

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

① ビジョンの概要

我々人類は自然や宇宙に思いを巡らせ、理解を進めることで己の存在の意味を考えて来た。「宇宙は何で出来ているのか。」「宇宙にどうして我々がいるのか。」「宇宙を支配する自然法則はなにか。」近年の観測によれば宇宙のエネルギー及び質量の約 95%が未知の成分によって占められることが判明している。本研究では宇宙の物質の 80%以上を構成する未知の物質である暗黒物質を直接検出し、その背後に潜む物理の解明を目指す。

② ビジョンの内容

科学は地動説、相対論、量子論など度々人類に大きく変革を起こして来た。「宇宙は何で出来ているのか。」「宇宙にどうして我々がいるのか。」「宇宙を支配する自然法則はなにか。」古来からの問いは人類にとって壮大なテーマである。

近年の宇宙背景輻射の観測によれば宇宙のエネルギー・質量のうち 95%が暗黒エネルギー及び暗黒物質によって占められ、つまり宇宙の殆どが未知の成分で満たされていることが判明している。物質に限って言えば 80%以上は我々にとって未知である。

暗黒物質の候補は多岐に渡る。過去には MACHO と呼ばれる中性子星や褐色矮星、また素粒子であるニュートリノも候補であったが今では否定されている。現在候補となっているものは、強い相互作用の CP 問題を解決するアクシオン、原始ブラックホール、超対称性理論など標準理論を超えたモデルで導入される未知の粒子などである。

暗黒物質の正体は不明であるが、最近までの研究からその性質が分かっている。暗黒物質は電荷をもたず中性であり、非相対論的にゆっくり運動し、バリオンではない。近年のヒッグス粒子の発見により、標準理論で体系化された粒子は全て揃ったが、暗黒物質はその性質からどの粒子にも当てはまらない。これは標準理論を超えた新しい粒子の存在を示唆すると考えられている。ゆえに暗黒物質の解明は宇宙物理のみならず素粒子物理とも密接に関係し、その正体と背後に潜む理論の解明はまさに 21 世紀の大きなチャレンジである。

Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)は暗黒物質有力候補の一つである。WIMP は、宇宙初期に熱的に生成され、現在でも我々の身の回りを漂う。一方で素粒子論の観点からは、標準理論を超えたモデルに自然と導入される。

本提案では、WIMP 暗黒物質を直接検出すること目的とする。実験では、宇宙線ノイズを避けるために 1,000m またはそれ以上深い地下の実験室にて行われる。極低放射性バックグラウンドを実現し、この WIMP 暗黒物質の直接検出を通じて、質量と通常物質との断面積を測定する。DARWIN 実験の前身である XENON 実験は十年以上に渡り世界で最も良い感度で探索を行うことに成功してきた。本提案である DARWIN 実験の検出感度は究極的なバックグラウンドとも言えるニュートリノにより制限される領域に到達する。検出器の標的として有効質量 50-100 トンのキセノンを使用し、検出器は気体と液体からなる 2 相型キセノン Time Projection Chamber (TPC)を用いる (図 1)。

暗黒物質が検出され、その正体が解明できれば、新しい素粒子モデルの発展や暗黒物質による天文学の創成が期待される。また、地下物理実験のテーマとして暗黒物質探索だけでなく、超新星や太陽ニュートリノ観測、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊、アクシオン、原子核稀崩壊の探索など広いテーマを有する。

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 (DARWIN/XLZD 実験計画の推進)

④ 学術研究構想の概要

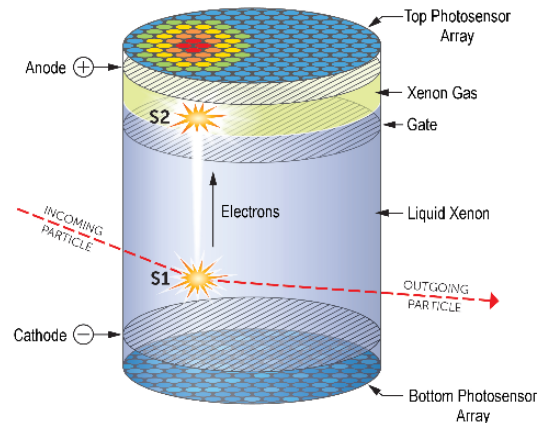


図 1 2 相型キセノン Time Projection Chamber の概念図。暗黒物質とキセノンが反応した際のシンチレーション光を光電子増倍管で捉える。

本研究では、多目的実験であるが WIMP 暗黒物質の直接探索を主な目的としている。WIMP は宇宙初期に熱的に生成され、現在まで残存していれば暗黒物質となり得る。これは、宇宙背景放射やビッグバン元素合成がこのような凍結モデルから説明できることから自然な導入と言える。現在稼働中の XENONnT では有効質量 5.9 トンの液体キセノンを標的として観測を行っている。XENONnT 実験で暗黒物質の兆候が見られた場合さらに一桁以上の標的を用いて精密観測を行うことが必然である。その検出感度は究極的なバックグラウンドとも言える太陽、大気ニュートリノとのコヒーレント散乱事象制限される領域に到達する（断面積 10^{-49} cm^2 、図 2）。検出器標的として有効質量 50-100 トンのキセノンを使用し、検出器は直接探索で実績のある気体と液体からなる二相型キセノン TPC を用いる。

⑤ 学術的な意義

暗黒物質の示唆は 1930 年代に遡る。F. Zwicky はかみのけ座銀河団の質量をビリアル定理から見積もり、観測との 400 倍ほどの大きな食い違いを指摘した。その後、電波観測が発展した 1970 年代 V. Rubin らは渦巻銀河の回転速度から電磁波では見えない大きな質量が銀河にも存在することを指摘している。WIMP 暗黒物質は GUT スケールにおける力の統一を予想する超対称性理論など標準理論を超えたモデルにおいて GeV-TeV 質量の新粒子として自然に導入される。また、宇宙背景放射やビッグバン元素合成などと同様に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と一致する。これらの観点から WIMP ミラクルと呼ばれ注目を浴び、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。暗黒物質直接探索ではこの暗黒物質粒子と原子核（この場合検出器媒体）が稀に反応した時に落とす 100keV 以下の僅かなエネルギーを捉えることで探索を行う。これは我々の身の回りに暗黒物質が存在することを”知る”唯一の方法である。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

XENON/DARWIN 実験等で発見された暗黒物質の性質を詳細に研究するために、ガス飛跡検出器を用いた方向に感度をもつ暗黒物質探索 (NEWAGE 実験) が進められている。同程度の感度を持った将来計画として液体アルゴンを用いた ARGO がある。50 トンサイズの液体キセノン検出器は DARWIN 実験が世界で唯一となる。

⑦ 社会的価値

本研究は、最先端の技術や知識を集約して人類未踏の研究課題に挑むものである。「宇宙を支配する自然法則はなにか。」科学者だけでなく一般の人にも大きな関心を寄せている。また、物理学はその理解が多くの応用を生み、そのために必要な技術を革命的に向上させる。インターネット WWW や GPS などが良い例で、その多岐に渡る知見の波及効果が大きく、最先端の技術や知識は社会や国民の支持を獲得し人類の役に立つことが期待できる。

⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール

R5 - R8 : R&D、Conceptual Design Report、Technical Design Report

R9 - R11 : 建設

R12 - R22 : コミッショニング及び観測 (200 トン・年以上の大統計データの取得が目標)

実施機関 DARWIN コラボレーション: 日米欧からなる約 200 名 38 機関

国内からは神戸大学、名古屋大学、東京大学が参加する。

所要経費 総予算約 200 億円、日本分担 15 億円。

⑨ 連絡先

山下 雅樹 (東京大学カブリ IPMU)

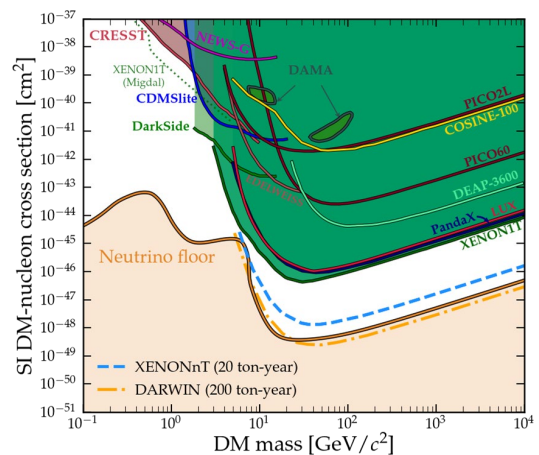


図 2 DARWIN 実験の期待される WIMP 暗黒物質に対する感度。(O. Ciaran PRL, 127. 25. 2021)