

領域略称名：地下素核研究
領域番号：2603

令和元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）」
に係る事後評価報告書

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」

（領域設定期間）

平成26年度～平成30年度

令和元年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

| | |
|--|-----|
| 1. 研究領域の目的及び概要 | 6 |
| 2. 研究領域の設定目的の達成度 | 8 |
| 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況 | 1 2 |
| 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況 | 1 3 |
| 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む） | 1 5 |
| 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等） | 1 8 |
| 7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況 | 2 3 |
| 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む） | 2 5 |
| 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度 | 2 9 |
| 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況 | 3 0 |
| 11. 総括班評価者による評価 | 3 1 |

研究組織 (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

| 研究項目 | 課題番号 研究課題名 | 研究期間 | 代表者氏名 | 所属機関 部局 職 | 構成員数 |
|-----------|--|-------------------|--------|------------------------|------|
| X00 総括 | 26104001 宇宙の歴史をひもとく 地下素粒子原子核研究 | 平成26年度～ 平成30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 | 12 |
| Y00 支援 | 15K21747 地下研究施設国際ネットワークによる宇宙の歴史の解明 | 平成27年度～ 平成30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 | 8 |
| A01 計画 | 26104002 大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究 | 平成26年度～ 平成30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 | 8 |
| A02 計画 | 26104003 48Caを用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発 | 平成26年度～ 平成30年度 | 岸本 忠史 | 大阪大学・核物理研究センター・教授 | 10 |
| B01 計画 | 26104004 大型実験装置による暗黒物質の直接探索 | 平成26年度～ 平成30年度 | 岸本 康宏 | 東京大学・宇宙線研究所・准教授 | 6 |
| B02 計画 | 26104005 低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究 | 平成26年度～ 平成30年度 | 身内 賢太郎 | 神戸大学・大学院理学研究科・准教授 | 3 |
| C01 計画 | 26104006 超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究 | 平成26年度～ 平成30年度 | 作田 誠 | 岡山大学・自然科学研究科・教授 | 8 |
| C02 計画 | 26104007 近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究 | 平成26年度～ 平成30年度 | 石徹白 晃治 | 東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教 | 8 |
| D01 計画 | 26104008 極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化 | 平成26年度～ 平成30年度 | 竹内 康雄 | 神戸大学・大学院理学研究科・教授 | 13 |

| | | | | | |
|-------------------|--|-------------------|--------|------------------------------|---|
| E01 | 26104009 物質粒子の起源と宇宙進化の解明 | 平成26年度～ 平成30年度 | 柳田 勉 | 東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授 | 6 |
| 統括・支援・計画研究 計 10 件 | | | | | |
| A01 公募 | 15H01026 高圧液体キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索の基礎研究 | 平成27年度～ 平成28年度 | 上島 孝太 | 東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教 | 1 |
| A02 公募 | 15H01029(廃止) 原子核行列要素の方法による不一致問題の解決 | 平成27年度～ 平成28年度 | 寺崎 順 | 筑波大学・数理物質系および計算機科学研究センター・准教授 | 3 |
| A02 公募 | 15H01032 二重ベータ崩壊実験用Ca同位体のレーザー濃縮 | 平成27年度～ 平成28年度 | 仁木 英明 | 福井大学・工学研究科・教授 | 1 |
| B01 公募 | 15H01038 気液2層型Ar光検出器の開発と高感度化 | 平成27年度～ 平成28年度 | 寄田 浩平 | 早稲田大学・理学研究科・教授 | 1 |
| B02 公募 | 15H01039 暗黒物質探索のための方向感度を持つ高圧キセノンガス検出器の開発 | 平成27年度～ 平成28年度 | 市川 温子 | 京都大学・理学研究科・准教授 | 2 |
| C02 公募 | 15H01039 ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明 | 平成27年度～ 平成28年度 | 滝脇 智也 | 国立天文台・理論研究部・助教 | 2 |
| D01 公募 | 15H01027 メタルスカベンジャーによる極低放射能技術の開発 | 平成27年度～ 平成28年度 | 清水 格 | 東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授 | 1 |
| D01 公募 | 15H01035 薄膜蛍光フィルムを利用した表面バックグラウンド除去技術の開発 | 平成27年度～ 平成28年度 | 吉田 斉 | 大阪大学・大学院理学研究科・准教授 | 3 |
| D01 公募 | 1お5H01036 超低バックグラウンドゲルマニウム検出器を用いたタンタル 180m | 平成27年度～ 平成28年度 | 梅原 さおり | 大阪大学・核物理研究センター・特任助教 | 1 |

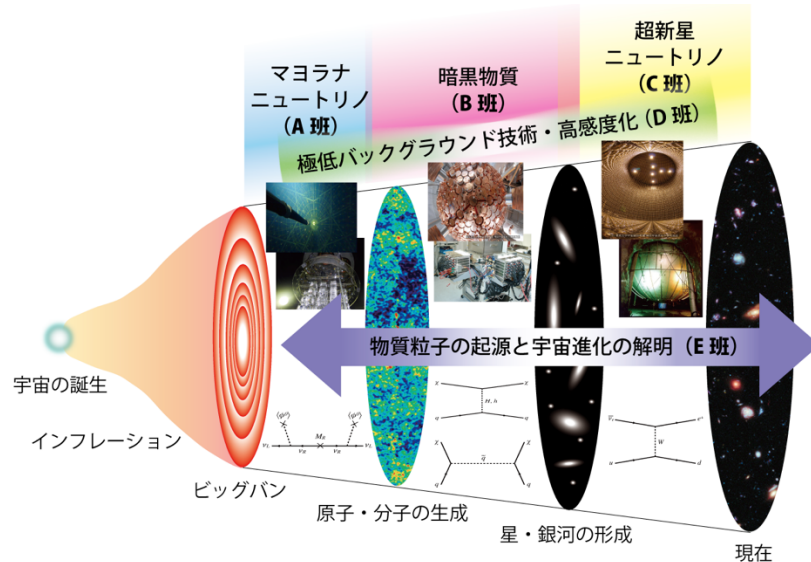
| | | | | | |
|-----------|---|-------------------|--------|-------------------------|---|
| | の半減期測定 | | | | |
| E01 公募 | 15H01030 「京」コンピュータにより暗黒物質の位相空間分布に関する研究 | 平成27年度～ 平成28年度 | 石山 智明 | 千葉大学・統合情報センター・准教授 | 1 |
| E01 公募 | 15H01031 レプトン数の破れから探る宇宙バリオン数生成機構の解明 | 平成27年度～ 平成28年度 | 浅賀 岳彦 | 新潟大学・自然科学系・准教授 | 2 |
| E01 公募 | 15H01037 ニュートリノで探る標準模型を超える新しい物理 | 平成27年度～ 平成28年度 | 波場 直之 | 島根大学・総合理工学部・教授 | 1 |
| A01 公募 | 17H05149 生成座標法による二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価 | 平成29年度～ 平成30年度 | 日野原 伸生 | 筑波大学・計算機科学研究センター・助教 | 1 |
| B01 公募 | 17H05204 気液2層型アルゴン検出器による低質量暗黒物質探索 | 平成29年度～ 平成30年度 | 寄田 浩平 | 早稲田大学・理工学術院・教授 | 1 |
| B02 公募 | 17H05109 方向感度暗黒物質探索に向けた光学的異方性シンチレータの探索と実証 | 平成29年度～ 平成30年度 | 黒澤 俊介 | 東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授 | 1 |
| B02 公募 | 17H0599 MEMS技術を用いた低雑音・高位置分解能なガス飛跡検出器に向けた基礎研究 | 平成29年度～ 平成30年度 | 高田 淳史 | 京都大学・理学研究科・助教 | 1 |
| C01 公募 | 17H05203 背景ニュートリノから大質量星とブラックホールの形成史をたどる理論研究 | 平成29年度～ 平成30年度 | 中里 健一郎 | 九州大学・基幹教育院・助教 | 1 |
| C02 公募 | 17H05202 大型水チェレンコフ検出器の為のヘテロジニアス型事象再構成アル | 平成29年度～ 平成30年度 | 矢野 孝臣 | 東京大学・宇宙線研究所・特任助教 | 1 |

| | | | | | |
|-------------|---|-------------------|--------|-----------------------------|---|
| | ゴリズムの開発 | | | | |
| C02 公募 | 17H05205 超新星ニュートリノで 探る大質量星コア構造 | 平成29年度～ 平成30年度 | 中村 航 | 福岡大学・理学部・助教 | 1 |
| C02 公募 | 17H05206 超新星ニュートリノの 系統的予言 | 平成29年度～ 平成30年度 | 滝脇 知也 | 国立天文台・理論研究部・助教 | 1 |
| D01 公募 | 17H05191 メタルスカベンジャー による液体シンチレー タ検出器の極低放射能 化 | 平成29年度～ 平成30年度 | 清水 格 | 東北大学・ニュートリノ科学研究セン ター・准教授 | 1 |
| D01 公募 | 17H05192 粒子識別を目的とした 新型泡箱検出器の開発 | 平成29年度～ 平成30年度 | 丸藤 祐仁 | 東北大学・ニュートリノ科学研究セン ター・助教 | 1 |
| D01 公募 | 17H05197 極低閾値電離信号を用 いた質量の小さい宇宙 暗黒物質探索検出器開 発研究 | 平成29年度～ 平成30年度 | 山下 雅樹 | 東京大学・宇宙線研究所・特任助教 | 1 |
| D01 公募 | 17H052019年4 月9日カルシウム48 のシングルベータ崩壊 の測定 | 平成29年度～ 平成30年度 | 梅原 さおり | 大阪大学・核物理研究センター・准教 授 | 1 |
| E01 公募 | 17H05198 電弱スケールでの共鳴 レプトン数生成機構 | 平成29年度～ 平成30年度 | 浅賀 岳彦 | 新潟大学・自然科学系・准教授 | 1 |
| 公募研究 計 25 件 | | | | | |

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募研究領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

地下素粒子原子核実験の総力を結集し、「宇宙初期の物質粒子生成」、「軽いニュートリノの謎」、「暗黒物質の謎」、「星形成の歴史」、「現在の天体活動」などを直接的に究明する。そして、各時代・各重要過程の理解を紡ぐことで、一連の宇宙の歴史をひもとく。



地下素粒子原子核研究のさらなる進化と融合

神岡地下素粒子原子核実験は、小柴のノーベル賞につながったKamiokande実験以降、Super-Kamiokande(SK)やKamLANDを擁し、大気・太陽・加速器・原子炉からのニュートリノ振動研究、超新星・太陽・地球などの天体ニュートリノ観測で世界第一線の成果を上げ続けている。さらに次の目標として、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu 2\beta$) 探索によるニュートリノのマヨラナ性（粒子と反粒子の同一性）検証、暗黒物質の直接探索、超新星背景ニュートリノや超新星前兆ニュートリノ探索など次の大発見を狙う実験も進行中である。一方、地下での素粒子原子核実験は、宇宙素粒子の大問題を解明する非常に有力かつ効率的な手法であり、中規模装置で大発見が期待できる最先端研究を行えることから、世界で激しい競争となっている。そこで、各グループが個別に研究を続けていた極低放射能研究を核として、新たに組織的な連携体制を構築し、我が国の地下素粒子原子核研究のさらなる進化と融合を目指す。

極低放射能研究を核に地下から宇宙の歴史をひもとく

素粒子・宇宙の謎の究明：「宇宙初期の物質粒子生成」, 「軽いニュートリノの謎」, 「暗黒物質の謎」と暗黒エネルギーの謎に対し、我々はニュートリノのマヨラナ性検証から「宇宙初期の物質粒子生成」, 「軽いニュートリノの謎」, 暗黒物質直接探索から「暗黒物質の謎」の究明を目指す。さらに、超新星背景ニュートリノや超新星前兆ニュートリノの観測を通じて「星形成」「現在の天体活動」に迫る。

応募領域の着想に至った経緯：全ての実験で共通するのは、極めて希な事象の検出であり、低バックグラウンド技術がそこでの共通課題である。そこで、分野を超えて研究者間で技術や知見を共有することで、広い連携のもとに素粒子・宇宙の大問題に取り組む。そのため、以下の研究項目を設定する。

研究項目A(マヨラナ性検証)： ^{136}Xe 原子核を用いて世界最高レベルでのニュートリノのマヨラナ性検証を行う(A01班)。相補的なアプローチとして ^{48}Ca での探索を確立すると共に、将来の超高感度化のための蛍光熱量検出器技術を開発する(A02班)。

研究項目B(暗黒物質探索)：世界トップレベルでのWIMP 反応断面積の感度を達成し、同時にいくつかの実験で兆候が報告されている軽い質量領域を検証する(B01班)。また、暗黒物質発見時に詳細な研究を行うための方向に感度を持つ次世代検出器の実用化を図る(B02班)。

研究項目C(超新星ニュートリノ)：SK での超新星背景ニュートリノ探索感度を向上させ、ガドリニウム導入による感度向上のための開発を進める(C01班)。近傍超新星爆発における前兆ニュートリノを含む包括的な観測体制を構築する(C02班)。これにより星形成の歴史や現在の天体活動に関する新たな知見を得る。

研究項目D(極低放射能技術)：全ての実験の共通課題として極低放射能環境の実現が重要である。これまで独自に蓄積されてきた研究のノウハウを結集し、「マイクロベクレル」の計測を実現することにより、次世代の極低放射能測定・低減技術を確立する(D01班)。

研究項目E(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(E01班)。

世界初の発見を目指し長期的に競争力を維持するためには、ニュートリノのマヨラナ性検証や暗黒物質探索における世界トップレベルの研究をさらに展開・高感度化(A01班, B01班)し、これと並行して将来の技術革新のために基礎的な開発(A02班, B02班)を実施しておかなければならない。さらに、いつ初観測が実現してもおかしくない超新星背景ニュートリノや近傍巨星の超新星爆発の前兆についても、継続的な高感度化(C01班)、さらに詳細観測を逃さず実現する体制を整備(C02班)しておくことが必要である。

研究項目A-Cはそれぞれ宇宙の歴史の各時代における重要な物理現象の解明を世界初で実現する可能性を持っている。D01班によって共通課題である極低放射能技術を共有化し向上することで、これらの性能を相乗的に向上することができる。D01班には、研究項目A-Cの研究グループ及び物理化学・地球化学分野からの参加があり、強固な連携と相乗効果を生み出せるよう方策をとっている。また、研究項目A-Cを串刺しする理論研究E01班を設定することで、各計画研究の有機的連携が一層高められ、各時代の物理を解明するだけでなく、宇宙の歴史の系統的理解が可能になる。

本領域の発展による学術水準の向上・強化

本研究領域は、Kamiokande での陽子崩壊探索、ニュートリノ観測から続く地下素粒子原子核実験のさらなる進展を目指すものであり、極低放射能研究を核とした地下素粒子原子核実験の連携により、宇宙の始まりから現在の宇宙のまでの大きな流れを解明していく。これらの分野で世界をリードすることは科学技術立国日本に必要な若い人材を引きつけるものである。本領域が有しており、さらに発展させる極低放射能技術は、宇宙・天文・素粒子・原子核研究における希な現象研究で基盤となるものであり、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。

「神岡」地下は、 $0\nu 2\beta$ ・暗黒物質・超新星背景ニュートリノ・超新星前兆ニュートリノの探索それぞれに世界最大の観測装置を有しており、次世代の革新的技術も涵養されている。また、素粒子的宇宙像構築の理論的研究が神岡にも施設を持つKavli IPMUを中心に活発に行われている。一方、海外の地下施設も整備が進み、 $0\nu 2\beta$ や暗黒物質探索は特に熾烈な競争状態にある。国内でも相乗効果のある協働を迅速に構築することが急務であり、それにより、個々の能力の高さとあわせて高い競争力を長期間維持できる。さらに、強力な理論班との連携により宇宙の歴史の解明を力強く推進できる。

本領域を設定することで、長期的な視点に立った革新的技術の基礎研究や、より詳細な背景物理研究の実現を目的にした多様な技術開発を戦略的に実施できる。またその新学術領域あるいは地下素粒子原子核研究の広い視点に立った計画展開に優秀な若手が参加することで、領域の長期的な競争力強化と将来の強いリーダー育成を同時に実現することができる。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

総括班 X00

研究目的：神岡をはじめとする地下において個々に行われていた実験の総力を結集し、「宇宙初期の物質粒子生成」、「軽いニュートリノの謎」、「暗黒物質の謎」、「星形成の歴史」、「現在の天体活動」などを直接的に究明し、その結果、宇宙の各時代、各重要過程の理解を紡ぐことで、一連の宇宙の歴史をひもとくことを目的とする。地下施設の責任ある立場のリーダーが集う運営会議や総括班会議を通して、共通課題である極低放射能技術を共有化し発展させるとともに、種々の研究会によって領域内の各テーマを串刺しにする理論的研究との協働も促進する。

研究の進捗：運営会議を合計 44 回、総括班会議を合計 18 回開催し、極低放射能技術の共有化を進め大きく発展させた。協働体制の実現により、各計画班では世界をリードする大きな成果を多数生み出した。また、技術や関心の共有によって人材の流動性が高まり、若手のキャリアパスも拡大した。若手の連携も進み、若手研究会の実施や、それを元にした各班の若手共著での論文発表も実現した。領域全体会議を 5 回主催（内 2 回は国際会議）したほか、極低放射能技術に関する 5 回の研究会（計画研究 D 班主催）の支援など、分野間連携を促進した。また、領域内で企画された各種研究会（超新星ニュートリノ研究会、若手チュートリアルなど）を支援したほか、領域内に留まらない「重力波天体」「中性子星物質」「地下素核」の三新学術領域合同シンポジウムを開催し、成果波及・周辺分野との協調を促進した。国際連携では、二重ベータ崩壊に関する国際会議 DBD の隔年共催や、方向感度を持つ暗黒物質に関する国際会議 CYGNUS の毎年開催を行ってきた。

国際活動支援班 Y00

研究目的：世界の地下施設でのサービス共有化や手厚い支援が、競合の研究展開を強力に促進していることを受け、本研究は、世界の地下研究施設と連携し、共同開発を効率的に推進することを目的とする。特に、プロジェクト同士の交流に留まることなく、本領域全体と諸外国の地下施設との連携によって、重複開発を減らし、限られたマンパワーで効率的な協働体制を構築する。また、諸外国から神岡の優れたプロジェクトへの参加を促し、「神岡」そして我が国の存在感を一段と高めることを目的とする。

研究の進捗：国際ネットワークの構築と新たな国際共同研究の創出として、「世界に打って出る」「世界を呼び込む」「世界と連携する」研究が大きく進展した。(1) 方向に感度をもった暗黒物質探索実験において、国際ネットワーク CYGNUS コラボレーションがスタート (H28 年) した。(2) 原子核乾板をもちいた暗黒物質探索実験 NEWSdm コラボレーションがスタート (H28 年) した。GranSasso 研究所 (伊) にて予備の実験が認められ、名古屋大、ナポリ大を中核に実験装置の設置等を推進した。(3) 欧州を中核とする国際共同実験グループ XENON コラボレーションとの間で MoU を締結し、キセノンを用いた暗黒物質探索実験 XENONnT へ日本グループが参加することが決定した (H29 年)。(4) 領域のシンチレーション結晶技術と AMoRE 実験 (韓) の低温熱量計技術を組み合わせた極低温蛍光熱量計開発を国際共同研究として開始した。(5) 韓国 CUP との極低バックグラウンド技術、検出器開発の交流を開始した。(6) 2015 年には、重力波観測とニュートリノ観測が連携しマルチメッセンジャー観測を行うことに関して MoU を締結した。(7) 極低放射能研究用電子基板の開発をマサチューセッツ工科大学と協働で行っている。(8) ハワイ大学と共同での光電子増倍管性能向上の試験、KamLAND や Super-Kamiokande の改修などでの海外からの貢献を支援し、国際ネットワーク強化につなげた。(9) 国際スクールを開催し、若手育成と国際行同研究の拡大を行った。

計画研究 A01 (大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究)

研究目的：本研究は、極低放射能環境を実現した大型ニュートリノ観測装置を活用して効果的にニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) を探索するものである。世界最大量 380kg の二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe を導入することでニュートリノ質量の縮退構造をカバーする 60meV の感度でニュートリノのマヨラナ性を検証する。さらに、その拡張性を生かして倍量の二重ベータ崩壊核を導入し、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 の感度に達することができる探索を開始することである。

研究の進捗：探索開始当初に見つかった福島原発の事故由来の ^{110m}Ag は、液体シンチレータおよびキセノンの蒸留により除去することに成功し、380kg での高感度の探索を実現した。その結果、 ^{136}Xe の $0\nu 2\beta$ 半減期の下限值 1.07×10^{26} 年を得た。この結果は世界を大きくリードするものであり、マヨラナ有効質量 61-165meV 以下に換算され、縮退構造をほぼ全て排除することに成功している。研究目標を大幅に前倒しして実現することに成功した。その後も、クラス 1 のスーパークリーン環境で徹底的な埃対策を実施し、以前と比べて 10 倍低放射能のミニバルーンを実現した。ほぼ倍量となる 745kg の ^{136}Xe 導入も実現し、低放射能化

と合わせて有効体積中の ^{136}Xe 量を 4 倍にすることに成功した。五年の観測で 40meV に達成する感度を有しており、当初目標を達成した。さらに γ 線を含むバックグラウンドを半分に低減するニューラルネットワーク解析の実現や、新型電子回路の導入で主要なバックグラウンドである ^{10}C 除去率を 64%から 99%に低減する目処を立てるなど、研究目標を上回る成果をあげることができた。

計画研究 A02 (48Ca を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発)

研究目的: 本研究は、レプトン数保存則の破れに対応するニュートリノのマヨラナ性の検証を目指し、 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ の研究を推進した。 ^{48}Ca 同位体濃縮技術の実用化と、高分解能蛍光熱量検出器の開発を進めた。並行して CANDLES 装置を用いて ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ の観測を進め、将来数 meV 領域までのマヨラナ性の検証を可能にする実験へ成長することを目指した。

研究の進捗: 自然存在比が 0.19%と非常に低い ^{48}Ca を 12%以上 (10 倍以上) に上げるための、電気泳動法を基礎とする新しい手法(MCCCE 法)で濃縮度を高め、量を増やす開発研究を進めた。泳動路を構成する BN を 10mm から 20mm に厚くし、装置の改良とパラメーターの探索を進めた結果、濃縮度でほぼ 100 倍の $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比 15%を達成し、目標をはるかに超える結果が得られた。蛍光熱量検出器開発において、 CaF_2 結晶の低温での特性を調べるために韓国のグループの冷凍機システムで特性を調べた。熱と蛍光の両方を測定できることが示され、研究の可能性が明確になってきた。連続する崩壊を捉えることで位置依存性を消せば高い分解能が得られることを確認した。並行して、CANDLES 検出装置に導入した遮蔽システムで、 γ 線と中性子起源のバックグラウンドをほぼ 2 桁減少させ、 $0\nu 2\beta$ の観測を進めた結果、 ^{48}Ca での探索において世界で一番良い感度を達成した。

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

研究目的: 本研究は、大型暗黒物質探索装置 XMASS を用いた暗黒物質の探索、特に先行研究が主張する暗黒物質による季節変動現象の追試を行うと共に、次世代の極低バックグラウンド暗黒物質探索装置の開発・研究を実施する。

研究の進捗: 暗黒物質探索では、先行研究の主張する季節変動を追試して、 3σ の信頼度でこれを否定し、本研究の主目的を達成した。さらに、Bosonic SuperWIMPs と呼ばれる暗黒物質が熱的に生成されるシナリオを世界で初めて否定したほか、暗黒物質以外でもキセノン二重電子捕獲事象探索において世界で最も厳しい制限を付けることに成功するなど、当初目標を超えた成果を得た。次世代暗黒物質探索装置の開発・研究では、D班と協力して数々の測定器で極低バックグラウンド化を行い、これを利用して検出器の低バックグラウンド化を推進したほか、光電子増倍管開発で約 1 桁のバックグラウンド低減に成功した。このように、次世代暗黒物質探索に必要な極低バックグラウンド化の基礎を構築した。

計画研究 B02 (低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質の基礎研究)

研究目的: 本研究は、新学術領域の技術的な基盤である「低バックグラウンド技術」を方向に感度を持つ暗黒物質探索へと応用するための基礎研究を目的とした。

研究の進捗: 当初の予定通り、低バックグラウンド検出器(ガス検出器・原子核乾板)の開発に成功し、地下実験室において方向感度を持つ暗黒物質探索実験を実施し、これまでよりも約 1 桁強い制限を与えた。また、バックグラウンド研究の一環として行った地下環境での中性子測定は、領域内の連携を得て新たな研究へと発展、予定以上の成果を達成した。公募研究との共著や共同研究開始など、新学術領域研究としての十分な進展を得た。

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

研究目的: 本計画研究では、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)を導入するために必須な低放射能技術開発を第一目標とし、関連した超新星爆発ニュートリノの実験・理論開発を同時に進めることを目標にした。

研究の進捗: SK 実験に Gd を導入する SK-Gd 計画の最重要目標であった超高純度硫酸 Gd 原料作成において、開発した高感度 ICPMS 測定と Ge 測定によって、放射製不純物 U、Th、Ra 量の目標値 (5、0.05、0.5mBq/試料 kg) 達成を確認した。原料の大量生産に向けた 1.5 トンの製造でも、その目標値達成を確認した。原料中の不純物 Ra、Rn の測定では、Ra 吸着樹脂で Ra 濃縮し、Ge 検出器で測定することに成功した。さらに 200 トン水チェレンコフ装置を使って、Gd を純水に導入し、陽イオン交換樹脂を循環系に導入する試験を行った。その結果、水の透過率向上を確認し、本番の SK-Gd 純化装置に導入可能であることを確認した。この成果により、SK-Gd 計画において低バックグラウンドかつ高い透過率の実現が可能となり、本計画研究の第 1 目標であった SK-Gd 実験開始条件を達成できた。関連した超新星背景ニュートリノの実験・理論開発についても成果を論文出版し、データ公開も行った。

計画研究 C02 (近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究)

研究の目的: 近傍超新星に関して、爆発前核燃焼段階からのニュートリノ (前兆 ν) と全種類の超新星ニュートリノを観測して、超新星爆発に至る天体活動を解明する。特に、KamLAND で前兆 ν を用いた超新星アラームを実現するとともに、神岡で稼働する3台のニュートリノ検出器 (SK, KamLAND 及び XMASS) の近傍超新星に備えたデータ取得系の強化を行う。超新星爆発があれば、3台の検出器で協力して超新星爆発の全容を究明する。また、超新星爆発以外の天体ニュートリノ観測も継続する。

研究の進捗: KamLAND で前兆 ν を用いた超新星アラームのシステムを開発し、登録ユーザーに情報を公開している。アラームの信頼度を高めるために最新の天体観測や恒星進化モデルを組み込んだ前兆 ν の理論モデルを開発した。また、近傍超新星爆発に備えたデータ取得系の強化を、それぞれの検出器で終えた。さらに、連携は神岡に閉じることなく世界中のニュートリノ検出器や重力波検出器と MoU を交換して、協力して超新星爆発に備える体制を構築することができた。他にも、重力波やガンマ線バーストに起因するニュートリノ探索を行った。

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

研究の目的: 本研究では、ニュートリノ・宇宙暗黒物質を研究する検出器本体及び検出器の周辺物質に含まれる放射性不純物の濃度をマイクロベクレル (μBq 、 10^{-6} /sec) レベルの高感度で分析する装置を開発し、次世代の極低バックグラウンド検出器開発をサポートすることを目指す。具体的には、(a) 極微量放射性不純物の測定及び除去技術に関する開発、(b) 高感度スクリーニングシステムの開発、(c) 領域全体の技術的連携の推進、(d) 情報発信システムの構築、に取り組む。

研究の進捗: (a) では、宇宙暗黒物質探索用の高純度かつ大型の NaI(Tl) 検出器を開発した。NaI(Tl) 結晶に含まれるカリウム不純物濃度は、本研究計画での飛躍的な純度向上によって、最終目標とする 20 ppb を達成した。純ガス中に含まれるラドン分析の要素技術開発では、 $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ の感度を実現可能な高い吸着性能を示すナノ素材を発見し、特性試験を行った。(b) では、神岡坑内地下実験室 A において、シンチレータ結晶の内部不純物分析装置、表面 α 線分析装置、ラドン分析装置の開発と運用を行い、目標を達成した。シンチレータ結晶の内部不純物分析装置の測定感度は $5 \mu\text{Bq}/\text{kg}$ に達し、安定した運用を行った。表面 α 線分析装置は、約 $2.4 \times 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{hour}$ (約 $0.7 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$) の測定感度まで到達した。ラドン分析装置は、水中でのシート状素材の透過ラドンの分析など、これまでになかった新しい分析装置の開発・運用をした。(c) に関しては、極低放射能技術について議論するトピカル研究会を毎年一度、定期的に主催し、目標を達成した。実験系の全て計画研究・公募研究から毎回 50~60 名ほどの参加があり、集中的な議論を行う大切な機会となった。(d) では、放射能データベースの開発と試験運用を行った。データベースには、検索機能の充実、環境データ入力への対応など、独自機能を組み込んだ。蓄積した独自のデータは、2019 年 3 月までに 404 件となり、本領域内の各研究グループがアクセスできる環境で試験運用を行い、目標を達成した。

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

研究の目的: 本計画研究が挑む、(a) 小さいニュートリノ質量、(b) 宇宙のバリオン数非対称性、(c) 宇宙の暗黒物質の 3 つの謎に関して、素粒子模型・初期宇宙論・直接/間接探索・コライダーでの検証といった多様な角度から研究を行う。

研究の進捗: 数多くの業績を挙げた (査読付論文 141 件)。特に、A 班がターゲットとするレプトン数の破れの探索に予言を与え、B 班がターゲットとする暗黒物質直接探索に指針を与える理論的成果も得られた。代表者・分担者による国際会議での発表も多数行った。また研究会や総括班会議を通して領域内の各班との情報交換や交流を行い、C 班の超新星爆発の知見を生かした共同研究を開始するなど、当初予定していた以上の進展も得られた。以上のように、研究成果、領域内連携などにおいて、新学術領域研究としての十分な進展を得た。

公募研究

公募研究の目的: 公募研究では、計画研究ではカバーしきれなかった課題、領域内の連携をより強固にする研究を支援することにより、領域の進化と融合を促すことにある。

研究の進捗: 本領域の公募研究は、H27-28 年度に 12 件、H29-30 年度に 13 件の研究が行われた。この中では、寄田・梅原両氏が極低バックグラウンド環境を活用した研究を遂行し、上島・市川・黒澤・高田・丸藤・山下の各氏による萌芽的開発・研究によって、本領域の拡充と進展を促進することができた。また、仁木・清水・吉田の各氏による極低バックグラウンド技術の開発・研究は、本領域の最重要課題である極低バックグラウンド技術をより強固なものとする研究であり、この成果を D 班主催の研究会において領域内に普遍化する方向の流れができたことは非常に大きな成果と言える。本領域のもう 1 つの最重要課題である理論的研究においては、中里・滝脇・日野原・中村ら諸氏によって、領域内で推進する実験に対する重要なインプットが与えられ、波場・浅賀ら諸氏によって、宇宙の歴史の解明と理解に向けた理論的研究が推進された。このような点から、本領域の公募研究の目的は達成されたと言える。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

領域全体では研究遂行上の大きな問題はなかったが、個々の計画研究で生じた問題は以下の様に解決した。

A01 班「液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究」

問題点：高感度化の重要課題であるミニバルーンの低放射能化では、埃の元となる人間ができるだけバルーンフィルムに近づかないように自動化を進めたが、導入時に穴が開いてしまった。

解決策：機械の溶着方向を上下反転させ、溶着時に熱伝導を均質化する緩衝フィルム越しの溶着に切り替えるとともに、温度・湿度・時間・圧力パラメータの最適化と、エッジによるダメージ、不均一性による溶着品質の低下を防ぐ方法を徹底的に突き詰め、溶着強度を 2 倍にすることに成功した。安全係数はおよそ 20 倍を確保できており、同時に導入時の圧力負荷も徹底的に排除し、ミニバルーン内外の密度差を 5 桁の精度で制御した。ミニバルーン製作作業では B01 班および国際連携での知見を取り入れ、ミニバルーンフィルムの 10 倍低放射能化、 ^{136}Xe の倍量化を実現し、合わせて有効体積内の ^{136}Xe 量 4 倍化に成功した。2019 年 1 月には新フェーズとして高感度観測を開始しており、世界を大きくリードし、5 年の観測で複数の理論モデルを検証でき、逆階層構造に切り込むことができる。

B01 班「大型実験装置による暗黒物質の直接検出」

問題点：次世代の暗黒物質探索装置用に開発してきた光電子増倍管に、長期間ではごく僅かなキセノン漏れが生じることが判明した。

解決策：極微量のキセノンが長期間使用でリークする事例は、他実験ではあったものの XMASS が開発使用してきたものでは全くなかった。しかし、本研究で新開発した光電子増倍管では、リークが生じることが見つかった。企業と協力しつつ、開発で新たな要素として取り入れた点を洗い直してテスト機での試験を行ったところ、低バックグラウンド化のためにシール部分のアルミ材を超高純度にしたことが原因であると判明した。現在では、リークを解決しつつ低バックグラウンド化も実現した光電子増倍管を作成することに成功しており、その点を含めた論文を執筆中である。この問題とその解決過程で、極低バックグラウンドの推進には高純度素材の使用が必須であるが、一方で、高純度製品は加工・製作などの技術面で異なった性質を有する点、そして、その点も考慮した低バックグラウンド化が必要であるとの知見を得た。また、D 班主催の研究会等を通じて、領域内でこれを共有できた。

C01 班「超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究」

問題点：イオン交換樹脂の作成に使う硫酸 Gd 中に、予期せぬ放射性元素 (Ra) が含まれることが判明した。

解決策：SK-Gd 計画で溶質として開発していた高純度硫酸 Gd を樹脂作成にも使用することで、解決した。新たな知見として、極低レベル Rn 濃度を目指すには高純度イオン交換樹脂が必須であるが、SK-Gd 用の高純度イオン交換樹脂を作成するには、高純度硫酸 Gd が必要であるということがわかった。

問題点：Rn 濃縮に使う活性炭がバックグラウンド源であった。

解決策：D 班で開発中であった新しい種類の活性炭の使用で、バックグラウンドレベルをそれまでの半分以下にすることに成功し、開発段階だった新しい種類の活性炭が実測定で有用であることを示した。D 班との協力で早期に解決策が見つかり、問題点は全て解決した。

研究途中での問題点は上記のように全て解決しており、解決前後では領域内での議論、助言、ノウハウ共有が効果的に行われた。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

領域採択時

審査結果の所見

本研究領域は、暗黒物質や超新星爆発に伴うニュートリノ放射の探索とともに、それらの実験実施に伴って必須となる低バックグラウンド環境の開発に力点を置き、深地下での素粒子原子核実験の技術的、科学的シナジーを追及するものである。近年の潮流として、加速器を使わない地下に設置した検出器を利用した実験が大きく進展している。この世界的に競争の厳しい分野について、先端的研究者が連携してより効果的な研究体制を構築し、領域研究として総合的に研究を推進する意義は十分に認められる。

領域代表者は、組織運営について、これまで優れた実績を有しており、領域のマネジメントに問題はない。また、若手と経験者をバランスよく取り入れた総括班が構成され、年度ごとに各研究計画の評価を行い、助言、支援を行う体制も整っている。各研究計画は、それぞれが物理学上の重要な課題に挑戦する意欲的なものであり、観測と検出器開発に理論グループを加えた強力なメンバーにより研究組織が構成されている。共通する実験基盤の開発として、超低放射能技術の高性能化が計画されている。この取り組みは、各実験の成否を握る重要な課題であり、うまく機能すれば大幅な研究の進展が期待される。計画全体には有機的なつながりが認められ、本研究領域によって、新しい実験コミュニティの形成が確固としたものになることが期待される。

留意事項：なし

参考意見：加速器を使用した暗黒物質探索との協調関係についての説明がほしい、との指摘があった。

審査結果では、超低放射能技術の高度化が各実験の成否を握る有用な課題として取り上げられていた。領域では、運営会議を合計44回、総括班会議を合計18回開催し領域全体の連携、支援を行うとともに、実験上の問題点、それに対する解決法等を議論してきた。これにより、極低放射能技術の共用化が進み、各計画は効率的に世界をリードする多くの成果を上げることができた。また、共通課題に対して連携して取り組み、世界をリードする実績を積んできたことで、人材の流動性向上や国際的なキャリアパス拡大にも大きく貢献できた。

国際活動支援班採択時

審査結果の所見：

本研究課題は、これまでに「神岡」地下実験施設と競争関係にあった世界の研究施設と、協奏的な関係を築くことを目標としている点が高く評価できる。液体シンチレータ及び二重ベータ崩壊核種の純化・低放射能化や、データベースの共通化など、地下実験に特有でかつ具体的な国際共同研究テーマが設定されており、十分な成果が期待できる。

一方で、申請されている経費の70%程度は神岡施設における外国人の雇用費であり、国内の研究員等が海外で活動する体制になっていないことは懸念が残る。国際活動支援班の趣旨を鑑み、十分な国際交流の体制を構築し、本領域の成果を国際的に発信することなどを盛り込んだ計画として、活動することが期待される。

留意事項：研究経費の大部分が、外国人研究員の雇用および神岡施設での実験参加費となっていることが、多くの委員から指摘されている。国際活動支援班の目的・趣旨を踏まえ、海外の実験施設との間で研

究者を相互派遣するなど、国際的な繋がりをより一層促進するための工夫が求められる。

参考意見：国際活動支援体制について、評価体制のほか、例えば、協定締結によるリエゾン研究者の相互派遣や、スクールの開催など、更に連携を活性化されるための工夫も望まれる。

これらの指摘・提案に対応するため、雇用を岡山大学にとどめ、「世界に打って出る」「世界を呼び込む」「世界と連携する」研究推進に集中的に取り組むことで、XENONnT への参加、暗黒物質方向測定装置開発での世界のハブとしての活動、極低温蛍光熱量計開発での国際連携など、大きな変革がもたらされた。また、韓国 CUP との極低バックグラウンド技術・検出器開発の交流、重力波観測とニュートリノ観測が連携しマルチメッセンジャー観測を行うことに関して MoU を締結など、双方向の連携や協定締結なども実施した。その他、国際スクールの開催なども行い、国際的なキャリアパスの拡大にも大きく貢献した。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

評価結果 A+（研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展が認められる）

評価結果の所見：

本研究領域の設定目的に向けて、ニュートリノのマヨラナ性の検証、暗黒物質の探索、超新星由来の背景ニュートリノ・前兆ニュートリノの探索という、地下素粒子原子核研究の基盤実験グループを組織し、検出器の極低バックグラウンド技術や情報を研究領域全体で徹底的に共有し、その結果として、世界の実験に対して大きく先行する成果を上げている。特に、ニュートリノのマヨラナ性を決定するために必要となるニュートリノ放出を伴わない2重 β 崩壊の実験では、今後数年で検出できるレベルにまで検出感度を高めることに成功している。また、暗黒物質の探索実験では先行研究の結果をほぼ完全に否定することにつながる革新的な成果の創出に成功している。複数の実験で期待を上回る成果が得られており、中間評価としては十分な成果を達成していると判断できる。

また、理論研究を担当する計画研究では、本研究領域内外の実験結果を直ちに検証できる体制を整えており、研究領域全体として有機的に結びついた研究体制を実現できている。研究費の使用状況についても、設備の共同利用など効率的な運営が行われており、適切であると判断できる。若手研究者の育成のための研究会やスクールの開催、一般へ向けた研究成果の公開も積極的に行われている。現段階で実験技術が非常に高いレベルに到達しているため、今後の研究の進展が期待できるとともに、本研究領域で培われた技術を強みとして国際協力の面からの発展も期待される。

留意事項：特になし

参考意見：特になし

中間評価では、それまでの活動が高く評価され A+の評価結果を得ることができた。その後も研究は順調に進展し、0 ν 2 β 探索では「KamLAND-Zen」が倍量の ^{136}Xe 導入に成功し、40meVに到達し逆階層領域にマヨラナ質量を予想する複数の理論モデルを検証できる感度での探索を開始した。暗黒物質探索においても世界トップの感度が期待されている「XENONnT」に、本領域のノウハウを持ち込みニュートリノフロアに迫る $2\times 10^{-48}\text{cm}^2$ という大幅な感度向上を見込む活動を開始した。まさに始まろうとしている「SK-Gd」では、超新星背景ニュートリノの世界初観測が見込まれる。本領域の活動は、「格段の発展」が期待されるこれらの旗艦プロジェクトを実現した。神岡地下で開発された極低放射能技術は、国際連携でも生かされ、国際的な技術連携やキャリアパス拡大にも繋がっている。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

計画研究 A01（大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究）

^{136}Xe を液体シンチレータに導入し、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) 探索を通してニュートリノのマヨラナ性を検証する KamLAND-Zen 実験において、世界最大量の二重ベータ崩壊核の導入と放射性不純物の低減に成功し、世界最高感度を達成しニュートリノ質量階層の縮退構造をほぼ排除する制限を得た。得られた ^{136}Xe の $0\nu 2\beta$ 崩壊の半減期の下限值 1.07×10^{26} 年、あるいは、マヨラナ有効質量の上限値 61-165meV は探索レベルを飛躍的に高めたため、世界の研究計画策定に大きな影響を与えた。さらに、放射性不純物を 10 分の 1 に低減したミニバルーンを作成し倍量のキセノンを導入することに成功した。低放射能化の成功によって有効体積を 4 倍に拡大することに成功し、逆階層構造に切り込み 5 年以内に複数の理論モデルを検証できる感度での探索を開始した。ニューラルネットワークを使い γ 線を含むバックグラウンド (BG) を半分に低減できる解析手法、主要な BG である ^{10}C の除去効率を 64% から 99% に高めることができる新型電子回路の設計を完成させた。

計画研究 A02（ ^{48}Ca を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発）

^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ の研究を推進した。 ^{48}Ca 同位体濃縮技術の実用化においては、自然存在比の 0.19% から 2% 以上に濃縮するため、電気泳動法を基礎とする新手法 (MCCCE 法) で、濃縮度・濃縮量を高める開発研究を進めた。泳動路を構成する BN を 10mm から 20mm に厚くし、装置の改良とパラメーターの探索を進め、目標を遥かに超えるほぼ 100 倍の濃縮度である $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比 15% を達成した。評価の正しさは市販の ^{48}Ca 濃縮同位体でも確認した。理論的考察から BN を厚くすることでさらに高い濃縮度が期待できることも示した。新しい濃縮技術が誕生したと言える。高分解能蛍光熱量検出器の開発では、韓国のグループの冷凍機システムを使い、 CaF_2 結晶の低温での特性を調べた。熱と蛍光の両方を測定できることが示され、実現可能性が明確になってきた。連続崩壊を捉えることで位置依存性を消せば高い分解能が得られることを確認した。 $0\nu 2\beta$ 探索では、建設した遮蔽システムで γ 線と中性子起源の BG をほぼ 2 桁減少させ、 ^{48}Ca での探索において世界で一番良い感度を達成した。

計画研究 B01（大型実験装置による暗黒物質の直接検出）

この宇宙最大の謎の一つである暗黒物質の謎に迫るべく、大型実験装置 XMASS を用いた暗黒物質探索と、次世代暗黒物質探索装置の開発・研究を行った。前者では、先行研究の主張する暗黒物質信号（季節変動事象）の追試を行い、2 論文を公表した。最終的に 3σ の信頼度で否定し、本研究の主目的を完了した。また、Bosonic-SuperWIMP と呼ばれる暗黒物質探索を世界最高感度で実施し、Vector 型のは暗黒物質ではあり得ないという結論を世界で始めて公表するなど、当初目標を越えた成果を得た。後者では、世界最高感度の α 線検出器を開発し、極低放射能測定や素材スクリーニングが可能となった。これらを用いて、従来の約 10 分の 1 の放射線量の光電子増倍管の開発に成功し、次世代暗黒物質探索装置の基礎を築いた。

計画研究 B02（低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質の基礎研究）

ガス検出器、原子核乾板を用いた手法ともに、当初の予定通り検出器内の放射性物質定量評価、代替材料選択を行い、低 BG 検出器の製作に成功した。こうして製作したガス検出器を用いて、地下実験室にて方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行い、これまでよりも約 1 桁強い制限を与えた。原子核乾板を用いた手法では、予定通りの性能を持つ検出器の製作を経て地下実験の提唱を行うに至った。また、BG 研究の一環と

して行った地下環境での中性子測定は、領域内の連携を得て新たな研究へと発展した。

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

領域内連携により、原料 Gd 化合物中の放射性不純物除去と水循環装置での陽イオン交換樹脂の開発を行い、低 BG かつ高い水透過率(水 15m に対するチェレンコフ光の透過率 77%)を実現した。特に最重要目標であった硫酸 Gd 原料作成では、開発した高感度 ICPMS 測定と Ge 測定によって、U、Th、Ra 量の目標値 (5、0.05、0.5mBq/試料 kg) 達成を確認した。原料の大量生産に向けた 1.5 トンの製造でもその目標値達成を確認した。従って、本研究の第 1 目標であった世界最先端の SK-Gd 実験開始条件を達成できた。超新星背景ニュートリノ (SRN) だけでなく、太陽ニュートリノも低閾値で継続観測できる。さらに、実験開始に伴う SRN モデルの理論的精密化も論文出版され、Gd 熱中性子捕獲 γ 線モデルの精密化の論文も出版された。以上、全ての SK-Gd 開始条件達成とともに、SK-Gd 観測データの解析準備も整えることができた。今後、SK-Gd 実験開始により世界初の SRN 観測が期待できる。

計画研究 C02 (近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究)

前兆ニュートリノを用いた超新星アラーム配信システムを構築し、2015 年 10 月から登録ユーザーに情報提供を開始した。また、アラームの信頼度向上へ向けて新しい前兆ニュートリノモデルを開発した。これは最新の恒星進化計算を基礎に、主な前兆ニュートリノ生成プロセスである電子/陽電子対消滅モデルの精密化、および爆発直前に重要となる原子核プロセスの組み込みからなる。さらに、近傍超新星爆発の超高頻度事象数に対応したデータ収集システムの強化を実現し、次世代地下実験に対応した新型フロントエンド電子回路の開発などを進めた。また、MoU をベースに世界中のニュートリノ検出器や重力波検出器と協力して超新星爆発を探索する体制を作ることができた。そのほかに重力波やガンマ線バーストに起因するニュートリノに最も強い制限を与えることに成功した。

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

(a) 極微量放射性不純物の除去技術により、NaI(Tl) 結晶に含まれるカリウム不純物濃度は、最終的に目標とする 20 ppb を達成した。(b) 高感度 80L Rn 検出器を開発・校正した。また、水中でのシート状素材の透過ラドンの分析など、新しい分析装置への応用も行った。(c) C01 班と協力し、1L Rn 検出器を A01、A02 班に提供して、神岡地下の全実験エリアでの環境 Rn モニターの整備を行った。(d) 極低放射能技術に関する研究会を毎年開催し領域内の技術連携を維持した。実験系の全ての計画研究・公募研究から毎回 50~60 名ほどの参加があり、集中的な議論を行う大切な機会となった。(e) 2015 年(平成 27 年)以後、神岡地下に D01 用の研究活動スペースを、宇宙線研究所の共同利用として確保し続けた。神岡坑内での低放射能技術開発を連携して進める体制を継続した。

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

素粒子模型構築や宇宙論の観点からニュートリノ物理への予言を与える研究を行い、 $0\nu 2\beta$ への予言を与えるなどした。また WIMP 暗黒物質に関して特定の素粒子模型に依らない包括的な研究を行い、例えば 'Well-Tempered WIMP' では近い将来の直接探索のみで殆ど探査可能であることを定量的に示すなどした。またインフレーション、レプトジェネシス、ニュートリノ質量、暗黒物質、strong CP 問題、クォーク・レプトンの質量階層性といった複数の問題を同時に解決する素粒子模型・シナリオを提案した。その他、本計画研究の対象であるニュートリノ質量、宇宙のバリオン数非対称性、暗黒物質の 3 つの謎に関連した幅広い研究を多様な角度から行い、数多くの業績を挙げた。

公募研究 (全 25 件より、いくつかを抜粋)

A01: 「生成座標法による二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価」(日野原 伸生)

二重ベータ崩壊原子核行列要素の不定性の主因である中性子-陽子対相関の決定に向け、有限振幅法による準粒子散乱雑位相近似計算のコード開発を行い、従来の大次元行列対角化を行うことなく、効率的な計算が可能となった。今後は、模型空間の拡大と、さまざま原子核密度汎関数を用いた系統的計算により、二重ベータ崩壊の実験値を大局的に再現する、中性子-陽子対相関の結合定数決定が可能となった。

B01：「気液 2 相型アルゴン検出器による低質量暗黒物質探索」(寄田浩平)

低質量暗黒物質探索を目的とした Ar 気液 2 層型検出器の開発において、特に光量の最大化と S2 信号電場依存性の精密測定と最適化を行った。前者では、光電子増倍管に塗布する波長変換材の蒸着系の最適化により、世界最大光量 12 P.E./keV_{ee} を達成した。また今後、20 P.E./keV_{ee} を実現する目処もついた。後者では、先行研究が無い高い電場領域でのデータを取得し、逆に低い電場領域では消光因子を体系的に算出するモデルを世界で初めて構築した。

B02：「方向感度暗黒物質探索に向けた光学的違法性シンチレータの探索と実証」(黒澤俊介)

タングステン酸塩結晶に着目し、方向感度を暗黒物質探索用シンチレータの可能性を探った。入射面を変えてガンマ線を照射したところ、入射面によって同じエネルギーでも発光量が異なるという、従来の常識を覆す驚きの発見があった。同様の現象が、ある結晶グループで生じることも分かった。今後、この現象のメカニズム解明に向けた研究を継続する。

C01：「背景ニュートリノから大質量星とブラックホールの形成史をたどる理論研究」(中里健一郎)

ガドリニウムを添加した SK での SRN 観測に先駆けて、事象数の理論的予測を行った。原子中性子星冷却後期において現象論的モデルを適用すると、従来の知見よりもニュートリノ放射時間が長期に亘り、SRN の事象数も上方修正されることを示した。

C02：「ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明」(滝沢智也)

超新星ニュートリノ観測から爆発の仕組みに迫る研究を行った。中でも、高速自転している星が重力崩壊した場合の数値シミュレーションによると、原子中性子星が歪み、その歪みがスクリューの様に物質を攪拌してエネルギー輸送を助ける、という従来考えられなかった爆発メカニズムを発見した。

D01：「超低バックグラウンドゲルマニウム検出器を用いたタンタル 180m の半減期測定」(梅原さおり)

タンタル 180m は、天然に存在する唯一の核異性体で、最も寿命が長い。核構造情報を得られる核異性体の励起エネルギーや寿命は、原子核物理学で必要な因子である。しかし、タンタルの寿命は下限値が得られているのみであった。研究では、低 BG ゲルマニウム半導体検出器を用いて、寿命の測定を行った。その結果、半減期の下限値で世界最高感度を更新することに成功した。

D01：「薄膜蛍光フィルムを利用した表面バックグラウンド除去技術の開発」(吉田斉)

極低 BG 実験共通の課題である表面 BG 問題を解決するための、新しい検出器材料の開発として検出器材料表面に「薄膜発光フィルム」を溶着したアクティブな表面 BG 除去を提案した。ポリスチレンベースの蛍光材料を利用し、発光量 10^4 光子/MeV、時定数 10 ns と理想的な性能のフィルム開発に成功した。このフィルムを CaF₂ 結晶と組み合わせ、発光波形の違いによる表面 BG 除去の原理検証を行い、これも成功した。さらに、塩化ビニル系の軟化剤添加で、検出器結晶と薄膜フィルムの密着性を向上させることにも成功し、汎用性のある薄膜発光フィルムが開発できた。

E01：「レプトン数の破れから探る宇宙バリオン数生成機構の解明」(浅賀岳彦)

宇宙における物質の数と反物質の数の差の解明を目指し、新しい素粒子理論の枠組みを検討した。その中で、 $0\nu 2\beta$ への「軽い右巻きニュートリノ」の寄与を定量的に評価した。その結果、質量 500MeV 程度の場合、通常のマヨラナニュートリノに付加的な寄与を与え、崩壊を加速することを示した。この成果は、今後の KamLAND-Zen 等で観測可能性が高まることを示し、幅広い分野に重要なインパクトを与えた。

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

発表論文

計画研究 A01（大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究）

- ▲ A. Gando, 他 KamLAND-Zen Collaboration (全 56 名), “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) (査読有)
- ▲ A. Gando, 他 KamLAND-Zen Collaboration (全 41 名), “Search for Majorana the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, Physical Review Letters 117, 082503 (2016) (査読有) **Editor’s suggestion, Featured in Physics**
- ▲ K. Asakura, 他 KamLAND-Zen Collaboration (全 44 名), “Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen”, Nuclear Physics A 946 (2016) 171-181 (査読有)
- 他 18 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 A02（ ^{48}Ca を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発）

- ▲ K. Nakajima, 他 (全 43 名), “Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment”, Astroparticle Physics, 100(2018), 54-60 (査読有)
- ▲ T. Kishimoto, K. Matsuoka, T. Fukumoto, S. Umehara, “Calcium isotope enrichment by means of multi-channel counter-current electrophoresis for the study of particle and nuclear physics”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2015, Issue 3, 033D03 (査読有)
- ▲ T. Maeda, 他 (全 31 名), “The CANDLES Trigger system for the study of double beta decay of ^{48}Ca ”, Nuclear Science, IEEE Transactions, 62 (3), 1128-1134 (査読有)
- 他 13 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 B01（大型実験装置による暗黒物質の直接検出）

- ▲ K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “Development of low radioactivity photo multiplier for the XMASS-I detector”, Nucl. Inst. And Method in Phys. Reserch A, A922 (2019) 171-176 (査読有)
- ▲ K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “A direct dark matter search in XMASS-I”, Phys. Lett. B, B783 (2019), 45-53 (査読有)
- ▲ K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “Direct dark matter search by annual modulation with 2.7 years of XMASS data”, Phys. Rev. D, D97 102006 (2018) (査読有)
- 他 13 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 B02（低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質の基礎研究）

- ▲ K. Miuchi, 他 (全 16 名), “Development of a time projection chamber with a sheet-resistor field cage”, PTEP accepted, <https://arxiv.org/abs/1903.01663> (査読有) (B01, D01 共同研究)
- ◎▲ K. Mizukoshi, R. Taishaku, K. Hosokawa, K. Kobayashi, K. Miuchi, T. Naka, A. Takeda, M. Tanaka, 他 (全 11 名) “Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at Kamioka Observatory”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, Issue 12, 1 December 2018, 123C01, doi:10.1093/ptep/pty133, (査読有) (A01, A02, B01, D01 共同研究)
- ▲ T. Hashimoto, K. Miuchi, (全 10 名), “Development of a low-alpha-emitting μ -PIC for NEWAGE direction-sensitive dark-matter search”, AIP Conference Proceedings 1921, 070001 (2018) (査読無)
- ▲ NEWSdm collaboration (N. Agafonova et al., T. Naka 33 番目), “Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions”, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 578, DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-6060-1 (査読有)
- 他 24 件

計画研究 C01（超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究）

- ▲* K. Nakazato and H. Suzuki, Cooling timescale for protoneutron stars and properties of nuclear matter: Effective mass and symmetry energy at high densities, Accepted for publication in The Astrophysical Journal in April 2019, arXiv:1905.00014, pp.1-11 (査読有)

- ▲* S. Ito, K. Ichimura, Y. Takaku, K. Abe, M. Ikeda, Y. Kishimoto, “Development of the measurement of radium using a germanium detector with molecular recognition resin”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 091H01, pp. 1-6, DOI:10.1093/ptep/pty096 (査読有)
- ▲ K. Hagiwara, *M. Sakuda (14 番目), 他 ANNRI-Gd Collaboration (全 23 名), “Gamma-ray spectrum from thermal neutron capture on gadolinium-157”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 023D01, pp. 1-26, DOI: 10.1093/ptep/ptz002 (査読有)
- 他 28 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 C02 (近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究)

- ▲ K. Abe, K. Hiraide et al., “Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS”, Astroparticle Physics 89, 51-56 (2017) (査読有)
- ▲* T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, “Supernova neutrino events relating to the final evolution of massive stars”, Physical Review D 93, 123012 (2016) (査読有)
- ▲ K. Asakura, *K. Ishidoshiro et al., “KamLAND sensitivity to neutrinos from pre-supernova satellites”, Astrophysical Journal, 818 91 (2016) (査読有)
- ▲* C. Kato, M. D. Azari, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, “Pre-supernova neutrino emissions from ONe cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of Fe cores?”, Astrophysical Journal, 808, 168 (2015) (査読有)
- 他 23 件

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- ▲* K. Fushimi, D. Chernyak, H. Ejiri, K. Hata, R. Hazama, S. Hirata, H. Ikeda, K. Imagawa, K. Inoue, A. Kozlov, R. Orito, T. Shima, Y. Takemoto, S. Umehara, K. Yasuda, and S. Yoshida, “Dark Matter Search by Means of Highly Radiopure NaI(Tl) Scintillator”, JPS Conf. Proc. 24, 011011 (2019)
- ▲* Y. Nakano, H. Sekiya, S. Tasaka, Y. Takeuchi, R. A. Wendell, M. Matsubara, and M. Nakahata, “Measurement of radon concentration in Super-Kamiokande’s buffer gas”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, 867 (2017), pp. 108-114 (査読有)
- ▲ K. Hosokawa, A. Murata, Y. Nakano, Y. Onishi, H. Sekiya, *Y. Takeuchi, and S. Tasaka, “Development of a high-sensitivity 80 L radon detector for purified gases”, PTEP 2015, 033H01 (査読有)
- 他 7 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- ▲ K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, “Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis”, Phys. Lett. B757 (2016) 32-38. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.03.051 (査読有)
- ▲ K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, “Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model”, Eur. Phys. J. C77 (2017) no.11, 763. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5348-x (査読有)
- ▲ S. Banerjee, S. Matsumoto, K. Mukaida, Yue-Lin S. Tsai, “WIMP Dark Matter in a Well-Tempered Regime: A case study on Singlet-Doublets Fermionic WIMP”, JHEP 1611 (2016) 070. DOI: 10.1007/JHEP11(2016)070 (査読有)
- 他 138 件

公募研究

- ▲ N. Fang 他, “Low-lying collective excited states in nonintegrable pairing models based on the stationary phase approximation to the path integral”, Phys. Rev. C (2018), 64327 (査読有)
- ▲ R. Murayama 他, “Crystal structure of Ce-doped $(La, Gd)_2Si_2O_7$ grown by the Czochralski process”, J. Alloys Compd. (2018), 404-410 (査読有)
- 他 74 件

国際会議講演

計画研究 A01 (大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究)

- K. Inoue, “KamLAND-Zen”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research (2019 年) (招待講演)
- K. Inoue, “Current status and future prospects of KamLAND-Zen”, DBD2018 (2018 年) (招待講演)
- K. Inoue, “Neutrinoless Double Beta Decay and Mass Scale”, ICFA seminar (2017 年) (招待講演)
- 他 99 件

計画研究 A02 (48Ca を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発)

- T. Kishimoto, “CANDLES for the study of double beta decay of ^{48}Ca and its future prospect”, Workshop session of The Joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (Hawaii2018) (招待講演)
- T. Kishimoto, “CANDLES for the study of ^{48}Ca double beta decay and its future prospect”, Revealing

the history of the universe with underground particle and nuclear research (2019年) (招待講演)

- 他 45 件

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

- K. Ichimura, “Recent results from XMASS experiment”, The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector (2018年)
- B. Yang, “XMASS experiment”, 日本物理学会 第73回年次大会 日韓シンポジウム (2018年) (招待講演)
- K. Kobayashi, “Dark matter searches in XMASS”, ICHEP2018 (2018年)
- 他 50 件

計画研究 B02 (低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質の基礎研究)

- O. T. Naka, “NEWSdm experiment ~Directional Dark Matter Search with Super-high resolution Nuclear Emulsion~”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research (2019年) (招待講演)
- O. K. Miuchi, “Review on Direction-Sensitive Direct Dark Matter Search with gaseous detectors”, IDM 2018 (2018年) (招待講演)
- O. K. Miuchi, “Direction-Sensitive Direct Dark Matter Search”, Topical Workshop on Dark Matter, November 13-15, NanYang Technological University, Singapore (招待講演)
- 他 46 件

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

- H. Suzuki, “Supernova Overview”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research (2019年) (招待講演)
- M. Sakuda, “A Close Link Between Electron-Nucleus and Neutrino-Nucleus Scattering”, Mini-Symposium: Intersections of Neutrino and Charged Lepton Scattering (2018年) (基調講演)
- M. Ikeda, “Solar neutrino measurement at Super-Kamiokande”, Neutrino2018 (2018年) (招待講演)
- 他 56 件

計画研究 C02 (近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究)

- K. Ishidoshiro, “KamLAND”, Supernova at Hyper-Kamiokande (2017年) (招待講演)
- K. Ishidoshiro, “Future Supernova neutrino experiments”, NuInt2015 (2015年) (招待講演)
- 他 35 件

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- Y. Takeuchi, “Recent results and future prospects of Super-Kamiokande”, RICH 2018, Russian Academy of Sciences, Russia, 31 July, 2018 (招待講演)
- K. Fushimi, “PICO-LON dark matter search”, DBD2016, Osaka, Japan, Nov. 8, 2016 (招待講演)
- H. Sekiya, “Quest for Lowest Energy Neutrinos in Super-Kamiokande”, LRT2015, Univ. of Washington, USA, Mar. 20, 2015 (招待講演)
- 他 25 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- T. Yanagida, “Neutrino mass in the landscape of vacuum”, CosPA 2016 (2016年) (招待講演)
- K. Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model”, Moriond Electroweak 2018 (2018年) (招待講演)
- D. Suematsu, “Roles of Peccei-Quinn symmetry in an effective model for dark matter and neutrino mass”, Neutrino 2018 (2018年) (招待講演)
- 他 55 件

公募研究

- K. Nakazato, “Astrophysical implication of the nuclear symmetry energy”, NuSYM18 (2018年) (招待講演)
- 他 75 件

国内講演, 学会発表

計画研究 A01 (大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究)

- 井上邦雄「非加速器素粒子原子核実験のレビュー」、学術会議・素粒子原子核分野大型計画シンポジウム(2019年) (招待講演)
- 井上邦雄「極低放射能環境でのニュートリノ研究」、日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会第2回シンポジウム(2019年) (招待講演)
- 井上邦雄「KamLAND2-Zen」、CRC 将来計画タウンミーティング (2017年) (招待講演)
- 他 277 件

計画研究 A02 (48Caを用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発)

- 吉田 齊「ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の現状と将来」、日本物理学会秋季大会シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」 (2017年) (招待講演)

- 岸本忠史 「48Ca の新濃縮法の開発と CANDLES 実験」、日本物理学会秋季大会 (2015 年) (招待講演)
- 他 132 件

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

- 佐藤和史 「XMASS 実験 -液体 Xe シンチレータ-」、Scintillator for Medical, Astro-particle and environmental Radiation Technology 2017 (招待講演)
- 岸本康宏 「大型検出器による暗黒物質直接探索」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究領域研究会 (2017 年) (招待講演)
- 他 101 件

計画研究 B02 (低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質の基礎研究)

- 身内賢太郎 「暗黒物質直接探索実験の現状」、日本物理学会秋季大会シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」(2017 年) (招待講演)
- 中童大 「宇宙におけるダークマター問題とその直接探索」、日本写真学会年次大会 (2016) (基調講演)
- 他 249 件

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

- 鈴木英之 「超新星理論開発」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究領域研究会 (2017 年) (招待講演)
- 池田一得 「SK-Gd 計画」、CRC 将来計画タウンミーティング (2017 年)
- 作田誠 「Gamma production from thermal neutron capture on natural gadolinium, 155Gd and 157Gd」、新学術領域「重力波天体」Workshop (2017 年)
- 他 77 件

計画研究 C02 (近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究)

- 吉田敬 「Progress of the Study on Massive Star Evolution」、10th DTA Symposium “Stellar deaths and their diversity” (2019 年) (招待講演)
- 石徹白晃治 「Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research」、新学術領域「ニュートリノフロンティア」研究会 (2015 年) (招待講演)
- 他 75 件

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- 伏見賢一 「宇宙暗黒物質探索レビュー」、シンチレータ研究会 SMART2017 (2017 年) (招待講演)
- 竹田敦 「XMASS の中性子バックグラウンド」、「極低放射能技術」研究会 (2016 年) (招待講演)
- 他 93 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- 柳田勉 「ニュートリノの質量と CP の破れ, ダブルベータ」、日本物理学会年次大会 (2015 年) (招待講演)
- 松本重貴 「素粒子物理学における指導原理としての暗黒物質探索」、日本物理学会年次大会 (2019 年) (招待講演)
- 他 44 件

公募研究

- 浅賀武彦 「初期宇宙物理学の現状認識: L 生成, 暗黒物質, 非加速器実験」、研究会「質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理」(2018 年)
- 他 73 件

図書

A01: カミオカンデとニュートリノ、鈴木厚人監修、丸善出版、第 8・9 章 / Frontiers in Physics 9 ニュートリノ物理、中家剛著、共立出版、p33-35, 47-48, 53, 64-66 / 5 つの謎からわかる宇宙、荒舩良孝著、平凡社新書、p143-162 / ニュートリノって何?、青野由利著、筑摩プリマー新書、p96-101, 222-224 / ニュートリノでわかる宇宙・素粒子の謎、鈴木厚人著、集英社新書、第 3・5 章 / ニュートリノで探る宇宙と素粒子、梶田隆章著、平凡社、第 8・9・11 章

一般向け講演、解説等

一般向け講演

A01: 「ニュートリノで調べる地球の成り立ちと宇宙の物質の起源」知のフォーラムプレミアム 2019 年 1 月 / 「宇宙の謎を解く鍵: ニュートリノ」夢ナビライブ 2018 年仙台 140 名, 17 年仙台 123 名, 名古屋 220 名, 16 年仙台 170 名, 東京 400 名, 15 年仙台 176 名 / 「物質の根源はニュートリノかも!」第 4 回仙台市天文台×東北大学大学院理学研究科公開サイエンス講座「ニュートリノから探る宇宙の謎」2017 年仙台 100 名 / 「ニュートリノで解き明かす宇宙の謎」東北大学科学シンポジウム「ニュートリノ研究に夢を乗せて」2017 年仙台 700 名 / 「ニュートリノと宇宙」仙台オープン病院医師会 2017 年仙台 80 名 / 「ニュートリノと宇宙」科学講演会 2016 古川 1011 名 など多数

B01: 「ダークマターの正体を追う」富山市天文台 サイエンスカフェ 2014 年 他 10 件

B02: 「Dark Matter in The Universe」8th サイエンス E カフェ 2016 年神戸 / 謎多きニュートリノの世界～素粒子物理学はどこへ向かうのか」東濃地科学センターセミナー 2015 年瑞浪 他 18 件

C01: 「星の一生と元素の起源」全国同時七夕講演会 2018年 / 「ニュートリノ観測から宇宙の歴史を紐解く」日本熱物性学会シンポジウム・招待講演 2016年岡山 200名 / 物理、ニュートリノ、スーパーカミオカンデ」SSH講義 2015年飛騨 他 16件

D01: 「宇宙暗黒物質を探せ！」市民科学講座～ニュートリノと宇宙暗黒物質の謎～ 2016年徳島 他

E01: 「ダークマターの正体は？」2017年東京 / 「暗黒物質の正体について」第11回 Kavli IPMU/ICRR 合同一般講演会「宇宙を捉える-暗黒物質の正体に迫る-」2014年

解説等

A01: 長基線原子炉ニュートリノ振動、井上邦雄、物理学会誌 p222-226, Vol 71, Np. 4, 2016 / ガスレビュー No. 837、東北大学最先端研究にキセノン利用、p3-4

B01: 「ダークホース新粒子アクシオン」日経サイエンス 2018年5月号 監修他 3件

ホームページ, 新聞記事等

領域ホームページ: <http://www.lowbg.org/ugnd/>

その他プロジェクトのホームページ

A01: <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

A02: <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/candles/>

B01: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/>

B02: http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/newage_j.html

C01: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>

超新星背景ニュートリノモデル <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/>

超新星爆発ニュートリノモデル: <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

Gd 熱中性子捕獲ガンマ線モデル: http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~sakuda/ANNRI-Gd-EG_v3.html

C02: <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/SNmonitor/regist/index.html>

D01: <http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/laboratory/radon/index.html>

新聞記事等

A01: BS フジ ガリレオ X H29. 2. 12, H29. 2. 19 / 読売新聞 H29. 3. 19 「ニュートリノの正体は？」 / 日経サイエンス H29. 12月号「ニュートリノはマヨラナ粒子か？」 / NHK ラジオ番組「特集・宮城イグ☆ナル学園熱血授業！」, “きみはニュートリノを見たか!?” , 2016/2/11 15:05~16:55 放送 / 日経新聞 H28. 1. 11 「ニュートリノ観測強化」 / 日経サイエンス 2016年4月号、素粒子で地球を透視 / ニュートン別冊「物理学をゆるがすニュートリノ」 / 別冊日経サイエンス 203, 「ヒッグスを超えて ポスト標準理論の素粒子物理学」 / ニュートン別冊, 「太陽系の成り立ち 誕生からの1億年」 / 放送大学「宇宙とその進化」第3回「電磁波以外の手段による宇宙の観測」、2015年4月17日放送 / TBS 別冊アサ秘ジャーナル、2014年12月21日放送 / 河北新報 2014年9月3日、「宇宙の始まり、解く鍵に／最小の素粒子ニュートリノ」

A02: Newton 別冊 物理学をゆるがすニュートリノ, 「蛍石でニュートリノの謎に挑む CANDLES」, p134-137 / 別冊日経サイエンス 203, 「ヒッグスを超えて ポスト標準理論の素粒子物理学」, p92

B01: 2016年2月19日北陸新聞 朝刊「暗黒物質の正体を探れ」等

C01: 2017年10月30日9面掲載 日経新聞「宇宙の進化謎に迫る」 / 2018年9月11日30面掲載 毎日新聞「スーパーカミオカンデ12年ぶり公開」 / 2018年9月16日30面掲載 日経新聞「太古の宇宙素粒子で探る」 / 山陽新聞 2017年10月4日朝刊32面「5月に新学術領域研究会主催で岡大にて招待講演をされた Barish 氏がノーベル物理学賞を受賞」 / 山陽新聞 2017年5月24日29面掲載、新学術領域「地下素核研究」・岡山大学共催「重力波発見と宇宙に関する2つの公開講演」-Barry Barish 氏 (LIGO/カルテック) と村山斉氏 (東大カブリ IPMU 機構長)

主催シンポジウム等

領域研究会: 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」第一, 二, 三回研究会, 2014年豊中市, 15年神戸市, 17年岡山市

領域国際会議: “Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research” 2016年東京都, 2019年仙台市

重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質 新学術3領域合同シンポジウム「多面的アプローチで解きあかす宇宙と天体」 2015年仙台市

その他の研究会:

D01班主催研究会「極低放射能技術」2015年淡路市, 16年徳島市, 17年飛騨市, 18年山形市, 19年仙台市

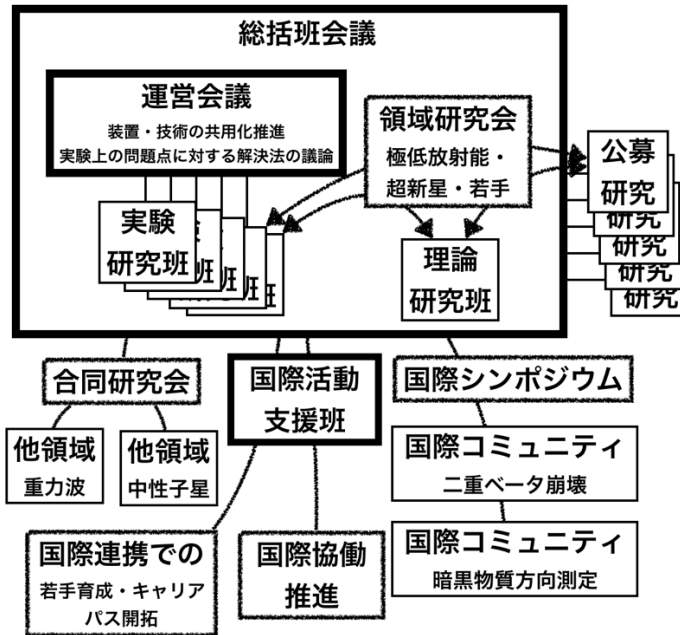
D01班主催「無機シンチレーター研究会 (SMART)」 2017年11月山形市, 18年5月那覇市

C01, 02班主催「超新星ニュートリノ研究会」2015年野田市, 16年富山市, 17年仙台市, 18年箱根町, 19年三鷹市
若手研究会, 2014年神戸, 名古屋, 15年神戸, 名古屋, 16年大阪, 徳島, 神戸, 17年加賀市, 東京都, 18年豊中市, 名古屋市, 仙台市

国際会議 “Double Beta Decay and Underground Science” 共催、2016年大阪, 18年ハワイ

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。



総括班が開催する運営会議・総括班会議を中心に各計画班および公募研究、そして周辺の新学術領域研究やコミュニティとの連携を促進する。特に、運営会議は実験班間の装置や技術の共有を図り、各班の課題に対するアドバイスも行ってきた。実験・理論間の連携推進は総括班会議で行い、領域研究会を中心に、極低放射能研究会や超新星ニュートリノ研究会などのトピカル研究会も毎年開催し、公募研究も含めた広い連携の開拓と調和を図ってきた。国際活動支援班は、総括班と密接に連携し、国際協働を効果的に推進するとともに、国際的なキャリアパスの開拓にも貢献した。以下、各計画班が実施した具体的な連携について記述する。

A01 班の活動では、B01 班が開発したキセノン蒸留装置を借り受け大きな BG であった ^{110m}Ag の除去作業に適用したほか、B01 班および国際連携で開発したスーパークリーンルームの装備を導入し、10 倍低放射能のミニバルーンを作成した。これにより世界を大きくリードし縮退構造を排除する成果を上げたことに加え、リードをさらに広げて 40meV に到達し逆階層構造に切り込む感度での探索を開始することができた。一方で、A01 班の技術である、液体シンチレータを純水で洗浄する装置は A02 班の研究に提供し、 CaF_2 結晶を吊り下げる媒質としてまた veto 装置として活用された。また A01 班が得意とする蛍光フィルムを使った表面 α 線測定技術や液体シンチレータを使った中性子測定技術は D01 班の活動に還元された。また、D01 班の低放射能 NaI 検出器の開発において、低放射能実験室、高性能電子回路などの技術および環境を提供し、世界トップレベルの低放射能結晶開発に貢献した。

A02 班の研究において、高エネルギーガンマ線に対する遮蔽体を導入する際に、検出器材料が環境熱中性子を捕獲し、数 MeV のガンマ線を発生する事象を大きく抑制する必要があった。そのため CANDLES 検出器の最外遮蔽体として、熱中性子を効率的に吸収するホウ素入りシリコンラバー製の熱中性子遮蔽シートを導入した。これにより、CANDLES 検出器に入ってくる熱中性子の量を 2000 分の 1 に低減することに成功した。この成果から、同質の材料が、B02 班で XMASS 検出器のキセノン循環ライン（水タンクの外部）で Xe の熱中性子捕獲による放射化を抑えるために利用された。また、神岡地下実験室での環境中性子測定（A01, A02, B01, B02, D01 班共同研究）において、熱中性子検出に感度の高い ^3He 比例係数検出器を用いた、高

速中性子成分の測定セットアップにも利用され、中性子のフラックスの広範囲エネルギー領域での評価に大きな貢献をした。また、A02 班では、公募研究「二重ベータ崩壊実験用 Ca 同位体のレーザー濃縮」において、計画研究で開発を進めている電気泳動法とは異なる手法でのカルシウム同位体濃縮法開発が行われ、研究期間終了時には、70%以上の高濃縮カルシウム 48 の生成に成功し、多様な方法でカルシウム同位体濃縮に取り組みやすくなった。公募研究「カルシウム 48 のシングル β 崩壊の測定」では、研究協力者が中心となり、二重ベータ崩壊半減期の評価の際にバックグラウンドとなる崩壊モード（シングル β 崩壊）の測定に取り組み、研究協力を進めた。

B01 班は、B02 班と連携して、低バックグラウンド化で問題となるコバルトの含有量が少なく、ステンレスの代替として構造体用途に用いることができる合金の試作・評価を行った。この共同研究の結果、XMASS (B01 班) では、新開発の光電子増倍管のボディをコバルトフリーの合金で作成し、放射性 ^{60}Co の量を 1/20 ~1/30 に削減することができた(論文執筆中)。この新素材は、極低バックグラウンド用途に広く利用できるため、波及効果大きい。

B02 班では、A01, A02, B01, B02, D01 の各班と共同して、地下環境での中性子測定を行い、論文を発表した (PTEP(2018) 123C01)。また、公募研究と協力して研究を行い、共著論文を発表した (J. Inst. 13 (2018) P07015)。B02 班の検出器 (マイクロ TPC) を応用した表面 α 線検出器を考案し、B01 班, D01 班と協力して新しい表面 α 線検出器を製作し、論文を投稿した (NIMA 投稿)。

C02 班は、公募研究「超新星ニュートリノの系統的予言」と協力して、超新星ニュートリノ観測によるニュートリノ集団振動の検出可能性を評価した (論文投稿準備中)。また、D01 班の低放射能結晶開発において、C02 班が開発を進める電子回路を提供し、デッドタイムフリーなデータ取得を支援した。さらに、C01 班と協力して毎年超新星ニュートリノ研究会を開催した。特に、長めのチュートリアル講演を設けて実験と理論、若手とシニア研究者の活発な意見交換を実現させた。2019 年からも継続・発展して実施することを合意している。また、E01 班と連携して、特徴的な近傍超新星ニュートリノアラームを生かして、このアラームをトリガーとする新しいアクシオン探索の研究を開始した。

D01 班では、領域内の技術的連携を維持するため、年に 1 度、極低放射能技術研究会を開催してきた。全ての実験系の計画研究と公募研究からの参加を得て、成果のみではなく技術的な問題点に関して情報共有・議論する場を設けた。特に、地下実験における共通で重要な低放射能技術に関しては、毎回テーマを決めて重点的に議論を行ってきた。また、各実験グループの枠を超えて、新学術領域内の研究者が協力して装置開発を行うことができる研究スペースとして、東京大学宇宙線研究所神岡施設の地下実験 A の共同利用申請を行い、維持して来た。このスペースでは主に 3 種類の分析装置の開発を、項目 A, B, C の各実験系の計画研究グループからのメンバーと協力して行ってきた。

E01 班では、領域全体を串刺しにする様々な理論的研究を行なった。A01 班, A02 班に対しては、ニュートリノ質量行列に予言を与える素粒子モデルを解析し、 $0\nu 2\beta$ への予言をすることで、重要な指針を与えた。また B01 班, B02 班に対しては、WIMP 暗黒物質に関して model-independent な包括的研究を行い、地下実験での WIMP 暗黒物質直接探索の重要性や他の探索との相補的関係を明らかにした。また研究期間終盤において、C01 班と共に、超新星爆発の知見を生かした新物理探索に関する共同研究を開始するなど、当初予定していた以上の進展も得られた。また分担者が A01 班, A02 班の若手研究会に講師として参加してきたほか、B02 班と共に理論・実験合同若手研究会を開催するなど、領域内の若手育成にも貢献した。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

- 低放射能環境とバックグラウンド測定環境
神岡地下の東京大学が共同利用として提供する地下環境において、A02 班 (CANDLES), B01 班 (XMASS), B02 班 (NewAGE), C01 班 (SK-Gd 開発研究), D01 班 (低放射能技術開発研究) が協働で研究を推進しているほか、東北大学も地下クリーンルームを D01 班 (PICO-LON 開発) に提供しており、それぞれの計画研究が有するゲルマニウム検出器や放射線遮蔽、電子回路など、極低放射能測定に必要な機器を共有している。
- 純化装置の共用
B01 班の有するキセノン純化装置を、A01 班 (KamLAND-Zen) が利用しているほか、A01 班の液液抽出純化装置を、A02 班に提供している。
- 希釈冷凍機を始めとする極低温設備
B02 班, D01 班の研究者が開発した希釈冷凍機を、A02 班の蛍光熱量検出技術開発に提供し、共同で研究開発を行っている。この希釈冷凍機の共同研究に端を発し、将来の宇宙暗黒物質の直接探索への利用を目指した、新たなコラボレーションが結成された。
- 神岡地下共同利用スペース（実験室 A）での極低放射能技術開発
D01 班が中心となって、本領域のメンバーがコラボレーションを組み、宇宙線研究所の共同利用研究として神岡地下の実験スペース（実験室 A）をクリーンルーム化して、極低放射能の研究・開発を行っている。
A02 班で使用する CaF_2 結晶の内部不純物分析装置を、D01 班と共同して実験室 A に構築した。この装置は、簡易的に開閉可能な遮蔽システムと遅延同時計数を始めとする測定系で構成されており、領域内で推進されている様々な検出器開発において、検出器内部の放射性不純物測定に利用されている。
実験室 A には共用設備として、80L Rn 検出器用容器、ターボ分子排気システム、混合ガス分離装置、高電圧電源、ガス電子増幅器用両面基盤、ガス透過率測定セル、各種配管部品、各種ガス、クリーンブース構築用各種資材（導電床シート、透明シート、アルミフレームなど）が導入された。
- 環境 Rn モニターの整備
D01 班を主体に改良を加えて準備した Rn 計測システムを、A01 班, A02 班の各実験グループに提供した。これらは、B01 班, C01 班で既に個々に構築されていた Rn 観測モニターと統合され、神岡地下実験エリア全体の環境 Rn 濃度を統一的にモニターするシステムを構築した。これによって、神岡地下全体で系統的な Rn 低減に対する取り組みが可能となった。
- 中性子観測ネットワークの構築
B02 班主催の第 3 回若手研究会（主題：中性子バックグラウンド）において、中性子が共通の課題であることが判明し、これを機に、B02 班が中心となって地下実験環境での中性子測定コンソーシアムが結成された。ここでは、各計画班の得意とする技術（A02 班の液体シンチレータ、B01 班の過去の測定データ、B02 班のガス測定器と原子核乾板、D01 班の低バックグラウンド検出器）を結集し、地上と地下で中性子の測定・モニタリングを進めた。この活動は、若手の勉強会をスタートに若手が主導し、最終的には、学会発表や論文発表に繋がる成果となっており、連携成功実績の 1 つに挙げられる。また、領域外の研究者からの協力依頼や打診もあり、領域の枠を超えた連携の礎となっていることも特筆すべき点である。
- 研究会による連携の推進
例年の領域研究会によって、領域の連携が加速している。特に、2016 年と 2019 年の国際会議では、内外からの招待講演を迎え、地下で行われている素粒子・原子核研究の最新の成果が報告された。会議では、世界各地の地下実験施設の現状報告や紹介がなされた他、世界初発表となる結果が発表されるなど大成功であった。また、D 班主催の極低放射能技術に関する研究会は、地下実験関係者が揃って参加して、低バックグラウンドに関する議論と情報交換を行う研究会として、領域内外から非常に好評であった。

・研究費の使用状況（（１），（２），（３）を合わせて３ページ以内）

（１）主要な物品明細（計画研究において購入した主要な物品（設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。）について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。）

| 年度 | 品名 | 仕様・性能等 | 数量 | 単価（円） | 金額（円） | 設置(使用)研究機関 |
|----|------------------------------|-----------------------------------|----|------------|------------|------------|
| 26 | 濃縮キセノン136 | Xe-136 濃縮度90%(45kg) | 1 | 72,900,000 | 72,900,000 | 東北大学 |
| | 低バックグラウンド地下実験解析用計算機サーバー | Fijitu E-5 2607v2, 主記憶64G, 500 GB | 1 | 14,904,000 | 14,904,000 | 東京大学宇宙線研 |
| | ラジウム除去装置一式 | オルガノ(株)G-70(EG-4A-HG) | 1 | 7,344,000 | 7,344,000 | 東京大学宇宙線研 |
| 27 | 濃縮キセノン136 | Xe-136 濃縮度90%(17.951kg) | 1 | 27,006,430 | 27,006,430 | 東北大学 |
| | Ge半導体検出器(アンブレ等含)一式 | 低バックグラウンド仕様(特注)CANBERRA社 | 1 | 21,114,000 | 21,114,000 | 東京大学宇宙線研 |
| 28 | バックグラウンド地下実験解析用計算機磁気ディスク装置一式 | Fujitsu 285 TB | 1 | 17,820,000 | 17,820,000 | 東京大学宇宙線研 |
| | 極低バックグラウンドGe半導体検出器 | EGPC-50-1.95/SB99-TFA | 1 | 8,316,000 | 8,316,000 | 大阪大学 |
| 29 | 希釈冷凍機制御システム | Oxford Triton-DR | 1 | 10,999,800 | 10,999,800 | 大阪大学 |
| | クリーンルーム加湿器 | いけうち AirAKI | 1 | 4,498,200 | 4,498,200 | 東北大学 |
| 30 | 無冷媒式希釈冷凍機1式 | Oxford Instruments 社製 | 1 | 23,389,560 | 23,389,560 | 大阪大学 |
| | 超高純度硫酸ガドリニウム1式(1.5トン) | 並木薬品 Gd2(SO4)3-8H2O | 1式 | 12,636,000 | 12,636,000 | 東京大学宇宙線研 |
| | 高圧電源システム | C.A.E.Nユニバーサルマルチチャンネル | 3 | 5,221,800 | 15,665,400 | 東北大学 |

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

研究期間を通じて、旅費は、各機関から神岡地下実験施設への旅費が多くを占めている。本領域の性格上、地下実験施設へ移動して実験を遂行することは必須であるため、必要不可欠な支出である。この他、国際会議への出席、国際連携のための打合せなど海外渡航費用も必要であった。人件費・謝金については、研究員等の雇用のための費用が大部分である。その他としては、ICP-MS のレンタル費用に多くを費やしているが、極低バックグラウンド環境の実現には素材中の不純物定量が不可欠であり、これも妥当な支出である。

以下に、主要なもののみを示す。

【平成26年度】

・旅費

[A01] 1,593 千円 (神岡での地下実験のための旅費 20 件) (「旅費」総額 5,553 千円), [D01] 650 千円 (神岡への移動) (「旅費」総額 1,229 千円, [E01] 594 千円 (海外出張(ドイツ DESY) 1 名) (「旅費」総額 3,132 千円), [B01] 536 千円 (領域研究会 (淡路) への参加 8 名) (「旅費」総額 1,487 千円), [C01] 410 千円 (J-PARK 実験施設への旅費, 5 名) (「旅費」総額 2,346 千円), [X00] 259 千円 (領域研究会 (大阪) への参加, 5 名) (「旅費」総額 2,008 千円)

・人件費・謝金

[C01] 1,134 千円 (研究補助者 1 名, 非常勤 (博士, 修士学生) 2 名の雇用) (「人件費・謝金」総額 1,134 千円), [D01] 195 千円 (研究会 運営補助の費用) (「人件費・謝金」の総額 195 千円), [E01] 188 千円 (専門知識の提供に対する対価) (「人件費・謝金」の総額 188 千円), [X00] 57 千円 (領域研究会 補助) (「人件費・謝金」の総額 150 千円)

・その他

[C01] 3,000 千円 (ガドリニウム実験室洗浄作業) (「その他」総額 4,976 千円), [A01] 1,498 千円 (ニュートリノ方向検出光学設計) (「その他」総額 2,149 千円), 1,000 千円 (NaI 結晶加工費) (「その他」総額 11,440 千円), [B01] 945 千円 (UGE サーバー移設, 再構築作業) (「その他」総額 2,511 千円), [B02] 149 千円 (直流電源修理費用), (「その他」総額 311 千円)

【平成27年度】

・旅費

[A01] 9,068 千円 (神岡での地下実験のための旅費 92 件) (「旅費」総額 10,998 千円), [Y00] 2,375 千円 (8 名を仙台での国際共同研究推進会議に招聘) (「旅費」総額 3,897 千円), [C01] 2,500 千円 (国際スクール参加 25 名分) (「旅費」総額 6,258 千円), [A02] 1,829 千円 (神岡での地下実験のための旅費 52 件) (「旅費」総額 3,556 千円), [B02] 590 千円 (神岡での地下実験のための旅費, 17 件) (旅費) 総額 6,258 千円), [X00] 381 千円 (領域研究会 (富山) への参加, 6 名) (旅費) 総額 2,679 千円), [B01] 288 千円 (領域研究会 (神戸) への参加, 6 名) (旅費) 総額 798 千円)

・人件費・謝金

[E01] 5,304 千円 (博士研究員 2 名雇用) (「人件費・謝金」総額 5,304 千円), [B01] 4,138 千円 (特任研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 4,138 千円), [D01] 3,367 千円 (博士研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 3,367 千円), [C01] 3,170 千円 (研究補助 1 名, 非常勤 (博士, 修士学生 3 名の雇用) (「人件費・謝金」総額 3,170 千円), [C01] 2,780 千円 (博士研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 2,780 千円)

・その他

[A02] 8,309 千円 (ICP-MS アジレント 7900 レンタル料) (「その他」総額 8,655 千円), [A01] 2,986 千円 (外水槽 PMT 交換足場作業) (「その他」総額 6,052 千円), [C01] 900 千円 (タンク止水材試験費用) (「その他」の総額 1,211 千円), [B01] 812 千円 (「1/3 モデル」電解研磨試験費用) (「その他」総額 3,345 千円), [C02] 600 千円 (タンク水分析費用) (「その他」の総額 1,211 千円), [B02] 190 千円 (放射性炭素測定) (「その他」総額 474 千円)

【平成28年度】

・旅費

[A01] 11,560 千円 (神岡での地下実験のための旅費 130 件) (「旅費」総額 20,965 千円), [Y00] 1,306 千円 (国際共同研究推進会議参加, ホノルル, 4 名) (「旅費」総額 5,425 千円), [E01] 583 千円 (博士研究員赴任旅費 1 名) (「旅費」総額 2,952 千円), [B02] 540 千円 (神岡での地下実験のための旅費 17 件), [D01] 400 千円 (極低放射能技術研究会 参加旅費, 8 名) (「旅費」総額 1,730 千円)

・人件費・謝金

[D01] 8,799 千円 (博士研究員 2 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 8,799 千円), [C01] 7,065 千円 (特任助教 1 名, 研究補助 1 名, 非常勤 (博士, 修士学生) 3 名の雇用) (「人件費・謝金」総額 7,065 千円), [C02] 5,581 千円 (博士研究員 1 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 5,581 千円), [A02] 5,376 千円 (博士研究員 1 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 5,376 千円), [B01] 4,202 千円 (特任研究員 1 名の雇用) (「人件費・謝金」総額 4,202 千円), [E01] 4,050 千円 (博士研究員 2 名 (3 か月 + 7 か月) の雇用) (「人件費・謝金」総額 4,050 千円)

円), [Y00] 1,939 千円 (研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 1,939 千円)

・その他

[A02] 9,348 千円 (ICP-MS アジレント 7900 レンタル料金) (「その他」総額 9,768 千円), [B01] 994 千円 (スーパーコンピュータ利用料) (「その他」総額 4,705 千円), [C01] 900 千円 (タンク止水材試験費用) (「その他」の総額 1,206 千円), [A01] 593 千円 (ICP-MS 分析費用 5 件) (「その他」総額 1,023 千円), [X00] 516 千円 (国際会議 開催費用) (「その他」総額 787 千円), [D01] 180 千円 (バルブモーター標準メンテナンス費用) (「その他」総額 442 千円)

【平成 29 年度】

・旅費

[A01] 5,059 千円 (神岡での地下実験のための旅費 68 件) (「旅費」総額 8,552 千円), [Y00] 2,342 千円 (国際共同研究推進, 韓国 I B S 研究所 17 件) (「旅費」総額 9,162 千円), [C01] 2,100 千円 (国際会議旅費 7 件) (「旅費」総額 5,731 千円), [E01] 994 千円 (エディンバラ大学での共同研究等) (「旅費」総額 3,268 千円), [A02] 1,451 千円 (神岡地下での実験の旅費 63 件) (「旅費」総額 5,565 千円), [D01] 600 千円 (極低放射能技術研究会への旅費, 10 件) (「旅費」総額 2,627 千円),

・人件費・謝金

[C01] 7,104 千円 (特任助教 1 名, 研究補助 1 名, 非常勤 (博士・修士) 2 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 7,104 千円), [B01] 6,869 千円 (特任研究員 1 名と特任准教授 1 名 (2 カ月) を雇用) (「人件費・謝金」総額 6,869 千円), [C02] 5,483 千円 (博士研究員 1 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 5,483 千円), [A02] 5,425 千円 (博士研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 5,425 千円), [E01] 3,181 千円 (博士研究員 1 名を 6 か月雇用) (「人件費・謝金」総額 3,181 千円), [Y00] 2,476 千円 (研究員雇用, 1 名) (「人件費・謝金」総額 2,884 千円)

・その他

[A02] 12,464 千円 (ICP-MS アジレント 7900 レンタル料) (「その他」の総額 14,918 千円), [A01] 4,860 千円 (RO エレメント交換業務) (「その他」の総額 5,972 千円), [C01] 900 千円 (タンク止水材試験費用) (「その他」の総額 2,410 千円), [B01] 723 千円 (Ge 検出器遮蔽体構築工事), [A01] 512 千円 (ミニバルーン技術労務費用) (「その他」の総額 5,972 千円),

【平成 30 年度】

・旅費

[A01] 16,701 千円 (神岡での地下実験のための旅費 204 件) (「旅費」総額 13,118 千円), [Y00] 4,619 千円 (国際共同研究推進会議参加 ケンブリッジ 13 名) (「旅費」総額 13,118 千円), [C01] 1,400 千円 (国際会議旅費 3 件) (「旅費」総額 4,096 千円), [A02] 1,011 千円 (DBD18 国際会議に 5 名出席) (「旅費」総額 4,254 千円), [E01] 743 千円 (トロント大学での共同研究) (「旅費」総額 3,182 千円), [B02] 500 千円 (神岡での地下実験のための旅費, 15 件) (「旅費」総額 2,979 千円)

・人件費・謝金

[B01] 13,457 千円 (特任助教, 特任准教授 各 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 13,457 千円), [A02] 7,778 千円 (博士研究員, 特任研究員各 1 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 7,778 千円), [Y00] 6,281 千円 (研究員 1 名を雇用) (「人件費・謝金」総額 6,281 千円), [D01] 4,228 千円 (博士研究員 1 名雇用) (「人件費・謝金」総額 4,228 千円), [E01] 4,033 千円 (博士研究員 2 名雇用 (4 か月, 6 か月)) (「人件費・謝金」総額 4,033 千円)

・その他

[Y00] 792 千円 (国際会議 DBD 開催費用) (「その他」の総額 997 千円), [X00] 718 千円 (国際会議 (仙台) 開催費用) (「その他」の総額 1,141 千円), [A02] 561 千円 (CaF₂ 結晶 6 面研磨), (「その他」の総額 1,836 千円), [A01] 504 千円 (クリーンスーツ クリーニング代, 593 件) (「その他」の総額 936 千円), [B02] 421 千円 (産総研 ビーム試験技術供与) (「その他」の総額 523 千円)

(3) 最終年度 (平成 30 年度) の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

該当なし。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

【A01】 $0\nu 2\beta$ 探索において、半減期の下限值にして未踏の10の26乗の桁に突入し、縮退構造をほぼ全て排除する感度を達成し、逆階層構造に達する感度の実現見込みをつけた。今後の感度向上による理論モデルの検証に大きな期待がかかるとともに、世界の競合の将来計画に対しても大きな影響を与え、逆階層構造に到達し競争力を持てる計画への修正が進んだ。また、通常二重ベータ崩壊はもはや精密測定域に達し、原子核内の相互作用パラメータを取り出すなど新しい連携が実現している。また、核行列要素の計算精度向上への要求が高まり、大規模な計算機を使った計算や、原子核反応の多方面からの詳細測定など、周辺分野を大いに活気付かせている。 $0\nu 2\beta$ の探索は、欧米の宇宙素粒子・原子核研究分野のトッププライオリティにあげられるようになった。

【A02】 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 探索において、飛躍的に感度を向上させるため同位体濃縮法の開発を行い、電気泳動法を基礎とする新しい手法(MCCCE法)で濃縮度を高め、濃縮度でほぼ100倍の $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比15%を達成した。公募研究「二重ベータ崩壊実験用Ca同位体のレーザー濃縮」では、レーザーを利用した異なる手法でのCa同位体濃縮法開発によって70%以上の高濃縮 ^{48}Ca の生成に成功し、多様な方法でCa同位体濃縮に取り組めるようになった。従来取組であるクラウンエーテルによる化学的分離法も含めて、多様な同位体濃縮技術が開発され、同位体科学分野においても、二重ベータ崩壊核種の同位体分離手法の開発が基礎科学研究進展の鍵であると認知されてきた。今後も同分野の活性化が期待される状況である。他方で、検出器の高分解能を見据え、極低温熱量計検出器開発を国際協働で実施し、世界で初めて CaF_2 の蛍光熱量計としての利用に成功した。この成果により、さらなる国際共同研究の展開が期待できる状況である。

【B01】先行研究(DAMA/LIBRA)の主張する季節変動に対し、より大きな統計量で検証し、統計精度 3σ で否定した。その後、新データが公表されたものの、原子核反跳を対象とした超低バックグラウンド実験(LZ, XENON1T)の結果と総合すると、季節変動は、暗黒物質であったとしても極めて特殊な性質のものと考えられ、今後の暗黒物質研究に大きな影響を与えた。また、Xe二重電子捕獲事象の寿命を世界最高感度で測定し、A班がターゲットとする $0\nu 2\beta$ 事象の原子核行列要素の計算精度向上に有効なデータを提供した。

【B02】領域発足前には原理実証レベルであった、方向感度を持つ暗黒物質探索実験に、低放射能技術を取り入れることで、将来的に暗黒物質の確実な発見や性質の研究を可能とする技術の礎を築くことができた。宇宙・素粒子物理の大問題である、「暗黒物質の正体解明」に向けた大きな一歩である。

【C02】超新星爆発前の超新星前兆ニュートリノを用いたアラームシステムを確立し、全世界に情報を公開している。このアラームシステムは、天文観測や重力波観測グループに大きな影響を与えた。特に、アメリカのLIGOグループは常にアラームを監視し、必要があれば緊急観測を行う体制となり、KamLANDとのホットラインも構築した。

【D01】複数の研究トピックにおいて、「マイクロベクレル」レベルの極低放射能技術の開発に成功し、世界最高感度のニュートリノ観測実験(項目A, 項目)や、宇宙暗黒物質探索実験(項目B)の推進に貢献した。また、次世代のニュートリノ観測実験の設計に重要な放射能分析データを本研究が初めて提供し、世界最先端レベルの研究活動を支援した。極低放射能技術に関しては、これまで国内の各地下実験グループ内で比較的少人数で行われていたが、実験グループの枠を超えて連携するきっかけとなった。

【E01】WIMP暗黒物質の包括的研究においては、本領域の項目Bが行なっている直接探索だけでなく、領域外で行われている間接探索(宇宙線での探索)やコライダーでの探索との相補性を明らかにし、幅広い波及効果を与えた。またインフレーション、レプトジェネシス、ニュートリノ質量、暗黒物質、strong CP問題、クォーク・レプトンの質量階層性といった複数の問題を同時に解決する素粒子模型・シナリオを提案するなど、領域内の幅広い研究対象を含む統一的な理論研究も行なった。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

【A01】期間内に、24名の修士、4名の博士を輩出した。3名の修士専攻賞と1名の博士専攻賞を受賞したほか、3名が国内会議でのポスター賞、1名が国際会議でのポスター賞を受賞した。グループ全体では2015年にブレークスルー賞を受賞した。また学生による94件の国内会議での発表、21件の国際会議での発表がなされた。博士号取得者4名には、東京大学での研究員を経験したのちに中国清華大学でテニユアトラック助教のポストに就いたもの、企業へ就職したものの、学振研究員PDとして京都大学に移ったもの、東北大学で学術研究員を続けているものがある。また、カムランドグループの一員として研究に参画していた助教の1名は准教授に昇格した。

【A02】期間内に大阪大学特任助教として参加した3名の若手研究者が、それぞれ新しい職を得た。1名は福井大学特命助教に着任後、期間内にさらに講師に昇格し、1名が筑波大学のテニユアトラック助教として転出、1名が東京大学宇宙線研究所に特任助教として転出し、新たな研究プロジェクトに参画している。大学院生の学位取得は、期間内に6名の博士、26名の修士を輩出した。

【B01】期間内に5名の博士の学位、12名が修士の学位を取得した。このうち2名が所属機関の賞を受賞し、別にもう1名がポスター賞を受賞しており、高水準での研究・教育が行われたと考えている。また、博士学位取得者2名は、他大学でポスドクの職を得て活躍している。また、本領域のポスドク1名は助教（任期付）に昇進、助教3名のうち2名は他大学での職を得て、1名は精華大学のテニユアトラック助教となった。この1名はA01班の出身者であり、領域内で様々な知識を得た上で、国際的に認知された研究者として成長した若手の好例である。

【B02】大学院生を主体とした若手研究会を全12回開催した。世話人の話合いによって、検出器製作、招待講演、研究発表など多彩な形態の研究会を企画、研究テーマに関する技術的な内容から物理まで幅広く扱い、若手研究者間の交流、研鑽を進めた。また、第3回若手研究会のトピックとして取り上げた「中性子」は、計画研究を横断する研究テーマであることが判明、若手を中心とした共同研究へと発展した。実際に地下実験室での中性子測定を行い、大学院生を筆頭著者とする論文を出版した。地下実験室での中性子測定に関しては、本研究を基盤として、平成31年度より東京大学宇宙線研究所共同利用プログラムとして採択され、継続的研究へと発展した。期間内に修士17名、博士5名を輩出した。分担者の2名は特任助教から講師、講師から准教授へとそれぞれ昇進した。

【C01】C02班と共同で、学生、若手研究者育成のため、毎年超新星ニュートリノ研究会を開催した。また、2015年11月には、国際支援班の支援の下に、ニュートリノ反応国際スクールを開催（42名参加、海外半数）した。国際交流協定締結のフランス、インドからの修士研究学生(Internship)を4名受け入れた。これらの学生は、領域外ではあるが博士課程に進学している。国際支援班のおかげで海外から2名博士課程に入学、修了し、研究者（1名テニユア職）を続けている。海外からのポスドクも3名雇用し、テニユア職、研究員継続、会社就職へと進んだ。日本人博士2名は、学位取得後に会社就職（1名は研究職）した。国際交流協定による研究留学生は本年度も2名あり、継続している。

【C02】2名の学生が東京大学理学系研究科研究奨励賞を受賞した。博士課程を修了した1名は、学振海外PDとしてボン大で活躍している。

【D01】若手の博士研究員2名が、D01班での研究活動終了後、それぞれ他研究機関の特任研究員(任期付き)として研究活動を続けた。そのうち1名は、2019年4月からは、特命助教(任期付き)として教育・研究活動を行っている。

【E01】雇用した外国人博士研究員2名が、それぞれ出身国でテニユア職に就いた。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班評価者（外部）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，宇宙物理学 】

宇宙線の影響を低減できる地下においても、二重ベータ崩壊や暗黒物質、ニュートリノの観測を目指す素粒子原子核実験に対する放射性バックグラウンド(BG)は、観測の成否を決定する深刻な障害になっており、その克服はこれらの実験にとって共通の課題である。そのため、本領域においては、目的の異なる複数の実験であっても密接な協力関係を築くことができ、BGの低減につながった多くの成果が、各実験の大幅な感度向上に生かされた。協力関係が広がったことによる人材交流の活発化や、若手研究者の育成も含め、新学術領域として連携して研究を進めた意義は大きかったといえる。

各実験グループの成果についてはここでは繰り返さないが、KamLAND-Zen 実験でニュートリノのマヨラナ有効質量の探索領域の目標を達成し、Super-Kamiokande にガドリニウムを導入するための放射線不純物低減条件をクリアするなど、多くの項目で当初目標を達成している。関連する理論研究においても多くの論文が発表されており、公募研究においても極低BG技術や理論的研究において多くの進展が見られた。

参加している大型実験は、その多くが国際共同研究として進められてきたが、キセノンを用いた暗黒物質探索実験グループが欧州を中心とした XENONnT 実験への参加を決めるなど、さらに国際的にみて競争力のある研究へと発展している点も注目される。

【 神田 展行（大阪市立大学・理学研究科・教授），専門：重力波実験物理学，宇宙物理学 】

新しい学術領域としての発展性、創発性が現れた部分として、C班、D班の研究成果を高く評価したい。C02班は超新星爆発からの前兆ニュートリノについてのアラーム配信を構築した。このアラームをもって重力波や γ 線バーストといった観測と実際に探索体制を形成し、マルチメッセンジャー観測に研究を結びつけた。C01班の超新星背景ニュートリノの観測と合わせて、天体起源ニュートリノ観測における新しい貢献が期待できる進展である。D01班における低不純物資料の作成、分析、データベース化といった成果は、ややもすれば地道な課題だが、領域として推進したことで、それぞれが独立・個別に研究した以上の成果を発揮したという印象を得た。D班関連の公募研究も同じく領域によく貢献したと思われる。単にすぐれた計画研究を集めたものではなく、領域の創発的な成果が得られたと思われる。

一方計画研究個別の成果でも、A班のニュートリノのマヨラナ性の研究は、 $0\nu 2\beta$ の探索において、KamLAND-Zen、CANDLESともにインパクトのある結果（下限値、Caでの世界最高感度）を更新した。またB01班でも世界最高感度の α 線検出器を開発、B02班も低BGのガス検出器で1桁改良するなど、着実な成果が得られた。E班は理論研究として非常に多くの論文業績を残した。これらのことは、サイエンスにおいて本新学術領域が国際的にも優れたものであったことを示している。また他の新学術領域と合同の研究会を開くなど、領域間の研究交流を行ったことも良かった点として評価したい。

【 塩澤 真人（東京大学・宇宙線研究所・教授），専門：宇宙素粒子物理学 】

ニュートリノのマヨナラ性と暗黒物質の正体は、宇宙の進化史を理解するうえで中心的な役割を果たすと期待されている。また両者への実験的アプローチは、放射性低BGの理解と低減という共通の課題を持つ。このような科学的課題と技術的課題を共有した計画研究を結集し、連携させる本新学術領域の意義は大きい。A01班はニュートリノによる宇宙の物質数生成の必要条件となるニュートリノのマヨナラ性を検証する「ニュートリノ放出を伴わない二重 β 崩壊現象の探索」を推進し、二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe を用いてニュートリノ質量の縮退構造シナリオを棄却することに成功した。さらに実験の拡張により、今後逆階層構造シナリオ領域の検証に到達するという目標感度に到達しており、世界を先導する成果を上げていることは高い評価ができる。またA02班により、相補的な実験アプローチとなる、二重ベータ崩壊核 ^{48}Ca の濃縮技術開発にも大きな進展が得られたことも重要である。目標とする数meV領域の感度到達に向けて、今後の進展に

期待したい。研究項目 B による暗黒物質の直接探索もあわせ、今後さらなる技術開発による実験感度の飛躍的向上が期待できる分野であると言える。発見に到達するまで、さらなる挑戦を続けて欲しい。

総括班 進捗担当による評価

【 柳田 勉 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授), 専門:素粒子物理学 】

本新学術領域研究(研究領域提案型)「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」はこの5年間の間に目覚ましい成果を上げ世界でも注目を浴びる学術研究となっている。いくつかの研究成果の中で、特に、ニュートリノを伴わない二重β崩壊の研究計画はこの5年間で、その成果において世界のトップの座に君臨した。しかも、将来においても世界をリードし続けると考えられている。将来、この二重β崩壊が観測されると、それは単にニュートリノの質量がマヨラナ型であることの証明になるだけでなく、宇宙のバリオン数の起源を解き明かす大きな原動力になる。この研究計画の意義は計り知れないほど偉大なものである。

【 鈴木 洋一郎 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授), 専門:天体素粒子物理学 】

本研究では、二重β崩壊探索に於いて世界最高感度を達成し近い将来の発見への期待を高めた。また、暗黒物質探索の多様な実験技術の開発にも成功している。本研究のバックボーンともいえるべき、低放射線技術の開発では、高感度なラドン分析装置、表面α粒子解析装置など、世界的にもユニークな開発が行われた。また、低放射線技術のデータベースも完成している、世界をリードする高い技術基盤を作り上げたといえる。これらは日本のお家芸でもあり、世界最先端を維持・発展させるものである。日本の「科学力」の減退が指摘される今日ではあるが、本研究で得られた成果、高い技術力を、日本発の実験に生かし、世界をさらにリードしてほしい。また、今後も、世界に伍する人材排出を期待する。

【 中畑 雅行 (東京大学・宇宙線研究所・教授), 専門:宇宙素粒子物理学 】

本新学術領域ではD班が低BG実験のベースとなる技術を開発し、それをベースとしてニュートリノのマヨラナ性の研究、暗黒物質の探索、超新星ニュートリノの研究などが進められ、宇宙の初期から現在までの歴史を紐解く研究が非常に良く連携して進められてきた。ニュートリノのマヨラナ性の研究においては ^{136}Xe の $0\nu2\beta$ 崩壊半減期の下限値 1.07×10^{26} 年を達成し世界をリードする結果を出すとともにキセノン量も倍に増やし有効体積も倍にすることに成功している。また、将来の高感度 $0\nu2\beta$ 崩壊実験を目指して ^{48}Ca を効率よく濃縮する方法の開発にも成功している。暗黒物質の研究においては、季節変動によって暗黒物質の存在を主張する先行実験の結果に対して、同じ季節変動の手法を使って否定する結果を得ている。また、検出器の低BG化をおこない、特に約1桁BGを低減した光電子増倍管の開発に成功している。超新星ニュートリノ観測においては、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)を溶かし、宇宙初期からの超新星ニュートリノを探るために必要とされる極低BG硫酸ガドリニウムの製造に成功し、SK-Gdを実現させる道筋を作った。本領域では、D班の極低放射能技術に関する研究会、領域全体の研究会、本領域の物理テーマを包括する理論班による研究会など、非常の多くの研究会によって参加研究者間の連携が密にとられてきた。

【 岸本 忠史 (大阪大学・核物理研究センター・教授), 専門:素粒子核物理学 】

本研究領域では「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」のサブタイトルが的確に表現する研究が世界最高のレベルで推進されてきた。 $0\nu2\beta$ の観測は宇宙の物質の起源を解明する鍵で、世界中で実験が進められている。激しい競争のなかで世界最高感度を達成したことは特筆すべき成果である。また次世代の計測技術の研究開発が進められ、今後世界をリードすることが期待できる結果が得られている。宇宙の質量の起源を解明する暗黒物質の観測にも大きな進展があり、国際的な共同研究に発展している。神岡を中心に地下素粒子核実験で極低BG計測技術の共同研究体制を組んだことで、効率的な技術開発が進み、各計画研究の迅速な進展に寄与しただけでなく、コミュニティも発展させた。星からのニュートリノなどの現在の宇宙からの信号の観測も進んだ。理論の発展と組み合わせることで広く宇宙の歴史の解明に貢献した。