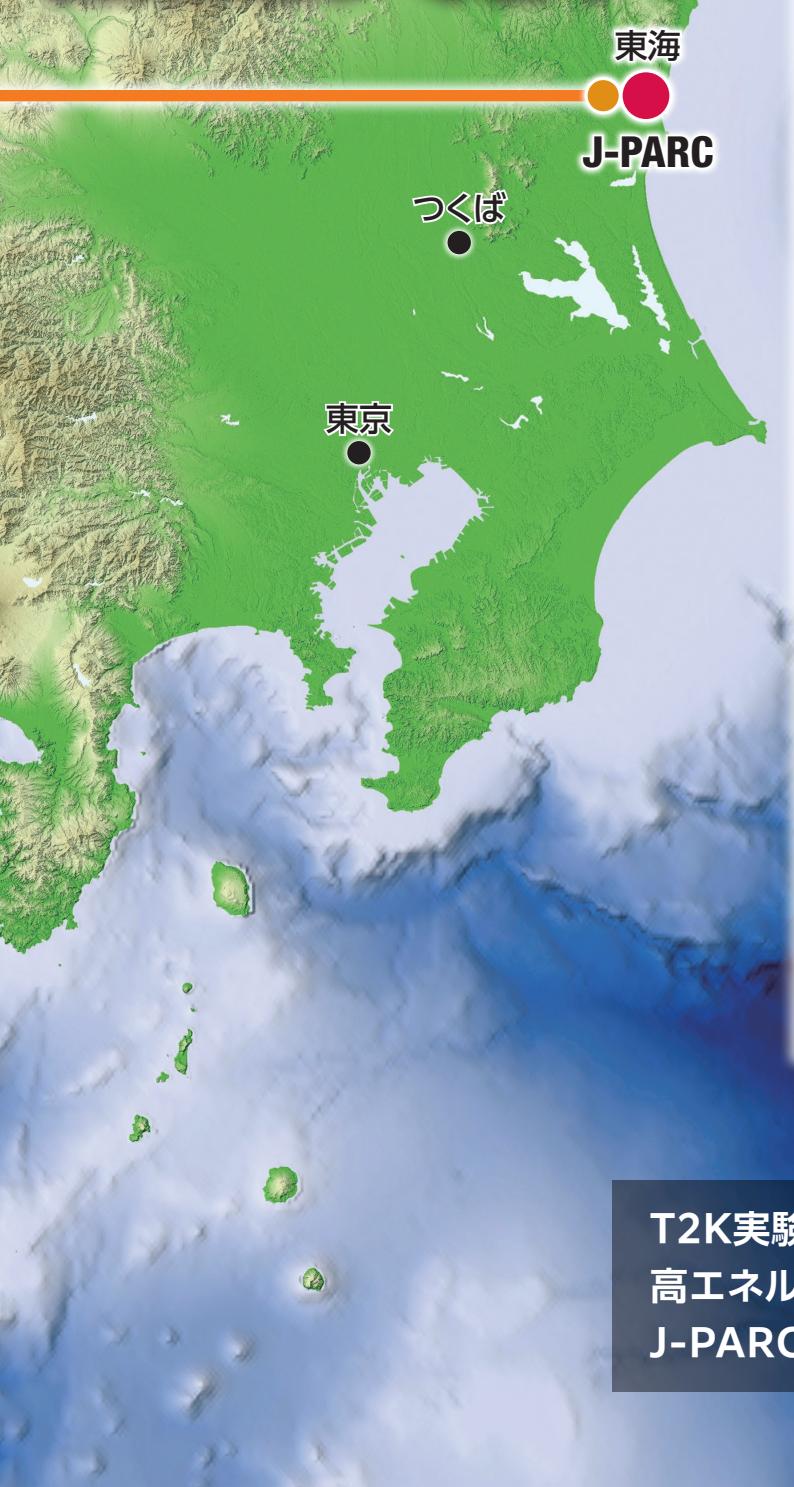


T2K(Tokai-to-Kamioka) long-baseline
neutrino-oscillation experiment

東海一神岡間 長基線ニュートリノ 振動実験



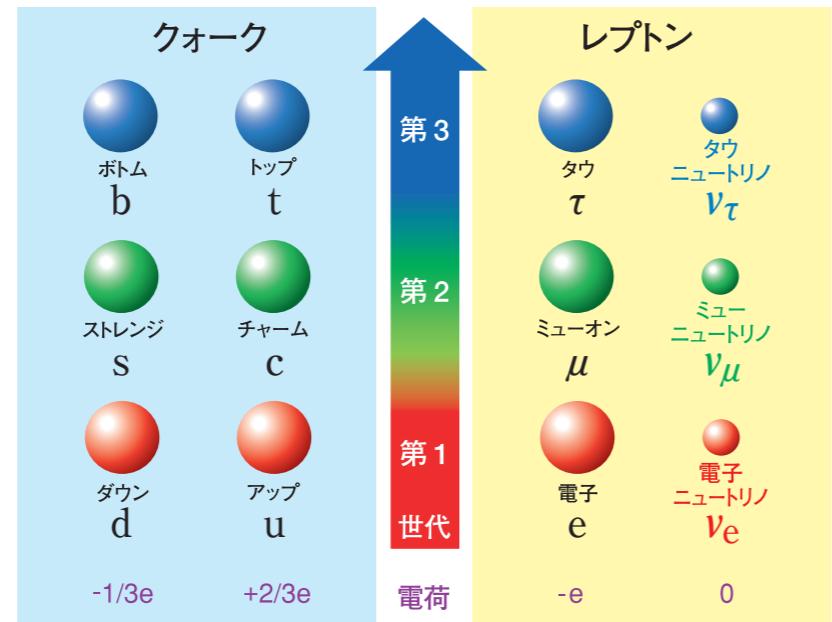
T2K実験グループ
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所
J-PARCセンター

ニュートリノ振動と長基線ニュートリノ振動実験

ニュートリノとは？

ニュートリノとは電気的に中性で、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)あり、またそれぞれの反ニュートリノがあることが知られています。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。

自然界をかたちづくっ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。



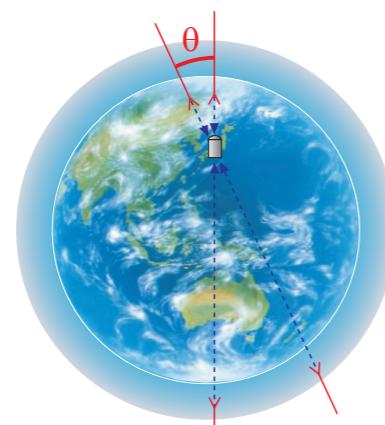
ニュートリノ振動とは？

3世代あるニュートリノが飛んでいるうちに互に入れ換わることをニュートリノ振動といいます。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、距離と共にあります。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・ニュートリノにもなります。これを繰り返すので、ニュートリノ振動と名付けられました。ニュートリノ振動はニュートリノが質量をもち、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質量と、世代間の混合を調べる唯一の方法です。

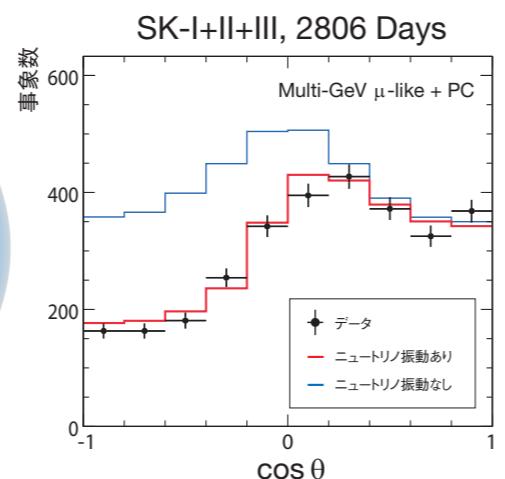
T2Kニュートリノ振動実験が発見を目指す3世代間のニュートリノ振動現象の模式図。

スーパー・カミオカンデによるニュートリノ振動の発見

ニュートリノ振動の発見は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ました。スーパー・カミオカンデで観測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よりも有意に少ない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あると考えられます。ニュートリノに微小な質量があることを世界で初めて実験的に証明したことになります。



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い。



加速器を使ったニュートリノ振動研究

スーパー・カミオカンデのニュートリノ振動の発見を受けて、2000年頃からニュートリノビームを使ったニュートリノ振動実験が行われるようになりました。加速器で作ったニュートリノビームを数百キロ離れた測定器で観測し、飛行中のニュートリノ振動を調べる長基線ニュートリノ振動実

験です。自分達でニュートリノ振動研究に最適なニュートリノビームを作り、生成直後のニュートリノを測定し、素性のよく分かったニュートリノを使って、より詳しくニュートリノ振動の研究しようと考えたのです。

K2K (KEK-to-Kamioka) 実験

世界で最初の長基線ニュートリノ振動実験はK2K実験です。茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)で作ったニュートリノビームを、250km離れた岐阜県飛騨市神岡町の50000トン水チエレンコフ検出器、スーパー・カミオカンデへ打ち込みました。実験は1999年から2004年まで行われ、大気ニュートリノで観測されていたニュートリノ振動を人工のニュートリノを用いて初めて証明しました。



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)	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)
1956	反電子ニュートリノを発見 (F.ライネス、C.コーワン)	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)
1962	ミュー・ニュートリノを発見 (L.レーダマンラ)	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
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)	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)
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)	2013	「電子ニュートリノ出現」の発見 (T2K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)	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
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)	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
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	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)
2000	タウニュートリノの存在を確認 (丹羽公雄らDONUT実験)		

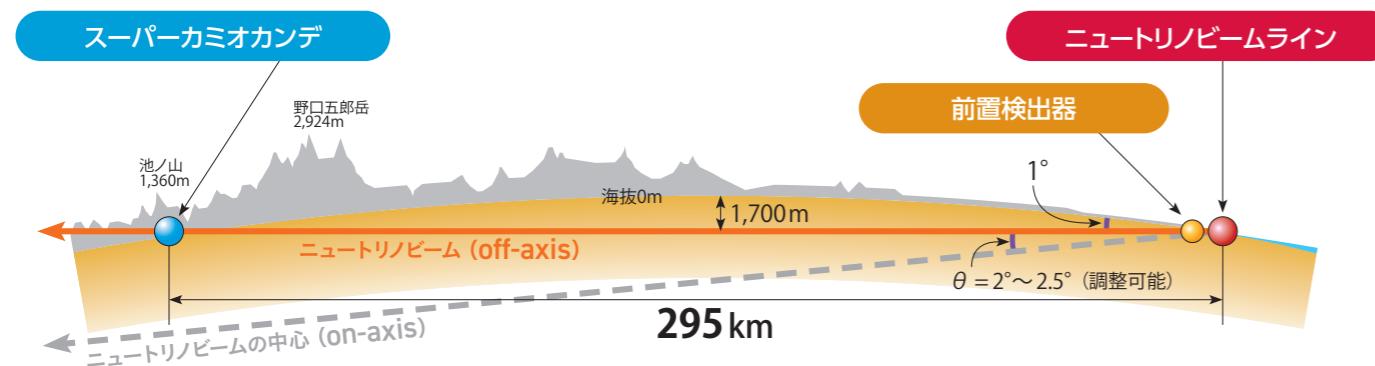
T2K実験を行う国際共同研究グループには、国内外の約500人の研究者が参画するなど、ニュートリノ研究を進める世界的拠点となっています。

T2K実験の概要

T2K実験は以下の3つによって行われている長基線ニュートリノ振動実験です。

- 1 東海でニュートリノビームを作る ニュートリノビームライン
- 2 東海でニュートリノビームを測定する 前置検出器
- 3 神岡でニュートリノビームを測定する スーパーカミオカンデ測定器

東海で観測されたできたばかりのニュートリノと、神岡で観測された295km飛行した後のニュートリノを比較することにより、飛行中に生じたニュートリノ振動現象を解明します。



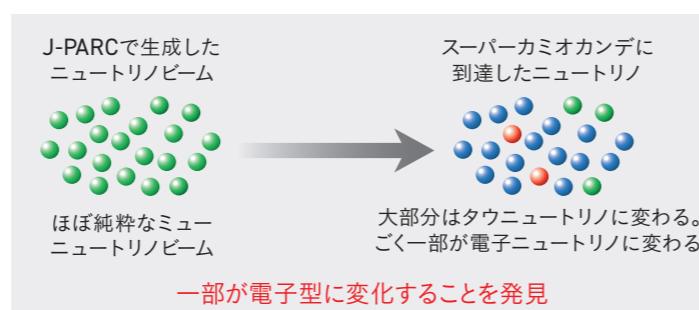
T2K実験による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

ミュ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。

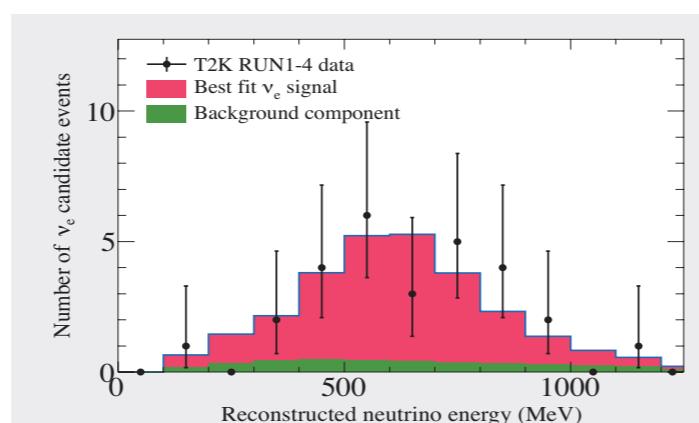
T2K実験グループは、2013年7月、ミュニュートリノが飛行中に電子ニュートリノに変化する「電子ニュートリノ出現」が存在することを示す決定的な測定結果が得られたことを発表しました。未発見であった最後の振動パターンが見つかったことで、ニュートリノ振動が3世代の間の振動現象であることが示されました。これにより、ニュートリノ振動の研究は、新たな段階に入りました。

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」が起きていればニュートリノと反ニュートリノで振動確率に違い生じるはずです。T2K実験は2014年からCP対称性の破れの発見を次の目標にして、反ニュートリノビームの運転を開始し、現在に至っています。



T2K実験が直接検出したミュー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



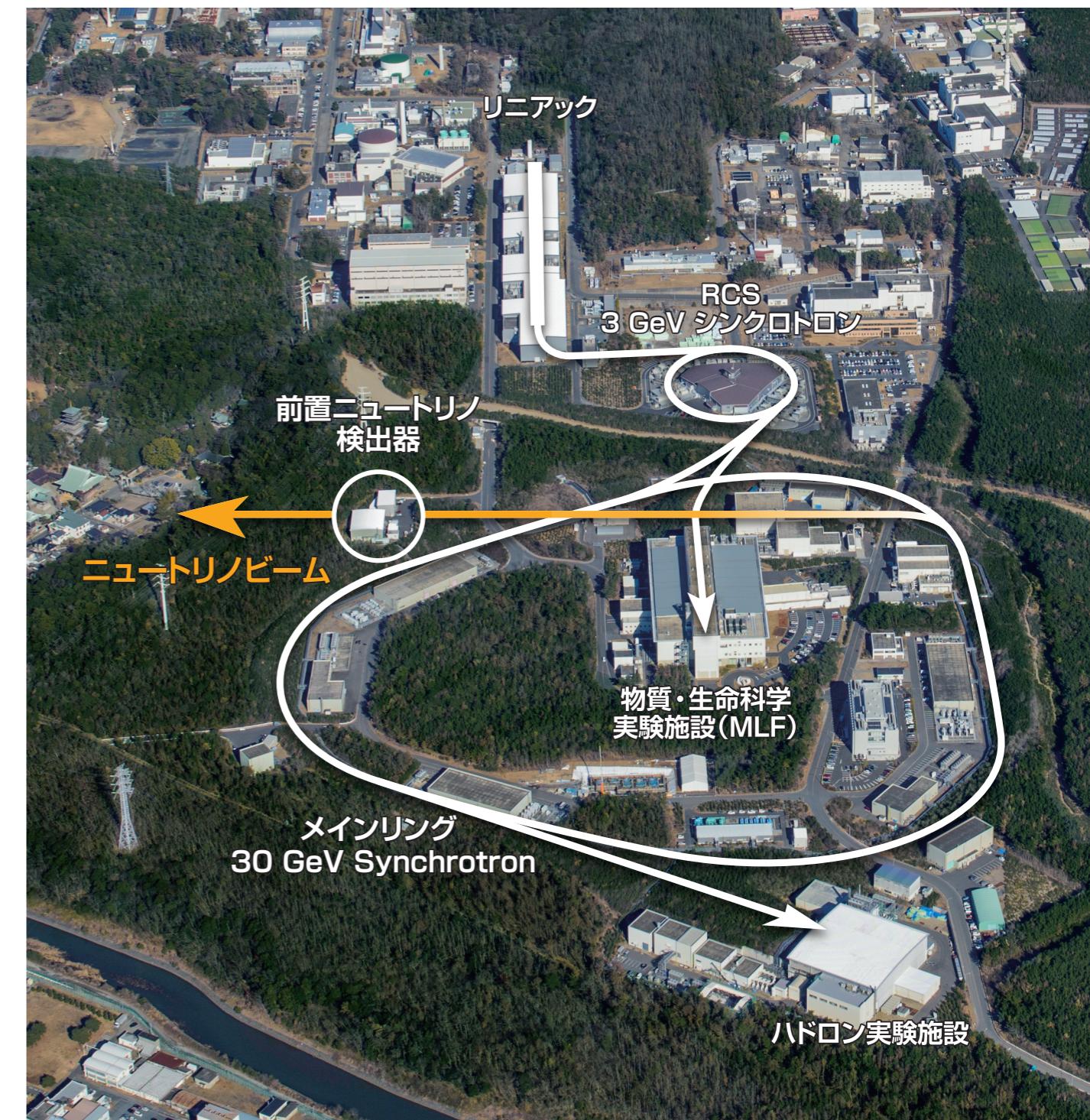
観測された28個の電子生成事象のニュートリノエネルギー分布。
データ(黒点)は、予想される背景事象(緑)に電子型ニュートリノ出現現象(赤)を加えると非常によく再現されることがわかります。

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以下しかないことが明らかとなりました。

大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、2001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。T2K実験のうちニュートリノビームラインと前置検出器はJ-PARCの施設の一部です。

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に向かって後、ニュートリノビームラインに供給します。



1 東海でニュートリノビームを作る ニュートリノビームライン



⑥ ミューオンモニタ

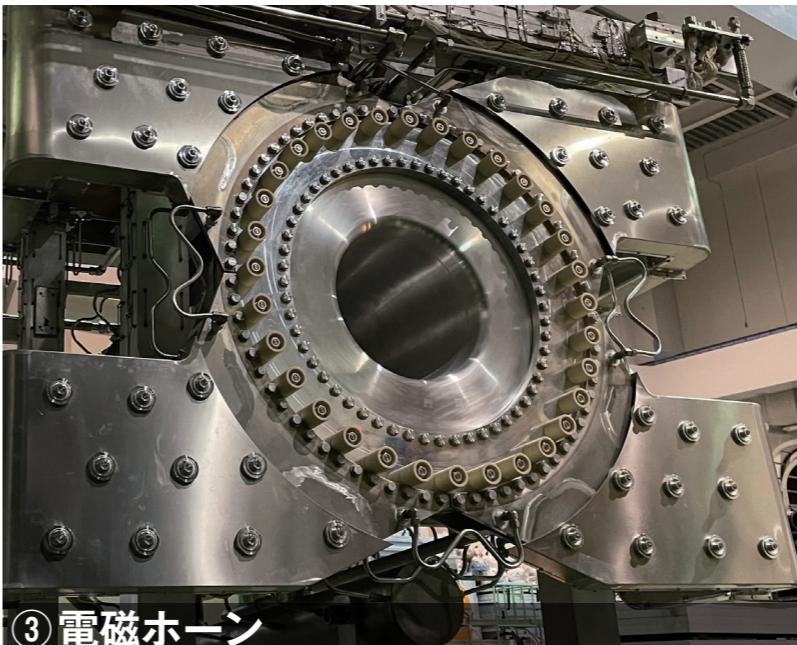
ミューオンモニタは、ニュートリノとともに生成されたミュー粒子を測定することにより、間接的にニュートリノビームの方向およびその安定性を監視するための測定器です。

⑤ ビームダンプ

ビームライン下流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ています。ニュートリノ以外の粒子はこのビームダンプに吸収されます。

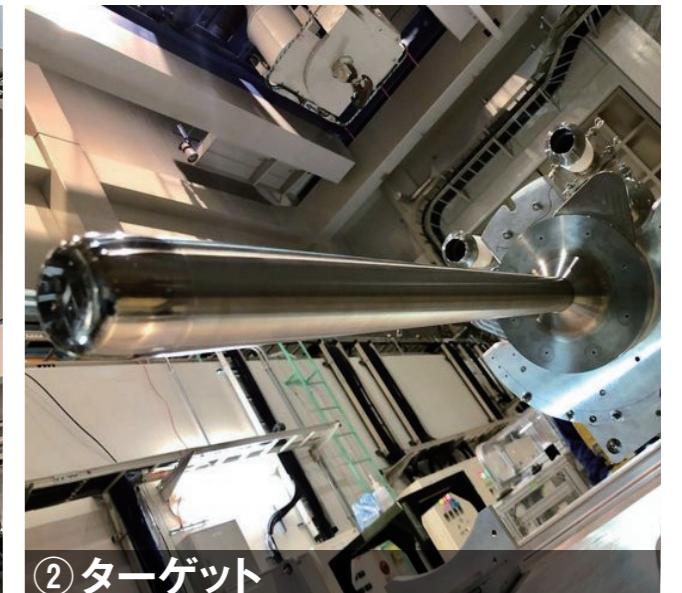
④ ディケイボリューム

パイ中間子は約 100m のディケイボリュームで崩壊し、ニュートリノが生成されます。



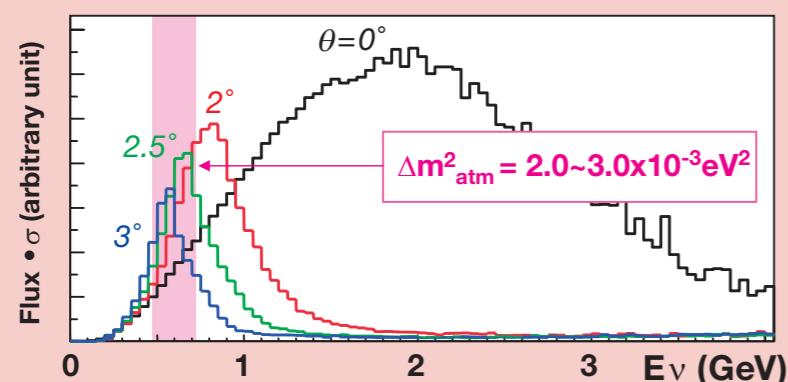
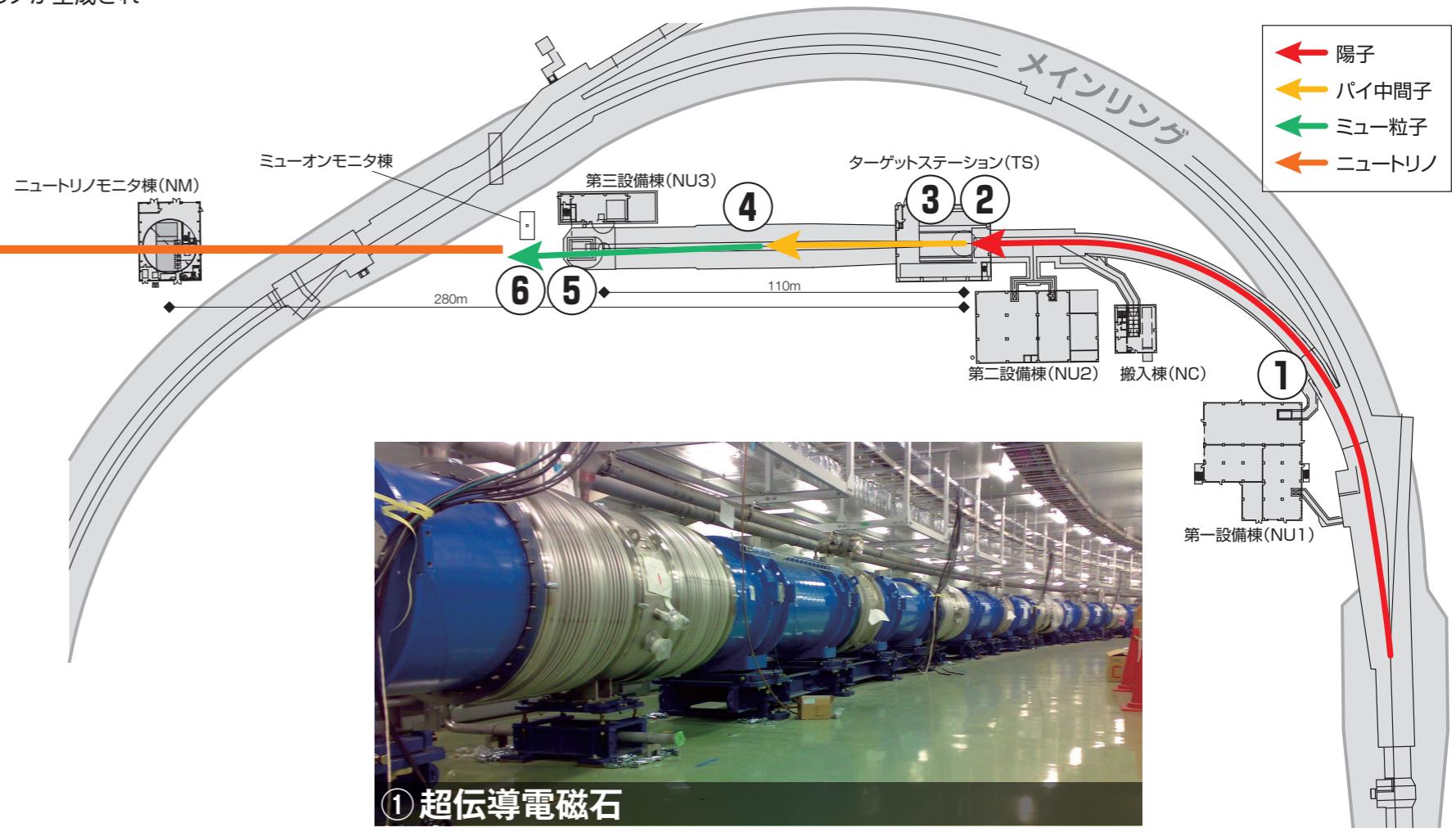
③ 電磁ホーン

電磁ホーンは 32 万アンペアのパルス電流により生じた強磁場でパイ中間子を前方に収束させる装置です。電流の方向を切替えることによりニュートリノビームと反ニュートリノビームの切替ができます。



② ターゲット

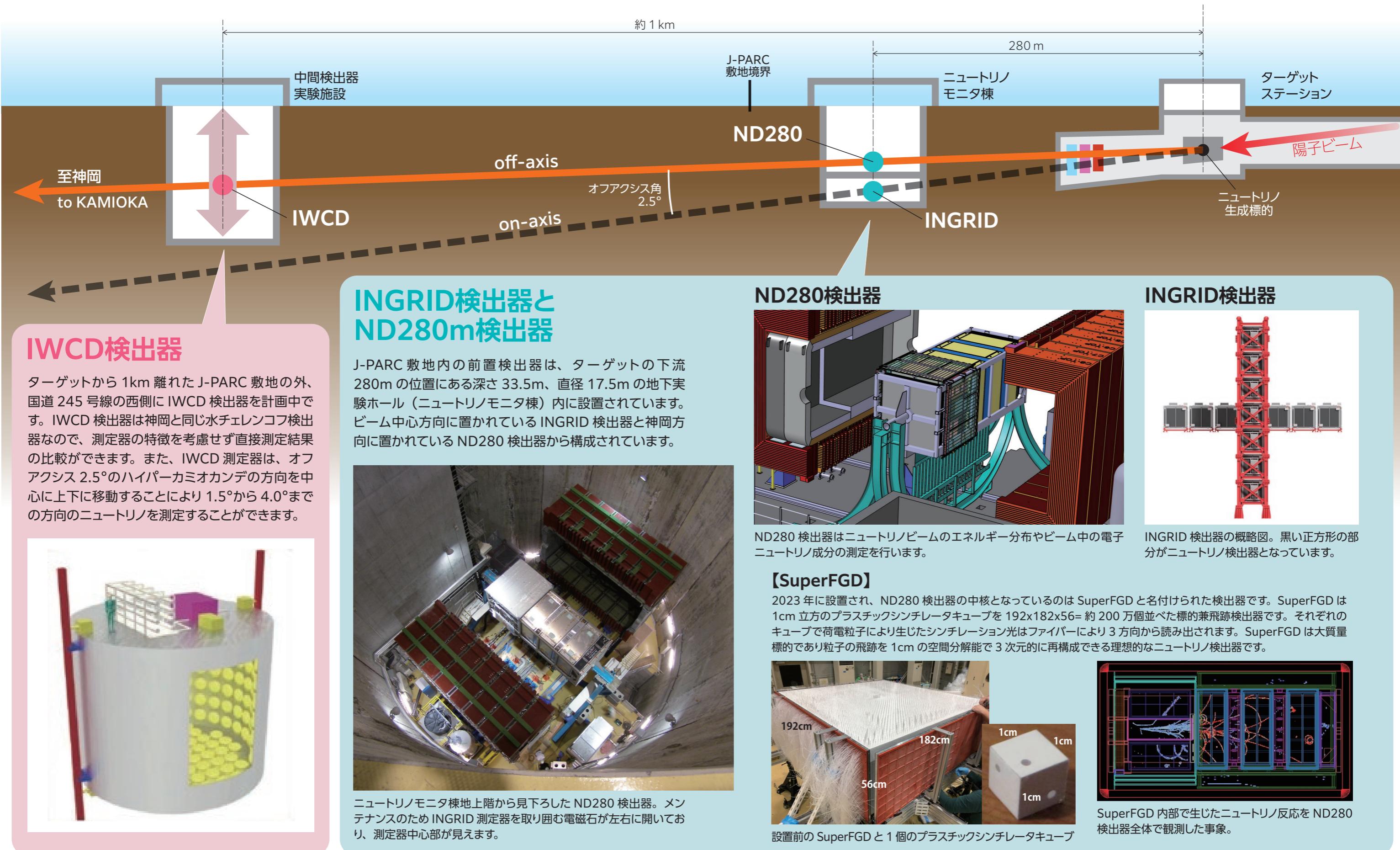
ターゲットステーションに導かれた陽子ビームは第一ホーンの内部に設置された黒鉛製のターゲットに衝突し、反応します。



オンアクシスビーム ($\theta=0^{\circ}$) と比較したオフアクシスビーム ($\theta=2^{\circ} \sim 3^{\circ}$) のエネルギー分布

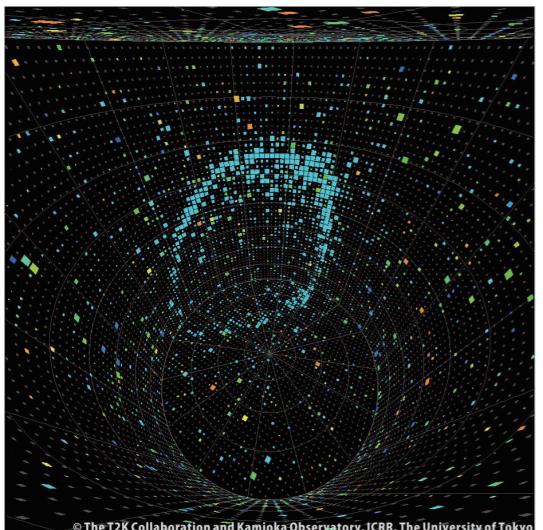
2 東海でニュートリノビームを測定する 前置検出器

生成された直後のニュートリノを測定するために、東海にはいくつかの測定器が設置され、また計画されています。

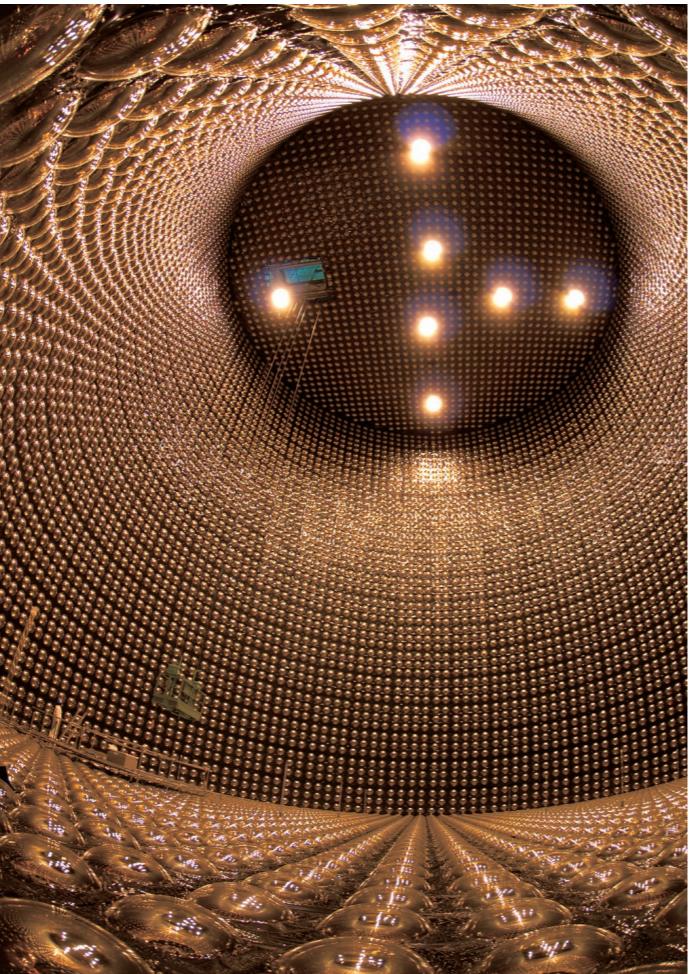


3 神岡でニュートリノビームを測定する スーパーかみおかんデ検出器

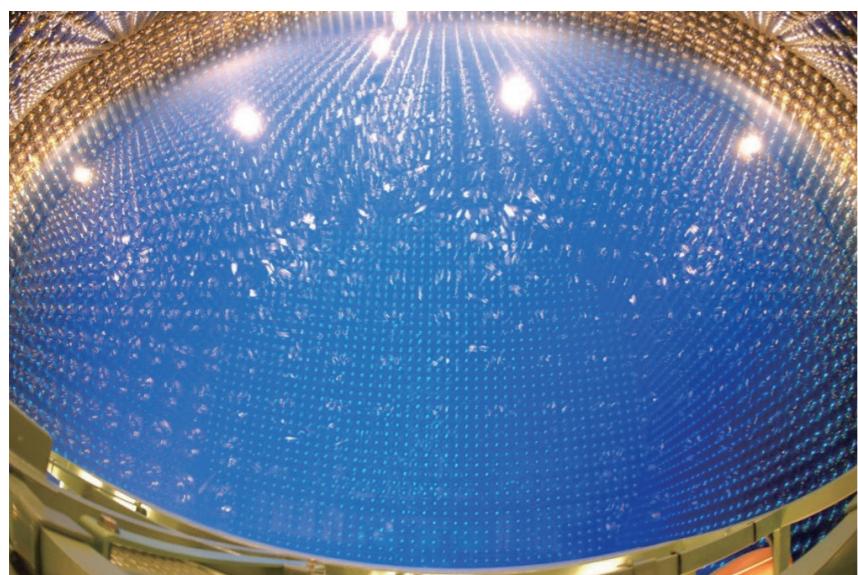
スーパーかみおかんデは、岐阜県飛騨市、神岡鉱山の地下1000mにある東京大学宇宙線研究所の巨大なニュートリノ観測装置です。1996年4月から観測を開始し、宇宙から飛来するニュートリノの観測を続けています。装置は直径39.3m、高さ41.4mの水槽に5万トンの純水をたくわえ、11129本の高感度光検出器(光電子増倍管)を装着、水中でニュートリノが稀に反応する際に発生する微弱なチレンコフ光を検出することによりニュートリノの種類、飛来方向とエネルギーを決定できます。



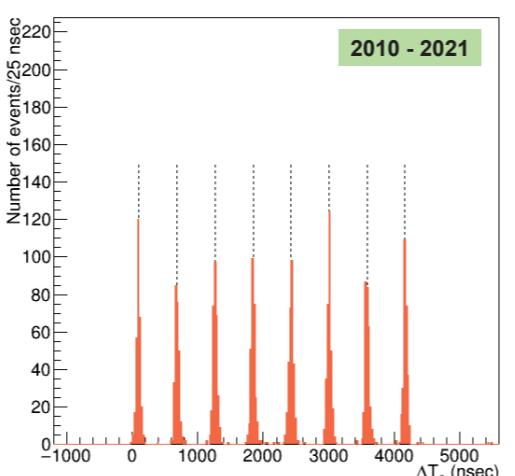
T2K実験で世界に先がけて観測された
電子ニュートリノ出現事象の候補



水を抜いた状態のスーパーかみおかんデ



90%以上超純水で満たした状態のスーパーかみおかんデ



ニュートリノ事象の時間分布。
ニュートリノビームの8バンチ構造が
確認できる。

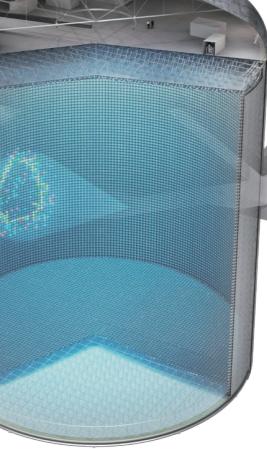
ハイパーかみおかんデ(建設中)

ハイパーかみおかんデは、現行のスーパーかみおかんデの後継実験で、岐阜県北部の神岡町の地下600mに設置される巨大水チレンコフ測定器です。直径68m、深さ71mのタンク中の超純水で発生するチレンコフ光を、スーパーかみおかんデの約2倍の感度・分解能・安全性を持つ約4万本の光電子増倍管でとらえます。有効質量はスーパーかみおかんデの8.4倍に相当します。J-PARCからのニュートリノビームを用いたニュートリノ振動実験もハイパーかみおかんデ実験に含まれます。2020年初めに実験計画が承認され、2027年の実験開始に向けて建設中です。2023年8月の時点では世界22カ国から500名以上の研究者が参加しています。



地下空洞とタンク

2021年5月からトンネルの掘削を開始しました。ドームと円筒部を合わせると直径69m高さ94mの大空洞となり、地下人工空洞としては世界最大規模です。2024年度の掘削工事完了、その後のタンク製作工事を経て光電子増倍管設置が始まります。



NIKKEN SEKKI

光電子増倍管

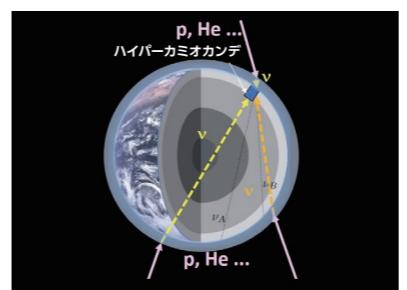
スーパーかみおかんデで使われた直径50cmの高感度光電子増倍管をさらに改良したもの(写真左)が使われます。年平均5000本のペースで製造され、タンクへの設置を待っています。2026年に全部で約20000本の光電子増倍管が完成する予定です。より時間精度を高めた「複眼」光センサー(写真右)も開発され、両方を組み合わせることで検出精度向上が期待されます。



ハイパーかみおかんデが目指す物理

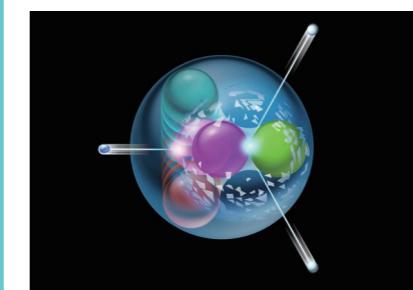
ニュートリノ振動の解明

J-PARCからのニュートリノビームと反ニュートリノビームに加えて、大気ニュートリノ、太陽ニュートリノを用いて3世代の間のニュートリノ振動を包括的に解明します。



陽子崩壊の観測

自然界に存在する相互作用のうち強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用を統一的に説明する「大統一理論」では陽子の崩壊が予言されています。世界初の陽子崩壊の発見と新たな素粒子物理学の枠組みの開拓を目指します。

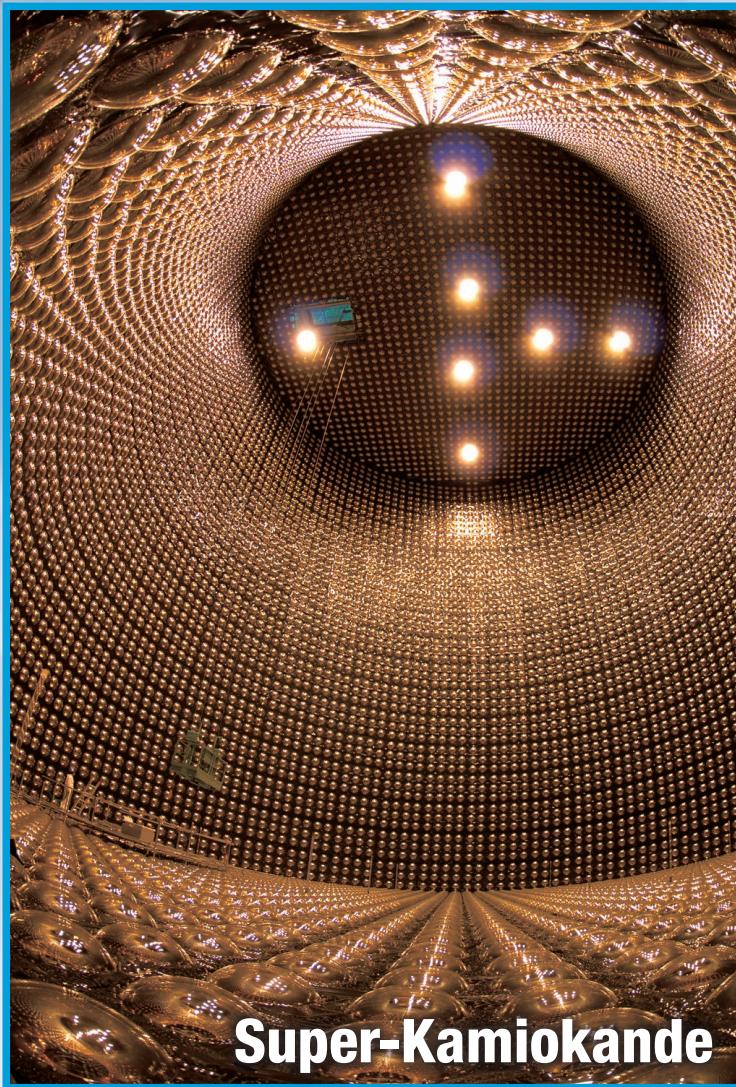


ニュートリノ天文学の発展

太陽ニュートリノ、超新星爆発からのニュートリノ、過去の超新星爆発ニュートリノ、中性子星等の高エネルギー天体からのニュートリノ等の観測により、宇宙の進化や歴史の解明、マルチメッセンジャー天文学の発展に寄与します。



Copyrights : Hamamatsu Photonics K.K. (光センサー)、J-PARC Center (航空写真)、東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設(その他)



T2K実験紹介ビデオ（約14分）がYouTubeにアップロードされています。
<https://www.youtube.com/watch?v=z1YYMchj6xw>

もしくは

T2K実験 KEK YouTube

検索

もしくは



T2K実験紹介パンフレット及びT2K実験の最新結果は以下からダウンロードできます。

https://j-parc.jp/documents/pdf/2024/T2K_202408_J-Low.pdf
https://j-parc.jp/documents/pdf/J-PARC_T2Kleaflets.pdf

もしくは



及び

