

極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化：新たな宇宙物質観創生のフロンティア

	研究代表者	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授 岸本 康宏 (きしもと やすひろ)	研究者番号：30374911
	研究課題情報	課題番号：24A205 キーワード：極稀事象、ニュートリノ、暗黒物質、超新星、極稀事象技術	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

宇宙は誕生直後の高温・高密度の火の玉の状態から、現在の形へと進化してきた。この進化の中で「なぜ物質だけが生き残ったのか?」「通常物質の約5倍もの暗黒物質の正体は何か?」「宇宙初期に存在しなかった重元素はどのようにして生成・拡散されたのか?」と言う点は全く分かっていない。本学術変革領域研究では、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索、暗黒物質の直接検出、超新星ニュートリノ観測という極稀な事象を、世界最高感度で探索することで、これら宇宙の物質の起源についての根源的な謎を解明する。そして、この謎の解明を通じ、我々が当然視している「物質」についての新たな視点、「物質観」を創生することを目標としている。

●研究の背景

素粒子・原子核研究の究極の目標は、「力の統一」と「物質の起源の解明」である。この目標に向けて、これまで3つのアプローチ「高エネルギーフロンティア」「大強度フロンティア」「宇宙フロンティア」が取られてきた。高エネルギーフロンティアと大強度フロンティアでは加速器を利用し、それぞれ高エネルギーの新事象の研究と大統計の精密測定が行われている。宇宙フロンティアは宇宙そのものの観測を通じて素粒子の性質や相互作用を導き出す研究である。このような状況の下、近年「物質の起源の解明」に向けてこれら従来の3つのフロンティアではカバーしきれない研究領域が成長してきた。その一つが、地下という低放射能バックグラウンド環境を用いた「地下宇宙素粒子研究」である。

「物質の起源の解明」をテーマとした実験的研究は多く、どれもパラダイムの変革をもたらす重要な研究である。多くの重要な実験は「非常に稀な事象を探究する」という点で共通している。地下環境は宇宙線の影響が小さいため、極稀事象観測に最適な環境である。カミオカンデ実験を皮切りに発展したニュートリノ観測は、超新星、太陽、大気、加速器、原子炉、地球と様々なニュートリノ源からのニュートリノの観測に成功してきた。これらの観測によって、ニュートリノ振動の発見、ニュートリノ振動パラメータの精密測定、さらには地球ニュートリノ観測による地球内部の熱エネルギー源の測定まで、多岐にわたる大きな成果を残している。これらの成果の裏には、極低バックグラウンド環境を実現し、極稀な信号を確実に捉える「極低バックグラウンド技術」の発展と深化があった。現在では、この極低バックグラウンド技術を基盤に、「物質の起源」をテーマとした世界最先端の研究が行われている。日本を起点に芽生えた研究領域が、現在は世界的な競争が展開されるフィールドに成長してきた。我々は、この領域を素粒子・原子核研究の第四のフロンティア「稀事象フロンティア」として発展・拡大する。

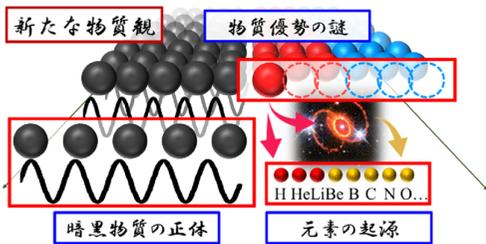


図1 本領域のイメージ図

●研究の目標

これまでの研究から、宇宙の物質は、宇宙の歴史に沿って、1) 宇宙の誕生時には、同数あった物質・反物質からわずかの量の物質だけが残り、2) その物質の4倍もの量の未知の暗黒物質によって、銀河が形成され、3) 我々にとって既知である20%の物質についても、宇宙当初の水素、ヘリウム、リチウムというわずかに3種の元素から、その他元素が生成され、現在に至っている、と考えられている。しかし、この歴史の中で「どうして物質だけが残ったのか」「暗黒物質の正体は何か」「その他元素がどのように作られ、拡散したのか」は謎に包まれている。つまり、「我々の周りにあふれる『物質』は、実は謎に満ちた存在」なのだ。本領域研究は、「物質優勢の謎」「暗黒物質の正体」、元素合成と拡散の場である「超新星爆発」の3テーマを研究し、その謎を解き明かすことによって、我々が当然視している「物質」についての新たな視点、つまり、新たな物質観の創造を目標とする。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●物質の優勢の謎

物質優勢の謎への手がかりは、ニュートリノのマヨラナ性の検証である。マヨラナ性とは「粒子それ自身が反粒子である」という性質のことで、これを検証する唯一の現実的な方法がニュートリノ二重ベータ崩壊(0νββ)の検出である。マヨラナ性は、物質・反物質という枠組を超えた性質であり、これが起源となって宇宙が物質優勢になったと考えられている。ニュートリノのマヨラナ性は、ニュートリノがなぜ質量が軽いのかという謎を解く鍵も提供するため、標準模型を超えた新たなパラダイムの一つであり、「力の統一」とも密接に関連している。従って、0νββが発見されれば、それは歴史を変える成果である。本領域では、カムランド(A01)が0νββの直接発見に挑戦し、CANDLES(A02)がレーザー同位体濃縮やシンチレーションポロメータ開発など将来を展望した研究開発を遂行する。発見に至らなかった場合でも世界最高感度の装置を用いた制限を与える。

●暗黒物質の直接探索

暗黒物質は未知の素粒子であり、その正体の解明は標準模型を超える物理(BSM)の探究に繋がり、ゲームチェンジャーとなる可能性がある。本領域では、暗黒物質の最有力候補であるWIMPsとアクシオンの直接探索実験を遂行する。WIMPsでは、XENONnT(B02)が世界最高感度での探索を進め、同時に将来へ向け、方向に感度を持った検出器の開発・研究を行う(B03)。更に、新たなアクシオン探索(B01)を低温・超伝導技術を用いて開始し、暗黒物質候補を隈無く探索する。

●超新星ニュートリノ観測

SK-Gd(C01)が、過去の超新星爆発によって生じた宇宙背景ニュートリノの世界初発見を目指して観測を継続する。さらに、SK-Gdとカムランドが協力して、近傍天体の超新星爆発を数時間前から数日前に予報し、さらに銀河系内の超新星爆発では、SK-Gdがニュートリノの到来方向を世界中の天文台にいち早く知らせることで、マルチメッセンジャー天文学の推進に決定的な役割を担う。また、超新星爆発ニュートリノ観測では、様々な検出器(SK-Gd、カムランド、XENONnT)で測定したニュートリノフレーバー情報や、これまで注目されてこなかった<sup>16</sup>Oなどの中性カレントの反応などを利用することで、超新星ニュートリノを多角的に解析する体制を構築し、1987年の超新星爆発で得られた知見からの大幅な進歩を創出する。

●稀事象技術の普及と拡大

上記の研究は、どれも極稀な事象を対象とした研究であり、その基盤となるのが、極低放射能環境の構築などの「極稀事象技術」である。本領域では、研究分野や実験グループの枠組を超えた独自の技術連携体制を構築し、極稀事象技術の普及と拡大を図り、それによって物質の起源に迫る研究を加速する。

●宇宙物質の通史の編纂

宇宙の物質についての3つの大きな謎は、宇宙の歴史全体で解き明かされる必要がある。理論的な研究によって個々のテーマの研究成果を統合し、宇宙の物質の歴史を紐解くことで新たな物質観を創造する。