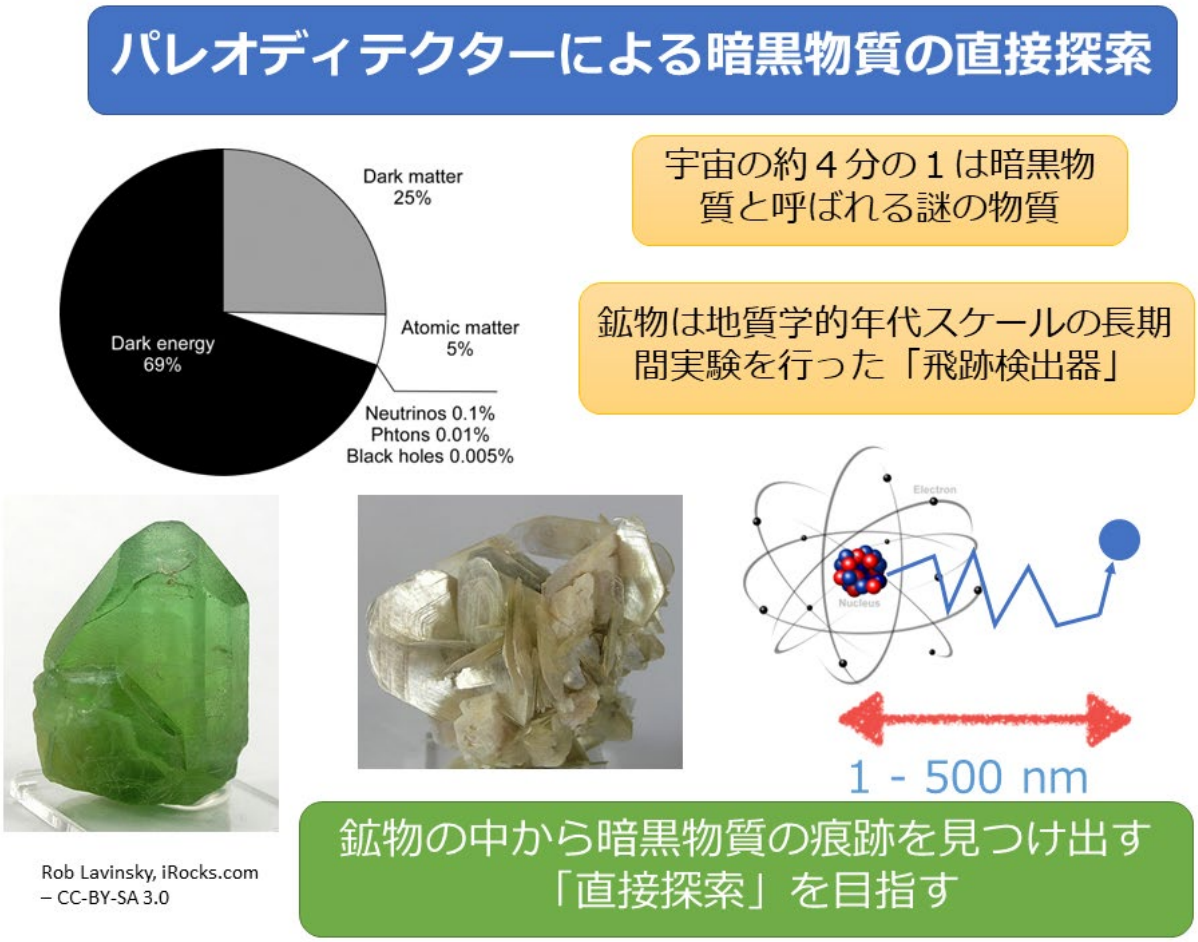
パレオディテクターによる暗黒物質の直接探索

暗黒物質は宇宙の約四分の一を占め、銀河や星など宇宙の大規模構造を形成する上で不可欠な存在である。しかし、光学的には観測するこができず、その正体は謎のままである。暗黒物質の正体が明らかになれば、標準理論を超える新しい物理を解き明かしたり、宇宙の誕生や歴史を明らかにしたりするうえで重要な知見をもたらすと考えられている。この未知の物質の正体を明らかにするため世界中で様々な試みがなされている。例えば、XENONnT では、トン単位の液体キセノンを用いて直接探索を行っている。XENONnT のような直接探索では、検出器の質量と実験時間の積に検出感度が制限される。人間が行う実験では時間を無限にのばすことはできず、また、液体キセノンを用いた方法も規模の限界が見えてきている。そこで、検出器に鉱物を用いる方法である「パレオディテクター」という手法が着目されている。鉱物は地質学的スケールの時間で暗黒物質と相互作用しているため、極めて長い時間の実験を行った検出器として扱うことができる。このことから、少量の試料でも液体キセノンを用いたシンチレーション法を超える感度で暗黒物質を探索できる可能性が示唆されている。本プロジェクトでは ISEE 内外の研究者と連携して岩石学、地質年代学、素粒子宇宙物理学、X 線分光学、電子顕微鏡学、分析化学などを融合し、パレオディテクターによる暗黒物質やその他の未知素粒子の直接探索を目指している。

パレオディテクターによる未知素粒子の直接探索の歴史は長く、1980 年代には白雲母を用いた磁気単極子の探索が行われている。また、1995 年に Snowden-Ifft らが雲母を用いて暗黒物質の直接探索を試みている。しかし、いずれの研究も未知の素粒子の発見には至らなかった。近年、パレオディテクターが注目され始め、世界中で様々な研究グループが理論的な検討や、原理実証に向けた実験などを行っている。我々のプロジェクトでは、岩石学、地質年代学、素粒子物理学、電子顕微鏡学、地球化学、分析化学などの分野の研究者により原理実証に向けた研究を進めている。また、国内外の他の研究グループと連携し、各分野の最新の知見を用いて暗黒物質の直接探索をめざしていく。

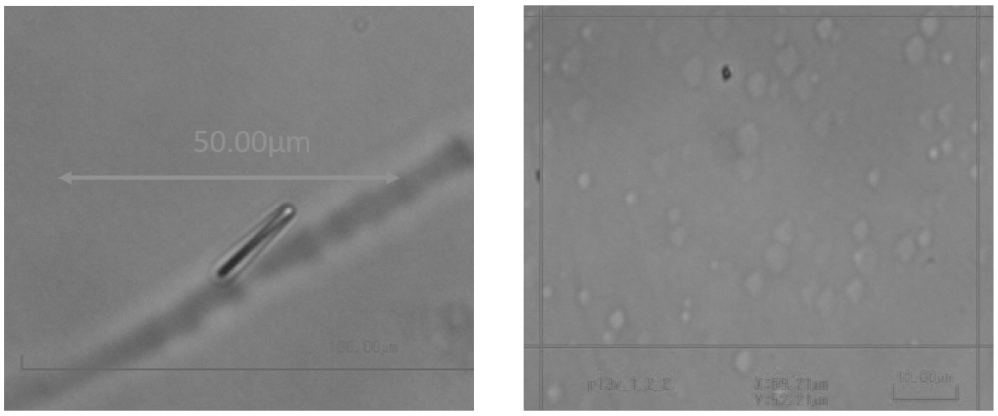


2022 年度の主な活動

白雲母の飛跡読み取り法の開発

暗黒物質として、弱相互作用重粒子（Weakly Interacting Massive Particles: WIMP）や Q-ball などが候補として考えられている。いずれの可能性にも対応できるよう、カンラン石と白雲母を用いて飛跡の検出方法を確立させることを目指している。暗黒物質は光速のおよそ 1000 分の 1 の速度で地球に降り注いでいると考えられているが、これは支配的な阻止能が電離的阻止能と核的阻止能との境界付近になる。2022 年度は、探査量が体積ではなく面積できまる Q-ball の探索に使いやすく、先行研究から電離的阻止能が支配的な領域での飛跡と核的阻止能が支配的な領域での飛跡の両方を観察することが期待できる白雲母を重点的に扱った。白雲母は明瞭な劈開があり、薄く剥がすことができる。したがって、一つの鉱物粒子から多数の観察用試料を得て、大面積観察を行うことが可能である。また、透過光と反射光の両方で試料を観察することが可能である。さらに、電離的阻止能が支配的な領域で生じるフィッショントラックと核的阻止能が支配的な領域で生じるαリコイルが存在することが知られている。そのため、両者の違いを自動光学読み取りで判別可能かどうか検証するのに適している。

粒子が白雲母に飛跡を残すかどうか検証するため、量子科学技術研究開発機構の重粒子線がん治療装置（HIMAC）を用いて 500 MeV/n の Fe を照射した。照射後の白雲母試料をフッ酸でエッチングし、光学顕微鏡で観察したところ、明瞭な飛跡が観察された。また、照射前から存在するαリコイルによる飛跡も同時に観察された。このことは、電離的阻止能が支配的な領域で生じる飛跡と核的阻止能が支配的な領域で生じる阻止能を区別して同時観察できる可能性を示唆している。



フィッショントラック（左）とαリコイル（右）の光学顕微鏡写真（透過照明）。

研究機関の連携に向けた取り組み

近年、様々なグループにより鉱物を用いた暗黒物質の直接探索やニュートリノの検出が試みられるようになっている。2022 年度は、我々のグループと海洋研究開発機構のグループが合同で会合を 3 回開催し、状況報告や討論を行い、暗黒物質の直接探索の実現に向けて連携を強化している。

また、2022 年 10 月 17 日から 21 日まで、イタリアの Institute for Fundamental Physics of the Universe (IFPU) において、Mineral Detection of Dark Matter and Neutrinos が開催された。名古屋大学、東邦大学のほか、日本からは海洋研究開発機構のグループも参加した。また、チューリッヒ大学、スタンフォード大学、クイーンズ大学、ジョンズ・ホプキンズ大学、ハイデルベルグ大学、ストックホルム大学、バージニア工科大学、カンタブリア大学、SLAC 国立加速器研究所、イタリア国立核物理研究所、ミシガン大学、メリーランド大学などの研究者が参加した。理論的な背景、素粒子物理学的視点からの検討、地質学的視点からの検討、読み取り方法の検討や、各機関での実証実験の状況について発表があり、活発な討論が行われた。

今後、国際的な連携を強化するとともに、様々な視点から検討をすすめることで、原理実証に向けた研究を続けていく。