

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05802

研究課題名（和文）地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化

研究課題名（英文）Unraveling the history of the universe and matter evolution with underground physics

研究代表者

井上 邦雄（Inoue, Kunio）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授

研究者番号：10242166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 46,000,000円

研究成果の概要（和文）：神岡地下での研究の共通基盤である極低放射能技術に先進の極低温技術を取り込み、素粒子・原子核研究の最重要課題であるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊研究や暗黒物質探索、さらに宇宙の歴史を紐解く上で重要な超新星爆発ニュートリノ・地球ニュートリノ研究などで世界をリードする研究を展開した。理論モデルの排除など大きなマイルストーンとなる成果を得た。さらに、領域での連携を国際的にも発展させ、長期的な視野での研究展開・技術継承・人材育成を実現する組織整備による神岡極稀現象研究拠点の形成、拠点の活動場所となる世界的にも稀有な地下クリーン施設の整備なども実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共通基盤と系統的な理論で地下での素粒子原子核研究が連携することで、個別に研究を進めると比較して遥かに効率的に相乗効果を生み出し、それぞれの研究で世界をリードする成果をあげることができた。これらの活動を通して自然界に存在する標準理論を超えた現象を極低放射能技術で見出す極稀現象フロンティアを確立した。さらに継続的な研究展開・技術継承・人材育成を担う拠点や施設の整備も結実した。

研究成果の概要（英文）：Under the common basis of ultra-low radioactivity and ultra-low temperature technologies, we developed world-leading research such as searches for neutrinoless double beta decay and dark matter as most important subjects in particle and nuclear science, and observations of supernova relic neutrinos and geoneutrinos as important elements for unraveling the history of the universe and matter evolution. Major milestones were achieved, including the rejection of some critical theoretical models. Furthermore, we developed collaboration in the field internationally, and realized the formation of the Kamioka Extremely Rare Phenomena and Neutrino Research Laboratory and unique underground super-clean facility those will strongly propel research development, technology inheritance, and human resource development from a long-term perspective.

研究分野：地下宇宙素粒子研究

キーワード：地下 二重ベータ崩壊 暗黒物質 超新星ニュートリノ 地球ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

(地下宇宙素粒子研究の発展) 低バックグラウンド(BG)観測に適した地下で発展したニュートリノ研究は、ニュートリノ振動の発見や、超新星爆発や太陽内の原子核反応、地球研究にも波及している。低エネルギー観測の成否を分ける極低放射能化の進展は、稀な現象探索への適用を可能にし、暗黒物質の直接探索やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu 2\beta$)の探索といった「地下宇宙素粒子研究」が、重要な学術分野として発展してきている。

(宇宙の各時代を紡ぐ) $0\nu 2\beta$ 研究は宇宙の始まりでの物質生成(反物質の消失)を解き明かす最重要課題であり、暗黒物質研究はその後の大規模構造の形成や星の進化を決定づけるやはり最重要課題である。さらに過去の超新星爆発(超新星背景)ニュートリノの観測は星進化の歴史に新たな観測手法をもたらし、これらの連携は、宇宙の化学進化に対する系統的な研究手段を提供する。そして、地球ニュートリノ観測が現在の地球組成の情報をもたらすことで、地下宇宙素粒子研究は、宇宙の始まりから現在までをカバーする「宇宙の歴史と物質の進化」を解き明かす学問領域となる。

(領域の成功) 前身の新学術領域「地下素核研究」では、神岡地下で個別に進化させてきた極低放射能技術を共有化し発展させることで、世界トップレベルでの $0\nu 2\beta$ 探索、暗黒物質探索、そして超新星ニュートリノ観測環境を実現した。同時に国際的な活動も支援し、特に暗黒物質の探索において「世界に打って出る」とともに、暗黒物質の方向測定においては「世界を呼び込む」ハブとして機能する環境を構築できるようになった。

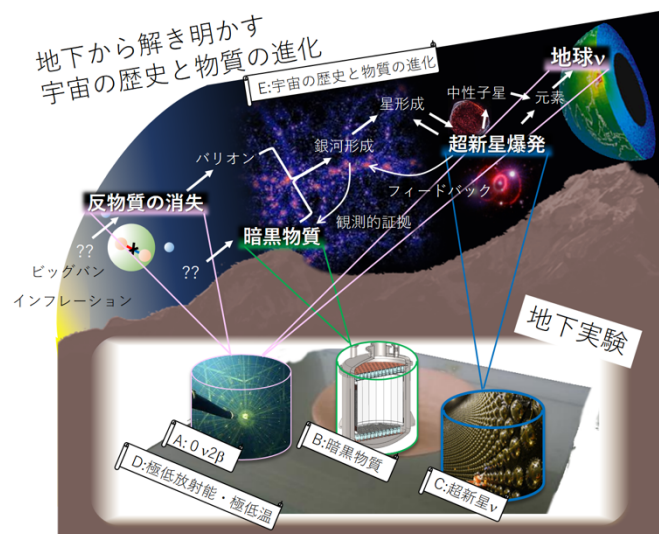
(サイエンスの展開) 宇宙の歴史を貫く系統的な理論構築においては、暗黒物質ハロー分布の研究や、超新星爆発の暗黒物質分布への影響、クーリングを含む超新星爆発詳細研究、地球始原物質にまで繋がる宇宙の化学進化の解明を研究対象に組み込むことで、包括的な宇宙の歴史の解明と物質の進化の系統的な研究を進めることができ、「地下素核研究」を飛躍的に発展できる。

(技術の発展) 技術的側面においては、極低放射能技術に加えて、高分解能化において最先端技術として有望な低温技術を展開・波及することで、 $0\nu 2\beta$ 探索におけるニュートリノ質量の順階層領域に到達可能な技術、MeVスケールの軽い暗黒物質を探索できる技術、暗黒物質の候補であるアクシオンを世界最高感度で探索する技術を開発し、将来を見据えて国際的優位性を維持しさらに押し広げることが可能である。

(国際活動の充実) 「地下素核研究」の国際活動班での活動は、 $0\nu 2\beta$ 研究のための低温における蛍光熱量測定技術の国際連携体制構築にも貢献してきた。また、大型暗黒物質探索実験 XENONnT に「地下素核研究」で培った極低放射能技術を持ち込むことで、さらなる飛躍的な発展を効率的に実現する計画が進み始めていた。同様に、暗黒物質の方向測定を行う世界的なコミュニティを通じた国際ネットワークの構築も進められた。世界をリードする神岡地下プロジェクトのさらなる推進に加え、世界トップレベルの研究をさらに発展させる上で、これまでの神岡地下での施設・装置・ノウハウの共有を進め、国際的な双方向の連携を発展させることの重要性が認められていた。

2. 研究の目的

本「地下宇宙」領域は、実験的共通基盤である極低放射能に加えて、革新的技術基盤と目される低温技術を共有化し、相乗的かつ長期的に発展させることで、世界をリードして宇宙の物質の起源から現在の地球組成まで宇宙の歴史と物質の進化を串刺しにする理論体系を構築していくもので、有機的な連携において独自性が高く、国際的優位性を有するものである。この領域の優位性を最大限に発揮するためには、世界をリードする実験・理論を集結し、技術の共通化・高度化を含めた密接な連携を促進し、それが個々の研究の進展とともに領域全体の進展に繋がっていくことが重要である。さらに宇宙の歴史と物質の進化を串刺しにする研究は、波及する分野が広く、他分野との有機的な接続に



よって個々の研究の価値はますます高まる。波及する分野との科学的・技術的連携を促進することも総括班の役割である。

地下宇宙素粒子研究分野において長期的に世界をリードし、宇宙の歴史と物質の進化の系統的理解に寄与するために、総括班は以下の役割を担う。

1. 各計画研究及び公募研究との連携を円滑にすること。(領域運営)
2. 総括班会議・運営会議において、若手とともに戦略的な方針決定を行い将来の強いリーダーを育成すること。技術連携や人材交流を迅速かつ効果的に促進すること。
3. 研究会、国際会議、WEB等により、研究成果を広く発信・波及させること。(成果発信、研究会運営、分野融合の開拓)
4. 地下大型実験の実験代表が参画し、施設共用や装置の円滑な運転を促進すること。
5. 各計画研究の進捗を評価し、適切なアドバイスや支援を提供すること。(進捗評価)
6. 国際活動を活性化し世界トップレベルの研究を継続すること。
7. 世界的にも稀有な最先端研究環境を教育にも生かしていくこと。

これらの活動を通して、神岡地下の国際的な優位性をさらに発展させ、極低放射能研究を核とした地下宇宙素粒子実験の連携により、宇宙の始まりから現在の宇宙までの大きな流れを物質進化とともに解明していく。

3. 研究の方法

各課題で世界をリードする項目 A~C の研究課題においては、それぞれ世界初観測を目指し、各探索・観測で未踏領域に切り込み世界をリードすること、項目 A, B についてはさらに将来の高感度化のための技術を成熟させることが達成目標である。技術的基盤を提供する項目 D においては、世界トップレベルの極低放射能技術を発展させ項目 A~C の研究をさらに高度化すること、そして、将来の高感度化で有効な新たな装置・センサーを提供することが達成目標である。項目 E は統一的な理論体系によって項目 A~C の成果を有機的に接続し、それらの価値を一層高めることが達成目標である。総括班は、これらの目標達成の実現を統括するため、領域全体の連携強化・国際活動支援の促進は総括班会議を中心に実施し、国内研究会や国際会議によって分野融合も促進する。また、設備の共用化や技術的な連携支援は、地下施設のリーダーも参画する運営会議を中心に活性化させる。将来のリーダー育成は、総括班・運営会議での活動、各計画班での責任ある研究活動を通して行い、それを指導する機能も総括班・運営会議で受け持つ。研究人材の育成は、各計画班での若手雇用や優秀な学生の参加、教育プログラムとの連携によって積極的に行い、優秀な学生が集うよう「知的好奇心をかりたてる」研究課題を心がける。

国際活動支援においては、海外から神岡地下へ、神岡から世界の地下実験施設への人的交流を主軸に、研究を展開する。具体的には、海外の若手研究者を雇用し、海外から神岡地下実験への参加を支援する。また、海外で実験を行う研究者の支援を行う。さらに世界の地下実験施設や新たな国際共同研究の創出へ向けて研究者を派遣し、新たな国際ネットワークの形成を支援する。また、領域を長期的に展開・持続するためには、国際的な視点や経験を持った若手の育成が最重要である。この目的のため、海外の地下実験施設との間で若手の相互派遣、国際スクールの開催などを支援する。

4. 研究成果

月例の運営会議・年 4 回の総括班会議を行い、各計画班への研究アドバイス、領域内外との連携促進などを指揮してきた。毎年の領域研究会(内 2 回は国際シンポジウム)・暗黒物質に関する国際シンポジウム・超新星ニュートリノ研究会・極低放射能技術研究会のほか、不定期も合わせて合計 34 の研究会やシンポジウムを開催した。以下は、総括班の指揮の元で領域活動を通して得られた各計画班の成果や国際活動支援の成果、さらに新たに開拓した分野の継続的な発展に関する成果である。

A01 では、 $0\nu 2\beta$ の探索での KamLAND-Zen 400/800 の統合解析での排除領域が逆階層構造のバンド領域に到達したほか、 $2\nu 2\beta$ の高統計高精度スペクトル測定で $0\nu 2\beta$ 核行列要素の情報を取り出す新手法を開拓した。また、地球ニュートリノ観測では、地球モデルの精度約 20% を凌駕する観測精度 15% によって、地球物理学モデルとも言われる High-Q モデルを排除し、地球内部のダイナミクス・組成に新たな知見を与えるニュートリノ地球科学の質的転換を果たした。A02 では、現行 CANDLEES 検出器を用い、 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 崩壊の世界最高感度と同等の測定結果を得た。また、高純度化結晶に用いた Ca 原料は、B02 の高純度モレキュラーシーブとして使用されることとなった。

B01 では、イタリアグランサッソでの XENONnT 実験で原子核反跳を用いた暗黒物質探索の初の結果を出した。前身の XENON1T と同程度の曝露量でそれを凌ぐ結果を得た。XENON1T で見られた電子反跳現象の超過は低 BG 化でなくなり、太陽アクシオン等未知の現象に対する世界一厳しい制限を与えた。また、硫酸 Gd を用いた水チェレンコフ光型中性子検出器を、暗黒物質探索で初めて実用化することに成功した。B02 では、NEWAGE 用の 30cm 角低 BG μ -PIC を製作した。また、地下実験室で方向に感度を持つ暗黒物質探索を行い、2 編の論文を出版した。NEWSdm でも、原子

核乾板の読み取り技術改善、局在表面プラズモン共鳴の偏光依存性を用いた低閾値での解析法の構築などで、論文出版があった。D01・公募研究と共同で表面 α 線検出器開発を進め、共著論文として出版した。

C01では、公募研究およびD01と共同開発で0.03%Gd濃度を実現させ、世界で最も厳しい超新星背景ニュートリノに対する制限を更新した。すでに超新星爆発の平均温度が高いいくつかの理論モデルを排除している。

D01では、世界トップレベルの低BG-Ge検出器の開発に成功するとともに、極微量のRaをGe検出器で測定する手法を開発した。また、硫酸Gd水用のラドン検出器のBGレベルを目標値の 1mBq/m^3 以下に抑えることに成功したことで、硫酸Gd水に高い耐性を持つ膜脱気モジュールを開発した。これらは、B01, C01の研究進展に大きく貢献した。さらに、環境中性子の長期測定を実現し地下実験室の環境構築への知見を得たほか、 α 線イメージ分析装置の低BG化を実現し、領域の検出器材料のスクリーニングで大いに活躍した。公募研究では、落雷と地下磁場雑音の関係の測定や、地下排水量と環境中性子との相関など多角的な研究を展開した。D02では、超伝導センサー(MMC)を使い、 CaF_2 結晶を使用した蛍光熱量計を世界で初めて実現した。さらに、 α 線/ β 線の粒子識別で 5.5σ という高い分離能力を実現した。また、低温(4K)強磁場(9T)環境を整備し、無酸素銅と超伝導素材(NbTi)で作成した空洞のQ値を測定し、超伝導薄膜などを使用した高いQ値を持つ空洞開発が進んだほか、フォトニック結晶構造を使った空洞開発のアイデアを論文発表した。公募研究では、先端直接描画技術を駆使したフォトリソグラフィ技術により、インダクタンス部分に $50\mu\text{m}$ 長のエアブリッジ構造を組み込んだ超伝導検出器の作製に成功した。このデバイスで20万程度の高い共振Q値を確認し、 α 線の検出にも成功した。

E01では、宇宙の物質反物質非対称性の起源に関して、最小 $U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージ模型でのインフラトンの右巻きニュートリノへの非熱的崩壊に伴うレプトジェネシスで、ニュートリノ振動実験の観測値を説明するパラメータ領域においてバリオン数の観測値を説明することができることを明らかにした。また、将来のアクシオン・ヘリオスコープ検出器を利用した「超新星アクシオン望遠鏡」検出器を提案し、 $0(100)\text{pc}$ 以内の近傍超新星由来のアクシオンを検出できることを明らかにした。公募研究では、加速器実験と組み合わせた暗黒物質研究が進んだほか、高分解能宇宙論的構造形成シミュレーションによって自己相互作用の散乱断面積に制限($3\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ 以下)を与えることに成功した。また、Quintessential inflationシナリオにおいて、3世代の右巻きニュートリノによってレプトジェネシスとFIMP暗黒物質を実現する模型の構築に成功した。E02では、大規模シミュレーションで求めたニュートリノの角度分布に基づき、超新星コアにおけるニュートリノ集団振動の可能性を明らかにし、原始中性子星冷却期のニュートリノ観測から中性子星の質量・半径に制限をつける手法を考案した。現実的な核力から出発した状態方程式と自己無矛盾なニュートリノ放射率の計算法は改良が進んだ。また太陽系が現在の場所ではなく銀河中心近くで生まれ、その場所での銀河系の化学進化を反映していることを明らかにした。公募研究では、SN1987Aに対応する空間3次元の計算で、衝撃波の復活で電子型・反電子型ニュートリノ光度が減少すること、原始中性子星内部の対流によりニュートリノ球半径が膨張することで平均エネルギーは減少し μ 型・ τ 型ニュートリノの光度は増加することの発見があった。また、太陽金属量の大質量星の後期進化で、対流層境界を通じた物質混合が効果的に起こる場合には、カリウムや中質量元素がより効果的に作られることを明らかにした。さらに、ニュートリノ振動をモンテカルロ法で扱う手法を確立し、さらに物質とニュートリノの散乱をこれまでにない新しい方法で組み込んで、散乱・集団振動の両者を扱うことができるコードを完成した。

国際活動支援では、国際的な人材登用・若手育成・人材交流に加え、以下の成果があった。

(XENONnT実験の開始と遂行) XENONnT実験装置の建設及び運転にあたって、コロナ禍を避けながら大学院生や研究者がイタリア現地に滞在し、運転を開始、高感度な暗黒物質探索実験結果を得ることができた。その結果目標感度が達成できる校正データの取得等を行うことができた。コロナ禍のため、実質的に国際活動支援の恩恵を最も得たのが本研究活動であった。コラボレーション会議等の活動参加19名、延べ約182日、シフト取得14名、延べ約509日の海外での活動を支えた。(DARWIN/XLZD) XENONnT実験の将来計画として進められてきたDARWIN実験では、米国主導のLZ実験との協力が議論され、XLZDというさらに大きな枠組みでの将来計画の議論が開始された。各国でXLZDを見据えた将来計画が立案され、日本でも「未来の学術構想」グランドビジョン^⑩：自然界の基本法則と宇宙・物質の起源の探求にリストアップされた。将来の共同研究を基礎づける重要な進展を与えた。(低BG-Ge検出器の開発体制の確立)本領域の肝となる基幹技術を確立するため、2019年10月にフランスのランゴムサイルにあるMIRION TECHNOLOGIES SASを訪問し、専門家と超低BG仕様Ge検出器の開発に関する打ち合わせを行うとともに技術交流を行い、国際的開発体制を確立した。(ASAS-SN) SK-Gdの超新星爆発ニュートリノによるマルチメッセンジャー天文学推進のため、オハイオ州立大学を中心とした光学望遠鏡による超新星爆発探索ネットワークAll-Sky Automated Survey for SupernovaeとMoUを締結し、協力体制を構築した。(新たな日米協力体制の構築)2022年米国オークリッジ国立研究所で行われた超新星研究のためのニュートリノ反応研究会への参加、およびC01とE01合同で毎年開催している超新星ニュートリノ研究会への米国研究者招聘によって超新星ニュートリノと水との反応の詳細の測定を目指す、新たな体制を構築した。(国際ワークショップの開催)2019年から関連する研究者と毎年度共同開催してきたKASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUMは、コロナ禍の間でも国内・

海外併せて毎回 2-300 名の参加を得てきた。主催した国際会議では主としてリモート参加者が多かったが、実際に招聘できたケースでは、4 名の著名な研究者に会議に併せて短期滞在し、近隣分野の研究者と連携を行い、分野融合を含めた研究活動の拡大があった。そのほか理論研究の国際ワークショップを 3 回にわたり共催し新たな研究展開を推進した。低放射能技術を扱う会議でも、リモート参加の利点を活かして最先端の技術を持った研究者との情報交換を行う事ができた。

「地下素核」「地下宇宙」と続いた新学術領域での活動は、極稀な現象の研究によって物質の起源や力の統一を目指す「極稀現象フロンティア」を開拓した。このアクティビティは、さらに、学術変革領域「地下稀事象」に発展的に継承される。これらの領域の中でも KamLAND, SK-Gd は神岡地下に位置し、国際的な高い求心力を維持してきた。この分野は今後数十年にわたって宇宙・素粒子・原子核研究の重要な分野であり続けると期待され、求心力の高いプロジェクトのさらなる高度化に続き、長期的な視野を持った技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施していく必要がある。この観点から、A01 のプロジェクトである KamLAND を運営する東北大学ニュートリノ科学研究センターと、全国・国際共同利用共同研究機関であり A02・D02 のプロジェクトに参加する大阪大学核物理センターは、極稀現象フロンティアでの研究を展開し、技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施することを目的として、「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」(KERNEL) を組織整備として開始した。これは、本領域の大きな成果である。さらに、KamLAND エリアに KERNEL の活動を支える純空気製造装置や純水製造装置を備えるクラス 1 のスーパークリーン施設が 2025 年 3 月に竣工する。ここに導入される装置も領域の知見を取り込んだものである。地上にあるだけで宇宙線による放射化が問題となる本分野で、地下にスーパークリーン施設を有することは大きなアドバンテージとなり、技術継承を確実なものとし、技術革新を生み出す原動力となる。これも本領域での活動の成果である。これら分野を長期的に支える新しい拠点・基盤は、本領域の活動なくしては実現し得なかったものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

領域ホームページ
<https://www.lowbg.org/ugap/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梅原 さおり (Umehara Saori) (10379282)	大阪大学・核物理研究センター・准教授 (14401)	
研究分担者	森山 茂栄 (Moriyama Shigetaka) (50313044)	東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601)	
研究分担者	吉田 斉 (Yoshida Sei) (60400230)	大阪大学・大学院理学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	南野 彰宏 (Minamino Akihiro) (70511674)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	身内 賢太郎 (Miuchi Kentaro) (80362440)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	濱口 幸一 (Hamaguchi Koichi) (80431899)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授 (12601)	
研究分担者	鈴木 英之 (Suzuki Hideyuki) (90211987)	東京理科大学・理工学部物理学科・教授 (32660)	
研究分担者	関谷 洋之 (Sekiya Hiroyuki) (90402768)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計6件

国際研究集会 Kashiwa Dark Matter Symposium 2023	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 Theoretical and Experimental Approaches for Nuclear Matrix Elements of Double Beta Decays	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics UGAP2024	開催年 2024年～2024年
国際研究集会 Kashiwa Dark Matter Symposium 2020	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Dark matter searches in the 2020s - At the crossroads of the WIMP	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Graves	開催年 2020年～2020年

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------