

領域略称名：地下宇宙

領域番号：6105

令和3年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る中間評価報告書

「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

領域設定期間

令和元年度～令和5年度

令和3年6月

領域代表者 東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授・井上 邦雄

# 目 次

## **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3 研究領域の目的及び概要	5
4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	7
5 研究の進展状況及び主な成果	9
6 研究発表の状況	14
7 研究組織の連携体制	19
8 若手研究者の育成に関する取組状況	20
9 研究費の使用状況・計画	21
10 今後の研究領域の推進方策	22
11 総括班評価者による評価	24

**研究組織**

(令和3年6月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	19H05802 地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化	令和元年度 ～ 令和5年度	井上邦雄	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授	9
A01 計	19H05803 逆階層領域でのニュートリノのマヨラナ性の研究	令和元年度 ～ 令和5年度	井上邦雄	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授	1
A02 計	19H05804 48Caを用いたニュートリノマヨラナ性の研究と次世代高感度化技術開発	令和元年度 ～ 令和5年度	梅原さおり	大阪大学・核物理研究センター・特任准教授(常勤)	4
B01 計	19H05805 高感度大型装置で推進する暗黒物質直接探索	令和元年度 ～ 令和5年度	森山茂栄	東京大学・宇宙線研究所・教授	5
B02 計	19H05806 方向に感度をもった暗黒物質直接探索	令和元年度 ～ 令和5年度	身内賢太郎	神戸大学・大学院理学研究科・准教授	3
C01 計	19H05807 超新星背景ニュートリノの高感度観測でせまる宇宙星形成の歴史	令和元年度 ～ 令和5年度	関谷洋之	東京大学・宇宙線研究所・准教授	4
D01 計	19H05808 極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用	令和元年度 ～ 令和5年度	南野彰宏	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授	7
D02 計	19H05809 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化	令和元年度 ～ 令和5年度	吉田斉	大阪大学・理学研究科・准教授	5
E01 計	19H05810 物質の起源を解明する新たな素粒子模型と初期宇宙進化の理論研究	令和元年度 ～ 令和5年度	濱口幸一	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	5
E02 計	19H05811 超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究	令和元年度 ～ 令和5年度	鈴木英之	東京理科大学・理工学部物理学科・教授	5
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	20H05241 半減期 10 の 27 乗年以上の二重 $\beta$ 崩壊観測を実現する T1-208 背景事象	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	福田善之	宮城教育大学・教育学部・教授	1
A01 公	20H05242 有限振幅法を用いた原子核密度汎関数理論による二重ベータ崩壊行列要素計算	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	日野原伸生	筑波大学・計算科学研究センター・助教	1
A01 公	20H05251 ガス飛跡検出器で探るマヨラナ・ディラック決着への道	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	小原脩平	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教	1
B02 公	20H05252 高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	中村輝石	東北大学・理学研究科・助教	1
C01 公	20H05243 高マトリクス試料中の極微量放射性核種測定法確立-地下宇宙研究への応用	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	坂口綾	筑波大学・アイソトープ環境動態研究センター・准教授	1
D01 公	20H05246 極低放射能測定における $\mu$ -TPC を用いたアルファ線イメージ分析装置の開発	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	伊藤博士	東京理科大学・理工学部・助教	1
D01 公	20H05256 落雷磁場を利用した神岡地下水分量の長期観測	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	鷲見貴生	国立天文台・重力波プロジェクト・学振 PD	1
D02 公	20H05244 エアブリッジインダクタンスによる超伝導力学インダクタンス検出器の高感度化	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	成瀬雅人	埼玉大学・理工学研究科・助教	1
E01 公	20H05239 各種暗黒物質探索実験データと素粒子模型を系統的に照合するための枠組構築	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	馬渡健太郎	岩手大学, 教育学部, 准教授	1
E01 公	20H05245 高解像度シミュレーションを用いた暗黒物質分布の精密評価	令和 2 年度 ～ 令和 3 年度	石山智明	千葉大学, 統合情報センター, 准教授	1
E01 公	20H05247 (廃止) 暗黒物質サブハローの性質と直接・間接検出実験への示唆	令和 2 年度 ～ 令和 2 年度	安藤真一郎	東京大学, カブリ数物連携宇宙研究機構, 客員科学研究	1

E01 公	20H05248 右巻ニュートリノによる宇宙物質 総生成	令和2年度 ～ 令和3年度	横山順一	東京大学, 大学院理学系研 究科(理学部), 教授	1
E02 公	20H05240 ニュートリノ集団振動を考慮した 超新星ニュートリノスペクトルの 構築	令和2年度 ～ 令和3年度	加藤ちなみ	東京理科大学・理工学部・助 教	1
E02 公	20H05249 大質量星における40Kと中質量元 素の元素合成: 後期進化の対流混 合による影響	令和2年度 ～ 令和3年度	吉田敬	京都大学・基礎物理学研究 所・特定研究員	1
E02 公	20H05255 現実的な3次元超新星モデルに基 づく超新星背景ニュートリノ解析	令和2年度 ～ 令和3年度	中村航	福岡大学・理学部物理科学 科・助教	1
公募研究 計 15 件 (廃止を含む)					

[1] 総: 総括班、計: 総括班以外の計画研究、公: 公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数 (辞退又は削除した者を除く。)

## 研究領域全体に係る事項

### 3 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

#### ●学術的背景

(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。

#### ●革新性

**0ν2β探索**は、物質起源解明に繋がるニュートリノのマヨラナ性を検証する最適な手法である。「地下素核研究」では、領域での極低放射能技術共有化により、KamLAND-Zenが世界を大きくリードする成果を得て、ニュートリノの質量階層構造のうち縮退構造領域をほぼ全て排除した。次なる二重β崩壊核<sup>136</sup>Xeの倍増化と高性能電子回路導入では、逆階層構造に切り込む40meVを切る感度で理論班の複数のモデルを直接検証し、「0ν2βが発見されるなら神岡」という状況を継続する。一方、0ν2β発見の際は、多様な原子核での測定が背景物理の特定に有効であり、<sup>48</sup>Caで世界をリードする計画班は、レーザー同位体濃縮や極低温蛍光熱量計技術による高感度化に取り組み、将来を見据えた万全の開発体制をとる。

**暗黒物質探索**は、「地下素核研究」においてはXMASSが世界をリードする成果を上げてきたが、国際活動支援班を活用し、培った技術を携えて世界に打って出る選択をした。合流するXENONnTに本領域から中性子識別技術・ラドン低減技術を持ち込むことで、多くの理論モデルをカバーする数GeV以上の未踏領域で、大気ニュートリノのコヒーレント散乱の限界(ニュートリノフロア)に迫る $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$ の感度を実現し、「大発見も期待」できる。一方、<sup>8</sup>B太陽ニュートリノフロアの限界に近い数GeV領域では、世界を呼び込み実施する方向感度を有する暗黒物質探索装置の開発によって、限界突破に道筋をつけ、

大発見後の詳細研究技術も担保する。

さらに、「地下素核研究」でのガドリニウム(Gd)化合物の低放射能化は、未踏の**超新星背景ニュートリノ**に感度を持つSK-Gdを実現させた。さらに大量のGd高度純化で、検出効率を約2倍に高め現実的な期間に有意な信号を捉えることができる。

技術面では、各実験グループが発展させた**極低放射能技術**の集結により、世界トップレベルの状況にある。国際協力によるさらなる高度化、中性子検出器・世界最高感度のラドン検出器やGe検出器といった**高性能設備を基盤化**することで、全実験的研究のさらなる高度化・効率化を実現できる。また、**低温技術**は、 $0\nu2\beta$ ・暗黒物質探索の双方で**将来の有力技術**と目されており、ニュートリノ質量の順階層領域を狙う $0\nu2\beta$ 探索や、GeVを切りMeV程度までをカバーする暗黒物質探索、そしてアクシオンやアクシオンの物質(ALP)を探索する素子や装置を開発し、将来の超高感度探索計画の礎とする。理論面では、宇宙の物質起源を説明する有力理論である**レプトジェネシス理論**を生み出した伝統を持ち、世界をリードする理論グループが、暗黒物質分布のシミュレーション計算、 $0\nu2\beta$ の核行列要素計算を取り込み、各実験の観測結果が相乗的に成果を生み出すシナジーとして機能する。また**超新星を中心とする理論班**は、3次元爆発計算で世界をリードする研究者、その後のクーリングを含む100秒程度までをカバーできる研究者が集い、超新星爆発の前兆現象から爆発後100秒までをカバーできる、**世界トップの体制**を構築する。クーリングまでを含め、状態方程式の研究も進めることで、宇宙の歴史解明に重要な役割を果たす。さらに、ビッグバンでのLi生成やr過程、太陽系の始原隕石にも波及できる化学進化の第一線の研究者との共同研究で、宇宙の物質進化を解き明かし、地球ニュートリノ観測へ接続することも考慮している。理論研究を拡充したことで、超新星爆発による暗黒物質分布の変動、中性子星の温度観測を使った暗黒物質やALPへの制限、超新星ニュートリノを使ったニュートリノ振動研究、ビッグバン元素合成でのLi問題と関連づけた標準理論を超えた理論研究など、新たな多様な展開も期待される。

#### ●研究期間終了後に期待される成果等

(1) **マヨラナ性検証**： $^{136}\text{Xe}$ 原子核を用いて、世界をリードするニュートリノのマヨラナ性検証を行い、**逆階層領域に切り込み40meVを切る感度で複数の理論モデルを検証**する。また、逆階層領域をカバーする20meVに到達する技術を確認する(A01)。相補的・先駆的なアプローチとして $^{48}\text{Ca}$ での探索を高度化するために、高純度結晶(10 $\mu\text{Bg/kg}$ )を実現、さらに $^{48}\text{Ca}$ 同位体濃縮度50%、蛍光熱量検出器技術において0.5%のエネルギー分解能を達成する(A02)。

(2) **暗黒物質探索**：XENONnTに中性子識別およびラドン低減技術を導入し、世界トップの**WIMP反応断面積感度 $2\times 10^{-48}\text{cm}^2$ を達成**する(B01)。また、将来的な暗黒物質の正体解明のために、方向に感度を持つ複数技術の開発を進め、地下実験室にて方向に感度を持つ暗黒物質探索を行う(B02)。

(3) **超新星ニュートリノ**：SK-Gdで、世界初の**超新星背景ニュートリノ検出を実現**する(C01)。これにより、星形成率や星形成史、超新星爆発からクーリングに至る星の終焉に対する知見を深める。また超新星爆発ニュートリノを取り逃がさない観測体制を継続する。

(4) **地球ニュートリノ**：**モデルを凌駕する地球ニュートリノ観測精度を実現**し、地球モデルの検証を行う(A01)。地球始原隕石の特定と合わせて、物質の進化に対する較正点を提供する。

(5) **極低放射能技術**：**世界最高感度のGe検出器を構築し共用化**する。また、地下各所の中性子スペクトルをデータベース化する。極微量放射能測定・除去技術開発により、各実験の高度化を実現する(D01)。

(6) **低温技術**：**極低バックグラウンド希釈冷凍機**、ならびに冷却強磁場空洞を開発・整備し、多様な超高分解能低温温度センサー(NTD, MMC, KID)を応用した検出器を開発するとともに、テスト環境での $0\nu2\beta$ 探索・低質量暗黒物質探索を行い、アクシオン探索の技術を確認する(D02)。

(7) **理論研究**：**物質粒子の起源から宇宙進化への一連の理論的枠組みを構築**し、実験的に得られる情報を宇宙の歴史の系統的理解に反映させる。また、 $0\nu2\beta$ 核行列要素の精度向上(分担者の昇任による海外転出に伴いA01公募と連携する)、暗黒物質分布の理論的不定性を低減する(E01)。原始中性子星からのニュートリノ・超新星背景ニュートリノを含む超新星ニュートリノの理論モデルを確認し、宇宙の化学進化との有機的関係を扱う分野を構築する(E02)。

(8) **本領域の発展による学術水準の向上・強化**：本領域が、神岡地下の国際的優位性をさらに発展させ極低放射能技術を核とした地下宇宙素粒子研究分野で**世界をリード**することで、科学技術立国日本に必要な若い人材を惹きつけ、本領域が注力する若手育成・国際活動によって科学技術立国の継続発展に貢献する。本領域が発展させる極低放射能技術・低温技術は、宇宙・天文・素粒子・原子核研究における希な現象研究の基盤であり、高精度高感度を必要とする広い分野への波及効果も期待できる。

#### 4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

- 審査結果の所見における指摘

- 指摘内容

個々の素粒子研究については十分な実績や研究遂行能力及び発信力が認められる一方で、天文学と地球物理学に関連して期待される成果が限定的なものにとどまることがないように、多様な計画研究を内包することによって実現できる学理を目指して、複数の計画研究が互いに補強し合う研究領域の運営が求められる。

- 対応状況

E02 では、超新星ニュートリノの理論計算を行うとともに、それを宇宙初期からの星形成史を組み合わせ、宇宙に蓄積してきた超新星背景ニュートリノの理論計算を行うことで、C01 のSK-Gdによる観測に備えている。また、ニュートリノの評価に加えて、合成された宇宙に放出された重元素量の時間発展（化学進化）も総合的に取り扱うために、さまざまな質量の星、さまざまな周期や質量比の連星の存在比を考慮した種族合成計算を行う。具体的には、Hurley らの種族合成計算コードと、大質量星コアの重力崩壊を扱う Mueller モデルを組み合わせた計算を構築しており、放出されるニュートリノと重元素量・形成される中性子星の質量を評価することができる。最終的に中性子星連星が形成された場合は、連星合体時に放出されるウランやトリウムを含む r 過程元素が、太陽系形成時に地球に取り込まれ、地球ニュートリノの源となる。このような、A01 の KamLAND が観測を実現している地球ニュートリノと C01 の SK-Gd が目指す超新星背景ニュートリノを結びつける総合的な研究は、審査結果の所見で指摘された天文学と地球物理学に関連し、多様な研究計画を内包することで実現できる学理の開拓であり、複数の計画研究が互いに補強し合うことを実現するものである。領域運営としては、この天文学的な元素合成と地球の重元素量分布を結びつける研究体制をさらに強化するため、2020 年度より宇宙化学進化を専門とする国立天文台の辻本拓司氏を E02 の研究分担者に加えた。既に成果は出始めており、天の川銀河内での太陽系形成に関する研究が進み、太陽系が形成された領域は、重元素量の多い銀河系中心に近い領域であることを明らかにした。また地球ニュートリノ源となる、ウラン・トリウム量に関する議論も開始した。C01 と E02 が合同開催した第 6 回超新星ニュートリノ研究会（2020 年 1 月）では、辻本氏に「理論からの宇宙化学進化」、国立天文台の青木和光氏に「星観測からの宇宙化学進化」、東工大の横山哲也氏に「隕石分析からの宇宙化学進化」というレビュー・チュートリアル講演を依頼し、多くの領域メンバーが天文学と地球科学の両面から宇宙の化学進化を学ぶことができた。さらに、2020 年度に入ってから、新学術領域「冥王代生命学」の計画研究代表で地球科学の専門家である東工大の丸山茂徳氏や理化学研究所の戒崎俊一氏との共同研究も立ち上げた。彼らが研究成果として提唱する大陸三層モデルは、標準的なモデルと異なる地球内部のウラン・トリウム分布を予測することから、それぞれのモデルに基づく世界各地の地球ニュートリノフラックスを計算し、稼働中の KamLAND や将来計画として検討されている海洋底ニュートリノ実験での識別可能性を議論している。丸山氏には、第 7 回超新星ニュートリノ研究会（2021 年 1 月）で、地球科学の基礎と大陸三層モデルについて詳細なチュートリアル講演を依頼し、再び多くの領域メンバーの学習に役立った。

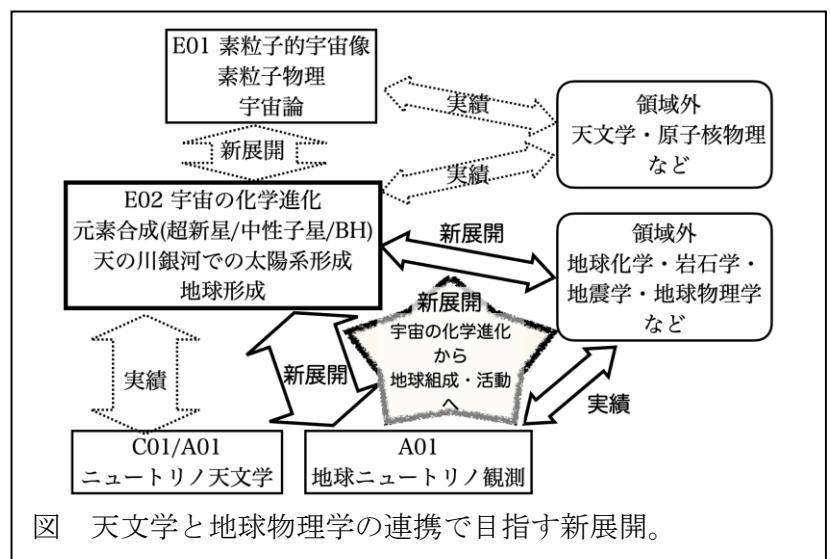


図 天文学と地球物理学の連携で目指す新展開。

他にも関連実績として、超新星ニュートリノ研究会での地球ニュートリノの議論をきっかけに、太



陽系の移動と地球史的事象の関連が論文発表（謝辞に A01 の研究代表者）された。

“Remarkable Migration of the Solar System from the Innermost Galactic Disk; a Wander, a Wobble, and a Climate Catastrophe on the Earth,” T.Tsujimoto and J.Baba, *The Astrophysical Journal* **904**:137(6pp), 2020.

また、A01 が推進する KamLAND では、東京大学地震研究所との共同利用による地球モデル高精度化の取り組みや新学術領域「核-マントル共進化」(H27-31)への参画を続けてきており、メンバーによる地球化学者・岩石学者・地震学者などと共著の論文発表もある。

“Stochastic modeling of 3-D compositional distribution in the crust with Bayesian inference and application to geoneutrino observation in Japan,” N.Takeuchi et al., *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **288** (2019) 37-57.

## ● 留意事項 1

### ● 指摘内容

技術の連携は理解できるが、複数の計画研究をいかに学理として互いに補強し合うかが明らかでなかった。関連する過去の採択領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」（2014-2018年度）との違いや発展性については、より明確な説明が求められる。

### ● 対応状況

宇宙の物質生成から、その後の大規模構造の形成や星の進化を決定づける暗黒物質の解明は、素粒子的宇宙像の核心であり、 $0\nu 2\beta$ 探索で物質生成解明に挑む A 班と暗黒物質を探索する B 班は、E01 の研究で関連づきシナジーを形成する。星進化の詳細は天文学的要因が重要であり、**新設 E02 の研究と C 班の超新星背景ニュートリノ観測**によって、化学進化とともに解明を進められる。大規模構造形成と星進化の境界領域は E01 と E02 の連携が重要であり、また未知の素粒子の存在が影響する激しい天体現象は、E01 と E02 が連携する格好の舞台である。本領域が**新たに取り組む化学進化と地球科学の関係**は、上述の「審査結果の所見における指摘」にあるように、E02 が核となって C01 がもたらす超新星背景ニュートリノ・太陽ニュートリノの情報と、現在の較正点として A01 がもたらす地球ニュートリノの情報を関連づけることでシナジーが形成される。地球を扱うには銀河系での太陽系形成が重要課題であり、研究体制を強化のために、E02 の分担者に宇宙化学進化が専門の辻本氏を加えたことは、前述のとおりである。A 班、B 班、C 班は、宇宙の始まりから地球形成までを実験的に広くカバーし、E 班によって学理として互いに補強し合う関係が構築されている。

## ● 留意事項 2

### ● 指摘内容

研究領域の運営体制については、過去の採択領域の運営体制を更に発展させるという抽象的な表現にとどめるのではなく、課題を明確にした上で、実効的な改善方策の着実な実施が望まれる。

### ● 対応状況

**連携活性化と若手育成強化**：本領域は幅広い宇宙の時代を扱い、新設の D02 が取り組む技術開発は新規性が高いため、若手育成も意識して、**チュートリアルを特に重視した多種の研究会の開催を増やし、議論を深めることで連携を活性化している**。領域では、極低放射能コミュニティのメーリングリストを運営しているのに加え、Slack のワークスペースを新たに開設し、研究会でも活用することで若手の利用者を増やし、多くの若手を含む構成員と幅広い情報交換を行ない、運営にも反映させている。

**波及促進**：D02 が取り組む低温技術は幅広い応用が見込まれるため、量子デバイスや物性研究への波及を促進し、東北大学 AIMR、通信研究所、ニュートリノ科学研究センター、米国パーデュー大学が取り組む連携研究“Quantum Sensing: From Materials to Universe”が、東北大学「新領域創成のための挑戦研究デュオ」に採択された。

**設備有効活用促進**：また、設備の更なる有効活用を実現すべく、領域外の極低放射能測定にも貢献するほか、地下クリーン環境の整備では領域外の意見も取り入れた設計を行なっている。さらに、東北大学の宇宙創成物理学国際共同大学院で実施している高度実験プログラムでも有効活用し、先進性の高い教育にも貢献している。

## 5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 目標と進展

#### ● 研究項目 A01 の目標と進展

(期間内目標) KamLAND-Zen 実験によって逆階層構造に切り込み、複数の理論モデルを検証できる 40meV の感度を達成する。地球ニュートリノ観測では、地球モデル精度を凌駕する観測精度でモデル選別を進める。マルチメッセンジャー天文学に関しては、低エネルギー天体ニュートリノ観測を担当し、天体現象との相関研究や近傍超新星前兆ニュートリノアラーム構築を行う。(中間評価までの目標) BG 低減のための新型電子回路のプロトタイプを製作、逆階層構造をカバーする感度 20meV 実現のための技術開発、共用地下クリーン環境の整備を進める。(進展)  $0\nu 2\beta$  探索では、KamLAND-Zen 800 の感度が 400 を上回った。プロトタイプ電子回路(図)で期待性能を確認した。感度 20meV を実現する集光ミラーの開発・設計に成功した。地下クリーン環境用の空間整備を実施した。地球ニュートリノ観測では期待を超えてモデル精度(約 20%)を凌駕する観測精度(15.6%)を達成した。マルチメッセンジャー天文学では近傍超新星前兆ニュートリノアラームを開始したほか、重力波との相関探索を論文発表した。全体として期待を超えた進展があった。

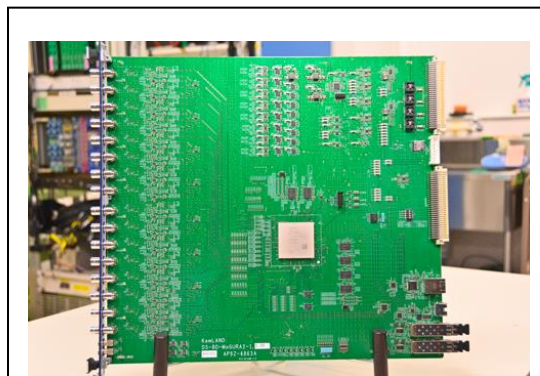


図 A01 で製作した新型電子回路。

#### ● 研究項目 A02 の目標と進展

(期間内目標)  $^{48}\text{Ca}$  の  $0\nu 2\beta$  測定および次世代測定器開発を行なう。次世代測定器の飛躍的感度向上には、 $\text{CaF}_2$  結晶の高純度化・ $\text{CaF}_2$  蛍光熱量検出器・ $^{48}\text{Ca}$  濃縮技術が重要である。それぞれの目標は、 $^{48}\text{Ca}$  の  $0\nu 2\beta$  測定で世界最高感度を更新、高純度結晶(10 $\mu\text{Bq}/\text{kg}$  以下)の製造技術確立、蛍光熱量検出器開発は、 $0\nu 2\beta$  測定で要求されるエネルギー分解能 0.5%(4.3MeV 換算)の達成、 $^{48}\text{Ca}$  濃縮については高出力レーザーおよび濃縮装置を開発し同位体比 50%以上の  $^{48}\text{Ca}$  濃縮である。これらから、順階層構造領域に至り数 meV 程度の感度にも達成可能な検出器開発に繋げる。(中間評価までの目標)そのために、4 か月の  $0\nu 2\beta$  測定データを解析し結果を報告する。また、 $^{48}\text{Ca}$  濃縮のための基本レーザーシステムを構築し性能評価する。(進展) 130 日の  $0\nu 2\beta$  測定データの解析を進め、バックグラウンドのない  $^{48}\text{Ca}$  の  $0\nu 2\beta$  測定を実現した。D02 と連携して、 $\text{CaF}_2$  を蛍光熱量検出器として動作させて、結晶内で発生位置依存性を取り除ける事象では、目標分解能を超えたエネルギー分解能 0.2%まで到達できることを確認できた。 $^{48}\text{Ca}$  濃縮ではコストパフォーマンスの良い注入同期レーザー方式を用いて、周波数安定性が要求以上の 2.0MHz (rms) を満たした光出力 100mW を実現した。全体として期待を超えた進展があった。

#### ● 研究項目 B01 の目標と進展

(期間内目標) XENON 実験では 20 トン年の暴露量で暗黒物質と核子の散乱断面積  $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$  を達成できる感度を実現し、大発見を目指す。この感度の実現には、本研究が貢献する中性子検出器が本質的に重要である。(中間評価までの目標) 液体キセノン TPC の建設と、本研究が貢献する中性子検出器を建設する。次に中性子検出器を純水で運転し、液体キセノン TPC の動作および純水での中性子検出器の性能を確認する。(進展) 液体キセノン TPC と中性子検出器の建設を完了し、水タンクに純水を満たしそれぞれの性能評価を行うことに成功した。今後、硫酸 Gd を中性子検出器に導入し、長期データ収集を開始する。硫酸 Gd を導入した際、中性子検出器中の水の光透過率が低減しないよう、純化装置を導入する。ここで用いる超高純度硫酸 Gd や溶液の純化装置は、C01 との連携に基づいて本研究が貢献する部分である。なお、前身の検出器である XENON1T のデータに電子の超過事象が観測され、今後 XENONnT での検証に注目が集まるなど、計画全体に期待以上の成果と進展が得られた。

● **研究項目 B02 の目標と進展**

(期間内目標) ガス検出器(NEWAGE)、原子核乾板(NEWSdm)を用いた、方向に感度を持つ暗黒物質探索を行う。NEWAGE では 30cm 角低 BG  $\mu$ -PIC 製作、DAMA 領域探索開始を目標とする。NEWSdm は、赤道儀を用いた地下環境での暗黒物質探索実験を目標とする。(中間評価までの目標) NEWAGE では 10 cm 角低 BG- $\mu$  PIC 試作機の製作、NEWSdm では赤道儀の試作及び動作試験を目標とする。(進展) NEWAGE では業者との綿密な打ち合わせなどの成果として、**30cm 角低 BG  $\mu$ -PIC を 1 年前倒しで製作することができた** (図)。NEWSdm については、試作した赤道儀を用いて、**方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を地上で実施した**。単なる動作確認を超えて、原子核乾板を用いた初の暗黒物質探索実験を行えた。全体として予定を超えた進展を得た。

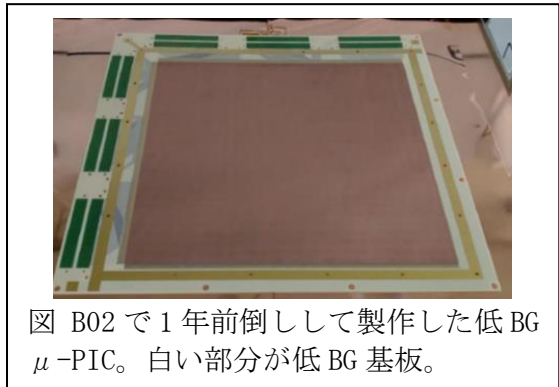


図 B02 で 1 年前倒しして製作した低 BG  $\mu$ -PIC。白い部分が低 BG 基板。

● **研究項目 C01 の目標と進展**

(期間内目標) SK-Gd を初期フェーズから一段と高性能化して、世界初の超新星背景ニュートリノの検出を目指す。それにより、宇宙の星形成の歴史と、そこで重要なニュートリノの役割を明らかにする。具体的には、5 年間の観測で得られたフラックスやスペクトルの情報から、超新星爆発やその後クーリングに至るプロセスの理解、星形成率等、宇宙星形成史モデルの妥当性を、詳しく評価する。(中間評価までの目標) Gd 濃度 0%および 0.01%で運用し中性子検出手法を確立すること、実際に超新星背景ニュートリノへの制限を得ること、Gd 濃度を 0.03%へ上昇させるために必要な技術開発を完了させることを目指した。(進展) Gd 導入前のデータでの超新星背景ニュートリノ探索を実施した。そして、**2020 年度に 0.01%濃度で Gd を導入し、実際に中性子捕獲事象の効率向上を確認した**。宇宙線による中性子生成率の測定や、バックグラウンドとなる核破碎事象の評価も進んでいる。また 0.03%濃度化に必要な高純度硫酸 Gd 26 トンの製造手法を確立した。また、水中のラドン測定のため硫酸 Gd 水溶液対応の検出器を開発し、エネルギー較正のための電子線形加速器の開発において電子導入部とクライストロンの動作試験を完了した。概ね計画どおり研究が進展している。

● **研究項目 D01 の目標と進展**

(期間内目標) 各計画研究がもつ低放射能技術を共通基盤化して各グループに還元することを目的とする。具体的には、検出器材料中の放射性不純物 (RI)・水やキセノンガス中の希ガス RI・地下環境中性子・ $Gd^{3+}$ イオン発光を測定し、低放射能技術研究会や WEB データベースで成果発信する。(中間評価までの目標) 低 BG 仕様のゲルマニウム検出器を製作する。(進展) 材料中 RI 測定は、C01 で推進する SK-Gd 用硫酸 Gd を中心に測定しつつ**低 BG 仕様ゲルマニウム検出器を製作した**。希ガス RI 測定用の新型ラドン検出器開発を完了し、レーザー共鳴イオン化測定装置の試運転を行った。地下環境中性子の長期測定を行い、検出器の低 BG 化も実現した。 $Gd^{3+}$ イオン発光測定も構築を進めている。成果発信は、低放射能技術研究会を 2 回開催し、データベースの改良を進めた。概ね計画どおりの進展があった。

● **研究項目 D02 の目標と進展**

(期間内目標) 検出器技術として極低温技術を新たに取り入れることで、 $0\nu 2\beta$ 探索検出器の高感度化と暗黒物質探索の範囲拡大を図る。(中間評価までの目標) 希釈冷凍機の低 BG 化と強磁場環境の整備を進め、マイクロ波空洞、超伝導センサーを使った検出機の開発を行う。(進展) **希釈冷凍機に低放射能シールドを導入し、環境 BG を低減できること、また 100kg を超えるシールド導入後も冷凍機で極低温環境を実現できることを実証した**。クライオスタットと 9T 超伝導磁石を導入し、強磁場下で高い Q 値を持ったマイクロ波空洞の開発を本格開始した。地上実験室にて、超伝導センサー(MMC)と  $CaF_2$  結晶を使用して、**世界で初めて  $CaF_2$  結晶蛍光熱量計を実現した**。 $CaF_2$  薄板上やシリコン基盤の両面に超伝導センサー KID を実装する独自の検出器開発を行ない、信号読み出しに成功した。空洞開発では、超伝導薄膜や超低誘電損失材料(アルミナ)を利用して Q

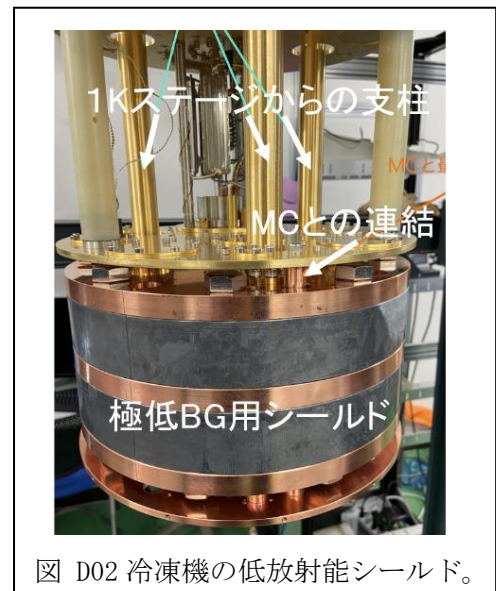


図 D02 冷凍機の低放射能シールド。

値を測定するなどの予備実験を開始した。全体として概ね計画通りに進展している。

### ● 研究項目 E01 の目標と進展

(期間内目標) (1) 宇宙の物質反物質非対称性の起源およびニュートリノ質量生成機構の解明、(2) 暗黒物質の正体・起源の解明、(3) (1) (2) を含む新たな素粒子模型・宇宙シナリオの構築、である。(中間評価までの目標) (1) 及び(2) を中心に理論的研究を進める。(進展) (1) においては、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非熱的崩壊に伴うレプトジェネシスを解析した。(2) においては、WIMP 暗黒物質の包括的研究、冷たい暗黒物質(CDM)に基づいた宇宙論的流体シミュレーションを用いた暗黒物質分布に関する諸問題に関する研究、軽い暗黒物質の散乱の計算に応用可能な有効場理論の開発などを行なった。また D01, D02 の分担者らとの共同研究によって近傍超新星由来のアクシオンを検出する「**超新星アクシオン望遠鏡**」**検出器のアイデアを提案、論文として出版**するなど、当初は想定していなかった領域内連携による成果も得られた。

### ● 研究項目 E02 の目標と進展

(期間内目標) 超新星ニュートリノと化学進化の総合的研究の開拓を目指している。(中間評価までの目標) 超新星ニュートリノと化学進化のそれぞれの研究を進めながら相互理解を進める。(進展) 山田は住吉らと共同で、世界で唯一3次元運動量空間内のニュートリノ分布を計算できるボルツマンソルバーを開発してきたので、最高水準のスーパーコンピュータを用いて爆発モデルや放出されるニュートリノの理解を深めている。鷹野・富樫による状態方程式と自己無矛盾なニュートリノ放射率の評価を行うための研究は、核子間相関関数取り扱いの改良を進めてきた。中里を中心に進めている球対称モデルをベースにした系統的な超新星ニュートリノ研究では、新しい状態方程式を用いたシミュレーションや、現象論的なパラメータを導入した状態方程式開発とニュートリノ観測から得られる状態方程式の研究を行った。超新星背景ニュートリノと化学進化・地球ニュートリノの総合的研究では、地球科学研究者との共同研究として大陸三層モデルによる地球ニュートリノの計算を進めた。新たに分担者となった辻本を中心に、**太陽系の形成位置と移動に関する研究をまとめることができたので、A01の地球ニュートリノ観測に関連する研究へつなげる端緒**としたい。概ね計画通りに進展している。

## (2) 得られた成果

### ● 研究項目 A01

計画研究の成果:  $0\nu2\beta$ 探索では、KamLAND-Zen 800の感度が400を上回り、国際会議で報告した。統合解析の**排除領域は逆階層バンド領域に到達**している。原子核破碎BGを低減する新型電子回路のプロトタイプを製作し、要求性能を満たすことを確認した。また、 $2\nu2\beta$ 高統計測定で核行列要素パラメータへの制限付与に成功し、PRL誌に発表した。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%を実現した。この結果、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、国際会議で報告した(図)。マルチメッセンジャー天文学では、超新星爆発を通知するSNEWSへの参加とともに独自の近傍超新星前兆アラームを構築している。

#### 公募研究の成果:

(小原) 高圧キセノンガス検出器開発において、光検出器の増強により有効面積を拡張し二重 $\beta$ 崩壊Q値での世界最高レベルのエネルギー分解能0.67%(FWHM)を実証した。また、D01との連携により高放射線量部品を特定できた。A01との連携により大型化の基本設計も行った。

(福田) 二重ベータ崩壊事象と $^{208}\text{Tl}$ のバックグラウンドをチェレンコフ光の情報を活用して識別するため、高速PMTを用いて波形弁別を行う装置を製作し複数の校正線源でのテストを行った。

(日野原) アイソスカラー型対相関の不定性を低減する原子核密度汎関数理論に基づく原子核行列要素計算において、高計算量の被積分関数計算の並列化で約20主量子数の広い模型空間計算を実現した。中間状態積算では収束性の良い積分経路を設定し、 $^{136}\text{Xe}$ を含む4核種を計算した。

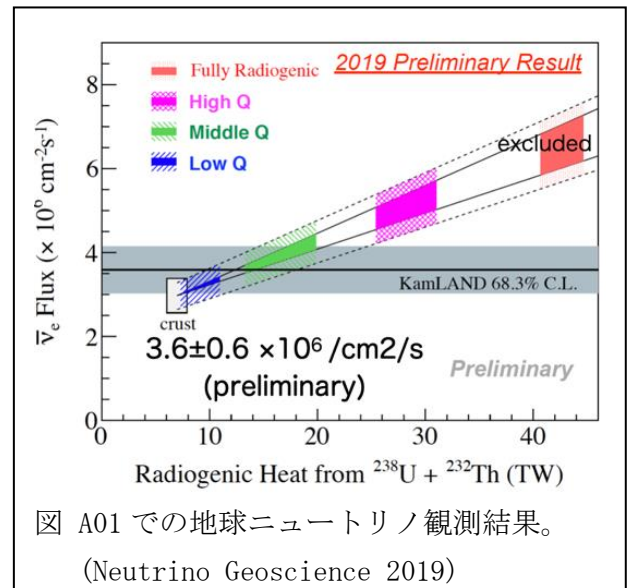


図 A01 での地球ニュートリノ観測結果。  
(Neutrino Geoscience 2019)

● **研究項目 A02**

**計画研究の成果**：現行 CANDLES 検出器の 130 日の測定データを用い、 $^{48}\text{Ca}$  の  $0\nu 2\beta$  崩壊の世界最高感度と同等の測定結果を得て、Phys. Rev. D に出版した。また、 $\text{CaF}_2$  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% まで到達できることを確認し、この結果は、J. Phys. Conf. Ser. に報告した。また、高純度化結晶に用いたカルシウム原料は、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。

● **研究項目 B01**

**計画研究の成果**：中性子検出器の建設において、検出器デザインから必要な反射材の選定、光電子増倍管の較正などに貢献してきた。純化装置のデザインは日本グループが行い、納品がまもなく行われる。日本分担分 2.4 トンの高純度硫酸 Gd を調達した。溶液の光透過率測定のため、高感度分光光度計を導入した。純水を用いた中性子検出器の性能評価を完了した。XENON1T のデータ解析を行い、**電子反跳現象に超過を観測した** (図)。XMASS のデータ解析による出版論文、将来へ向けた開発に関する出版論文も得られた。

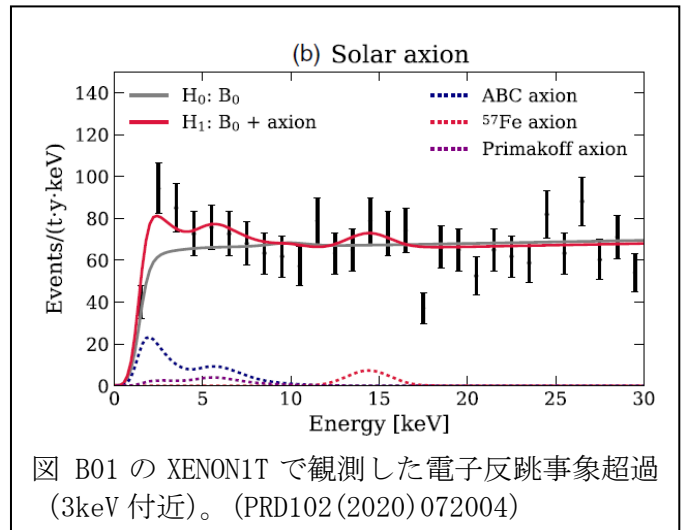


図 B01 の XENON1T で観測した電子反跳事象超過 (3keV 付近)。(PRD102(2020)072004)

● **研究項目 B02**

**計画研究の成果**：NEWAGE では、30cm 角低 BG  $\mu$ -PIC を製作、論文化に向けて性能評価を進めている。同時に、取得済みの地下実験室で行った方向に感度を持つ暗黒物質探索実験データの解析を進め、2 編の論文を出版した。ガス純化に関しては、英国シェフィールド大学との共同研究を進め、共著論文を出版した。NEWSdm では、原子核乾板の読み取り技術改善を進め、2 編の論文を出版した。局在表面プラズモン共鳴の偏光依存性を用い、将来の低閾値化に向けた事象解析法を構築、論文出版した。D01・公募研究との表面アルファ線検出器開発の共同研究が進み、共著論文を出版した。

**公募研究の成果**：(中村) ミグダル効果検出の基礎試験として中性子ビーム試験に向けた計画準備を進めた。B01・B02・E01 と連携して現実的検出器での観測可能性を示し、共著論文を出版した。

● **研究項目 C01**

**計画研究の成果**：Gd 導入前の純水 phase (SK-IV) において、陽子による中性子捕獲 (効率 20%) を用いた反電子ニュートリノ探索を行い、**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** (図) を得た。いくつかのモデル予言領域に初めて到達した。Gd 導入後は宇宙線起源の中性子や Am/Be 線源での中性子捕獲性能・Gd 濃度の検証を行い、Gd 濃度が検出器全体で一様に 0.011% であることを確認し、SK-Gd の動作検証を行った。

**公募研究の成果**：(坂口) 硫酸 Gd 試薬中の極微量放射性核種定量を目指し、誘導結合プラズマ質量分析計の定量限界低減、硫酸 Gd 試薬中の極微量放射性核種の定量に取り組んだ。硫酸 Gd からの  $^{226}\text{Ra}$  や  $^{227}\text{Ac}$  回収・濃集の手法を確立し、 $^{231}\text{Pa}$  の標準試料作成に成功した。

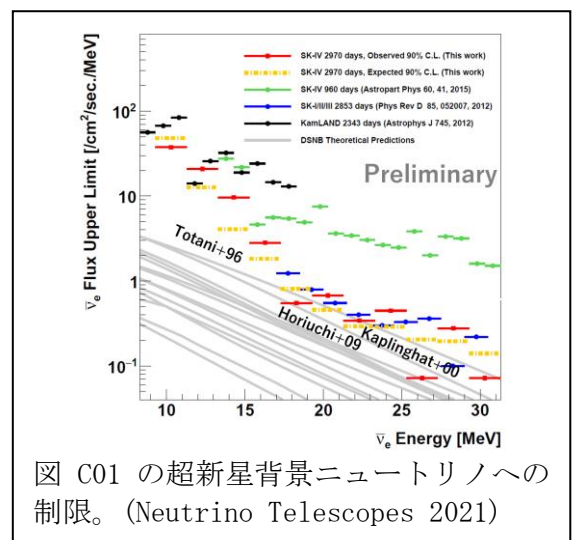


図 C01 の超新星背景ニュートリノへの制限。(Neutrino Telescopes 2021)

● **研究項目 D01**

**計画研究の成果**：C01 が推進する SK-Gd 用硫酸 Gd 中の RI 測定に関連し、**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**し、論文を出版した。硫酸 Gd 水用のラドン検出器の BG レベルを目標値の  $1\text{mBq}/\text{m}^3$  以下に抑えることに成功した。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。RI 含有量による検出器材料スクリーニングにより、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 程度まで低減することに成功した。

**公募研究の成果**：(伊藤) アルファ線イメージ分析の研究では、**各計画研究のための検出器材料の RI 測定と装置の性能改善を並行して進めた**。特に、B02 が推進する NEWAGE 実験で開発した低 BG  $\mu$ -PIC

の表面 BG を測定し、要求値を満たすことを確認した。また、装置の性能改善のための改良型フィールドケージ製作を完了した。(驚見) 落雷磁場を利用した神岡地下水分量観測の研究では、地上の KAGRA トンネル入口の落雷検知器のアナログ信号を、市販データロガーを用いてセルフトリガーでデータ取得し解析した。この解析結果から**地上と地下で観測される落雷磁場の性質をまとめ、論文出版**した。また、KAGRA トンネルからの排水量を常時モニターするシステムを構築した。

#### ● 研究項目 D02

**計画研究の成果**：超伝導センサー(MMC)と  $\text{CaF}_2$  結晶を使用して蛍光熱量計開発を実施し、 **$\text{CaF}_2$  結晶を使用した蛍光熱量計を世界で初めて実現**した。 $\text{CaF}_2$  結晶内に意図的に多量混入した  $^{238}\text{U}$  娘核の $\alpha$ 線事象を使って、高い分解能(5.5 $\sigma$ )で $\beta$ 線事象と粒子識別することに成功した。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 値を持つ空洞開発の準備が進んだ。フォトリソグラフィを使った空洞開発のアイデアに関する論文を PTEP に発表した。

**公募研究の成果**：(成瀬)最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、 $\alpha$ 線の検出にも成功した。一方で、全インダクタンス長におけるエアブリッジ部分の比は 0.5%と小さい設計だったため、通常のインダクタンス部分にあたった信号と、エアブリッジ部分にあたった信号を見分けることはできず、エアブリッジ構造によるエネルギー分解能向上には至らなかったため、エアブリッジ部分の比率を 50%以上に高めた素子の設計を行った。

#### ● 研究項目 E01

**計画研究の成果**：宇宙の物質反物質非対称性の起源に関して、最小  $U(1)_{\mu-\tau}$  ゲージモデル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。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**」検出器の提案をし、0(100)pc 以内の近傍超新星由来のアクシオンを検出しようことを明らかにした。

**公募研究の成果**：(馬渡)暗黒物質直接探索実験からくる厳しい制限を逃れられる擬スカラー暗黒物質モデルにおいて、付加的ヒッグス粒子が既知のヒッグス粒子と縮退していた場合でも、0.2GeV 以上の質量差があれば ILC 実験で検証されようことを明らかにした。(石山)冷たい暗黒物質、および自己相互作用を考慮した暗黒物質モデルに基づく高分解能宇宙論的構造形成シミュレーションを行い、銀河系スケールのハローに存在する小スケールサブハローの中心密度を推定した。矮小楕円体銀河の観測と比較し、自己相互作用の散乱断面積が  $3\text{cm}^2\text{g}^{-1}$  以下であると制限した。(横山)初期宇宙のインフレーションと現在の加速膨張の起源を同じスカラー場によって説明することのできる 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モデルを構築した。

#### ● 研究項目 E02

**計画研究の成果**：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見出した。現実的な核力から出発した状態方程式と自己無矛盾な修正 URCA 過程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。

**公募研究の成果**：(中村) SN1987A に対応する空間 3 次元の計算を行い、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ミュー型・タウ型ニュートリノの光度は増加することを発見した。

(吉田)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。(加藤)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。

## 6 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和3年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### ● 研究項目 A01（計画研究）

査読有論文：全15件

- [1] S.Abe, S.Asami, A.Gando, Y.Gando, T.Gima, A.Goto, T.Hachiya, K.Hata, S.Hayashida, K.Hosokawa, K.Ichimura, S.Ieki, H.Ikeda, K.Inoue et al. (KamLAND Collaboration), Search for Low-energy Electron Antineutrinos in KamLAND Associated with Gravitational Wave Events, *The Astrophysical Journal* **909** (2021) 116.
- [2] 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  $^{136}\text{Xe}$  Two-Neutrino  $\beta\beta$  Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements, *Physical Review Letters* **122**, 192501 (2019).

学会発表：国際学会 35 件（招待講演 20 件）、国内学会 74 件（招待講演 5 件）

- [3] H.Watanabe, Geoneutrino measurement with KamLAND, *Neutrino Geoscience 2019*, Prague, 2019/10/21. (国際会議口頭発表)
- [4] K.Inoue, First Results from KamLAND-Zen 800, Cosmic Neutrinos and Multi-messenger Workshop, Shanghai, 2019/11/30. (国際会議口頭発表)
- [5] Y.Gando, First Results of KamLAND-Zen 800, TAUP2019, Toyama, 2019/9/10. (国際会議口頭発表)

### ● 研究項目 A01（公募研究）

学会発表：国際学会 3 件、国内学会 1 件

- [1] 日野原伸生, Calculation of double-beta decay nuclear matrix elements using QRPA, 12<sup>th</sup> symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, 2020/10/6（オンライン）(国際会議口頭発表)
- [2] 福田善之, ZICOS – Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic scintillator -, NEUTRINO 2020, 2020/7/1（オンライン）(国際会議口頭発表)
- [3] 小原脩平, 高圧キセノンガス検出器開発の現状, 新学術領域「地下宇宙」2021年領域研究会, 2021/5/20（オンライン）(国内会議口頭発表)

### ● 研究項目 A02（計画研究）

査読有論文：全9件

- [1] S. Ajimura, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida 他, Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrino-less double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$ , *Phys. Rev. D* **103**, 092008.
- [2] T. Iida, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida 他, 2021, The energy calibration system for CANDLES using (n,  $\gamma$ ) reaction, *Nucl. Instr. Meth. A*, **986**, 164727.
- [3]\*B. T. Khai, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida, A study on energy resolution of CANDLES detector, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Volume: **68**, 368 – 378, 2021.
- [4]\*K. Tetsuno, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida 他, Status of  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay search and its future prospect in CANDLES, *Jour. of Phys.: Conf. Series*, 1468, 012132, 2019. (領域内連携)
- [5]\*K. Matsuoka, H Niki, I. Ogawa, Y Shinki, Y Kawashima, K Matsumura, The laser Isotope separation (LIS) methods for the enrichment of  $^{48}\text{Ca}$ , *Jour. of Phys.: Conference Series*, 1468, 012199, 2019.

学会発表：国際学会 9 件、国内学会 37 件

[6] Konosuke Tetsuno, Status of  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay search and its future prospect in CANDLES, 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019), Toyama, Japan, 2019/9 (国際会議口頭発表)

[7] Saori Umehara, Search for neutrino-less double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$  - CANDLES -, 27th International Nuclear Physics Conference(INPC2019), Glasgow, UK, 2019/7

● 研究項目 B01 (計画研究)

査読有論文: 全 17 件

[1] E. Aprile, S. Kazama, S. Moriyama, M. Yamashita et al. (XENON collaboration), Projected WIMP Sensitivity of the XENONnT Dark Matter Experiment, JCAP11(2020)031.

(国際活動)

[2] 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). (国際活動)

[3] K. Abe, S. Moriyama, M. Yamashita et al., (XMASS collaboration), Search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I, Phys.Lett.B **809** (2020) 135741.

[4] K. Sato, M. Yamashita, K. Ichimura, Y. Itow, S. Kazama, S. Moriyama, K. Ozaki, T. Suzuki, R. Yamazaki, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 113H02.

学会発表: 国際学会 16 件、国内学会 52 件

[5] N. Kato, XENONnT experiment, Kashiwa DM symposium 2020, Japan, 2020/11/17

(国際会議口頭発表)

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 2 件、メディア掲載 15 件、受賞 2 件

[6] 森山茂栄, アクシオンか?それともノイズか? ~アクシオンの基礎から XENON1T の最新結果まで~, カミオカラボ You Tube Live, 2020/7/5 (アウトリーチ)

● 研究項目 B02 (計画研究)

査読有論文: 査読有論文 16 件、著書 1 件

[1] R.R. Marcelo Gregorio, N.J.C. Spooner, J. Berry, A. C. Ezeribe, K. Miuchi, H. Ogawa, A. Scarff, Test of low radioactive molecular sieves for radon filtration in SF6 gas-based rare-event physics experiments, JINST accepted (2021) arXiv:2011.06994. (国際活動)

[2] T. Ikeda, ..., K. Miuchi (全 17 名), Direction-sensitive dark matter search with a low-background gaseous detector NEWAGE-0.3b, PTEP (2021) ptab053. (領域内連携)

[3] A. Umemoto, T. Naka, T. Nakano, R. Kobayashi, T. Shiraishi, T. Asada, Optical shape analysis based on DFT and second order moment analysis of the brightness distribution for the detection of sub-micron range tracks in nuclear emulsion, PTEP (2020) ptaa132.

(国際活動)

[4] K. Miuchi, Elisabetta Baracchini, Gregory Lane, Neil J. C. Spooner, S. E. Vahsen, CYGNUS, J. Phys.: Conf. Ser. 1468 (2020) 012044. (国際活動)

[5] 身内賢太朗 (共著)「宇宙物理学ハンドブック」2020年2月(朝倉書店 ISBN978-4-254-13127-7) 5.6.1 暗黒物質直接探査の項執筆(p762-767) (著書)

学会発表: 国際学会 20 件、国内学会 58 件

[6] Kentaro Miuchi, Status of NEWAGE/CYGNUS-KM, CYGNUS 2019 seventh workshop on directional dark matter searches (invited), Sapienza Piazzale A.Moro, 2 - Roma, Italy, 10-12 July 2019 (国際会議口頭発表)

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 4 件、メディア掲載 2 件、受賞 4 件

[7] 身内賢太朗, 宇宙と元素:スーパーノバ・ブラックホール・ダークマター, 錯体化学会 第 69 回討論会 市民公開シンポジウム, 2019/9/21, 名古屋大学 (アウトリーチ)

[8] 日本写真学会論文賞, 中竜大、連名受賞, 「局在表面プラズモン共鳴を用いた光学顕微鏡による微細放射線飛跡解析法」2020/8/26 (受賞)



- 研究項目 B02 (公募研究)

査読有論文： 全1件

- [1] K. D Nakamura, K. Miuchi, S. Kazama, Y. Shoji, M. Ibe, W. Nakano, Detection capability of Migdal effect for argon and xenon nuclei with position sensitive gaseous detectors, PTEP (2020) ptaa162. (領域内連携)

- 研究項目 C01 (計画研究)

査読有論文： 査読有論文 9 件、著書 1 件

- [1] S. Ito, H. Sekiya 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 11, November 2020, 113H01.
- [2] Y. Nakano, H. Sekiya, Y. Takeuchi et al., Measurement of the radon concentration in purified water in the Super-Kamiokande IV detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 977, 11 October 2020, 16429.
- [3] 鈴木良一, 陽電子消滅実験のためのガンマ線検出技術, 陽電子科学, vol 14, pp.3-8 (2020).
- [4] S. Ito, H. Sekiya et.al, Development of a method for measuring rare earth elements in the environment for future experiments with gadolinium-loaded detectors, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 6, June 2019, 063H03 (2019).
- [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).

学会発表: 国際学会 11 件、国内学会 43 件

- [6] Michel Smy for the Super-Kamiokande collaboration, Super-Kamiokande with Gd, XIX International Workshop on Neutrino Telescopes, Online, 2021/2/22. (国際会議口頭発表)

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 10 件、メディア掲載 39 件

- 研究項目 C01 (公募研究)

学会発表: 国内学会 2 件

- [1] 坂口綾, 高マトリクス試料中の極微量放射性核種測定法確立—地下宇宙研究への応用, 新学術領域「地下宇宙」2020年領域研究会, 2020/6/2-3 (オンライン) (国内会議発表)
- [2] 坂口綾, 高久雄一, 宮田滉介, 鹿籠康行, 伊藤慎太郎, 市村晃一, 中島康博, 伊藤博士, 関谷洋之, 誘導結合プラズマ質量分析計による極微量放射性核種測定 (チュートリアル講演), 「第七回極低放射能技術」研究会, 2021/3/24-25 (オンライン) (国内会議発表)

- 研究項目 D01 (計画研究)

査読有論文： 全5件

- [1] Y. Nakano, K. Ichimura et al., Evaluation of radon adsorption efficiency values in xenon with activated carbon fibers, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2020, Issue 11, November 2020, 113H01 (2020).
- [2] K. Abe, K. Ichimura, A. Takeda et al., Development of low-background photomultiplier tubes for liquid xenon detectors, Journal of Instrumentation, Volume 15, P09027 (2020).
- [3] 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.

学会発表: 国際学会 2 件、国内学会 26 件

- [4] Atsushi Takeda, Development of high-sensitivity radon detector in water with continuous measurement, The XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2020), 2020/6/22 (オンライン) (国際会議口頭発表)

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 8 件、受賞 2 件

[5] 南野彰宏, 幽霊粒子ニュートリノが宇宙を作った?, 横高アカデミア 2020, 2020/10/6, 横須賀高校

● 研究項目 D01 (公募研究)

査読有論文: 全3件

[1] K. Fushimi, H. Ito et al., Development of highly radiopure NaI(Tl) scintillator for PICOLON dark matter search project, PTEP 2021, 4, 043F01.

[2] T. Akutsu, T. Washimi et al. (KAGRA Collaboration), Overview of KAGRA Calibration, detector characterization, physical-environment monitoring, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, 5, 05A102.

[3] T. Washimi et al., Effects of lightning strokes on underground gravitational waves observatories, accepted in JINST (2021).

学会発表: 国内学会 6件

[4] 伊藤博士, “極低放射能測定における  $\mu$ -TPC を用いたアルファ線イメージ分析装置の開発”, 「第七回極低放射能技術」研究会, 2021/3/24(オンライン) (国内会議発表)

[5] 鷺見貴生, “バースト重力波検出器に向けた KAGRA における環境雑音モニター”, 新学術「地下宇宙」第7回超新星ニュートリノ研究会, 2021/1/8 (オンライン) (国内会議発表)

● 研究項目 D02 (計画研究)

査読有論文: 全3件

[1] Y. Kishimoto 他, Development of a cavity with photonic crystal structure for axion searches, PTEP ptab051 2021, DOI:<https://doi.org/10.1093/ptep/ptab051>.

学会発表: 国際学会 2件、国内会議 11件

[2] S. Yoshida, Present Status of Low Temperature Detector for Neutrino-less Double Beta Decay, Neutrinos Electro-Weak interactions and Symmetries 2020-12, ONLINE, Dec.21, 2020 (国際会議発表)

[3] X. Lee, D.H. Kwon, K. Tetsuno, I. Kim, H.L. Kim, H.J. Lee, S. Yoshida, Y.H. Kim, M.K. Lee, S. Umehara, and T. Kishimoto, Study of a Large CaF<sub>2</sub>(Eu) Scintillating Bolometer for Neutrinoless Double Beta Decay, 16th International conference on Topics in Astroparticle and underground physics, Toyama, Japan 8 - 14 September, 2019 (国際会議発表)

[4] S. Yoshida, Development of Scintillating Bolometer with Large Undoped and Eu-doped CaF<sub>2</sub> Crystals for Neutrino-less Double Beta Decay of <sup>48</sup>Ca, The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, ONLINE, June20 – July 2, 2020 (国際会議発表)

[5] K. Ishidoshiro, Kinetic inductance detectors on CaF<sub>2</sub> for spin-dependent dark matter search, 18th International Workshop on Low Temperature Detectors, Milano, Italy, 22-26 July 2019 (国際会議発表)

[6] 岸本康宏 暗黒物質アクシオン、暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 -高い Q 値の実現, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン開催) 2020 年 9 月 14-17 日 (国内学会発表)

● 研究項目 D02 (公募研究)

学会発表: 国内学会 2件

[1] 河村 優貴、美馬 覚、大谷 知行、石徹 白晃治、Mohamado Zulfakri、細川 佳志、成瀬 雅人、明連 広昭、田井野 徹, 暗黒物質探索用 LEKID の作製に関する研究, 2020 年第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 11a-Z27-1, 2020/9/8-11 (9/11)

[2] 和賀 雄貴, 成瀬 雅人, 田井野 徹, 明連 広昭, エアブリッジを組み込んだ力学インダクタンス検出器の開発, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021/3/16-19 (オンライン) (国内学会発表)

- 研究項目 E01 (計画研究)

査読有論文： 38 件

[1] K. Inomata, M. Kawasaki, K. Mukaida, and T. T. Yanagida, NANOGrav Results and LIGO-Virgo Primordial Black Holes in Axionlike Curvaton Models, Physical Review Letters **126**, 131301 (2021). 10.1103/PhysRevLett.126.131301.

[2] 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. 10.1088/1475-7516/2020/11/059.

- 学会発表: 国際学会 21 件 (招待講演 16 件)、国内学会 25 件 (招待講演 12 件)

- 研究会・勉強会の開催

2020/5/27, E02 とオンライン合同勉強会を開催。

2021/2/12, 2/15, A01 公募 (代表:日野原) との合同主催により、オンライン研究会「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺」を開催。(参加者 150 名以上。)

- 研究項目 E01 (公募研究)

- 査読有論文： 1 件 (投稿中)

[1] S. Abe, G. Cho, K. Mawatari, Probing a degenerate-scalar scenario in a pseudoscalar dark-matter model, [arXiv:2101.04887].

学会発表: 国際学会 4 件 (招待講演 4 件)、国内学会 6 件 (招待講演 3 件)

- 研究項目 E02 (計画研究)

査読有論文： 21 件

[1] \*Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki, A New Approach to Mass and Radius of Neutron Stars with Supernova Neutrinos, Astrophys.J. **891**:156,2020.

[2] \*Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Hiroki Nagakura, Akira Harada, Shun Furusawa, Kosuke Sumiyoshi, Hideo Matsufuru, Shoichi Yamada, Simulations of the Early Postbounce Phase of Core-collapse Supernovae in Three-Dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport, The Astrophysical Journal, 2020, 903, id 82, 24pp. (査読有論文)

[3] \*Takuji Tsujimoto, Junichi Baba, Remarkable Migration of the Solar System from the Innermost Galactic Disk; a Wander, a Wobble, and a Climate Catastrophe on the Earth, Astrophys.J. **904**:137,2020. (査読有論文)

学会発表: 国際学会 17 件 (招待講演 2 件)、国内学会 59 件 (招待講演 1 件)

- 研究会・勉強会の開催

2020/1/6-7, C01 と合同で第 6 回超新星ニュートリノ研究会を開催。

2020/2/26-28, 国際ワークショップ「The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave」を開催。

2020/5/27, E01 とオンライン合同勉強会を開催。

2021/1/7-8, C01 と合同で第 7 回超新星ニュートリノ研究会(オンライン)開催。

- 研究項目 E02 (公募研究)

査読有論文： 4 件

[1] Kato Chinami, Nagakura Hiroki, Hori Yusuke, Yamada Shoichi, Neutrino Transport with Monte Carlo Method. I. Toward Fully Consistent Implementation of Nucleon Recoils in Core-collapse Supernova Simulations, The Astrophysical Journal, **897**:43, 2020.

[2] T. Yoshida, T. Takiwaki, K. Kotake, K. Takahashi, K. Nakamura, H. Umeda, Three-dimensional Hydrodynamics Simulations of Precollapse Shell Burning in the Si- and O-rich Layers, Astrophys. J. **908**:44, 2021.

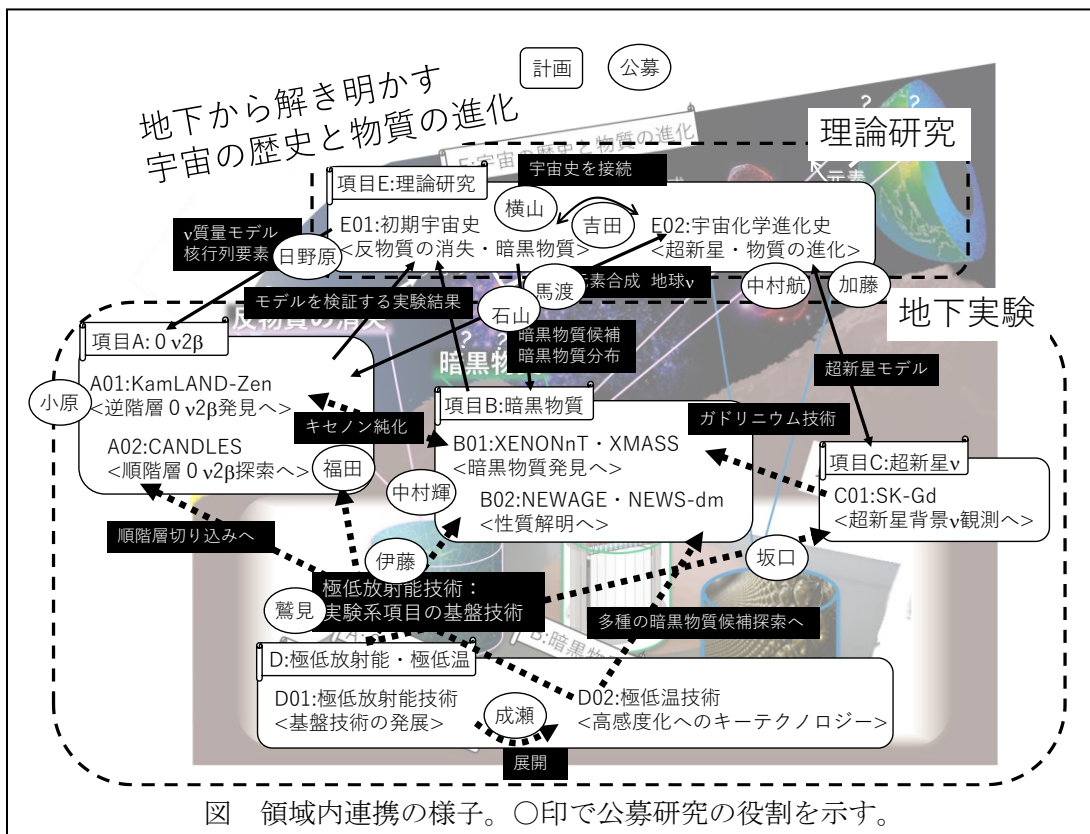
学会発表: 国内学会 11 件

## 7 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域提案時の計画研究による連携は予定通り進捗しており、図中丸印で示す公募研究が加わり連携が進んでいる。領域内連携、公募研究の対応する計画研究を超えた連携や橋渡しの事例のいくつかを示す。

- (1) 「有限振幅法を用いた原子核密度汎関数理論による二重ベータ崩壊行列要素計算」(日野原)： $0\nu2\beta$ の核行列要素の誤差改善が主題であるが、逆向きのA01による $2\nu2\beta$ スペクトルの精密測定を核行列要素パラメータの制限に反映させる双方向連携が可能で、A01からの制限はPRLで論文発表した。またE01との合同主催で、オンライン研究会「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺」を開催した。
- (2) A01, C01はマルチメッセンジャー天文学の低・中エネルギーニュートリノを担当し実験間(KL-SK)でMoUを結んでいる。地球ニュートリノ観測も含めE02との三つ巴の有機的連携が実現している。
- (3) 「高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究」(中村輝)：B01と暗黒物質探索による連携、B02と検出器開発に関する連携、E01と物理による連携が進められ、共著論文を発表した。さらに、令和3年度の領域研究会を契機にA01および「ガス飛跡検出器で探るマヨラナ・ディラック決着への道」(小原)とともにキセノンの同位体入手に関しての議論を開始した。また、A01が整備する地下クリーン環境は、これらの研究を大型化する検出器の設置を考慮して設計が進められている。
- (4) 「低放射能測定における $\mu$ -TPCを用いたアルファ線イメージ分析装置の開発」(伊藤)：B01・B02による技術提供を受け、D01との低バックグラウンド技術による連携で進めた論文を出版した。さらに、D01が進めるGe検出器とは検出できる放射性同位体の種類が異なり、領域全体に相補的に測定を供与している。
- (5) 「落雷磁場を利用した神岡地下水分量の長期観測」(鷲見)：神岡地下水分量測定とD01の地下環境中性子測定との比較で、岩盤中水分量の環境中性子への影響について新しい知見が得られる。
- (6) 「ニュートリノ集団振動を考慮した超新星ニュートリノスペクトルの構築」(加藤)：加藤が令和3年4月に東京理科大の助教に着任し、E02での日常的議論が可能な体制となったことで、研究が加速している。また、毎年C01とE02が合同で超新星ニュートリノ研究会を開催し、その際にも計画研究のメンバーと公募研究の代表者が発表・議論を行って、活発に交流している。
- (7) 第6回超新星ニュートリノ研究会での地球ニュートリノの議論に端を発し、辻本らによる太陽系の移動と地球史的現象の関連が論文発表され、A01研究代表者を謝辞に挙げている。辻本はE02に合流した。



## 8 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和3年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

- **若手研究者の就職・昇進状況**：大学院生を含む若手研究者のステップアップを以下に挙げるように果たした。特に任期なし助教へ2名（†）の就職を実現したことは大きな成果である。また、大学部局の協力で、本領域予算を基盤に領域研究期間を超える任期での助教雇用を実現した（‡）。A02で博士を修了し、B01(暗黒物質探索研究)へ就職するといった、領域内での交流も進んだ。

● A02	大学院生	→	B01 博士研究員	1名
● A01	大学院生	→	特任助教（任期付）	1名
● A01	博士研究員	→	特任助教（任期付）	3名（‡）
● 領域外	博士研究員	→	特任助教（任期付）	1名（‡）
● A01	学振PD	→	特任助教（任期付）	1名
● 公募	特任研究員	→	助教（任期付）	1名
● 公募	助教（任期付）	→	助教（任期付）	1名
● 公募	特任研究員	→	助教（任期なし）	1名（†）
● D01 分担	助教（任期付）	→	助教（任期なし）	1名（†）
● D01 分担	助教	→	准教授	1名
● D02 分担	助教	→	准教授	1名
● E01 分担	博士研究員	→	テニユアトラック助教	1名
- **大学院生の学位取得**：修士 33名 博士 10名 の大学院生が学位を取得した。
- **大学院生の発表**：大学院生が以下の通り研究成果を発表した。
  - 国際会議（口頭8件、ポスター23件） 国内会議（口頭119件、ポスター32件）
- **大学院生の海外渡航**：国際共同研究や国際会議発表で5名の大学院生が海外渡航した。
- **チュートリアル講演を含む研究会の開催**：若手研究者の育成を意図してチュートリアル講演を含む研究会を5回開催した。
- **若手研究会の開催**：領域内の実験理論の枠を超えた若手研究者の交流を目的として、自らの企画による地下宇宙若手研究会を東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設にて2020年2月22-24日に開催した。参加者は27名（理論9、実験18）であった。
- **若手研究者の表彰**：若手研究者の研究奨励を目的に、領域関連研究会で若手研究者を表彰した。
  - 2020年度領域研究会（2020年6月） 若手最優秀賞（2件）
  - 第7回極低放射能技術研究会（2021年3月） 最優秀賞（1件）・優秀賞（2件）
  - 2021年度領域研究会（2021年5月） 優秀発表賞（3件）
- **大学院生、若手研究者の受賞**：
  - 国際学会表彰
    - 細川佳志（東北大学），TAUP2019 Poster Honourable Mention, 2019年9月
    - 尾崎公祐（名古屋大学），TAUP 2019 Poster Honourable Mention, 2019年9月
  - 国内研究会表彰
    - 梅本篤宏，日本写真学会進歩賞，「局在表面プラズモン共鳴を用いた超解像イメージング技術の開発」，2020年8月
    - 中村陸生（東北大学），SMART2019 優秀ポスター賞，「液体シンチレータとシンチレーションフィルムの波形弁別」，2019年11月
    - 他5件
  - 大学内表彰
    - 島田 拓弥（神戸大学），神戸大学優秀修士論文発表賞（理学研究科総代），2021年2月
    - 尾崎秀義（東北大学），物理学専攻賞（博士），2020年2月
    - 安部清尚（東北大学），物理学専攻賞（修士），2020年2月

## 9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

● **COVID-19 の影響：** COVID-19 により海外出張が難しい状況であったため、旅費を中心に繰越が発生した計画研究があるが、影響を最小限にとどめて研究は順調に進展している。海外派遣の予定が多かった国際活動支援班では、**海外派遣人数を絞り出張期間を長くすることで隔離期間確保後でも出張用務への影響が小さくなる様に工夫し**、2020 年度にも海外出張を行った。研究会はオンライン中心に切り替えられたが、**zoom のブレイクアウトルームや slack の併用などのさまざまな機能を導入して、効果的な研究会開催を行なった**。また、チュートリアル講演のほか、議論の時間を別途確保するなどして、多くの参加者を集めるとともに若手が広い知見で分野を見渡すことができる機会を作ることに努めた。

今後、海外出張や国内での研究会開催が漸次可能となると期待しているが、現在の修士2年生などは、大学院入学以来、領域研究会などの現地参加を体験していない。若手育成などとも関連させて、こうした世代が対面で議論をできる機会を設け、研究の魅力を伝えて行く。

● **共用物品の整備状況・計画：** 装置・技術開発を進める D01, D02 を中心として、地下実験環境での共用物品が整備されている。

D01 では、神岡地下共同利用スペース (Lab-A) に、**共同で利用するためのクリーンブースを構築した**。神岡地下共同利用スペースでは、A02 の  $\text{CaF}_2$  結晶中の内部不純物分析測定装置、D01 の硫酸 Gd 水中のラドン検出器、公募研究の  $\alpha$  線イメージ分析装置などの開発を行っている。今後このクリーンブースの維持を行って低 BG 測定をサポートしていく。

D01 は、世界最高感度のゲルマニウム (Ge) 検出器を構築し共用化することを目標としている。この Ge 検出器の材料選択に B01 の開発した表面  $\alpha$  線検出器を利用した。この結果を活かした Ge 検出器が 2020 年度に納品された (図)。**2021 年度内に稼働、領域内に低 BG 測定を供する。**

D01 で開発した硫酸 Gd 水用ラドン検出器を B01 (XENONnT) の Gd 水モニタ用を使用している。

B01, B02, E01 と公募研究「高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究」間では共著論文に基づいた**新実験「Miracle 実験」を立ち上げた**。「Miracle 実験」に関連した中性子ビーム試験を産業技術総合研究所で予定しており、B02, D01 等が共同で実験を行う予定である。

公募研究「低放射能測定における  $\mu$ -TPC を用いたアルファ線イメージ分析装置の開発」では開発した装置によって、領域内の A02, B02, C01, D01, 公募研究などの試料の測定を行い、**領域内のハブの一つとして機能している**。また、今後の分析装置の感度向上に関しては、B02 で開発した  $\mu$ -PIC をコピー製作することで、初期費用を抑えることを可能とする。また B02 と同じ構造の検出器を使用しているため、回路や保守装置の地下環境での相互利用を行い、効率的な装置使用を行っている。

A02 で開発した高純度カルシウムを B02 でのガス純化材の材料に利用するなど、**低放射能材料に関するノウハウが共有**されている。

A01 が整備を進める地下クリーン環境は公募研究の発展型装置や D01, D02 の利用を取り込んで設計しており、領域外からの利用も見込まれる。また、集光ミラーを実機テストするために基盤研究 A と協力して建設するテストタンクは、小型実験に対し共用可能で D01 の将来計画にも利用される予定である。

● **国際活動支援の状況・計画**

令和元年度には、国際活動支援班からの海外旅費支援を行い、低バックグラウンド材料の選定を支援した。令和2年度には Ge 検出器の整備を支援し、令和3年度より神岡地下実験室への設置作業が始まった。令和3年度以降には、Ge 検出器の運用を開始するとともに、D02 の冷凍機の調整も開始する。国際研究支援班の支援により、国際研究集会を主催し、海外の著名な理論研究者を招聘した。それにより B01, B02 の実験的研究推進に加え、E01 の理論的研究との連携強化を図ることができた。



図 D01 で製作したゲルマニウム検出器

## 10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

- **総括班**：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、国際的なコミュニティとの連携を継続して推し進め下記の国際ネットワークの構築に記述する内容を中心に、幅広い国際連携を支援する。
- **計画研究 A01**：不調な PMT の電子回路改修による復活と時間変化への精緻な対応、原子核破碎事象の見積もり精度向上と識別手法の改良、新型電子回路の導入を最優先に進め、まずは**データ量を TAUP2019 から 3 倍以上に増やした  $0\nu 2\beta$  探索**で世界をリードする探索を継続し、期間内には 40meV の感度を実現する。地球ニュートリノ観測においては、原子炉ニュートリノスペクトルの不定性低減を図るとともに海外原子炉の精緻な評価で系統誤差を低減する。同時に地球モデルの改善にも取り組み、地球モデルの選別能力を高めていく。将来に向けた開発では公募研究や地下利用を目指す領域外の研究とも連携し、KamLAND-Zen では 20meV に向けた開発、国際協力では 1meV を視野に入れる研究開発を進める。
- **計画研究 A02**：すでに得られている 780 日の  $^{48}\text{Ca}$  の二重ベータ崩壊測定データの解析をすすめ、 $^{48}\text{Ca}$  の  $0\nu 2\beta$  半減期下限値の更新を実現する。蛍光熱量検出器開発では、エネルギー分解能の改善を進める。そのために、熱センサーの複数設置や、設置位置の調整を行う。また、紫外光吸収フィルムを用いるなどして、光による熱量分布のばらつきを低減する。これらにより、結晶内部での事象の発生位置依存性を取り除き、要求エネルギー分解能 0.5%の最初の達成を目指す。 $^{48}\text{Ca}$  濃縮技術開発では、注入同期レーザーをさらに増強し、目標とする出力 2W の光量を達成する。また、カルシウムビーム用チェンバーを大きくし、50%を超える同位体比まで濃縮する。
- **計画研究 B01**：XENONnT 検出器の初期データ解析を行う。暗黒物質探索のみならず、2020 年に発表した**電子反跳事象超過に関する検証**を行う。検出器の長期運転が可能と判断すれば、本研究が大きく貢献する中性子検出器に硫酸 Gd を導入し性能を検証した上で、20 トン年に渡るデータ収集を開始する。同時にキセノンの純化や中性子検出器の性能とデータ解析の手法を最適化し、本研究の目標である、20 トン年の曝露量で暗黒物質と核子の散乱断面積  $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$  を達成できる感度を実現する。それをもとに世界最高感度での暗黒物質探索のデータ解析を遂行し、暗黒物質の発見を目指す。
- **計画研究 B02**：研究組織内での連携・さらには領域内の連携を取りながら、当初目標を達成すべく予定通り研究を進めて行く。NEWAGE に関しては、30cm 角低 BG  $\mu$ -PIC の実機製作の後、現在地上で調整中の検出器を地下環境に設置、調整を経て観測、**DAMA 領域の探索**を開始する。NEWSdm に関しては、読み出しシステムの高速化を行うとともに、当初目標である地下環境での赤道儀を用いた暗黒物質探索実験を行う。また、計画研究内での共同研究、他の計画研究や公募研究との連携、国際活動支援班の支援を受けての国際共同研究も順調に進捗しており、これらをさらに進めて、予定以上の成果を上げていく。
- **計画研究 C01**：現状 0.01%の Gd 濃度を 2022 年度に 3 倍の 0.03%まで増強し、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研究計画調書よりも早く開始することを目指す。2022 年の春頃、緊急事態宣言等が解除されている期間に集中して実施することを計画している。0.03%の Gd 濃度に必要な硫酸 Gd の量は八水和物の形でおよそ 26 トンになる。これまでに開発・運用した硫酸 Gd 溶解装置は一日 400kg 導入する仕様であるが、これを一日 800kg 導入できるよう増強し、1 か月間で全 26 トンの導入を完了させる予定である。具体的には粉体導入部の拡大と溶解槽内の配管改良による溶解時間の短縮を図る。26 トンの分析には、公募研究で加わった筑波大坂口氏と連携して ICP-MS での分析を追求する。また、Ge 検出器での分析は D01 との連携に加え、海外の協力研究者との連携を通じて推進する。
- **計画研究 D01**：検出器材料中の RI 測定は、**世界最高感度の新型ゲルマニウム検出器**の運用を 2021 年夏から開始し、スクリーニング速度を向上させる。硫酸 Gd 水中のラドン測定は、2 種類の新型ラドン検出器の SK-Gd (C01)での運用を 2021 年度中に開始する。レーザー共鳴イオン化を用いたキセノンガス中

の希ガス RI 分析は、クリプトンに対し 0(10)ppq レベルの感度での測定を実現する。地下環境中性子については、神岡地下実験施設での多地点・長期測定を行い、その系統的な理解を進める。Gd<sup>3+</sup>発光については、発光寿命と波長スペクトラムの測定を実現する。成果発信については、低放射能技術研究会を引き続き開催し、放射能データベースを本領域メンバー以外にも公開する。

- **計画研究 D02**：研究期間の前半までに希釈冷凍機の極低 BG 化と低温強磁場環境の整備が終了したため、それらの整備された設備を有効活用し、研究装置（検出器、空洞）の開発を推進する。**地下実験施設への極低 BG 希釈冷凍機の導入**に向けて、クリーンルームの整備、電力、冷却水などの確保を行う。極低温熱量計の高エネルギー分解能化と低エネルギー閾値化を進め、0ν2β探索および暗黒物質探索への波及に取り組む。アクシオン探索の原理検証を進めるため、超伝導薄膜や超低誘電損失材料を使用した空洞の開発を進め、従来よりも 2 桁高い Q 値の実現を目指す。

- **計画研究 E01**：今後も、目的である (1) 宇宙の物質反物質非対称性の起源およびニュートリノ質量生成機構の解明、(2) 暗黒物質の正体・起源の解明、(3) (1) (2) を含む新たな素粒子模型・宇宙シナリオの構築、のため、代表者・分担者・博士研究員によって、**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。また、0ν2βとその周辺領域に関する第二回研究会／スクール (A01, A02 と合同)、超新星×標準模型を超える物理の第二回勉強会 (E02 と合同)、若手の発表を中心としたオンライン国際理論研究会 (E01 主催) などを開催し、研究交流、国際交流と若手育成を促進する。

- **計画研究 E02**：引き続き、最先端の多次元ニュートリノ輸送コードの開発を進め、多次元超新星シミュレーションをスーパーコンピュータ富岳で行うことも含め、**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。並行して、ニュートリノ反応率や球対称モデルを用いた状態方程式と超新星ニュートリノ観測の系統的な研究を進めるとともに、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。すでに 7 回開催している C01 と E02 合同の超新星ニュートリノ研究会を、今後も毎年開催し実験と理論の連携も推進する。

- **公募研究**：長期的な視点では、戦略的で多様性のある基礎技術開発が必要である。0ν2β探索では、原子核の多様性やトラッキング測定、暗黒物質探索では方向感度や超低閾値、非 WIMP 探索技術などが、背景となる物理の解明に重要であり、多様な技術の適用が見込まれる。また、宇宙の歴史と物質の進化の系統的理解には広い分野との連携も必要であり、公募研究は以下の役割を担う。

- (a) 萌芽的・多様な「極低放射能技術・高感度測定技術開発の促進」
- (b) 開発がある程度進んだ多様な技術の「研究展開の支援」
- (c) 周辺分野の発想に基づく小規模な開発や、分野融合を発展させるための研究会などの「関連分野との連携や応用の支援」
- (d) 分野境界の研究を重視することで、領域の研究の波及と新たな価値の創出を狙う「理論研究の展開や分野境界の研究推進」

- **国際ネットワークの構築**：国際活動支援班として、著名な研究者を招聘し、領域内外の研究者と交流を深め共同研究に繋げる活動を継続する。国際共同実験 XENON 推進の成果として (1) 実験の進展、(2) 若手の長期イタリア滞在での世界の研究者との交流、(3) 領域メンバーの次世代実験 DARWIN への参加開始、が得られた。特に XENON 実験では、コラボレーションボード co-chair、解析コーディネーター、editorial board 2 名、PR チームメンバーなどの要職に領域関係の研究者が就き、ビジビリティ向上を果たした。

今後、XENON 実験はデータ取得が始まり、本格的な暗黒物質探索が開始される。現地でのシフト取得、メンテナンスとともに、解析に関するネットワーク構築が重要となる。解析のスペシャリストは、実験の行われているイタリア以外にも世界各地で活躍している。定常的なオンラインミーティングに加えて、要所での若手研究者の訪問などは、暗黒物質探索をリードする上で重要となる。また DARWIN については、米国 LZ 等との連携の議論が開始されている。MOU 締結などを含んだ、さらに大きいネットワーク構築を目指す。方向に感度を持つ暗黒物質探索の将来の協力体制の議論が CYGNUS フレームワークで進んでいる。英国シェフィールド大との交流を軸として、海外研究者を呼び込むネットワーク構築を進める。



## 11 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 領域内評価者による評価

【中畑雅行（東京大学宇宙線研究所・教授・神岡宇宙素粒子研究施設長）】

本領域では月一回の頻度で運営会議を、年4回の頻度で総括班会議を開催し、強い連携のもとで領域研究を推進している。これらの会議では各研究の進捗状況報告等に加え、研究、運営上の諸問題とそれに対する取り組みなどを活発に議論しており、領域の運営がスムーズに進められている。本領域のかなめの一つはD班が中心となって開発している極低放射能技術を他班の研究に応用すること、また、それぞれの計画研究が独自に開発した低バックグラウンド技術を他班と共有することによってそれぞれの研究を更に進展させることである。例えば、C01が開発した高純度ガドリニウム製造技術のB01への応用、D02が開発した低温検出器を用いたA02での $0\nu 2\beta$ 崩壊探索実験への応用、A01の地球ニュートリノ研究とC01の超新星背景ニュートリノを結び付ける総合的な研究など、数多くのところで連携の成果が見えている。そして、E01, E02の理論班とA~D班の実験班との連携によって、理論と実験の両面からの宇宙素粒子研究が進められている。

連携の結果として当然、それぞれの研究項目において目標に向けて中間評価の時点での成果が期待できるが、以下に示すように、期待通りあるいは期待を超えた進展がみられる。A01ではKamLAND-Zen 800にて放射性不純物を10分の1に低減し、Zen 400との統合解析により逆階層領域にかかる排除領域を得ており、予定通り進展している。高感度化のための集光ミラーの設計を進め目標値1.8倍を超える2.3倍の集光量を実現している。地球ニュートリノ観測においては観測精度15.6%を達成し、理論モデルの精度20%を超える精度を達成している。A02では中間評価までに130日分の $^{48}\text{Ca}$ のニュートリノレス二重ベータ崩壊探索データを解析しこれまでの下限値と同等の厳しい制限を与えている。既に780日のデータが得られており、 $^{48}\text{Ca}$ に対して更に良い結果が得られる見込みである。CaF<sub>2</sub> 蛍光熱量検出器開発においては結晶内における事象の発生位置依存性を取り除くことによって目標分解能を超えた0.2%のエネルギー分解能を達成できることを実証している。 $^{48}\text{Ca}$ 濃縮技術開発においては温度コントロールが可能なオープンの開発、 $^{48}\text{Ca}$ の吸収線に精密に波長同調したレーザー光源の開発に成功している。B01では、XENON nT実験の液体キセノンTPCと中性子検出器の建設に成功し、水タンクに純水を満たし、各々の検出器のコミッション開始に成功した。また、C01の協力を得て高純度硫酸ガドリニウムの製造に成功している。B02では30cm角サイズの低バックグラウンド $\mu\text{PIC}$ 検出器を1年前倒して製作している。同班のNEWSdmでは赤道儀を試作し、実際それを用いて地上での方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行っており、これは予定を超えた進展と言える。C01は2020年に0.01%濃度でGdをスーパーカミオカンデに導入し、中性子捕獲事象の効率向上を確認した。また、0.03%Gd濃度化に必要な高純度硫酸ガドリニウム26トンの製造方法を確立している。D01は他班の研究のための検出器材料のスクリーニングを行うとともに低バックグラウンド仕様のゲルマニウム検出器の開発、高感度リアルタイムラドン検出器の開発に成功している。D02は希釈冷凍機に低放射能シールドをインストールし、環境放射線バックグラウンドを低減できることを実証するとともに、B02と共にCaF<sub>2</sub> 蛍光熱量検出器の開発を進めた。

【柳田勉（東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・客員上級科学研究員）】

A01のニュートリノを伴わない原子核の二重ベータ崩壊の実験では、ニュートリノの有効質量の上限値として世界で最も厳しい値を更新し続けており、世界をリードしている。この実験は将来の上限値として20meVを目指しており、それが達成されれば、ニュートリノの質量の逆階層性と言われていた領域のほぼ全領域をカバーすることになり、その意義は測りがたい。またB01の暗黒物質直接実験においても世界一の感度達成と大発見を目指して研究が進められており、超対称性模型をはじめとする暗黒物質シナリオへの大きなインパクトが期待される。E01ではこれらの実験に関連したLeptogenesisシナリオや暗黒物質模型などの研究が活発に進められており、高く評価できる。E01とE02との合同研究会開催による理論研究間の連携や、E01とD班との共同研究による超新星アクシオン望遠鏡の提案など、研究グループ間の連携例も複数あり、本領域の意義が具体的に示されている。

これら実験及び理論的研究は、素粒子・宇宙の長年の謎である宇宙のバリオン数や暗黒物質の問題を解く上で欠かすことのできない研究である。

### 領域外評価者による評価

【森 正樹（立命館大学・理工学部・教授）、専門：ガンマ線天体物理学・宇宙線物理学】

COVID-19 禍が研究活動に大きな制約を課している現状のもとでも、各計画研究はさまざまな工夫を重ねて行われており、多くの成果が報告されている。ここではすべてには触れないが、たとえば A01 の二重ベータ崩壊探索結果では注目すべき結果が得られており、また C01 の SK-Gd 実験は運転が開始され、超新星爆発からの背景ニュートリノの探索感度が大きく向上されることが見込まれ、結果が楽しみである。海外で行われている実験でも、渡航しての参加は困難である中で進展が報告されている。理論的研究でもたくさんの結果が発表されている。また、天文学や地球物理学との連携を強化する研究交流が積極的に実施され、領域としての活動も強化されている。2021 年 3 月にオンラインで行われた「極低放射能技術研究会」では、この領域の心臓部ともいえる技術について、多くの進展が報告されたとともに、4 つのトピックスのチュートリアル講演が行われ、これは特に若手研究者にとっては得るところが多かったと思われる。2021 年 5 月にやはりオンラインで行われた領域研究会では、各計画研究や公募研究の進捗状況についての報告があったが、主に若手研究者の発表には、オンラインツールを活用して活発な議論や情報交換が行われるなど、様々な工夫が凝らされていた。このように、困難な状況の下でも、新学術研究として順調な進展が見られていることは特筆すべきであろう。

【中家剛（京都大学大学院理学研究科・教授）、専門：ニュートリノ物理学】

本新学術領域は、地下宇宙素粒子研究において世界の最先端を走る実験研究がフラッグシップとなり、さらにそれらの実験を支える技術開発研究、そしてその実験結果を元に宇宙の進化史を解明する理論研究と、多彩な研究班で構成されている。研究成果の点で世界的に注目される結果は、A01 のニュートリノのマヨラナ性の検証 ( $0\nu 2\beta$ 探索) と B01 からの暗黒物質探索の結果である。 $0\nu 2\beta$ 探索では、背景事象の理解が進み、ニュートリノ質量の逆階層領域に探索感度を広げた。そして目標である 40meV を切る感度に向けて実験は進んでいて、「 $0\nu 2\beta$ が発見されるなら神岡」という状況であり、発見を期待したい。暗黒物質探索では、B01 が発表した XENON1T 実験の「電子反跳現象の超過」は世界的に注目されている。より感度の高い XENONnT 実験の準備が進行中で、神岡で開発された硫酸 Gd 水チェレンコフ技術が使われており、その結果が待たれる。また、硫酸 Gd 水チェレンコフ技術は C01 によりスーパーカミオカンデ実験で運用中であり、中性子の同定性能が大幅に向上し、超新星背景ニュートリノの観測への期待が高まっている。以上に加えて、世界的に見てユニークである、 $^{48}\text{Ca}$  を用いた  $0\nu 2\beta$ 探索実験や、方向感度を有した暗黒物質探索実験の準備が進行中、地下宇宙素粒子研究を支える重要な基盤研究が進んでいる。現時点では、目立った遅延もなく、研究は順調に進展しており、当初の目標を十分達成できると見ている。また発見があった場合には、素粒子や宇宙物理学の潮流を変える大発見となる可能性があり、常に世界から注目されている研究領域である。

【住吉光介（沼津工業高等専門学校・教授）、専門：ガンマ線天体物理学・宇宙線物理学】

極限検出実験および理論的研究が有機的に連携し着実な成果を出している。実験班の間では検出装置や技術情報の共有が活発に行われ、環境技術の工学への応用も期待ができる。また、最先端の理論的な研究と究極の実験が密接に結びついて研究の発展につながっている。C01 の超新星背景ニュートリノの検出実験では世界で最も厳しい制限を与える成果が得られ、今後は E02 の超新星の理論計算によりモデル不定性を突きとめる方向にある。A01, A02 の検出実験と E01 の理論予測では核行列要素の理論予測や研究会などを共同で行うことで二重ベータ崩壊の観測へ向けた研究が進展している。E01, E02 の研究会などでは理論研究者の活発な議論が行われ、自由な発想により D01, D02 との超新星アクシオン望遠鏡検出器の提案も行われている。公募研究や分担者追加などで機動的に研究組織を改良しており、課題の地球科学との結びつきでは、地球内部モデル研究へのアプローチおよび銀河内での太陽系における元素の進化の研究者が加わり、成果を上げ始めている。全体としてニュートリノ・暗黒物質を通じて地球・星・宇宙の繋がりを見渡す研究へと進化している。