

領域略称名：地下素核研究

領域番号：2603

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) 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

平成28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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究の進展状況	8
3. 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	11
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	20
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	22
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	23
9. 総括班評価者による評価	24
10. 今後の研究領域の推進方策	26

研究組織 (総括：総括班, 支援：国際活動支援班, 計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公募：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 計画	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
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 考太	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 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 秀明	福井大学・工学研究科・教授	1
B01 公募	15H01038 気相2相型 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・理工学術院・准教授	1
B02 公募	15H01034 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 知也	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	15H01036 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

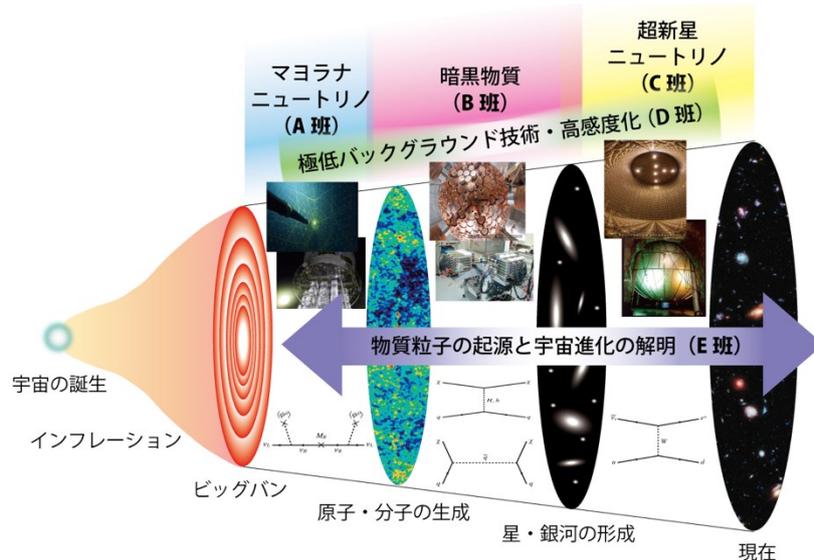
	の半減期測定				
E01 公募	15H01030 「京」コンピュータによる暗黒物質の位相空間分布に関する研究	平成27年度～ 平成28年度	石山 智明	千葉大学・統合情報センター・准教授	1
E01 公募	15H01031 レプトン数の破れから探る宇宙バリオン数生成機構の解明	平成27年度～ 平成28年度	浅賀 岳彦	新潟大学・自然科学系・准教授	2
E01 公募	15H01037 ニュートリノで探る標準模型を超える新しい物理	平成27年度～ 平成28年度	波場 直之	島根大学・総合理工学部・教授	1
公募研究 計 12 件					

研究領域全体に係る事項

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（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発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、ニュートリノレス二重 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)。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)。

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)。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)。

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)。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)。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)。

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)。

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, B01)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, B02)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)、さらに詳細観測を逃さず実現する体制を整備(C02)しておくことが必要である。

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には、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、A-Cを串刺しする理論研究E01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、0v2β・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、0v2β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. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（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、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。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、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

計画研究 A01

研究目的：「ニュートリノと反ニュートリノは同一粒子なのか？」という宇宙・素粒子の大問題にあげられる謎の解決のために、唯一現実的と考えられている「ニュートリノレス二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) の探索」を行う。KamLAND-Zen の拡張性を生かし、二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe を倍増させ極低放射能を追求することで、期間内に縮退構造をカバーする感度（マヨラナ有効質量で 60meV）を世界に先駆けて達成し、期間終了後には逆階層構造に切り込む感度での観測を開始する。さらに将来の高感度化のためにエネルギー分解能を向上するための技術開発、またバックグラウンド(BG)低減のための革新技术の開発を行う。

研究の進展：主要な BG であった $^{110\text{m}}\text{Ag}$ を純化によって問題にならないレベルにまで低減することに成功し、解析方法も改善することで、 ^{136}Xe の $0\nu 2\beta$ 半減期に対して 1.1×10^{26} 年以上 (90%信頼度) という未踏の桁に突入する制限をつけることに成功した。これはマヨラナ有効質量に対して縮退構造をほぼカバーする 60 ~ 161meV 以下という制限に相当しており、世界の競合を5年は先んじる成果であるとともに、当初の目標を大幅に前倒して達成できた。また、 ^{136}Xe 倍増のための準備も順調に進んでおり、平成 28 年度に導入できる予定である。技術開発においても、エネルギー分解能を改善するための開発として目標の4倍を上回る4.8倍に相当する光収集量の向上を、集光ミラー、高光収率液体シンチレータ、高量子効率光電子増倍管の開発を合わせて達成しており、革新的な開発においても発光フィルムでの小型バルーンの試作や30Lでの高感度撮像に成功しており、順調な進捗状況である。

計画研究 A02

研究目的：二重ベータ崩壊核の中で最も高いQ値をもち将来最も低BGが期待できる ^{48}Ca に注目して $0\nu 2\beta$ の研究を推進する。特に ^{48}Ca 同位体濃縮の実用化と、高分解能蛍光熱量検出器の開発を実現する。CANDLES III (UG) 装置を用いて、高感度化に向けたBG調査を進め、数 meV の感度でのマヨラナ性検証を視野に入れた $0\nu 2\beta$ 観測実験へと成長することを目指す。

研究の進展：(CANDLESIII) 中性子線源を用いた測定とシミュレーションにより、岩盤や検出器のステンレス材が環境中性子を捕獲して放出する γ 線が主要 BG であることを特定し、遮蔽システム的设计・構築を実施した。環境中性子束の正確な測定のため、計画班を越えた連携 (B02, D01 など) で研究を展開している。(濃縮) ^{48}Ca (自然存在比 0.19%) の濃縮技術開発において、多チャンネル向流電気泳動法 (MCCCE) で大きな濃縮度が得られることを見出し、スケールアップを進めている。(蛍光熱量検出器開発)： B02, D01 の協力で、低 BG 仕様の希釈冷凍機を利用し検出器開発を進めている。検出器本体の熱伝導や共振周波数分析を行い CaF_2 結晶やホルダー等の設計・製作が終了した。宇宙暗黒物質の直接探索への利用も視野に入れ、熱センサーの実装と希釈冷凍機の運転準備中である。

計画研究 B01

研究目的：暗黒物質探索装置 XMASS を使い、暗黒物質の探索、低 BG 技術の検証・開発、それに基づく次世代装置の開発を行う。暗黒物質研究では、DAMA/LIBRA 実験がその証拠となる季節変動の発見を強く主張する一方、他実験は否定している。また、CDMS II-Si 実験は別の示唆をしている。決定打が渴望される中、原子核散乱に限らず電子散乱も含めた広い探索が重要である。また、100GeV 暗黒物質に対して 10^{-46} cm^2 の感度を持つ次世代の極低 BG 装置の開発・研究も推進する。

研究の進展：XMASS は DAMA/LIBRA 同様に電子散乱・原子核散乱の双方に感度を持つ。彼らに匹敵する 2015

年までに収集した大統計量での季節変動解析では、電子散乱を含めて初めて DAMA/LIBRA 領域のほとんどを排除することに成功した。閾値を下げることに成功したため、さらなる大統計での検証を極めて順調に進めている。この他、標準的な暗黒物質に対し、散乱断面積 $1.60 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ (@100GeV) の制限を付けることに成功した。また、電磁相互作用する Super-WIMPs と呼ばれる暗黒物質では、特にベクトル型に対して熱的生成による暗黒物質シナリオを完全に排除することに成功した。また、新型光電子増倍管の低 BG 化が順調に進んでいるほか、表面 α 線検出器を使った製法による無酸素銅中の放射性元素含有量への影響を評価し、次世代装置の極低 BG 化を順調に進めている。

計画研究 B02

研究目的：暗黒物質の決定的な証拠となる方向に感度を持つ暗黒物質研究の基礎研究を行う。これまで、原理実証が進んでおり、本格的な研究に向けた低 BG 化が急務である。実績のある μ -PIC の低 BG 化を主軸に、スピンに依存しない暗黒物質探索実験と原子核乾板を使用した大質量検出器の開発を総合的に進める。主要な放射性 BG 源の同定・定量化が最初の目標であり、その後、低 BG 代替材料を選択し、低 BG 材料を用いた検出器の製作・性能評価へと研究を進める。最終目標は、方向に感度を持った暗黒物質探索を実施し、これまでの制限を一桁以上更新することである。

研究の進展：平成 27 年度までの研究で、ガス検出器、原子核乾板を用いた手法ともに、検出器内の放射性物質の定量評価、代替材料の選択、低 BG 検出器の試作が実現し、予定通り研究が進展している。さらに、B02 主催の若手研究会を通じて、地下環境での中性子 BG 測定が領域全体に資する重要な測定と分かった。分担者の田中を中心に計画研究の枠を超えた連携を構築、中性子 BG の測定、体系的な理解へ向けた研究を開始した。平成 28 年度以降には当初の予定以上の研究として地下実験環境で測定を実施する。

計画研究 C01

研究目的：スーパーカミオカンデ(SK)を用いて超新星背景ニュートリノ(SRN)を発見するために、遅延同時計測の効率を高めるガドリニウムを添加する SK-Gd 計画に対し、必須となる低放射能技術を開発する。また、超新星爆発(SN)ニュートリノ検出の改良(SN モニター開発、Gd 熱中性子捕獲 γ 線の詳細解析、ニュートリノ反応での γ 生成解析)も行う。さらに、SRN 観測結果から超新星頻度を導出するために、重元素量の宇宙進化・星の質量分布などの理論研究を進める。

研究の進展：SK でのニュートリノ電子散乱は、10kpc の超新星爆発に対して $5\text{-}6^\circ$ の方向精度を持つことを示した。**(低放射能技術開発)**また、低放射能技術に関しては、まず放射性娘核のラジウムに注目しイオン交換樹脂の開発を始め、昨年度までにラジウム濃度に対する測定精度約 0.1mBq/m^3 のイオン交換樹脂試験装置を構築した。試験したイオン交換樹脂は放射性不純物を多く含んでいたものの、比較的高濃度のラジウム水に対して 99.9%以上のラジウムを除去することを確認した。イオン交換樹脂の低放射性不純物化を D 班と連携して実施している。**(SN ニュートリノ検出の改良)**Gd 熱中性子捕獲 γ 線の詳細測定を JPARC 熱中性子ビームで実施し、これまでの Geant4 に組み込みのデータでは不十分であることを見出した。**(SRN の理論研究)**星形成率の進化モデル・宇宙の金属量進化が SRN に与える影響を調べ、宇宙進化を考慮した SRN エネルギースペクトルを得た。その中で、星形成率密度の影響は低エネルギー成分に現れ、衝撃波復活時間と状態方程式の影響は高エネルギー成分に現れることがわかった。計算された SRN の予想スペクトルや、数値シミュレーションに必要な状態方程式に対して、データベースを作成・公開した。これらの進展をもとに、2015 年 SK 共同実験は SK-Gd 計画を承認した。

計画研究 C02

研究目的：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、超新星元素合成の詳細を解明して、宇宙

の歴史で重要な重元素の起源を解明する。そのために、神岡で稼働する3台のニュートリノ検出器 (SK, KamLAND 及び XMASS) で近傍超新星に備える。また、超新星爆発以外の天体 ν 観測も継続する。

研究の進展：近傍超新星に備えたデータ取得系強化、及び相互連携の強化は順調に進んでいる。また、KamLAND では前兆 ν を用いた爆発前超新星アラームを実現し、本新学術領域の枠を超えて広く世界に情報を提供している。さらに、アラーム精度を向上させるために最新の恒星進化モデルと原子核反応テーブルを用いて前兆 ν モデルを一新した。 γ 線バーストや重力波に相関を持つ ν 探索などを行い、 ν 輝度に制限を与えた。今後は、当初計画を超えて世界中の重力波検出器とニュートリノ検出器による統合解析を進めることを予定する。

また、C01 と協力して超新星ニュートリノ研究会を主催している。公募研究採択者との情報交換やチュートリアル講演による新規研究者(主に大学院修士課程学生)への教育を行っている。

計画研究 D01

研究目的：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 BG 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。

研究の進展：(a) NaI(Tl) 検出器結晶の高純度化で、約 $29 \mu\text{Bq/kg}$ への ^{210}Pb 低減を実現した。純水中の高感度 Rn 濃度測定では、活性炭によるラドン(Rn)濃縮の系統誤差低減手法を開発し、SK 水で $0.4 \mu\text{Bq/kg}$ の測定を行った(C01 と共同)。キセノン中の Rn を、これまでの 1000 倍吸着する素材を新たに発見した。(b) 平成 27 年度から、神岡坑内で各種分析装置開発のためのスペースの共同利用が開始され、Rn 用分析装置、結晶中不純物分析装置(A02 と共同)、 μ -PIC による表面 α 線検出器 (B02 と共同)の構築と研究開発が進行中である。(c) 極低放射能技術に関する研究会を毎年主催しており、実験系の全ての関係者が集まる重要な機会となっている。(d) 既存の海外の放射能データベース (radiopurity.org) の開発者と情報交換を行い、本新学術研究用の放射能データベースの構築を進めた。既存スクリプトの神岡向けの修正とデータベースの基本構造の決定を行い、神戸大学内に試験サーバーを設置し、試験運用を開始した。

計画研究 E01

研究目的：LHC 実験でのヒッグス粒子発見で、素粒子の標準理論はほぼ確立したといえる。しかし自然界には標準理論では説明困難な現象が数多くあり、標準理論を超える物理は必須と思われる。本理論研究計画では、(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つの現象を素粒子の標準理論を超える重要なヒントと考え、領域内の実験・観測結果を踏まえ、標準理論を超える新しい理論を構築し、それを将来の実験や観測で検証する方法を考案する。研究代表者の柳田は、上記(a, b)の基礎となる2つの業績、シーソー機構とレプトジェネシス機構の生みの親であり、現在もこの分野で多くの研究業績を挙げている。物質粒子の起源と宇宙進化の解明に挑む最強の理論チームといえるメンバーを揃え、領域内のA-C班との密接な連携によって、新たな素粒子・宇宙像に迫る研究を行う。

研究の進展：本研究が挑む(a-c)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い、数多くの業績を挙げてきた。特に、A班がターゲットとする $0\nu 2\beta$ や B班がターゲットとする暗黒物質直接探索に予言や示唆を与える理論的成果も得られた。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、メンバーによる国際会議での発表やアウトリーチなど、研究成果の情報発信も着実に進んでいる。

3. 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（2ページ以内）

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は無し。

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、総括班メンバーで総括班会議を年4回程度行い、領域全体の連携、支援を行っている（これまでに8回開催）。これに加え、領域では、実験系の研究代表者を中心に、運営会議をおよそ1カ月に1回程度（総括班会議がある月は総括班会議を持って兼ねる）開催している。この運営会議はこれまでに10回開催され、各実験グループ内での実験の進捗ばかりでなく、実験上の問題点、それに対する解決法等が議論されている。議論の中には、通常はコラボレーションの外に出ることはないレベルの事項の報告なども含まれ、活発な議論が行われている。また、総括班会議、運営会議は、各実験の代表者が出席して頻繁に行われているため、大学院生主催の若手研究会の開催の提案などに対しても速やかに対応することが出来た。今後も、このような体制を維持し、地下素粒子原子核研究コミュニティを形成するように運営する。

また、総括班の年齢バランスの良さがあげられていた。計画研究 B02 代表の身内は総括班中の若手研究者として計画研究 B02 主催の若手研究会を企画し、平成 26、27 年度に計 5 回の研究会を開催した。第 2 回以降は大学院生に計画・運営の主体を移して若手育成を進めている。また、単なる計画研究 B02 若手の育成の場にとどまらず、領域全体からの参加者を募り、横のつながりを通じて、次世代の研究者間の切磋琢磨を促進も狙った。この狙いは徐々に功を奏し始めており、平成 27 年度には、計画研究 A の大学院生主催の若手研究会が企画され、平成 28 年度には、計画研究 A, B 合同の若手研究会が開催されるなど着実に横のつながりが生み出されている。また、第三回若手研究会では、テーマの一つに「中性子バックグラウンド」を設定し、領域内外の専門家による招待講演を企画した。この結果、本領域の「低バックグラウンド技術」において、領域発足時には検出器材料の測定や純化などに焦点を絞っていたが、これらが達成された暁には、中性子 BG 対策が必要になる（A02 では現状の主要な BG である。）ということが判明した。地下実験環境での中性子 BG 測定は、10 年前に行われて以来更新されておらず、その系統誤差も明確でないことが、実際に測定を行った招待講師の説明により判明した。これを機に、若手研究会発の領域内連携を発足させ、計画研究 B02 分担者の田中を中心にした地下実験環境における中性子測定の協力体制を構築した。平成 27 年度の終わりの日本物理学会では、関連講演を 6 件発表、領域外の研究者からの問い合わせや協力依頼などの打診などもあり、計画研究の枠、さらには新学術研究領域の枠を超えた研究の礎となった。今後の若手研究会の運営についても、運営主体は大学院生としながらも質を高めるための議論を行い、領域全体の活性化に寄与していきたい。

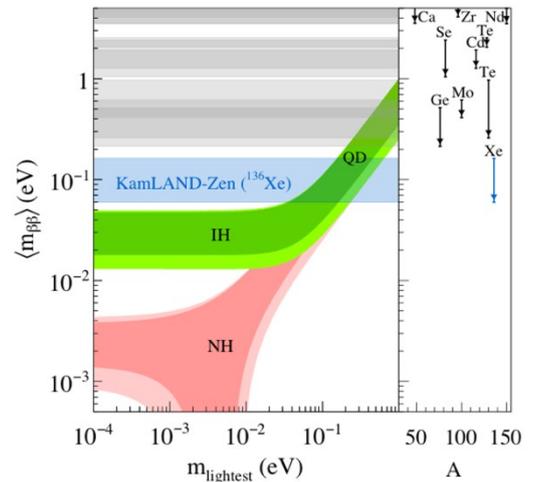
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（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

B01 との連携で放射性不純物 (^{110m}Ag) の大幅低減に成功し、 ^{136}Xe の $0\nu 2\beta$ 探索に対して、史上最大の $504\text{kg}\cdot\text{年}$ という探索を実施した。その結果 $0\nu 2\beta$ 半減期に対する下限値として KamLAND-Zen 自身の感度を約 5 倍更新する 1.1×10^{26} 年（90% 信頼度）を得た。これは未踏の桁に達する感度であり、他実験の到達感度を大幅に凌ぎ、世界の探索実験の将来計画に大きく影響する。マヨラナ有効質量への換算では $60 \sim 161\text{meV}$ 以下となる。目標としていたニュートリノ質量の縮退構造（右図の QD）のカバーを、予定を大幅に前倒して達成し、逆階層構造（IH）への到達を現実的にした。



計画研究 A02

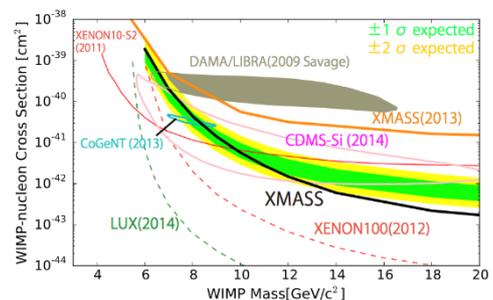
主要な BG を環境中性子捕獲反応による高エネルギー γ 線と同定し、その低減のための遮蔽システムを構築した。また、 ^{48}Ca 同位体濃縮において、微量なら高速高濃縮率が可能なキャピラリー電気泳動法と、濃縮度は低いが大量に扱える向流電気泳動法のメリットを合わせた新しい濃縮技術「多チャンネル向流電気泳動法」を開発し、少量ながら ^{48}Ca 濃度にして 6 倍の濃縮度を達成、原理検証に成功した。蛍光熱量検出器の開発では、熱伝導計算や共振周波数分析、BG シミュレーションなどから CaF_2 結晶やホルダー等の設計・製作を行い、希釈冷凍機の整備も行う事で原理検証実験の準備が整った。

計画研究 B01

(1) DAMA/LIBRA が暗黒物質発見を主張するパラメータ領域をほぼ否定する結果を発表した。電子散乱も含めて季節変動を大統計で検証したという点で、DAMA/LIBRA 実験に対する最も強力な追試である。

(2) ^{124}Xe , ^{126}Xe の二重電子捕獲事象に対し、寿命下限値を 4.7×10^{21} 年、 4.3×10^{21} 年に更新し、特に ^{124}Xe について複数の理論モデルを排除した。

(3) Bosonic Super-WIMPs 暗黒物質に対して、最も厳しい制限を課した。特にベクトル型 Super-WIMPs に対し、宇宙初期の熱的生成モデルの排除に成功し、Editors' suggestion に選ばれた。(PRL 133 (2014) 121301-1)



計画研究 B02

ガス検出器、原子核乾板を用いた手法ともに、検出器内の放射性物質の定量評価、代替材料の選択、低 BG 検出器の製作を達成した。ガス検出器 μ -PIC の材料では、現行機の放射性不純物量を測定して主要な BG 源を特定、1/100 の不純物の代替材料を見出した。平成 27 年度には代替材料で低 BG μ -PIC の試作機 (10 cm 角) を製作、動作確認を行った。原子核乾板実験でも、乾板素材中の放射性不純物量を測定して中性子 BG の見積もりを行い、地下実験の提案とした。

計画研究 C01

SKの低エネルギー事象観測で最も問題となるラジウム(Ra)に対して、Gd水溶液にも適用できるRa除去試験装置(右写真)を開発した。装置は、1トンの純水または硫酸Gd水溶液を用い、樹脂に通水した場合としない場合のRa濃度を測定する。Ra濃度の測定には娘核であるRnを高性能Rn検出器で測定する。純水中Ra濃度測定はD班で確立された方法であり、D班と協力してGd水溶液にも対応する新しい装置を作成しRa濃度を約 0.1mBq/m^3 の精度で測定することに成功した。



計画研究 C02

近傍超新星爆発に備えたデータ取得系の強化を進め、SKとKamLANDではハードウェアの機能強化を終え、ソフトウェアの導入中である。また、KamLANDでは超新星前兆 ν に対する感度を定量的に評価し、爆発前アラームシステムを実現した。さらに、アラームを高精度化するために最新の恒星進化理論に基づき前兆 ν モデルを独自開発した。また、通常の重力崩壊型だけでなく電子捕獲型超新星爆発での前兆 ν 輝度を評価した。XMASSでは中性カレントコヒーレント散乱による超新星 ν 探索の可能性を定量的にまとめた。さらに、 γ 線バーストや重力波と相関を持つ ν 探索を行い、各天体現象での ν 輝度に制限を与えた。

計画研究 D01

(1)極微量放射性不純物の除去技術により、DAMA/LIBRAの世界最高感度のNaI(Tl)と同等の高純度NaI(Tl)検出器の試作に成功した。(2)高感度80L Rn検出器を開発・校正した。(3)神岡での放射能データベース整備のために、神岡坑内の各地点における環境Rnモニターの整備を行っており、新システムをA01, A02に提供して、神岡地下の各実験エリアの環境Rn濃度を統一的に測定できるようした。(4)地下実験における極低放射能技術に関する研究会を毎年開催し、実験系の全ての計画研究と公募研究からの研究報告を行うことで、実験系の全ての関係者が集まる機会となっている。(5)各実験のノウハウを結集し極低放射能技術の開発を行うための共同利用スペースの使用が平成27年より実現し、神岡坑内での低放射能技術開発を連携して進める体制が整った。

計画研究 E01

柳田はクォークやレプトンの質量行列に対して予言能力を持つ理論の構築を行った。Occam's Razorを使う理論がクォークの質量行列を無矛盾に再現できるのみならず、Cabibbo角を見事に説明できることを発見した。このOccam's Razorアプローチをさらにレプトンの質量行列に応用して、ニュートリノ振動に現れるCP対称性を破る位相が $+90$ 度または -90 度に予言できることを示した。この -90 度は最近のニュートリノ振動実験から示唆されている値である。この理論ではもう一つのCP位相が存在し、その位相こそが宇宙のバリオン非対称性を生成する位相である。この重要な位相は、将来のニュートリノ振動や $0\nu 2\beta$ の精密測定で決定できることが分かった。松本は暗黒物質について、特にWIMPがフェルミオンの場合に注目して、包括的に現状及び将来における検出可能性を明らかにする研究を進めている。特に直接探索の果たす役割を明らかにし、領域研究会での発表(平成26年8月の国内研究会および平成28年5月の国際研究会)などでB01班、B02班への情報提供を行った。

公募研究

A01「高圧液体キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索の基礎研究」: 高圧用プラスチックシンチレータ容器を開発し

4. 4MPa の高圧液体キセノンを導入することに成功した。また放射性不純物量に対して、表面の希酸洗浄でU/Thとも検出限度(5ppt)以下までの低減に成功した。

A02「原子核行列要素の方法による不一致問題の解決」: $0\nu 2\beta$ 測定でのニュートリノ質量の決定に必要な原子核行列要素の不定性改善のため、準粒子乱雑位相近似と殻模型の詳細比較を開始し、陽子と中性子両方を含む二粒子・二空孔成分の重要性が明らかになった。

A02「二重ベータ崩壊実験用Ca同位体のレーザー濃縮」: Caの原子ビームに ^{40}Ca に同調した選択励起用半導体レーザー光とイオン化用YAGレーザー第2高調波光を同軸照射し、2倍程度の濃縮を確認した。一方で、非共鳴的なイオン化では高濃度と高イオン化効率を両立できないと判明し、波長可変レーザー等を用いた共鳴的なイオン化で濃縮性能を改善することを考案した。

B01「気相2相型Ar光検出器の開発と高感度化」: 極低温下で128nm蛍光を直接検出可能なSiPMを浜松ホトニクス社と共同開発し、最大で約12%のPDEを達成した。また、真空断熱容器を200Lに増強しPMTも多チャンネル化することで3次元発光位置決定が可能なことを示した。

B02「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」: 高圧キセノンガス中での電離電子・イオンの再結合が、荷電粒子の方向とガスに印加した電場の方向によって変化するかを評価するための、紫外光用APDをキセノンガスチェンバーに組み込んだ装置を製作した。

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」: 超新星爆発の3次元計算により、高速自転する親星では、ニュートリノ信号から回転周期が分かることを初めて明確に指摘した。

D01「メタルスカベンジャーによる極低放射能技術の開発」: 放射性重金属の吸着にメタルスカベンジャーを適用し、最大約95%の除去を確認した。実機で必要となるカラムプロセスも小型の装置で構築した。

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」: ポリスチレン(PS)ベースの蛍光Filmにおいて発光量10000光子/MeV, 時定数10nsecと理想的な性能を得た。 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶と組み合わせ、発光波形による表面BG除去原理の検証を行い、高い識別効率を確認した。

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」: タンタル180mの半減期を、低バックグラウンドゲルマニウム半導体検出器を用いて測定し、半減期 10^{17} 年以上(予備結果)という世界で最も厳しい下限値を得た。

E01「「京」コンピュータによる暗黒物質の位相空間分布に関する研究」: 小スケールの原始暗黒物質ハローは、質量比の大きい合体では、暴走的緩和で構造が大きく変化する。合体したものは、していないものと比べ密度プロファイルの冪が有意に浅くなることを明らかにした。

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」: 右巻きニュートリノが引き起こすレプトン数を破る反応「電子+電子 \rightarrow W+W」に着目し、右巻きニュートリノ数を3つ以上にすると、 $0\nu 2\beta$ からの制限を回避でき、ILC, CLICなどの将来実験で検証可能性がある事を指摘した。

E01「ニュートリノで探る標準模型を超える新しい物理」: 二段階のシーソー機構により、新たなスケールパラメータを導入せずに、自然な形でインバース・シーソー機構を実現できることを示し、その場合、レゾナント・レプトジェネシスがはたらき、宇宙のバリオン数生成が起き得ることを示した。

5. 研究成果の公表の状況（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。

総括班 X00

○主催シンポジウム

2016/5/11-13, International symposium on “Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research”, Koshiba-hall, Tokyo, Japan, 143 名

2015/5/15-17, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」第二回研究会, 神戸大学, 113 名

2014/8/23-24, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」第一回研究会, 大阪大学, 134 名

○合同研究会

2015/7/24-25, 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明かす宇宙と天体」, 東北大学, 約 50 名

○共催スクール

2015/11/8-14, NuSTEC-15 ニュートリノ原子核反応国際スクール, 岡山大学, 42 名

○アウトリーチ

パンフレット 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」, 2016 年 2 月発行, 3000 部

○ホームページ <http://www.lowbg.org/ugnd/>

計画研究 A01

○論文発表（査読有 8 件、無 2 件）

▲K. Asakura, A. Gando, Y. Gando (3 番目), …, K. Inoue (7 番目), …, M. Koga (11 番目), …, K. Nakamura (15 番目), …, I. Shimizu (19 番目), Y. Shirahata, J. Shirai (21 番目), …, K. Ueshima (25 番目), H. Watamabe (26 番目), … (計 38 名), “Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen experiment”, Nuclear Physics A946 (2016) 171-181, doi:10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011 (査読有)

○国際会議発表（39 件）国内学会（102 件）

K. Inoue (招待講演), “Neutrino mass measurements (double beta) Asia”, Third International Meeting for Large Neutrino Infrastructures, 31 May 2016, Kobayashi hall, KEK, Tsukuba, Japan

K. Inoue (基調講演), “New result of KamLAND-Zen”, International symposium on “revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research”, 11 May 2016, Tokyo, Japan

I. Shimizu (招待講演), “KamLAND”, Neutrino Telescope 2015, 5 March 2015, Venice, Italy

Y. Gando (招待講演), “Latest results from KamLAND-Zen second phase”, ICHEP2014, 3 July 2014, Valencia, Spain

○アウトリーチ（14 件）

井上邦雄, “ニュートリノと宇宙”, 2016/5/19, 古川黎明高校, 1011 名

井上邦雄, “極微のニュートリノが作る極大の宇宙”, 2016/3/13, 徳島大学けやきホール, 30 名

井上邦雄, “ニュートリノって何がすごい！？”, 2016/1/24, 仙台市天文台, 100 名

○メディア等による発信 (16 件)

NHK ラジオ「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

○研究会開催

2016/2/23-24, 第一回 A 班主催若手研究会, 大阪大学, 21 名

計画研究 A02

○論文発表 (7 件)

▲K. Nakajima, T. Iida, T. Kishimoto 他全 25 名 (連携研究者 7 名含む), “Low background techniques in CANDLES”, AIP Conference Proceedings, 1672, (2015) 110004.

T. Maeda, ..., T. Kishimoto (連携研究者 9 名含む全 31 名中 11 番目), “The CANDLES Trigger System for the Study of Double Beta Decay of ^{48}Ca ”, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 62, No. 3, (2015) 1128-1134.

◎▲T. Kishimoto, K. Matsuoka, T. Fukumoto and S. Umehara, “Calcium isotope enrichment by means of multi-channel counter-current electrophoresis for the study of particle and nuclear physics”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 033D03.

○国際会議発表 (口頭発表 15 件、ポスター発表 13 件) 国内学会 (口頭発表 61 件、ポスター発表 11 件)

T. Kishimoto, “Development of a new ^{48}Ca enrichment method and the CANDLES experiment for the study of ^{48}Ca double beta decay”, APS Fall Meeting in Nucl. Phys. Division, Santa Fe(USA), September 2015

T. Iida for the CANDLES collaboration, “Status and future prospect of ^{48}Ca double beta decay search in CANDLES”, Topics in Astroparticles and Underground Physics (TAUP2015), Torino(Italy), September 7-20, 2015

○主催シンポジウム

2014/10/5-9, Double Beta Decay and Underground Science (DBD14), Hawaii, USA, 80 名

○アウトリーチ (13 件)

小川泉, 「放射線測定～身近な物質に含まれる天然放射性物質の測定～」, 2014 年度 SSH 科学技術人材育成重点枠プログラム(福井県立藤島高等学校), 『Fukui Magnet School For Science and Technology』, アドバンスコース課題研究

○メディア等による発信 (2 件)

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

計画研究 B01

○論文発表 (査読有 7 件, 無 12 件)

▲K. Abe, ..., Y. Kishimoto, K. Kobayashi, ..., H. Ogawa, ..., B. S. Yang, ..., Y. Suzuki, et al. (XMASS Collaboration), “Direct dark matter search by annual modulation in XMASS-I”, Phys. Lett. B 印刷中 (査読有)

▲XMASS Collaboration: K. Abe, ..., Y. Kishimoto, K. Kobayashi, ..., H. Ogawa, ..., B. S. Yang, ..., Y. Suzuki, et al., “Search for two-neutrino double electron capture on ^{124}Xe with the XMASS-I detector”, Phys. Lett. B759 (2016) 64-68 (査読有)

▲K. Abe, ..., Y. Kishimoto, ..., K. Kobayashi, ..., H. Ogawa, ..., B. S. Yang, ..., Y. Suzuki, et al. (XMASS Collaboration), “Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Dark Matter Particles with the XMASS-I Detector”, Physical Review Letters, 113, 121301 (2014) 121301 1-5 (査読有)

▲H. Uchida, K. Abe, ..., Y. Kishimoto, K. Kobayashi, ..., H. Ogawa, ..., Y. Suzuki, B. S. Yang, et al. (XMASS Collaboration), “Search for inelastic WIMP nucleus scattering on ^{129}Xe in data from the XMASS-I experiment”, Prog. Theor. Exp. Phys. 63 (2014) 063C01 (査読有)

○国際会議 (口頭発表 23 件) 国内会議 (口頭発表 61 件)

M. Yamashita, “Direct Dark Matter Searches (Review)”, “Sources and Detection of Dark Matter and Dark

Energy in the Universe (UCLA Dark Matter 2016)”, Los Angeles, USA Feb. 17–26, 2016

S. Moriyama, “Direct dark matter search with XMASS”, “Dark Side of the Universe 2015”, Kyoto, Japan Dec. 14–18, 2015.

Y. Suzuki, “Recent result from XMASS”, “Neutrino and Dark Matter in Nuclear Physics 2015”, Finland June 1–5, 2015

○アウトリーチ (12 件)

鈴木洋一郎, “地下から宇宙を探索する”, “全国中学校理科教育研究会富山大会記念講演”, 2015/8/7、600 人

計画研究 B02

○論文発表 (査読有 7 件)

▲A. Alexandrov, … T. Naka (全 27 人中 20 番目), … “Intrinsic neutron background of nuclear emulsions for directional Dark Matter searches”, *Astropart. Phys.* 80 (2016) 16–21, doi:10.1016/j.astropartphys.2016.03.003 (査読有)

▲T. Naka (11 名中 1 番目) 他, “Analysis system of submicron particle tracks in the fine-grained nuclear emulsion by a combination of hard x-ray and optical microscopy”, *Review of Scientific Instruments* 86, 0730701 (2015), DOI:10.1063/1.4926350 (査読有)

▲Kiseki Nakamura, Kentaro Miuchi (16 人中 2 番目) 他, “Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2015) 043F01s (査読有)

○国際会議 (口頭発表 17 件, ポスター発表 5 件) 国内会議 (口頭発表 91 件)

Kentaro Miuchi (招待講演), “Radiation Detector Development for Direct Dark Matter

○アウトリーチ (9 件)

○メディア等による発信 (3 件)

(特集: 暗黒物質に異説) 「暗黒物質を捉える」日経サイエンス 2015 年 10 月号 (取材協力: 身内賢太朗、中竜大)

テレビ朝日、2015 年 7 月 23 日、報道ステーション (解説: 身内賢太朗)

なぜ?どへして?科学の図鑑、永岡書店 (取材協力: 身内賢太朗)

計画研究 C01

○主催研究会 (C01-C02 合同)

2016/1/6–7, 第二回 超新星ニュートリノ研究会, 富山商工会議所, 40 名

2015/3/16–17, 第一回 超新星ニュートリノ研究会, 東京理科大学, 35 名

○論文発表 (12 件)

▲K. Abe et al. (Super-K Collab.), M. Ikeda (4 番目), M. Nakahata (10 番目), H. Sekiya (13 番目), Y. Koshio (110 番目), M. Sakuda (112 番目), “Real-Time Supernova Neutrino Burst Monitor at Super-Kamiokande”, *Astroparticle Physics* 81 (2016) 39–48, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.04.003> (査読有)

▲K. Nakazato, E. Mochida, Y. Niino, H. Suzuki, “Spectrum of the Supernova Relic Neutrino Background and Metallicity Evolution of Galaxies”, *The Astrophysical Journal* 804 (2015) 75, DOI: 10.1088/0004-637X/804/1/75 (査読有)

▲Chikako Ishizuka, Takuma Suda, Hideyuki Suzuki, Akira Ohnishi, Kohsuke, Sumiyoshi, and Hiroshi Toki, “EOSDB: The database for nuclear equations of state”, *Publ. Astron. Soc. Jpn* 67, 2015, 13–29, DOI:10.1093/pasj/psu141 (査読有)

○国際会議発表

H. Suzuki (招待講演), “Neutrino spectra from supernova events”, 10th International Workshop on Neutrino Nucleus Interactions in the Few-GeV Region (NuInt15), 16–21 November 2015, Osaka University

M. Ikeda (招待講演), “GADZOOKS! project at Super-Kamiokande”, WIN2015, 6–13 June 2015, Heidelberg, Germany

M. Nakahata (招待講演), “Recent results from Super-Kamiokande”, XVI International Workshop on Neutrino Telescopes, March 2–6, 2015, Venice, Italy

M. Sakuda (招待講演), “Charged current and Neutral current neutrino-nucleus interaction in the 100 to 1000MeV region”, NNR14 Workshop, 5–6 November 2014, RCNP, Osaka University

○アウトリーチ (5件)

鈴木英之, “超新星爆発とニュートリノ・ダークエネルギー” 全国同時七夕講演会、2015/7/7、東京理科大学野田キャンパス

作田誠, “宇宙の元素の起源の謎に迫る”、岡山大学理学部公開講座、2014/11/9、80名

鈴木英之, “超新星爆発とニュートリノ・ダークエネルギー”、東京理科大学生涯学習センター一般講座 2014/7/27、東京理科大学神楽坂キャンパス

計画研究 C02

○論文発表 (7件)

◎▲ “KamLAND sensitivity to neutrinos from pre-supernova satars,” K. Asakura, ..., Y. Gando (3番目), ..., H. Ikeda (6番目), ..., *K. Ishidoshiro (8番目), 他 43名 ApJ 818 91 (2016) (査読有)

◎▲ “Pre-supernova neutrino emissions from ONe cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of Fe cores?,” *C. Kato, M. D. Azari, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, ApJ 808, 168 (2015) (査読有)

◎▲ “Study of electron anti-neutrinos associated with gamma-ray bursts using KamLAND,” K. Asakura, ..., Y. Gando (3番目), ..., H. Ikeda (6番目), ..., *K. Ishidoshiro (8番目), 他 44名 ApJ 806 87 (2015) (査読有)

○国際会議発表 (9件) 国内学会 (36件)

K. Ishidoshiro, “Future Supernova neutrino experiments”, 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region (NuInt2015), 2015/11/16–21 (発表日 11/20), Osaka, Japan

K. Hiraide, “XMASS”, Higgs as a Probe of New Physics 2015, 2015/2/11–15 (発表日 2/13), Toyama, Japan

計画研究 D01

○論文発表 (査読有 2件)

▲*K. Fushimi, H. Ejiri, R. Hazama, H. Ikeda, K. Imagawa, K. Inoue, G. Kanzaki, A. Kozlov, R. Orito, T. Shima, Y. Takemoto, Y. Teraoka, S. Umehara, K. Yasuda, S. Yoshida, “High purity NaI(Tl) scintillator to search for dark matter”, JPS conference proceedings 掲載予定 2016年

▲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)

○国際会議発表 (2件) 国内学会 (2件)

H. Sekiya (招待講演), “Quest for Lowest Energy Neutrinos in Super-Kamiokande”, LRT2015, 20 March 2015, Univ. of Washington, USA

K. Kobayashi (招待講演), “Surface purity control during XMASS detector refurbishment”, LRT2015, 19 March 2015, Univ. of Washington, USA

○アウトリーチ

関谷洋之, “地下にこもって宇宙の研究”, 平成 26 年度 高校生のための素粒子サイエンスキャンプ Belle Plus サイエンスカフェ, KEK, 2014 年 8 月 7 日

計画研究 E01

○論文発表(査読付き論文のうち謝辞に課題番号を含むもの全 67 件(平成 26 年:25 件、平成 27 年:42 件))

▲Morimitsu Tanimoto, Tsutomu T. Yanagida, “Occam’s Razor in Quark Mass Matrices,”

PTEP 2016 (2016) no. 4, 043B03 (査読有)

▲Shigeki Matsumoto, Satyanarayan Mukhopadhyay, Yue-Lin Sming Tsai, “Singlet Majorana fermion dark matter: a comprehensive analysis in effective field theory,” JHEP 1410 (2014) 155 (査読有)

▲Koichi Hamaguchi, Kazuya Ishikawa, “Prospects for Higgs- and Z-resonant Neutralino Dark Matter,” Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 055009 (査読有)

▲Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, Tsutomu T. Yanagida, “Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis,” Phys.Lett. B757 (2016) 32-38 (査読有)

▲Romy H. S. Budhi, Shoichi Kashiwase, Daijiro Suematsu, “Inflation due to a nonminimal coupling of singlet scalars in the radiative seesaw model,” Phys.Rev. D93 (2016) no.1, 013022 (査読有)

○国際会議発表(招待講演/基調講演 21 件(平成 26 年:6 件、平成 27 年:15 件))

Tsutomu Yanagida, “Chatic Inflation From Particle Physics,” CosPA 2014, 8-12 December 2014, Auckland, New-Zealand

○アウトリーチなど(6 件)

松本重貴, “What is dark matter?” IPMU+ICRR public lecture、東京大学駒場キャンパス、2014/11/15

公募研究

○論文発表(査読有 7 件、無 1 件)

A02 「原子核行列要素の方法による不一致問題の解決」

▲Y. Iwata, N. Shimizu, T. Otsuka, Y. Utsuno, J. Menendez, M. Honma, and T. Abe, “Large-Scale Shell-Model Analysis of the Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of Ca48”, Phys.Rev.Lett.116 (2016) 112502 (査読有)

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」

▲Nishimura, Nobuya; Takiwaki, Tomoya; Thielemann, Friedrich-Karl, The r-process Nucleosynthesis in the Various Jet-like Explosions of Magnetorotational Core-collapse Supernovae, The Astrophysical Journal, Volume 810, Issue 2, article id. 109, 23 pp. (2015) (査読有)

E01 「ニュートリノで探る標準模型を超える新しい物理」

▲M. Aoki, N. Haba and R. Takahashi, “A model realizing inverse seesaw and resonant leptogenesis,” PTEP 2015, no. 11, 113B03 (2015) (査読有)

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」

▲T. Asaka, T. Tsuyuki, “Perturbativity in the seesaw mechanism”, Phys.Lett.B753 (2016) 147-149 (査読有)

▲T. Asaka, T. Tsuyuki, “Seesaw mechanism at electron-electron colliders”, Phys.Rev.D92 (2015) 094012 (査読有)

○国際会議発表(講演 1 件、ポスター1 件) 国内学会(18 件)

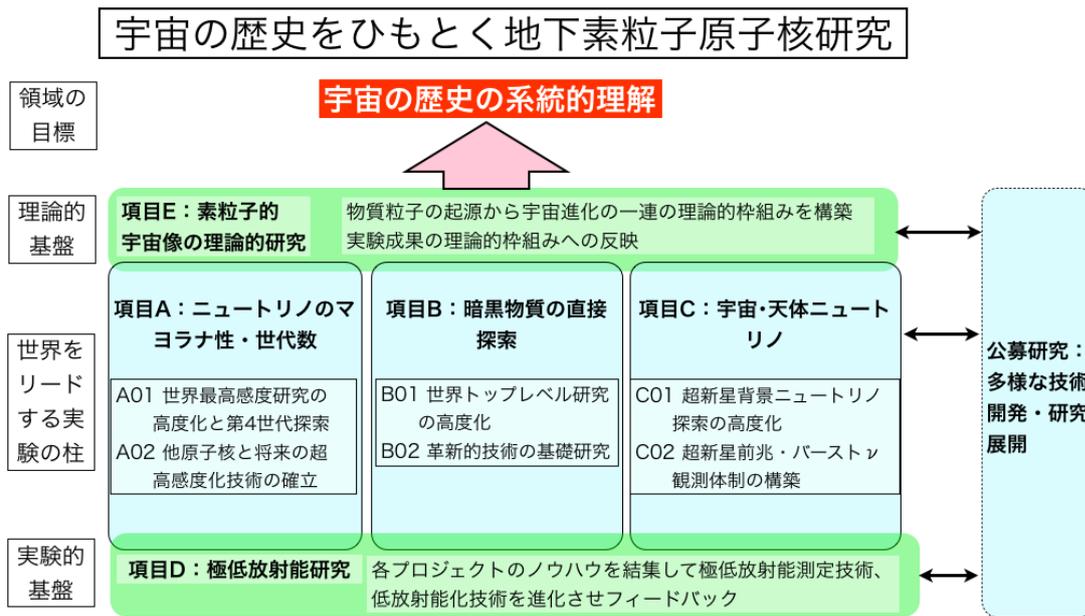
○アウトリーチ(3 件)

「「京」コンピュータによる暗黒物質の位相空間分布に関する研究」

石山智明、「スーパーコンピュータの威力で宇宙の暗黒面に迫る ーダークマター構造形成ー」、2015/8/22、2015 年度国立天文台水沢地区特別公開特別講演会、参加者約 100 名

6. 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、研究組織間の連携状況について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。



世界をリードする A-C 班の観測が、極低放射能研究による実験的基盤 (D 班) を経由して相乗的に連携・発展し、各宇宙の時代の謎を究明する。その成果を理論的基盤である素粒子的宇宙像の理論的研究 (E 班) が紡ぐことで、領域目標の「宇宙の歴史の系統的的理解」を実現する。さらに、公募研究での萌芽的技術開発や研究展開も含めた密な連携を促進し、円滑な目標達成を実現する。総括班は、これらの連携を円滑化し積極的な協働を提案するために、毎月の運営会議や毎年の研究会を開催する。運営会議は、施設責任者及び実験代表者が参加することで迅速かつ踏み込んだ連携を可能にする。さらに新たに加わった国際活動支援班は連携対象を世界の地下実験施設に拡張しより効率的・効果的な研究推進を実現する。

以下は、連携事例である。

- (1) A01 班は、B01 班が有するキセノン蒸留装置を借り受け、さらにノウハウを習得することで、最大 BG であった福島原発由来の放射性同位体 ^{110m}Ag を無視できるレベルにまで低減することに成功し、0v2B 探索感度の大幅向上に成功、縮退構造をカバーするという目標を前倒しして達成した。
また、キセノン倍増化では、ゴーグルやクリーン手袋などにおいて B01 班の知見を得て、製品の調査の手間を大きく低減することができた。さらに、スーパークリーンルームでのミニバルーン製作環境が埃のない状態に維持できているかの検査を B01 班が行った。この検査測定は、XMASS の高度化にも活かされる。(A01, B01 連携)
- (2) A01 班 (KamLAND) が有する液体シンチレータ純化装置 (液液抽出) を A02 (CANDLES) に提供することで、CANDLES の液体シンチレータの純化を効率的に行うことができた。(A01, A02 連携)
また、A01, C02 が開発・整備した電子回路や低放射能環境 (クリーンルーム、ゲルマニウム検出器、低 BG 鉛、無酸素銅) を D01 の高純度 NaI (Tl) 結晶開発に提供している。(A01, C02, D01 連携)
- (3) B01 (XMASS), C01 (SK-Gd), D01 (PICO-LON) が連携し、酸化シリコン粉末の情報を持ち寄り、試料を評価した結果、低 BG 酸化シリコンを見出すことに成功した。D01 の NaI 結晶純化で検討していた酸化シリコンが SK-Gd のタンク止水剤の高粘度化に最適であることがわかった。(B01, C01, D01 連携)
- (4) C01 (SK-Gd), D01 (PICO-LON, 金沢大低レベル放射能実験施設「尾小屋」) で連携し、硫酸ガドリニウム

水溶液中・NaI 水溶液中の放射性不純物除去に適したイオン交換樹脂を調査・評価している。また、SK-Gd で重要となるラジウム除去効率の評価には、尾小屋が実績を有するバリウム共沈法が有効であることが確認された。さらに、領域の枠組みを超えて、ゲルマニウム検出器の利用に関し尾小屋と神岡宇宙素粒子研究施設との連携が進んでいる。(C01, D01 連携)

- (5) 宇宙線研究所や岐阜大で C01 (SK-Gd)、B01 (XMASS) のために開発していた Rn 測定システムを、D 班を主体に改良し、新たに A 班 (CANDLES, KamLAND) に提供して、神岡地下の実験エリアの Rn 濃度を統一的に測定できるようになった。(B01, C01, D01→A01, A02)
- (6) B01 (XMASS) と B02 (NEWAGE) が連携して、低 BG 化で問題となるコバルトを含まない、ステンレス代替の構造体用低 BG 合金の試作・評価を行っている。(B01, B02 連携)
- (7) 低 BG 地下実験では、内部 BG とともに、実験室の壁などからの中性子起因の BG が大きな問題となる。これが B01, B02 で問題となる中性子反跳による暗黒物質の疑似信号以外に、A02 においても熱中性子起源の γ 線が主要 BG であることが、B02 の若手研究会で報告され、神岡地下環境での中性子束密度の正確な測定が共通課題であることが認識された。そこで、若手を中心に A01 (液体シンチレータ)、A02 (液体シンチレータ, NaI 検出器)、B01 (過去の測定経験)、B02 (測定主導)、C01 (中性子と原子核との反応モデル)、C02 (電子回路)、D01 (装置の低 BG 化) などのノウハウを結集して、測定を開始した。2016 年 3 月の日本物理学会では 6 件の関連した報告がなされた。(A, B, C, D 連携)
- (8) A02 が進めている蛍光熱量検出器開発に関して、B02, D01 の研究者の低温熱量検出器開発経験を活かし協働した研究を進めている。A02 の直接的な推進に寄与するとともに、将来の暗黒物質探索実験 (B01 や B02 の将来計画) の可能性も含めて検討を進めている。開発経験者らが作成した希釈冷凍機を A02 が譲り受け、効率的な研究開発が可能となった。(A02, B02, D01 連携)
- (9) B02 内での大学院生や若手 PD の交流を目的として開始した若手研究会に刺激され、A01-A02 班でも若手研究会が開催された。ともに計画から実施まで大学院生を中心として行われ、実質的な議論が行われている。また、それぞれの研究会を軸としながらも 3 年目には合同の研究会の開催が予定されており、計画研究を超えた若手の交流の素地が形成されている。(A, B 連携)
- (10) D01 主催で地下での極低放射能技術についての研究会を毎年開催し、特に現行実験で問題となっている BG 源について情報を交換・共有し、実験装置の高感度化に向けた低 BG 技術の研究開発のアイデア等に関して議論を行っている。実験系の全ての計画研究・公募研究が研究報告を行っており、実験系の全ての関係者が集まる機会になっている。(A, B, C, D, 公募連携)
- (11) D01 主導で各研究グループが情報交換・連携し、平成 27 年度より低放射能技術開発をする宇宙線研究所神岡地下実験施設内の共同利用スペースを確保した。現在、Rn 用分析装置 (C01 と連携)、結晶中不純物分析装置 (A02 と共同)、表面 α 線検出器 (B02 と共同) の構築と研究開発が進行中である。(A02, B02, C01, D01 連携)
- (12) 領域外との連携も推進しており、「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」(2015/7/24-25、東北大学) を開催したほか、新学術「ニュートリノ」においても積極的に講演を行っている。また、超新星ニュートリノ研究会を毎年開催し、120 分のチュートリアル講演を 2 つ用意することで、天文分野への波及を後押ししているほか、重力波事象に関しての同時解析に参加するなど天文分野との実際の共同研究を開始している。(他領域との連携)

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

分野をリードする国際共同研究を中心に、最先端の研究に参加させその成果を発表させると同時に、分野の俯瞰的な理解や若手同士の連携を高めるため、若手主催の研究会や国際スクール、チュートリアルを含む研究会の開催によって若手の育成を行っている。

研究会・スクール

- ・B02班若手研究会(第一回から五回：2014/8/24, 神戸大学, 15名；2014/12/6-7, 名古屋大学, 14名；2015/5/17-18, 神戸大学, 29名；2015/8/31-9/1, 早稲田大学, 32名；2016/3/16, 徳島大学, 21名)
- ・A班主催若手研究会(第一回：2016/2/23-24, 大阪大学, 21名)
- ・2015/11/8-14, NuSTEC-15 ニュートリノ原子核反応国際スクール, 岡山大学, 42名(内海外30名)
- ・C01, C02 合同超新星ニュートリノ研究会(チュートリアルつき)(第一から二回：2015/3/16-17, 東京理科大学, 35名；2016/1/6-7, 富山商工会議所, 40名)

若手の研究発表

国際会議 144 件、国内学会 382 件

その他海外地下施設(イタリアグランサッソ) スクール(2014/9/22-10/3)への派遣などを行った。

本領域での若手研究者育成を通して、以下の人材輩出・若手研究者の受賞・研究者の成長が実現した。

大学院生の教育、研究指導

本領域に係る研究テーマを通して、修士 32 人、博士 6 人を輩出。

大学院生の受賞(11 件)

第 6 回高エネルギー物理春の学校最優秀賞

東北大学物理学専攻賞(修士論文)

第 8 回 HOPE ミーティング Unique Team Presentation Award

大阪大学物理学専攻春の学校 2016(那智勝浦), 優秀発表賞×2 件

平成 27 年度 徳島大学康楽賞

神戸大学若手フロンティア研究会 2015 加速器部門賞受賞

1st ICAI2015 Best Paper Award

神戸大学理学部サイエンスフロンティア研究会 優秀発表賞受賞

2014 年夏季放射線研究会 応用物理学会放射線分科会ポスター賞×2 件

若手の研究職への進路状況

東北大学博士課程→東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構研究員

東北大学ニュートリノ科学センター助教→東北大学ニュートリノ科学センター准教授

大阪大学特任助教→福井大学特命助教(テニュアトラック)

大阪大学技術職員→若狭湾エネルギーセンター常勤研究員

岡山大学特任助教→インド SRM 大学テニュア准教授

東京大学宇宙線研究所助教→同准教授

東京大学理学系研究科研究員→韓国 IBS-CTPU テニュアトラック

神戸大学博士課程→東北大学ニュートリノ科学研究センター研究員

8. 研究費の使用状況（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総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

・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よって、A02(CANDLES), B01(XMASS), B02(NEWAGE), C01(SK-Gd 開発環境), D01(低放射能技術開発環境)が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(PICO-LON 開発)に提供しており、それぞれの計画が有するゲルマニウム検出器や放射線シールド、電子回路など低放射能測定に必要な機器を共用している。

・純化装置の共用

B01 のキセノン純化装置をA01 が利用しているほか、A01 の液液抽出装置をA02 に提供している。

・希釈冷凍機をはじめとする極低温設備

B02 およびD01 の研究者が開発した希釈冷凍機をA02 の蛍光熱量検出技術開発に提供し協働で研究開発を行っている。将来の宇宙暗黒物質の直接探索実験（B02）への利用も検討している。

・神岡地下共同利用スペース（Lab-A）での低放射能技術開発

A02 で使用する CaF_2 結晶中の内部不純物分析測定装置を、Lab-A においてD01 と共同で構築した。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測回路をはじ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共用できる。

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、高圧電源装置、ガス電子増幅器用両面基板、ガス透過率測定装置用セル、各種配管部品、各種純ガス、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）などを環境構築のために導入した。

・環境 Rn モニターの整備

D01 を主体に改良し準備した Rn 測定システムを、A01(KamLAND)、A02(CANDLES)の各実験グループに提供し、神岡地下実験エリアの環境 Rn 濃度を統一的にモニターするシステムの構築を進めている。既に構築されているSK 実験グループ、XMASS 実験グループ内のそれぞれの坑内 Rn モニターとの統合を目指す。

・中性子測定ネットワークの構築

B02 主催の第三回若手研究会（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 を中心に地下実験環境での中性子測定の協力体制を構築した。特に各計画班の得意とする技術（A02 液体シンチレータ、B01 過去の測定、B02 ガス検出器・原子核乾板、D01 低 BG 検出器）を持ち寄り、平成 27 年度までに地上での中性子束測定などの基礎試験を行った。平成 28 年度以降、地下環境での測定・理解・モニタリングを進める。平成 28 年春の日本物理学会では、関連講演を 6 件行い、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た。

・研究会による連携の推進

毎年の領域研究会(2016 年は国際会議)によって、領域の連携を高めている。特に 2016 年の国際会議では、内外から招待講演を迎え、地下で行われている素粒子、原子核研究における最新の成果が報告された。この会議では、物理成果のみに留まらず、世界各地の地下実験施設の現状の報告、紹介がなされ、成功裏に終了することが出来た。また、D01 主催の毎年恒例の極低放射能技術に関する研究会も支援し、計画研究・公募研究に関わる地下実験関係者が揃って参加する研究会となっており、新たな連携を効果的に涵養している他、3 領域合同研究会など広い連携を支援している。

9. 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・宇宙線物理学】

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ため、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る。この点に着目して新学術領域を設立して活動することの意義は大きい。

それぞれの計画研究の実験は、既に一部が開始されているものが多いこともあり、総括班の主催する毎年の研究会および平成 28 年の国際会議で成果が多数報告され、活発に議論が行われている。しかし、極低放射能技術を共有・展開することで各研究を飛躍的に進展させることがこの新学術領域の主眼であり、この共通課題を領域全体が連携して追及する計画研究 D01 の活動が最も重要な鍵を握っているともいえる。この計画研究では、神岡鉱山地下での各種放射能分析装置やデータベースの構築などの要素が班員によって個々に進められ、B01 で用いるキセノン中のラドンの分離技術の開発に成功するなどの成果を得るとともに、極低放射能技術の情報交換を目指した宿泊型の研究会を開催している。評価者もこの会に参加したが、研究の進展が詳しく報告されるとともに、細部まで踏み込んだ議論が活発に行われ、大きな意義を感じさせるものであった。また、若手主体の研究会も行われ、普段は個別の実験を進めている若手研究者どうしが実験技術や情報の交換を密に行えるように促す試みとして注目される。

その他の計画研究についてもおおむね順調に進展していると判断される。個々の進捗については、たとえば B01 では、ドーム型光電子増倍管の開発に成功するなど、背景雑音の大幅な低減につながる成果が得られているが、ここではすべてを列挙しない。また、6. に詳述されているように計画研究間の連携も多数進められていることがわかる。若手研究者に対する取り組みも順調といえる。

【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】

地下は温湿度、気圧などが安定した環境であり、宇宙線や外部振動などにおいても低バックグラウンドが達成できる。素粒子・原子核実験にとっては優れた実験環境であるが、特にニュートリノに関しては、地下実験において宇宙物理学・天体物理学的な研究が可能であり、本新学術領域が計画研究 C 班を擁することは領域の多方面への展開を期待させるものである。

ニュートリノ観測に関する C01, C02 班はそれぞれに確実な進展を見せている。C01 班の研究はガドリニウム (Gd) 添加の水チェレンコフ実験についてである。これは過去の超新星起源の背景ニュートリノの観測を可能なさしめる技術と期待されており、また近傍であれば超新星爆発時のニュートリノ観測においても高い効率と反電子ニュートリノ事象の弁別で効果が期待できる。ビーム実験によって Gd の熱中性子捕獲で放出する γ 線を精密に測定できたことは、Gd 添加による検出器の性能を正しく見積もる上で重要な基礎データだと言える。これらの研究成果もあって、スーパーカミオカンデ (SK) 実験が SK-Gd 計画を正式に決めたことは C01 班にとっても大きな進展である。低バックグラウンドのために、D 班と連携して成果を上げているのも領域として評価できる。

C02 班は超新星爆発の前兆ニュートリノに着目しており、これは超新星爆発モデルの研究や重力波観測などと密接に結びつく。近傍超新星爆発に対応するデータ取得系強化をおこなうだけでなく、恒星内部モデルの研究を行うメンバーもおり、研究が進んでいる。前兆ニュートリノのアラートシステムを実際に構築したことは、観測の具体化にとって重要なことであり、評価できる。他のニュートリノ観測とともに、先ごろ重力波を初観測した米国 aLIGO 実験と欧州 Virgo 実験と国際的な情報交換に取り組んでいるのもよい点である。また非公式ではあるが日本の KAGRA 実験の重力波解析とも連絡を保っており、将来の成果に期待したい。

【塩澤 真人（東京大学・宇宙線研究所・教授）、専門：宇宙素粒子実験】

統一的な素粒子像と宇宙像を理解する上で、ニュートリノの性質やニュートリノを手段とする天文学、暗黒物質の性質の果たす役割は大きいと期待されている。これらの実験的研究の共通の挑戦として、放射性バックグラウンドの理解と低減がある。研究課題と技術的課題を共有した本新学術領域の活動の意義は大きい。

ニュートリノ振動の発見により示された極微のニュートリノ質量の存在が示唆することは、標準理論を超えた超高エネルギーの物理の存在と超重マヨラナニュートリノによる宇宙の物質数の生成である。この問題を直接的に検証する「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) の探索」は緊急の実験的課題となっており、世界で激しい競争が行われている。A01 班は当初の感度目標（マヨラナ有効質量で 60meV）を世界に先駆けて達成し、3 つのニュートリノ質量がほぼ等しいという質量縮退構造全体に

対する制限を与えるまでに至ったのは評価に値する。今後逆階層構造を検証する感度に到達するためのミラーや高感度光電子増倍管、高光収率液体シンチレータなどの技術開発が確実に進展していることもあり、さらなる実験感度の向上も期待される。また A02 班では新たな手法による 6 倍の同位体濃縮に成功した。さらに、蛍光熱量検出器の原理検証実験の準備が整った。目標感度(マヨラナ有効質量で数 meV)達成に向けてさらなる技術開発に期待したい。また領域を横断する理論研究では、非常に多くの研究成果が論文として発表されていることからその活発な研究活動がうかがえる。多様な角度からの研究が進み、 $0\nu 2\beta$ や暗黒物質直接探索に予言や示唆を与える成果が得られていることも評価される。

総括班 進捗評価担当による評価

【柳田 勉(東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授)、専門：素粒子理論】

A01 班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を現在 60meV まで達成した。この値は世界で最も厳しいものであり、この研究は世界を圧倒的にリードしている。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る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、E01 班においては、上記のニュートリノの有効質量の理論的予言を試みている。逆階層性の領域においては、Occam's Razor の手法を用いて、有効質量が 50meV と予言されており、A01 班の実験により数年後には検証される。さらに Occam's Razor 手法を階層性の領域に拡張して、有効質量が 7-8meV という結果を導いている。これら実験及び理論的研究は、宇宙論の長年の謎である宇宙のバリオン数の問題を解く上で欠かすことのできない研究である。

【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】

本研究の最大の特徴は、基幹となる研究で世界的成果を出すとともに、共通している低放射線測定、低放射能化技術の共有により、基幹研究の推進とその高度化、将来の地下素粒子原子核研究の進展を計ることである。研究成果を含めすべてに渡り良好に進んでいる。共有技術開発の中心は計画研究 D01 であり、マイクロベクレルレベルの分析装置等の開発は着々と進んでおり高く評価される。情報交換の為の研究会、情報発信の為のデータベース作りも活発であるが、データベース作りはさらに加速させる方がより有用である。研究グループ間の連携例は、すでに数多く見られ、本研究の意義が具体的に示されており評価できる。また、多様な若手研究会の開催など、若手の育成、活躍が顕著であり、高く評価される。

【中畑 雅行(東京大学・宇宙線研究所・教授)、専門：天体素粒子物理学】

神岡の地下では世界をリードするニュートリノレス二重ベータ崩壊実験、暗黒物質探索実験、超新星爆発ニュートリノ観測が進められている。これからも世界をリードし続けるためには低バックグラウンド技術を磨いていく必要がある。本領域では、D01 班が中心となり、A, B, C 班の人々が集まって、神岡の地下に低バックグラウンド技術を開発するセットアップを設けたり、頻りに集まって情報交換を行っており、日本の少ない研究者人口をうまく活用して世界最先端の技術開発が行われており高く評価できる。実際、A, B, C 班でおこなう実験の主要となる材料が D01 班によって開発された実績もあり、成果も出始めている。また、領域全体での会議や月々行われる運営会議等によって、実験に関係する A, B, C, D 班と理論に関係する E 班との連携を綿密にとられており、高く評価できる。

【岸本 忠史(大阪大学・核物理センター・教授)、専門：素粒子核物理学】

A01 班の KamLAND-Zen 実験では、 ^{136}Xe の二重ベータ崩壊で、ニュートリノの有効質量で 60meV と、0.1 eV を下回る領域まで世界で初めて探索した。これは世界を驚かせた成果で、各所から称賛の声が上がるなど、当面の間他の追従を許さないレベルにある。A02 班では新しい濃縮法を開発する等、次世代研究に道筋をつけつつある。B01 班は特に、季節変動という DAMA と同じ方法を用いて DAMA の領域を排除したことが高く評価できる。B02 班の方向に感度をもつ装置の開発も順調に進展している。C01 班では SK-Gd 計画が SK 共同実験として認められたことが大きく、今後の進展に期待出来る。C02 班は、KamLAND で爆発前超新星アラームを実現し、本領域の枠を超えて広く世界に情報を提供する等、他分野との連携が進んだ。D01 班は A, B, C の研究に共通する低バックグラウンドの測定に関して、共同の測定環境の設定や、共同での観測など、本領域によって初めて出来た共同研究が進み、特徴的な進展があった。E01 班では、素粒子論と宇宙論の関係で多くの理論的研究に進展があった。

以上、予想以上の科学的成果が得られつつあり、また素粒子、原子核、宇宙それに理論と実験の融合も着実に進んでいる。本領域は当初の予定を超えて進展していると結論付けられる。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

それぞれの計画研究は順調に進展しており、特に A01 (KamLAND-Zen) では計画を大幅に前倒しして縮退構造のカバーを達成している。また、総括班主導の運営会議や研究会などを通して、期待以上の計画研究間や領域を超えた連携が始まっており、この活発な雰囲気を継続することが重要と考える。

また、新たに始まった国際活動支援班によって海外の地下研究施設との連携をより強固に推進することが可能になったので、さらなる連携の拡大、技術の導入および波及を支援していく。

計画研究 A01

キセノンの倍増を確実に実行し、逆階層構造に切り込む探索のスタートを最優先する。同時にエネルギー分解能向上のための開発を進めるとともに、反ニュートリノ観測などの並行する研究で着実な研究成果を出していく。0 ν 2 β が発見された際には、核行列要素の誤差縮小や背景となる物理の究明には他核種での測定やトラッキング測定が重要となるので、A02 班をはじめ世界の革新的技術開発のグループと連携して大規模の測定を展開し宇宙の歴史をひもとく。

一方、液体シンチレータを使った地下実験は、カナダ(SNO)・中国(JUNO)・韓国(RENO-50)を始め幾つかの計画が立案されており、国際活動支援班と協調して A01 が実現した極低放射能技術の波及とともに相乗的な発展を目指す。

計画研究 A02

重要な開発要素であるサーミスタは、蛍光熱量検出器の開発初期段階においては現有の NTD-Ge サーミスタで行う計画であるが、海外研究グループでは TES (超伝導転移端センサー) や MMC (金属磁気熱量センサー) を利用した検出器を開発・運用しており、CaF₂ 結晶による蛍光熱量検出の原理検証後の性能向上においては、類似した高性能の熱量センサー開発が必須である。センサー開発で先行する海外グループとの共同研究を視野に入れて、⁴⁸Ca 同位体濃縮開発との両輪で、数 meV 領域の感度でのマヨラナ性検証を視野に入れた、世界をリードする 0 ν 2 β 崩壊観測実験へと成長することを目指す。

計画研究 B01

XMASS 検出器の安定稼働による暗黒物質探索の高統計化・高感度化と、将来の性能向上のための研究開発、極低バックグラウンド化を並行して推進する。

特に、季節変動解析での長期観測による統計量増大で WIMPs, Bosonic-Super-WIMPs の感度向上を実現する。またスクリーニングのためのゲルマニウム半導体検出器の低バックグラウンド化を実現し、徹底した低放射能素材の厳選により究極の極低放射能光電子増倍管を開発し、次期 XMASS の実現につなげる。

また、二重電子捕獲などの副次的な物理研究も積極的に開拓し、多様な物理成果を得ていく。

計画研究 B02

領域内の連携で実現した低放射能素材を使った実機 (30cm 角 μ -PIC) を完成させ、方向感度を持つ暗黒物質探索の感度を大幅に向上させる。特に低 BG μ -PIC の製作が見込まれているので、当初の目標を上回る感度を目指す。同様に、平成 27 年度に製作した低 BG 乳剤試作機の性能評価も行い、実機の製作につなげるとともに、試作機でのスピンの依存しない暗黒物質探索の実現を目指す。また、B02 主催の若手研究会をきっかけに始まった地下実験室での系統的な中性子束の測定を推進する。

また、国際活動支援班と協調して方向感度を持つ暗黒物質探索の国際的な連携を実現する。

計画研究 C01

硫酸ガドリニウム水溶液中のラジウムを除去するイン交換樹脂の開発を D01 班と連携して進めるとともに、素材として放射性不純物を含まないガドリニウムを D01 班およびサプライヤーと協力して開発し、SK-Gd の準備を万全にする。また、開発したイオン交換樹脂を SK に導入し、過去の超新星ニュートリノの探索をより低いエネルギー閾値で実現する。

計画研究 C02

SK、KamLAND へのデータ取得系の改良を進め、超新星爆発時の万全なニュートリノ観測体制を整える。また、XMASS に対してもデータ取得系改良のための開発を進める。

一方、KamLAND で稼動している前兆ニュートリノアラームの安定運転を実施するとともに、超新星爆発前後のニュートリノ放出予測に対する理論的枠組みの整備を進める。これにより、SK、KamLAND、XMASS の 3 検出器を合わせた観測によって得られる情報を最大化する。また、当初計画をさらに発展させ、重力波検出器とニュートリノ検出器の同時解析を世界的な連携で実現し、リアルタイム解析にまで高めることを目指す。

計画研究 D01

NaI(Tl) 検出器の低放射能化をさらに進めつつ、特に C01 班との連携で低放射性不純物イオン交換樹脂の開発を行い SK に適用できる純水中のラジウム除去技術の確立を目指す。また、キセノン中の高感度 Rn 濃度測定を実現するための要素技術の開発を進める。また、Rn 分析装置、結晶中不純物分析装置、ガス飛跡検出技術を応用した表面 α 線分析装置を構築し、領域全体の発展に大きく貢献する。

極低放射能技術に関する研究会の継続開催、神岡地下環境 Rn データベース、神岡版放射能データベース構築によって国内のみならず世界の地下実験との連携を高め、地下素核研究を発展させる。

計画研究 E01

Occam's Razor に基づく理論で宇宙のバリオン数と矛盾しない条件、WIMP での singlet-like から doublet-like, triplet-like さらに mixed の場合までカバーする系統的な研究、0 ν 2 β がレプトジェネシス機構のもと右巻きニュートリノ質量に与える示唆、右巻きスカラーニュートリノインフレーションにおけるレプトン数生成の評価、拡張輻射シーソーモデルにおける非熱的バリオン数生成・暗黒物質候補・ニュートリノ質量と強い CP 問題の関連、などの幅広い研究を通して、A 班のマヨラナ性検証実験や B 班の暗黒物質探索実験に対する予言を行うとともに、宇宙の歴史の系統的な理解を進める。

以上の各計画や計画間の連携・さらには領域を超えた国際的な連携がより効果的・効率的に進むように総括班会議・運営会議、研究会、および国際活動支援班の活動を通して強力に支援する。公募研究に対しても、運営会議への参加を認めることで、計画班との 1 対 1 の連携にとどまらず領域全体での相乗的な協力を実現する。