

Long-baseline Neutrino Oscillation Experiment

東海-神岡間

長基線ニュートリノ振動実験



Super-Kamiokande (ICRR, Univ. Tokyo)

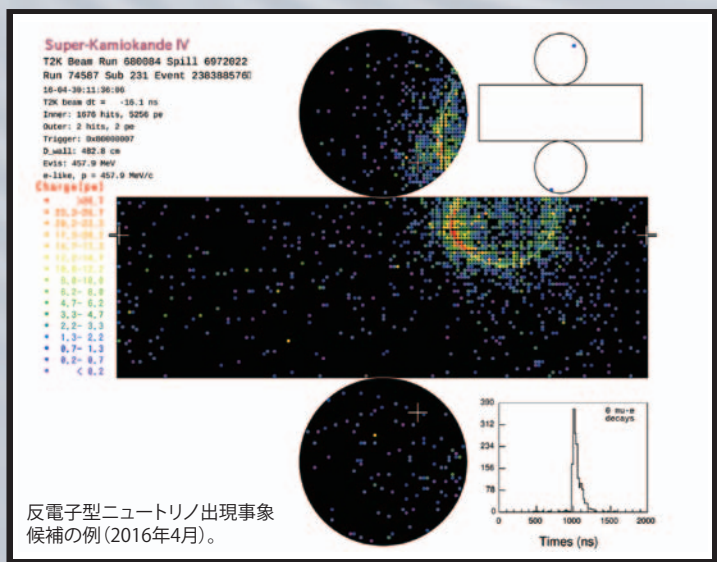


Neutrino



Neutrino Experimental Facility at J-PARC (KEK-JAEA, Tokai)

Anti-neutrino

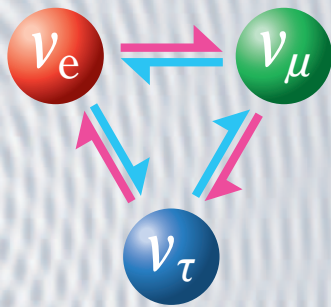


T2K実験国際共同研究グループ
t2k-experiment.org

高エネルギー加速器研究機構
www.kek.jp

2020年12月

3世代あるニュートリノの質量と混合の全容を解明し、物



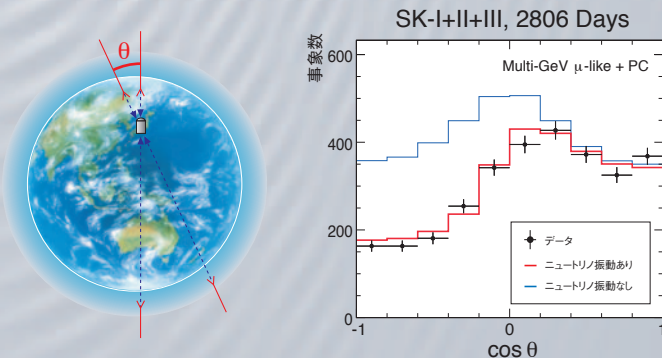
クォーク		レプトン	
ボトム b	トップ t	タウ τ	タウニュートリノ ν_τ
ストレンジ s	チャーム c	ミューオン μ	ミューニュートリノ ν_μ
ダウン d	アップ u	電子 e	電子ニュートリノ ν_e
-1/3e	+2/3e	-e	0
電荷		電荷	

T2Kニュートリノ振動実験が発見を目指す3世代間のニュートリノ振動現象の模式図。

自然界をかたちづけているクォークとレプトンの種類には共に3世代があります。

ニュートリノ研究の歴史

- 1930 ニュートリノの存在を予言 (W.パウリ)
- 1956 反電子ニュートリノを発見 (F.ライネス、C.コーワン)
- 1962 ミューニュートリノを発見 (L.レーダマンら)
- 1962 ニュートリノ振動理論を提唱 (牧二郎・中川昌美・坂田昌一)
- 1987 超新星爆発により発生したニュートリノを世界で初めて観測 (小柴昌俊らカミオカンデ実験)
- 1991 軽いニュートリノが3世代しか存在しないことを証明 (LEP実験)
- 1998 大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動を発見 (戸塚洋二・梶田隆章らスーパーカミオカンデ実験)
- 1999 世界初の長基線ニュートリノ振動実験K2Kにおいて人工ニュートリノ信号の観測に成功
- 2000 タウニュートリノの存在を確認 (丹羽公雄らDONUT実験)
- 2001 太陽ニュートリノ観測でもニュートリノ振動の存在を証明 (スーパーカミオカンデ実験およびカナダSNO実験)
- 2002 原子炉からの反電子ニュートリノ振動を観測 (カムランド実験)
- 2002 **小柴昌俊、R.デービスJrらとともにノーベル物理学賞を受賞**
- 2004 人工ニュートリノビームでニュートリノ振動の存在を確立 (K2K実験)
- 2013 **「電子ニュートリノ出現」の発見 (T2K実験)**
- 2015 **梶田隆章とA.マクドナルドがノーベル物理学賞を受賞**
- 2015 **西川公一郎らK2K・T2K実験グループがブレークスルー賞を受賞**
- 2016 **ニュートリノの「CP対称性の破れ」の兆候を捉える (T2K実験)**



スーパーカミオカンデで観測された宇宙線と大気が反応して生まれた大気ニュートリノの天頂角分布。地球の裏側からくるミューニュートリノは予想より少ない。

T2Kニュートリノ振動実験は

茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設のメインリングシンクロトロンとニュートリノ実験施設によって大強度ニュートリノビームを作り、295km離れた岐阜県飛騨市神岡町の地下1000メートルに位置する東京大学宇宙線研究所の5万トン水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデに打ち込み、ニュートリノの謎を解明する実験です。

T2Kニュートリノ振動実験によって、私達は

- スーパーカミオカンデにより発見され、K2K実験によって検証された $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動と相補的な $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を新たに発見すること
- その結果、ニュートリノ振動が3世代の間の振動現象であることを明らかにすること
- さらには、レプトンの世界における **CP対称性 (物質と反物質の対称性)** の破れの探索にむけた指標を与えること

を目指します。この研究により

- 3世代あるニュートリノの質量と混合の全貌の解明
- 我々の宇宙にはなぜ反物質が存在しないのか

などの根元的な問題に迫ることができます。

ニュートリノとは?

電氣的に中性で、最も軽いクォークや電子の100万分の1以下の重さしかもたない素粒子です。

ニュートリノには電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の3種類(世代)あることが知られています。またそれぞれの反ニュートリノがあります。

太陽から放射されるニュートリノが、毎秒数百兆個も私達の体を通り抜けています。しかし全く害はありません。

ニュートリノ振動とは?

3世代あるニュートリノが飛んでいるうちに互いに入れ換わることをいいます。例えば加速器で100%純粋なミューニュートリノを作っても、距離と共にある割合でタウニュートリノに変化してしまいます。更に進むと、また元のミューニュートリノにもどります。これを繰り返すので、「ニュートリノ振動」といいます。

これはニュートリノが重さを持ち、世代間の混合がある場合に限り起きる現象です。今のところ、ニュートリノ振動は極めて微小なニュートリノの重さと、世代間の混合を調べる唯一の方法です。

スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見

1998年6月にスーパーカミオカンデ研究グループによって発表された大気ニュートリノの天頂角分布は、地球の裏側から飛んでくるミューニュートリノが上空からくるものに対して減少していることを示していました。これは、ミューニュートリノがニュートリノ振動によって観測できないタウニュートリノに変化したためで、ニュートリノに微小な重さがあることを世界で初めて実験的に証明しました。

質宇宙創生の謎に迫るT2K長基線ニュートリノ振動実験

加速器によるニュートリノビーム生成

加速した陽子ビームを標的となる原子核に当てると、たくさんのパイ中間子が作り出されます。パイ中間子は非常に不安定な粒子で、数十メートル飛んでいるうちに壊れてミュオン粒子とミュオンニュートリノに変わります。こうして出てきたミュオンニュートリノをビームとして使います。加速器によって作り出したニュートリノビームは、ほぼ純粋なミュオンニュートリノのビームとなります。

加速器をもちいたニュートリノ振動研究

生成した時点ではほぼ純粋なミュオンニュートリノのビームですが、距離とともにある割合で別の種類のニュートリノに変わるため、遠方の検出器ではその分ミュオンニュートリノとして観測される割合が減ってしまいます。この「ミュオンニュートリノの減り方」を調べることが、ニュートリノ振動を検証することができます。また、変わった別の種類のニュートリノを直接検出することによっても、ニュートリノ振動の検証が可能となります。ニュートリノが変わる割合はニュートリノの持つエネルギーによって違いがあるため、ニュートリノ振動研究では観測されたニュートリノ事象のエネルギー分布を調べることが重要になります。

T2K実験では、J-PARCで作成した純粋なミュオンニュートリノビームをスーパーカミオカンデに打ち込み、電子ニュートリノとして観測される事象を探し出すことにより、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の発見を目的としました。

T2K実験による $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

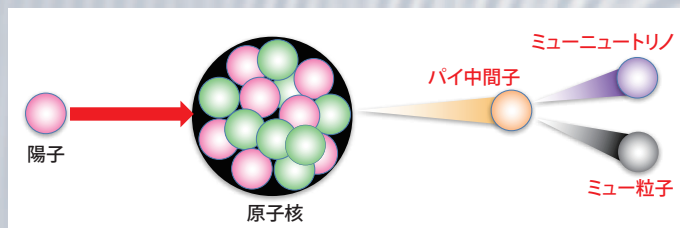
ミュオンニュートリノが電子ニュートリノに変わる確率は、タウニュートリノに変わる確率に比べて非常に小さく、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動はT2K実験以前のニュートリノ振動実験では観測されませんでした。そこでT2K実験では、大強度のニュートリノビームを作り出すJ-PARCニュートリノビームラインを新たに建設し、2010年より本格的に実験を開始しました。

T2K実験グループは、2013年7月、ミュオンニュートリノが飛行中に電子ニュートリノに変化する「電子ニュートリノ出現」が存在することを示す決定的な測定結果が得られたことを発表しました。未発見であった最後の振動パターンが見つかったことで、ニュートリノ振動が3世代の間の振動現象であることが示されました。これにより、ニュートリノ振動の研究は、新たな段階に入りました。

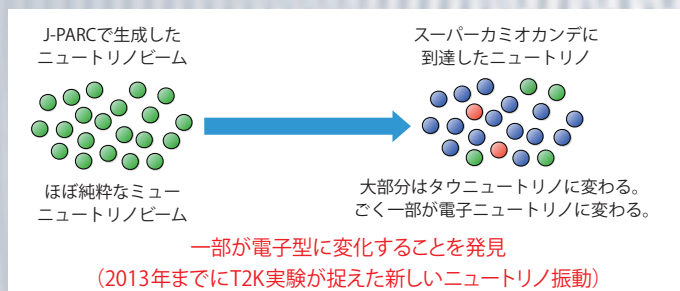
ニュートリノの「CP対称性の破れ」

ニュートリノにおいて「CP対称性の破れ」が起きている場合、ニュートリノと反ニュートリノではニュートリノ振動の起きる確率に違いが生じます。特に $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動においては大きな違いが表れると考えられています。そのため、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の発見により、ニュートリノの「CP対称性の破れ」の探索が可能となり、T2K実験はその解明にむけて研究を続けています。

T2K実験を行う国際共同研究グループには、国内外の約500人の研究者が参画するなど、ニュートリノ研究を進める世界的拠点となっています。

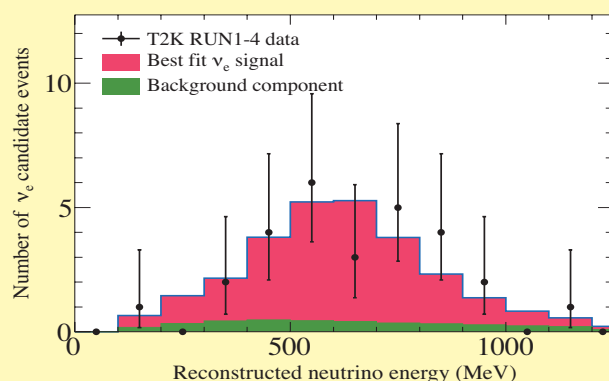


加速器によるニュートリノビーム生成の模式図



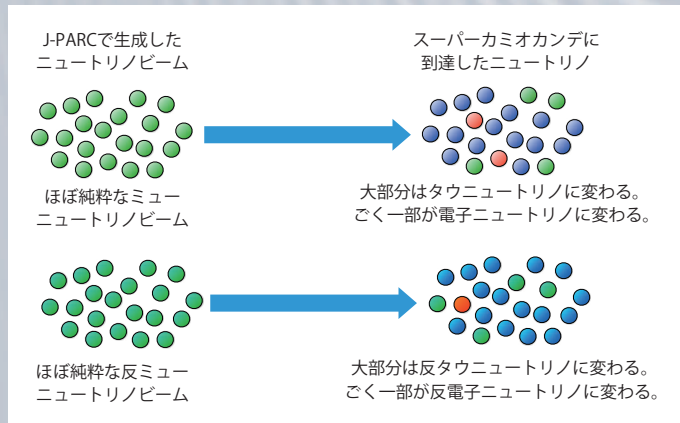
一部が電子型に変化することを発見
(2013年までにT2K実験が捉えた新しいニュートリノ振動)

T2K実験が直接検出したミュオン型から電子型へのニュートリノ振動
「電子ニュートリノ出現」の模式図



観測された28個の電子生成事象のニュートリノエネルギー分布。データ(黒点)は、予想される背景事象(緑)に電子型ニュートリノ出現現象(赤)を加えると非常によく再現されることがわかります。

解析の結果、背景事象のみの統計的な揺らぎによって偶然に起こる確率は1兆分の1以下しかないと明らかとなりました。



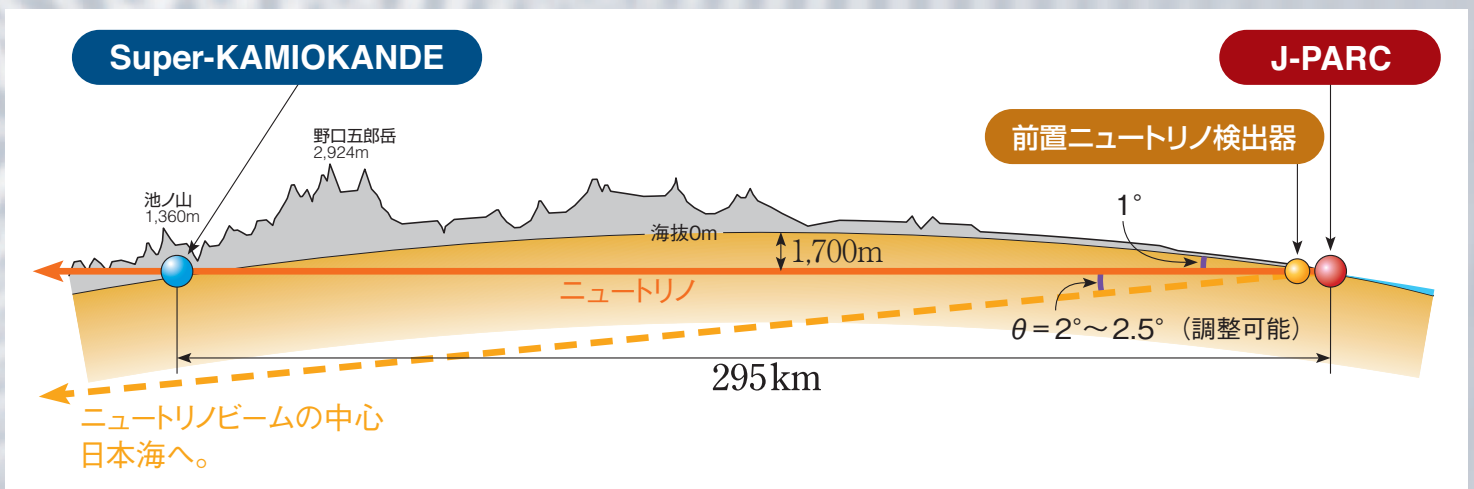
電子ニュートリノ出現事象を用いた「CP対称性の破れ」の探索。 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動をニュートリノと反ニュートリノの場合で比べることにより、「CP対称性の破れ」の検証を行います。

日本列島をまたいで配置されるT2K長基線ニュー



T2K実験では、J-PARCニュートリノ実験施設で発生させた世界最高強度のニュートリノビームをスーパーカミオカンデの方向に発射します。ニュートリノは鉄もコンクリートも岩盤もあつてなきが如くに通りぬけ、約1ミリ秒後に295kmはなれた神岡町に到達し、その中のごく一部がスーパーカミオカンデで観測されます。

ニュートリノビームはJ-PARC内の前置検出器を用いても観測されているので、スーパーカミオカンデの観測結果と比較することで、ニュートリノが飛行中に別の種類に変わる「ニュートリノ振動」の研究が可能となります。

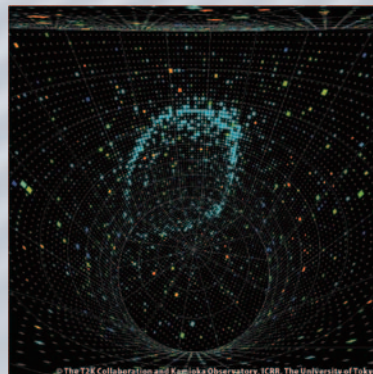


Super-KAMIOKANDE

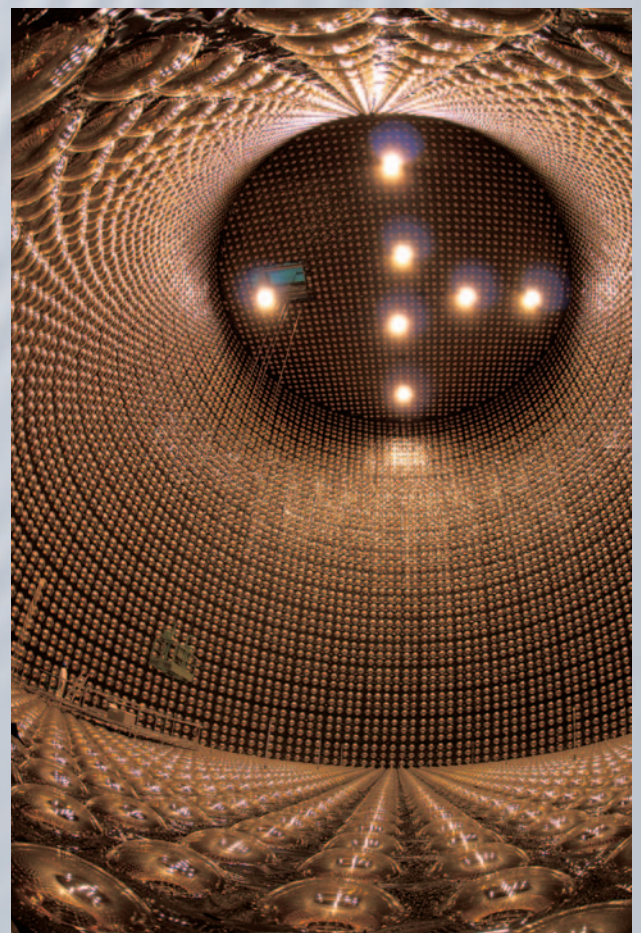
スーパーカミオカンデは、岐阜県飛騨市、神岡鉱山の地下1000mにある東京大学宇宙線研究所の巨大なニュートリノ観測装置です。1996年4月から観測を開始し、宇宙から飛来するニュートリノの観測を続けています。装置は直径39.3m、高さ41.4mの水槽に5万トンの純水をたくわえ、11129本の高感度光検出器(光電子増倍管)を装着、水中でニュートリノが稀に反応する際に発生する微弱なチェレンコフ光を検出することによりニュートリノの種類、飛来方向とエネルギーを決定できます。



スーパーカミオカンデで使用されている光電子増倍管。世界最大、直径約50cm。

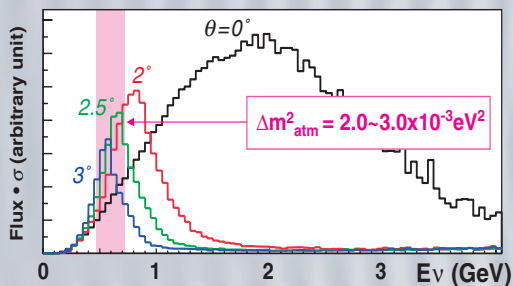


T2K実験で世界に先がけて観測された電子ニュートリノ出現現象の候補(2010年5月)



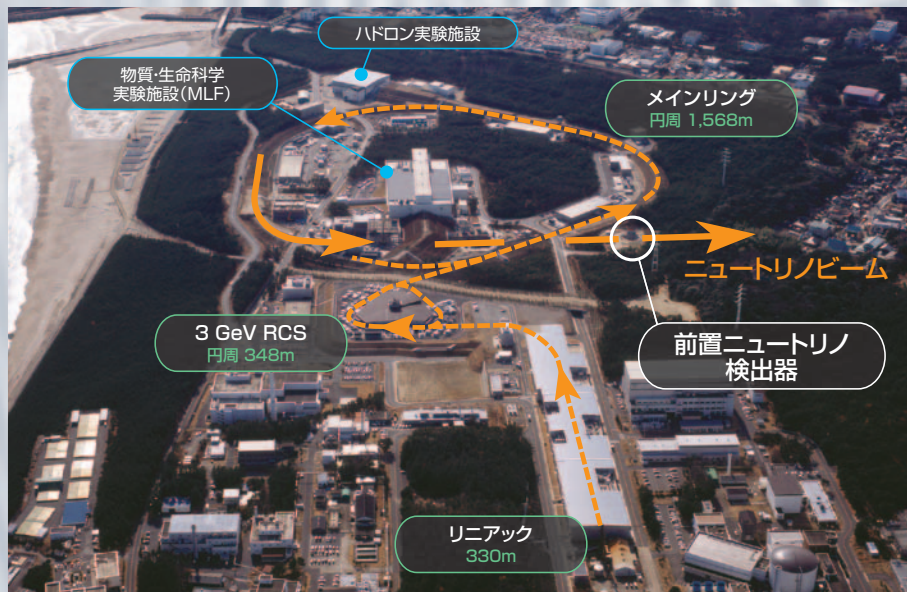
トリノ振動実験の実験装置群

大強度陽子加速器施設 J-PARC



オン軸シスビーム($\theta=0^\circ$)と比較したオフ軸シスビーム($\theta=2^\circ\sim 3^\circ$)のエネルギー分布

J-PARCで生成されるニュートリノビームは広がりを持っています。ビームの中心軸をスーパーカミオカンデの方向より僅かに下に向けてすることで、神岡に到達するニュートリノのエネルギーをより低く、分布の幅をより狭くすることができます。J-PARCニュートリノ実験施設は、世界に先駆けてオフ軸シスビームを生成利用する施設として設計開発されました。



J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) とは、平成13年より高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で茨城県東海村に建設した陽子加速器施設と利用施設群の総称です。

J-PARCでは、陽子をリニアックで加速後、3GeVシンクロトロン(RCS)を経てメインリング(MR)に送り込みます。陽子をキッカーとよばれる電磁石により内向きに蹴りだし神岡の方向に向けた後、標的に衝突させニュートリノビームを生成、スーパーカミオカンデに向けて発射します。

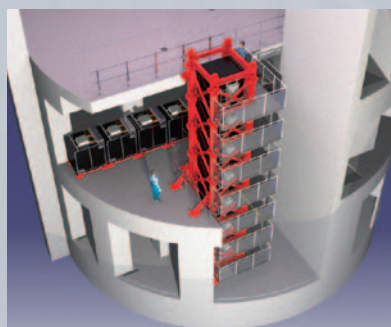
前置ニュートリノ検出器

前置検出器は、標的の下流280mの位置にある、深さ33.5m、直径17.5mの実験ホール(ニュートリノモニター棟)内に設置されています。

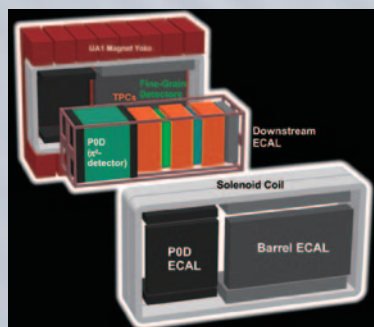
前置検出器は、ビーム中心におかれている「オン軸シス検出器 INGRID」と、神岡の方向におかれている「オフ軸シス検出器」の独立した2つの検出器から構成されています。

前者はニュートリノビーム中心の安定性をモニターし、後者はニュートリノビームのエネルギー分布やビーム中の電子ニュートリノ成分の測定を行います。

オフ軸シス検出器を取り囲む電磁石はCERNの陽子-反陽子衝突型加速器でのUA1実験のために1979年に製作され、1983年にWボソン粒子とZボソン粒子の発見に貢献したものです。



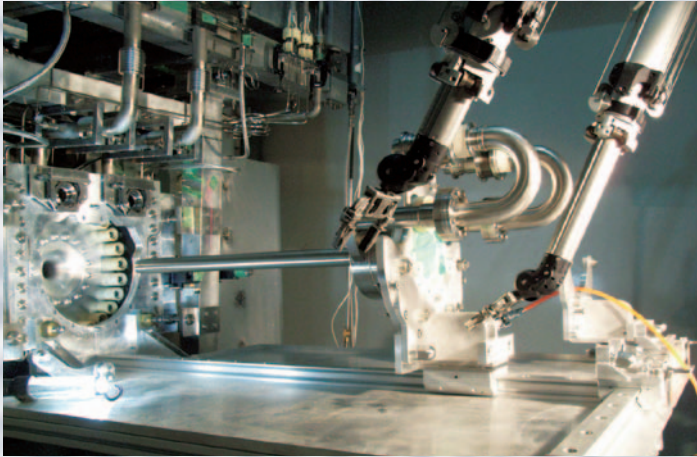
オン軸シス検出器



オフ軸シス検出器

世界最高強度のニュートリノビーム生成を実現する

J-PARCのメインリングからキッカーと呼ばれる電磁石を用いて蹴り出された陽子ビームは、多数の常伝導電磁石や超伝導電磁石、ビームモニターを軌道上に配列した一次ビームラインを通して西向きに曲げられ、ターゲットステーション内のグラファイト製標的に衝突します。陽子ビームが標的に衝突すると、多数のパイ中間子が生成されます。このパイ中間子を電磁ホーンと呼ばれる特殊な電磁石によって前方に収束させた後、ディケイボリュームと呼ばれる長さ100mのトンネルに入射し、飛行中にニュートリノとミュオン粒子の対に崩壊させます。ニュートリノと一部のミュオン粒子以外の粒子は全てビームダンプで吸収されてしまい、実験施設の外には出て行きません。



標的

マニピュレータで第一ホーン内管の中心に挿入されているのがパイ中間子を作り出す標的です。標的はグラファイト製で、グラファイト(中)とチタン合金(外)の2重の鞘に覆われています。その隙間にヘリウムガスを流して、発生する熱を冷却する構造です。運転時、中心部の温度は、約700℃にもなります。



電磁ホーン(第一ホーン)

電磁ホーンはアルミニウムの管が二重になった装置で、32万アンペアのパルス電流により2テスラの磁場を内外管の間に発生させ、パイ中間子を前方に収束させます。T2K実験では3台の電磁ホーンが使われます。

295km先 スーパーカミオカンデへ

To Super-Kamiokande

ニュートリノモニター棟(NM)
ミュオンモニター棟



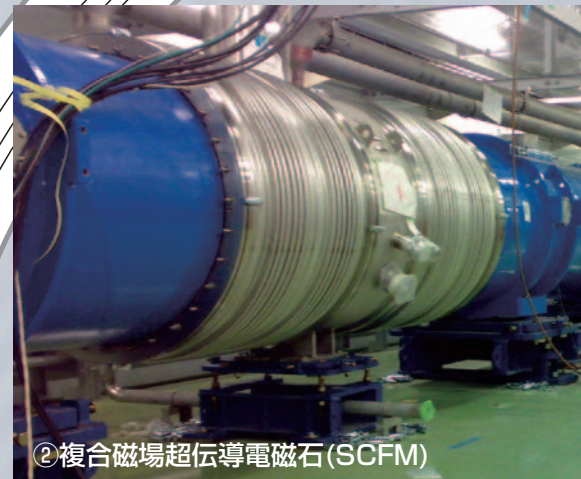
⑥ビームダンプのインストール

ビームライン最下流部には、グラファイトブロックを用いたビームダンプが設置され、標的に反応しなかった陽子等を吸収し、発生する熱や放射線を遮断します。



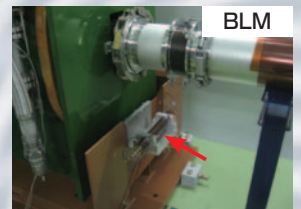
⑤ディケイボリューム

約6mの厚さのコンクリートで覆われたトンネルの内部には、2次粒子により発生する熱を冷却するための水冷配管が敷き詰められています。

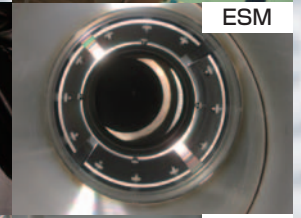


②複合磁場超伝導電磁石(SCFM)

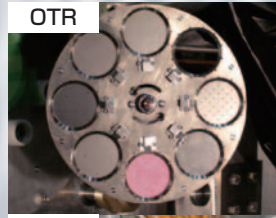
メインリングから射出された陽子ビームを神岡の方向に曲げるアーク部には、超伝導電磁石システムが使われます。長さ3.3m、二極磁場最大2.6テスラ、四極磁場勾配最大18.6テスラ/mの二極/四極複合磁場超伝導電磁石(SCFM)28台から構成されます。これらの磁石を超伝導状態にするために、絶対温度4.5度で2キロワットの冷凍能力を持つヘリウム冷凍機が設置されます。



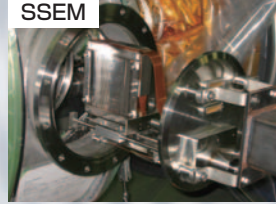
BLM



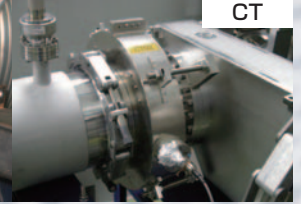
ESM



OTR



SSEM

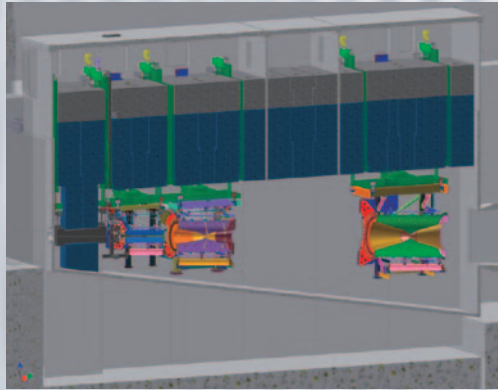


CT

ビームモニター

一次ビームラインには、ビームの強度・位置・形状をモニターする多数のビームモニター装置(CT・ESM・SSEM・BLM)が設置され、メインリングから取り出される陽子ビームを漏れなく標的まで送り込みます。また、標的の直前にもビーム形状をモニターするOTRが設置されています。

J-PARCニュートリノ実験施設

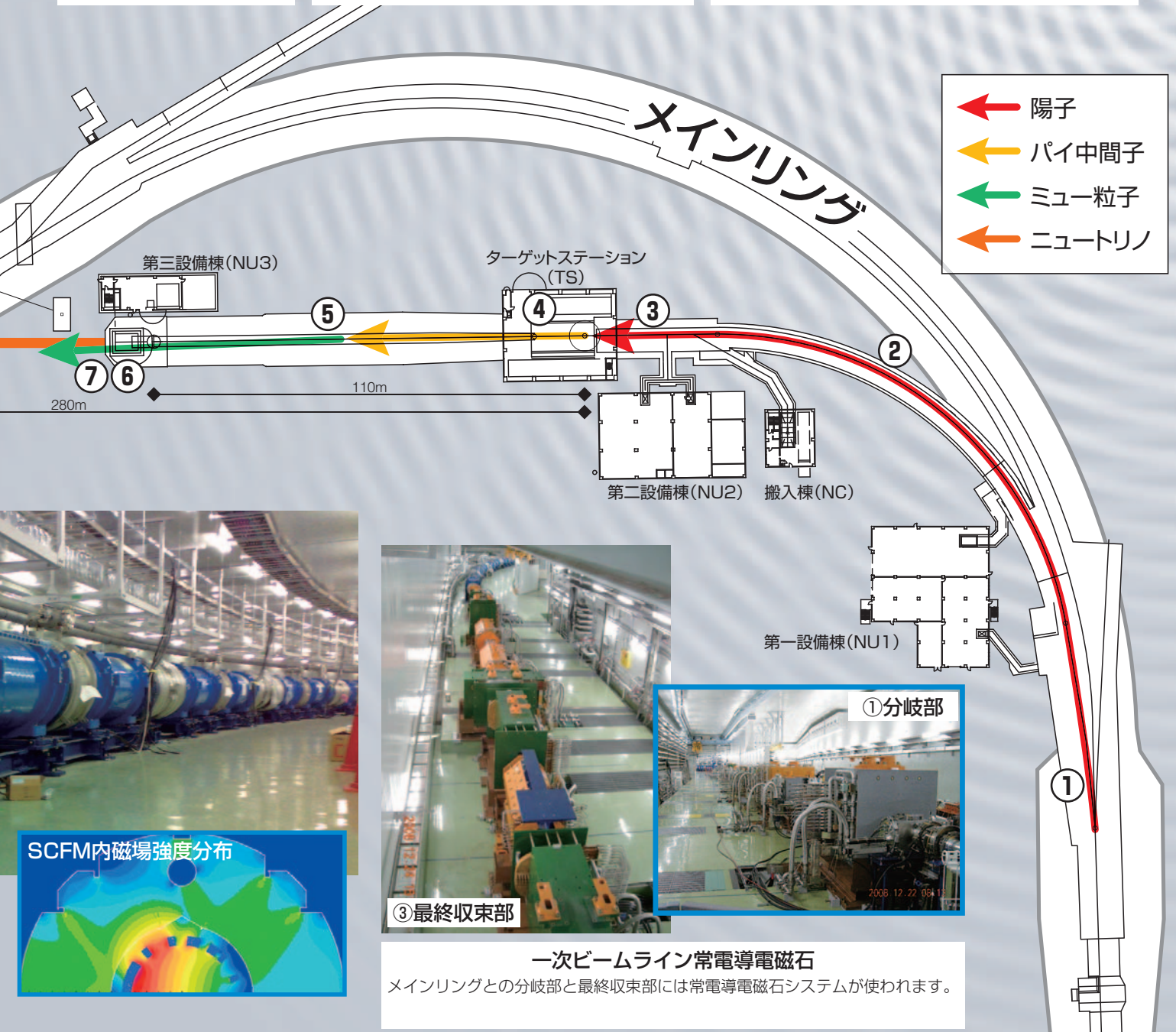


⑦ミューオンモニター

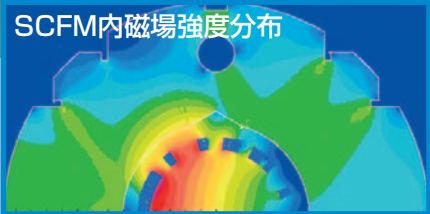
ミューオンモニターは、ニュートリノとともに生成されたミュー粒子を測定することにより、間接的にニュートリノビームの方向およびその安定性を監視するための測定器です。

④ターゲットステーション(TS)

ターゲットステーションの内部には、ディケイボリウムと一体の、体積1500m³の巨大なヘリウム容器が建設されています。3台の電磁ホーン、ホーンを保護するパッフルなどがその中に設置されています。これらは放射線を遮蔽する鉄やコンクリートによって、厳重に覆われています。



- ← 陽子
- ← パイ中間子
- ← ミュー粒子
- ← ニュートリノ



③最終収束部

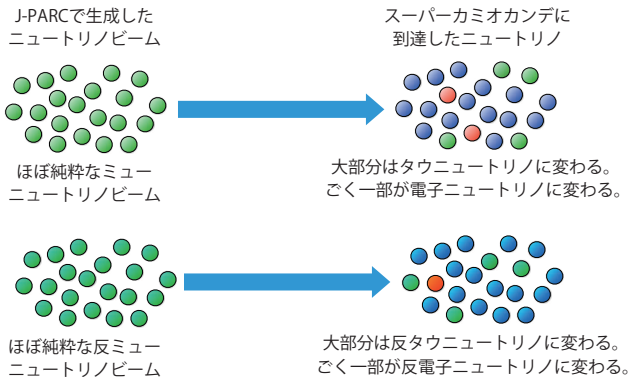


①分岐部

一次ビームライン常電導電磁石
メインリングとの分岐部と最終収束部には常電導電磁石システムが使われます。

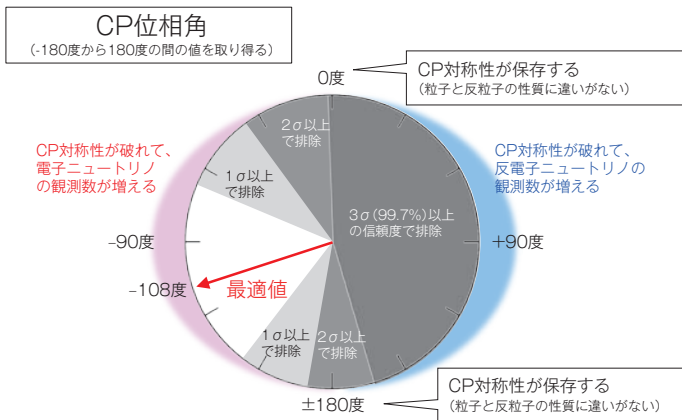
ニュートリノの「CP対称性の破れ」 解明への挑戦

T2K実験グループは、「ニュートリノと反ニュートリノの振る舞いの違い (= CP対称性の破れ)」の検証を行うため、2014年から反ニュートリノビームを用いた実験を開始しました。2018年までに取得したデータによって、CP対称性の破れの大きさを決める量である「CP位相角」に大幅な制限を与えることに世界で初めて成功しました。また、得られた結果はCP対称性の破れを95%の信頼度で示唆しています。ニュートリノの未解明の性質の一つである、粒子と反粒子が異なる振る舞いをするかどうかという問題に大きく迫る成果です。



実験データ	予測される数 (CP対称性の破れがない場合)	検出された数
ニュートリノ	68	90
反ニュートリノ	19	15

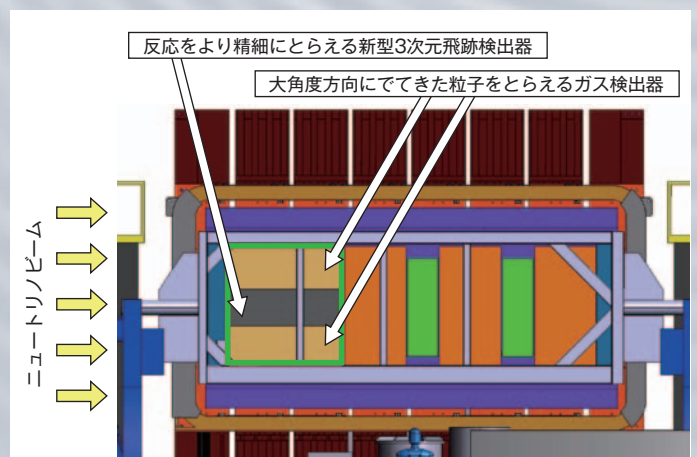
(注)「CP対称性の破れ」がない場合の予想数が異なるのは、電子ニュートリノと反電子ニュートリノが同じ数通過しても、スーパーカミオカンデ内で反応を起こす反応確率に差があるため。



CP対称性が破れていると、ニュートリノ振動現象のミュー型から電子型への変化確率に、ニュートリノと反ニュートリノで違いが生じます。破れの大きさを決める量はCP位相角と呼ばれ、-180度から180度の値を取り得ます。今回の実験データで検出された数と予測された数を比較してCP位相角を測定した結果、世界で初めてCP位相角に統計的信頼度99.7% (3σ)で強い制限がつけられました(左図)。さらに測定を続けることでCP位相角の取り得る範囲から0度と180度を99.7%の統計的信頼度で排除できると、CP対称性の破れを99.7%の信頼度で示すことができます。

「CP対称性の破れ」の発見を目指す将来計画

T2K実験グループは、前置検出器を改良して測定精度を高めるとともに、さらにデータを蓄積することで、CP対称性の破れの検証を進めていきます。J-PARCでは、より大強度のニュートリノを生成するために、加速器およびニュートリノ実験施設の性能向上に着手しています。さらに次世代の実験として、スーパーカミオカンデの約10倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ実験が計画されています。ハイパーカミオカンデ実験では、増強されたJ-PARCニュートリノビームを測定することにより、CP対称性の破れの決定的証拠を捉えるとともにCP位相角の精密な測定が可能となります。これらの研究によって、素粒子の性質や、宇宙から反物質が消えた謎の理解が進むと期待されます。



改良される前置ニュートリノ検出器 (オフアクシス検出器)。上流側を新たな測定器に置き換えてニュートリノの反応を精密に測定することで、より高精度な実験を実現します。