

大型液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接検出実験 (XLZD 実験計画の推進)

① ビジョンの概要

「宇宙は何からできているのか」「なぜ我々は存在するのか」という根源的問いを人類は探究してきた。本構想は、宇宙の物質の約 85%を占めるとされる未知の暗黒物質の直接検出を通して、その背後に潜む物理法則の解明を目指し、この根源的問いに迫る。

② ビジョンの内容

暗黒物質は宇宙の物質の約 85%を占め、宇宙の大規模構造形成に不可欠であり、その正体解明は素粒子物理と宇宙物理を結ぶ 21 世紀最大の課題である。

有力候補である WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) は宇宙初期に熱的生成され、現在も存在すると考えられる。直接探索は地下深部で極低バックグラウンド環境を構築し、原子核との稀な弾性散乱を検出する手法である。この方法で XENON/LZ 実験は世界最高感度を達成してきた。次世代計画 XLZD は、60~80 トンの液体キセノンを用いたガス・液体の二相型 TPC により、ニュートリノ背景 (いわゆるニュートリノフォグ) 領域に迫る究極感度を目指す。検出が実現すれば、新粒子物理の展開と「暗黒物質天文学」の創成に直結する。さらに XLZD は、超新星・太陽ニュートリノ、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊、アクシオン探索など多目的物理を可能にする。2030 年代以降 10 年以上の観測により、宇宙の基本法則理解を飛躍的に進展させる。



図 1 XLZD 検出器の概念図。サイズは直径 2.98 m、高さ 2.97 m となり上下に光センサーのアレイが取り付けられる。

③ 学術研究構想の名称

大型液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接検出実験 (XLZD 実験計画の推進)

④ 学術研究構想の概要

暗黒物質の正体の解明は、長年人類が抱いてきた根源的な問い「なぜ現在の宇宙の姿があり、我々はどうのように生まれたのか」に迫る鍵を握る。本構想は、その暗黒物質を直接探索することを目的とする。候補は多岐にわたるが、その中でも有力視されるのが WIMP である。WIMP は宇宙初期に熱的に生成され、現在まで残存すれば暗黒物質となり得る。宇宙背景放射やビッグバン元素合成がこの凍結モデルから自然に説明できることが、有力候補とされる所以である。

現在稼働中の XENONnT 実験は、有効質量 5.9 トンの液体キセノンであるが、次世代計画 XLZD 実験では、その 10 倍以上の有効質量 60~80 トンの液体キセノンを標的とし、その感度は、究極的なバックグラウンドである太陽・大気ニュートリノとのコヒーレント散乱による制限 (断面積 10^{-49} cm^2) に迫る。これを実現するためには、シンチレーション光を捉える高性能光センサー、検出器材料の徹底した低放射化、超高純度液体キセノン循環精製、さらに中性子を識別する水チェレンコフカウンターが不可欠となる。

また、XLZD は多目的実験として、超新星・太陽ニュートリノ、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 (^{136}Xe 半減期約 5×10^{27} 年の感度、有効質量 7~30 meV)、アクシオンや稀少核崩壊の探索も同時に進める。

⑤ 学術的な意義

暗黒物質の示唆は 1930 年代の F. Zwicky の指摘に遡る。その後、1970 年代には、V. Rubin らが渦巻銀河の回転速度を測定し、大きな質量が銀河にも存在することを明らかにした。

WIMP 暗黒物質は、超対称性理論のように標準理論を超えた模型において GeV~TeV 質量の新粒子として自然に導入される。また、単純な凍結モデルを仮定すると、現在観測されている暗黒物質の残存量を見事に説明することができる。この観点から WIMP ミラクルと呼ばれ、精力的にその探索が行われている。

暗黒物質は我々の銀河にも存在する。直接探索では、この暗黒物質と検出器媒体中の原子核とが稀に反応した時に検出器中に付与する 100 keV 以下の僅かなエネルギーを捉えることで探索を行う。直接検出は我々の身の回りに暗黒物質が存在することを「知る」唯一の方法であり、同時に暗黒物質の質量や通常の物質と

の断面積を測定することが可能となる。

直接探索はこの数十年で約 7 桁の感度向上を達成した。XLZD は標準模型を超えた電弱多重項 WIMP を包括的に検証可能であり、HL-LHC（加速器）や CTAO（間接探索）と相補的に 2030 年代の決定的局面を担う。

本構想は 2030 年代以降 10 年以上の観測を計画しており、超新星や太陽ニュートリノ、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索も同時に可能である。超新星からのニュートリノ観測においては、既存実験とは異なる相互作用チャンネルを提供する。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

国内では XMASS が観測を 2019 年に終了し、NEWAGE が方向感度探索を進める。国外では DarkSide-20k、PandaX-xT が進行中である。XLZD は 60～80 トン規模で世界最大となる計画であり、2021 年に XENON、LZ、DARWIN が MOU を締結、2024 年に正式コラボレーションへ発展した。「世界で唯一の究極検出器」を目指す。

⑦ 社会的価値

宇宙の根源的謎の解明は広く社会の関心を喚起し、知的基盤の深化に資する。国際最先端の実験への参画を通じて高度人材を育成し、極低放射能・放射線計測技術の高度化は産業基盤の発展にも寄与する。

⑧ 実施計画等について

＜実施計画・スケジュール＞

観測は 2030 年代に開始し、10 年のデータ取得を予定している。

- (1)～R9: R&D、Conceptual Design Report、Technical Design Report
- (2)R10～R13: 調達および建設（日本側）
- (3)R14～R15: 部分運用
- (4)R16～R26: 本格運用

＜実施機関と実施体制＞

XLZD コラボレーション: 日米欧からなる約 440 名、76 機関

日本: 神戸大学、名古屋大学、東京大学

＜総経費＞ 380 億円（うち日本分担 15 億円）

＜所要経費＞

日本グループは光センサー開発及び調達、キセノン純化装置、中性子反同時検出器の貢献を担う。

- 実機で使用するキセノンガス調達（3 トン ～ 9 億円）
- 極低放射能光検出器開発・調達（5.5 億円）
- キセノン純化装置、中性子反同時検出器（0.5 億円）

運用期

- 運転費用、旅費、コモン・ファンド、ポスドク人件費、年額 2000 万円（5 年、合計 1 億円）

⑨ 連絡先

山下 雅樹（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

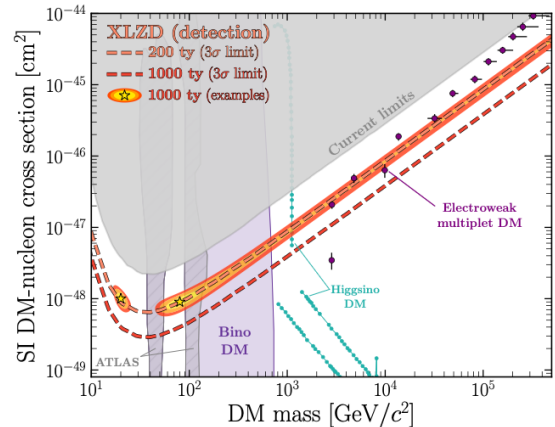


図 2 XLZD 実験の WIMP 暗黒物質に対する発見感度。電弱多重項 WIMP を包括的に検証。