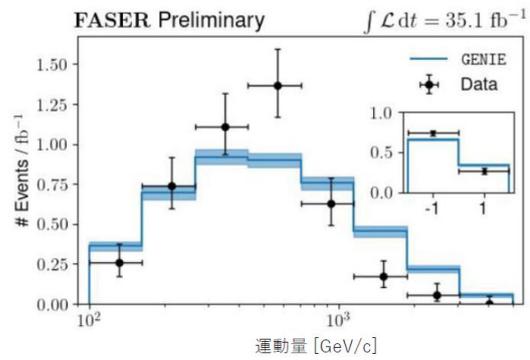


上図: CERN LHC アトラス、陽子・陽子衝突点前方480mに設置されたFASER 検出器。

下図: FASER検出器で捉えたニュートリノ反応例。タングステン・原子核乾板標的(肌色)で起きたニュートリノ反応を後方スペクトルメータで検出。



右図: 観測されたLHC衝突点由来ニュートリノ反応のミュー粒子運動量分布。153事象、信頼度は16 σ (有意度)の観測。

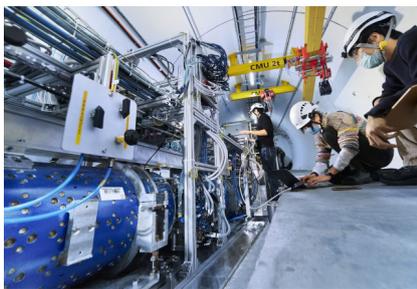
兆候から発見へ：世界最高エネルギー衝突型加速器 LHC が生成するニュートリノを FASER 国際共同実験が初観測

FASER 国際共同実験(※1)は 2017 年に発足し、素粒子標準理論(※2)の背後にある未知の物理法則を探るため、暗黒物質(※3)の解明に繋がる素粒子の発見と未開拓の高エネルギー領域のニュートリノ(※4)の研究を目指しています。世界最高エネルギーで陽子を正面衝突させる欧州原子核研究機構(CERN)の大型ハドロンコライダー(LHC(※5))において衝突点からビーム軸方向に生成する粒子群に着目し、480m 地点の既存のトンネルを改造して検出器を配置した特色ある実験です。

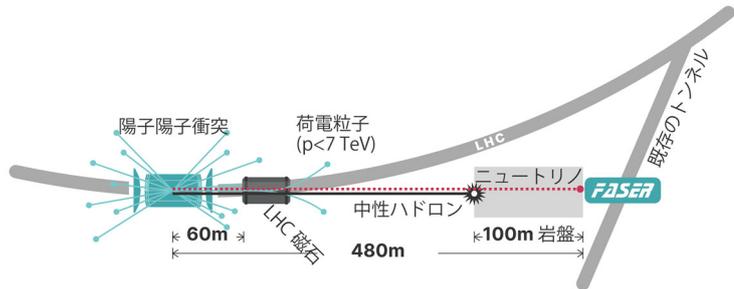
ニュートリノは非常に高い透過力を持つため測定は容易ではありません。衝突型加速器が生成するニュートリノの検出は世界初の取り組みとなり困難の連続でした。LHC の第 2 期運転の最終年となる 2018 年に写真乾板を用いた小型検出器を設置してニュートリノの測定に挑戦しましたが決定的な結果には至りませんでした。本研究では LHC の第 3 期運転(2022-2025)に向けて開発した FASER 検出器によって、LHC の生成するニュートリノの存在に対して十分な確度での観測(※6)が実現できました。この成果には日本が主導するシリコン検出器が極めて重要な役割を果たしています。衝突型加速器を用いたニュートリノ実験の創始となり、高エネルギーニュートリノに現れる素粒子標準理論を超えた物理の検証が可能となりました。将来計画となる大型施設(FPF: Forward Physics Facility(※7))の具体化も進展が期待できます。

FASER 国際共同実験は日本からの若手研究者が中核として推進し、国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学の佐藤修特任准教授、中野敏行准教授、中村光廣教授、六條宏紀特任助教、九州大学先端素粒子物理研究センターの音野瑛俊助教、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所の田窪洋介研究機関講師、清華大学の稲田知大博士研究員、九州大学基幹教育院の有賀智子助教、河原宏晃学術研究員、千葉大学・ベルン大学の有賀昭貴准教授、早川大樹特任助教などが参加しています。

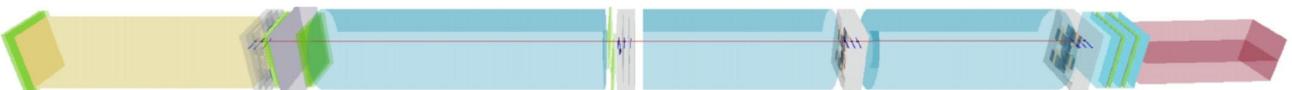
本成果は 2023 年 3 月 19 日(日)に国際会議 Moriond EW 2023 で発表しました。



(左図)FASER 検出器の試運転の様子。右側がシリコン検出器の責任者を務める音野助教(九州大学)。



(右図) LHC の陽子衝突で生成したニュートリノをビーム軸方向 480m 地点に設置した FASER 検出器によって捕える様子。



(上図)ニュートリノが FASER 検出器と反応した事象の一例。左から到来するニュートリノが黄色の領域のタングステン標的と反応して生成した粒子の飛跡をシリコン検出器で再構成し、赤線で示した。

研究者からひとこと：2012年のヒッグス粒子の発見によって素粒子標準理論は完成しましたが、宇宙初期に何が起きていたかについては依然謎に包まれています。世界中の素粒子研究者が頭を悩ませている状況にあり、我々は新たなアプローチで着実な実験成果を積み上げ、未知の物理への突破口を見出したいと考えています。

【用語解説】

(※1) FASER 国際共同実験: CERN の大型ハドロンコライダーLHC(※4)の陽子衝突点の超前方(ビーム軸に対して 0.03° 程度)の480m地点に全長約5mの検出器を設置し、暗黒物質(※3)の正体解明に繋がる未知粒子を探索することを目的として2017年8月に提案された実験です。日本からの研究者は2018年4月に加わり、シリコン検出器や写真乾板をFASER実験に導入し、そして未開拓の高エネルギー領域において3世代全てのニュートリノ(※4)を研究できることを着想しました。日本人研究者を中心としてLHCが生成するニュートリノの測定を提案し、本研究の成果に繋がっています。

(※2) 素粒子標準理論: 17種類の素粒子によって、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用を記述し、これまでの実験結果と精度良く整合しています。ただし数多くの不自然なパラメータを内包し、暗黒物質(※3)の候補粒子を持たず、重力を扱うことができないなど新たな物理が必要とされています。

(※3) 暗黒物質: 銀河の回転速度や重力レンズ効果など宇宙観測によって存在が確実視されていますが、素粒子標準理論では説明を与えることができません。

(※4) ニュートリノ: 素粒子標準理論において、電荷を持たず質量が非常に小さい素粒子と考えられています。電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという3世代があることが分かっていますが、その詳細な性質の解明はこれからです。素粒子標準理論では3世代のニュートリノは同じように弱い相互作用をすると仮定されています。これをレプトン普遍性と呼び、広く受け入れられてきましたが、近年、他の実験によって、高い世代の粒子に関わる崩壊においてレプトン普遍性が破れているかもしれないという実験結果が報告されています。LHCが生成するニュートリノはこれまでの加速器を用いた実験に比べ1桁高いエネルギーに達します。

(※5) 大型ハドロンコライダー(Large Hadron Collider(LHC)): 高エネルギー物理学実験を目的として、CERNが建設した世界最大・最高エネルギーのハドロン衝突型加速器です。2つのビーム(加速された粒子)を正面衝突させる加速器で、静止した標的に加速した粒子を衝突させる手法に比べてはるかに高いエネルギーでの衝突となり、より微細な構造を調べる実験が可能になります。LHCは周長が27kmあり、スイスとフランスの国境をまたいで建設されました。2019年から2021年の運転停止期間を経て、第3期運転が2022年から2025年まで予定されています。FASER国際共同実験は第3期運転の開始からデータを取得しています。

(※6) LHCの生成するニュートリノの存在に対して十分な確度での観測: ニュートリノが期待される信号領域において153イベントを観測しました。背景事象は 0.19 ± 1.83 イベントと見積もり、ニュートリノの観測に対する有意度は16シグマに達しました。ここでシグマとは確かさの度合いを示し、素粒子物理学において新粒子や新現象の兆候を主張するためには必要とされる3シグマ(99.7%の確かさ)、発見を主張するために必要とされる5シグマ(99.9999%の確かさ)を大きく超えています。

(※7) Forward Physics Facility (FPF): FASER国際共同実験は15年以上使用されていなかった既存のトンネルを実験区域に用いたため、設置できる検出器の大きさに制限があり、現在の約5mのFASER検出器をさらに大型化することは不可能です。またLHCの加速器の真横にあるため放射線の観点からLHCの運転中のアクセスが制限されています。そこで専用施設となるForward Physics Facility (FPF)としてビーム衝突点から620m地点の地下100mに全長65m、幅9.7m、高さ7.7mのトンネルを建設し、5つの実験を遂行する準備を進めています。FPFの建設費用は40MCHF(約60億円)と算定し、予算措置に向けた取り組みはこれからになります。2024年に概念計画書、2025-26年に技術計画書を提出し、土木工事を開始して2031年の実験開始が目標です。

【謝辞】本研究は、JSPS科学研究費補助金JP18K13619・JP20H01919(研究代表者:音野瑛俊)、JP20K04004・JP21H00082(研究代表者:田窪洋介)、JP19H01909・JP22H01233(研究代表者:有賀智子)、JP20K23373(研究代表者:有賀昭貴)、欧州研究評議会(ERC) Grant agreement No. 101002690(研究代表者:有賀昭貴)、平成30年度・平成31年度九州大学QRプログラム(研究代表者:音野瑛俊)、令和2年度九州大学QRプログラム(研究代表者:有賀智子)、第50回三菱財団自然科学研究助成(若手助成)(研究代表者:有賀智子)、2020年度・2021年度名古屋大学未来材料・システム研究所共同利用・共同研究(研究代表者:有賀智子)、Heising-Simons Foundation Grant Nos. 2018-1135, 2019-1179, 2020-1840, Simons Foundation Grant No. 623683(研究代表者:Jonathan L. Feng)、CERNの助成を受けて行われました。