

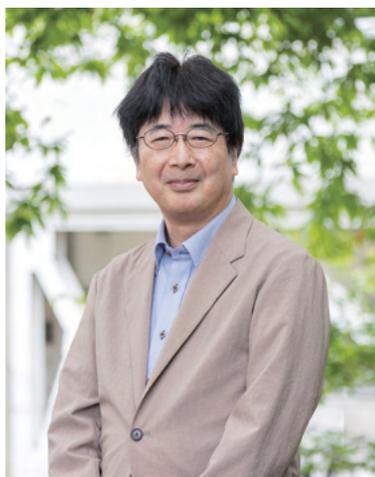
東北大学

ニュートリノ科学研究センター

Research Center for Neutrino Science,
Tohoku University



ごあいさつ

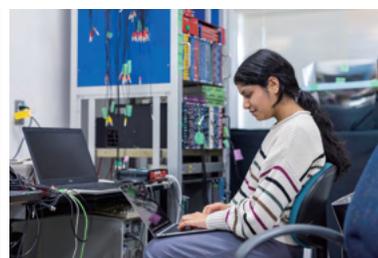
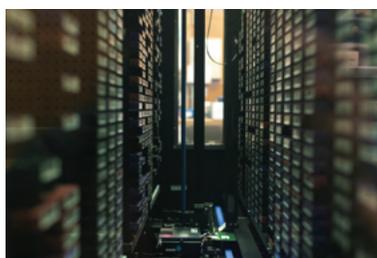


東北大学ニュートリノ科学研究センター
センター長 井上 邦雄

神岡鉱山内に設置したカムランドでは、原子炉ニュートリノ振動研究や地球ニュートリノ観測などで多くの成果を創出しました。カムランドの特徴は、大光量と極低放射能です。それらを活用したニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の研究でも世界をリードしており、さらに大光量化する高性能化計画を進めています。この研究は、素粒子研究手法の新しい潮流となる極稀現象フロンティア開拓にも繋がりました。2024年には、コミュニティと連携した持続的発展のため、極稀現象研究技術開発部を新設し、大阪大学核物理研究センターと連携して神岡極稀現象研究拠点を発足しました。今後も長きに亘り、素粒子研究全般そして物理学の進展に寄与していきます。

東北大学ニュートリノ科学研究センター 沿革

- 1971年 東北大学大学院理学研究科附属泡箱写真解析施設が設置される
- 1998年 東北大学大学院理学研究科附属ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換
カムランドの建設が始まる
- 2002年 カムランド実験が開始する
原子炉ニュートリノ振動の結果を発表する
- 2005年 世界初の地球ニュートリノ検出を発表する
- 2009年 東北大学ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換
- 2010年 ダブルショー実験主検出器が完成する
- 2011年 カムランド禅 400 実験が開始する
ダブルショー実験が最初の結果を発表する
- 2012年 二重ベータ崩壊に関する最初の結果を発表する
- 2014年 太陽⁷Beニュートリノに関する最初の結果を発表する
- 2015年 カムランド禅 400 実験が終了する
- 2019年 カムランド禅 800 実験が開始する
- 2022年 カムランド禅 800 実験の最初の結果を発表する
- 2024年 カムランド禅 800 実験終了（1月）
カムランド実験完了（8月）
神岡極稀現象研究拠点 (Kamioka Extremely Rare-phenomena and NEutrino-research Laboratory, 通称 KERNEL: カーネル) の立ち上げ
- 2028年 カムランド 2 実験開始予定



東北大学ニュートリノ科学研究センター

東北大学ニュートリノ科学研究センターは、低エネルギーニュートリノ・反ニュートリノの観測および極低放射能環境における実験的研究を通じ、素粒子・原子核物理学、宇宙物理学および地球物理学の謎等の解明を目指すニュートリノ科学研究を推進しています。また、マントル地球ニュートリノ検出や暗黒物質検出を目指した新しい実験プロジェクトの立ち上げも進めています。



茂住実験室

富山と岐阜の県境、神岡鉱山の坑口近く、山深い静かな場所に位置する茂住実験室は、地下で行われる世界最先端の素粒子実験を支える拠点です。一見すると普通の一軒家のようにも見えますが、カムランドや神岡極稀現象研究拠点などの実験現場に最も近い場所にある、まさに研究の最前線です。

現在、実験の運営やアップグレード、装置開発のために約10名の研究者が常駐し、国内外から研究者や学生が頻繁に訪れています。

実験室内には研究室やオフィスのほか、日本有数の高速ネットワークを備えた計算機室や3交代シフトに対応した宿舎も整備されています。飛騨市や地域住民の皆様の多大なご協力に感謝いたします。

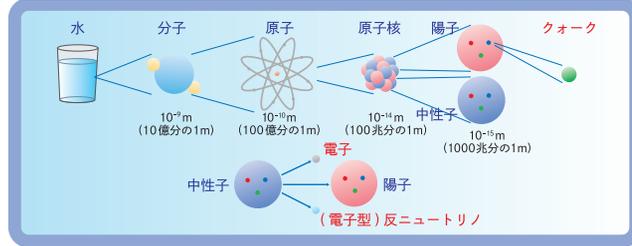


左) 茂住実験室外観
右) 茂住実験室 2025 年メンバー



ニュートリノ

ニュートリノは、物質を構成する最小の粒子である素粒子の1つです。宇宙で光の次に多く飛び交っているありふれた粒子ですが、物質と反応しにくく10兆kmの厚みの鉛も通り抜けるため、検出はとて難しく、最近まで質量があるのかさえ不明でした。このニュートリノの質量の値や、未知の性質を探る実験が世界各地で行われています。東北大学ニュートリノ科学研究センターでは、カムランドを用いてニュートリノの研究を推進しています。



物質を構成する素粒子

	第一世代	第二世代	第三世代	電荷
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	2/3
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	-1/3
レプトン	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	-1
	ν _e 電子ニュートリノ	ν _μ ミューニュートリノ	ν _τ タウニュートリノ	0

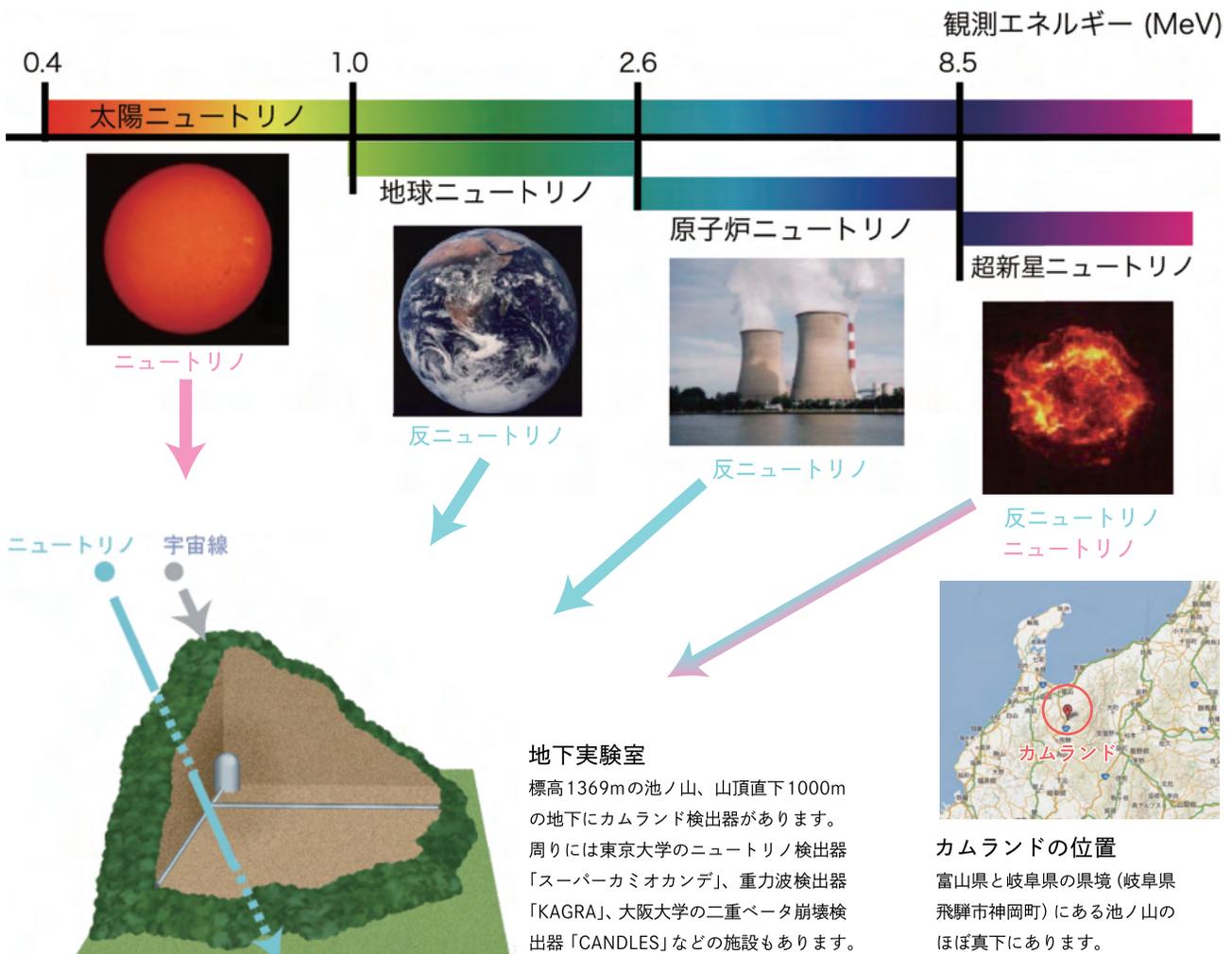
素粒子の一覧

カムランド

カムランド (KamLAND : Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector、神岡液体シンチレータ反ニュートリノ検出器) は、岐阜県飛騨市神岡町にある神岡鉱山の地下実験室、岐阜県と富山県の県境にある「池ノ山」の山頂直下1000mに設置され

ています。観測されるニュートリノには、太陽内の核融合反応で生成される太陽ニュートリノ、地球内部の放射性物質から発せられる地球ニュートリノ、原子力発電所で生成される原子炉ニュートリノなどがあります。ニュートリノは透過力が高く、地中深くにあ

るカムランドにも届きます。一方で、観測の妨げとなる宇宙線は山で遮られるため、地上と比べて約10万分の1まで低減されます。



地下実験室
標高1369mの池ノ山、山頂直下1000mの地下にカムランド検出器があります。周りには東京大学のニュートリノ検出器「スーパーカミオカンデ」、重力波検出器「KAGRA」、大阪大学の二重ベータ崩壊検出器「CANDLES」などの施設もあります。

カムランドの位置
富山県と岐阜県の県境(岐阜県飛騨市神岡町)にある池ノ山のほぼ真下にあります。

カムランドと坑内のカムランドエリア

カムランド検出器は神岡鉱山の跡津坑の坑口から2 kmほどの所にあり、そこはかつて小柴昌俊先生率いる東京大学のカミオカンデ実験チームが活躍し、超新星爆発ニュートリノの検出に始まるニュートリノ天文学が創始された場所です。

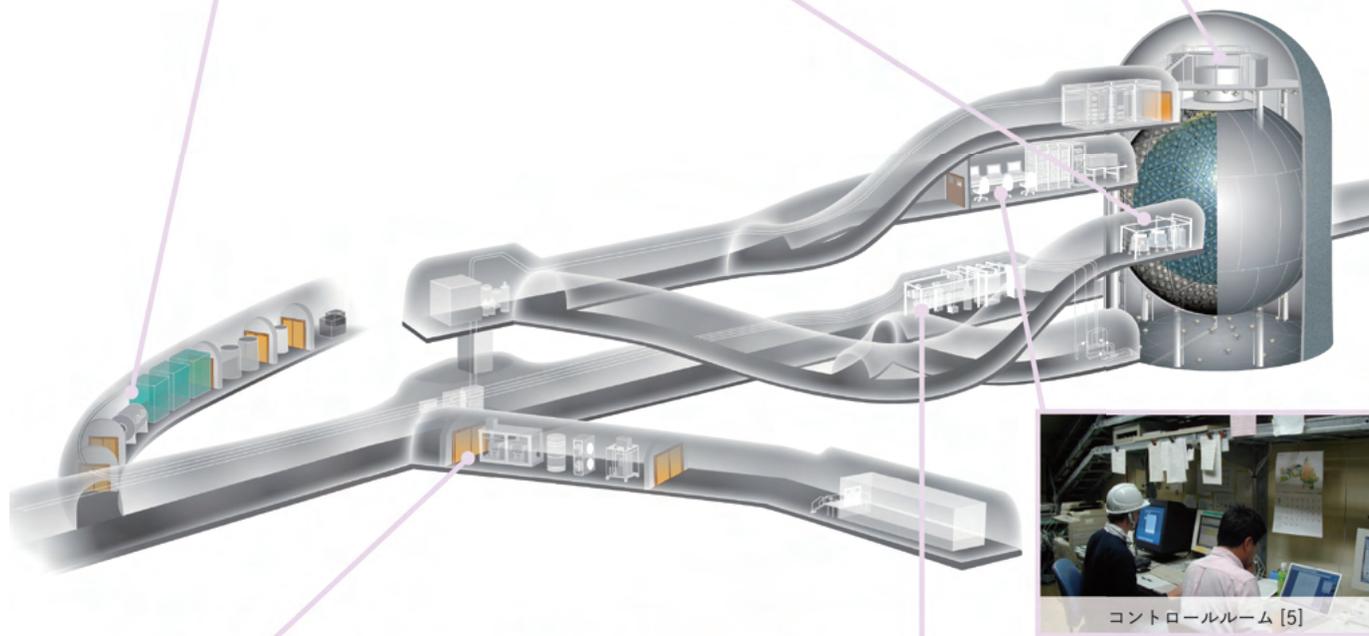
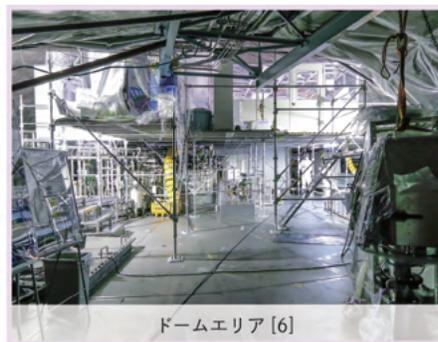
カムランドエリアに入ると、すぐ左側に蒸留法を用いた液体シンチレータの純化装置設備 [1] があります。右側にあるのは極低放射能技術を駆使したスーパークリーンルームと超純水・超純空気の製造装置を有した神岡極稀現

象研究拠点の実験室 [2] です。検出器に向かう坑道をそのまま進むと、検出器の外側に純水を供給する純水装置 [3] があります。検出器内部の実物大型模型を横目に検出器上部に向かう坑道を上ると、キセノン取扱い設備が設置してある部屋 [4] があります。さらに実験コントロールルーム [5] を経て、各種モニターや光電子増倍管の電源があるクリーンルームに到着します。検出器の最上部のドームエリア [6] には、検出器の内部にアクセスするための装置や測定用の電子回路システ

ム、作業用クリーンルームが設置されています。

カムランドは1998年に建設が始まり、2001年11月に完成し、宇宙線の信号を捉えました。以後、2度の液体シンチレータ純化作業を挟みながら、365日24時間体制で国際共同実験チームによるニュートリノの観測が2024年8月まで行われていました。

2011年からはカムランド実験に加え、カムランド禅実験も並行して行われ、汎用性の高い実験装置として世界最先端の研究を行っています。

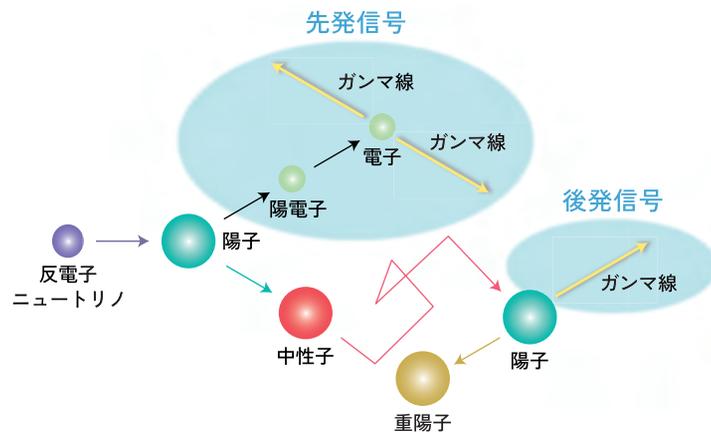
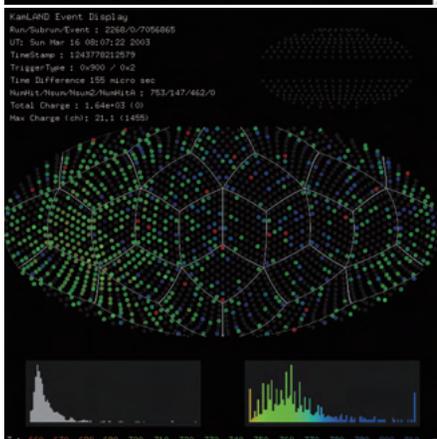
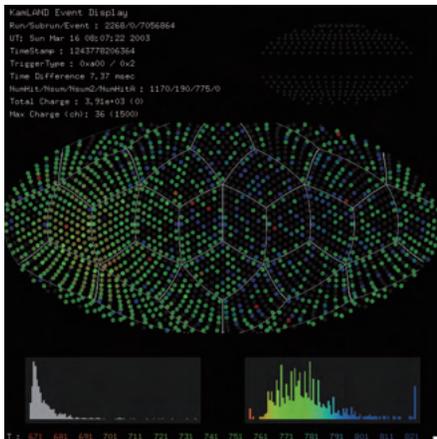
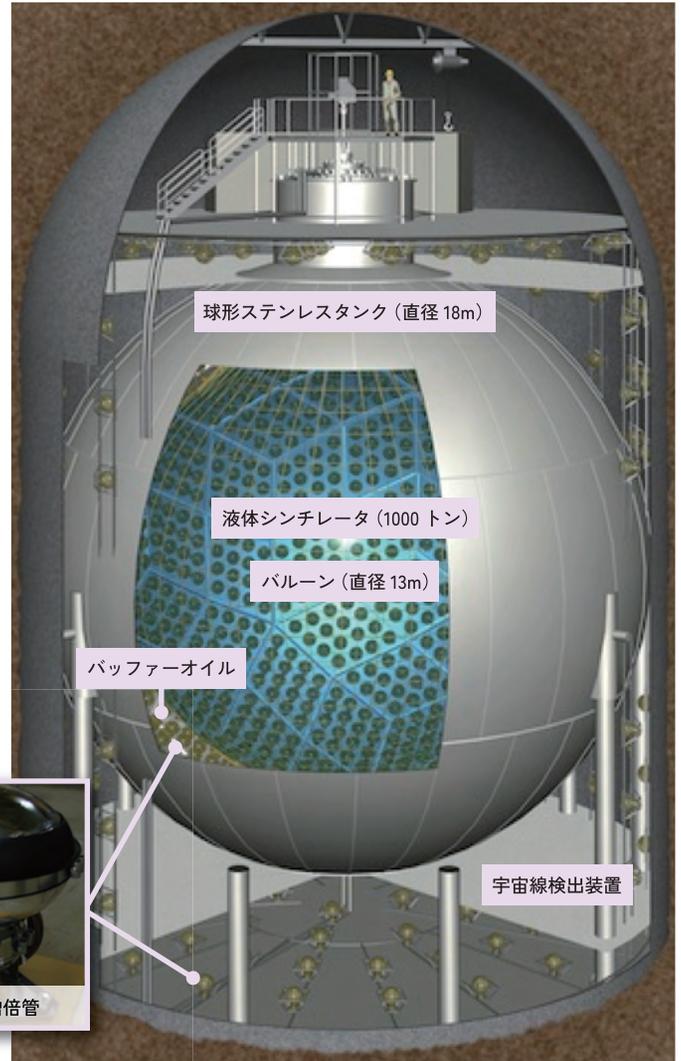


カムランドでニュートリノを検出する

カムランドでは、ベータ線、ガンマ線、アルファ線などの放射線が液体シンチレータ中で発生させる光を光センサー(光電子増倍管)で検出することで、その位置やエネルギーを特定しています。例えば、反電子ニュートリノがくと陽子と反応して、陽電子と中性子が発生します。陽電子は電子と反応して、2本のガンマ線を放出します(先発信号)。中性子は約200マイクロ秒後に別の陽子と結合し、ガンマ線を出します(後発信号)。これらの時間と位置相関を使い、反電子ニュートリノを特定することができます。

カムランドの概略

ステンレスタンクの表面に、光の最小単位である1光子を検出できる直径50cmの光電子増倍管が1879本取り付けられています。その内部にはバッファオイルがあり、透明なナイロン製フィルムで作られたバルーンが吊るされています。発光性の油である液体シンチレータはバルーン内部に満たされており、ニュートリノ反応が起きたときに発光します。この発光量は水を使用した場合に比べて100倍も大きいため、より低いエネルギーを観測できるというメリットがあります。



先発信号・後発信号、ともに液体シンチレータ中で発生した陽電子やガンマ線が発光を引き起こします。

カムランドでの反ニュートリノ反応のイベントディスプレイ (上図：先発信号、下図：後発信号)

1つの点は光電子増倍管1つに対応し、色が付いている点は検出したことを示しています。

研究成果

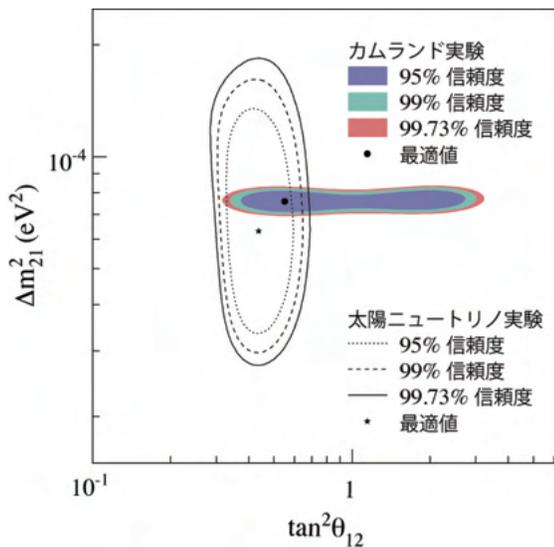
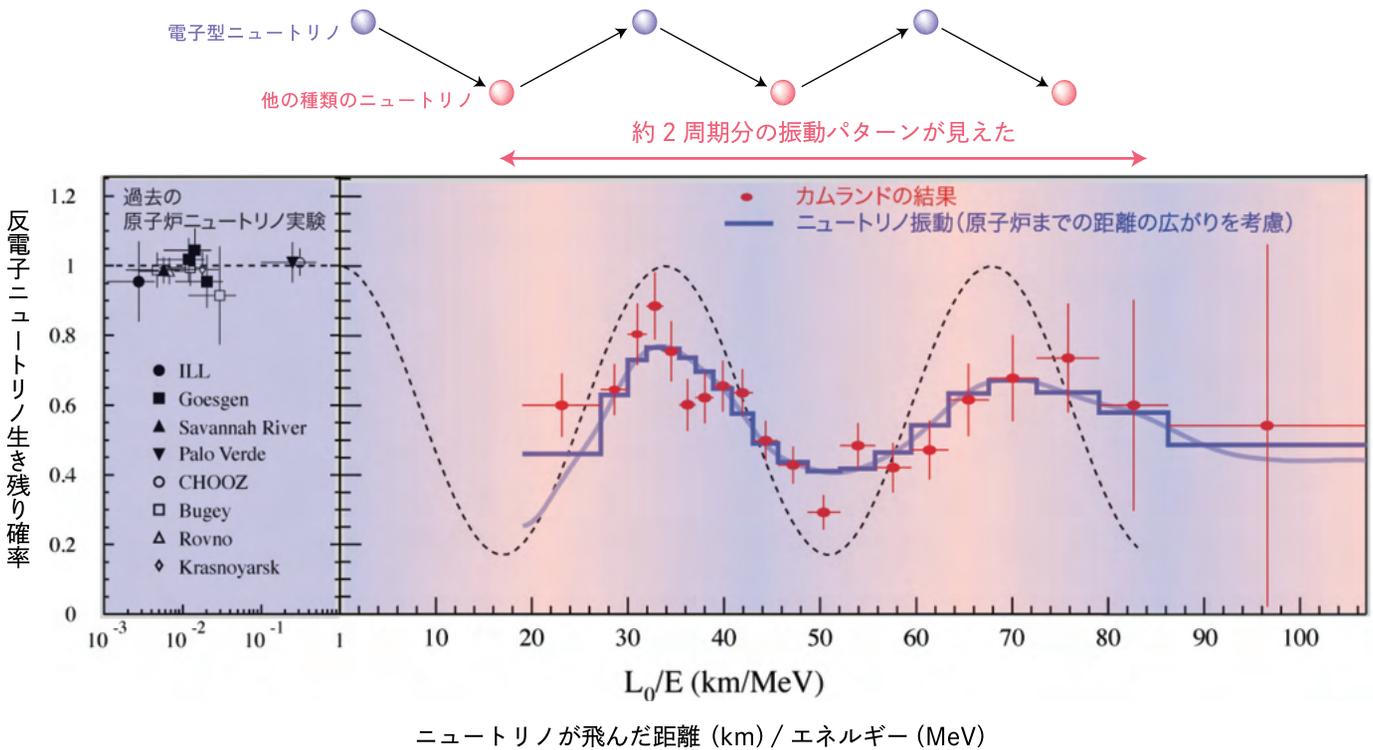
原子炉反ニュートリノを用いたニュートリノ振動の研究

太陽は核融合反応によって輝き、同時にニュートリノを発しています。しかし1970年代から観測されてきたこの太陽ニュートリノは、さまざまな検出器を用いても常に予測の半分程度しか検出されませんでした。そこで太陽モデルの問題、ニュートリノ自身の特徴により他の見えにくいニュートリノに変化したためという観点からこれ

までさまざまな研究が行われてきましたが、なかなか解決には至りませんでした。そこでカムランド実験はニュートリノ自身の特徴に着目し、素性のわかっている原子炉ニュートリノを用いて研究を行いました。カムランドの数年間におよぶ観測によって、原子炉で作られる反電子ニュートリノが他の観測できないニュートリノへ変化するこ

と、さらには、反電子ニュートリノへ戻ってくるニュートリノ振動の振動パターンが直接確認されました。それは、ニュートリノが有限の質量を持つことを示すとともに、太陽ニュートリノ問題の解決に決定打を与えるもので、世界中の研究者から注目を集めました。

カムランドで観測したニュートリノ振動パターン



ニュートリノ振動の変数の解析結果

横軸は振動の大きさ、縦軸は2つのニュートリノ質量の2乗差を表します。色の付いた領域はカムランド実験の結果から求められた、許される変数の範囲。黒の線は世界各地の太陽ニュートリノ実験の結果を合わせたものです。

原子炉ニュートリノと太陽ニュートリノでは、振動の仕方が誤差の範囲内で一致することがわかり、太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動によって引き起こされていたことがわかります。また、カムランド実験によって、質量の2乗差が2.7%という高い精度で決まりました。ニュートリノの振る舞いがより深く理解できるようになり、どの程度移動したら、どの程度他のニュートリノに変化するかが予測できるようになりました。この結果、ニュートリノを用いて、これまで調べることができなかったものを調査する方法が現実のものとなってきました。

地球ニュートリノの観測による地球内部熱量の解明

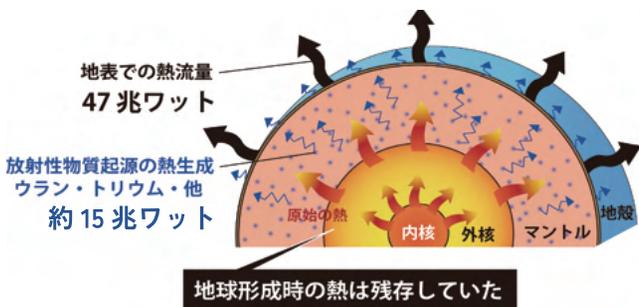
地球表面からの熱流量は47 TW (テラワット = 1兆ワット)と見積もられています。この地球内部に蓄えられている熱量は、地震や火山活動、地磁気の形成や維持、マントル対流やプレートテクトニクスといったさまざまな地球活動の源であり、地球を理解するには欠かせない最も基本的な物理量の1つです。熱源となるのは46億年前の地球形成時に蓄えられた「原始の熱」と地球内部にある放射性元素の崩壊による「放射化熱」であると考えられています。しかし、半径約6400kmのうち掘削の最深は12km

であることも示すように、地球深部を直接調べることは難しく、2つの熱源のバランスも良くわかっていませんでした。

地球内部の放射性物質の崩壊時には熱と同時にニュートリノも発生しています。地球ニュートリノと呼ばれるこのニュートリノの観測により、地上にいながらにして地球内部の放射性物質、さらには放射化熱量を観測することができます。

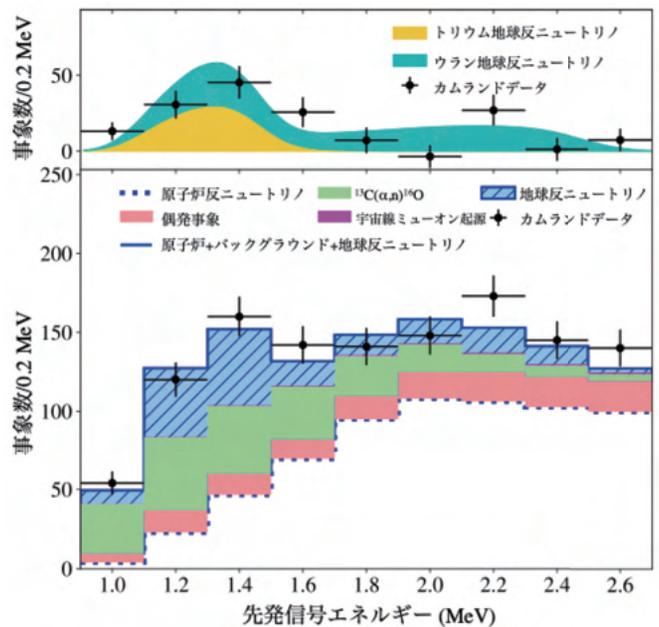
カムランドは2005年に世界初観測を成し遂げて以降、現在でも世界最高精度で観測を続けています。これま

での観測結果により、地球の熱流量の全てを放射化熱とするモデルは却下され、隕石の分析結果に基づいた地球進化モデルの推定値と一致することがわかりました。最近では観測精度の向上により、ウランとトリウム地球ニュートリノ源毎の分離測定も可能になってきました。カムランドの観測結果を地球内部の情報に焼き直すために必要な放射性物質分布モデルの研究も、分野を超えて地球科学分野の研究者とともに進められています。



カムランドで観測している地球ニュートリノの生成点分布

地球表面から平均40kmまでの地殻部分は検出器に近く放射性物質も多いため、約70%を占めます。残りはほぼマントル起源です。地球の中心の核は主に金属で、ウランとトリウムは存在していないと考えられています。この分布を解き明かす研究が地球科学分野の研究者と協力して行われています。



反ニュートリノのエネルギー分布

上図はカムランドでの全観測データからノイズ事象を差し引いた、地球ニュートリノ事象とデータから求められたウラン・トリウム起源の地球ニュートリノの寄与のエネルギー分布。下図はカムランドでの5227日間の観測時間の全データ(黒点)とノイズ事象の見積もり。

天体起源ニュートリノの研究

カムランドでは、スーパーカミオカンデでは検出できない ^7Be 太陽ニュートリノや低いエネルギーの ^8B 太陽ニュートリノを観測し、太陽モデルの理解に貢献してきました。その他に太陽フレア、ガンマ線バースト、重力波などに付随するニュートリノ事象を探索し、フォローアップ観測を積極的に進めています。最近ではカムランドの20年近いデータを解析し、超

新星ニュートリノが見つからないことから、銀河系の星形成率は1年間で太陽質量の17.5倍より小さいという制限を与えました。通常天文観測では銀河系の反対側が見えないので、ニュートリノ観測だからこそ与えられる制限です。

宇宙誕生以降には多数の超新星爆発が起っています。距離が遠いため、1個1個の超新星爆発からのニュート

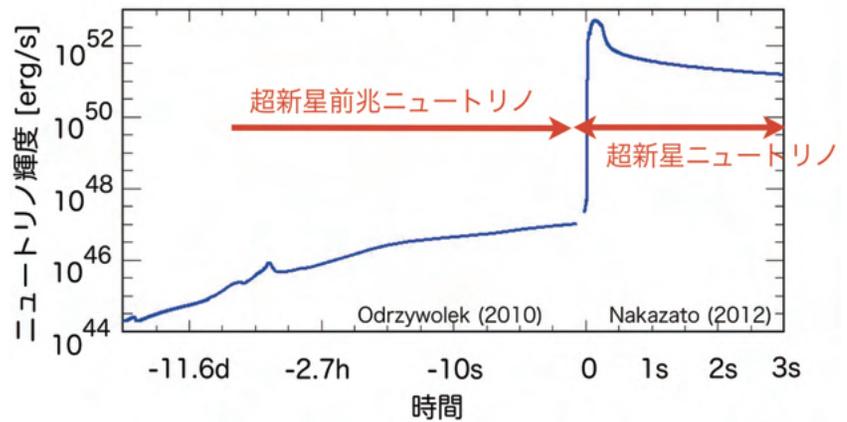
リノは検出できませんが、数が多いのでその重ね合わせ(超新星背景ニュートリノ)を検出できる可能性があります。カムランドでの探索は発見にいたりませんでした。15 MeV以下の超新星背景ニュートリノに関して、最も強い制限を与えることに成功しました。同時に、15 MeV以下の軽い暗黒物質の自己対消滅に関して、最も強い制限を与えています。

超新星爆発モニター



1987年に東京大学を中心とするカミオカンデ実験グループは、超新星爆発起源のニュートリノ検出に成功しました。最近の研究で、星は超新星爆発を起こす前の核燃焼段階でもニュートリノ（前兆ニュートリノ）を放出していることがわかってきました。ベテルギウスやアンタレスなどの近傍天体が超新星爆発を起こす時は、カムランドで前兆ニュートリノを検出することが

可能です。そのために、2015年以降に前兆ニュートリノのモニターシステムを開発してきました。2023年以降は、スーパーカミオカンデ実験のデータを合わせることで、より誤検出の少ない状態で前兆ニュートリノをモニターしていました。現在はカムランド改造のために停止中ですが、カムランドが再開する2027年度中にこのシステムも再開する予定です。



超新星爆発前と後に期待される反電子ニュートリノの光度

横軸の0sは爆発時刻を表し、爆発前是对数で、爆発後は線形で描かれていることに注意。



ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索

2011年からは、カムランド禅実験にて、ニュートリノが「マヨラナ粒子」と言われる特別な素粒子なのではないかと信じて検証をしています。

ニュートリノはマヨラナ粒子なの？

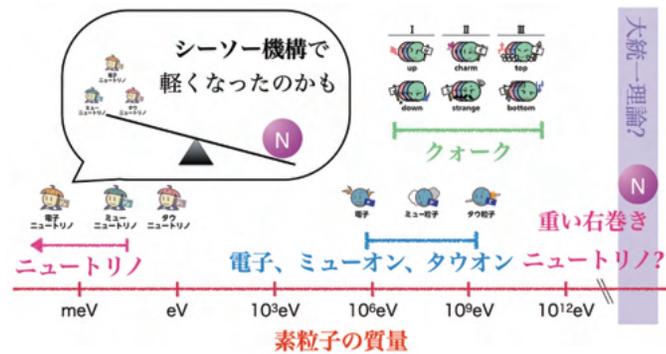
全ての粒子には、我々のよく知っている「粒子」に対応する「反粒子」があり、出会って対消滅してエネルギーに変わります。例えば電子(e⁻)には電荷が逆の陽電子(e⁺)があります。一方、質量のない光子は、粒子と反粒子の区別がなく、光子同士が会ってエネルギー

に変わります。では、質量を持つ粒子でも粒子と反粒子が区別できない「マヨラナ粒子」は存在するのでしょうか？その有力候補がニュートリノです。ニュートリノがマヨラナ粒子なら、素粒子論や宇宙論に大きな影響を与えると期待されています。



素粒子の質量階層構造

ニュートリノは他の素粒子（クォークや電子など）に比べて極端に軽く、その質量がなぜ小さいのかは未解決の謎です。ニュートリノがマヨラナ粒子なら、この謎を解くことができるかもしれません。これには、「重い右巻きニュートリノ」という未発見の粒子を導入します。「シーソー機構」と呼ばれる理論では、この非常に重い粒子が現れると、反動でニュートリノが軽くなる仕組みになっています。重い右巻きニュートリノの質量は、現在の標準理論を超えた「大統一理論」のエネルギー領域で予測されています。（右図）



素粒子の質量階層構造

ニュートリノの軽さの理由を「重い右巻きニュートリノ」と「シーソー機構」で説明できる可能性があります。

宇宙に物質が多い謎とニュートリノの秘密

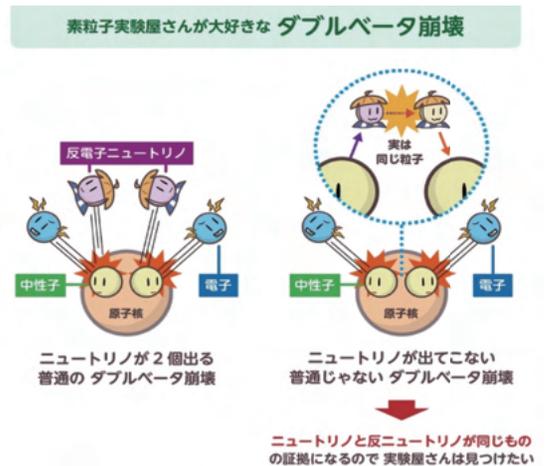
我々の宇宙は、すべて物質（粒子）からできています。実は、宇宙が生まれた直後には物質と反物質が同じだけ存在し、お互いにぶつかり合って消滅するはずでした。しかし、なぜか少しだけ物質のほうが多く残り、それが現在の宇宙を作っています。この謎の鍵を握っているのが、「ニュートリノ」という小さな粒子かもしれません。

ニュートリノが「マヨラナ粒子」という特別な粒子であると、宇宙初期に物質を少しだけ多く残すことが可能になります。この仕組みを「レプトジェネシス」と呼んでいますが、実際に正しいのかはまだわかっていません。もしこの理論が正しければ、ニュートリ

ノがマヨラナ粒子であることが証明される必要があります。

では、どうすればニュートリノがマヨラナ粒子かを確かめられるでしょうか？それには、ある原子核でとても珍しい現象を探します。それは、「ニュートリノを伴わない二重(ダブル)ベータ崩壊」と呼ばれ、原子核の中で同時に起きる二つの崩壊が、ニュートリノを放出しないで起こる現象です。もしこの現象が観測できれば、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが証明されます。

しかし、この現象はまだ見つかっておらず、世界中の研究者が探索を続けています。



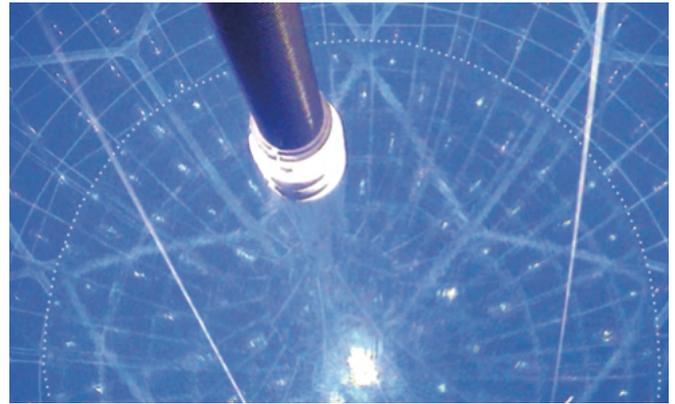
カムランド禅実験 (KamLAND - Zen)

「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」は極めて稀な現象です。この現象を見つけるには、多くの二重ベータ崩壊原子核を用意し、長期間安定して観測することが必要です。また、誤った信号を出す放射性物質がない、非常にクリーンな環境が欠かせません。

我々が行う「カムランド禅」実験は、これらの条件を満たす世界最高レベルの実験です (図1、図2)。

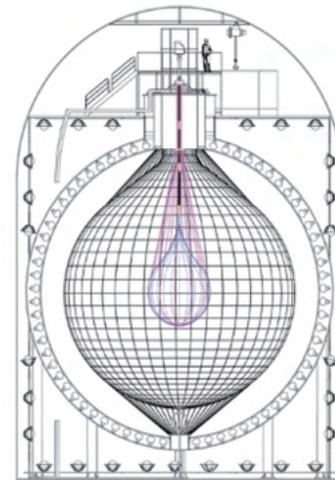
検出器中心に「ミニバルーン」という特別な容器を設置し、その中に二重ベータ崩壊を起こす原子核「キセノン 136」を溶かした液体シンチレータを満たしています。2011年にキセノン約400 kgを使った「禅400」を開始し、2019年から2024年には約800 kgに増やした「禅800」フェーズを行いました。

2022年に発表した最新の結果では、この現象の半減期が 2.3×10^{26} 年以上という世界最高の感度に到達しました。これは以前の禅400の結果よりも2倍以上高い感度です。また、この感度で初めて、ニュートリノの質量が「逆階層型」と呼ばれる理論の領域に達しました。まだ現象は見つかっていませんが、発見を目指して次の段階である「カムランド2禅」実験の準備を進めています。

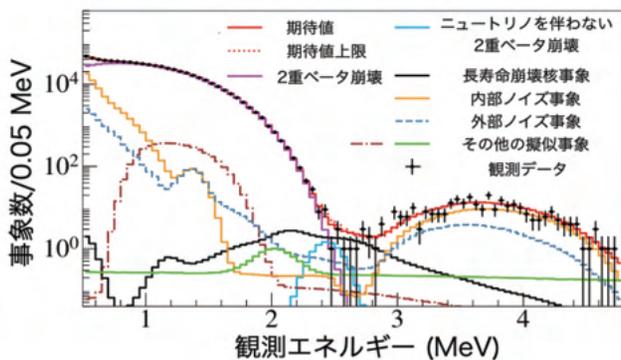


1. カムランド禅検出器の写真

白点線がミニバルーンのある位置。よく見るとキセノンによって屈折率が変わるせいで、点線部分で後ろのフレームなどが歪んで見えます。

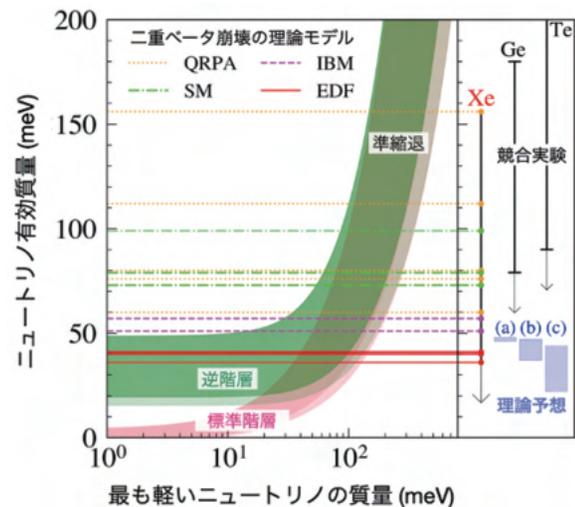


2. カムランド禅検出器の概略図



3. カムランド禅800フェーズのエネルギースペクトル

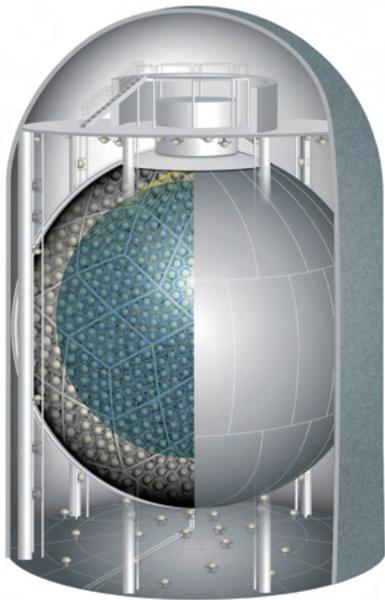
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊は、水色の線よりも少ないことを表しています。その観測エネルギーにあるノイズ事象の多くは、長寿命崩壊核事象と通常の二重ベータ崩壊でした。



4. カムランド禅800の結果からニュートリノ有効質量に対する制限

ニュートリノの質量の並び方には「準縮退型」「標準階層型」「逆階層型」の3つの可能性があります (上図参照)。ニュートリノがマヨラナ粒子なら、このどこかに答えがあります。カムランド禅実験は、世界で初めて「逆階層型」の領域に到達し、理論モデルによる予想と比較できるようになりました。図の色つき線は、実験結果による質量の上限値を示しており、それより上の領域は既に排除されています。

カムランド 2



カムランド 2



カムランド 2 プロトタイプ (集光ミラー付き高量子効率光センサー 14 個)

カムランドでは、高発光量の液体シンチレータを用いた高性能な検出器によって、これまでにさまざまな成果を挙げてきました。しかし、現在使用されている装置は 20 年以上前の技術で作られており、老朽化が進んでいます。そこで、装置の大規模な刷新・改良（カムランド 2）を行うことで、さらなる研究の飛躍が期待されています。たとえば、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の研究（カムランド 2 禅）では、大発見の可能性が大きく高まります。また、地球内部の熱量の解明に迫る地球ニュートリノ観測や、超新星爆発をはじめとする低エネルギーニュートリノ天文学のための性能向上も見込まれています。

カムランド禅では既に世界最高感度の二重ベータ崩壊実験を実現していますが、今後も競合実験をリードし続けるには検出器の高性能化が必要になります。現在のカムランド検出器では液体シンチレータで作られる光の検出効率が高くないため、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊でのエネルギー分解能は十分ではなく、このためエネルギーによって区別している通常の二重ベータ崩壊が最大のノイズ源となっています。そこで、カムランド 2 では検出できる光量を増加させるためより優れた発光特性の液体シンチレータ、

高量子効率光センサー、集光ミラーの導入を予定しています。これらの改良が実現すればエネルギー分解能は大きく改善し、目標としているバックグラウンド削減を達成できます。

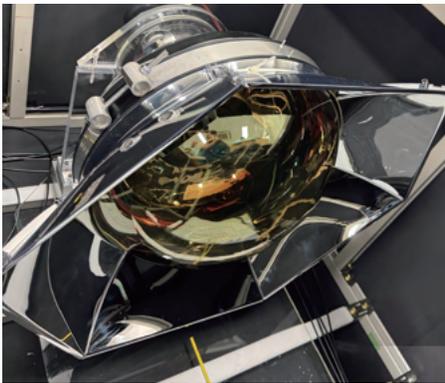
新しい検出器ではシンチレータが発した光をできるだけロスすることなく直径 50 cm の世界最大の受光面を持つ光センサーに集めるため、光をガイドする筒状ミラーの設置と光透過性能の高い高純度液体シンチレータの作成を行います。このような検出器の光量増加が実現すればエネルギー分解能は大きく改善し、目標としているノイズ削減を達成できます。光量増加はカムランド 2 プロトタイプ（右上図）によって実証され、基本的な技術開発は既に目標を達成しています。

2024 年 8 月にはカムランドでのデータ収集を停止し、続けて外水槽の光センサー取り外しと液体シンチレータの排出作業を行いました。2026 年から本格化する検出器再建に向けて、ステンスタンク内の乾燥、バルーン撤去、光センサー取り外しなどの解体作業を進めています。

また、ミニバルーンに含まれる微量な放射性不純物もノイズ事象を作るため、感度を制限する要因となっています。改良計画では発光性フィルムを使用したミニバルーンに置き換えること

で、ノイズ事象を同定して除去できません。1000 トン液体シンチレータを内包する大型バルーンも製作過程において放射性不純物が混入しないように工夫することで低放射能化を実現し、ニュートリノ観測における感度向上を目指します。さらに、宇宙線が検出器内で起こす反応によっても放射性崩壊するノイズ源が作られます。このようなノイズの識別には検出器の光量増加に加え、宇宙線による大信号直後の 1 光電子検出によって宇宙線由来の中性子に対する検出効率を高めることが重要であることがわかっています。改良計画では大光量化や高速化に対応した高性能電子回路を導入し、また光センサーの光子ヒット時間情報を入力とした機械学習（ニューラルネットワーク）による粒子識別技術の開発も進め、ノイズ事象の低減による感度向上を実現する予定です。この他にも、カムランド上部の導入口の汎用化、新しい較正装置導入システムと検出器上部の高集光性能の両立など、さまざまな開発が進められています。

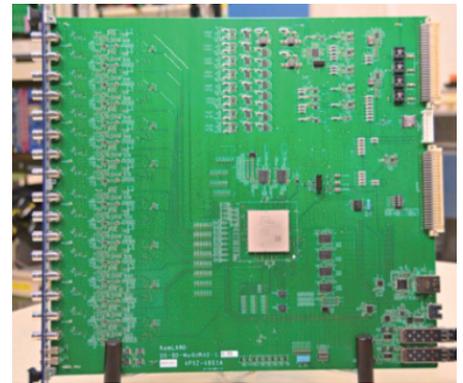
これらの改良による検出器の高性能化が実現すると、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊に対する感度は大きく向上し、逆階層構造のニュートリノ質量予測をカバーした探索によって大発見の可能性が大幅に高まります。



集光ミラー



発光性バルーン



高性能電子回路

神岡極稀現象研究拠点と極低放射能技術

カムランド2禅実験での探索感度を上げていくには検出器内外に含まれる極微量の放射性不純物をさらに減らす必要があります。そのための研究開発拠点として、地下実験サイトに神岡極稀現象研究拠点が整備されました。本拠点にはISO14644規格クラス1(半導体工場の約100倍の清浄度)を達成しているスーパークリーンルームがあり、カムランド2禅実験で用いるミニバルーンの製作などに用いられます。

不純物を徹底的に除去した超純水の製造装置や、空気中に含まれる放射性貴ガスであるラドンを除去した超純空気の製造装置も設置されており、これらの水や空気をスーパークリーンルームやカムランド検出器に供給することによってカムランド2禅検出器の極低放射能化を目指しています。

実験室には、検出器材料に含まれる極微量の放射性不純物量から放出されるガンマ線を分析することで、どれくらいの放射性不純物量が含まれているかを調べることができる世界トップレベルの極低放射能高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器も設置されます。このHPGe 検出器では、放射性不純物であるラジウム 226 を 10^{-17} g/g の精度で検出でき、より放射性不純物の少ない材料の選定を進めています。この実験室は、さらに高感度な放射性不純物量分析手法の開発や、新たな極稀事象探索のための技術開発のスペースとしても活用されます。



超純空気製造装置(中央に見える黒い筒のところまで)と超純水製造装置(奥)

ここで作られるクリーンな空気や水がカムランド検出器やスーパークリーンルームに供給されます。



ISO規格クラス1のスーパークリーンルームの内部写真

一般的な半導体工場の約100倍の清浄度を達成しており、チリやホコリの全くない環境で検出器作りが可能です。



世界トップレベルの極低放射能 HPGe 検出器(中央)

測定試料を載せるためのアクリル台があり、周りからくる環境放射線を遮るための高純度銅や低放射能鉛でできたシールドで囲われています。

現在進行中の研究

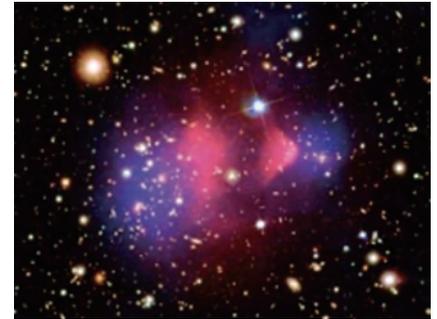
暗黒物質の探索

宇宙の暗黒物質

夜空には、数多くの星や銀河が輝いています。これらは、我々がよく知っている「物質」から構成されていますが、これら物質は宇宙の全エネルギーの5%程度に過ぎないことがわかってきました。宇宙には、宇宙を万有引力で支配する「暗黒物質」(約27%)と、宇宙空間を駆けよとする「暗黒エネルギー」(約68%)が存在しています。

暗黒物質と暗黒エネルギー、どちらもその正体を解き明かすことが必要で

す。暗黒物質については、未知の素粒子だと考えられているため、実験的に直接にその素粒子を検出しようとする試みが全世界で進んでいます。



2つの銀河が衝突したとき、重力レンズ効果から推定される「暗黒物質」が(青)とエックス線によって観測される「物質」(赤)と分かれていることがわかります。

暗黒物質アクシオン探索実験 EDAMAME

暗黒物質の候補は数多くありますが、有力な候補の1つがアクシオンです。アクシオンは、暗黒物質問題を解決するだけでなく、原子核を結合する力(強い相互作用)における深刻な問題も解決する、いわば「一石二鳥」の素粒子であるため、特に注目されています。

アクシオンは、強磁場中でその質量に対応したエネルギーの光子に転換する性質があります。暗黒物質アクシオンの質量は非常に軽いと考えられているため、暗黒物質探索では、数100メガヘルツから数100ギガヘルツの非常に微弱なマイクロ波の検出が必要です。ニュートリノ科学研究センターでは、この非常に微弱なマイクロ波を捉えるため、フォトニック結晶構造など物性物理学の研究成果を応用し、アクシオン探索のための共振空洞の開発・研究を行ってきました。

そして、2024年からアクシオン探索実験 EDAMAME(Explore the DARK-matter Mystery through Anomalous Microwave Emission)を開始しました。現在のEDAMAMEは、試料空間が直径110ミリ、長さ200ミリ、印加する磁場は9Tと、世界のライバルたちに比べると小規模の実験ですが、共振空洞の研究成果を活用し、これま

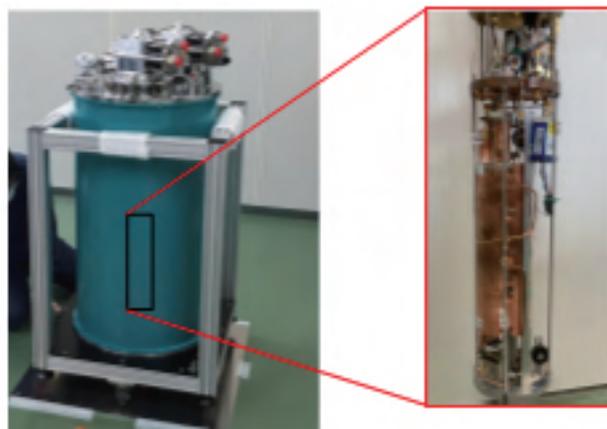
で未探索の高い周波数領域(7.5~8.0GHz)で、暗黒物質アクシオンの発見を目指します(EDAMAME Phase 1)。

この探索と並行して、EDAMAMEでは、さらなる高感度化を行っています。2024年度からは、東北大学工学部と共同で共振型KIPA(Kinetic Inductance Parametric Amplifier)の開発・研究に着手しました。KIPAは、超伝導素子でありながら強磁場環境にも強いという特長があり、強磁場と極低雑音の両立が求められるアクシオン探索に最適な素子です。2025年からは、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの共同利用研究課題に採択され、同センター

の持つ大型で強力なマグネット(直径360ミリ、9.4T)を利用できるようになりました。2026年からは、このマグネットとKIPAの両方を導入して、より高感度な探索を行います(EDAMAME Phase 2)。

将来は、希釈冷凍機の導入による極低温化を行い、より大型で、より強力なマグネットを占有して長期間運転を実施することで、究極の感度を持った探索を計画しています(EDAMAME Phase 3)。

EDAMAMEでは、このように探索と開発・研究の両立しながら暗黒物質アクシオンの発見を目指しています。



EDAMAME Phase 1 実験装置

左が冷凍機とマグネット、右がその中に導入されるマイクロ波空洞などの装置。

神岡クライオラボ計画

東北大学ニュートリノ科学研究センター (RCNS) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の共同研究として、希釈冷凍機を神岡地下実験施設に設置しました(右図)。希釈冷凍機は、量子コンピュータや量子センサーなどに必要な 100 ミリケルビン (-273.05℃、-273.15℃の絶対零度から 0.1℃上。) 以下の極低温環境を作り出す装置です。RCNS が持つ極低放射能技術と KEK が持つ量子計測技術を組み合わせ、軽い暗黒物質や二重ベータ崩壊などの極めて稀な事象探索を推進していきます。



神岡地下実験室に設置した希釈冷凍機

2025 年度中にここで軽い暗黒物質探索を開始する予定です。

マントル地球ニュートリノ直接観測を目指した

海洋底ニュートリノ観測プロジェクト (OBD)

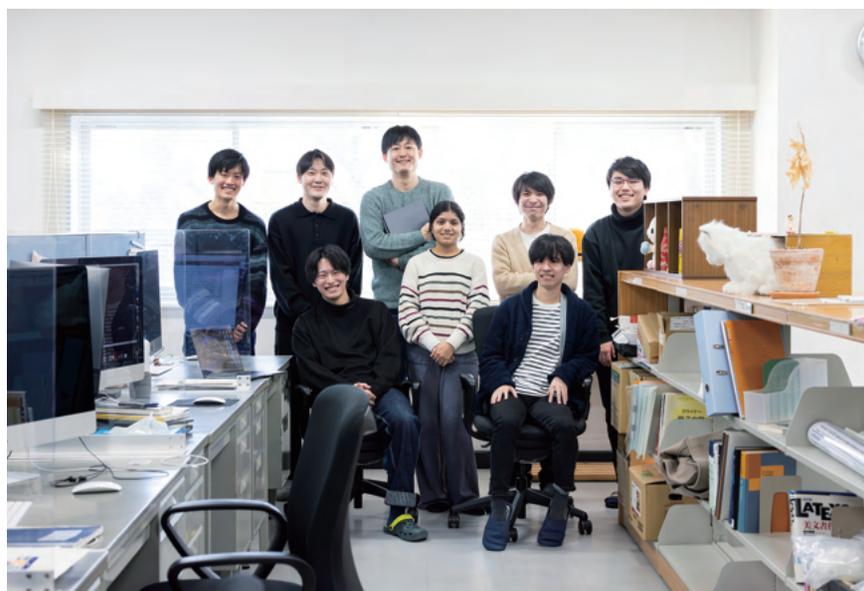
大陸上の検出器による地球ニュートリノ観測では地殻の寄与が約 70% を占めるため、より深く未解明の謎の多いマントルについて情報を得るのは困難です。そこで、地殻が薄く (大陸地殻の約 1/7) 構造が単純な海底に検出器を設置し、約 70% に及ぶマントルの寄与を直接観測する計画「OBD (Ocean Bottom Detector)」が発足しました。

宇宙線ミュオンによるノイズ事象を海水で遮断するために約 4 km の海底に検出器を設置する必要があり、低温 (2~5℃) で高圧 (40 MPa)、遮断された環境での電力供給・通信といった、現存する大陸上の検出器とは全く異なる環境で稼働する検出器の開発が進められています。これまでの素粒子物理と地球科学の研究者に加え、海洋工学や海洋底生物学といった、さらに分野の垣根を超えた研究者とともに、検出器の大型化に向けた分野形成や研究開発が進められています。

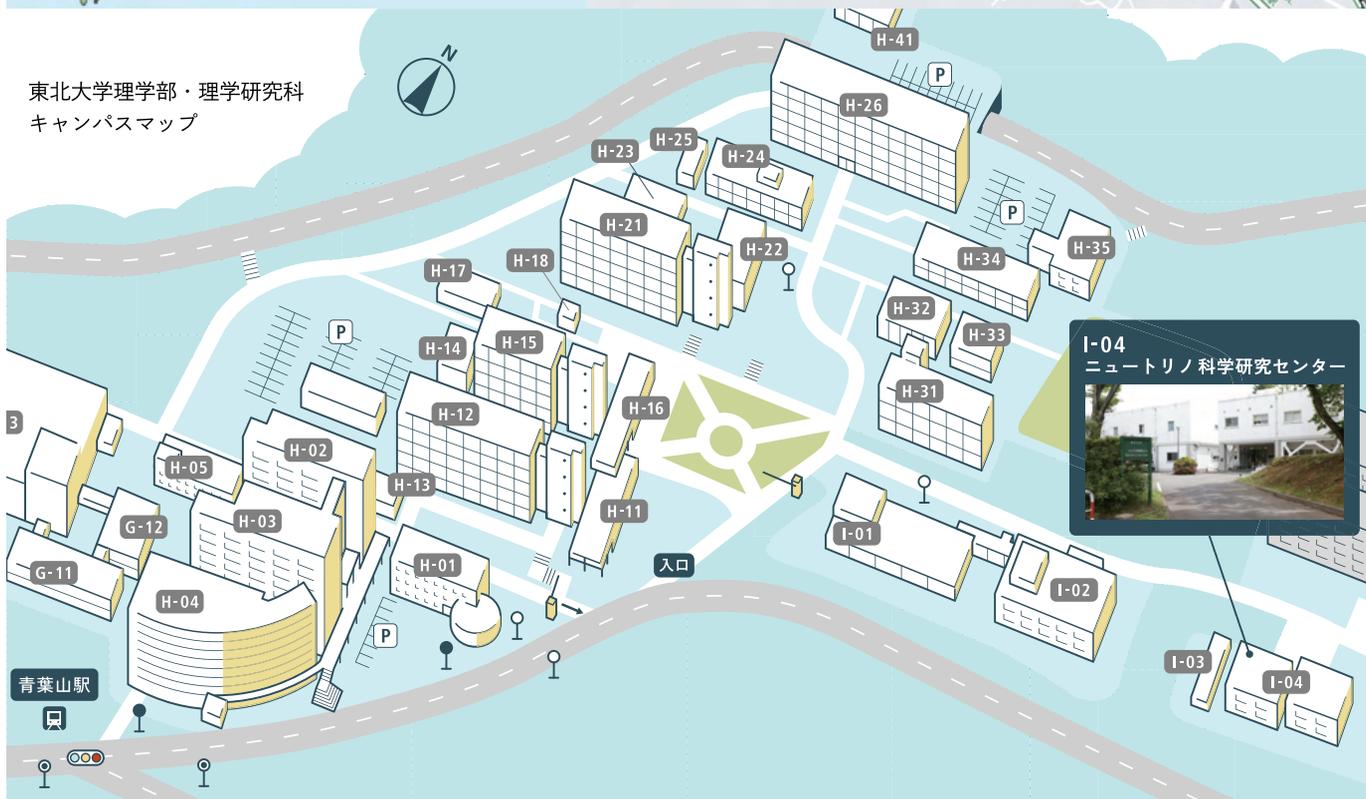
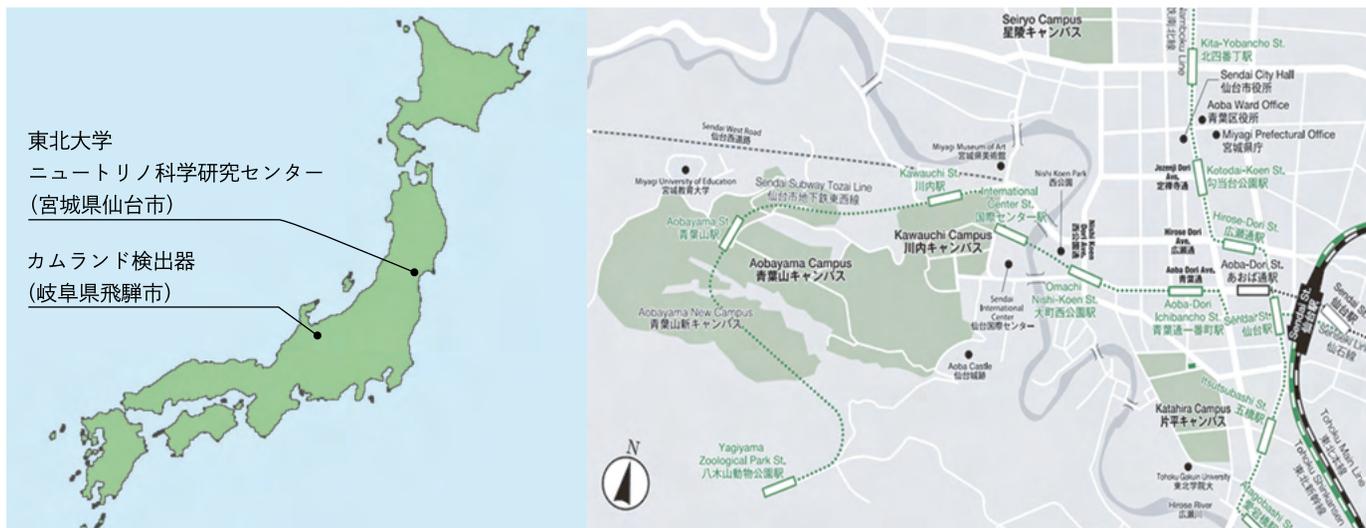


1.5 kt OBD 検出器のイメージ図

液体シンチレーター領域を囲む光電子増倍管には耐水圧シールドがつけられています。ノイズ源となる宇宙線ミュオンの同定には海水自体を用い、海水中の光電子増倍管で観測します。



アクセス



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番3号
TEL 022-795-6727 FAX 022-795-6728
URL www.awa.tohoku.ac.jp
E-mail office@awa.tohoku.ac.jp



茂住実験室

〒506-1205
岐阜県飛騨市神岡町東茂住上町408番地
TEL 0578-85-0030 FAX 0578-85-0031

交通のご案内

地下鉄東西線仙台駅より八木山動物公園行きにて9分、青葉山駅下車、北1出口から徒歩10分

一般公開のご案内

[ニュートリノ科学研究センター]
東北大学理学部のオープンキャンパス（7月頃開催）の際に、自由に見学することができます。

[カムランド実験エリア]
神岡鉱山の一般公開（ジオ・スペース・アドベンチャー、7月頃開催）の際にご覧いただけます。

東北大学理学部入試情報のご案内

東北大学理学部・理学研究科 HP から東北大学の入試情報にアクセスできます。
www.sci.tohoku.ac.jp

