

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（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,129,500,000円

研究の概要

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

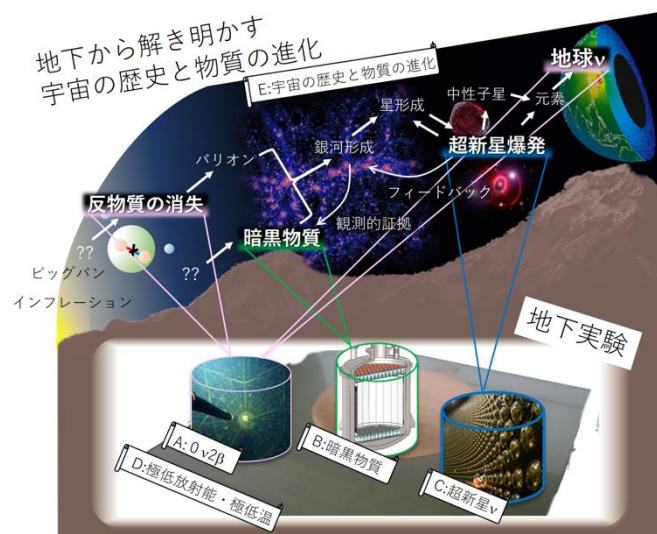
（地下宇宙素粒子研究の発展） 低バックグラウンド(BG)観測に適した地下環境では、超新星や太陽・大気・加速器・原子炉さらには地球ニュートリノ観測を通して、ニュートリノ振動の発見や、ニュートリノ天文学やニュートリノ地球科学を創出した。成否を分けた装置の低放射能化は極低放射能化へと進展し、非常に稀な現象を扱う**暗黒物質**の直接探索や**ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu2\beta$)**の探索といった「地下宇宙素粒子研究」を重要な学術分野に成長させた。**（宇宙の各時代を紡ぐ）** $0\nu2\beta$ 研究は宇宙の始まりでの物質生成（反物質の消失）を解き明かす最重要課題であり、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。

（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、 $0\nu2\beta$ 、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 $0\nu2\beta$ 探索、暗黒物質探索での大きな実験的進展に対応し、 $0\nu2\beta$ 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

0v2β・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

0v2β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 0v2β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. 研究の進展状況及び成果

A01 では、0v2β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、2v2βの高統計高精度スペクトル測定で 0v2β核行列要素の情報を取り出す新手法を開拓[1]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 15.6%を実現し、地球物理学モデルとも言われる High Q モデルをほぼ排除した。A02 では、現行 CANDLES 検出器を用い、⁴⁸Ca の0v2β崩壊の世界最高感度と同等の測定結果[2]を得た。また、CaF₂蛍光熱量検出器開発では、発生位置依存性を取り除ける事象に対して目標エネルギー分解能を超えたエネルギー分解能 0.2% (4.3MeV 換算) まで到達できることを確認した。公募研究との連携も進んでおり、いずれも期待を超えた進展があった。

B01 では、イタリアグランサッソでの XENONnT の建設を進めるとともに、XENON1T において電子反跳現象に超過を観測[3]した。B02 では、地下実験室で取得済みのデータを使い方向に感度を持つ暗黒物質探索[4]を行なった。また、NEWAGE 用の 30cm 角 (当初予定は 10 cm 角) の低 BG マイクロピクセルイメージ測定器(μ-PIC)を製作した。予定を超えた進展を得ている。

C01 では、SK-IV における反電子ニュートリノ探索で、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得た。また、0.011%の Gd を導入し、SK-Gd[5]の動作検証を行なった。概ね計画通りに研究が進展している。

D01 では、極微量のラジウムをゲルマニウム検出器で測定する手法を開発[6]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/m³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、SK-Gd での使用を開始した。さらに、液体シンチレータ中性子検出器のアルファ線バックグラウンドを従来の 1/4 程度まで低減した。D02 では、超伝導センサー(MMC)を使い、CaF₂結晶を使用した蛍光熱量計を世界で初めて実現し

た。また、希釈冷凍機への低放射能シールドの導入や、クライオスタットと9T超伝導磁石を導入し、高磁場下で高いQ値を持ったマイクロ波空洞の開発[7]を行なった。各計画研究・公募研究との連携も活発であり、概ね計画通りに研究が進展している。

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**」検出器の提案[8]をし、0(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。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[9]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。領域内外での想定を超えた連携が進んでいる。

5. 今後の研究計画

それぞれの計画研究は順調に進展しており、総括班主導の運営会議や研究会などを通して計画研究・公募研究間の順調な連携と領域を超えた連携が行われている。この**活発な雰囲気**を**継続することを重視した運営**を行う。また、若手育成を進め人材の流動性をさらに高め、分野をリードする研究者を輩出する。さらに、幅広い国際連携を支援する。

各計画研究においては、A01では、マヨラナ有効質量で世界をリードする40meVの感度での0 ν 2 β 探索を行うとともに、20meV実現に向けた技術開発を行う。また、地球モデルの選別を進める。A02では、 ^{48}Ca での探索を進めるとともに、レーザー濃縮において出力2Wを達成し、50%超の同位体比を実現する。B01では、XENONnTにおいて電子反跳事象超過の検証を行い、さらに、暗黒物質の散乱断面積 $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$ の探索感度を達成する。B02では、NEWAGEにおいて地下環境で方向有感でのDAMA領域での探索を開始し、NEWSdmにおいても、地下環境での赤道儀を用いた暗黒物質探索を行う。C01では、Gd濃度を0.03%まで高め、中性子同定効率を約75%まで高めた超新星背景ニュートリノの観測を開始する。D01では、世界最高感度の新型ゲルマニウム検出器稼働させる。また、キセノンガス中の10ppqレベルのクリプトン測定を実現する。D02では、地下環境で極低BG希釈冷凍機稼働させ、極低BG低温熱量計の開発を進めるとともに、低温強磁場環境での高Q空洞の開発を進める。E01では、インフレーションから物質反物質非対称性の生成、暗黒物質生成、宇宙の構造形成までの研究を進めていくとともに、連携・交流を促進する。E02では、大規模計算を進め、超新星爆発のメカニズムやニュートリノ放出の研究を進める。また、種族合成・化学進化と組み合わせた超新星背景ニュートリノ・地球ニュートリノの総合的な研究へと発展させる。

6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

- [1] A.Gando, Y.Gando, T.Hachiya, M.Ha Minh, S.Hayashida, Y.Honda, K.Hosokawa, H.Ikeda, K.Inoue et al. (KamLAND-Zen Collaboration), Precision Analysis of the ^{136}Xe Two-Neutrino $\beta\beta$ Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements, *Physical Review Letters* **122**, 192501 (2019).
- [2] S. Ajimura, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida et al., Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca , *Phys. Rev. D* **103**, 092008.
- [3] E.Aprile, S.Kazama, S.Moriyama, M.Yamashita et al. (XENON collaboration) Observation of Excess Electronic Events in XENON1T, *Phys. Rev. D.* **102**, 072004 (2020).
- [4] T. Ikeda, ..., K. Miuchi, Direction-sensitive dark matter search with a low-background gaseous detector NEWAGE-0.3b, *PTEP* (2021) ptab053.
- [5] C. Simpson, H. Sekiya, Y. Takeuchi et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission, *Astrophys. J.* **885**, 2 (2019).
- [6] S. Ito, K. Ichimura, M. Ikeda et al., Improved method for measuring low-concentration radium and its application to the Super-Kamiokande Gadolinium project, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2020, Issue 9, September 2020, 093H02.
- [7] Y. Kishimoto et al., Development of a cavity with photonic crystal structure for axion searches, *PTEP* ptab051 2021.
- [8] S. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa, Y. Kishimoto, N. Nagata, J. Zheng, Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **11** (2020) 059.
- [9] Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki, A New Approach to Mass and Radius of Neutron Stars with Supernova Neutrinos, *Astrophys.J.*891:156,2020.

ホームページ等

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