

領域略称名:地下宇宙
領域番号:6105

令和6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)」
に係る研究成果報告書(研究領域)兼
事後評価報告書

「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

領域設定期間

令和元年度～令和5年度

令和6年6月

領域代表者 東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授・井上 邦雄

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	13
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	15
6 研究目的の達成度及び主な成果	17
7 研究発表の状況	22
8 研究組織の連携体制	27
9 研究費の使用状況	28
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	30
11 若手研究者の育成に関する取組実績	31
12 総括班評価者による評価	32

研究組織

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

1 総括班・総括班以外の計画研究

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

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

2 公募研究

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

E01 公	20H05248 右巻ニュートリノによる宇宙物質総生成	令和2年度 ～ 令和3年度	横山順一	東京大学・大学院理学研究科(理学部)・教授	1
E02 公	20H05240 ニュートリノ集団振動を考慮した超新星ニュートリノスペクトルの構築	令和2年度 ～ 令和3年度	加藤ちなみ	東京理科大学・理工学部・助教	1
E02 公	20H05249 大質量星における40Kと中質量元素の元素合成:後期進化の対流混合による影響	令和2年度 ～ 令和3年度	吉田敬	京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員	1
E02 公	20H05255 現実的な3次元超新星モデルに基づく超新星背景ニュートリノ解析	令和2年度 ～ 令和3年度	中村航	福岡大学・理学部物理科学科・助教	1
A01 公	22H04567 高感度 $0\nu\beta\beta$ 探索のための高圧XeLSの開発研究	令和4年度 ～ 令和5年度	尾崎秀義	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教	1
A01 公	22H04569 二重ベータ崩壊・二重電子捕獲半減期の全核種精密計算	令和4年度 ～ 令和5年度	日野原伸生	筑波大学・計算科学研究センター・助教	1
A02 公	22H04570 PIKACHU実験によるガドリニウム160の二重ベータ崩壊の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	飯田崇史	筑波大学・数理物質系・助教	1
A02 公	22H04573 窒化物半導体光増幅器を用いた小型・高効率な青色単一波長高出力光源の開発	令和4年度 ～ 令和5年度	上向井正裕	大阪大学・工学研究科・助教	1
B02 公	22H04574 ガスTPCの超微細読み出しが切り拓く低質量暗黒物質探索	令和4年度 ～ 令和5年度	東野聡	神戸大学・理学研究科・学術研究員	1
C01 公	22H04575 極微量元素除去技術を応用した放射線検出器材料の高純度化と高感度化	令和4年度 ～ 令和5年度	伏見賢一	徳島大学・社会産業理工学研究部(理工学域)・教授	1
D01 公	22H0457 極低バックグラウンド新型ピクセル検出器による太陽アクシオン探索	令和4年度 ～ 令和5年度	鶴剛	京都大学・理学研究科・教授	1
D01 公	22H04578 神岡地下・地上における雷観測と宇宙素粒子実験への利用	令和4年度 ～ 令和5年度	鷲見貴生	国立天文台・重力波プロジェクト・特任助教	1
E02 公	22H04571 超新星ニュートリノ後期放射の理論計算および背景ニュートリノ探査の新手法開発	令和4年度 ～ 令和5年度	諏訪雄大	東京大学・総合文化研究科・准教授	1

E02 公	22H04577 物質中のニュートリノ集団振動の非 線形挙動と超新星ニュートリノに与 える影響の調査	令和4年度 ～ 令和5年度	加藤ちなみ	東京理科大学・創域理工学 部・助教	1
公募研究 計 25 件 (廃止を含む)					

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

全体

年度	合計	直接経費	間接経費
令和元年度	308,490,000円	237,300,000円	71,190,000円
令和2年度	291,694,000円	224,380,000円	67,314,000円
令和3年度	290,875,000円	223,750,000円	67,125,000円
令和4年度	293,995,000円	226,150,000円	67,845,000円
令和5年度	288,470,000円	221,900,000円	66,570,000円
合計	1,473,524,000円	1,133,480,000円	340,044,000円

総括班 X00(地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	11,440,000	8,800,000	2,640,000
令和2年度	10,530,000	8,100,000	2,430,000
令和3年度	13,520,000	10,400,000	3,120,000
令和4年度	10,790,000	8,300,000	2,490,000
令和5年度	13,520,000	10,400,000	3,120,000
合計	59,800,000	46,000,000	13,800,000

計画研究 A01(逆階層領域でのニュートリノのマヨラナ性の研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	29,900,000	23,000,000	6,900,000
令和2年度	46,540,000	35,800,000	10,740,000
令和3年度	57,980,000	44,600,000	13,380,000
令和4年度	55,380,000	42,600,000	12,780,000
令和5年度	47,190,000	36,300,000	10,890,000
合計	236,990,000	182,300,000	54,690,000

計画研究 A02(48Caを用いたニュートリノマヨラナ性の研究と次世代高感度化技術開発)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	33,930,000	26,100,000	7,830,000
令和2年度	36,920,000	28,400,000	8,520,000
令和3年度	23,530,000	18,100,000	5,430,000
令和4年度	23,530,000	18,100,000	5,430,000

令和5年度	16,250,000	12,500,000	3,750,000
合計	134,160,000	103,200,000	30,960,000

計画研究 B01(高感度大型装置で推進する暗黒物質直接探索)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	60,970,000	46,900,000	14,070,000
令和2年度	28,720,000	22,180,000	6,540,000
令和3年度	25,010,000	18,950,000	6,060,000
令和4年度	23,090,000	18,050,000	5,040,000
令和5年度	27,170,000	20,900,000	6,270,000
合計	164,960,000	126,980,000	37,980,000

計画研究 B02(方向に感度をもった暗黒物質直接探索)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	25,480,000	19,600,000	5,880,000
令和2年度	30,420,000	23,400,000	7,020,000
令和3年度	24,570,000	18,900,000	5,670,000
令和4年度	34,580,000	26,600,000	7,980,000
令和5年度	37,050,000	28,500,000	8,550,000
合計	152,100,000	117,000,000	35,100,000

計画研究 C01(超新星背景ニュートリノの高感度観測でせまる宇宙星形成の歴史)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	33,930,000	26,100,000	7,830,000
令和2年度	35,620,000	27,400,000	8,220,000
令和3年度	49,920,000	38,400,000	11,520,000
令和4年度	51,220,000	39,400,000	11,820,000
令和5年度	47,840,000	36,800,000	11,040,000
合計	218,530,000	168,100,000	50,430,000

計画研究 D01(極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	51,480,000	39,600,000	11,880,000
令和2年度	14,950,000	11,500,000	3,450,000
令和3年度	18,720,000	14,400,000	4,320,000
令和4年度	14,040,000	10,800,000	3,240,000
令和5年度	17,810,000	13,700,000	4,110,000
合計	117,000,000	90,000,000	27,000,000

計画研究 D02(極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	44,330,000	34,100,000	10,230,000
令和2年度	37,440,000	28,800,000	8,640,000
令和3年度	28,470,000	21,900,000	6,570,000
令和4年度	20,280,000	15,600,000	4,680,000
令和5年度	20,410,000	15,700,000	4,710,000
合計	150,930,000	116,100,000	34,830,000

計画研究 E01(物質の起源を解明する新たな素粒子模型と初期宇宙進化の理論研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	9,360,000	7,200,000	2,160,000
令和2年度	11,310,000	8,700,000	2,610,000
令和3年度	11,310,000	8,700,000	2,610,000
令和4年度	11,570,000	8,900,000	2,670,000
令和5年度	11,570,000	8,900,000	2,670,000
合計	55,120,000	42,400,000	12,720,000

計画研究 E02(超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和元年度	7,670,000	5,900,000	1,770,000
令和2年度	10,140,000	7,800,000	2,340,000
令和3年度	10,400,000	8,000,000	2,400,000
令和4年度	10,140,000	7,800,000	2,340,000
令和5年度	10,790,000	8,300,000	2,490,000
合計	49,140,000	37,800,000	11,340,000

公募研究 A01(半減期 10 の 27 乗年以上の二重β崩壊観測を実現する TI-208 背景事象除去の検証)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,990,000	2,300,000	690,000
令和3年度	2,990,000	2,300,000	690,000
合計	5,980,000	4,600,000	1,380,000

公募研究 A01(有限振幅法を用いた原子核密度汎関数理論による二重ベータ崩壊行列要素計算)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 A01(ガス飛跡検出器で探るマヨラナ・ディラック決着への道)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,990,000	2,300,000	690,000
令和3年度	2,860,000	2,200,000	660,000
合計	5,850,000	4,500,000	1,350,000

公募研究 B02(高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,990,000	2,300,000	690,000
令和3年度	2,990,000	2,300,000	690,000
合計	5,980,000	4,600,000	1,380,000

公募研究 C01(高マトリクス試料中の極微量放射性核種測定法確立—地下宇宙研究への応用)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,340,000	1,800,000	540,000
令和3年度	2,860,000	2,200,000	660,000
合計	5,200,000	4,000,000	1,200,000

公募研究 D01(極低放射能測定における μ -TPCを用いたアルファ線イメージ分析装置の開発)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,730,000	2,100,000	630,000
令和3年度	2,860,000	2,200,000	660,000
合計	5,590,000	4,300,000	1,290,000

公募研究 D01(落雷磁場を利用した神岡地下水分量の長期観測)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 D02(エアブリッジインダクタンスによる超伝導力学インダクタンス検出機の高感度化)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,990,000	2,300,000	690,000
令和3年度	2,990,000	2,300,000	690,000
合計	5,980,000	4,600,000	1,380,000

公募研究 E01(各種暗黒物質探索実験データと素粒子模型を系統的に照合するための枠組構築)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 E01(高解像度シミュレーションを用いた暗黒物質分布の精密評価)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	2,600,000	2,000,000	600,000
令和3年度	2,210,000	1,700,000	510,000
合計	4,810,000	3,700,000	1,110,000

公募研究 E01(暗黒物質サブハローの性質と直接・間接検出実験への示唆)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	1,170,000	900,000	270,000

公募研究 E01(右巻ニュートリノによる宇宙物質総生成)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 E02(ニュートリノ集団振動を考慮した超新星ニュートリノスペクトルの構築)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 E02(大質量星における 40K と中質量元素の元素合成:後期進化の対流混合による影響)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,040,000	800,000	240,000
合計	2,210,000	1,700,000	510,000

公募研究 E02(現実的な3次元超新星モデルに基づく超新星背景ニュートリノ解析)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和2年度	1,170,000	900,000	270,000
令和3年度	1,170,000	900,000	270,000
合計	2,340,000	1,800,000	540,000

公募研究 A01(高感度 $0\nu\beta\beta$ 探索のための高圧XeLSの開発研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	3,250,000	2,500,000	750,000
令和5年度	3,250,000	2,500,000	750,000
合計	6,500,000	5,000,000	1,500,000

公募研究 A01(二重ベータ崩壊・二重電子捕獲半減期の全核種精密計算)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	910,000	700,000	210,000
令和5年度	910,000	700,000	210,000
合計	1,820,000	1,400,000	420,000

公募研究 A02(PIKACHU実験によるガドリニウム160の二重ベータ崩壊の研究)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	3,250,000	2,500,000	750,000
令和5年度	3,250,000	2,500,000	750,000
合計	6,500,000	5,000,000	1,500,000

公募研究 A02(窒化物半導体光増幅器を用いた小型・高効率な青色単一波長高出力光源の開発)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	3,120,000	2,400,000	720,000
令和5年度	2,990,000	2,300,000	690,000
合計	6,110,000	4,700,000	1,410,000

公募研究 B02(ガスTPCの超微細読み出しが切り拓く低質量暗黒物質探索)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	3,250,000	2,500,000	750,000
令和5年度	3,250,000	2,500,000	750,000
合計	6,500,000	5,000,000	1,500,000

公募研究 C01(極微量元素除去技術を応用した放射線検出器材料の高純度化と高感度化)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	9,750,000	7,500,000	2,250,000
令和5年度	9,750,000	7,500,000	2,250,000
合計	19,500,000	15,000,000	4,500,000

公募研究 D01(極低バックグラウンド新型ピクセル検出器による太陽アクシオン探索)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	9,620,000	7,400,000	2,220,000
令和5年度	9,620,000	7,400,000	2,220,000
合計	19,240,000	14,800,000	4,440,000

公募研究 D01(神岡地下・地上における雷観測と宇宙素粒子実験への利用)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	3,250,000	2,500,000	750,000
令和5年度	3,250,000	2,500,000	750,000

合計	6,500,000	5,000,000	1,500,000
----	-----------	-----------	-----------

公募研究 E02(超新星ニュートリノ後期放射の理論計算および背景ニュートリノ探査の新手法開発)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	1,300,000	1,000,000	300,000
令和5年度	1,300,000	1,000,000	300,000
合計	2,600,000	2,000,000	600,000

公募研究 E02(物質中のニュートリノ集団振動の非線形挙動と超新星ニュートリノに与える影響の調査)

年度	合計(円)	直接経費(円)	間接経費(円)
令和4年度	1,300,000	1,000,000	300,000
令和5年度	1,300,000	1,000,000	300,000
合計	2,600,000	2,000,000	600,000

4 研究領域の目的及び概要

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

●学術的背景

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

(宇宙の各時代を紡ぐ) $0\nu2\beta$ 研究は宇宙の始まりでの物質生成(反物質の消失)を解き明かす最重要課題であり、暗黒物質研究はその後の大規模構造の形成や星の進化を決定づけるやはり最重要課題である。さらに**過去の超新星爆発(超新星背景)**ニュートリノの観測は星進化の歴史に新たな観測手法をもたらし、これらの連携は、宇宙の化学進化に対する系統的な研究手段を提供する。そして、**地球ニュートリノ**観測が現在の地球組成の情報をもたらすことで、地下宇宙素粒子研究は、宇宙の始まりから現在までをカバーする「宇宙の歴史と物質の進化」を解き明かす学問領域となる。

(対象とする学問分野) 実験的には、極低放射能技術を基盤とした素粒子・原子核の実験手法に、新たに低温技術を導入して高分解能化や低BG化を進める。主要課題は、 $0\nu2\beta$ 、暗黒物質、超新星ニュートリノ、地球ニュートリノであり、それぞれ、「物質はどこから来たのか?」、「星・銀河はどのように作られたのか?」、「元素はどのように作られたのか?」、「どのように地球に行き着いたのか?」という基礎的・根源的な謎の解明につながる。理論研究はこれらの実験研究を関連づけ、レプトジェネシスを中心とした物質の起源と銀河形成に関わる暗黒物質を統一的に解明する素粒子的宇宙像を確立する。また、星形成の歴史を過去の超新星爆発と関連づけ、クーリングを含む時間スケールで星の終末である超新星爆発を解明し、宇宙の化学進化に波及させる。さらに地球始原隕石に接続して、地球ニュートリノ観測・地球科学の知見を取り込み、地球形成・ダイナミクス解明にも貢献する。特に $0\nu2\beta$ 探索、暗黒物質探索での大きな実験的進展に対応し、 $0\nu2\beta$ 頻度とニュートリノ質量の換算で重要な核行列要素の計算、および暗黒物質分布を非線形な小スケールまで解ける銀河形成シミュレーションにも分野を拡張する。また、物質の進化の系統的解明のために、新たに超新星爆発の多次元計算、原始中性子星の冷却、状態方程式もカバーした宇宙の化学進化の研究も取り込む。対象とする学問分野は幅広く、**素粒子・原子核・宇宙・天文・天体・地球科学**に加え、極低放射能・低温測定器・大規模数値計算などの技術的分野に及ぶ。これら多様な連携で**宇宙の歴史と物質の進化を系統的に解明する地下宇宙素粒子研究分野**は、「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域」であり、「地下素核研究」が立ち上げた新興・融合領域を「格段に発展」させるものでもある。

●革新性

$0\nu2\beta$ 探索は、物質起源解明に繋がるニュートリノのマヨラナ性を検証する最適な手法である。「地下素核研究」では、領域での極低放射能技術共有化により、KamLAND-Zen が世界を大きくリードする成果を得て、ニュートリノの質量階層構造のうち縮退構造領域をほぼ全て排除した。次なる二重 β 崩壊核 ^{136}Xe の倍増化と高性能電子回路導入では、逆階層構造に切り込む 40meV を切る感度で理論班の複数のモデルを直接検証し、「 $0\nu2\beta$ が発見されるなら神岡」という状況を継続する。一方、 $0\nu2\beta$ 発見の際は、多様な原子核での測定が背景物理の特定に有効であり、 ^{48}Ca で世界をリードする計画班は、レーザー同位体濃縮や極低温蛍光熱量計技術による高感度化に取り組み、将来を見据えた万全の開発体制をとる。

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

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

信号を捉えることができる。

技術面では、各実験グループが発展させた**極低放射能技術**の集結により、世界トップレベルの状況にある。国際協力によるさらなる高度化、中性子検出器・世界最高感度のラドン検出器や Ge 検出器といった**高性能設備を基盤化**することで、全実験的研究のさらなる高度化・効率化を実現できる。また、**低温技術**は、 $0\nu 2\beta$ ・暗黒物質探索の双方で**将来の有力技術**と目されており、ニュートリノ質量の順階層領域を狙う $0\nu 2\beta$ 探索や、GeV を切り MeV 程度までをカバーする暗黒物質探索、そしてアクシオンやアクシオンの物質(ALP)を探索する素子や装置を開発し、将来の超高感度探索計画の礎とする。理論面では、宇宙の物質起源を説明する有力理論である**レプトジェネシス理論**を生み出した伝統を持ち、世界をリードする理論グループが、暗黒物質分布のシミュレーション計算、 $0\nu 2\beta$ の核行列要素計算を取り込み、各実験の観測結果が相乗的に成果を生み出すシナジーとして機能する。また**超新星を中心とする理論班**は、3次元爆発計算で世界をリードする研究者、その後のクーリングを含む 100 秒程度までをカバーできる研究者が集い、超新星爆発の前兆現象から爆発後 100 秒までをカバーできる、**世界トップの体制**を構築する。クーリングまでを含め、状態方程式の研究も進めることで、宇宙の歴史解明に重要な役割を果たす。さらに、ビッグバンでの Li 生成や r 過程、太陽系の始原隕石にも波及できる化学進化の第一線の研究者との共同研究で、宇宙の物質進化を解き明かし、地球ニュートリノ観測へ接続することも考慮している。理論研究を拡充したことで、超新星爆発による暗黒物質分布の変動、中性子星の温度観測を使った暗黒物質や ALP への制限、超新星ニュートリノを使ったニュートリノ振動研究、ビッグバン元素合成での Li 問題と関連づけた標準理論を超えた理論研究など、新たな多様な展開も期待される。

● 研究期間終了後に期待される成果等

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

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

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

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

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

(6)**低温技術**:**極低バックグラウンド希釈冷凍機**、ならびに冷却強磁場空洞を開発・整備し、多様な超高分解能低温温度センサー(NTD,MMC,KID)を応用した検出器を開発するとともに、テスト環境での $0\nu 2\beta$ 探索・低質量暗黒物質探索を行い、アクシオン探索の技術を確認する(D02)。

(7)**理論研究**:**物質粒子の起源から宇宙進化への一連の理論的枠組みを構築**し、実験的に得られる情報を宇宙の歴史の系統的理解に反映させる。また、 $0\nu 2\beta$ 核行列要素の精度向上(分担者の昇任による海外転出に伴い A01 公募と連携する)、暗黒物質分布の理論的不定性を低減する(E01)。原始中性子星からのニュートリノ・超新星背景ニュートリノを含む超新星ニュートリノの理論モデルを確認し、宇宙の化学進化との有機的関係を扱う分野を構築する(E02)。

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

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

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

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

● 審査結果の所見における指摘

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

対応状況: E02 は、超新星背景ニュートリノの理論計算で、C01 の SK-Gd による観測に備えている。また、ニュートリノの評価に加えて、重元素量の時間発展（化学進化）も総合的に取り扱い、放出されるニュートリノと重元素量・形成される中性子星の質量の評価、地球ニュートリノ源としての中性子星連星合体時の r 過程を経て、A01 の KamLAND が観測を実現している地球ニュートリノと C01 の SK-Gd が目指す超新星背景ニュートリノを結びつける総合的な研究が実現する。審査結果の所見で指摘された天文学と地球物理学に関連し、多様な研究計画を内包することで実現できる学理の開拓であり、複数の計画研究が互いに補強し合うことを実現するものである。領域運営としては、この天文学的な元素合成と地球の重元素量分布を結びつける研究体制強化のため、2020 年度より宇宙化学進化を専門とする国立天文台の辻本拓司氏を E02 の研究分担者に加えた。その結果、天の川銀河内での太陽系形成に関する研究が進み、太陽系が形成された領域は、重元素量の多い銀河系中心に近い領域であることを明らかにした。また地球ニュートリノ源となる、ウラン・トリウム量に関する議論も開始した。C01 と E02 が合同開催した第 6 回超新星ニュートリノ研究会（2020 年 1 月）では、辻本氏に「理論からの宇宙化学進化」、国立天文台の青木和光氏に「星観測からの宇宙化学進化」、東工大の横山哲也氏に「隕石分析からの宇宙化学進化」というレビュー・チュートリアル講演を依頼し、多くの領域メンバーが天文学と地球科学の両面から宇宙の化学進化を学ぶことができた。さらに、2020 年度に入ってから、新学術領域「冥王代生命学」の計画研究代表で地球科学の専門家である東工大の丸山茂徳氏や理化学研究所の戒崎俊一氏との共同研究も立ち上げた。彼らが提唱する大陸三層モデルに対して、稼働中の KamLAND や将来計画として検討されている海洋底ニュートリノ実験での地球ニュートリノ観測による識別可能性を調査している。丸山氏には、第 7 回超新星ニュートリノ研究会（2021 年 1 月）で、地球科学の基礎と大陸三層モデルについて詳細なチュートリアル講演を依頼し、再び多くの領域メンバーの学習に役立った。他にも関連実績として、超新星ニュートリノ研究会での地球ニュートリノの議論をきっかけに、太陽系の移動と地球史的現象の関連が論文発表（謝辞に A01 の研究代表者）された。また、A01 が推進する KamLAND では、東京大学地震研究所との共同利用による地球モデル高精度化の取り組みや新学術領域「核-マントル共進化」(H27-31)への参画もあり、メンバーによる地球化学者・岩石学者・地震学者などと共著の論文発表もある。

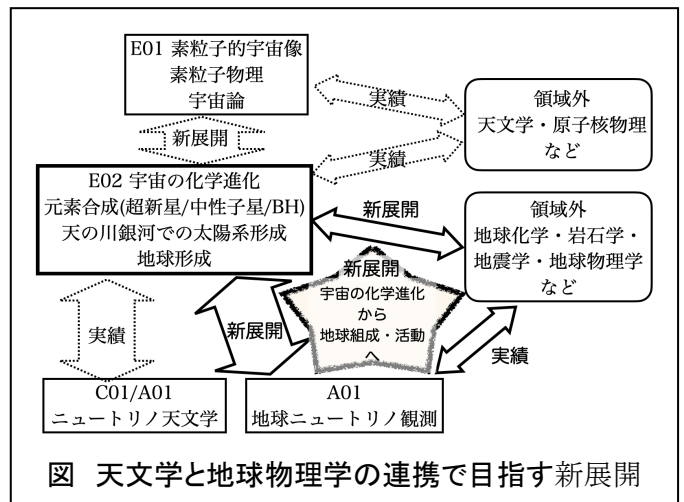


図 天文学と地球物理学の連携で目指す新展開

● 留意事項 1

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

● **対応状況:** 宇宙の物質生成から、その後の大規模構造の形成や星の進化を決定づける暗黒物質の解明は、素粒子的宇宙像の核心であり、0v2β探索で物質生成解明に挑む A 班と暗黒物質を探索する B 班は、E01 の研究で関連づきシナジーを形成する。星進化の詳細は天文学的要因が重要であり、新設 E02 の研究と C 班の超新星背景ニュートリノ観測によって、化学進化とともに解明を進められ

る。大規模構造形成と星進化の境界領域は E01 と E02 の連携が重要であり、また未知の素粒子の存在が影響する激しい天体現象は、E01 と E02 が連携する格好の舞台である。本領域が**新たに取り組む化学進化と地球科学の関係**は、上述の「審査結果の所見における指摘」にあるように、E02 が核となって C01 がもたらす超新星背景ニュートリノ・太陽ニュートリノの情報と、現在の較正点として A01 がもたらす地球ニュートリノの情報を関連づけることでシナジーが形成される。地球を扱うには銀河系での太陽系形成が重要課題であり、研究体制を強化のために、E02 の分担者に宇宙化学進化が専門の辻本氏を加えたことは、前述のとおりである。A 班、B 班、C 班は、宇宙の始まりから地球形成までを実験的に広くカバーし、E 班によって学理として互いに補強し合う関係が構築されている。

● 留意事項 2

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

● **対応状況**: (**連携活性化と若手育成強化**) 本領域は幅広い宇宙の時代を扱い、新設の D02 が取り組む技術開発は新規性が高いため、若手育成も意識して、**チュートリアルを特に重視した多種の研究会の開催を増やし、議論を深めることで連携を活性化している**。領域では、極低放射能コミュニティのメーリングリストを運営しているのに加え、Slack のワークスペースを新たに開設し、研究会でも活用することで若手の利用者を増やし、多くの若手を含む構成員と幅広い情報交換を行ない、運営にも反映させている。**(波及促進)** D02 が取り組む低温技術は幅広い応用が見込まれるため、量子デバイスや物性研究への波及を促進し、東北大学 AIMR、通信研究所、ニュートリノ科学研究センター、米国パーデュー大学が取り組む連携研究“Quantum Sensing: From Materials to Universe”が、東北大学「新領域創成のための挑戦研究デュオ」に採択された。**(設備有効活用促進)** また、設備の更なる有効活用を実現すべく、領域外の極低放射能測定にも貢献するほか、地下クリーン環境の整備では領域外の意見も取り入れた設計を行なっている。さらに、東北大学の宇宙創成物理学国際共同大学院で実施している高度実験プログラムでも有効活用し、先進性の高い教育にも貢献している。

● 中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

● **所見内容**: …期待どおりに進展していると判断できる。…低バックグラウンドを目指した純化技術での他分野との交流や、地球ニュートリノ測定を通じた地球物理学との協調など、他分野との交流の進展も認められる。後半の研究期間では、領域としての相乗効果を発揮した広がりのある展開とあわせて他分野への波及も期待される。

● **対応状況**: 中間評価では、期待通りの進展との評価を得ており、他分野との交流についても進展しているとの評価を得た。留意事項はなかったものの、領域内での相乗効果を発揮した展開や他分野への波及の期待が示されていた。

領域としての相乗効果については、計画研究間や公募研究も含めた連携を進めることで、多くの共同研究や共著論文を出版した。また、連携の成果として、東北大学ニュートリノ科学研究センター(RCNS)と大阪大学核物理センター(RCNP)が、極稀現象フロンティアでの研究を展開し、技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施することを目的として、「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」(KERNEL)を組織整備として開始した。さらに、KamLAND エリアに KERNEL の活動を支える純空気製造装置や純水製造装置を備えるクラス 1 のスーパークリーン施設が 2025 年 3 月に竣工する。ここに導入される装置も領域の知見を取り込んだものである。地上にあるだけで宇宙線による放射化が問題となる本分野で、地下にスーパークリーン施設を有することは大きなアドバンテージとなり、技術継承を確実なものとし、技術革新を生み出す原動力となる。これも本領域での活動の成果である。これら分野を長期的に支える新しい拠点・基盤は、本領域の活動なくしては実現し得なかったものである。また、他分野への波及においても、審査結果の指摘内容への対応の延長として、地球科学研究者と連携した海洋底ニュートリノ検出器プロジェクトが日本学術会議の未来の学術構想に掲載されたほか、D02 の極低温センサー技術開発に関連して RCNS と KEK-QUP が MoU を交わし CryoLab の構築を開始した。また、宇宙背景放射観測用技術開発での性能試験への低放射能環境の提供、量子コンピュータへの適用を目指した量子ドットの放射線耐性の評価など、分野外への波及を実現できた。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定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、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 目標と達成度

- **研究項目 A01 の目標と達成度:**(期間内目標) KamLAND-Zen 実験によって逆階層構造に切り込み、複数の理論モデルを検証できる 40meV の感度を達成する。地球ニュートリノ観測では、地球モデル精度を凌駕する観測精度でモデル選別を進める。マルチメッセンジャー天文学に関しては、低エネルギー天体ニュートリノ観測を担当し、天体現象との相関研究や近傍超新星前兆ニュートリノアラーム構築を行う。(達成度) 中性子多重度を用いた長寿命破砕核の低減、機械学習を用いたバックグラウンドの識別、老朽化で変化の激しい検出器特性を精緻に較正して補正する位置・エネルギー再構成プログラムの開発などによって、期間を通して二重ベータ崩壊探索を安定稼働し、探索感度を大幅に向上した。原子炉ニュートリノスペクトルの詳細な理解と、海外原子炉の稼働状況も取り込んだ原子炉ニュートリノフラックス評価の高精度化により、地球ニュートリノ観測の誤差縮小を達成した。大気ニュートリノや高速中性子などの天体ニュートリノ観測のバックグラウンド評価の精緻化お行い、広範な天体ニュートリノ研究を実施した。天体ニュートリノ関連では、9 件の国際共著論文の発表に加え、超新星ニュートリノアラームの国際的な協働への参画、前兆ニュートリノアラームの運用開始の上で SK との協働も実現した。また、カムランド高性能化のための技術開発目標を全て達成した。主要な成果は後述する。(達成度 120 %)
- **研究項目 A02 の目標と達成度:**(期間内目標) ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 測定および次世代測定器開発を行なう。次世代測定器の飛躍的感度向上には、高純度 CaF_2 結晶製造 ($10\mu\text{Bq/kg}$ 以下)・ CaF_2 蛍光熱量検出器 (エネルギー分解能 0.5%)・ ^{48}Ca 濃縮技術開発 (狭線幅レーザーと濃縮装置構築) を行う。(達成度) $10\mu\text{Bq/kg}$ 以下の高純度結晶製造は、研究期間前半に実現し、後半には ^{48}Ca を濃縮した際に必要となる歩留まりのよい高純度化法の開発を進めることができた。 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 測定結果は論文発表し、こちらもさらなる高感度結果を得るための解析手法の改善を進めることができた。 ^{48}Ca 濃縮では注入同期レーザー方式を導入し、周波数安定性が要求以上の狭線幅を満たしたシステムを実現した。現在、予定通り 23 個のレーザー素子を用いたシステムを構築した。また、濃縮装置の設計を進め、メインチェンバー・原子ビームチェンバー・カルシウムモニタ等からなる基本濃縮装置を構築した。濃縮度については、研究開始時に検討していた方法ではなく 2 段階濃縮によって実現することとした。D02 と連携して、 CaF_2 を蛍光熱量検出器として動作させて、結晶内で発生位置依存性を取り除ける事象では、目標分解能を超えたエネルギー分解能 0.2% まで到達できることを確認できた。(達成度 100%)
- **研究項目 B01 の目標と達成度:**(期間内目標) XENON 実験では 20 トン年の暴露量で暗黒物質と核子の散乱断面積 $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$ を達成できる感度を実現し、大発見を目指す。これには、本研究が貢献する中性子検出器が本質的に重要である。(達成度) 硫酸ガドリニウムを導入する前に純水を用いた中性子カウンターを用いて暗黒物質探索を行い、初の結果を出した。すでに中性子タグ効率は 53% 程度を達成し、前身の XENON1T 検出器とほぼ同じ暴露量であったがそれを超える感度を達成できた。その後、少量の硫酸ガドリニウムを導入し、中性子カウンターと純化システムを運転し、タグ効率約 77% を達成できた。これにより硫酸ガドリニウム全量を導入することで予定通り約 87% のタグ効率を実現できる。中性子検出器のノイズレベルが低く、不感時間を増やすことなく期待以上に低い敷居値を実現したのは期待以上の成果である。なお、液体キセノン TPC 電極の不具合のため、予定通りの電場が印加できておらず修理を予定しており、全量を用いた実証は TPC の修理後となる。TPC を修理し、期待通りの性能で運転を行うことさえできれば、当初の目的である暗黒物質探索の感度 $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$ を達成できる。本研究項目で責任を持つ低ノイズの中性子検出器の性能が実証できたのは C01 との連携による成果である。(達成度 99 %)
- **研究項目 B02 の目標と達成度:**(期間内目標) ガス検出器(NEWAGE)、原子核乾板(NEWSdm)を用いた、方向に感度を持つ暗黒物質探索を行う。NEWAGE では 30cm 角低 BG μ -PIC 製作、DAMA 領域探索開始を目標とする。NEWSdm は、赤道儀を用いた地下環境での暗黒物質探索実験を目標とする。(達成度) 領域の技術的な基盤である「低バックグラウンド技術」を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索を行った。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) および低バックグラウンドガス純化材の開発に成功、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。また、原子核乾板を用いた研究では地上・地下の環境での中性子測定によるデモンストレーションを経て、初の方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行った。(達成度 100%)

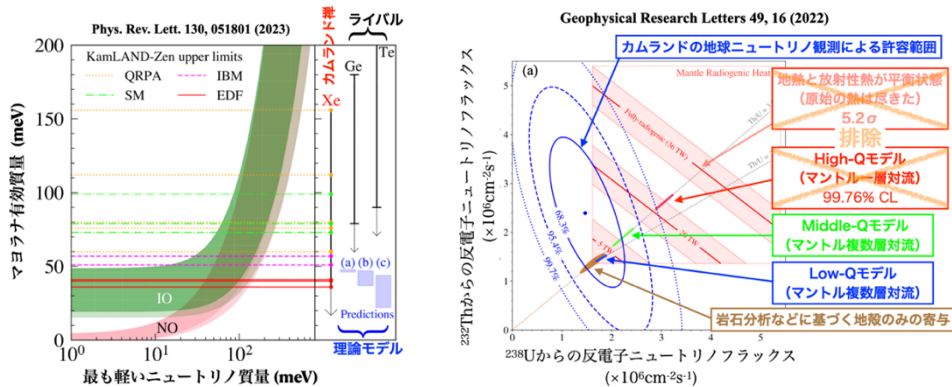
- **研究項目 C01 の目標と達成度:**(期間内目標)SK-Gd を初期フェーズから一段と高性能化して、世界初の超新星背景ニュートリノの検出を目指す。それにより、宇宙の星形成の歴史と、そこで重要なニュートリノの役割を明らかにする。具体的には、5 年間の観測で得られたフラックスやスペクトルの情報から、超新星爆発やその後クーリングへ至るプロセスの理解、星形成率等、宇宙星形成史モデルの妥当性を、詳しく評価する。(達成度) 2020 年度に Gd 濃度 0.01% で運用開始し、中性子捕獲事象の効率向上を確認した。500 日程度の観測で、5 倍以上の期間観測した純水時と同等な超新星背景ニュートリノへの制限を得た。その後 26 トンの超高純度硫酸ガドリニウム八水和物の開発製造を完了させ、2022 年度に Gd 濃度を 0.03% へ上昇させた。最大のバックグラウンド源である大気ニュートリノによる中性子カレント反応を削減する手法も開発した。2023 年 9 月までの観測データを解析したところ、まだ予備的な結果でありさらなる改善が見込まれるが、すでに、超新星爆発の平均温度が高いとするいくつかの理論モデルを世界で初めて排除している。この解析を行う中で、想定していなかったが、原子炉ニュートリノも SK で初めて観測できていることが分かった。(達成度 105%)
- **研究項目 D01 の目標と達成度:**(期間内目標)各計画研究がもつ低放射能技術を共通基盤化して各グループに還元することを目的とする。具体的には、検出器材料中の放射性不純物 (RI) ・水やキセノンガス中の希ガス RI ・地下環境中性子・ Gd^{3+} イオン発光を測定し、極低放射能技術研究会等で成果を発信する。(達成度)バックグラウンド頻度(60-2700 keV)が $81.3 \text{ kg}^{-1}\text{Gd}^{-1}$ と世界トップレベルに低い Ge 半導体検出器を開発し、各実験班の検出器材料中の放射性不純物含有量測定を進めた。次に、バックグラウンド頻度が 1 mBq/m^3 以下のラドン検出器を開発し、SK-Gd と XENONnT で運用を開始した。また、神岡地下実験室の環境中性子フラックスを 2 台の ^3He 比例計数管で約 2 年半にわたって測定した。そして、レーザー共鳴イオン化による放射性希ガス微量分析装置を立ち上げ、信号の検出器に成功した。さらに、レーザー励起を用いて硫酸ガドリニウム水中の Gd^{3+} イオン発光を測定し、SK-Gd の観測には問題にならないことを実証した。最後に、極低放射能技術研究会を 4 回開催し、領域内外の研究者と最新の低放射能技術開発の成果について情報交換および研究交流を行った。(達成度 100%)
- **研究項目 D02 の目標と達成度:**(期間内目標)検出器技術として極低温技術を新たに取り入れることで、 $0\nu 2\beta$ 探索検出器の高感度化と暗黒物質探索の範囲拡大を図る。(達成度)極低温($\sim 10\text{mK}$)に不活性 CaF_2 結晶を冷却し熱信号と光信号を超伝導センサーを使用して観測する CaF_2 蛍光熱量計を世界で初めて実現し、熱信号の位置依存性を排除した場合のエネルギー分解能が 4.3MeV 付近において 0.5% 以下になることを実証できた。これにより ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 事象探索において $2\nu 2\beta$ 信号のバックグラウンドを無視できるレベルまで低減できる。低温(4K)強磁場(9T)環境下で目標とした Q 値が 10^5 以上の共振空洞の開発に成功し、高感度アクシオン探索実験への道を拓いた。研究期間内にアクシオン探索実験のエンジニアリングランにも成功し、当初を上回る成果を得た。当初の計画目標である(発生準粒子数換算で) 10eV 以下の信号を検出できる超伝導検出器(KID)の開発に成功し、B01,B02 が実現した暗黒物質探索の探索範囲を低質量領域まで広げることが可能とした。低温技術研究会を対面で 2 回、オンラインのセミナー形式で 6 回開催し領域外の研究者との情報交換や連携拡大を行った。(達成度 100%)
- **研究項目 E01 の目標と達成度:**(期間内目標)(1)宇宙の物質反物質非対称性の起源およびニュートリノ質量生成機構の解明、(2)暗黒物質の正体・起源の解明、(3)(1)(2)を含む新たな素粒子模型・宇宙シナリオの構築を目的とした理論研究を行う。(達成度)(1)においては、最小 $U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージ模型において、インフラトンの右巻きニュートリノへ非熱的崩壊に伴うレプトジェネシス、および熱的レプトジェネシスの解析を行い、ニュートリノ振動実験の観測値を説明するパラメータ領域に宇宙の物質反物質非対称性の観測値を説明することができることを明らかにした。(2)においては、熱的暗黒物質の包括的研究、冷たい暗黒物質(CDM)に基づいた宇宙論的流体シミュレーションを用いた暗黒物質分布に関する諸問題に関する研究、軽い暗黒物質の散乱の計算に応用可能な有効場理論の開発などを行なった。(3)においては、インフレーションを含むレプトジェネシスシナリオの構築や重力波観測に兆候を持ち得る模型の構築などを行った。また D01,D02 の分担者らとの共同研究によって近傍超新星由来のアクシオンを検出する「超新星アクシオン望遠鏡」検出器のアイデアを提案、論文として出版するなど、当初は想定していなかった領域内連携による成果も得られた。(達成度 100%)
- **研究項目 E02 の目標と達成度:**(期間内目標)超新星ニュートリノと化学進化の総合的研究の開拓を目指している。(達成度)山田は住吉らと共同で、世界で唯一 3 次元運動量空間内でのニュートリノ分布を計算できるボルツマンソルバーを開発してきたので、最高水準のスーパーコンピュータを用いて爆発モデルや放出される

ニュートリノのシミュレーションを行い、ニュートリノ運動量の角度分布が重要となるニュートリノ集団振動や原始中性子星の対流が起こる領域に関する論文を出版できた。鷹野・富樫による状態方程式と自己無矛盾な核子制動放射ニュートリノ放射率については、核子の有効質量を介した影響が大きいことを見出した。中里や鈴木が行った球対称モデルをベースにした系統的な超新星ニュートリノ研究では、状態方程式や中性子星のパラメータを観測から探る手法が開発できた。超新星背景ニュートリノ・化学進化・地球ニュートリノの総合的研究については、鈴木を中心に種族合成計算コードの改良や地球科学研究者との共同研究として大陸三層モデルによる地球ニュートリノの計算を現在も進めている。一方、辻本による化学進化の研究成果を中里が超新星背景ニュートリノの評価に組み込み、このモデルではブラックホール形成イベントに起因する高エネルギーニュートリノの量が多くなることなどを見出し、論文として発表できた。(達成度 100%)

(2) 得られた成果

● 研究項目 A01

計画研究の成果: $0\nu 2\beta$ 探索では、KamLAND-Zen 400/800 を統合した解析を実施し、世界で初めて逆階層領域に切り込む制限 (36-156meV 以上を排除) を与え PRL 誌に発表した。複数の理論モデルにもかかわらず、高性能化のための開発は、プロトタイプでの性能検証を経て、高性能化プロジェクトとして提案し、文科省のロードマップ 2023 に掲載された。地球ニュートリノ観測では、地球モデルの精度約 20% を凌駕する観測精度 15% を実現し GRL 誌に発表した。High-Q モデルと呼ばれるマントルの一層対流を予言するモデルを排除することに成功した。地球内部のダイナミクスに対する知見(マントルの多層対流)に加えて、モデルの仮定に問題があることを示唆することから、地球内部組成に対しても知見を与えており、ニュートリノ地球科学の質的転換を果たした。日本学術会議の未来の学術構想 2023 には、カムランドの高性能化プロジェクト (No. 178) と地球ニュートリノ観測を発展させる計画(No. 106)の 2 件が掲載されている。



公募研究の成果: (小原) 高圧キセノンガス検出器開発において、光検出器の増強により有効面積を拡張し二重 β 崩壊 Q 値での世界最高レベルのエネルギー分解能 0.67% (FWHM) を実証した。また、D01 との連携により高放射線量部品を特定できた。A01 との連携により大型化の基本設計も行った。(福田) 二重ベータ崩壊事象と ^{208}Tl のバックグラウンドをチェレンコフ光の情報を利用して識別するため、高速 PMT を用いて波形弁別を行う装置を製作し複数の較正線源でのテストを行った。(日野原)アイソスカラー型対相関の不定性を低減する原子核密度汎関数理論に基づく原子核行列要素計算において、高計算量の被積分関数計算の並列化で約 20 主量子数の広い模型空間計算を実現した。中間状態積算では収束性の良い積分経路を設定し、 ^{136}Xe を含む 4 核種を計算した。2 期目では、 $0\nu 2\beta$ に加え、 $2\nu 2\beta$, $0\nu \text{ECEC}$ にも計算を拡張した。また、QRPA での計算量を数桁減らすことが期待される有限振幅法のエミュレータの定式化を実現した。(尾崎)加圧によってキセノン密度を高める研究を実施し、高圧化での Xe 含有液体シンチレータの発光特性を測定した。測定結果に基づき、新たに開発したニューラルネットワークを使った解析手法で、宇宙線の原子核破碎による長寿命 BG を約 7 割低減することに成功した。

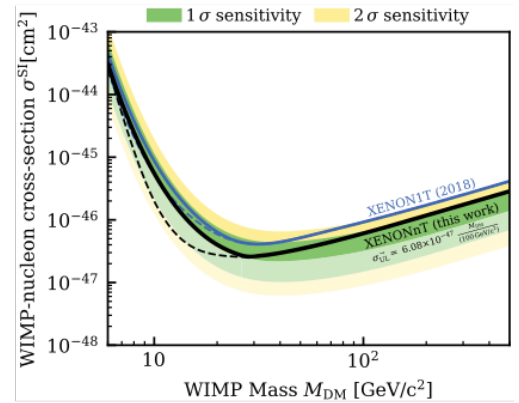
● 研究項目 A02

計画研究の成果: 現行 CANDLES 検出器の 130 日の測定データを用い、 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 崩壊の世界最高感度と同等の測定結果を得て Phys. Rev. D に出版した。目標としていた $10\mu\text{Bq/kg}$ 以下の結晶モジュールを、結晶原料の選定および事前判定を行うことで、歩留まりよく製造することに成功した。注入同期システムを導入した狭線幅青色レーザーシステムを実現し、論文発表した。また、 CaF_2 蛍光熱量検出器開発では、発生位置依存性を取り除ける事象に対して目標エネルギー分解能を超えたエネルギー分解能 0.2%まで到達できることを確認し J. Phys. Conf. Ser.に報告した。

公募研究の成果: (飯田)GAGG 結晶の高純度化のために、高純度原料を用いて結晶育成を行った。神岡施設にて測定を行い、バックグラウンド評価を進め、バックグラウンドレベルが 1/10 に低減していることを確認した (PTEP に発表)。(上向井)レーザーを高出力化するためのレーザー素子の開発を行った。本技術を応用し、2024 年度以降に 422nm の青色レーザーの制作を進めることとなった。

● **研究項目 B01**

計画研究の成果: XENONnT 実験で原子核反跳を用いた暗黒物質探索の初の結果を出した(図)。前身の XENON1T と同程度の曝露量であったが、それを凌ぐ結果を得た。また、XENON1T で見られた電子反跳現象の超過については、XENONnT 実験では見られず、太陽アクシオン等未知の現象に対する世界一厳しい制限を与えることができた。硫酸ガドリニウムを用いた水チェレンコフ光型中性子検出器を、暗黒物質探索で初めて実用化することに成功し、目標を達成した。他にも XMASS のデータ解析により、様々な未知の物理現象に対する制限を与えることに成功した。また XMASS の 5 年に渡る全データの解析により、0.35GeV から 10TeV といった広い範囲の暗黒物質に制限を与え、その結果をまとめた最終論文を出版しコラボレーションの活動を完結することができた。なお、将来の高感度の実験のための研究開発(ラドン抑制、新センサー開発、液体キセノンからの赤外線発光と粒子種同定の研究)も進み、研究発表や論文発表としての成果も得られた。



● **研究項目 B02**

計画研究の成果: NEWAGE では、予定通り 30cm 角低 BG μ -PIC を製作した。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、論文を出版した。ガス純化に関しては、低バックグラウンド吸着剤の開発を行い論文出版した。NEWSdm では、地上・地下の環境での中性子測定によるデモンストレーションを経て、初の方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行った。D01・公募研究との表面アルファ線検出器開発の共同研究が進み、共著論文を出版した。

公募研究の成果: (中村)ミグダル効果検出の観測可能性に関して B01・B02・E01 と共著論文を出版した。(東野)低質量暗黒物質の方向有感探索に用いることのできる技術としてピクセル IC の製作を行った。

● **研究項目 C01**

計画研究の成果: 公募研究および D01 との密接な連携により追加導入用の高純度硫酸 Gd 開発、製造、評価を実施した。そして 2022 年度に 0.03%Gd 濃度を実現させ、世界最高感度の超新星背景ニュートリノ探索を行った。2023 年 9 月までの観測データから世界で最も厳しい超新星背景ニュートリノに対する制限を更新した(図)。すでにいくつかのモデルで予言される領域を排除している。

公募研究の成果: (坂口)硫酸 Gd 中の極微量放射性核種定量を目指し、誘導結合プラズマ質量分析計の定量限界低減に取り組んだ。そして硫酸 Gd 中の ^{226}Ra や ^{227}Ac の評価方法を確立し、SK への硫酸 Gd 追加時の製品スクリーニングに大きく貢献した。

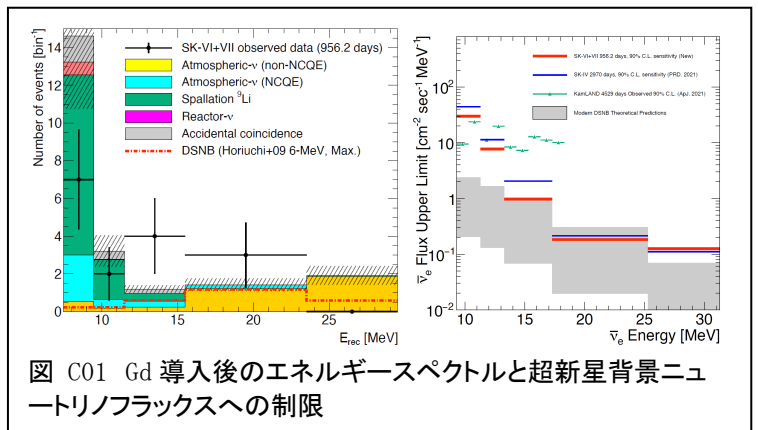


図 C01 Gd 導入後のエネルギースペクトルと超新星背景ニュートリノフラックスへの制限

● **研究項目 D01**

計画研究の成果: 世界トップレベルにバックグラウンドが低いゲルマニウム検出器を開発し(図)、C01 の硫酸 Gd および各実験グループの検出器材料のスクリーニングを行った。そして、硫酸 Gd 水中のラドン濃度を測定できるラドン検出器を 4 台開発し、C01 の SK-Gd および B01 の XENONnT で運用開始した。また、硫酸 Gd 水での Gd³⁺イオン発光の観測に成功し、C01 の SK-Gd の観測に問題ない発光量であることを実証した。さらに、神岡地下実験室の環境中性子を約 2 年半測定した。加えて、極低放射能技術研究会を 4 回開催し、成果発信を行った。

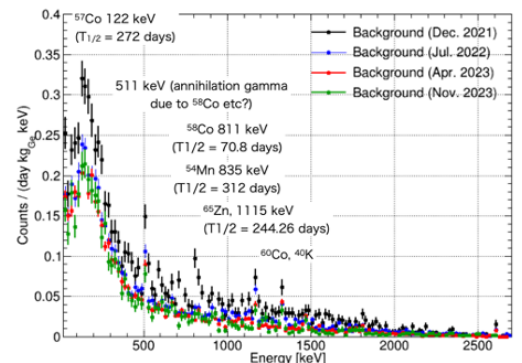


図 D01 開発したゲルマニウム検出器のバックグラウンドスペクトラム

公募研究の成果: (伊藤) アルファ線イメージ分析装置の低バックグラウンド化を進め、各実験グループの検出器材料のスクリーニングを行った。(鷺見) 地上と地下で観測される落雷磁場の性質をまとめ、論文出版した。また、落雷による磁場雑音が現在の KAGRA の感度よりも十分に小さいことを確認した。さらに、4 年間の雨量データおよび 3 年間の地下排水量のデータを取得し、D01 の地下環境中性子フラックスとの相関を調べた。(鶴) SOPIX カメラの残留バックグラウンドの低減に成功し、太陽アクシオン探索準備を完了した。

● 研究項目 D02

計画研究の成果: 超伝導センサー(MMC)を使った信号読み出しにより CaF_2 結晶を使用した蛍光熱量計を世界で初めて実現した。意図的に多量混入した ^{238}U 娘核の α 線事象を使った解析で、位置依存性を排除した場合にエネルギー分解能 $\sigma = 0.2\% @ 5.5\text{MeV}$ を達成し、高い分解能(5.5σ)で β 線事象との粒子識別に成功した。低温(4K)強磁場(9T)環境を整備し、超高純度銅/フォトリソグラフィ技術/第二種超伝導体バルク/超伝導体薄膜技術を用いて作成した空洞で、目標の Q 値 10^5 を達成した。フォトリソグラフィ結晶構造を使った空洞開発のアイデアに関する論文を PTEP に発表し、アルミナ結晶を用いて高磁場(9T)下で Q 値 10^5 を達成した。超高純度銅空洞を用いたアクシオン探索実験のエンジニアリングランにも成功し、当初を上回る成果を得た。AI 製 KID の開発では、当初の計画目標である 10eV 信号を検出できることを準粒子数変化の測定から確認することに成功した。KID を CaF_2 基板に実装する方法を確立し、詳細な性能評価をまとめて論文として出版した。

公募研究の成果: (成瀬) 最先端直接描画技術を駆使したフォトリソグラフィ技術により、インダクタンス部分に $50\mu\text{m}$ 長のエアブリッジ構造を組み込んだ超伝導検出器の作製に成功した。このデバイスで 20 万程度の高い共振 Q 値を確認し、 α 線の検出にも成功した。

● 研究項目 E01

計画研究の成果: 宇宙の物質反物質非対称性の起源に関して、最小 $U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージモデルでの熱的および非熱的レプトジェネシスで、ニュートリノ振動実験の観測値を説明するパラメータ領域においてバリオン数の観測値を説明できることを明らかにした。熱的暗黒物質の包括的研究により、弱電荷を持つスカラー暗黒物質などにおいて、直接探索、間接探索、加速器実験の相補的役割を定量的に明らかにした。冷たい暗黒物質(CDM)に基づいた宇宙論的流体シミュレーションを用いて、初代銀河の形成過程、超新星フィードバックモデルの構築、巨大ブラックホール種の形成、ダストの成長・破壊モデル、ダークマターと中性水素分布などの諸問題について研究を進めた。領域内連携により、将来のアクシオン・ヘリオスコープ検出器を利用した「超新星アクシオン望遠鏡」検出器の提案をし、 $O(100)\text{pc}$ 以内の近傍超新星由来のアクシオンを検出しようことを明らかにした。

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

● 研究項目 E02

計画研究の成果: ボルツマン方程式を直接解く最先端のコードを用いた軸対称シミュレーションなどを通じて、ニュートリノ集団振動や原始中性子星の対流が起こる領域を明らかにした。また宇宙の化学進化の研究成果を取り入れた超新星背景ニュートリノの予測計算を行った。さらに超新星ニュートリノの観測から中性子星の状態方程式などに制限を付ける手法を開発した。現実的な核力から出発した状態方程式と自己無矛盾な核子制動放射過程ニュートリノ放射率の評価を行い、有効質量の影響が大きいことを明らかにした。

公募研究の成果: (中村) SN1987A に対応する空間 3 次元の計算を行い、衝撃波の復活で電子型・反電子型ニュートリノ光度が減少すること、原始中性子星内部の対流によりニュートリノ球半径が膨張することで平均エネルギーは減少しミュー型・タウ型ニュートリノの光度は増加することを発見した。(吉田) 太陽金属量の大質量星の後期進化で、対流層境界を通じた物質混合が効果的に起こる場合には、カリウムや中質量元素がより効果的に作られることを明らかにした。(加藤) ニュートリノ振動をモンテカルロ法で扱うコードを開発するとともに、ニュートリノの放出・吸収・散乱反応がニュートリノ集団振動に与える影響を明らかにした。(諏訪) 開発した超新星ニュートリノの解析解を用いて、超新星ニュートリノ観測データの解析コードを開発し、中性子星の質量・半径を精度よく決定できることを見出した。

7 研究発表の状況

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

•研究項目 A01(計画研究)

査読有論文: 全 35 件

[1] S.Abe, S.Asami, M.Eizuka, S.Futagi, A.Gando, Y.Gando, T.Gima, A.Goto, T.Hachiya, K.Hata, S.Hayashida, K.Hosokawa, K.Ichimura, S.Ieki, H.Ikeda, K.Inoue et al. (KamLAND Collaboration), Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen, Physical Review Letters 130, 051801 (2023). **Editors' Suggestion, Featured in Physics**

[2] S.Abe, S.Asami, M.Eizuka, S.Futagi, A.Gando, Y.Gando, T.Gima, A.Goto, T.Hachiya, K.Hata, K.Hosokawa, K.Ichimura, S.Ieki, H.Ikeda, K.Inoue et al. (KamLAND Collaboration), Abundances of Uranium and Thorium Elements in Earth Estimated by Geoneutrino Spectroscopy, Geophysical Research Letters 49, 16 (2022). **AGU Research Spotlight** (分野融合)

学会発表: 国際学会 92 件(招待講演 62 件)、国内学会 168 件(招待講演 3 件)

[3] K.Inoue, Status and prospects of KamLAND-Zen, UGAP2024, Sendai, 2024/3/4.

[4] N.Kawada, Latest result of geoneutrino measurement with KamLAND, TAUP2023, Vienna, 2023/8/28. (分野融合)

受賞等: 一部抜粋

川田七海, [2]に関連して、第 18 回日本物理学会若手奨励賞 (宇宙線・宇宙物理領域)(2024), 第 18 回宇宙線物理学奨励賞(2024), 第 25 回高エネルギー物理学奨励賞(2023)

渡辺寛子, 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2023), 第 24 回守田科学研究奨励賞(2022), 第 2 回米沢富美子記念賞(2020)

東北大学物理学専攻賞 (博士:安部清尚 2023, 尾崎秀義 2020) (修士:後藤駿 2024, 永塚穂里 2023, 儀間智美 2022, 酒井汰一 2022, 安部清尚 2020)

東北大学総長賞(竹内敦人 2022)

•研究項目 A01(公募研究)

査読有論文: 全 7 件

[1] Qunqun Liu, Jonathan Engel, Nobuo Hinohara, and Markus Kortelainen, Effects of quasiparticle-vibration coupling on Gamow-Teller strength and β decay with the Skyrme proton-neutron finite-amplitude method, Physical Review C 109, 044308 (2024). **Editors' suggestion**

学会発表: 国際学会 16 件(招待講演 13 件)、国内学会 6 件 (招待講演 4 件)

[2] 日野原伸生, Calculation of double-beta decay nuclear matrix elements using QRPA, 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, 2020/10/6

[3] 福田善之, ZICOS – Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic scintillator -, NEUTRINO 2020, 2020/7/1

[4] 小原脩平, 高圧キセノンガス検出器開発の現状, 新学術領域「地下宇宙」2021 年領域研究会, 2021/5/20

[5] 尾崎秀義, Machine learning status and prospects in KamLAND-Zen, 2023 fall meeting of APS DNP and JPS, 2023/11/26, Hawaii

•研究項目 A02(計画研究)

査読有論文: 全 18 件

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

[2] *T. Iida, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida 他, The energy calibration system for CANDLES using (n, γ) reaction, Nucl. Instr. Meth. A, **986**, 164727 (2021).

[3] *K. Tetsuno, ..., I. Ogawa, ..., S. Umehara, S. Yoshida 他, Status of ^{48}Ca double beta decay search and

its future prospect in CANDLES, Jour. of Phys.: Conf. Series, 1468, 012132, 2019. (領域内連携)

[4] *I Ogawa, ..., H Niki, S Tokita, N Miyanaga, M Uemukai, A Rittirong, S Umehara, K Matsuoka and S Yoshida, Laser isotope separation to study for the neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca , Jour. of Phys.: Conference Series, 2586, 012136, 2023.

学会発表: 国際学会 45 件、国内学会 102 件

[5] Saori Umehara, Current status and future prospects of the CANDLES experiment, Double beta decay and underground science (DBD23)/JPS/APS Meeting/, Hawaii, US, 2023/12

[6] 時田茂樹、狭線幅・高出力青紫色レーザーの開発 — ^{48}Ca の濃縮を目指して—、レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会、オンライン、2022 年 01 月 (分野融合)

•研究項目 A02 (公募研究)

査読有論文: 全 1 件

[1] Omori Takumi; Iida Takashi; Gando Azusa; Hosokawa Kei..., First Study of the PIKACHU Project: Development and Evaluation of High-Purity $\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$ Crystals for ^{160}Gd Double Beta Decay Search, Progress of Theoretical and Experimental Physics/2024(3)/p.033D01, 2024-02

学会発表: 国際学会 3 件、国内学会 7 件

[2] Takashi Iida, UGAP2024, The PIKACHU experiment for the study of Gd-160 double beta decay, Sendai, Japan, 2024 年 03 月

[3] 楠井大晴, 和田拓巳, 上向井正裕, 谷川智之, 片山竜二, レーザー学会学術講演会第 44 回年次大会, 日本科学未来館, 2024 年 01 月 (分野融合)

•研究項目 B01 (計画研究)

査読有論文: 全 36 件

[1] K. Abe ... S. Moriyama ... K. Martens, ... S. Nakamura ... et al., XMASS Collaboration, Direct dark matter searches with the full data set of XMASS-I, Phys. Rev. D 108 083022 (2023) pp083022-1-083022-19.

[2] E. Aprile ... K. Abe ... S. Kazama ... S. Moriyama ... K. Martens ... et al., XENON Collaboration, First Dark Matter Search with Nuclear Recoils from the XENONnT Experiment, Phys. Rev. Lett. 131, 041003 (2023) pp041003-1-041003-9.

[3] J. Aalbers ... K. Abe ... S. Kazama ... S. Moriyama ... K. Martens ... et al., A next-generation liquid xenon observatory for dark matter and neutrino physics, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 50 013001 (2023)

[4] E. Aprile ... K. Abe ... S. Kazama ... S. Moriyama ... K. Martens ... et al., Search for New Physics in Electronic Recoil Data from XENONnT, Phys. Rev. Lett. 129, 161805 (2022) pp161805-1-161805-10.

[5] E. Aprile ... K. Abe ... S. Kazama ... S. Moriyama ... K. Martens ... et al., Excess electronic recoil events in XENON1T, Phys. Rev. D 102 072004 (2020)

学会発表: 国際学会 56 件、国内学会 69 件

[6] S. Moriyama, Direct Detection of Particle Dark Matter, QUPosium2023, 2023/12/12

[7] M. Yamashita, XLZD: Ultimate WIMP Dark Matter Search, International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science”, 2023/12/3

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 4 件、メディア掲載 15 件、受賞 7 件

[8] 森山茂栄, 大発見に向けた研究の新展開: ニュートリノとダークマター、宇宙線研究所一般公開, 2023/11/3

•研究項目 B02 (計画研究)

査読有論文: 査読有論文 28 編、著書 1 件

[1] T. Shimada, S. Higashino, ... K. Ichimura, K. Abe, A. Takada, H. Sekiya, K. Miuchi, Direction-sensitive dark matter search with three-dimensional vector-type tracking in NEWAGE, PTEP (2023), ptad120 (領域内連携)

[2] T. Shiraiishi, S. Akamatsu, T. Naka, Environmental sub-MeV neutron measurement at the Gran Sasso surface laboratory with a super-fine-grained nuclear emulsion detector, Phys. Rev. C 107, 014608

[3] Hiroshi Ogawa, Kenta Iyoki, Minoru Matsukura, Toru Wakihara, Ko Abe, Kentaro Miuchi, Saori Umehara, Measurement of radon emanation and impurity adsorption from argon gas using ultralow radioactive zeolite, JINST 19 P02004 (2024) (領域内連携)

[4] K. Miuchi, Elisabetta Baracchini, Gregory Lane, Neil J. C. Spooner, S. E. Vahsen, J., CYGNUS, Phys.:

Conf. Ser. 1468 (2020) 012044.

[5] 身内賢太朗 (共著)「宇宙物理学ハンドブック」2020年2月(朝倉書店 ISBN978-4-254-13127-7)

5.6.1 暗黒物質直接探査 の項執筆(p762-767)

学会発表: 国際学会 38 件、国内学会 165 件

[6] Kentaro Miuchi, NEWAGE / CYGNUS-KM, CYGNUS 2023, University of Sydney, Australia 11th - 15th December 2023

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

[7] 身内賢太朗, 夢ナビ ミニ講義 「宇宙を満たす謎の物質ダークマター その正体を暴く！」

<https://douga.yumenavi.info/Lecture/PublishDetail/2024003375?back>

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

•研究項目 B02 (公募研究)

査読有論文: 全 1 件

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

•研究項目 C01 (計画研究)

査読有論文: 査読有論文 25 件、著書 1 件

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

[2] M. Shinoki et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), Measurement of the cosmogenic neutron yield in Super-Kamiokande with gadolinium loaded water, Phys. Rev. D 107, 092009 (2023)

[3] L. N. Machado et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), Pre-supernova Alert System for Super-Kamiokande, The Astrophysical Journal, 935, 40 (2022)

[4] K. Abe et al., First gadolinium loading to Super-Kamiokande, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1027 (2022) 166248

[5] Y. Nakano, et al., Measurement of the radon concentration in purified water in the Super-Kamiokande IV detector, NIM A 977, 11 October 2020, 16429.

[6] C. Simpson, H. Sekiya, Y. Takeuchi et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission, Astrophys. J. 885, 2 (2019).

学会発表: 国際学会 11 件、国内学会 43 件

[7] M. Vagins, NEUTRINO 2022 “SK-Gd”, June 2

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 23 件、メディア掲載 79 件

•研究項目 C01 (公募研究)

学会発表: 国内学会 2 件

[1] 坂口綾, 高マトリクス試料中の極微量放射性核種測定法確立—地下宇宙研究への応用, 新学術領域「地下宇宙」2020年領域研究会, 2020/6/2-3

[2] 坂口綾, 高久雄一, 宮田滉介, 鹿籠康行, 伊藤慎太郎, 市村晃一, 中島康博, 伊藤博士, 関谷洋之, 誘導結合プラズマ質量分析計による極微量放射性核種測定 (チュートリアル講演), 「第七回極低放射能技術」研究会, 2021/3/24-25

•研究項目 D01 (計画研究)

査読有論文: 全 10 件

[1] Y. Nakano, K. Ichimura et al., Evaluation of radon adsorption efficiency values in xenon with activated carbon fibers, PTEP (2020), 113H01 (2020).

[2] K. Abe, K. Ichimura, A. Takeda et al., Development of low-background photomultiplier tubes for liquid xenon detectors, Journal of Instrumentation, Volume 15, P09027 (2020).

- [3] S. Ito, K. Ichimura, M. Ikeda et al., Improved method for measuring low-concentration radium and its application to the Super-Kamiokande Gadolinium project, PTEP (2020), 093H02.
- [4] K. Hosokawa, M. Ikeda, T. Okada, H. Sekiya, K. Ichimura et al., Development of ultra-pure gadolinium sulfate for the Super-Kamiokande gadolinium project, PTEP (2022)013H01.
- [5] Y. Iwata, H. Sekiya, C. Ito, Emission characteristics of gadolinium ions in a water Cherenkov detector, PTEP (2022), 013H01
- [6] H. Ito, K. Wada, T. Yano, A. Minamino et al., Analyzing the neutron and γ -ray emission properties of an americium-beryllium tagged neutron source, NIM A 1057, 168701 (2023).
- [7] K. Ichimura, M. Ikeda, H. Sekiya, H. Ito, A. Minamino, S. Suzuki et al., Development of a low-background HPGe detector at Kamioka Observatory, PTEP, (2023), 123H01

学会発表: 国際学会 8 件、国内学会 67 件

- [8] Akihiro Minamino, Low background technologies for astroparticle experiments, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics 2024, 2024/3/6

アウトリーチ・メディア掲載等: アウトリーチ 12 件、受賞 3 件

•研究項目 D01(公募研究)

査読有論文: 全 5 件

- [1] K. Fushimi, H. Ito et al., Development of highly radiopure NaI(Tl) scintillator for PICOLON dark matter search project, PTEP 2021, 4, 043F01.
- [2] T. Akutsu, T. Washimi et al. (KAGRA Collaboration), Overview of KAGRA Calibration, detector characterization, physical-environment monitoring, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, 5, 05A102.
- [3] T. Washimi et al., Effects of lightning strokes on underground gravitational waves observatories, accepted in JINST (2021).
- [4] T. Washimi, T. Yokozawa et al., Response of the underground environment of the KAGRA observatory against the air pressure disturbance from the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2022, 113H02 (2022).

学会発表: 国際会議 5 件、国内学会 11 件

- [5] Tatsuki Washimi, Kamioka Lightning & Thundercloud observation and its application for the astroparticle experiments, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics 2024, 2024/3/6

•研究項目 D02(計画研究)

査読有論文: 全 3 件

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

学会発表: 国際学会 2 件、国内会議 11 件

- [2] S.Yoshida, Present Status of Low Temperature Detector for Neutrino-less Double Beta Decay, Neutrinos Electro-Weak interactions and Symmetries 2020-12, ONLINE, Dec.21, 2020
- [3] X. Lee, D.H. Kwon, K. Tetsuno, I. Kim, H.L. Kim, H.J. Lee, S. Yoshida, Y.H. Kim, M.K. Lee, S. Umehara, and T. Kishimoto, Study of a Large CaF₂(Eu) Scintillating Bolometer for Neutrinoless Double Beta Decay, 16th International conference on Topics in Astroparticle and underground physics, Toyama, Japan 8 - 14 September, 2019
- [4] S.Yoshida, Development of Scintillating Bolometer with Large Undoped and Eu-doped CaF₂ Crystals for Neutrino-less Double Beta Decay of ⁴⁸Ca, The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, ONLINE, June20 – July 2, 2020
- [5] K. Ishidoshiro, Kinetic inductance detectors on CaF₂ for spin-dependent dark matter search, 18th International Workshop on Low Temperature Detectors, Milano, Italy, 22-26 July 2019
- [6] 岸本康宏 暗黒物質アクシオン、暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 -高い Q 値の実現, 日本物理学会 2020 年秋季大会(オンライン開催)2020 年 9 月 14-17 日

•研究項目 D02(公募研究)

学会発表: 国内学会 2 件

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

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

•研究項目 E01 (計画研究)

査読有論文: 120 件

[1] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Tseng, K. Tsumura, Minimal Gauged $U(1)L\alpha-L\beta$ Models Driven into a Corner, Phys.Rev.D 99 (2019) 5, 055029.

[2] K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi, Dark Matter Heating vs. Rotochemical Heating in Old Neutron Stars, Phys.Lett.B 795 (2019) 484-489.

[3] S. Matsumoto, Y. S. Tsai, P. Tseng, Light Fermionic WIMP Dark Matter with Light Scalar Mediator, JHEP 07 (2019) 050.

学会発表: 国際学会 57 件(招待講演 45 件)、国内学会 36 件(招待講演 20 件)

研究会・勉強会の開催

2020/5/27, E02 とオンライン合同勉強会を開催。

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

•研究項目 E01 (公募研究)

査読有論文: 13 件

[1] S. Abe, G. Cho, K. Mawatari, Probing a degenerate-scalar scenario in a pseudoscalar dark-matter model, Phys.Rev.D 104 (2021) 035023.

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

•研究項目 E02 (計画研究)

査読有論文: 50 件

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

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

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

学会発表: 国際学会 41 件(招待講演 7 件)、国内学会 133 件(招待講演 4 件)

研究会・勉強会の開催

2020/1/6-7, 2021/1/7-8, 2022/1/6-7, 2023/3/2-3, 2024/2/29-3/1 C01 と合同で第 6-10 回超新星ニュートリノ研究会

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

2020/5/27, E01 とオンライン合同勉強会

•研究項目 E02 (公募研究)

査読有論文: 20 件

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

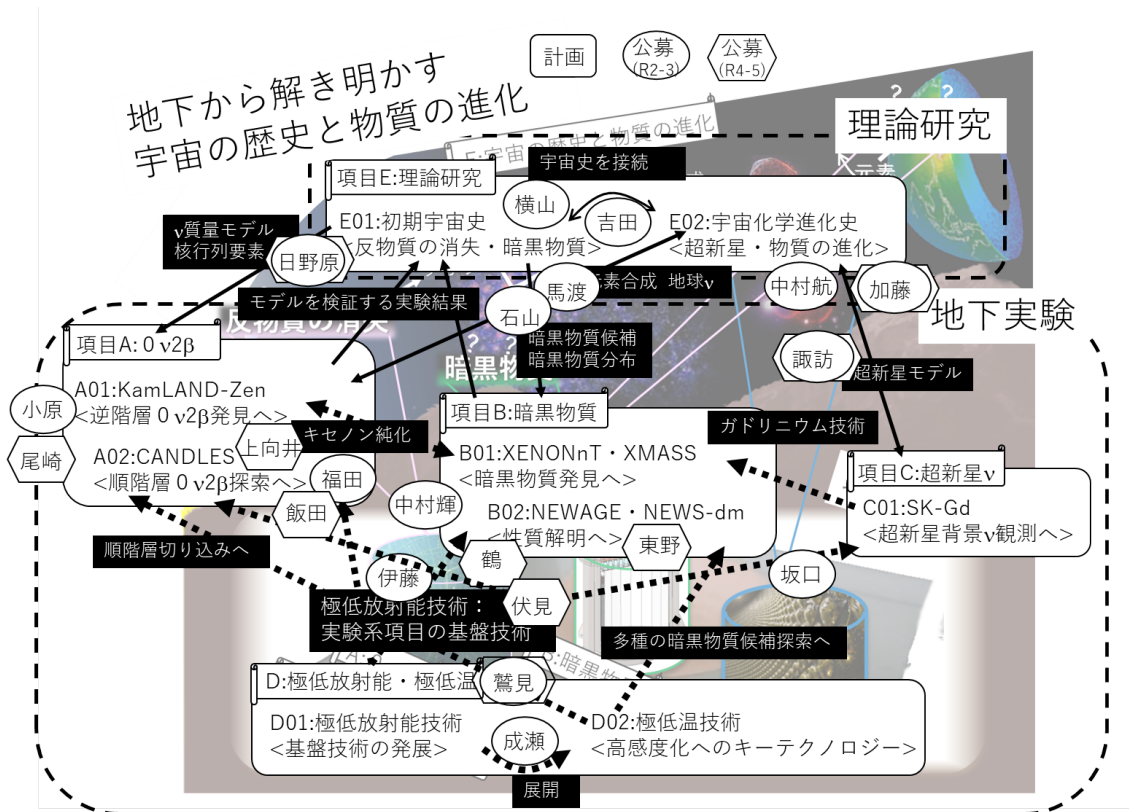
[2] T. Yoshida, T. Takiwaki, K. Kotake, K. Takahashi, K. Nakamura, H. Umeda, Three-dimensional Hydrodynamics Simulations of Precollapse Shell Burning in the Si- and O-rich Layers, Astrophys. J. 908:44, 2021.

学会発表: 国際学会 10 件、国内学会 30 件

8 研究組織の連携体制

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

領域提案時の計画研究による連携は予定通り機能した。公募研究によって、計画研究内の研究の補完、計画研究間の連携が促進された。図に計画研究、公募研究の連携の様子を示す。代表的な連携の成果を以下にいくつか挙げる。



- 1) A01, C01 はマルチメッセンジャー天文学の低・中エネルギーニュートリノを担当し実験間(KL-SK)で MoU を締結している。地球ニュートリノ観測も含め E02 との三つ巴の有機的連携が実現している。
- 2) 中村輝の公募研究「高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究」(R2-3)では、B01、B02、E01 との連携が進められ、共著論文を発表した。
- 3) 坂口の公募研究「高マトリクス試料中の極微量放射性核種測定法確立—地下宇宙研究への応用」の成功を受け、令和4年度より計画研究 C01 の分担者として参加することになった。
- 4) 伊藤の公募研究「低放射能測定における μ -TPC を用いたアルファ線イメージ分析装置の開発」(R2-3) は B02、D01 との共著論文を出版、領域全体に測定を供与している。
- 5) 鷲見の公募研究「落雷磁場を利用した神岡地下水分量の長期観測」(R2-R3)、「神岡地下・地上における雷観測と宇宙素粒子実験への利用」(R4-R5)では、落雷現象に注目、領域の研究に広がりを与えた。
- 6) 第6回超新星ニュートリノ研究会での議論に端を発し、辻本らによる太陽系の移動と地球史的事象の関連が論文発表され、A01 研究代表者を謝辞に挙げている。辻本は計画研究 E02 に参加した。
- 7) 日野原の公募研究「有限振幅法を用いた原子核密度汎関数理論による二重ベータ崩壊行列要素計算」(R2-3,R4-5)では A01 との双方向連携を進め、A01 の結果は PRL で論文発表した。
- 8) 加藤の公募研究「ニュートリノ集団振動を考慮した超新星ニュートリノスペクトルの構築」(R2-3,R4-5)に関連して、C01 と E02 が合同で研究会を開催し、その際にも計画研究のメンバーと公募研究の代表者が発表・議論を進めた。加藤が令和3年4月に東京理科大の助教に着任した。
- 9) E01 と D01,D02 の分担者らとの共同研究によって近傍超新星由来のアクシオンを検出する「超新星アクシオン望遠鏡」検出器のアイデアを提案、論文として出版した。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等(本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など)の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究(総括班・国際活動支援班を含む。)がある場合は、その内容を記述すること。

・**旅費の効率的使用**:海外派遣の予定が多かった国際活動支援班では、海外派遣人数を絞り出張期間を長くすることで旅費の効率的使用とともに COVID-19 の期間でも現地での研究業務を着実に実行した。また、神岡地下の国際共同研究では、時差を利用して国内研究者が昼間の検出器監視業務・海外研究者が夜間のリモートでの監視業務を行うように体制を整えて、旅費の効率的使用とともに渡航制限の影響を最小限にとどめた。

・**共用物品等の活用状況**:装置・技術開発を進める D01,D02 を中心に、地下実験環境での共用物品が整備された。

D01 では、神岡地下共同利用スペース(Lab-A)に、共同で利用するためのクリーンブースを構築した。神岡地下共同利用スペースでは、A02 の CaF_2 結晶中の内部不純物分析測定装置、D01 の硫酸 Gd 水中のラドン検出器、公募研究の α 線イメージ分析装置などの開発を行った。さらに、領域全体に低 BG 測定を提供した。

D01 は、世界トップレベルの低バックグラウンドゲルマニウム(Ge)検出器を構築し、共用化した。この Ge 検出器の材料選択に B01 の開発した表面 α 線検出器が利用され、Ge 検出器は領域全体の材料選定、特に B01・C01 の低放射能硫酸ガドリニウムのスクリーニングに利用された。また、D01 は ICP-MS による極微量ラジウム定量技術を開発し、短時間での硫酸ガドリニウム中の不純物測定も可能となった。

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

A01 が整備を進めてきた地下スーパークリーン環境は公募研究の発展型装置や D01, D02 関連研究の利用を取り込んで設計しており、領域外からの利用も見込まれる。そこに導入される純空気製造装置や純水製造装置は C01・D01 などの知見を取り込んだものである。地上にあるだけで宇宙線による放射化が問題となる本分野において、世界的にも稀有な施設として長期的に分野の発展に寄与する。また、基盤研究 A と共同で簡易低放射能実験タンク(50m³)を建設し、KamLAND 高性能化の鍵となる高量子効率 PMT, 多角形集光ミラー, 新型液体シンチレータ, 新型電子回路の統合実験を行った。これは、KamLAND の液体シンチレータを扱う際のバッファータンクとしても機能するほか、D01・D02 が開発する新型検出機を使った将来計画の低放射能実験環境としても機能する。また、D02 が展開する極低温でのセンサー技術開発に協力し、KamLAND 用の低バックグラウンド実験室を整備し、極低温センサーを使った暗黒物質直接探索研究を推進すべく、RCNS と KEK-QUP 間で MoU を結び KamLAND 区域に CryoLab を設置することとなった。

B01, B02, E01 と公募研究「高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果検証のための研究」間では共著論文に基づいた新実験「Miracle 実験」を立ち上げた。

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



図 D01 で製作したゲルマニウム検出器

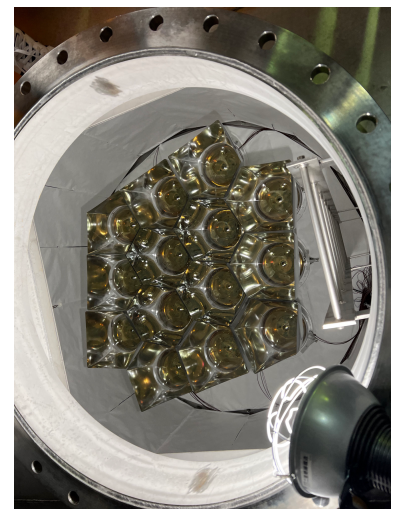


図 A01 が建設した簡易低放射能実験タンク

率的な装置使用を行った。

A02 と D01 が協力して開発した結晶中 α 線分析装置は高純度 CaF_2 結晶の微量分析を可能にし、 $10 \mu\text{Bq/kg}$ の結晶製造を実現した。さらに D01 が開発している高速 ICP-MS は、結晶高純度化での純化手法の評価に活用された。これらの成果が D02 で活用され、世界初の CaF_2 蛍光熱量計が実現した。さらにこの結晶高純度化開発で見出された高純度炭酸カルシウムは、B02 の検出器に用いるガス中のラドン等を低減する高純度モレキュラーシーブの材料として使われ、1~2 桁のモレキュラーシーブの低放射能化が実現した。

・国際活動支援の状況・計画

XENON 実験、暗黒物質方向有感探索実験、蛍光熱量計による二重ベータ崩壊を中心に、国際活動の支援を行った。

XENONnT 実験では低バックグラウンド材料の選定が重要であり、世界各地の検出器を活用しながら進められた。国際活動支援として、令和元年度には、低バックグラウンド材料の選定のための海外旅費支援を行った。さらに、令和 2 年度には D01 が開発する Ge 検出器の整備を支援し、令和 3 年度より神岡地下実験室に設置され、B01・C01 を中心とした低放射能材料の選定に利用された。また、COVID-19 での渡航制限に関係して、D02 では海外の開発環境を国内にも複製し、効果的な開発を進める必要があった。そのため、D02 の希釈冷凍機の調整なども支援した。さらに、暗黒物質研究を中心に国際研究集会を年次で主催し、KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM では、コロナ禍の間でも国内・海外併せて 2-300 名の参加を得てきた。海外の著名な理論研究者を招聘し、B01, B02 の実験的研究推進に加え、E01 の理論的研究との連携強化を図ることができた。

以下は、国際活動支援を通して実現した成果の抜粋である。

・XENONnT 実験の開始と遂行

XENONnT 実験装置の建設及び運転にあたって、コロナ禍を避けながら大学院生や研究者がイタリア現地に滞在し、運転を開始、高感度な暗黒物質探索実験結果を得ることができた。その結果目標感度が達成できる較正データの取得等を行うことができた。コロナ禍のため、実質的に国際活動支援の恩恵を最も得たのが本研究活動であった。コラボレーション会議等の活動参加 19 名、延べ約 182 日、シフト取得 14 名、延べ約 509 日の海外での活動を支えた。

・DARWIN/XLZD

XENONnT 実験の将来計画として進められてきた DARWIN 実験では、米国主導の LZ 実験との協力が議論され、XLZD というさらに大きな枠組みでの将来計画の議論が開始された。各国で XLZD を見据えた将来計画が立案され、日本でも「未来の学術構想」グランドビジョン^⑩：自然界の基本法則と宇宙・物質の起源の探求にリストアップされた。将来の共同研究を基礎づける重要な進展を与えた。

・ASAS-SN

スーパーカミオカンデの超新星爆発ニュートリノによるマルチメッセンジャー天文学推進のため、オハイオ州立大学を中心とした光学望遠鏡による超新星爆発探索ネットワーク All-Sky Automated Survey for Supernovae と MoU を締結し、協力体制を構築した。

・新たな日米協力体制の構築

2022 年米国オークリッジ国立研究所で行われた超新星研究のためのニュートリノ反応研究会への参加、および C01 と E02 合同で毎年開催している超新星ニュートリノ研究会への米国研究者招聘によって超新星ニュートリノと水との反応の詳細の測定を目指す、新たな体制を構築した。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択

当領域は、新学術領域「地下素核」の成功を受けて、「地下宇宙」として領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指した。本領域の活動により、極稀な現象の研究によって物質の起源や力の統一を目指す「極稀現象フロンティア」という研究領域を本格的に開拓した。このアクティビティは、さらに、学術変革領域「地下稀事象」に発展的に継承される。これらの領域の中でも KamLAND, SK-Gd は神岡地下に位置し、国際的な高い求心力を維持してきた。この分野は今後数十年にわたって宇宙・素粒子・原子核研究の重要な分野であり続けると期待され、求心力の高いプロジェクトのさらなる高度化に続き、長期的な視野を持った技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施していく必要がある。この観点から、A01 のプロジェクトである KamLAND を運営する東北大学ニュートリノ科学研究センター(RCNS)と、全国・国際共同利用共同研究機関であり A02・D02 のプロジェクトに参加する大阪大学核物理センター(RCNP)は、極稀現象フロンティアでの研究を展開し、技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施することを目的として、「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」(KERNEL)を組織整備として開始した。これは、本領域の大きな成果である。さらに、KamLAND エリアに KERNEL の活動を支える純空気製造装置や純水製造装置を備えるクラス1のスーパークリーン施設が2025年3月に竣工する。ここに導入される装置も領域の知見を取り込んだものである。地上にあるだけで宇宙線による放射化が問題となる本分野で、地下にスーパークリーン施設を有することは大きなアドバンテージとなり、技術継承を確実なものとし、技術革新を生み出す原動力となる。これも本領域での活動の成果である。これら分野を長期的に支える新しい拠点・基盤は、本領域の活動なくしては実現し得なかったものである。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和6年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手研究者の就職・昇進状況：大学院生を含む若手研究者のステップアップを以下に挙げるように果たした。特に**任期なし助教へ1名（†）、准教授1名の就職を実現した**ことは大きな成果である。また、大学部局の協力で、本領域予算を基盤に領域研究期間を超える任期での助教雇用を実現した（‡）。A02で博士を修了し、B01（暗黒物質探索研究）へ就職、その後D02（低温技術）と連携するといった、領域内での交流も進んだ。主な就職状況は下記のとおりである。下記を含め、若手研究者の就職・昇進等は全29名であった。

A02	大学院生	→ B01 博士研究員	→ D02 連携（研究員）	1名
A01	博士研究員	→ 助教・特任助教（任期付）		2名（‡）
A01	大学院生	→ 助教・特任助教（任期付）		5名（‡）
領域外	博士研究員	→ 特任助教（任期付）		1名（‡）
公募	特任研究員	→ 助教（任期なし）		1名（†）
B01	助教	→ 准教授		1名（†）

大学院生の学位取得：修士 103名 博士 31名 の大学院生が学位を取得した。

大学院生の発表：大学院生が以下の通り研究成果を発表した。

国際会議（口頭28件、ポスター74件） 国内会議（口頭404件、ポスター51件）

大学院生の海外渡航：COVID-19の影響もあり、海外渡航が困難な期間が長かったが、そのような中に置いて、2.5か月の長期渡航を含め国際共同研究のために延べ人数4名、国際会議発表で15名の大学院生が海外渡航（総括班の国際活動支援）した。

チュートリアル講演を含む研究会の開催：若手研究者の育成を意図してチュートリアル講演を含む研究会を7回開催した。

若手研究会の開催：領域内の実験理論の枠を超えた若手研究者の交流を目的として、地下宇宙若手研究会を東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設にて2020年2月22-24日に開催した。参加者は27名（理論9、実験18）であった。その後、2021年11月（神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール）、2022年11月（つくば市つくば国際会議場）にも若手研究会を開催した。2024年03月には、若手自らが運営した若手研究会を東北大学理学研究科にて開催した。

若手研究者の表彰：若手研究者の研究奨励を目的に、領域関連研究会で若手研究者を表彰した。領域外の若手研究者も受賞しており、幅広い分野の若手研究者の育成につながった。

4回の領域研究会で11名、2回の極低放射能技術研究会で4名、3回の若手研究会で11名表彰。

大学院生、若手研究者の受賞：領域内の若手の受賞が全41件あった。主なものを下記に記載する。

国際学会表彰：全5件

Takahiko Hachiya, UGAP2024 ポスター賞 2024/3/6

尾崎公祐, TAUP2019 Poster Honourable Mention, 2019年9月

国内学会表彰：全19件

川田七海, 第18回日本物理学会若手奨励賞（宇宙線・宇宙物理領域）2024年03月

ダウディ由莉香, 日本物理学会第78回年次大会（2023年）学生優秀発表賞, 2023年9月

梅本篤宏, 日本写真学会進歩賞, 2020年8月

大学内表彰：全17件

安部清尚, 東北大学宇宙創成物理学国際共同大学院優秀学生賞（実験）, 2023/3/2

竹内敦人, 東北大学総長賞, 2022/3

島田 拓弥, 神戸大学優秀修士論文発表賞（理学研究科総代）, 2021/2

12 総括班評価者による評価

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

領域内評価者による評価

【中畑雅行（東京大学宇宙線研究所・教授・神岡宇宙素粒子研究施設長）】

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

それぞれの研究項目において次に掲げるような成果が見られたが、これらはおおむね期待通りあるいは期待を超えた進展であったと考えられる。A01では $0\nu 2\beta$ 崩壊探索においてKamLAND-Zen 400/800を統合した解析を実施し、世界で初めて逆階層領域に切り込む制限(36-156meV以上を排除)を得て、当初の目標を達成した。地球ニュートリノ観測では観測精度15%を実現し、High-Qモデルと呼ばれるマントルの一層対流を预言するモデルを排除することに成功した。これは目標以上の成果だと考えられる。A02では130日分の ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 崩壊探索データを解析し同原子核において世界最高感度と同等の測定結果を得た。また、目標としていた $10\mu\text{Bq/kg}$ 以下の放射性不純物濃度である結晶モジュールを製造することに成功している。 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ 崩壊探索においては、 ^{48}Ca を濃縮することによって他の原子核を格段に超える感度が期待されるが、注入同期レーザー方式を導入し、周波数安定性が要求以上の狭線幅を満たしたシステムを実現したことは濃縮に向けて順調な成果が得られたことを示すものである。 CaF_2 蛍光熱量検出器開発においては結晶内における事象の発生位置依存性を取り除くことによって目標分解能を超えた0.2%のエネルギー分解能を達成できることを実証している。B01では、XENONnT実験で原子核反跳を用いた暗黒物質探索の初の結果をもたらし、これは暗黒物質の発見に向けて大きな一歩であったと考えられる。特に、この直接探索実験において最も主要なバックグラウンドとなる中性子事象を取り除くため、ガドリニウムを用いた中性子カウンターを建設しその運転を行い77%のタギング効率を得たことは大きな成果である。B02では当初の目標通り30cm角サイズの低バックグラウンド μPIC 検出器を製作し、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。同班のNEWSdmでは原子核乾板を用いるというユニークな方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験を実際におこなった。C01は2020年に0.01%濃度でGdをスーパーカミオカンデに導入し、2022年にはそれを0.03%濃度まで増やした。これらによりそれぞれ50%,75%の中性子捕獲効率が達成され、高感度での超新星背景ニュートリノ観測が行われた。これによりいくつかのモデルで预言される領域を排除する結果が得られており目標を達成していると考えられる。D01は他班の研究のための検出器材料のスクリーニングを行うとともに低バックグラウンド仕様のゲルマニウム検出器の開発、高感度リアルタイムラドン検出器の開発に成功した。D02は希釈冷凍機に低放射能シールドをインストールし、環境放射線バックグラウンドを低減できることを実証し、A02と共に CaF_2 蛍光熱量検出器を開発した。これらにより当初の目標を達成した。

【柳田勉（東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・客員上級科学研究員）】

A01のニュートリノを伴わない原子核の二重ベータ崩壊の実験では、KamLAND-Zen 400/800を統合した解析を実施し、世界で初めてニュートリノの質量の逆階層領域に切り込む制限(ニュートリノ有効質量36-156meV以上を排除)を与えた。この制限はE01の研究者らが提案したモデルなど複数の理論モデルが预言する範囲にかかり始めており、極めて重要な結果であると評価出来る。将来はニュートリノ有効質量の上限値として20meVを目指しており、達成されれば逆階層領域のほぼ全領域をカバーすることになり、その意義は測りがたい。

またB01の暗黒物質直接実験においては、XENONnT実験で原子核反跳を用いた暗黒物質探索の初の結果を出した。XENONnTでは世界一の感度達成と大発見を目指して研究が進められており、超対称性モデルをはじめとする暗黒物質シナリオへの大きなインパクトが期待される。

E01ではこれらの実験に関連したレプトジェネシスシナリオや暗黒物質模型などの研究が活発に進められた。いくつかの有望な素粒子模型において、A01の探索するニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊についての预言が行われ、またレプトジェネシスにより宇宙のバリオン数を説明できることを明らかにした。またB01がターゲットとする暗黒物質の研究においても、熱的暗黒物質の包括的研究により直接探索、間接探索、加速器実験の相補的役割を定量的に明らかにし、また冷たい暗黒物質(CDM)に基づいた宇宙論的流体シミュレーションを用いて、初代銀河の形成過程、超新星フィードバックモデルの構築、巨大ブラックホール種の形成、ダストの成長・破壊モデル、暗黒物質と中性水素分布などの諸問題について研究が進められた。その他にも、宇宙の進化と物質の起源の解明を目指して、インフレーションを含むレプトジェネシスシナリオの構築、様々な预言を持つ

多様な暗黒物質模型構築、重力波観測に兆候を持ち得る素粒子模型の構築など、非常に幅広い研究成果が得られている。また E01 と D 班との共同研究による超新星アクシオン望遠鏡の提案、E01 と B 班によりミグダル効果の研究、E01 と A 班との合同研究会開催、E01 と E02 との合同研究会開催など、領域内の複数のグループによる連携の例も多く見られ、本領域の意義が具体的に示されている。

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

領域外評価者による評価

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

低放射能計測技術を共通基盤として、稀現象に対する測定器感度の大幅な向上を実現し、二重ベータ崩壊現象の探索を通じてニュートリノ質量の上限値を更新し、暗黒物質や超新星背景ニュートリノの探索の感度を向上させたことなどをはじめ、数多くの重要な成果が報告されており、地下における様々な実験活動が大いに活発化されたことは大いに評価できる。また、従来の検出器の大幅な高性能化・低雑音化が図られたのみならず、極低温技術を取り入れた検出器の開発も行われており、実用化が待たれる。また、実験グループ間の研究連携が強化されて相乗的な発展が見られ、理論家との協力も様々な面で推進されて、新しい研究のきっかけが生まれるなど、前身の新学術領域「地下素核」を引き継ぐのみならず、大きく発展させることができた点も重要な収穫であるといえる。総括班はこれらの活動の中心として密に連携して運営され、勉強会・研究会・国際シンポジウムや国際活動支援を通じて領域の発展を支えていたことが見て取れる。さらに、COVID-19 禍が研究活動に大きな制約を課していた状況のもとでも、各研究はさまざまな工夫を重ねて遂行され、成果につながったことも特筆に値しよう。この領域で進められているこれらの研究は国際競争力も高く、今年度から開始された学術変革領域研究「地下稀現象」によってさらなる推進が図られることにより、大きな成果につながることに期待している。

【中家剛（京都大学大学院理学研究科・教授）、専門：ニュートリノ物理学】

本新学術領域（地下宇宙）は、地下というユニークな実験所で極低放射能技術と極低温技術を活用することで、「極稀現象フロンティア」という新しい研究領域を開拓した。「極稀現象フロンティア」では、素粒子物理学における究極目標である物質の起源や力の統一を探る上で重要な暗黒物質の探索とニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の研究を展開し、宇宙背景ニュートリノ観測を行った。A01 のニュートリノのマヨラナ性の検証(0ν2β探索)では、当初の目標であった 40meV の感度を達成し、世界で初めて逆階層領域に切り込む制限(36-156meV 以上を排除)を与えた。残念ながら、この感度においても0ν2β崩壊の発見は叶わず、今後の更なる研究の進展を期待したい。暗黒物質探索において、B01 は XENONnT 実験で、世界最高感度で重い暗黒物質に対して最も厳しい制限をつけることに成功した。中間評価の時点で XENON1T 実験が見ていた「電子反跳現象の超過」を XENONnT 実験では却下し、新物理の可能性を排除したことも重要な成果である。B01 が C01 と連携で開発した硫酸 Gd 水チェレンコフ技術の実用化も大きな技術的な進展である。C01 では、硫酸 Gd 水チェレンコフ技術を活用し、スーパーカミオカンデを使って世界最高感度で超新星背景ニュートリノ探索を行い、超新星爆発の平均温度が高いとするモデルの一部を排除することに成功した。以上に加えて、世界的に見てユニークである、⁴⁸Ca を用いた0ν2β探索実験や、方向感度を有した暗黒物質探索実験も一定の進展が見られている。さらに、実験結果をサポートする多くの理論研究が展開された。

以上より、本研究領域は当初目標を十分に達成し、世界最高水準の研究結果を多数創出したと高く評価できる。残念なことは、その研究結果に「発見」がなかったことであるが、これは研究領域の落ち度ではなく、自然がより深遠な謎を秘めているということである。実際、A01 班で地球ニュートリノは観測されており、実験に問題があったわけではない。今後の「極稀現象フロンティア」における更なる挑戦を期待したい。本領域の成果を受け、「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」(KERNEL) が始まり、学術変革領域「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化:新たな宇宙物質観創生のフロンティア(地下稀事象)」が採択されており、素粒子や宇宙物理学の潮流を変える大発見を期待したい。

【住吉光介(沼津工業高等専門学校・教授)、専門：原子核宇宙物理学・ニュートリノ天体物理学】

極低放射能・極低温技術の研究開発をもとに、稀事象の検出実験を実施することで素粒子・宇宙・天文・地球科学にまたがる目覚ましい研究成果を挙げることができた。地球ニュートリノの測定によるマントル対流モデルへの制限は、これまでと異なるアプローチから地球科学の知見を与えており、特に優れた研究成果である。さらに、ガドリニウム濃度を高めた検出実験による超新星背景ニュートリノ探索では超新星ニュートリノの一部のモデルについて制限に達したこと、近傍超新星における前兆ニュートリノ検出やアラート運用の体制が整ったことも重要な成果である。また、素粒子物理においても超新星アクシオン望遠鏡の提案により近傍超新星での検出が現実的となった。これらの成果が理論と実験の密接な関係により達成されたことは高く評価できる。研究会・チュートリアル講演などで異なる領域の理論・実験研究者が交流して、互いの理解を深め合う活動が活発に行われたことで事前の計画よりも進んだ成果を挙げることが可能となった。極めて微小な量を測定するための技術は様々な実験・観測分野で広く役立つものであり、さらなる極稀事象の探索チャレンジへつながる優れた研究ネットワークが育成された。