科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」　研究概要
〔令和６年度事後評価用〕

令和６年６月３０日現在

機関番号：11301
領域設定期間：令和元年度～令和５年度
領域番号：6105
研究領域名（和文）　地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化
研究領域名（英文）　Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics
領域代表者
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（領域設定期間全体）：（直接経費）1,129,500,000 円

研究成果の概要
本研究領域では、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索、暗黒物質直接探索、超新星背景ニュートリノ観測、地球ニュートリノ観測を地下空間において世界最高感度で実施し、「物質はどこから来たのか？」、「星・銀河はどのように作られたのか？」、「元素はどのように作られたのか？」、「どのように地球に行き着いたのか？」という宇宙の基礎的・根源的な謎を解明する『地下宇宙素粒子研究』を展開する。このため、共通基盤である極低放射能技術の高度化と先進の低温検出器技術導入による技術基盤の格段の発展とともに、理論的枠組みとなる素粒子的宇宙像と宇宙の化学進化描像のシームレスな統合を目指す。また、技術的・学術的な周辺分野への応用や波及も推進する。

研究分野：地下宇宙素粒子研究（素粒子・原子核、宇宙・天文・天体、地球科学、極低放射能、低温測定器、大規模数値計算）

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)観測に適した地下環境では、超新星や太陽・大気・加速器・原子炉さらには地球ニュートリノ観測を通して、ニュートリノ振動の発見や、ニュートリノ天文学やニュートリノ地球科学を創出した。成否を分けた装置の低放射能化は極低放射能化へと進展し、非常に稀な現象を扱う**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(0ν2β)** の探索といった「地下宇宙素粒子研究」を重要な学術分野に成長させた。

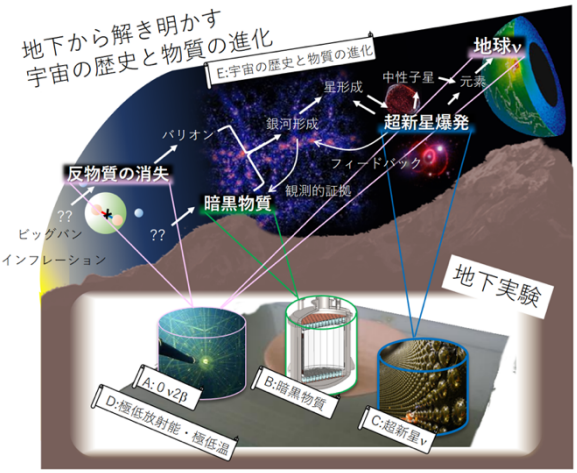
（宇宙の各時代を紡ぐ） 0ν2β研究は宇宙の始まりでの物質生成（反物質の消失）を解き明かす最重要課題であり、暗黒物質研究はその後の大規模構造の形成や星の進化を決定づけるやはり最重要課題である。さらに**過去の超新星爆発（超新星背景）ニュートリノ**の観測は星進化の歴史に新たな観測手法をもたらし、これらの連携は、宇宙の化学進化に対する系統的な研究手段を提供する。そして、**地球ニュートリノ**観測が現在の地球組成の情報をもたらすことで、地下宇宙素粒子研究は、宇宙の始まりから現在までをカバーする「宇宙の歴史と物質の進化」を解き明かす学問領域となる。

（対象とする学問分野） 実験的には、極低放射能技術を基盤とした素粒子・原子核の実験手法に、新たに低温技術を導入して高分解能化や低 BG 化を進める。主要課題は、0ν2β、暗黒物質、超新星ニュートリノ、地球ニュートリノであり、それぞれ、**「物質はどこから来たのか？」、「星・銀河はどのように作られたのか？」、「元素はどのように作られたのか？」、「どのように地球に行き着いたのか？」**という基礎的・根源的な謎の解明につながる。理論研究はこれらの実験研究を関連づけ、レプトジェネシスを中心とした物質の起源と銀河形成に関わる暗黒物質を統一的に解明する素粒子的宇宙像を確立する。また、星形成の歴史を過去の超新星爆発と関連づけ、クーリングを含む時間スケールで星の終末である超新星爆発を解明し、宇宙の化学進化に波及させる。さらに地球始原隕石に接続して、地球ニュートリノ観測・地球科学の知見を取り込み、地球形成・ダイナミクス解明にも貢献する。特に0ν2β探索、暗黒物質探索での大きな実験的進展に対応し、0ν2β頻度とニュートリノ質量の換算で重要な核行列要素の計算、および暗黒物質分布を非線形な小スケールまで解ける銀河形成シミュレーションにも分野を拡張する。また、物質の進

化の系統的解明のために、新たに超新星爆発の多次元計算、原始中性子星の冷却、状態方程式もカバーした宇宙の化学進化の研究も取り込む。対象とする**学問分野は幅広く、素粒子・原子核・宇宙・天文・天体・地球科学**に加え、極低放射能・低温測定器・大規模数値計算などの技術的分野に及ぶ。これら多様な連携で**宇宙の歴史と物質の進化を系統的に解明する地下宇宙素粒子研究分野**は、「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域」であり、「地下素核研究」が立ち上げた新興・融合領域を「格段に発展」させるものでもある。

２．研究の目的

0ν2β・暗黒物質・超新星ニュートリノ・地球ニュートリノといった地下宇宙素粒子研究の総力を結集し、各時代・各重要過程の理解を系統的に紡ぐことで、「物質はどこから来たのか？」、「星・銀河はどうのように作られたのか？」、「元素はどのように作られたのか？」、「どのように地球に行き着いたのか？」という一連の宇宙の歴史と物質の進化を解き明かす。「神岡」地下の強固な連携を国際共同に拡張し、各課題を更に深化する低温技術・核行列要素・暗黒物質分布、一連の宇宙の歴史と物質の進化の解明を系統的に展開する超新星爆発理論・物質進化を領域に取り込み、シナジー効果を増大させる。それによって、個々の研究の飛躍的な発展とともに、分野での高い競争力を長期間維持し、人材育成も含めた長期的な視野で研究戦略を立てることで、世界をリードして宇宙の歴史と物質の進化を解明する研究を展開する。

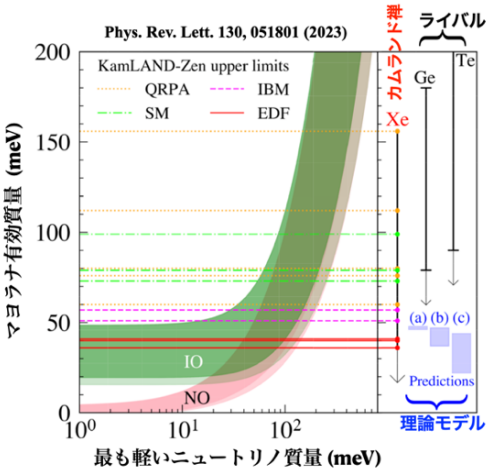


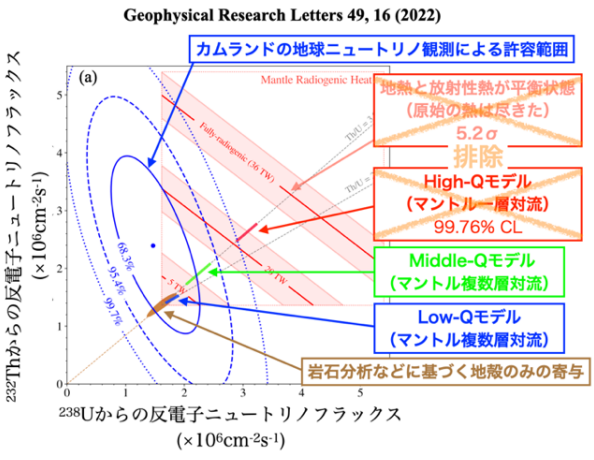
３．研究の方法

0ν2βの探索では、KamLAND-Zen が世界を大きくリードしている。暗黒物質探索では、XENON 実験が世界をリードしており、XENONnT に発展する。超新星ニュートリノ観測ではスーパーカミオカンデ(SK)が世界トップの感度を有しており、更に感度が高まる SK-Gd に発展する。地球ニュートリノ観測は、パイオニアである KamLAND が世界をリードしている。本研究領域は、各課題のトップランナーであるこれらの旗艦プロジェクトと将来展開を見据えた挑戦的な研究が、共通の基盤技術の下に連携し相乗的に発展する。将来を見据えた研究では、他核種を使った 0ν2β実験が、同位体濃縮や極低温蛍光熱量計技術を取り込み、究極の感度技術を開拓する。また、暗黒物質探索では、ニュートリノ BG の限界を突破する方向有感探索を国際協働で推進する。地下宇宙素粒子研究で基盤となる極低放射能技術では、世界最高性能を追求して展開するとともに、国際連携のデータベース発信により分野全体の技術レベルを底上げする。また、エネルギー分解能向上や低閾値を実現する革新技術として低温検出器技術を取り込み、長期にわたって世界をリードしていく。さらに、理論的な枠組みとなる素粒子的宇宙像と宇宙の化学進化描像のシームレスな統合を目指すことで、各研究の相乗効果・波及効果を大幅に高める。

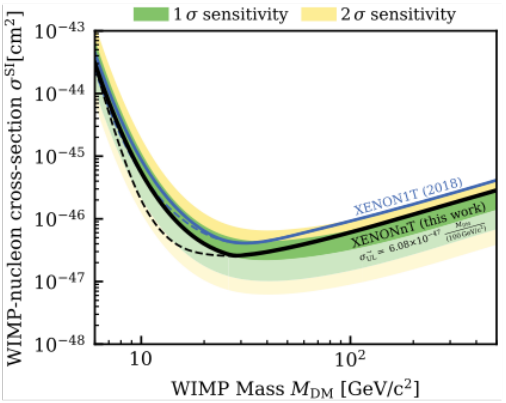
４．研究の成果

A01 では、0νββ の探索での KamLAND-Zen 400/800 を統合した解析を実施し、**世界で初めて逆階層領域に切り込む制限**（36-156meV 以上を排除）を与え PRL 誌に発表[1]した。複数の理論モデルにもかかり始めた。高性能化のための開発は、プロトタイプでの性能検証を経て、高性能化プロジェクトとして提案し、文科省のロードマップ 2023 に掲載された。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%を実現し GRL 誌に発表[2]した。High-



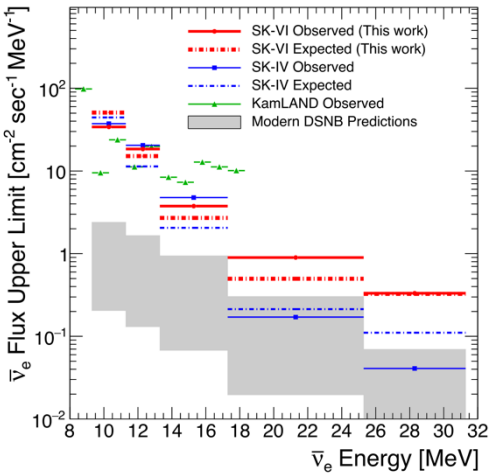


Q モデルと呼ばれるマントルの一層対流を予言するモデルを排除することに成功した。地球内部のダイナミクスに対する知見(マントルの多層対流)に加えて、モデルの仮定に問題があることを示唆することから、地球内部組成に対しても知見を与えており、**ニュートリノ地球科学の質的転換**を果たした。日本学術会議の未来の学術構想 2023 には、カムランドの高性能化プロジェクト (No.178) と地球ニュートリノ観測を発展させる計画(No.106)の 2 件が掲載されている。A02 では、現行 CANDLES 検出器を用い、^{48}Ca の $0\nu2\beta$ 崩壊の世界最高感度と同等の測定結果を得た[3]。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[4]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[5]。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[6]、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 との密接な連携により追加導入用の高純度硫酸 Gd 開発、製造、評価を実施した。そして 2022 年度に 0.03%Gd 濃度を実現させ、世界最高感度の超新星背景ニュートリノ探索を行った。2023 年 9 月までの観測データから**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[7]。すでにいくつかのモデルで予言される領域を排除している。**



D01 では、世界トップレベルの低 BG-Ge 検出器の開発に成功[8]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 5.5 σ 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[9]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 μm 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)μ−τ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、O(100)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(3cm^{2}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、対流層境界を通し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。

また、本領域活動によって、新しい本分野を支える研究基盤を形成することができた。「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(RCNS)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(RCNP)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（受賞等を含む）

[1] S.Abe et al. (KamLAND Collaboration), Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen, Physical Review Letters130, 051801 (2023). **Editors' Suggestion, Featured in Physics**

[2] S.Abe et al. (KamLAND Collaboration), Abundances of Uranium and Thorium Elements in Earth Estimated by Geoneutrino Spectroscopy, Geophysical Research Letters 49, 16 (2022). **AGU Research Spotlight**

[3] S. Ajimura et al, Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca, Phys. Rev. D **103**, 092008 (2021).

[4] E. Aprile et al. (XENON Collaboration), First Dark Matter Search with Nuclear Recoils from the XENONnT Experiment, Phys. Rev. Lett. 131, 041003 (2023). **Editors' Suggestion, Featured in Physics**

[5] E. Aprile et al., Search for New Physics in Electronic Recoil Data from XENONnT, Phys. Rev. Lett. 129, 161805 (2022) pp161805-1-161805-10. **Editors' Suggestion, Featured in Physics**

[6] T. Shimada et al., Direction-sensitive dark matter search with three-dimensional vector-type tracking in NEWAGE, PTEP (2023), ptad120

[7] M. Harada et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), Search for Astrophysical Electron Antineutrinos in Super-Kamiokande with 0.01% Gadolinium-loaded Water, Astrophysical Journal Letters 951 L27 (2023)

[8] K. Ichimura, M. Ikeda, H. Sekiya, H. Ito, A. Minamino, S. Suzuki et al., Development of a low-background HPGe detector at Kamioka Observatory, PTEP, (2023), 123H01

[9] Y. Kishimoto et al., Development of a cavity with photonic crystal structure for axion searches, PTEP ptab051 2021.

[10] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Tseng, K. Tsumura, Minimal Gauged U(1)L_α-L_β Models Driven into a Corner, Phys.Rev.D 99 (2019) 5, 055029.

[11] *Y. Ashida, K. Nakazato, T. Tsujimoto, Diffuse Neutrino Flux Based on the Rates of Core-collapse Supernovae and Black Hole Formation Deduced from a Novel Galactic Chemical Evolution Model, The Astrophysical Journal 2023, 953, 151.

ホームページ等

http://www.lowbg.org/ugap/