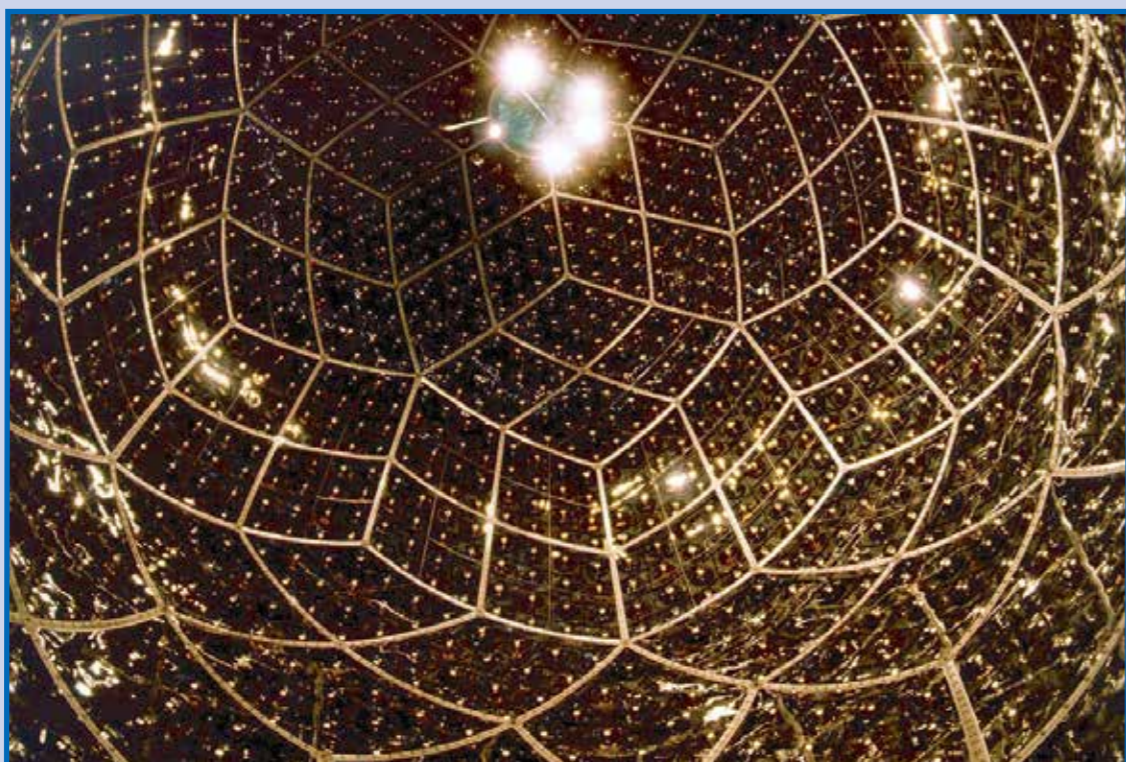




東北大学

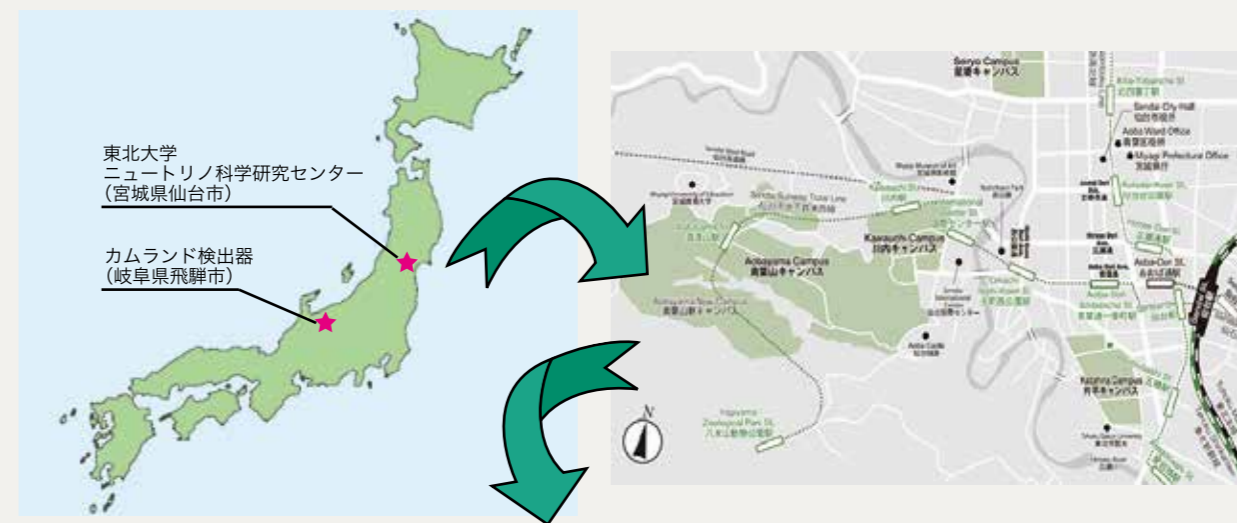
ニュートリノ科学研究センター



Research Center for Neutrino Science
Tohoku University



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
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。
カムランド検出器
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。

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

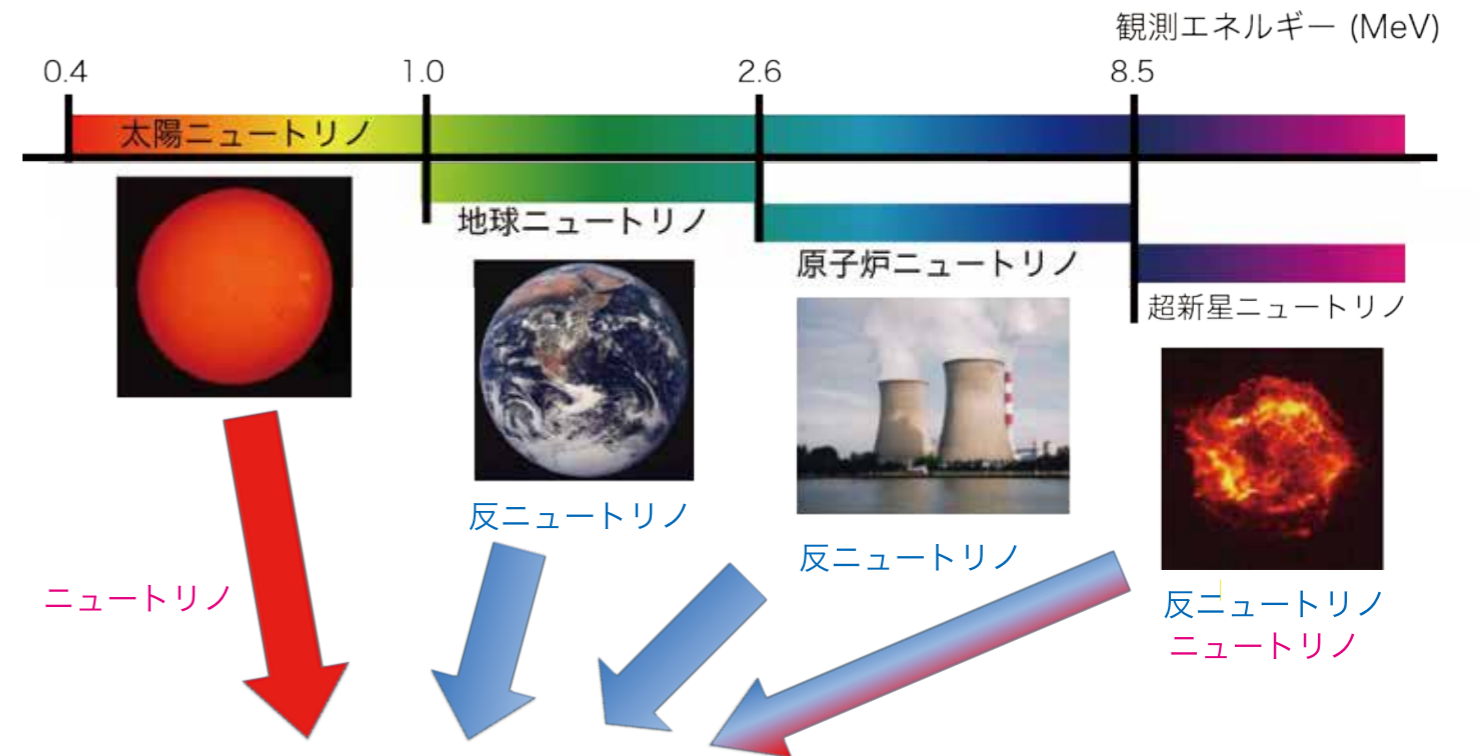
1971年	東北大学大学院理学研究科附属泡箱写真解析施設が設置される
1998年	東北大学大学院理学研究科附属ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換 カムランドの建設が始まる
2002年	カムランド実験が開始する 原子炉ニュートリノ振動の結果を発表する
2005年	世界初の地球ニュートリノ検出を発表する
2009年	東北大学ニュートリノ科学研究センターへ改組・転換
2010年	ダブルショー実験主検出器が完成する
2011年	カムランド禅実験 400 が開始する ダブルショー実験が最初の結果を発表する
2012年	二重ベータ崩壊に関する最初の結果を発表する
2014年	太陽 ⁷ Beニュートリ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



ニュートリノ科学研究センター

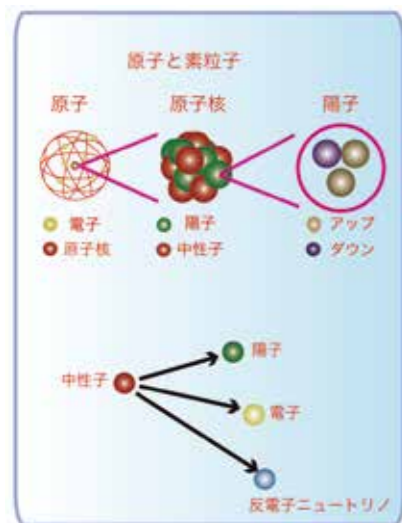
カムランド

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。



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、

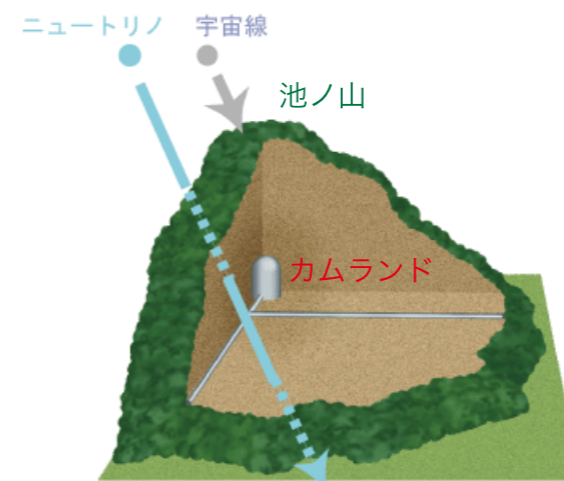


物質を構成する素粒子

	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	$-1/3$
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	-1
レプトン	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

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。



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」、暗黒物質検出器「XMASS」、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ム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、カムランド禪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。



ドームエリア [6]



コントロールルーム [5]



蒸留法による純化装置設備 [2]



純粋を用いた純化装置設備 [1]



純水装置 [3]



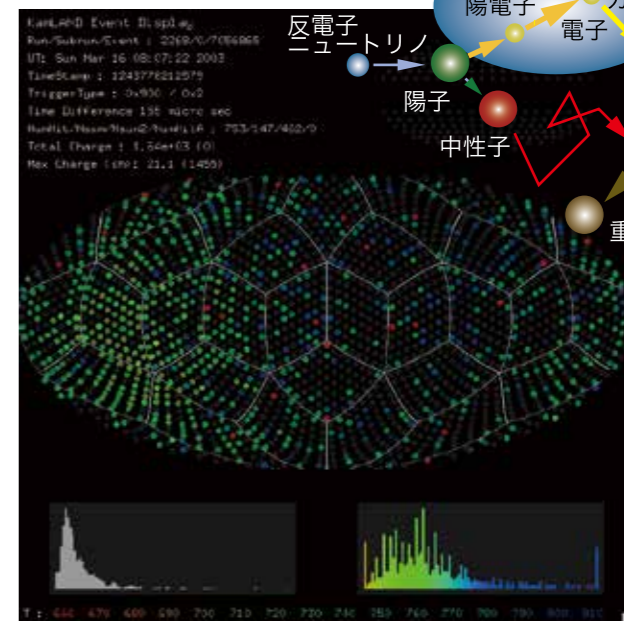
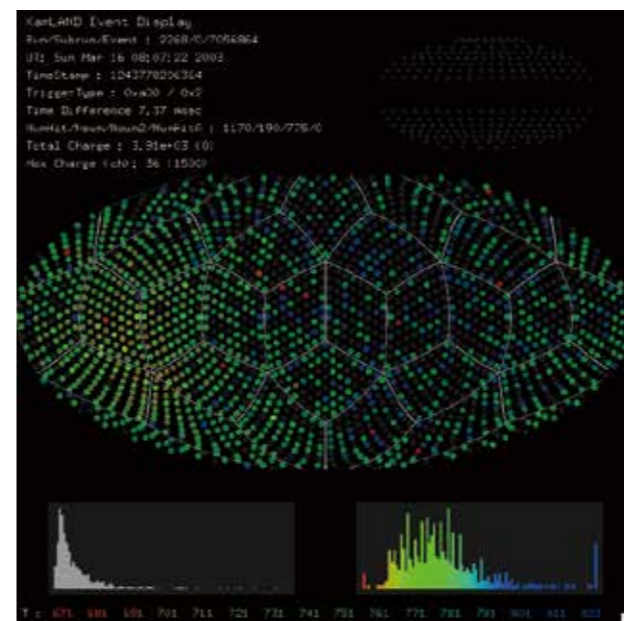
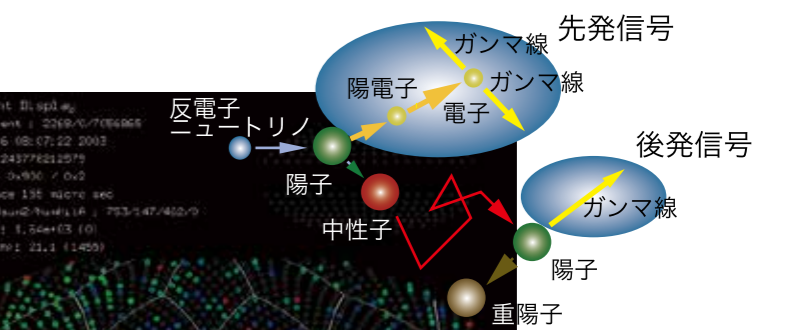
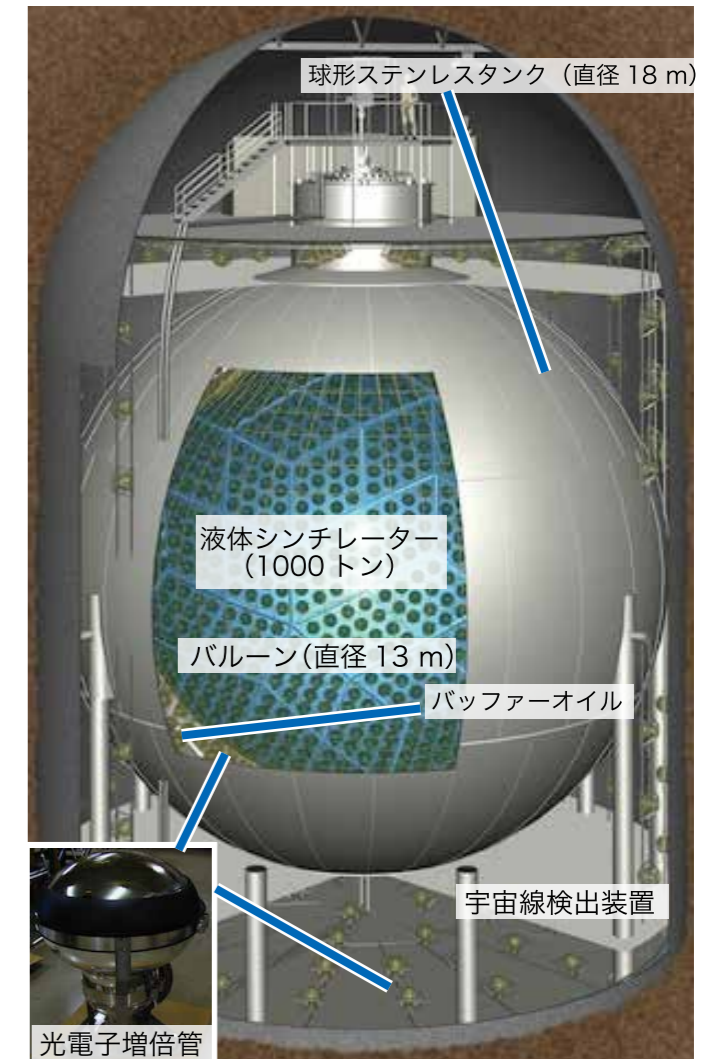
キセノン取扱い設備 [4]

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ーを発光させるため、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ー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。

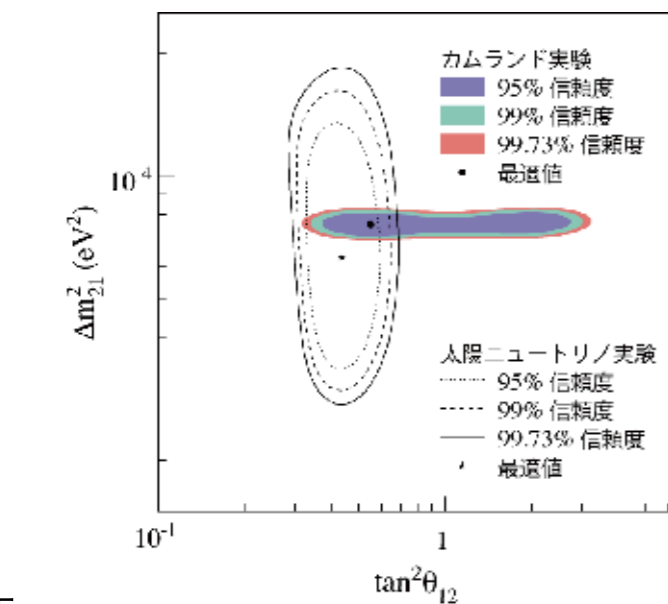
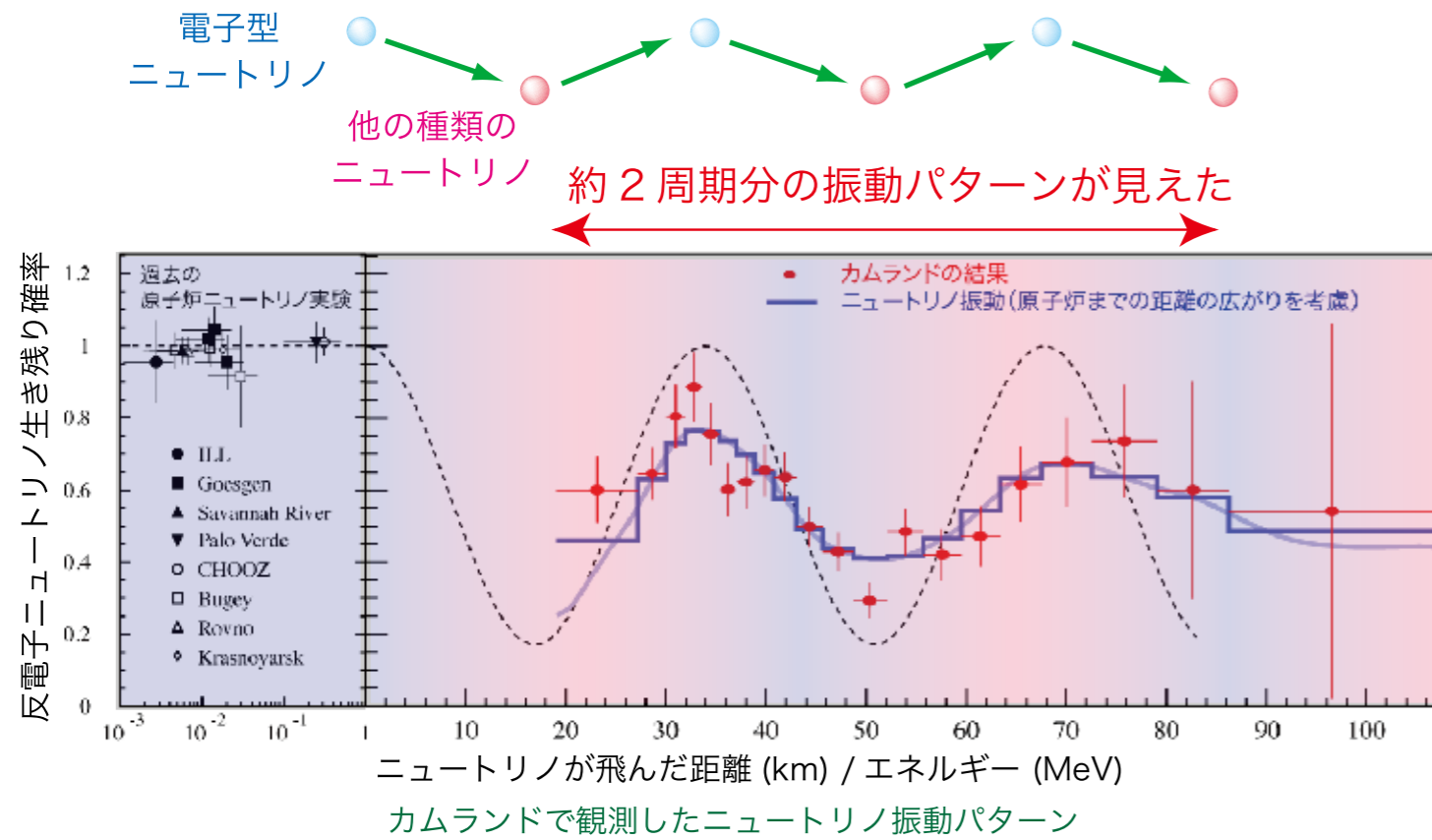


カムランドでの反ニュートリノ反応のイベントディスプレイ（左図：先発信号、右図：後発信号）
1つの点は光電子増倍管1つに対応し、色の付いている点は光を検出した事を示しています。

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生しています。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、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な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。

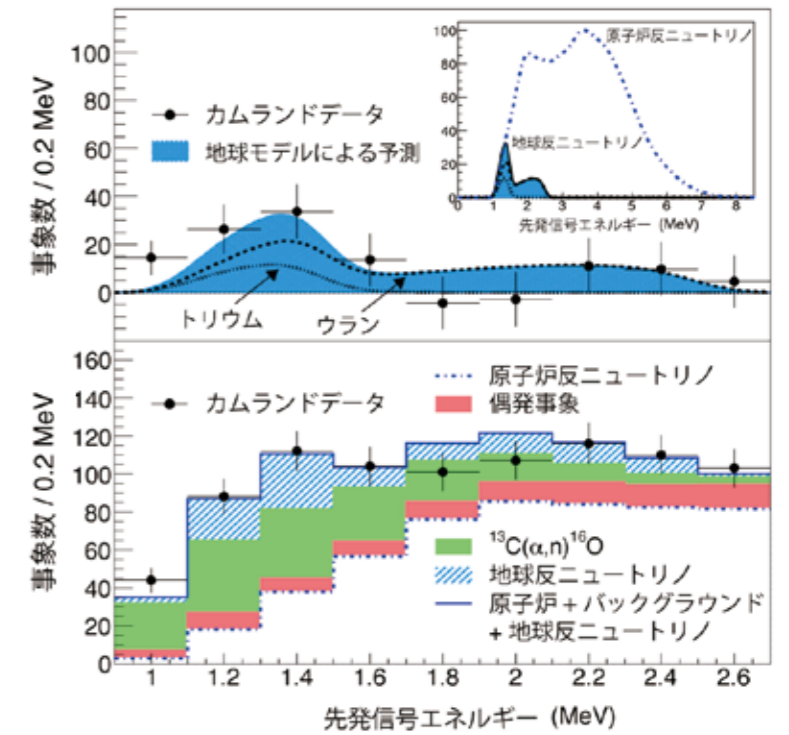


地球反ニュートリノの観測と地熱の熱源の測定

地熱の測定から、地球内部で発生している熱量は 47 TW (テラワット = 1 兆ワット) と見積もられています。この地球内部熱は、地震、火山活動、地磁気だけでなく、マントル対流やプレートテクトニクスなどの原因となり、地球の研究にかかせない最も基本的な物理量の一つです。

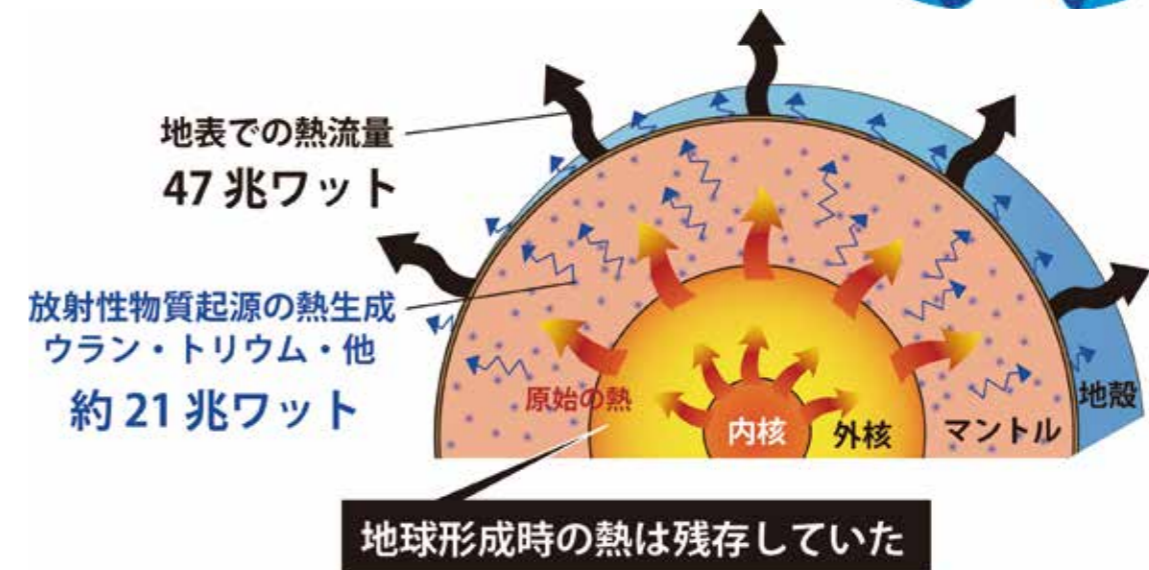
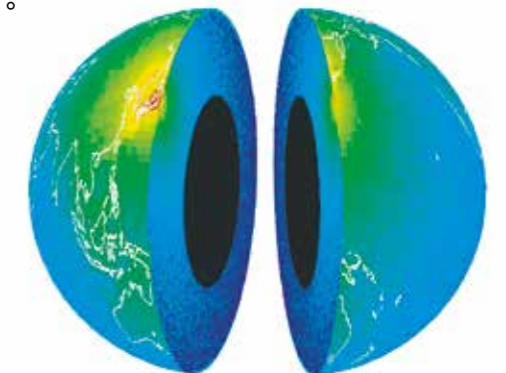
この地熱の原因は、地球形成時に蓄えられた熱もしくは地球内部の放射性元素からの熱と考えられていましたが、地球の奥深くを直接観測することは出来ないため、その割合なども分かりませんでした。カムランドでは、地球内部の放射性元素が熱を発生するときに同時に放出する反ニュートリノ（地球ニュートリノ）を観測する事により、放射性元素起源の熱発生量を測定する事に成功しました。

この測定結果より、地熱全てを放射性元素起源で説明する事はできず、地球物理によって予想されているモデルと一致することが分かりました。また、地熱の測定結果とカムランドの結果から、46 億年前の地球形成時に蓄えられた熱が今でも放出され続け、現在も地球は徐々に冷えているという事が分かりました。



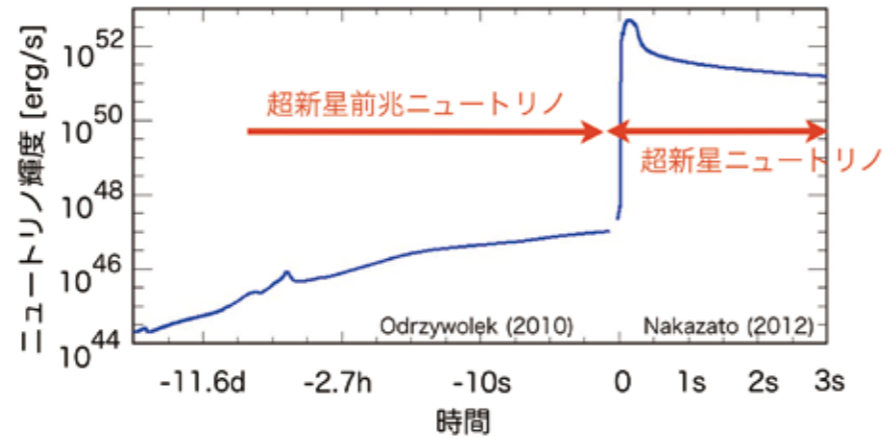
カムランドでの観測に相当する地球ニュートリノの生成点分布

地球表面の地殻部分およびその下のマントルに放射性元素が多く分布し、中心の核には存在していないと考えられています。この分布についての詳細な研究も始まったばかりです。



超新星爆発モニター

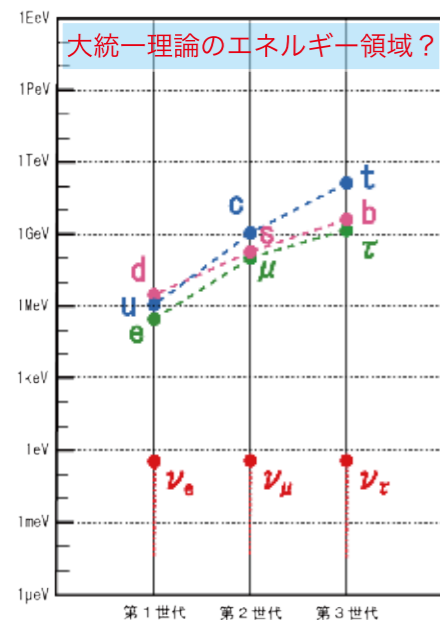
1987年に東京大学のカムオカンデ実験グループは超新星起源のニュートリノを検出しました。実は、星は超新星爆発を起こす前の核燃焼段階でもニュートリノ（超新星前兆ニュートリノ）を放出しています。カムランドは、ベテルギウスやアンタレスなど近傍の星が超新星爆発を起こす場合には、超新星前兆ニュートリノを捉えることができます。そのために、カムランドでは常に超新星前兆ニュートリノをモニターして、爆発の兆候を捉えた場合は全世界の天文台、ニュートリノ検出器、重力波検出器に情報を送ります。



現在進行中の研究

ニュートリノと反ニュートリノの同一性とニュートリノ絶対質量の研究

すべての素粒子には、我々がよく知っている‘粒子’に対応する‘反粒子’があります。例えば電子には電荷が逆の陽電子に対応しています。それらは、お互いが会おうと対消滅してエネルギーに変わります。光の最小単位であり質量を持っていない光子も素粒子の一つですが、光子自身が反粒子でもあり、光子2つが出会うとやはりエネルギーに変わります。それでは質量のある粒子で粒子と反粒子が同一のもの（マヨラナ粒子）があるのでしょうか。その可能性が高いと考えられているのがニュートリノです。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、素粒子論や宇宙理論に対して、さまざまな情報を与えてくれると考えられています。



素粒子の質量階層構造

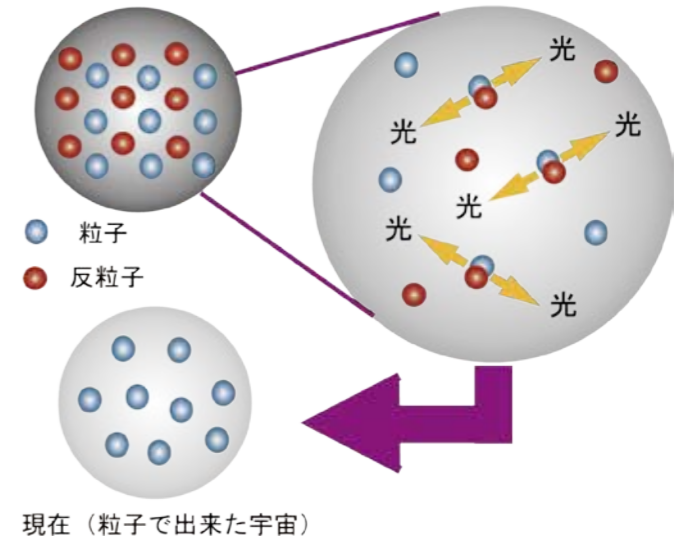
他の素粒子に比べ、ニュートリノは極端に小さい質量を持っています（数値はまだ分かっていません）。ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、重い右巻きニュートリノという仲間を導入し、シーソー機構というモデルを用いることによって軽いニュートリノを説明することができます。

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と期待されることから、とても重要と考えられています。

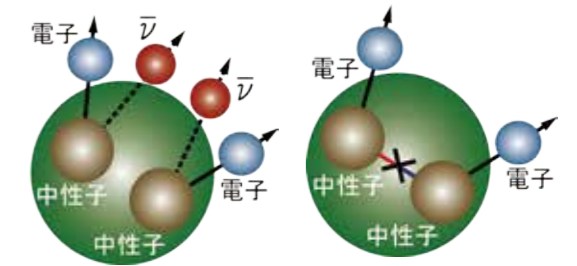
物質（粒子）で出来ている我々の宇宙

今の宇宙論では、我々の宇宙は‘無’から出来たと考えられています。その場合、宇宙が出来たときには粒子と反粒子は同じ数だけ出来なければなりません。そのように考えると、粒子と反粒子が対消滅してしまう、もしくは物質で出来ている領域と反物質で出来ている領域に別れ、その境界で激しく対消滅する事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。そこで、粒子と反粒子で生き残る確率がほんの少しだけ違う、しかも電子やニュートリノなどのレプトン族と呼ばれる素粒子に違いがあり、物質優勢の宇宙を作ったという理論があります。これをレプトジェネシスといいます。この考えの基礎には、ニュートリノがマヨラナ粒子である必要があります。このように宇宙論にとってもニュートリノのマヨラナ性は重要な意味を持っています。

ビッグバン



ニュートリノがマヨラナであるかどうかは、反ニュートリノ同士を衝突させたときに対消滅するかどうかを調べれば分かります。そこで、2つのベータ崩壊を同時に起こす特殊な二重ベータ崩壊核を用いて、その中で発生する2つの反ニュートリノが対消滅する事象があるかどうかを調べることで、マヨラナ粒子かどうかを調べる事ができます。これがニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊です。現在は未発見で、世界中で様々な実験が進んでいます。

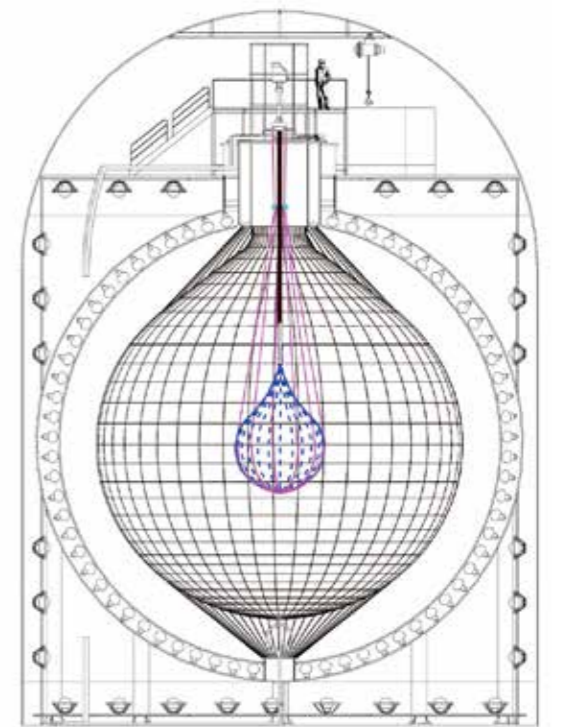


通常の二重ベータ崩壊（左）とニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊（右）

カムランド禅実験 (KamLAND-Zen)

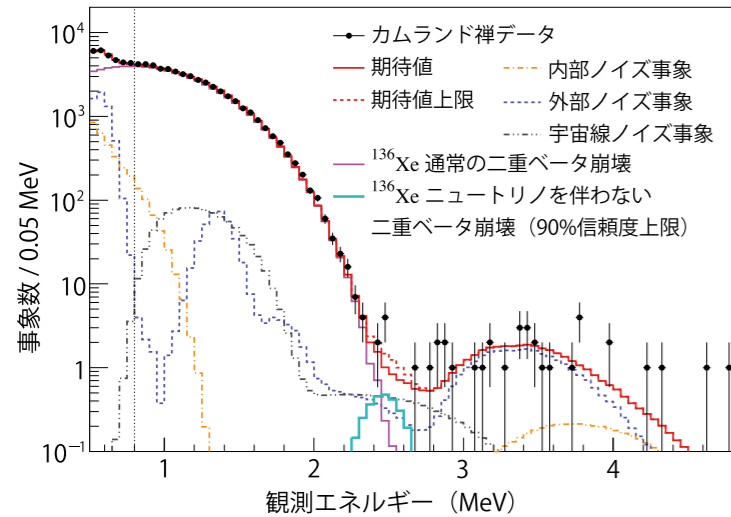
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊は極端に頻度が低いため、二重ベータ崩壊核を大量に用意し、それを保持する能力と、擬似信号となる放射性不純物の極めて少ないクリーンな環境が必要です。カムランドはこの2つを兼ね備えている検出器です。そこで、二重ベータ崩壊核であるキセノン 136 を溶かした液体シンチレーターを検出器中心に設置したミニバルーンに溶かして実験を開始しました。これをカムランド禅実験 (KamLAND-Zen : KamLAND Zero Neutrino double beta decay search) といいます。

カムランド禅は、世界最高感度でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象探索を目指し、開発研究と準備を進めました。2011年にミニバルーンの設置およびキセノン溶解液体シンチレーターの導入作業を行いました。そして、約 400kg のキセノン 136 でニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索を開始 (400kg フェーズ) しました。



カムランド禅の概略図
直径 3.16m のミニバルーンに、キセノン溶解液体シンチレーターを保持している。

カムランド禅では、2016年5月に二重ベータ崩壊事象探索における最新の観測結果を公表し、キセノン¹³⁶の半減期に対する制限を大幅に更新しました。さらに二重ベータ崩壊の理論モデルを仮定することによって、ニュートリノの有効質量に対して90%の信頼度で約0.1 eV（電子ボルト）以下という厳しい上限値を与えました。これまでニュートリノ質量型について正常階層型、逆階層型、準縮退型の3つの可能性が許されていましたが、カムランド禅においてマヨラナニュートリノ質量を世界最高感度で検証したことにより、その内の1つである準縮退型がほぼ否定されたこととなります。

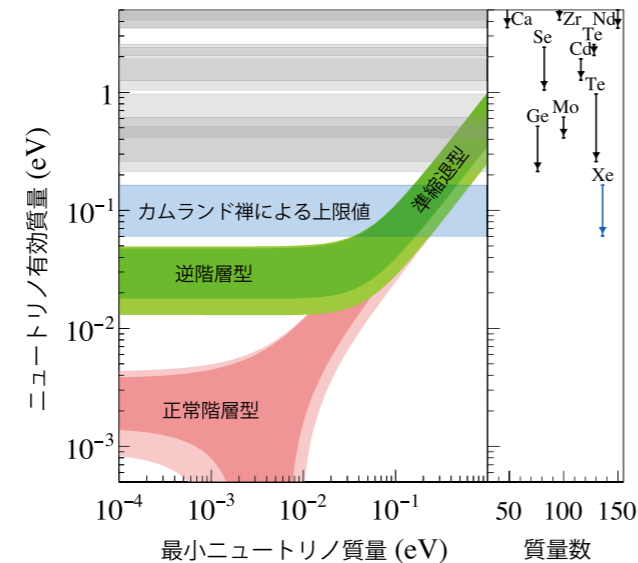


カムランド禅で観測されたエネルギースペクトル

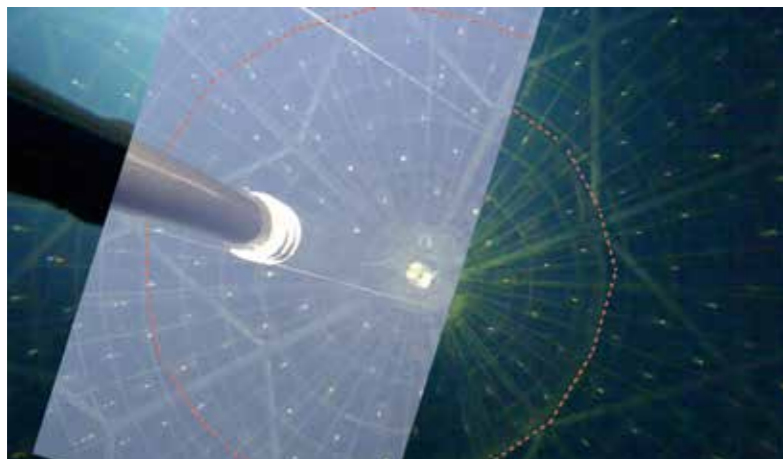
カムランド禅では液体シンチレータとキセノンの純化によって放射性不純物からのノイズ事象を低減し、二重ベータ崩壊観測の実験感度を向上させました。純化後の約1年半のデータ（左図）を加えた解析を行い、キセノン¹³⁶におけるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の半減期として90%の信頼度で 1.07×10^{26} 年以上という制限を得ました。カムランド禅では宇宙の年齢（ 1.4×10^{10} 年）の1兆倍のさらに1万倍の時間をかけて1回の割合でしか崩壊しないような、非常に稀な現象を探していることとなります。

ニュートリノ質量に対する制限

ニュートリノ有効質量と最小ニュートリノ質量の許される範囲（右図：左）。カムランド禅のニュートリノ有効質量に対する上限値から、準縮退型の質量の大部分が排除できたことがわかります。今回の結果でキセノン¹³⁶を用いたカムランド禅が、他の二重ベータ崩壊核を用いた競合実験を大きくリードしたことになります（右図：右）。これは極低放射能を特徴とするニュートリノ検出器を世界で初めて二重ベータ崩壊探索に応用したという実験手法の優位性を示していて、今後の観測のさらなる進展に世界中の期待が集まっています。



カムランド禅は、クリーンで大きなミニバルーンを作り直してキセノン量を約800kgに増大させた新しい測定、カムランド禅800kgフェーズを2019年1月から開始しました。これにより、さらに世界をリードする実験を継続し、世界初のニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象検出を目指します。



新旧ミニバルーンの大きさ比較

左図はカムランドの上から見たミニバルーンの写真です。見やすいようにミニバルーンの縁をオレンジ点線で示しています。小さい方が400kgフェーズで、大きい方が800kgフェーズです。圧倒的なスケールアップがわかると思います。

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 θ_{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（JSNS² 実験）、電子ニュートリノと鉛の反応断面積の測定（D@RveX 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 θ_{13} の測定を続けています。2019年には、図1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。

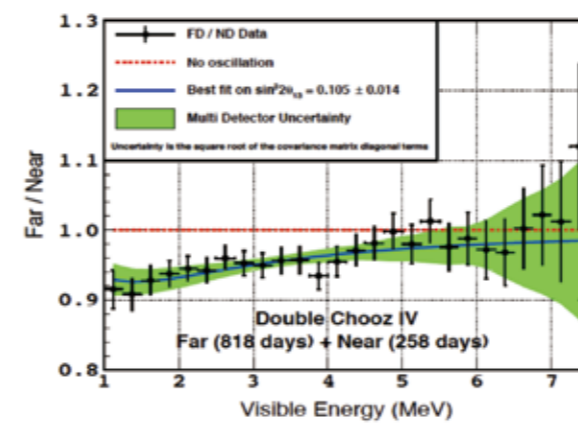


図1. 原子炉ニュートリノ振動測定結果

JSNS² 実験

素粒子の標準理論では、ニュートリノは3種類しかないと言われています。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 μ^+ 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2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。

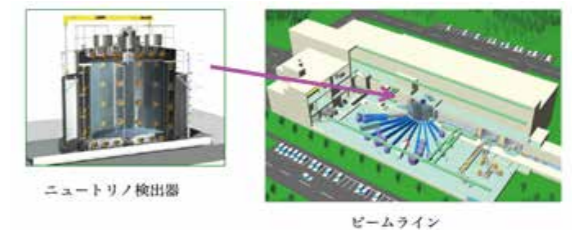
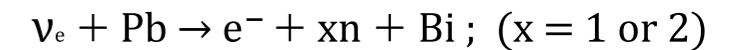


図2. ステライルニュートリノ探索実験 JSNS²

D@RveX 実験

J-PARC MLFでは静止した μ^+ の崩壊で生まれる電子ニュートリノ（ ν_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、この断面積が測定できれば、将来鉛を標的とした ν_e の実験を行うことができようになり、 ν_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 ν_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3のように薄い鉛シートをプラスチックシンチレータで挟んだ構造をしています。

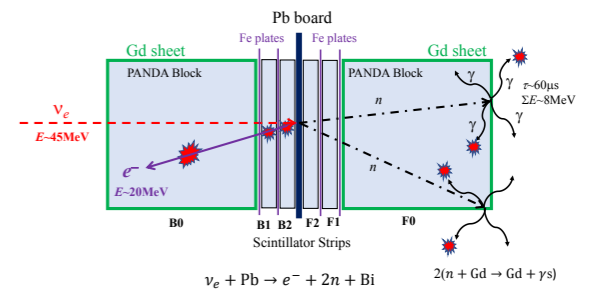


図3. $\nu_e + \text{Pb}$ 反応検出原理

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。