

XENONnT 実験での太陽ニュートリノによる原子核散乱事象の測定結果

2024 年 7 月 10 日

XENON コラボレーション

名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 (KMI)

名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE)

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU, WPI)

東京大学宇宙線研究所 (ICRR)

神戸大学大学院理学研究科

発表概要

名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 (KMI) はじめ、名古屋大学宇宙地球環境研究所、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU, WPI)、東京大学宇宙線研究所、神戸大学が参加する、米国・欧州・日本を中心とした国際共同実験 XENON コラボレーションは、現在稼働している暗黒物質探索実験である XENONnT (ゼノンエヌトン) 実験において、太陽で生成されたニュートリノとキセノン原子核の散乱をはじめて観測しました。本結果は、イタリア・ラクイラで開催されている国際会議「IDM2024」で日本時間 7 月 10 日に報告されました。

太陽で生成されるニュートリノとキセノン原子核の散乱事象は、微弱かつ非常に稀な現象であるため、高感度・大質量の検出器を使った長期の測定による観測が必要です。世界をリードする暗黒物質探索実験である XENONnT 実験の検出器は、大型の液体検出器でありながら、優れた検出器性能と背景事象の除去能力を持つため、微弱かつ非常に稀な現象の観測に最適な装置です。XENONnT 実験で取得した約 3.5 トン年のデータを解析した結果、観測した信号が背景事象のみに起因する確率が 0.35% であるという有意度でニュートリノとキセノン原子核の散乱事象を観測しました。この成果はそれ自体が初観測であるだけでなく、暗黒物質探索実験の検出器としての性能の高さを示す重要なマイルストーンと言えます。

発表内容

XENONnT 実験はイタリア・INFN グランサッソ国立研究所で行われている暗黒物質直接探索実験です。宇宙線などの背景事象の起源となる放射線を避けるために、暗黒物質探索やニュートリノ観測実験は、本研究所や岐阜県飛騨市神岡町にある地下の実験室等で行われています。

XENONnT 検出器は、これまでに XENON 実験が観測をおこなってきた装置よりも高い感度で暗黒物質を探索できるように設計されました。検出器の中核をなすのは、気体・液体キセノンからなる 2 相式キセノン“タイムプロジェクションチェンバー”(TPC) で (写真参照)、5.9 トンの超高純度液体キセノンで満たされています。XENONnT 検出器には、「大質量のキセノンを -95°C に保つための冷却装置」「キセノン中に含まれる放射性不純物を常時除去するオ

ンラインキセノン蒸留システム」「最新の検出器コントロールおよびデータ取得システム」そして「中性子背景事象を低減するためのガドリニウムを用いた中性子検出器」の4点が新たに導入されました。また、外部からの放射線を遮蔽するために、検出器は宇宙線ミュー粒子と環境中性子の検出器を備えた700トンの水タンク内に設置されています。

本実験で観測した、太陽内部で生成され地上に届くニュートリノとキセノン原子核との散乱は、ニュートリノ-原子核コヒーレント弾性散乱と呼ばれ、1974年に予言されています。この散乱は標準理論と呼ばれる物理理論の枠組み内の現象であるものの、散乱で与えられるエネルギーが非常に小さいことと、反応確率が非常に小さいことから、その実験的な検証には40年以上を要しました。2017年に、COHERENTグループが、米国テネシー州のオークリッジの中性子施設で人工的に生成した高エネルギーニュートリノを使った実験でニュートリノと原子核の散乱を初観測しました。今回のXENONnT実験での観測は、太陽内部、つまり地球外で生成されたニュートリノと原子核の散乱をとらえた初めての報告となります。

この初観測が可能となったのは、XENONnT検出器が低エネルギー事象まで観測可能であることと、背景事象が非常に少ないことによります。XENONnT検出器で取得した2021年7月7日から2023年8月8日までの約3.5トン年相当のデータに対して、ブラインド解析と呼ばれる、解析条件を確定するまでは実際の結果を隠しておく慎重な解析をおこないました。この結果、低エネルギーの原子核反跳の信号に、期待される背景事象よりも有意な超過が確認され、ホウ素同位体(B-8)由来の太陽ニュートリノによる信号と矛盾しませんでした。この信号超過は統計的有意度では2.7シグマに相当し、観測された信号が背景事象のみに起因する確率が0.35%であることに相当します。地球外の天体起源のニュートリノを原子核散乱として検出した初の例となる本結果は、暗黒物質探索実験の検出器としての性能の高さを示す重要なマイルストーンでもあります。これにより、暗黒物質探索実験はニュートリノ事象が背景事象となるニュートリノフォグ(ニュートリノの霧)と呼ばれる新領域の探索に入ります。XENONnT実験は今後もデータ取得を続け、暗黒物質など宇宙物理や原子核物理での新しい発見を目指します。

※日本グループのXENON1TおよびXENONnT実験に関わる活動は、日本学術振興会・科学研究費助成事業(18H03697、18KK0082、19H05802、19H05805、19H00675、19H01920、21H05455、21H04466、21H04471、22H00127、23H00104、24H00223、24K00659、50824059)、同研究拠点形成事業(JPJSCCA20200002)、およびJST創発的研究支援事業(JPMJFR212Q)の支援を受け行われています。

XENONプロジェクトの詳細については、

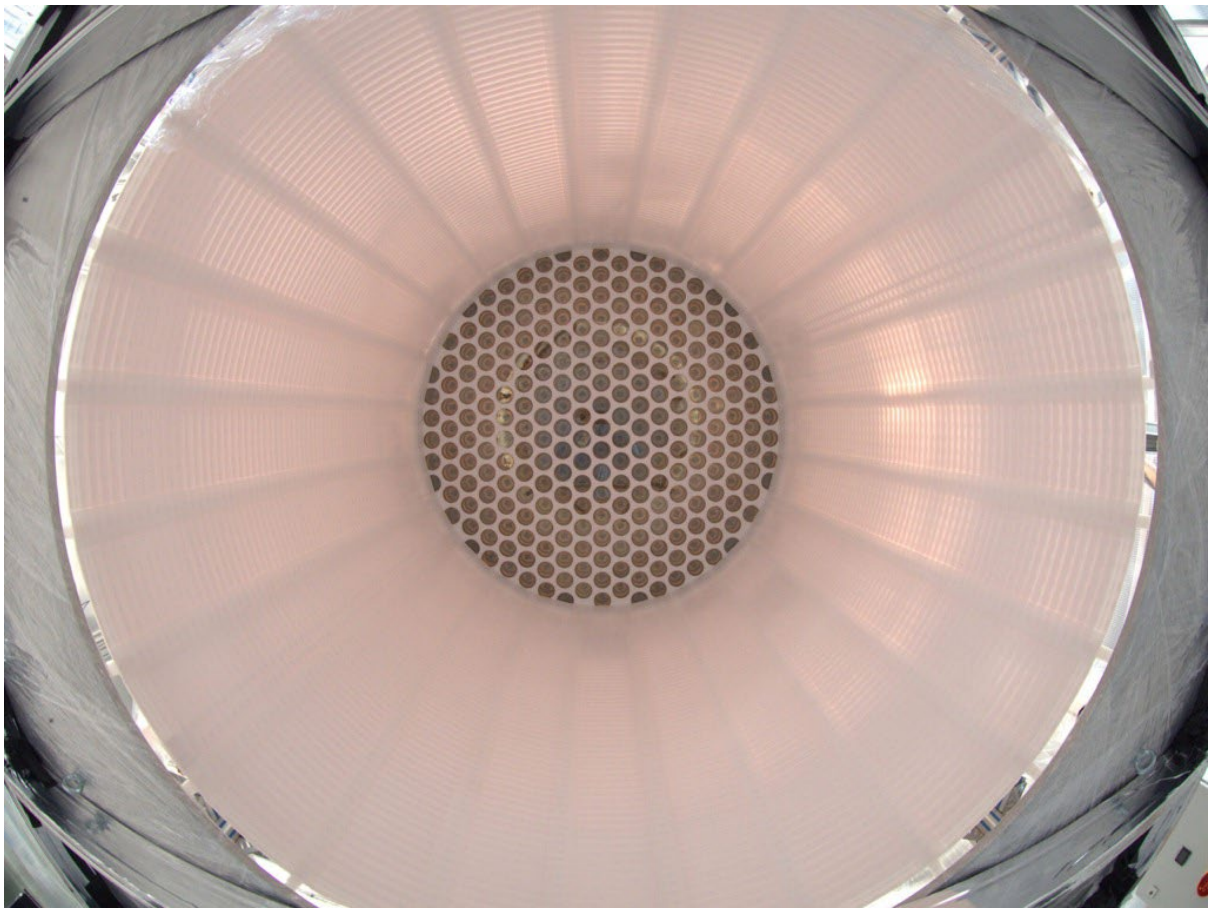
<https://xenonexperiment.org>

をご覧ください。

(名古屋大学の貢献)

本研究には、名古屋大学から伊藤好孝教授(宇宙地球環境研究所 ISEE・素粒子宇宙起源研究所 KMI・高等研究院 IAR)、風間慎吾准教授(KMI)、小林雅俊特任助教(KMI)が参加しています。

名古屋大学のグループはキセノン純化装置および中性子反同時検出装置の運転に関して貢献したほか、小林特任助教が低エネルギー電子反跳事象に関する解析の責任者を務め、今回のニュートリノ探索でも主なバックグラウンドのひとつである電子反跳バックグラウンドの推定に貢献しています。



XENONnT 検出器の TPC 内部 credit: XENON Collaboration