する元素の現在のそれぞれの寄与を測ることで、地球のこれまでの放射化熱史を明らかにできることを示している。地表での熱流量は地殻熱流量の測定により $47 \pm 2 \text{ TW}$ [27]と求められているが、その内訳については長年議論が絶えず未解決の根本的な課題である。特に地球全体の体積の8割を占めるマントルの放射化熱は地球モデルによって約10倍もの開きがあり、どのモデルが現在の地球を説明するかの判定は地球ニュートリノ観測が唯一の手段と言っても過言ではない。図6に示すように、High-Qモデルと呼ばれる全放射化熱が約30 TWでマントル一層対流を支持するモデルを 2σ 以上で排除した。現在の結果は原始隕石の違いにより全放射化熱が10 TW (Low-Q)・20 TW (Middle-Q)のモデルと無矛盾であるが、観測精度の向上や地殻部分の放射性物質分布の高精度化・高信頼度化による判別精度の向上が期待

されている。Borexinoは観測終了までの3,263日のデータの解析結果を発表 [28] し、18.3%の精度での観測に成功している。さらに地球ニュートリノイベント数の観測結果からマントルのみの放射化熱が $24.6^{+10.4}_{-10.4} \text{ TW}$ という知見を示し、Low-Qモデルを 2.4σ で排除した。これら2つの実験のマントル放射化熱の観測結果は 1σ 以上の開きがある。約70%を占める地殻の寄与は地震学による地下構造の理解や捕獲岩微量化学分析による放射性物質分布量の推定といった地球科学的知見を用いた予測値を用い、地球ニュートリノ観測によって与えられる地球全体の寄与の観測値から差し引くことでマントルの寄与を求めている。地殻の予測値は地球科学分野で研究が行われているが、現在の地球ニュートリノ観測の誤差に比べてまだまだ不定性が大きい。実験値の矛盾が追い風となり、特に観測値近辺の地殻の寄与の予測値の見直しが進んでいる。2つの実験による観測は「ニュートリノ地球科学」によって地球科学的知見を得られるレベルに達しており、地球科学分野との分野横断的研究が進んでいる。

現在も世界最高感度で観測を進めているKamLANDに加え、SNO+, JUNO, Jinpingといった実験の建設・計画が進んでいる。多地点観測により、観測値＝地殻＋マントル ($y=x+\text{constant}$) という関係を使えば、地殻の寄与 (x) を各地点で正確に求めることができれば、マントルは一様という仮定のもとでグローバル観測が可能になる。このアイデアの先にはマントルの寄与の直接観測という“夢”がある。その実現に向けて、地殻がより薄く単純な海洋での観測を行うという「海洋底ニュートリノ検出器」という計画が、海洋実験や海洋工学を牽引する海洋研究機構と東北大学の協力体制のもとで進められている。約1.5 ktonの検出器で3年の観測でマントル地球ニュートリノ観測を約25%の誤差で行うことができる試算で、地球科学の根幹を成す仮定の真偽を観測によって決定する大きなブレークスルーとなる。さらに

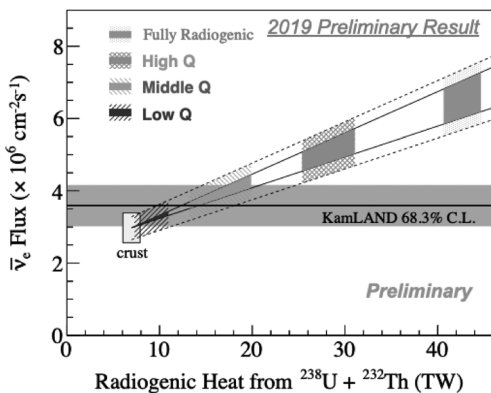


図6 KamLAND観測結果（灰色バンド）と各地球モデルの予測との比較（2019年予備結果）。

は、到来方向観測可能な ${}^6\text{Li}$ 含有LSと高位置分解能を実現するイメージング検出器の開発といった、新たな観測技術を有する次世代検出器へ向けた研究も進んでいる。日本発の分野横断的研究分野である「ニュートリノ地球科学」は、現在まで世界に先駆けて成果を上げており、将来にわたって分野を牽引していく計画が進行中である。

6. その他の物理

LS検出器は、上記以外にも天文学に密接に関係する素粒子・宇宙に関する研究を進めている。例えば、KamLANDでは原子炉反ニュートリノの精密観測で振動パラメータに強い制限を与えている。JUNOでは高エネルギー分解能での原子炉反ニュートリノの精密観測でニュートリノの質量階層構造を決めることが期待されている。

原子炉反ニュートリノと太陽ニュートリノは互いに反粒子なだけで、同じ振動パラメータを持つと考えられている。しかし、KamLANDの原子炉反ニュートリノの結果とSKの ${}^8\text{B}\nu$ の結果を合わせた振動パラメータとSKの ${}^8\text{B}\nu$ 解析だけで求めた振動パラメータに 1σ を超える矛盾がある。これを ${}^8\text{B}\nu$ のフラックスに焼き直したのが図3でのSK ${}^8\text{B}$ (solar $\nu_e + \text{KL } \bar{\nu}_e$) とSK ${}^8\text{B}$ (solar ν_e) である。この違いはニュートリノの非標準相互作用を示唆しているのかもしれない。さらなる精密観測が期待されている。

現在、KamLANDでは ${}^{136}\text{Xe}$ のニュートリノを放出しない2重 β 崩壊の検出で、ニュートリノのマヨラナ性を検証する実験を進めている (KamLAND-Zen 実験)。ニュートリノのマヨラナ性が明らかになれば、重い右巻きニュートリノの存在を示唆することになり、レプトジェネシスで現在の宇宙には反物質がほとんど存在しないという事実を自然に説明できる可能性がある。また、シーソー機構を通じてニュートリノが他の素粒子と比べて非常に軽い事実を説明できる可能性がある。

2011年にKamLAND内部に直径3.08 mの薄い

ナイロン製のバルーンを導入して、その内部に約400 kgの濃縮Xeを溶かし込んだ液体シンチレータを入れた。2015年までデータ取得を継続し、2016年に最終結果を公表している。残念ながら、ニュートリノを放出しない2重 β 崩壊は検出できなかったが、半減期に対して 1.07×10^{26} 年以上という制限、ニュートリノ有効質量に対して61–165 meVという制限を与えた [29]。この結果は、他実験で得られた制限を圧倒的に凌駕するものである。さらに、2018年に直径約3.84 mに大型化したバルーン (図1) を導入し、2019年からXeを約750 kg使った新しいフェーズを開始している。SNO+でも ${}^{130}\text{Te}$ を使った実験がもうすぐ動き出す予定である。

また、LS検出器は宇宙暗黒物質探索にもユニークな働きを持つ。通常の探索実験では10–1000 GeV程度の質量を持つ暗黒物質と原子核や電子との散乱を考えて、原子核や電子の反跳エネルギーを光や熱といった形で読み出している。ここでは、宇宙線で加速された軽い暗黒物質とLS中の陽子の散乱を考えるのである。そうすることにより、KamLANDのデータから 10^{-6} – 10^{-1} GeVの広い範囲で $2\text{--}6 \times 10^{31} \text{ cm}^2$ という反応断面積の制限が得られている [30]。この結果は、わずか128 kton-dayの ${}^8\text{B}\nu$ 観測の結果 [31] から導かれたものである。KamLANDでは、1桁以上の統計の増加と新規に開発されたバックグラウンド除去方法によるアップデートの結果を公表するべく解析を進めている。

7. まとめ

これまで述べてきたように、LS検出器は天文学・地球科学の分野においてユニークな役割を果たしてきた。2020年代は、KamLANDに加えてSNO+とJUNOが動き出し世界的には3台の検出器が稼働する。太陽ニュートリノの精密観測、超新星背景ニュートリノの高感度探索や地球ニュートリノの多地点観測などによる興味深い結果が続々と出てくることを期待していただきたい。

参考文献

- [1] Eguchi, K., et al., 2003, Phys. Rev. Lett., 90, 021802
 [2] Araki, T., et al., 2005, Nature, 436, 499
 [3] Gando, A., et al., 2011, Phys. Rev. D, 83, 052002
 [4] Gando, A., et al., 2015, Phys. Rev. C, 92, 055808
 [5] Asakura, K., et al., 2016, ApJ, 818, 91
 [6] An, F., et al., 2016, J. Phys. G43, 030401
 [7] Beacom, J. F., et al., 2017, Chin. Phys. C41, 023002
 [8] Ohlsson, T., 2013, Rept. Prog. Phys. 76, 044201
 [9] Miranda, O. G., & Nunokawa, H., 2015, New J. Phys. 17, 095002
 [10] Vinyoles, N., et al., 2018, J. Phys. Conf. Ser. 1056, 012058
 [11] Keefer, G., et al., 2015, Nucl. Instrum. Meth. A, 769, 79
 [12] Agostini, M., et al., 2018, Nature, 562, 505
 [13] Agostini, M., et al., 2019, Phys. Rev. D, 100, 082004
 [14] Agostini, M., et al., 2020a, Phys. Rev. D, 101, 062001
 [15] Agostini, M., et al., 2020b, arXiv:2006.15115
 [16] Beacom, J. F., et al., 2002, Phys. Rev. D, 66, 033001
 [17] Li, Hui-Ling, et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 123009
 [18] Odrzywolek, A., et al., 2004, Astropart. Phys. 21, 303
 [19] Nakazato, K., et al., 2013, ApJS, 205, 2
 [20] Kato, C., et al., 2017, ApJ, 848, 48
 [21] 加藤ちなみ, 2020, 天文月報, 1, 14
 [22] Kato, C., et al., 2020, Ann. Rev. Nucl. Sci (in press), arXiv:2006.02519
 [23] Li, Hui-Ling, et al., 2020, JCAP, 05, 049
 [24] Zhang, H., et al., 2015, Astropart. Phys. 60, 41
 [25] Gando, A., et al., 2012, ApJ, 745, 193
 [26] Watanabe, H., 2019, Neutrino Geoscience 2019
 [27] Davies, H. J., & Davies, D. R., 2010, Solid Earth, 1, 5
 [28] Agostini, M., et al., 2020, Phys. Rev. D, 101, 012009
 [29] Gando, A., et al., 2016, Phys. Rev. Lett., 117, 082503
 [30] Cappiello, C., & Beacom, J. F., 2019, Phys. Rev. D100,

103011

- [31] Abe, S., et al., 2011, Phys. Rev. C, 84, 035804

Neutrino Astrophysics and Geophysics with Liquid Scintillator Detectors

Koji ISHIDOSHIRO¹, Hiroko WATANABE², Yasuhiro TAKEMOTO³

^{1, 2} *Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza Aoba, Aobaku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan*

³ *Kamioka Observatory, the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), The University of Tokyo, 456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida, Gifu 506-1205, Japan*

Abstract: Liquid scintillator neutrino detectors such as KamLAND and Borexino have an important and unique role not only in particle physics experiments but also in astronomy and geoscience, e.g., the discovery of reactor neutrino disappearance, precision measurement of neutrino oscillation, observation of geo-neutrinos, measurement of low-energy solar neutrinos, and the launch of a pre-supernova neutrino monitor. In the 2020s, SNO+ in Canada and JUNO in China will start data taking. In addition, a 3 kton detector at the China Jinping underground lab and an ocean bottom detector are discussed. They will realize precision measurement of low-energy solar neutrinos to test solar models, detection of supernova relic neutrinos, and multi-site measurements of geo-neutrinos.