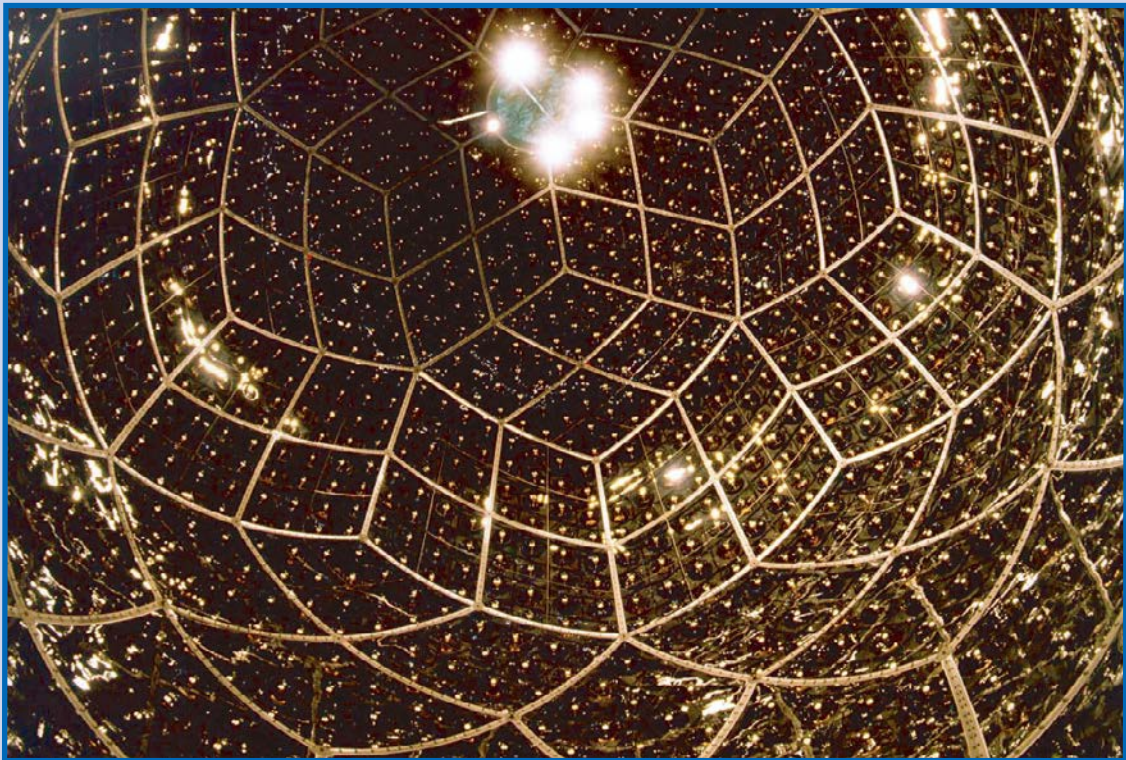




東北大学

ニュートリノ科学研究センター



Research Center for Neutrino Science  
Tohoku University



Double Chooz Japan



J-PARC Sterile Neutrino Search  
at J-PARC Spallation Neutron Source

# 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。

## 年表

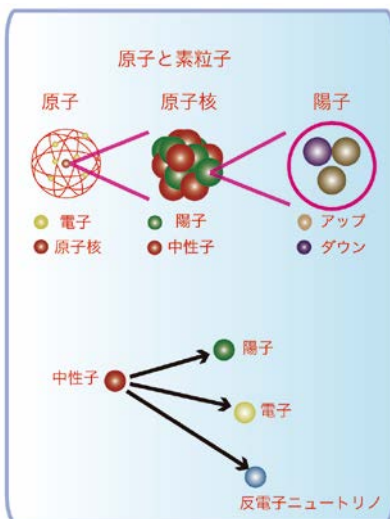
1971年	東北大学大学院理学研究科附属泡箱写真解析施設が設置される
1998年	東北大学大学院理学研究科附属ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換 カムランドの建設が始まる
2002年	カムランド実験が開始する 原子炉ニュートリノ振動の結果を発表する
2005年	世界初の地球ニュートリノ検出を発表する
2009年	東北大学ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換
2010年	ダブルショー実験主検出器が完成する
2011年	カムランド禅実験 400 が開始する ダブルショー実験が最初の結果を発表する
2012年	二重ベータ崩壊に関する最初の結果を発表する
2014年	太陽 <sup>7</sup> Beニュートリノに関する最初の結果を発表する
2015年	カムランド禅実験 400 が終了する
2019年	カムランド禅実験 800 が開始する
2022年	カムランド禅実験 800 の最初の結果を発表する



ニュートリノ科学研究センター

## 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一つです。ニュートリノは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、



物質を構成する素粒子

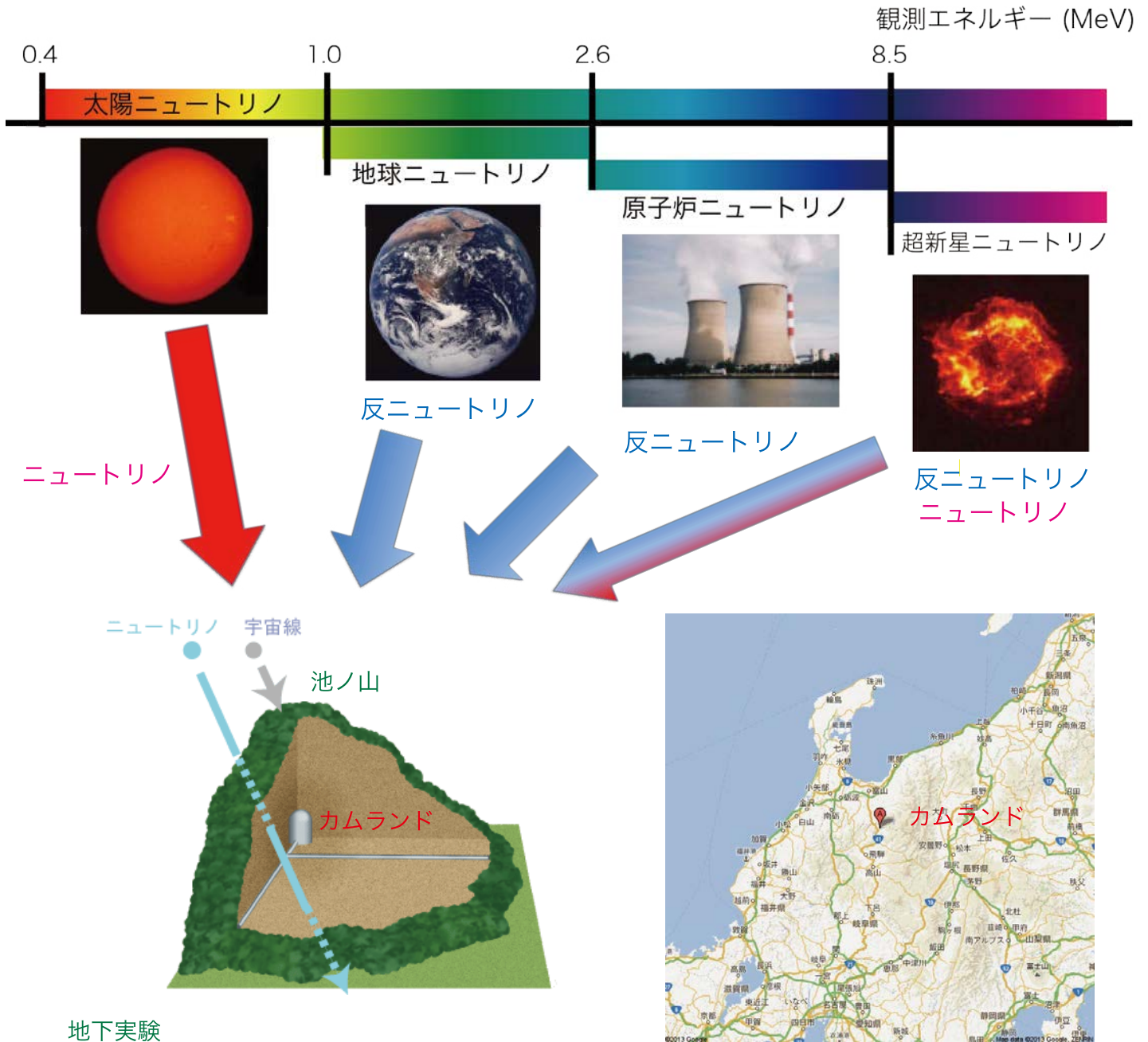
	第一世代	第二世代	第三世代	電荷
クォーク	$u$ アップ	$c$ チャーム	$t$ トップ	$2/3$
	$d$ ダウン	$s$ ストレンジ	$b$ ボトム	$-1/3$
レプトン	$e$ 電子	$\mu$ ミュー粒子	$\tau$ タウ粒子	$-1$
	$\nu_e$ ニュートリノ	$\nu_\mu$ ニュートリノ	$\nu_\tau$ ニュートリノ	$0$

素粒子の一覧

検出はとても難しく、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。また、フランスで行われているダブルショー実験の中心メンバーとしても活躍しています。

# 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ー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のカムランドまで届きますが、観測の邪魔となる宇宙線は山で遮られるため、地上の 10 万分の 1 程度まで低減されています。



## 地下実験

標高 1369m。山頂下 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 (岐阜県飛騨市神岡町)  
 富山県と岐阜県の県境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2kmほどの所にあり、そこはかつて小柴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、すぐ右側に純水で液体シンチレーターを洗う方法を用いる純化装置設備 [1]、左側に蒸留法を使った純化装置 [2] が設置されています。検出器に向かう坑道をそのまま進むと、検出器の外部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ー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続けられています。

2011年からはカムランド実験に加え、カムランド禅実験も平行して行われており、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。



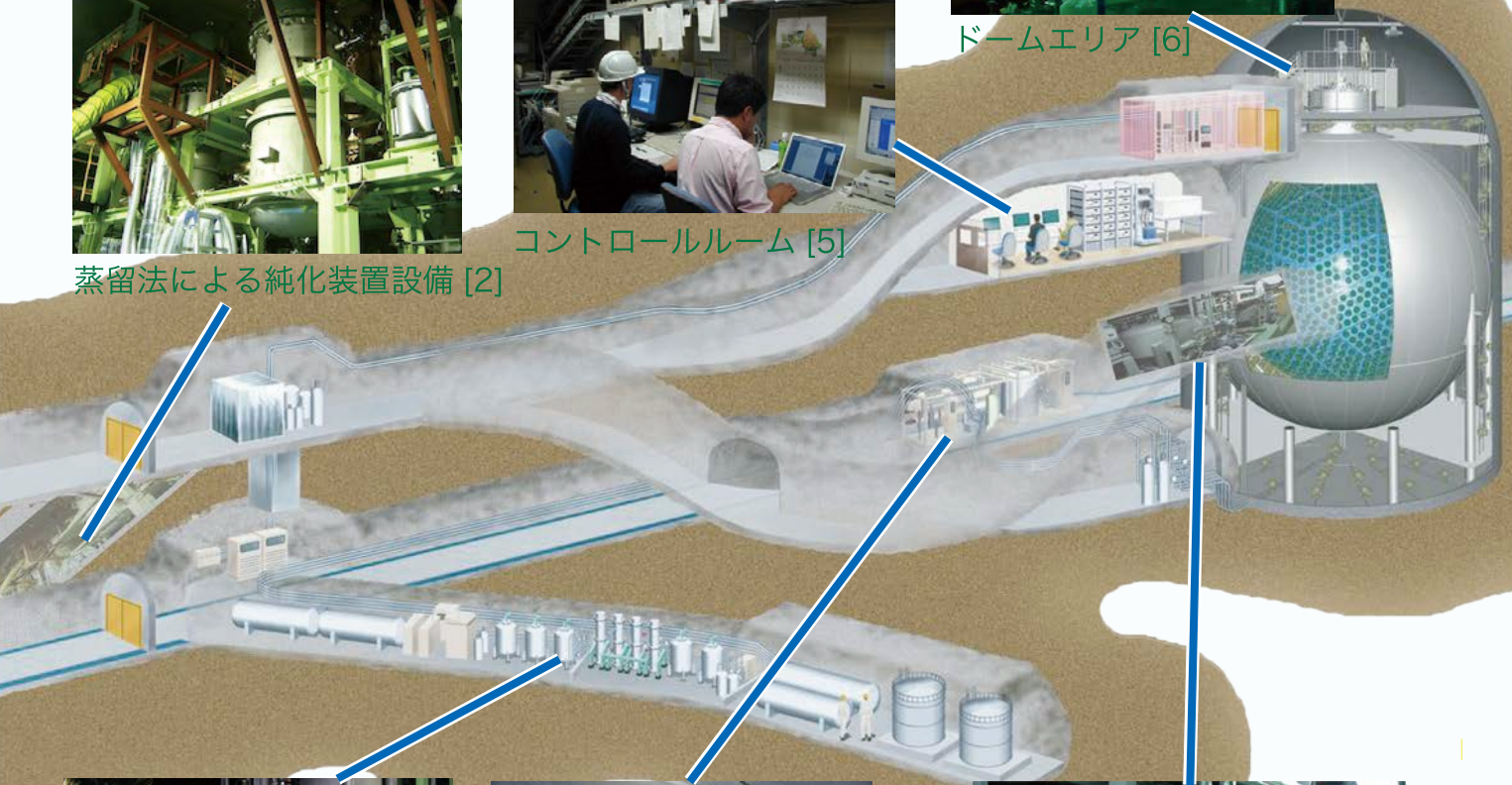
蒸留法による純化装置設備 [2]



コントロールルーム [5]



ドームエリア [6]



純粋を用いた純化装置設備 [1]



純水装置 [3]



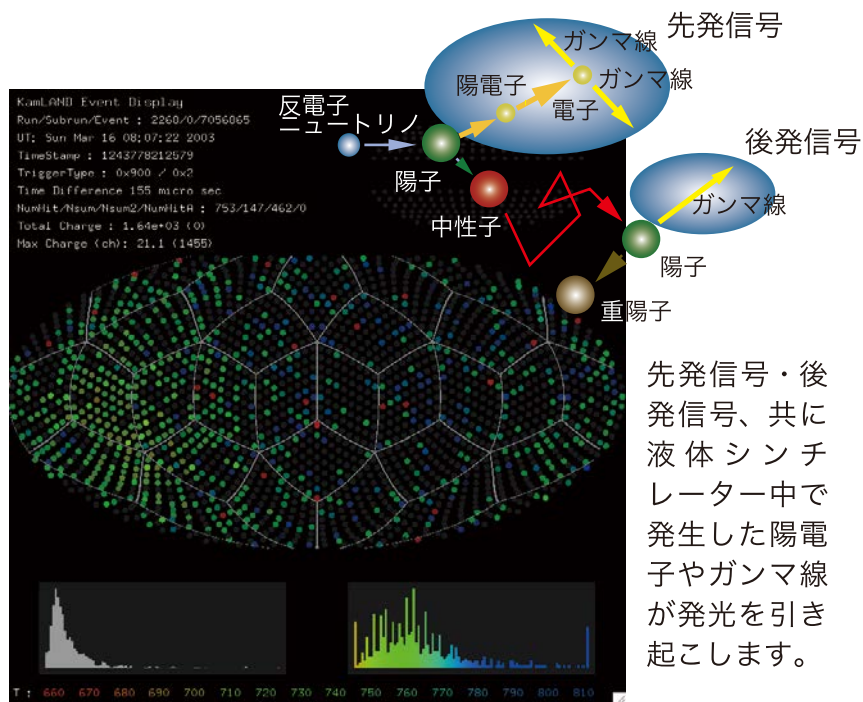
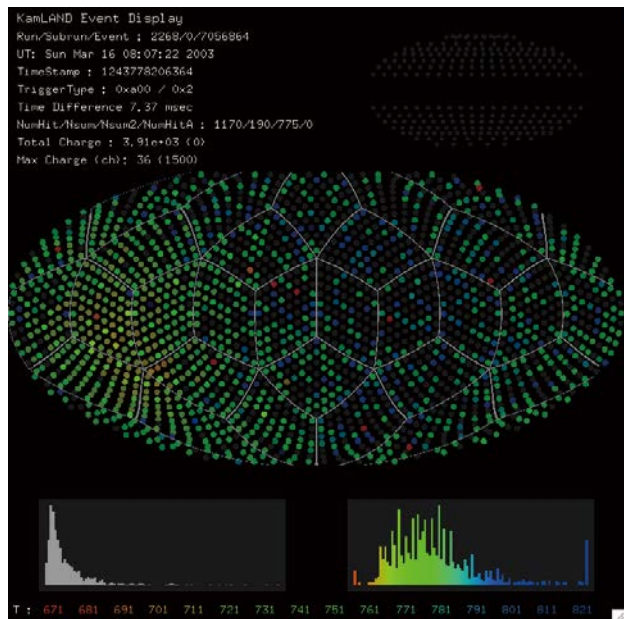
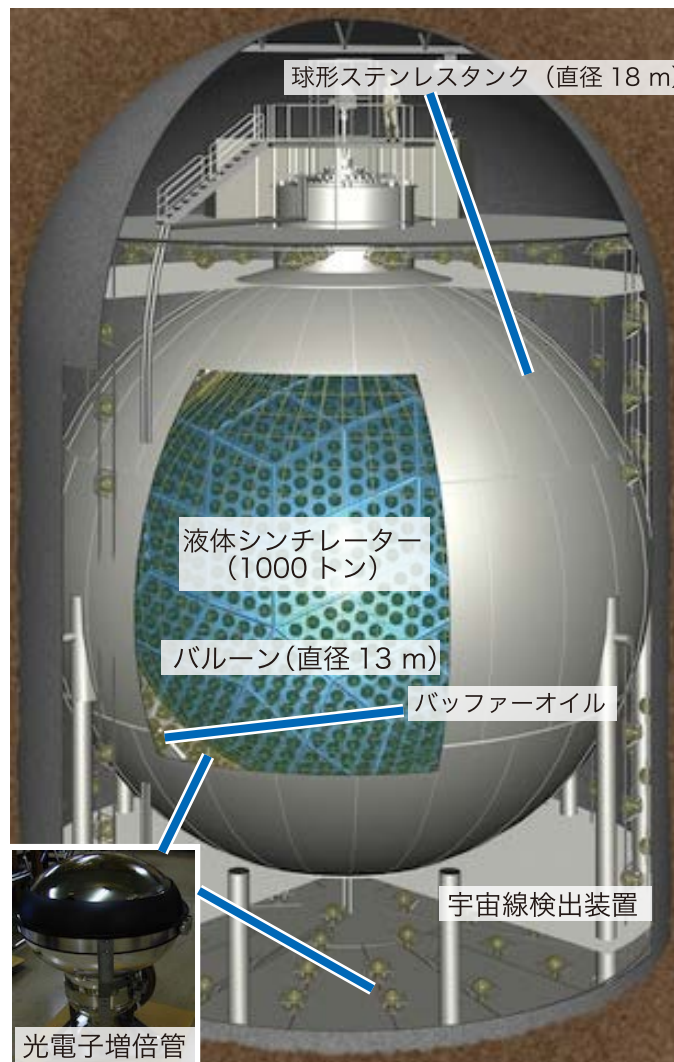
キセノン取扱い設備 [4]

# カムランドでニュートリノを検出する

カムランドでは、ベータ線やガンマ線、アルファ線などは液体シンチレータを発光させるため、この光を光センサー（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ると陽子と反応して、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 マイクロ秒後に陽子に吸収され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 50 cm 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ーオイルがあり、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出来るというメリットがあります。

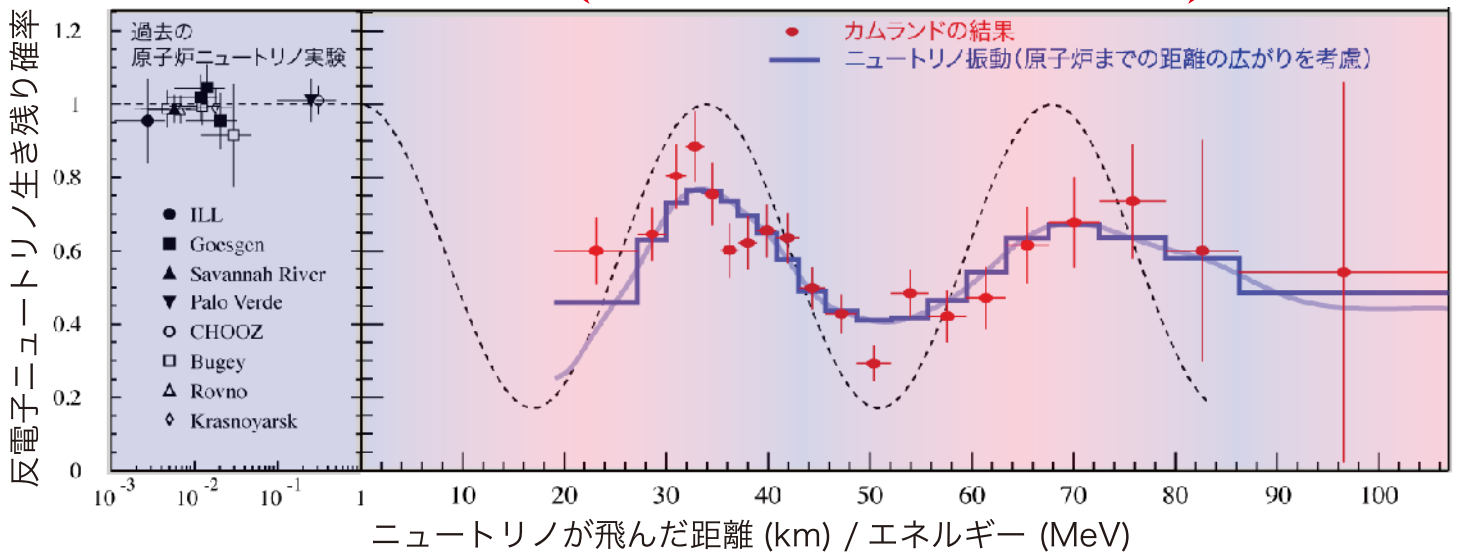
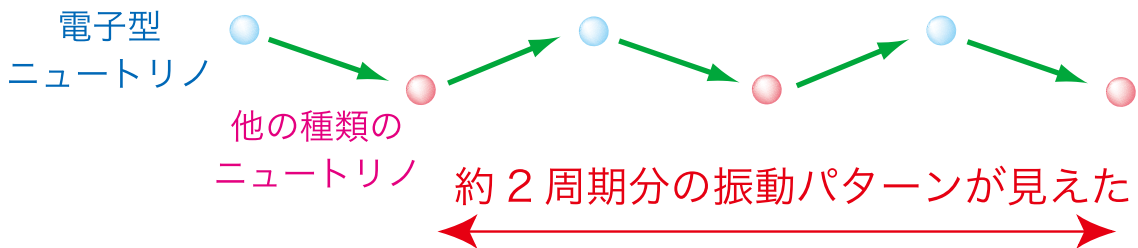


カムランドでの反ニュートリノ反応のイベントディスプレイ（左図：先発信号、右図：後発信号）  
1つの点は光電子増倍管1つに対応し、色の付いている点は光を検出した事を示しています。

# これまでの研究結果

## 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来たこの太陽ニュートリノは、様々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様々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、素性の分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出来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。

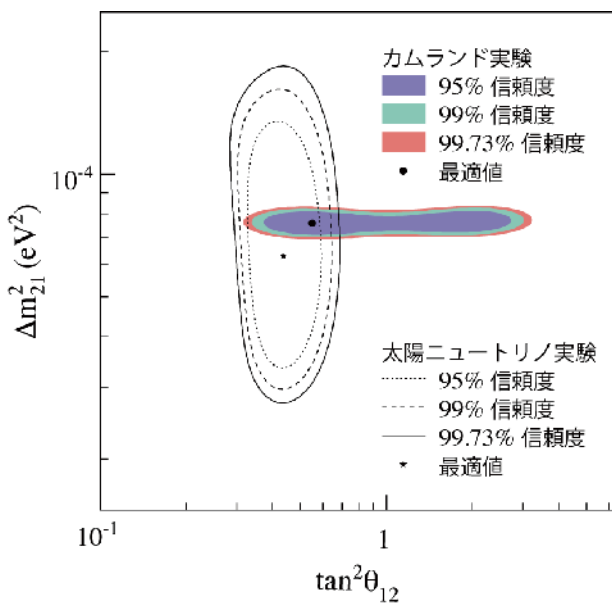


カムランドで観測したニュートリノ振動パターン

### 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乗差を表す。色の付いた領域はカムランド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。

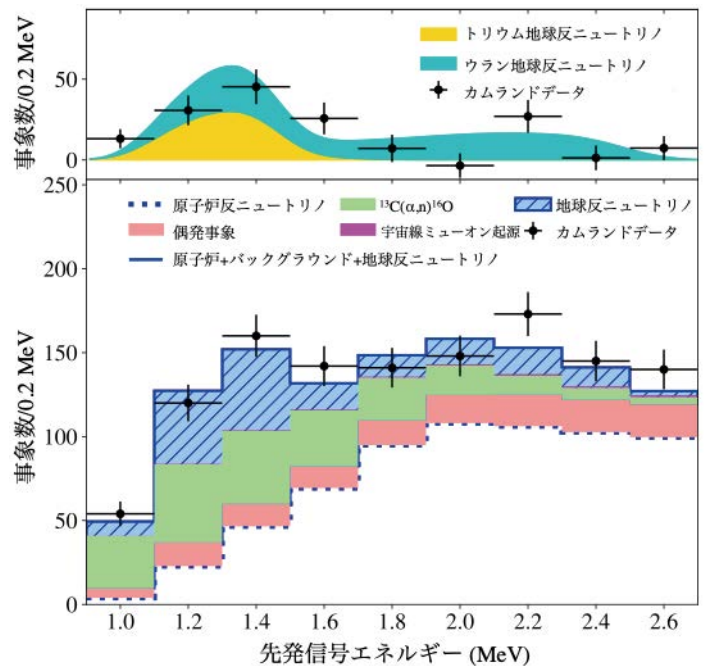
原子炉ニュートリノと太陽ニュートリノでは、振動の仕方が誤差の範囲内で一致する事が分かり、太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動によって引き起こされていた事が分かります。また、カムランド実験によって質量の2乗差が2.7% という精高度で決まりました。ニュートリノの振る舞いがより深く理解出来るようになり、どの程度移動したら、どの程度ほかのニュートリノに変化するかが予測出来るようになりました。この結果、ニュートリノを用いて、これまで調べる事の出来なかったものを調査する方法が現実のものとなりました。



# 地球ニュートリノの観測による地球内部熱量の解明

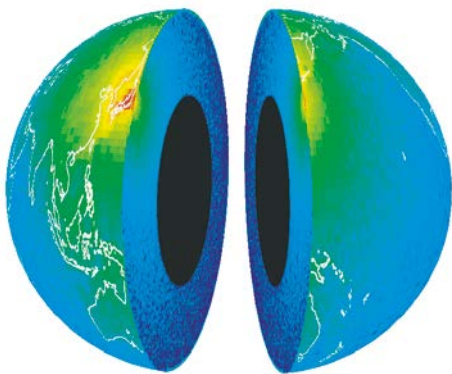
地球表面からの熱流量は 47 TW (テラワット = 1 兆ワット) と見積もられています。この地球内部に蓄えられている熱量は、地震や火山活動、地磁気の形成や維持、マントル対流やプレートテクトニクスといった様々な地球活動の源であり、地球を理解するには欠かせない最も基本的な物理量の一つです。熱源となるのは 46 億年前の地球形成時に蓄えられた「原始の熱」と地球内部にある放射性元素の崩壊による「放射化熱」であると考えられています。しかし、半径約 6400km のうち掘削の最深は 12km であることも示すように、地球深部を直接調べることは難しく、2 つの熱源のバランスも良くわかっていませんでした。

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質量、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分かりました。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共に進められています。



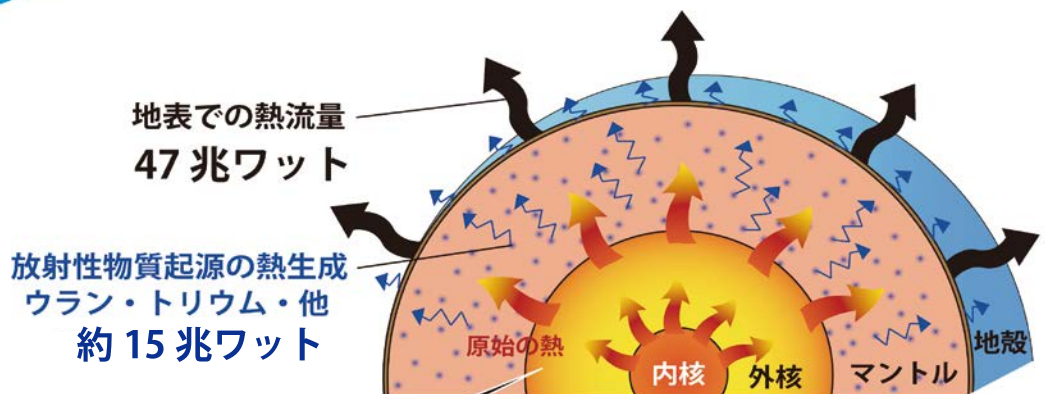
反ニュートリノのエネルギー分布

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。



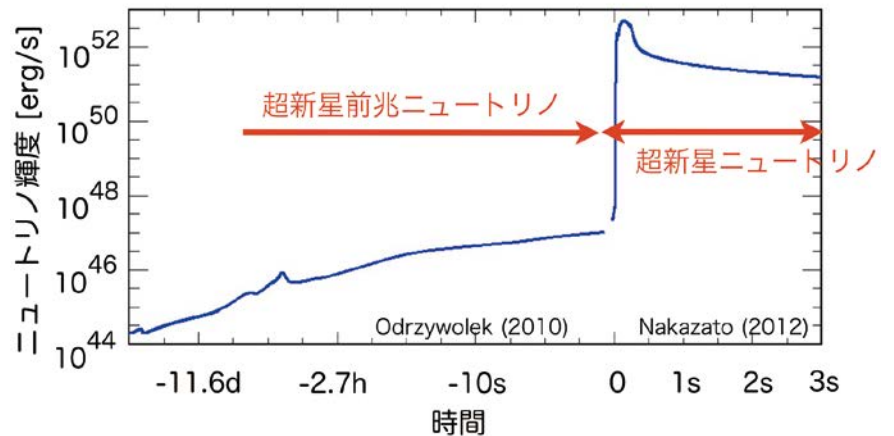
カムランドで観測している地球ニュートリノの生成点分布

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。



## 超新星爆発モニター

1987年に東京大学のカムオカンデ実験グループは超新星起源のニュートリノを検出しました。実は、星が超新星爆発を起こす前の核燃焼段階でもニュートリノ（超新星前兆ニュートリノ）を放出しています。カムランドは、ベテルギウスやアンタレスなど近傍の星が超新星爆発を起こす場合には、超新星前兆ニュートリノを捉えることができます。そのために、カムランドでは常に超新星前兆ニュートリノをモニターして、爆発の兆候を捉えた場合は全世界の天文台、ニュートリノ検出器、重力波検出器に情報を送ります。



## 天体起源ニュートリノの研究

カムランドでは、スーパーカムオカンデでは検出できない  ${}^7\text{Be}$  太陽ニュートリノや低いエネルギーの  ${}^8\text{B}$  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年間  $17.5 M_{\odot}$  より小さいという制限を与えました。通常のアストロ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きています。距離が遠いので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する最も強い制限を与えています。



# 現在進行中の研究

ニュートリノは、「マヨラナ粒子」と言われる特別な素粒子なのではないのか？それを信じて検証を行っているのが、現在進行中のカムランド禅実験です。

## ニュートリノはマヨラナ粒子なの？

すべての粒子には、我々のよく知っている「粒子」に対応する「反粒子」があります。例えば、電子(e-)には電荷が逆の陽電子(e+)があるように。それらは、お互いに出会うと対消滅してエネルギーに変わります。次に、質量を持っていない光子は、光の最小単位であり素粒子の一つなのですが、光子自身が反粒子でもあります。光子2つが出会うと、やはりエネルギーに変わるので。それでは、質量のある粒子で粒子と反粒子の区別がない「マヨラナ粒子」はあるのでしょうか？実は、ニュートリノだけは、そのマヨラナ粒子の可能性が高いと考えられています。もし、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、素粒子の特徴としてそれ自身が興味深いだけでなく、素粒子論や宇宙論に対して、さまざまな情報を与えてくれると考えられています。



図1：マヨラナ粒子の説明

## 素粒子の質量階層構造

他の素粒子に比べ、今あるニュートリノの質量は極端に小さいことがわかっています。(正確な数値はまだわかっていませんが。)実は、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、その極端に軽い質量の謎が解けるといえるのです。素粒子標準モデルでは、何とも反応しない右巻きニュートリノには、役割もなく存在する意味もないので考えていません。ここでは、今ある素粒子にマヨラナ粒子の重い右巻きニュートリノという仲間を加えるとします。すると、一つを重くすることで他方を軽くするシーソー機構という理論モデルによって、今あるニュートリノを非常に軽くできるのです。また、この重い右巻きニュートリノの質量は、現在の素粒子標準モデルを超える大統一理論が支配するエネルギー領域であるとも期待されています。このような筋道では、クォーク・レプトンを統一したより大きな対称性SO(10)を作る右巻きニュートリノにこそ重要な役割があります。

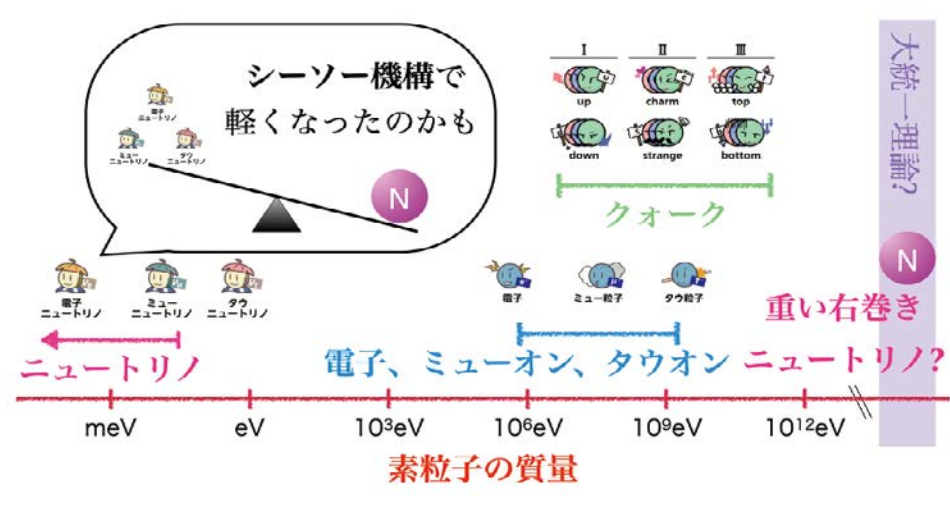


図2：素粒子の質量階層と重い右巻きニュートリノ  
ニュートリノが他の素粒子より6桁以上も軽い理由を重い右巻きニュートリノが解決してくれるかもしれない？

## 物質(粒子)のできている我々の宇宙の謎

宇宙論にとっても、「ニュートリノがマヨラナ粒子であるのかどうか？」は重要な問いになります。今の宇宙論では、我々の宇宙が「無」からできたと考えています。その場合、宇宙の始まりでは、粒子と反粒子が同じ数だけ作られなければなりません。そして、粒子と反粒子が対消滅して宇宙は消滅してしまうか、物質のできている領域と反物質のできている領域に別れ、その境界で激しく対消滅

をするような宇宙を考えなければなりません、どちらも我々の宇宙とは異なります。では、何が起こったのでしょうか。我々は以下の理論が正しいのではないかと考えています。「宇宙の歴史の初めでは、粒子と反粒子の生き残る確率が少しだけ違う。しかも、レプトン族のそれもマヨラナニュートリノがその違いを生み出して、物質の多い宇宙をつくれたのだ。」というものです。これをレプトジェネシスと言います。当然、この理論の基礎には、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが必要となっています。

では、どのようにすればニュートリノがマヨラナ粒子であるかを検証ができるでしょ

うか。「(反)ニュートリノ同士を衝突させて対消滅するのかどうかを調べればいい！」と思いつくのではないのでしょうか。しかし、ニュートリノは幽霊粒子と言われるほど反応しにくい素粒子です。加速器でたくさん作ってお互いに衝突させるのは難しくなります。そこで2つのベータ崩壊を同時に起こす特殊な2重ベータ崩壊核を用います。小さな原子核内で起こる2つのベータ崩壊で、同時に出てくる反ニュートリノ同士が対消滅するの？を調べることで、ニュートリノがマヨラナ粒子なのかを調べることができるのです。このような事象を、「ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊」といって、世界中で様々な実験装置(半導体や、チェンバー、ポロメータなど)を使って探していますが、まだ発見されていません。

素粒子実験屋さんが大好きな **ダブルベータ崩壊**

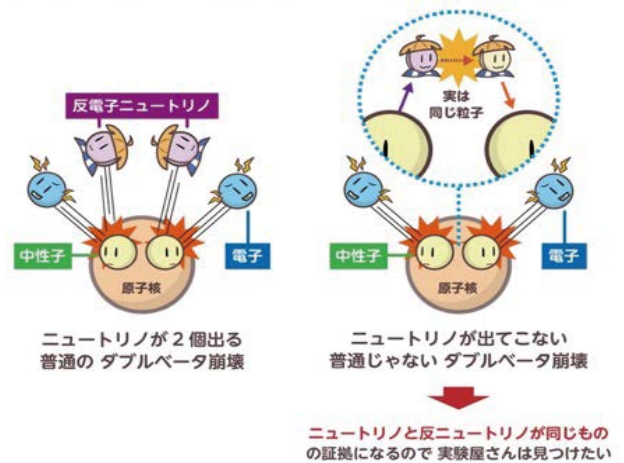


図 3 : ダブル (2重) ベータ崩壊の説明

**カムランド禅実験 (KamLAND - Zen)**

ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊はめったに起こらない事象です。発見の確率を上げるには、できるだけたくさんの2重ベータ崩壊原子核を用意する必要があります。また、それを長期間安定して保持・観測できなければなりません。さらに、擬似信号となる放射性不純物が多いと、見つけたい信号が薄まってしまいます。放射性不純物の極めて少ないクリーンな環境も大切なのです。それらを兼ね備えた検出器がカムランドになります。2011年に、ミニバルーンをカムランド検出器中心に据え、探索を開始しました。(図4、図5) ミニバルーンは、2重ベータ崩壊核である「キセノン 136」を溶かした液体シンチレータで満たしています。この実験をカムランド禅 (KamLAND-Zen: Zero neutrino double-beta decay search) と言います。カムランド禅実験は、キセノンを400 kg 使用した「禅400 フェーズ」を2015年秋まで行いました。2019年からは、キセノンを約800 kg に倍増して「禅800 フェーズ」を開始しました。この「禅800 フェーズ」のために、より大きい直径約4 m の、より放射性不純物の少ないミニバルーンを作って、これまでの直径約3 m のものと入れ替えています。2022年に公表した最新結果では、キセノン 136 のニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊の半減期

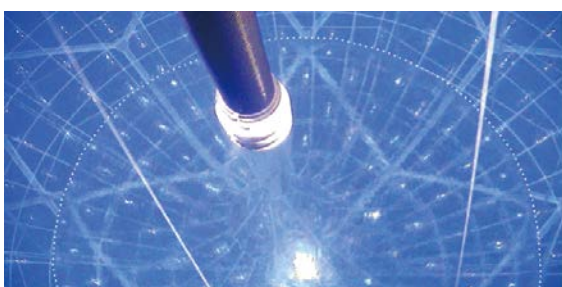


図 4 : カムランド禅検出器の写真  
白点線がミニバルーンのある位置。よく見るとキセノンによって屈折率が変わるせいで、点線部分で後ろのフレームなどが歪んで見えます。

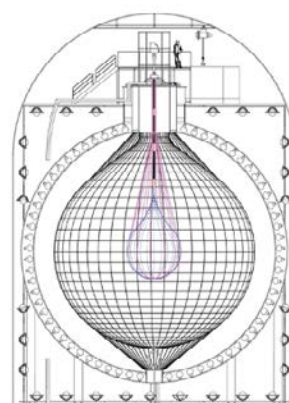


図 5 : カムランド禅検出器の概略図

に  $2.3 \times 10^{26}$  年以上 (90% の信頼度) という制限を与えています。世界一を維持し続けていた禅 400 フェーズの結果を 2 倍以上に更新したのです。半減期をニュートリノの有効質量に変換してみると、世界で初めて「逆階層型」が作っているバンドの部分での探索をしています。(図 7) 残念ながら、ニュートリノを伴わない 2 重ベータ崩壊は、まだ見つけていませんが、世界最高感度での探索は今も続いています。日々新しいデータを楽しみに観測を続けているところです。

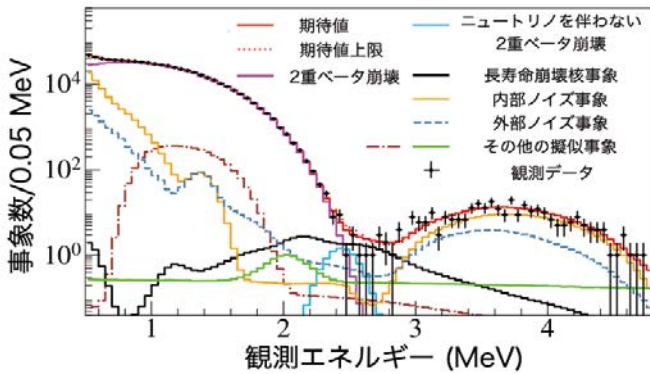


図 6：カムランド禅 800 フェーズのエネルギースペクトル  
ニュートリノを伴わない 2 重ベータ崩壊は、水色の線よりも少ないことを表しています。その観測エネルギーにあるノイズ事象の多くは、長寿命崩壊核事象と通常の 2 重ベータ崩壊でした。

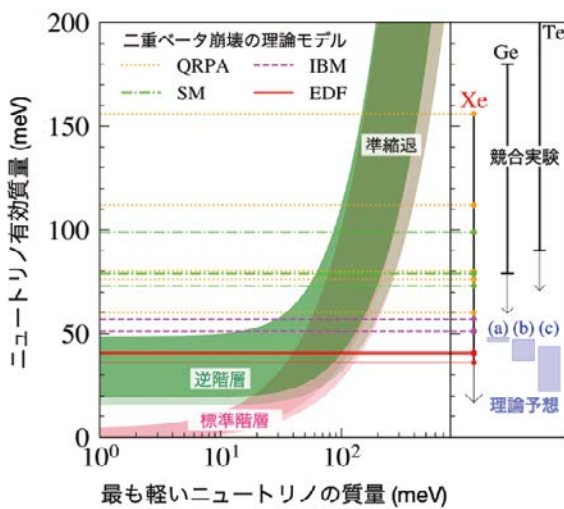


図 7：カムランド禅 800 の結果からニュートリノ有効質量に対する制限  
ニュートリノの質量型は、3 つの質量固有状態がほとんど同じくらいに大きい「準縮退型」(緑とピンクの重なった部分)と、世代に対してクォークなど他の素粒子と同じ順になっている「標準階層型」(ピンクのバンド)、反対の順になっている「逆階層型」(緑のバンド)があります。ニュートリノがマヨラナ粒子なら、これらのバンドのどこかに答えがあります。色のついた線と点線は、実験結果から得られた各モデルを使ったときのニュートリノ有効質量に対する上限値です。(線より上を排除しました。)世界でも初めて逆階層構造の作る横バンドに到達しました。そのあたりにはニュートリノ有効質量を予言している理論が少なくとも 3 つ存在しています。

## LowBG 技術

非常に稀な現象の探索感度を上げていくには、検出器内外に含まれる超微量の放射性不純物をさらに減らす必要があります。そうした超微量の放射性不純物量から放出されるガンマ線を高性能なゲルマニウム検出器で検出することで、測定試料中にどれくらい放射性不純物量が含まれているかを調べることが出来ます。ニュートリノ科学研究センターが所有する高性能ゲルマニウム検出器では、放射性不純物であるラジウム 226 を  $10^{-17}$  g/g の精度で調べる事ができ、より放射性不純物の少ない材料の選定を進めています。



図 8：真ん中に見えるのがゲルマニウム検出器。測定試料を載せるためのアクリル台があり、周りから来る環境放射線を遮るための銅や鉛で出来たシールドで囲われています。

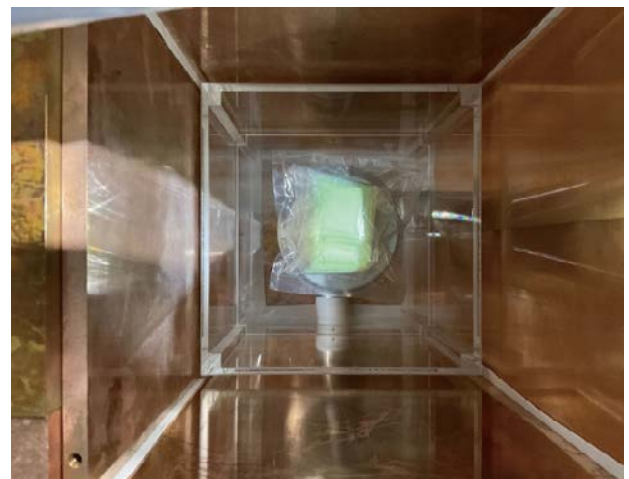
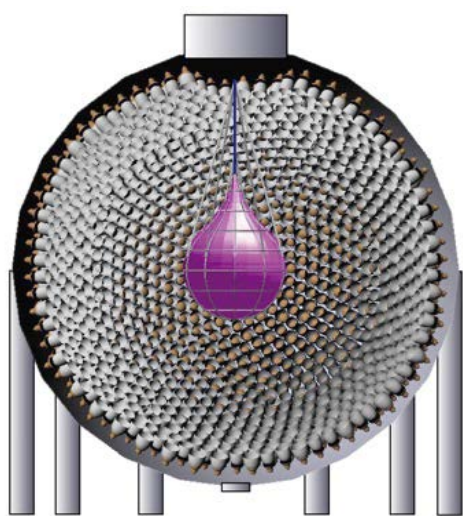


図 9：カムランド 2 禅実験で用いる予定の材料を測定している様子

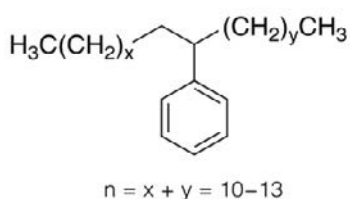
# カムランド検出器の高性能化に向けた開発

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の初検出を目指し、世界中で大型実験の実現に向けた開発研究が進められています。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、今後も競争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。さらに、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。そこで、カムランド禅では検出器の高性能化による改良計画（カムランド2禅）が検討されています。

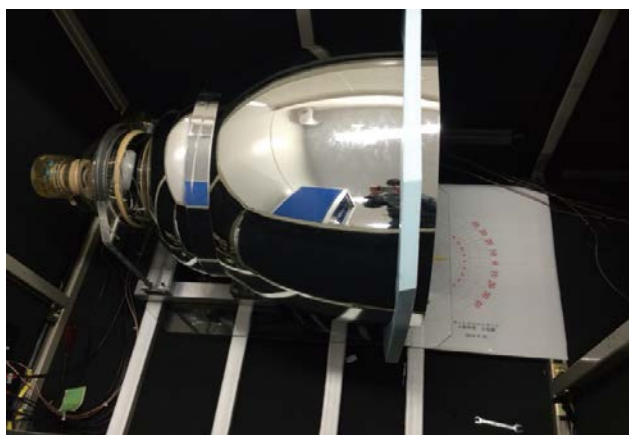
改良計画では、検出できる光量を増加させるため新液体シンチレータ、新型光電子増倍管、集光ミラーの導入を予定しています。新液体シンチレータでは光透過率が高いリニアアルキルベンゼンを主成分とし、さらに波長変換剤を添加して光検出効率を高めます。光電子増倍管は従来の約2倍の光検出効率のものに刷新します。集光ミラーは形状を最適化することで約2倍の光集収効率が得られます。このような検出器の光量増加が実現すればエネルギー分解能は大きく改善し、目標としているノイズ削減を達成できます。さらに、改良計画では発光性フィルムを使用したミニバルーンに置き換えることで、連続崩壊を利用したタグgingによるノイズ事象の除去ができます。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の探索感度は大きく改善し、逆階層型のマヨラナニュートリノが検証できるようになると期待されています。



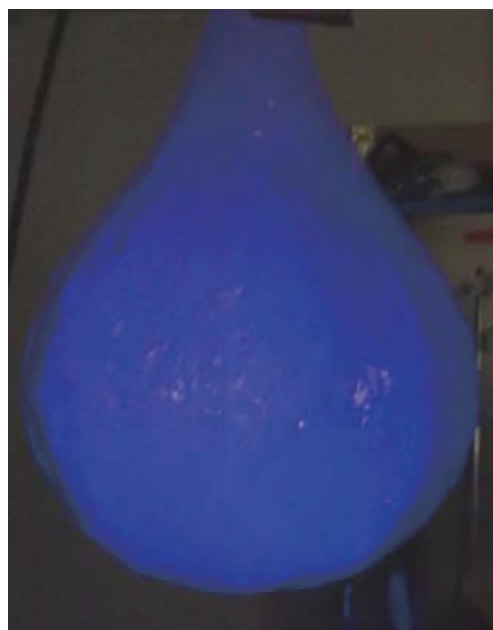
KamLAND2 禅



新液体シンチレータ



集光ミラー



発光性バルーン

# 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、私たちがよく知っている「物質」から構成されていますが、これら物質は宇宙の約5%程度に過ぎないことが分かってきました。宇宙には、宇宙を万有引力で支配する「暗黒物質」(約27%)と、宇宙空間を拡張しようとする「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。



図10: 2つの銀河が衝突したとき、重力によって観測される「暗黒物質」が(青)とX線によって観測される「物質」(赤)と分かれていることが分かる。

## 暗黒物質アクシオン、暗黒物質暗黒光子の探索

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)にあ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。

暗黒物質アクシオン探索では、アクシオンが強磁場中で転換した非常に微弱な光を検出します。この信号光は、アクシオンの質量に対応して、数100メガヘルツから数100ギガヘルツのマイクロ波になります。ニュートリノ科学研究センターでは、この微弱なマイクロ波を増幅する共振空洞を開発・研究しています。フォトニック結晶構造や超伝導など物性物理学の知識を応用することで、通常よりも約30倍の大きさの共振空洞の作成に成功しています。大きさが30倍になると、信号も30倍になるので、高感度でのアクシオンを検出が可能で

です。このような共振空洞を、核融合科学研究所の強力(13 T)・超大型(直径70 cm)のマグネットに導入して、アクシオン探索を実施することを計画しています。

アクシオンの他にも、暗黒光子と呼ばれる、超弦理論から予言される暗黒物質候補が存在します。この暗黒光子は、磁場がなくてもマイクロ波に転換する性質があります。暗黒光子は、アクシオンと比較すると注目度は低いですが、これまでに開発した共振器を用いると、理論的に予言された領域を探索することができます。こちらも暗黒物質2022年度から、この暗黒物質暗黒光子の探索も開始する予定です。

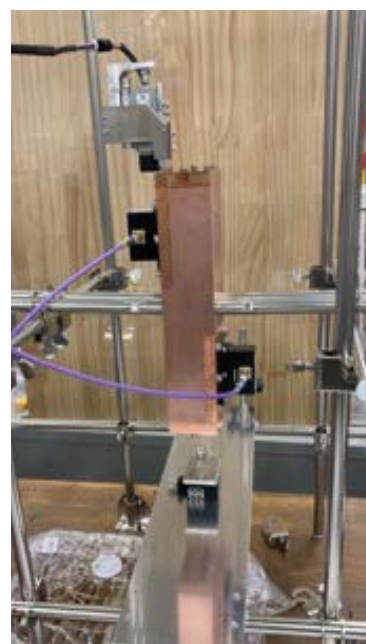


図11: 暗黒物質暗黒光子の探索に用いる共振器

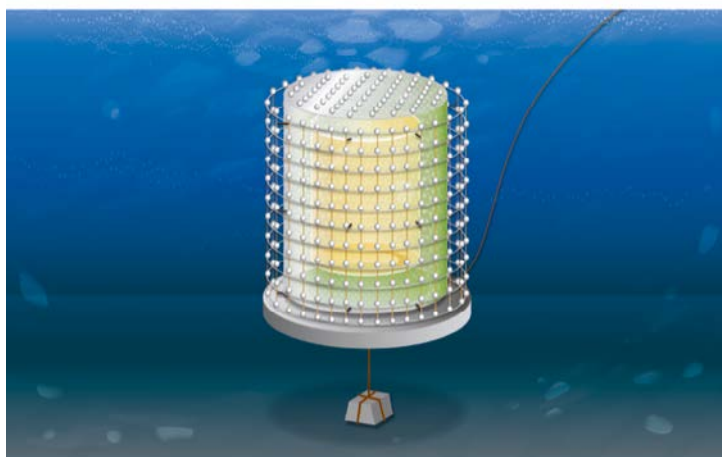
## 超伝導量子センサーを用いた宇宙素粒子実験

近年急速に開発が進む超伝導量子センサーと東北大学ニュートリノ科学研究センターの持つ極低放射能技術を組み合わせた新しい実験を計画しています。最初のステップとして、理化学研究所や埼玉大学と共同で開発している超伝導共振器やアメリカのバークレー研究所の超伝導転移端センサーを用いて軽い暗黒物質探索を予定しています。



## 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) シンプル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。宇宙線ミュオンのノイズ事象を海水で遮断するために約 4km の海底に検出器を設置する必要があり、低温 (2 ~ 5°C) 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更に分野の垣根を超えた研究者と共に、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、海中の光電子増倍管で観測します。

ニュートリノセンターでは、カムランドグループの他に、フランスの原子力発電所で $\theta_{13}$ と呼ばれる、最後のニュートリノ振動角を測定 (Double Chooz 実験)、ステライルニュートリノと呼ばれる第4のニュートリノの探索 (JSNS<sup>2</sup> 実験)、電子ニュートリノと鉛の反応断面積の測定 (DaRveX 実験)、などを行っているグループもあります。

## Double Chooz 実験

Double Chooz 実験では、フランスのショー原子力発電所に2台のニュートリノ検出器を設置し、原子炉ニュートリノが 1km 飛行する間に他の種類のニュートリノに変化するニュートリノ振動の測定を高い精度で行いました。その結果、2011 年 11 月に、世界で初めて第3のニュートリノ振動の兆候を捕らえ、ニュートリノ混合角 $\theta_{13}$ の測定を行いました。2019 年には、図12のような、ニュートリノ振動による原子炉ニュートリノの欠損から、

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.004$$

の結果を発表しました。この結果は T2K 実験などで行われているニュートリノによる CP 対称性の破れの測定にも貢献しています。

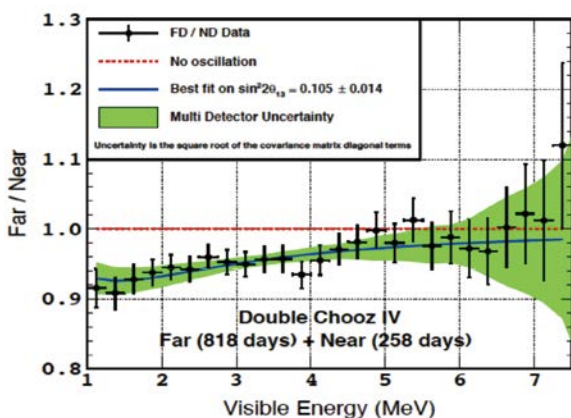


図 12. 原子炉ニュートリノ振動測定結果

## JSNS<sup>2</sup> 実験

素粒子の標準理論では、ニュートリノは 3 種類しかないとされています。しかし、いくつかの実験グループが第 4 のニュートリノ (ステライルニュートリノと呼ばれています) が存在することを示唆する結果を発表しています。

しかし、それらはまだ確実な結果としては受け入れられていません。本研究では、東海にある J-PARC 研究所の MLF 研究施設で、静止した $\mu^+$ の崩壊で生まれるニュートリノを利用し、

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

の振動を検出し、ステライルニュートリノの探索を行っています。本研究グループは MLF に図13のようなニュートリノ検出器を建設し、2020 年 6 月にデータ収集を開始しました。もし第4のニュートリノが発見されれば、素粒子物理の常識を覆す大発見となります。

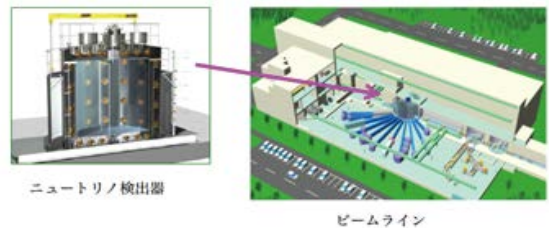
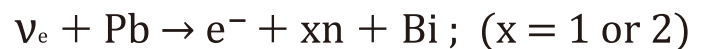


図 13. ステライルニュートリノ探索実験 JSNS<sup>2</sup>

## DaRveX 実験

J-PARC MLF では静止した $\mu^+$ の崩壊で生まれる電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ) も発生しています。このニュートリノを鉛に照射し、



の反応断面積の測定を行おうとしています。もし、この断面積が測定されれば、将来鉛を標的とした $\nu_e$ の実験を行うことができるようになり、 $\nu_e$ を利用したステライルニュートリノ探索や CP 対称性の破れの探索、超新星爆発 $\nu_e$ の検出などが可能となります。そのためのニュートリノ検出器は、図14のように薄い鉛シートをプラスチックシンチレーターで挟んだ構造をしています。

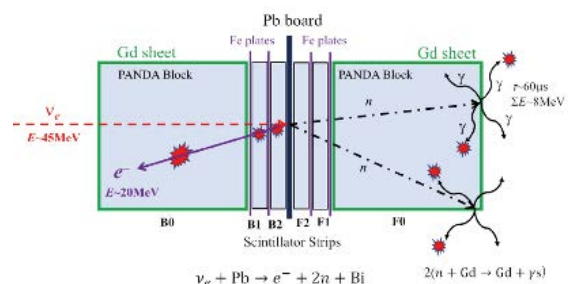
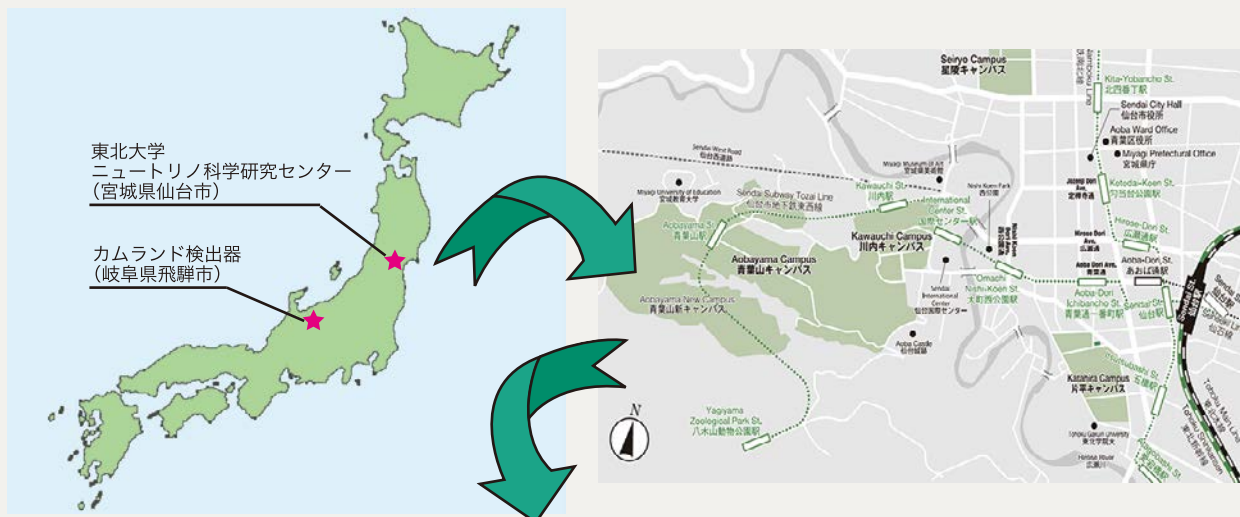


図 14.  $\nu_e + \text{Pb}$  反応検出原理

本研究グループは、現在このニュートリノ検出器の開発を行っています。

# アクセス

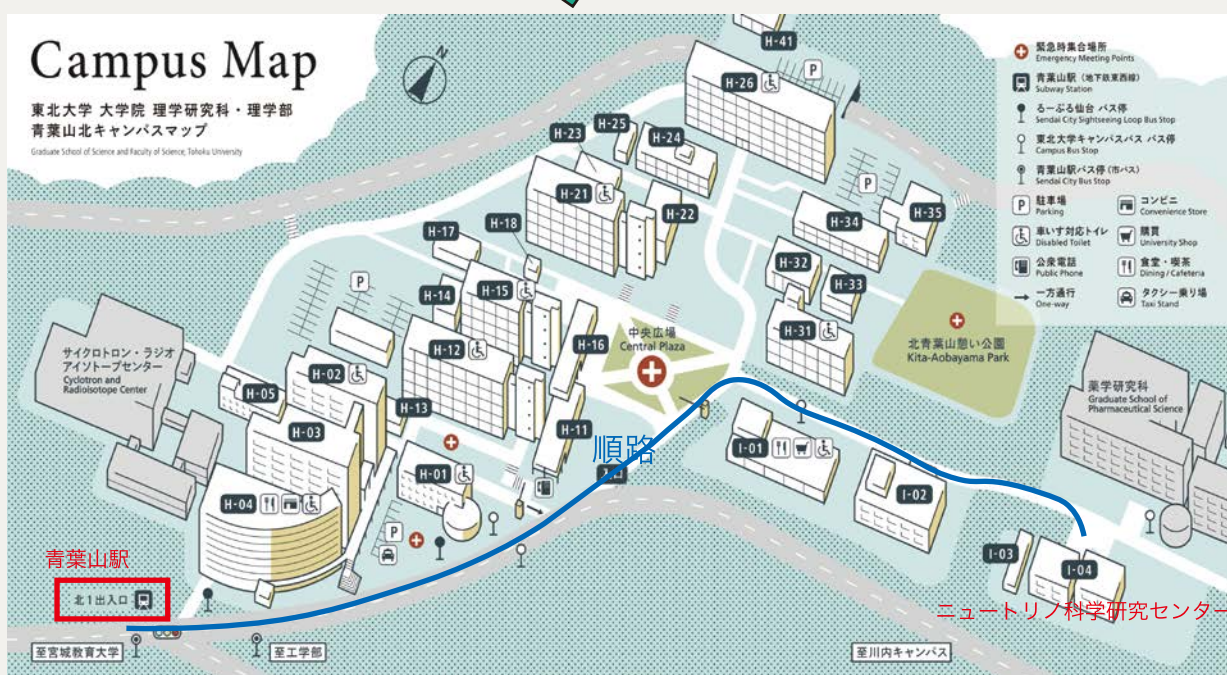


東北大学  
ニュートリノ科学研究センター  
(宮城県仙台市)

カムランド検出器  
(岐阜県飛騨市)

## Campus Map

東北大学 大学院 理学研究科・理学部  
青葉山北キャンパスマップ  
Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University



青葉山駅

北1出入口

順路

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

〒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

ホームページ <http://www.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番出入口から徒歩10分

### ■一般公開のご案内

ニュートリノ科学研究センター

東北大学理学研究科のオープンキャンパス(7月頃)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)の際にご覧いただくことができます。

### ■東北大学理学部入試情報のご案内

東北大学大学院理学研究科・理学部のホームページ

<http://www.sci.tohoku.ac.jp/> から東北大学の入試情報にアクセスできます。

Twitter

