


最高強度ビームと精密測定で目指すニュートリノCP対称性の破れの発見

	研究代表者	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 坂下 健（さかした けん）	研究者番号:50435616
	研究課題 情報	課題番号：22H04943 キーワード：ニュートリノ、素粒子、宇宙、反粒子	研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

● 研究の全体像

なぜ、現在の宇宙には物質のみ存在して、反物質はないのか？ この宇宙が誕生したときには、粒子と反粒子が同じだけ存在したと考えられているが、その後、なぜか物質を作る粒子だけが残った。この宇宙を作るためには、粒子と反粒子で物理法則が違っている必要がある。つまり、CP対称性が破れている必要がある。素粒子の一種であるクォークでは、これまでの研究からCP対称性が破れていることがわかっている。しかし、クォークでのCP対称性の破れでは、この宇宙誕生の謎を説明することができず、未解決の問題である。一方で、最近の研究で、ニュートリノのCP対称性の破れが、宇宙の物質・反物質非対称を説明する可能性が指摘されており、ニュートリノがこの謎を解く最も有力な候補として、多くの素粒子研究者が注目している。本研究では、ニュートリノでCP対称性が破れているか、またその破れが宇宙の物質と反物質の非対称を生成するのに十分大きいのかを決定することを目指している。

● 研究の手法

本研究は、東海 to 神岡ニュートリノ振動実験T2Kで行う。T2K実験では、J-PARCで大強度のニュートリノビームを生成し、前置検出器とスーパーカミオカンデでニュートリノを高精度で測定して、295km飛行している間に量子力学的な波の干渉として起こるニュートリノの種類の変化（ニュートリノ振動）を観測する（図1）。CP対称性の破れは、ミュー型(μ)から電子型(e)に変化する確率をニュートリノと反ニュートリノで比較して探索する。この方法は、現在、ニュートリノCP対称性の破れを調べることのできる唯一の方法である。

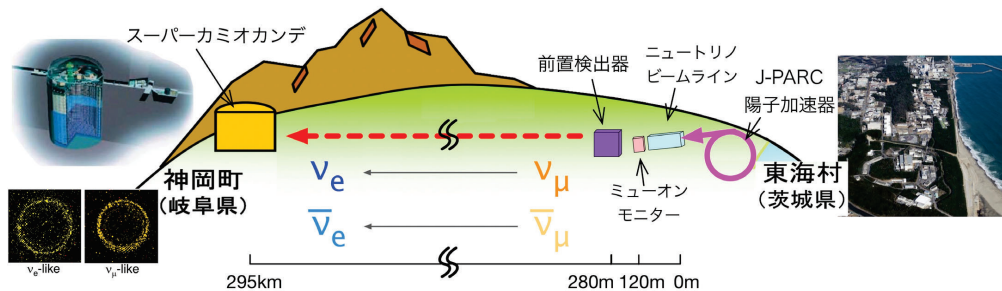


図1 T2K実験全体の概要図。

私たちは、2000年からT2K実験を計画し、J-PARC大強度陽子加速器、ニュートリノビーム生成ビームライン、前置検出器を建設し、2010年に実験を開始した。そして、2019年までのデータを解析して、信頼度95%でニュートリノCP対称性が破れているという“示唆”を得ている。この結果は総合科学雑誌ネイチャーに掲載され、また国内TVで特集が組まれるなど、科学全体や社会からも注目されている。

私たちはT2K実験において、人類が未経験の世界最高強度ニュートリノビーム(図2)を実現することで統計量を現在の3倍以上にして、さらに、その性質上とらえることが非常に難しいニュートリノを5%の精度で測定する方法(図3)を確立することで、ニュートリノCP対称性が破れていることを信頼度99.7%以上で示し、世界初の発見という金字塔を打ち立てることを目指す。

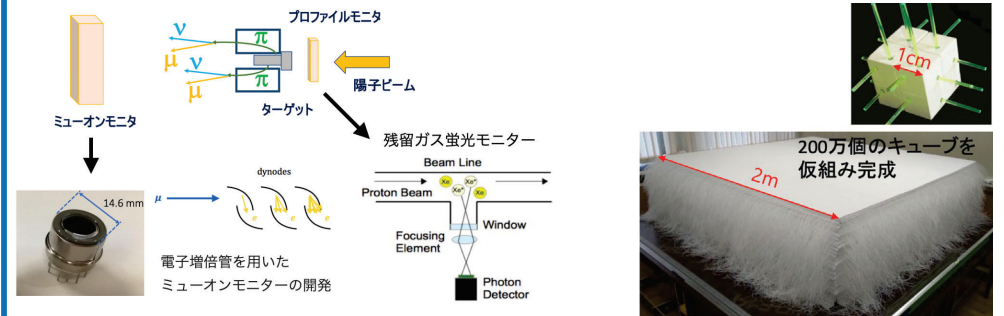


図2 世界最大強度のニュートリノビームを安定に生成するために新型の「陽子ビームモニター」と「ミュオンモニター」を導入する。

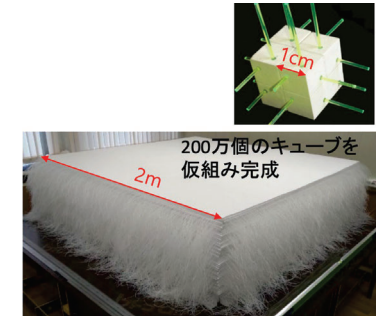


図3 ニュートリノを高精度に測定するために、具体的な方法の1つとして、写真のような1cm立方のシンチレータキューブを200万個ならべた新型検出機を導入する。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● 何をどこまで明らかにしようとするのか

三代目のニュートリノ種類と質量の関係は、3つの混合角とCP位相と呼ばれるパラメーターで表される。この20年の間に3つの混合角の値が求まり、残るCP位相の値がニュートリノCP対称性の破れの大きさを決める。CP位相の値が、 $\pm 90^\circ$ の場合には、ニュートリノCP対称性の破れが最大となり、ミュー型ニュートリノから電子型ニュートリノへ振動する割合は、ニュートリノと反ニュートリノの間で30%の違いがある。現在のT2K実験の結果はCP位相の値が -90° 付近にあることを示唆している(図4)。

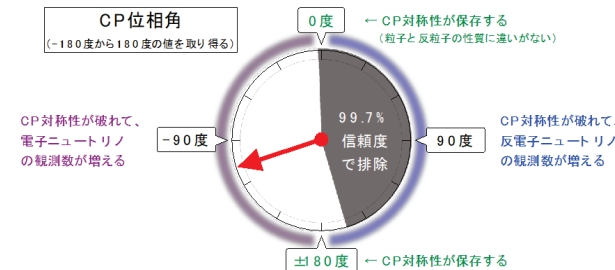


図4 これまでのT2K実験のデータから示唆されるCP位相の値（矢印）と99.7%の信頼度で排除された範囲（灰色塗りつぶし部分）。CP対称性が保存する位相はまだ99.7%の信頼度で排除されていない。

本研究ではその示唆をさらに深めて99.7%の信頼度でニュートリノCP対称性の破れの発見を目指す(図5)。CP位相が -90° から離れている場合には、ニュートリノCP対称性の破れの発見には至らないが、CP位相の範囲をこれまでの結果からさらに制限することで、ニュートリノ物理を記述する理論モデルの検証に貢献する。ニュートリノ質量のパターンについては、標準順序および逆順序と呼ばれる2つの可能性が、まだ決定されずに残っている。本研究で高度化したT2K実験のデータを他の実験のデータと組み合わせて解析することで質量順序を決定する。

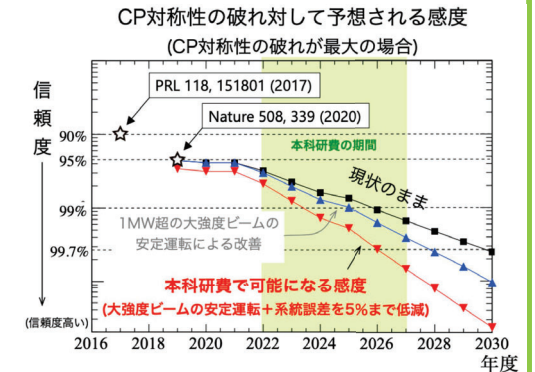


図5 CP対称性の破れに対して予想される感度。