



2020 年 4 月 16 日

慶應義塾大学
T 2 K 実験国際共同研究グループ

ニュートリノの「CP 位相角」が取り得る値を大きく制限 — 粒子と反粒子の振る舞いは異なるか？大きく前進する成果をネイチャー誌で発表 —

T 2 K 実験国際共同研究グループは、ニュートリノの CP 位相角が取り得る -180 度から 180 度の範囲から、おおよそ半分近くとなる -2 度から 165 度の領域を 99.7% の信頼度で排除することに成功しました。ニュートリノが空間を伝わるうちに別の種類のニュートリノに変化するニュートリノ振動という現象において、CP 位相角は「粒子と反粒子の振る舞いの違い」の大きさを決めています。ニュートリノの基本的性質を示す量の 1 つである CP 位相角は、これまで全く値がわかっていませんでしたが、世界で初めて制限を与えることに成功しました。

慶應義塾大学理工学部物理学科 西村康宏准教授らが推進する T 2 K 実験は、12 カ国から約 500 人が参加する国際共同研究で、大強度陽子加速器施設 J・P A R C から生成したニュートリノを 295 キロメートル離れた岐阜県飛騨市スーパーカミオカンデで観測しています。2018 年までに取得したデータを用いたこの研究成果は、2020 年 4 月 16 日に総合学術雑誌「ネイチャー」で掲載されました。

本研究と結果の詳細な情報については、以下をご覧ください。

東京大学宇宙線研究所

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/8798/> (日本語)

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/news/8799/> (英語)

高エネルギー加速器研究機構

<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2020/04/16/0000/> (日本語)

<https://www.kek.jp/en/newsroom/2020/04/16/0000/> (英語)

1. 本研究のポイント

- ・ニュートリノ振動現象において、粒子と反粒子の対称性の破れ具合を決める CP 位相角の値が取り得る領域に大幅な制限を与えることに世界で初めて成功
- ・ニュートリノの粒子と反粒子の性質に違いがあるかどうかの問題に大きく迫る成果であり、今後の測定精度を高めた検証が期待される

2. 研究背景

物質を構成する素粒子には、電荷の符号が異なる反粒子^{*1}が存在します。宇宙の始まりには、高いエネルギーの中で粒子と反粒子が同じ数だけ生まれましたが、現在は身の回りの物質が粒子のみで構成されています。宇宙に反粒子からなる反物質が存在しない理由として、C P 対称性^{*2}と呼ばれる電荷と空間に関わる基本的な対称性の破れ具合が絡むと考えられています。C P 対称性が破れていると、鏡の中のように空間が反転した世界で見せる反粒子の振る舞いは、こちら側の粒子の振る舞いと異なります。これまで、C P 対称性の破れは陽子や中性子の構成要素であるクォークと呼ばれる素粒子で見つかっていましたが、宇宙の成り立ちの起源を説明できる有力な仮説で、現在の宇宙の物質量を説明するには不十分な大きさです。そこで、電子の仲間であるニュートリノ^{*3}でのC P 対称性の破れの大きさが注目されています。T 2 K 実験^{*4}は、ニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動^{*5}現象を測定して、それらを比較することで、クォークとは異なるC P 対称性の破れを探索しています。

T 2 K 実験は2009年度に実験を開始し、2013年にミュー型ニュートリノがニュートリノ振動によって電子型ニュートリノに変化する「電子型ニュートリノ出現現象」の存在を世界で初めて発見しました。2014年からは反ミュー型ニュートリノの測定を開始し、C P 対称性の破れの検証を開始しました。2016年夏には、90%の信頼度でC P 対称性が破れている可能性を示しました。2018年夏には、その可能性を95%の信頼度に高めた結果を公表しました。T 2 K 実験では、まずC P 対称性の破れの発見を目指し、破れ具合を表すC P 位相角^{*6}の測定を目標として測定を続けています。C P 位相角は、ニュートリノが粒子と反粒子でどの程度異なるかを表す基本的な性質の1つで、これまでその値は全くわかっていませんでした。今回、T 2 K 実験では2018年までに取得した実験データを用いて解析を進め、C P 位相角の取り得る範囲を大きく制限する結果を総合学術雑誌「ネイチャー」で公表しました。

3. 研究内容・成果

T 2 K 実験では、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で大量のミュー型ニュートリノまたは反ミュー型ニュートリノを生成し、295 キロメートル離れた岐阜県飛騨市神岡にあるスーパーカミオカンデ検出器で測定しています。ニュートリノの一部は、295 キロメートルの飛来中にニュートリノ振動現象によりミュー型から電子型に変化します。

ニュートリノ振動現象においてC P 対称性が破れていると、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の間で違いが生じます。破れの大きさを決める量はC P 位相角と呼ばれ、-180 度から 180 度の値を取り得ます。0 度または 180 度であった場合にはC P 対称性が保存し、それ以外の角度ではC P 対称性が破れていることになります。C P 位相角が-90 度の場合には、電子型ニュートリノへの変化確率が最大に、反電子型ニュートリノへの変化確率が最小になります。90 度では逆になります。

今回、2018 年までに T 2 K 実験が取得したデータから、電子型のニュートリノが 90 個、反ニュートリノが 15 個観測されました。図 1 はスーパーカミオカンデで検出された電子型のニュートリノと反ニュートリノの観測例です。ニュートリノが反ニュートリノよりも観測されやすい特性を注意深く考慮した上で各C P 位相角での予想観測数と比べると、この観測結果はC P 位相角が-90 度である場合に予想される観測数（ニュートリノで 82 個、反ニュートリノで 17 個）に近く、C P 位相角が 90 度の場合の予想観測数（ニュートリノで 56 個、反ニュートリノで 22 個）とは大きく異なりました（図 2）。今回、C P 位相角の値を推定するための新たな統計的手法を取り入れ、C P 位相角の-2 度から 165 度の領域が 99.7%の信頼度で排除されることがわかりました（図 3）。

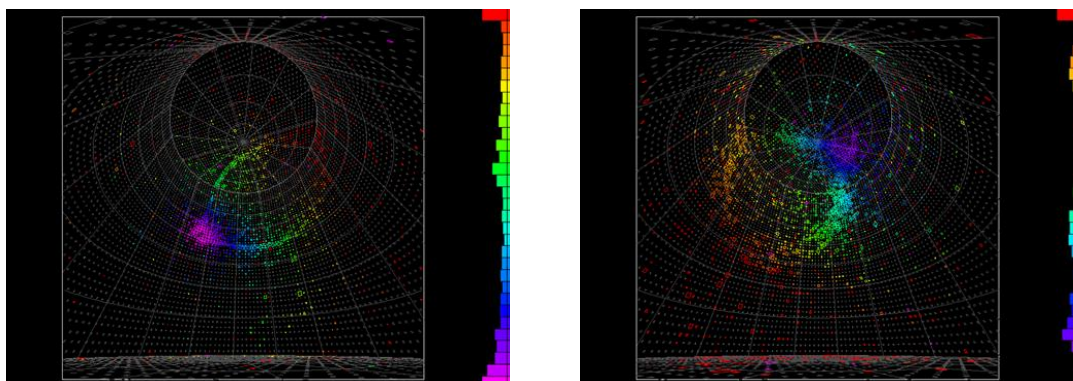
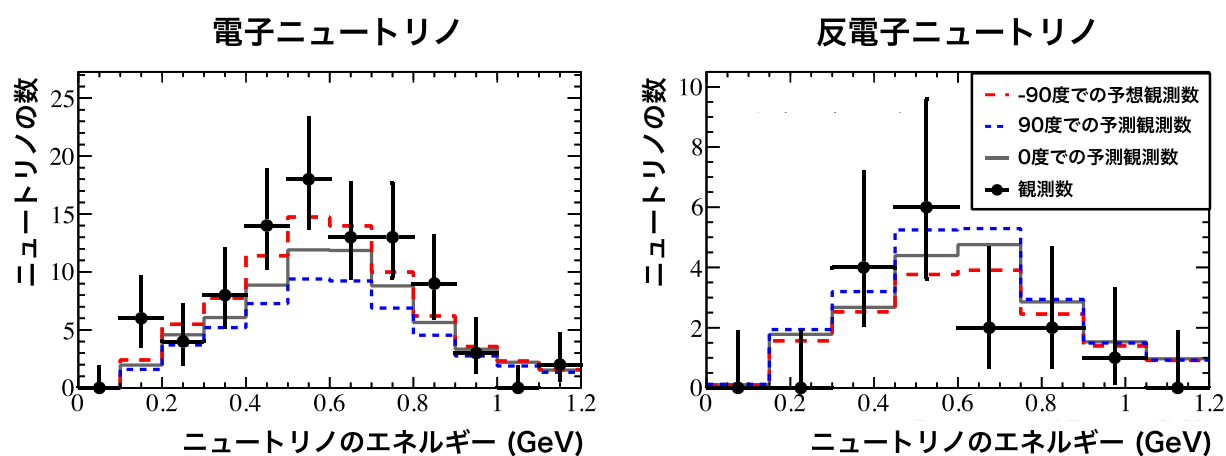


図1：スーパーカミオカンデで検出された電子型のニュートリノ（左）と反ニュートリノ（右）の例。ニュートリノが水と衝突して発する電子、または陽電子からのリング状の微弱光が、タンク内壁に設置された約11000本の光電子増倍管で観測された点を描いています。色は、光を検出した時間を表しています。



	観測数	予測される観測数	
		-90度の場合	90度の場合
電子ニュートリノ	90	82	56
反電子ニュートリノ	15	17	22

図2：今回得られたニュートリノのエネルギー分布。ニュートリノビームを用いて電子ニュートリノを測定した場合（左）の予想観測数は、C P位相角が-90度（赤破線）の方が90度（青破線）に比べて多くなります。反ニュートリノビームを用いて反電子ニュートリノを測定した場合（右）は、その逆です。C P対称性が保存する0度の場合の予想観測数は灰実線の分布になります。観測数の分布（黒点、縦線は誤差）は-90度での予想観測数の分布により近いことが分かります。下の表は、観測数とC P位相角が-90度または90度で予想される観測数をまとめたものです。

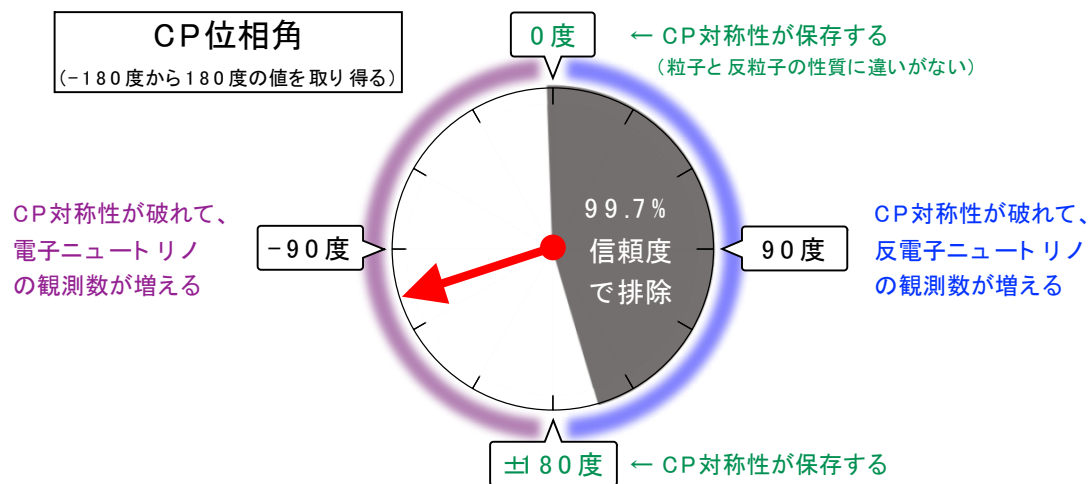


図3：今回の観測結果と最も良く合うCP位相角の値（矢印）と99.7%信頼度で値をとることが許された範囲（白抜き部分）。取り得る値の範囲を半分近く排除（右灰色部分）することができました。99.7%は、標準的な誤差（標準偏差、シグマ）の±3倍離れた値まで含む確率を示しています。

4. 今後の展開

CP位相角は、クォークでは小林・益川理論でよく知られる素粒子の基本的な性質で、CP対称性の破れは発見されていますが、電子やニュートリノの仲間であるレプトンについては、全く未知でした。本研究により、世界で初めてニュートリノのCP位相角に強い制限がつけられました。今回の結果からCP対称性が破れていると結論できませんが、CP対称性の破れを95%の信頼度で示唆しています。いまだに未知の性質が多いニュートリノのCP位相角、そしてCP対称性の破れが明らかになりつつあると言えます。180度を99.7%以上の信頼度で排除するためには、さらに測定を続けることが必要です。今後は、CP対称性の破れを発見し、CP位相角の測定を目指します。今回の成果は、その目標にたどり着くための重要なステップとなりました。

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。スーパーカミオカンデでは、反ニュートリノを識別できるSK-Gd計画が始まります。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の建設が始まりました。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ことが期待されます。

<原論文情報>

タイトル：

Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations

著者：K. Abe *et al.* (T2K Collaboration)

雑誌名：Nature Vol. 580, pp. 339-344, on April 16, 2020

DOI:10.1038/s41586-020-2177-0

<用語説明>

※1. 反粒子

素粒子には、質量や寿命は同じですが、電氣的に反対の性質を持つ反粒子とよばれるパートナーが存在します。例えば、電子の反粒子は陽電子、ニュートリノの反粒子は反ニュートリノと呼ばれます。宇宙の始まりであるビッグバンから、粒子と反粒子が同じ数だけ生成されたはずですが、粒子と反粒子が合わさると光子となって消滅しますが、現在の宇宙ではなぜか粒子で構成された物質だけが残し、反粒子で構成された反物質がほとんど存在しません。現在の宇宙の光子と物質を構成する粒子の割合から、宇宙初期に10億分の1だけ反粒子に比べて粒子を多くする何らかのメカニズムがあったと考えられています。しかしながら、その理由はまだ解明されておらず、宇宙のなりたちの大きな謎の1つとなっています。

※2. C P 対称性

C P 対称性の「C」とは、粒子と反粒子を入れ替える「C変換」のことです。C P 対称性の「P」とは、鏡写しのように空間の向きを入れ替える「P変換」のことです。この「C変換」と「P変換」をした場合に、同じ物理現象が同じ確率で起きることを「C P 対称性」と呼びます。このC P 対称性に従わない場合は「C P 対称性が破れる」、従う場合は「保存する」と言います。

※3. ニュートリノ

これ以上小さく分けることができないと考えられている素粒子の1つです。電子の100万分の1以下の重さで非常に軽く、電気を帯びていません。そのため他の物質とほとんど反応せず、観測が非常に難しい粒子です。電子型、ミュー型、タウ型と呼ばれる3種類が存在するとわかっています。T2K実験では、J-PARCでミュー型のニュートリノを生成して、スーパーカミオカンデでミュー型と電子型のニュートリノの数を検出することで、2種類の振動を観測できます。内1つのミュー型から電子型の振動で、C P 位相角の検証を行えます。T2K実験の条件ではタウ型のニュートリノを検出できないので、もう1つのミュー型からタウ型に変化するニュートリノ振動は、もともとあったミュー型のニュートリノの数の減少から測定します。

※4. T2K実験

高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構が共同で運営する大強度陽子加速器施設J-PARCで作成したニュートリノビームを、295キロメートル離れた岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学宇宙線研究所のニュートリノ検出器「スーパーカミオカンデ」で検出する長基線ニュートリノ振動実験です（図4）。J-PARCがある茨城県東海村と神岡町（Tokai to Kamioka）の頭文字を取って「T2K実験」と名付けられました。T2K実験はニュートリノの研究において世界をリードする感度を持ち、アメリカ・イギリス・イタリア・カナダ・スイス・スペイン・ドイツ・日本・フランス・ベトナム・ポーランド・ロシアの12ヶ国・69の研究機関から約500人の研究者が参加する国際共同実験です。日本からは、大阪市立大学・岡山大学・京都大学・慶應義塾大学・高エネルギー加速器研究機構・神戸大学・都立大学・東京工業大学・東京大学・東京大学宇宙線研究所・東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・東京理科大学・宮城教育大学の総勢114名の研究者と大学院生が参加しています。

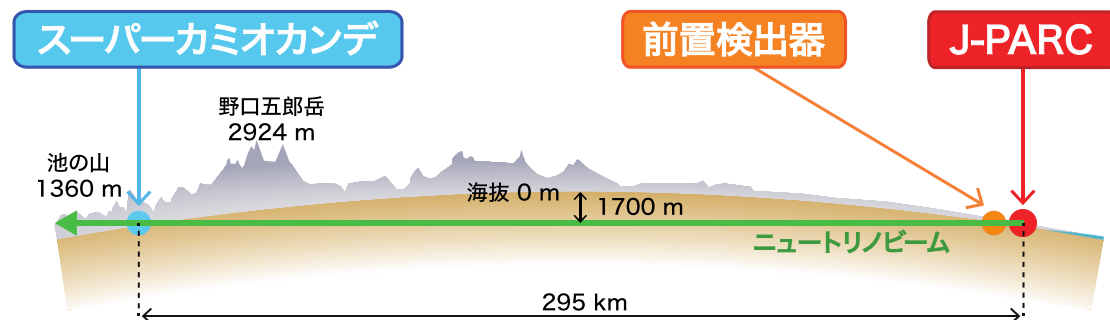


図4：T2K実験の概要

※5. ニュートリノ振動

ニュートリノが空間を伝わるうちに別の種類のニュートリノに周期的に変化する現象です。ニュートリノは「観測できる」状態で3種類（電子型、ミュー型、タウ型）に分類されますが、これらの種類は、同じく3種類の「質量」という別の状態のニュートリノの混ざり合いで決まっています。ニュートリノの質量の状態は、その質量に応じた振動数を持つ存在確率の波として振る舞います。その波の干渉効果によって、空間を伝わるうちに混ざり合う割合が変化する「うなり」が起こり、結果として観測できる状態の存在確率が周期的に変化します。この現象がニュートリノ振動です。この現象の発見によってニュートリノが質量を持つことが示され、2015年に東京大学の梶田隆章教授がノーベル物理学賞を受賞しました。

※6. CP位相角

3種類のニュートリノが振動現象を起こす場合には、粒子と反粒子でうなり現象の振る舞いが異なる、つまりCP対称性が破れている可能性があります。そのCP対称性の破れの大きさを決める値がCP位相角で、ニュートリノの基本的性質の1つです。CP位相角は-180度から180度の値を取り得ます。CP位相角が0度または180度の場合はCP対称性が保存され、それ以外の場合はCP対称性が破れていることになります。CP対称性の破れは、現在の宇宙で反物質がほとんど存在していないことを説明する条件の1つとされています。しかしながら、これまでに見つかっているクォークのCP対称性の破れはとて小さく、現在の宇宙の物質の量を説明することができていません。一方で、ニュートリノのCP対称性は大きく破れている可能性がT2K実験により示唆されており、CP位相角の測定は、宇宙の根源的な謎を解明する手がかりになると期待されています。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

・研究内容についてのお問い合わせ先

＜共同研究グループ・研究内容についてのお問い合わせ＞

東京大学宇宙線研究所

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/8798/>（日本語）

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/news/8799/>（英語）

高エネルギー加速器研究機構

<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2020/04/16/0000/>（日本語）

<https://www.kek.jp/en/newsroom/2020/04/16/0000/>（英語）

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 准教授 西村 康宏（にしむら やすひろ）

TEL：045-566-1524 FAX：045-566-1672 E-mail：nishimura@phys.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（村上）

Email：m-pr@adst.keio.ac.jp

<https://www.keio.ac.jp/>