

宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究

領域番号：2603

平成26年度～平成30年度

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）

（新学術領域研究（研究領域提案型））

研究成果報告書

令和元年5月

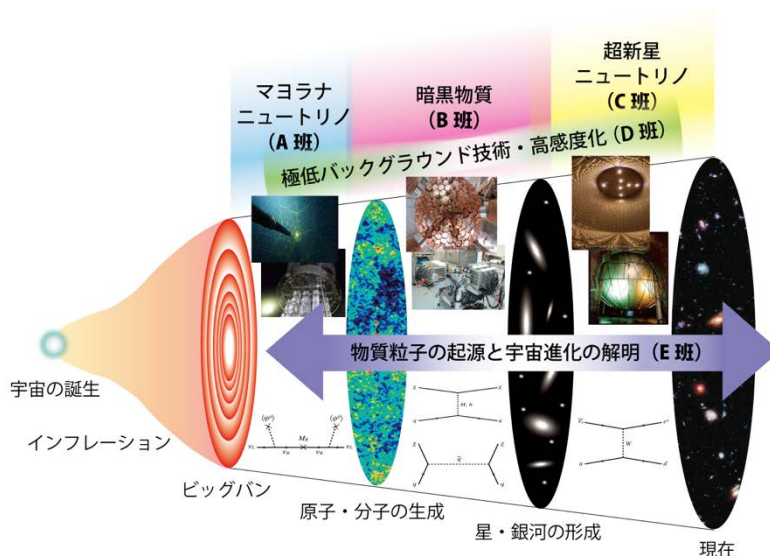
領域代表者 井上 邦雄

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授

はしがき

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の生成」、「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。

上記5つの謎に迫るため、本境域では次の研究項目を設定した。



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暗黒物質の領域を検証する (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)：スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノ探索の感度を向上させ、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み包括的なニュートリノ観測体制を構築する。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 (C02)。

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、「マイクロレベル」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)。

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で初めて実現する可能性を有している。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す方策を取っている。また、A~Cを串刺しにする理論研究E01を設定することで、各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となる。

研究組織

領域代表者：井上 邦雄（東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授）

総括班 X00

研究代表者：井上 邦雄（東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授）

研究分担者：岸本 忠史（大阪大学・核物理研究センター・教授）

岸本 康宏（東京大学・宇宙線研究所・准教授）

身内 賢太郎（神戸大学・理学研究科・准教授）

作田 誠（岡山大学・自然科学研究科・教授）

竹内 康雄（神戸大学・理学研究科・教授）

柳田 勉（東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授）

濱口 幸一（東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授）

国際活動支援班 Y00

研究代表者：井上 邦雄（東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授）

研究分担者：岸本 康宏（東京大学・宇宙線研究所・准教授）

身内 賢太郎（神戸大学・理学研究科・准教授）

作田 誠（岡山大学・自然科学研究科・教授）

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

研究代表者：井上 邦雄（東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授）

研究分担者：なし

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

研究代表者：岸本 忠史（大阪大学・核物理研究センター・教授）

研究分担者：なし

計画研究 B01（大型実験装置による暗黒物質の直接検出）

研究代表者：岸本 康宏（東京大学・宇宙線研究所・准教授）

研究分担者：梁炳守（東京大学・宇宙線研究所・特任助教）（H29年度まで）

小川 洋 (日本大学・理工学部・助手)
小林 兼好 (東京大学・宇宙線研究所・特任助教)
市村 晃一 (東京大学・宇宙線研究所・特任助教) (H30 年度)

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

研究代表者: 身内 賢太郎 (神戸大学・理学研究科・准教授)
研究分担者: 中竜大 (名古屋大学・現象解析研究センター・特任助教)
田中雅士 (早稲田大学・理工学術院・准教授)

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

研究代表者: 作田 誠 (岡山大学・自然科学研究科・教授)
研究分担者: 池田 一得 (東京大学 宇宙線研究所・助教)
鈴木 英之 (東京理科大学 理工学部・教授)
高久 雄一 (公益財団法人環境科学技術研究所・環境影響研究部・研究部長)
井上 睦夫 (金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授)

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

研究代表者: 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)
研究分担者: 梅田 秀之 (東京大学・理学系研究科・准教授)
平出 克樹 (東京大学・宇宙線研究所・特任助教)
戸村 友宣 (東京大学・宇宙線研究所・特任助教) (H27 年度まで)

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

研究代表者: 竹内 康雄 (神戸大学・理学研究科・教授)
研究分担者: 伏見 賢一 (徳島大学・大学院社会産業理工学研究部・教授)
関谷 洋之 (東京大学・宇宙線研究所・准教授)
竹田 敦 (東京大学・宇宙線研究所・助教)

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

研究代表者: 柳田 勉 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授)
研究分担者: 松本 重貴 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授)
濱口 幸一 (東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授)
中山 和則 (東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教)
末松 大二郎 (金沢大学・数物科学系・教授)

交付決定額（配分額）

総括班 X00（宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究）

	合計（円）	直接経費（円）	間接経費(円)
平成 26 年度	3,900,000	3,000,000	900,000
平成 27 年度	5,590,000	4,300,000	1,290,000
平成 28 年度	5,590,000	4,300,000	1,290,000
平成 29 年度	6,630,000	5,100,000	1,530,000
平成 30 年度	7,020,000	5,400,000	1,620,000
総計	28,730,000	22,100,000	6,630,000

国際活動支援班 Y00（地下研究施設ネットワークによる宇宙の歴史の解明）

	合計（円）	直接経費（円）	間接経費(円)
平成 26 年度	-	-	-
平成 27 年度	15,210,000	11,700,000	3,510,000
平成 28 年度	15,340,000	11,800,000	3,540,000
平成 29 年度	15,470,000	11,900,000	3,570,000
平成 30 年度	15,470,000	11,900,000	3,570,000
総計	61,490,000	47,300,000	14,190,000

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

	合計（円）	直接経費（円）	間接経費(円)
平成 26 年度	106,080,000	81,600,000	24,480,000
平成 27 年度	79,560,000	61,200,000	18,360,000
平成 28 年度	39,000,000	30,000,000	9,000,000
平成 29 年度	44,980,000	34,600,000	10,380,000
平成 30 年度	59,280,000	45,600,000	13,680,000
総計	328,900,000	253,000,000	75,900,000

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

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	52,910,000	40,700,000	12,210,000
平成 27 年度	39,260,000	30,200,000	9,060,000
平成 28 年度	44,200,000	34,000,000	10,200,000
平成 29 年度	69,030,000	53,100,000	15,930,000
平成 30 年度	68,120,000	52,400,000	15,720,000
総計	273,520,000	210,400,000	63,120,000

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接探索)

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	84,760,000	65,200,000	19,560,000
平成 27 年度	46,020,000	35,400,000	10,620,000
平成 28 年度	70,980,000	54,600,000	16,380,000
平成 29 年度	44,720,000	34,400,000	10,320,000
平成 30 年度	37,960,000	29,200,000	8,760,000
総計	284,440,000	218,800,000	65,640,000

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

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	6,370,000	4,900,000	1,470,000
平成 27 年度	12,480,000	9,600,000	2,880,000
平成 28 年度	30,550,000	23,500,000	7,050,000
平成 29 年度	8,190,000	6,300,000	1,890,000
平成 30 年度	8,970,000	6,900,000	2,070,000
総計	66,560,000	51,200,000	15,360,000

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	39,910,000	30,700,000	9,210,000
平成 27 年度	37,830,000	29,100,000	8,730,000
平成 28 年度	23,790,000	18,300,000	5,490,000
平成 29 年度	32,760,000	25,200,000	7,560,000
平成 30 年度	32,760,000	25,200,000	7,560,000
総計	167,050,000	128,500,000	38,550,000

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

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	4,810,000	3,700,000	1,110,000
平成 27 年度	11,960,000	9,200,000	2,760,000
平成 28 年度	20,280,000	15,600,000	4,680,000
平成 29 年度	12,480,000	9,600,000	2,880,000
平成 30 年度	8,320,000	6,400,000	1,920,000
総計	57,850,000	44,500,000	13,350,000

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子の研究の高度化)

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	17,680,000	13,600,000	4,080,000
平成 27 年度	15,470,000	11,900,000	3,570,000
平成 28 年度	22,360,000	17,200,000	5,160,000
平成 29 年度	16,640,000	12,800,000	3,840,000
平成 30 年度	16,380,000	12,600,000	3,780,000
総計	88,530,000	68,100,000	20,430,000

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の起源の解明)

	合計 (円)	直接経費 (円)	間接経費(円)
平成 26 年度	7,150,000	5,500,000	1,650,000
平成 27 年度	9,880,000	7,600,000	2,280,000
平成 28 年度	9,880,000	7,600,000	2,280,000
平成 29 年度	10,660,000	8,200,000	2,460,000
平成 30 年度	10,660,000	8,200,000	2,460,000
総計	48,230,000	37,100,000	11,130,000

研究発表

雑誌論文

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

- A. Gando, 他 KamLAND-Zen Collaboration (全 56 名), “Precision Analysis of the ^{136}Xe Two-Neutrino $\beta\beta$ Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements”, Physical Review Letters 122, 192501 (2019) (査読有)
- A. Gando, 他 KamLAND-Zen Collaboration(全 41 名), “Search for Majorana the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, Physical Review Letters 117, 082503 (2016) (査読有) **Editor’ s suggestion, Featured in Physics**
- K. Asakura, 他 KamLAND-Zen Collaboration (全 44 名), “Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen”, Nuclear Physics A 946 (2016) 171-181 (査読有)
- 他 18 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 A02 (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)

- K. Nakajima, 他 (全 43 名), “Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment”, Astroparticle Physics, 100(2018), 54-60 (査読有)
- T. Kishimoto, K. Matsuoka, T. Fukumoto, S. Umehara, “Calcium isotope enrichment by means of multi-channel counter-current electrophoresis for the study of particle and nuclear physics”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2015, Issue 3, 033D03 (査読有)

- T.Maeda, 他 (全 31 名), “The CANDLES Trigger system for the study of double beta decay of ^{48}Ca ”, Nuclear Science, IEEE Transactions, 62 (3), 1128–1134 (査読有)
- 他 13 件 (査読有り論文のみ)

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

- K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “Development of low radioactivity photo multiplier for the XMASS-I detector”, Nuclear Instruments And Methods in Physics Research A, A922 (2019) 171–176 (査読有)
- K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “A direct dark matter search in XMASS-I”, Phys. Lett. B, B783 (2019), 45–53 (査読有)
- K. Abe, 他 XMASS Collaboration (41 名), “Direct dark matter search by annual modulation with 2.7 years of XMASS data”, Phys. Rev. D, D97 102006 (2018) (査読有)
- 他 13 件

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

- Kentaro Miuchi, 他 (全 16 名), “Development of a time projection chamber with a sheet-resistor field cage”, PTEP accepted, <https://arxiv.org/abs/1903.01663> (査読有) (研究計画 B01 D01 との共同研究)
- Keita Mizukoshi, Ryosuke Taishaku, Keishi Hosokawa, Kazuyoshi Kobayashi, Kentaro Miuchi, Tatsuhiko Naka, Atsushi Takeda, Masashi Tanaka, 他 (全 11 名), “Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at Kamioka Observatory ” Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, Issue 12, 1 December 2018, 123C01, doi:10.1093/ptep/pty133, (査読有) (研究計画 A01 A02 B01 D01 との共同研究)
- Takashi Hashimoto, Kentaro Miuchi, 他 (全 10 名), “Development of a low-alpha-emitting μ -PIC for NEWAGE direction-sensitive dark-matter search”, AIP Conference Proceedings 1921, 070001 (2018) (査読無)
- NEWSdm collaboration (N. Agafonova et al., T. Naka 33 番目) “Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions”, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 578, DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-6060-1 (査読有)
- Kiseki Nakamura, Kentaro Miuchi, 他 (全 16 名), “Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015) 043F01s
- 他 23 件

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

- Ken'ichiro Nakazato and Hideyuki Suzuki, “Cooling timescale for protoneutron stars and properties of nuclear matter: Effective mass and symmetry energy at high densities”, accepted for publication in The Astrophysical Journal in April 2019, arXiv:1905.00014, pp.1-11 (査読有)
- S. Ito, K. Ichimura, Y. Takaku, K. Abe, M. Ikeda, Y. Kishimoto, “Development of the measurement of radium using a germanium detector with molecular recognition resin”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 091H01, pp. 1-6, DOI:10.1093/ptep/pty096 (査読有)
- Ken'ichiro Nakazato, Toshio Suzuki and Makoto Sakuda, “Charged-current scattering off the ^{16}O nucleus as a detection channel for supernova neutrinos”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 123E02, pp. 1-14, DOI: 10.1093/ptep/pty134 (査読有)
- K. Hagiwara, Makoto Sakuda(14番目), Ajmi Ali(22番目), 他 ANNRI-Gd Collab. (全23名), “Gamma-ray spectrum from thermal neutron capture on gadolinium-157”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 023D01, pp. 1-26. DOI: 10.1093/ptep/ptz002 (査読有)
- Ajmi Ali, Makoto Sakuda (15番目), 他 ANNRI-Gd Collab. (全23名), “Analysis of Gd(n, gamma) reaction with 155, 157 and natural Gd targets taken with JPARC-ANNRI and development of Gd(n, gamma) decay model for Gd-doped neutron/neutrino detectors”, PoS (ICHEP 2018)120, pp.1-4. <https://pos.sissa.it/340/> (査読有)
- 他 26 件 (査読有り論文のみ)

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

- K. Abe, K. Hiraide et al., “Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS”, Astroparticle Physics 89, 51-56 (2017), <http://10.1016/j.astropartphys.2017.01.006> (査読有)
- T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, “Supernova neutrino events relating to the final evolution of massive stars”, Physical Review D 93, 123012 (2016), <http://10.1103/PhysRevD.93.123012> (査読有)
- K. Asakura, K. Ishidoshiro et al., “KamLAND sensitivity to neutrinos from pre-supernova stars”, Astrophysical Journal, 818 91 (2016), 10.3847/0004-637X/818/1/91 (査読有)
- C. Kato, M. D. Azari, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, “Pre-supernova neutrino emissions from ONe cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of Fe cores?,” Astrophysical Journal, 808, 168 (2015), 10.1088/0004-637X/808/2/168 (査読有)
- 他 23 件

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- K. Fushimi, D. Chernyak, H. Ejiri, K. Hata, R. Hazama, S. Hirata, H. Ikeda, K. Imagawa, K. Inoue, A. Kozlov, R. Orito, T. Shima, Y. Takemoto, S. Umehara, K. Yasuda, and S. Yoshida, “Dark Matter Search by Means of Highly Radiopure NaI(Tl) Scintillator”, JPS Conf. Proc. 24, 011011 (2019)
- Y. Nakano, H. Sekiya, S. Tasaka, Y. Takeuchi, R. A. Wendell, M. Matsubara, and M. Nakahata, “Measurement of radon concentration in Super-Kamiokande’s buffer gas”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, 867 (2017), pp. 108–114 (査読有)
- K. 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, and S. Yoshida, “High purity NaI(Tl) scintillator to search for dark matter”, JPS Conf. Proc. 11, 020003 (2016)
- K. Hosokawa, A. Murata, Y. Nakano, Y. Onishi, H. Sekiya, *Y. Takeuchi, and S. Tasaka, “Development of a high-sensitivity 80 L radon detector for purified gases”, PTEP 2015, 033H01 (査読有)
- 他 6 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, Tsutomu T. Yanagida, “Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis”, arXiv:1601.00192 [hep-ph]. Phys.Lett. B757 (2016) 32–38. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.03.051 (査読有).
- Kento Asai, Koichi Hamaguchi, Natsumi Nagata, “Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model”, arXiv:1705.00419 [hep-ph]. Eur.Phys.J. C77 (2017) no.11, 763. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5348-x (査読有).
- Shankha Banerjee, Shigeki Matsumoto, Kyohei Mukaida, Yue-Lin Sming Tsai, “WIMP Dark Matter in a Well-Tempered Regime: A case study on Singlet-Doublets Fermionic WIMP”, arXiv:1603.07387 [hep-ph]. JHEP 1611 (2016) 070. DOI: 10.1007/JHEP11(2016)070 (査読有).
- Yohei Ema, Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model”, arXiv:1612.05492 [hep-ph]. JHEP 1701 (2017) 096. DOI: 10.1007/JHEP01(2017)096 (査読有).
- 他 137 件

公募研究

公募研究は H27～28 年度に 12 件, H29～30 年度に 13 件の合計 25 件の研究課題があった。

- N. Haba, 他, “A new dynamics of electroweak symmetry breaking with classically scale invariance”, Phys. Lett. B. 755 (2016), p439-443 (査読有)
- A. Yamaji, 他, “Crystal Growth and Optical Properties of Organic Crystal for Neutron Scintillators”, Plasma and Fusion Research 13 (2018), 2405011 (査読有)
- T. Asaka, 他, “Initial condition for baryogenesis via neutrino oscillation”, Phys. Rev. D, 96 (2017) , 83010 (査読有)
- O’ Connor, 他, “Global comparison of core-collapse supernova simulations in spherical symmetry”, J. of Phys. G, 45 (2018), 104001 (査読有)
- 他 72 件

国際会議講演

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

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

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

- T. Kishimoto, “CANDLES for the study of double beta decay of ^{48}Ca and its future prospect”, Workshop session of The Joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (Hawaii2018) 国際学会、招待講演
- T. Kishimoto, “CANDLES for the study of ^{48}Ca double beta decay and its future prospect”, International symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, March 7-9, Tohoku Univ., 2019. 国際学会、招待講演
- 他 45 件

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

- K. Ichimura, “Recent results from XMASS experiment”, The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector

(2018 年)

- B. Yang, “XMASS experiment”, 日本物理学会 第 73 回年次大会 日韓シンポジウム (2018 年)、招待講演
- K. Kobayashi, “Dark matter searches in XMASS”, XXXIX International conference on High Energy Physics (2018)
- 他 50 件

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

- Tatsuhiro Naka, “NEWSdm experiment ~Directional Dark Matter Search with Super-high resolution Nuclear Emulsion~”, “Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019”, 2019 年、招待講演
- Kentaro Miuchi “Review on Direction-Sensitive Direct Dark Matter Search with gaseous detectors”, “Identification of Dark Matter 2018(IDM 2018)” 23 - 27、招待講演
- Kentaro Miuchi “Direction-Sensitive Direct Dark Matter Search”, “Topical Workshop on Dark Matter” November 13-15 NanYang Technological University, Singapore、招待講演
- 他 46 件

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

- H. Suzuki, “Supernova Overview”, International symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, March 7-9, Tohoku Univ., 2019. 国際学会、招待講演
- M. Sakuda, “A Close Link Between Electron-Nucleus and Neutrino-Nucleus Scattering”, Mini-Symposium: Intersections of Neutrino and Charged Lepton Scattering in 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018, Hawaii. 国際学会(2018 日米合同原子核分野物理学会)、基調講演
- M. Ikeda, “Solar neutrino measurement at Super-Kamiokande”, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2018), 4-9 June, Hamburg, 2018. 国際学会、招待講演
- 他 56 件

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

- K. Ishidoshiro, “KamLAND”, International workshop on ‘Supernova at Hyper-Kamiokande’, 2017、招待講演

- K. Ishidoshiro, “Future Supernova neutrino experiments”, 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region (NuInt2015), 2015、招待講演
- 他 35 件

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- Y. Takeuchi, “Recent results and future prospects of Super-Kamiokande”, The 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2018), Russian Academy of Sciences, Russia, 31 July, 2018、招待講演
- K. Fushimi, “PICO-LON dark matter search”, DBD2016, Osaka, Japan, Nov. 8, 2016、招待講演
- H. Sekiya, “Quest for Lowest Energy Neutrinos in Super-Kamiokande”, LRT2015, Univ. of Washington, USA, Mar. 20, 2015、招待講演
- 他 25 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- Tsutomu Yanagida, “Neutrino mass in the landscape of vacuum”, CosPA 2016, 2016 年, シドニー大学, オーストラリア、招待講演
- Koichi Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model”, Moriond Electroweak 2018, 2018 年, La Thuile, イタリア、招待講演
- Daijiro Suematsu, “Roles of Peccei-Quinn symmetry in an effective model for dark matter and neutrino mass”, The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018), 2018 年, Heidelberg, ドイツ、招待講演
- 他 55 件

公募研究

公募研究は H27～28 年度に 12 件、H29～30 年度に 13 件の合計 25 件の研究課題があった。

- K. Nakazato, “Astrophysical implications of the nuclear symmetry energy”, 8th International symposium on nuclear symmetry energy (NuSYM18), 2018 年、招待講演
- T. Asaka, “Search for right-handed neutrinos in the seesaw mechanism”, Particle Cosmology and beyond 2015 年、招待講演
- T. Washiimi, “Low-mass dark matter search with two phase Ar TPC”, SMART2017、招待講演
- 他 73 件

国内講演, 学会発表

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

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

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

- 吉田斉「ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の現状と将来」、日本物理学会 2017年秋季大会 シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」 2017年9月12日 宇都宮大学、招待講演
- 岸本忠史「⁴⁸Ca の新濃縮法の開発と CANDLES 実験」、日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月26日大阪市立大学、招待講演
- 他 132件

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

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

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

- 身内賢太郎「暗黒物質直接探索実験の現状」、日本物理学会 2017年秋季大会 シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」2017年9月12日 宇都宮大学、招待講演
- 中竜大「宇宙におけるダークマター問題とその直接探索」、2016年度日本写真学会年次大会 2016年6月8日、東京工業大学すずかけ台キャンパス、基調講演
- 他 249件

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

- 鈴木英之「超新星理論開発」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究・2017年領域研究会、岡山大学、2017年5月21-23日
- 池田一得「SK-Gd計画」、2017年度CRC将来計画タウンミーティング、東大宇宙線研究所、2017年6月24日
- 作田 誠「Gamma production from thermal neutron capture on natural gadolinium, ^{155}Gd and ^{157}Gd 」、新学術領域「重力波天体」Workshop、京都大学基礎物理学研究所、2017年12月26-28日
- 他 77 件

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

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

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

- 伏見賢一「宇宙暗黒物質探索レビュー」、シンチレーター研究会 SMART2017 (山形市), 2017年11月11日、招待講演
- 竹田敦「XMASS の中性子バックグラウンド」、「極低放射能技術」研究会 2016 (徳島大けやきホール), 2016年3月15日、招待講演
- 他 93 件

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

- 柳田勉「ニュートリノの質量と CP の破れ, ダブルベータ」、日本物理学会 2015 年年次大会, 2015 年, 早稲田大学、招待講演
- 松本重貴「素粒子物理学における指導原理としての暗黒物質探査」、日本物理学会 2019 年年次大会, 2019 年, 九州大学、招待講演
- 他 44 件

公募研究

公募研究は H27~28 年度に 12 件、H29~30 年度に 13 件の合計 25 件の研究課題があった。

- 寄田 浩平「DM 探索アルゴン TPC」、高エネルギー加速器研究機構 液体 TPC 座談会, 2015 年、招待講演
- 浅賀 岳彦「Physics of right handed neutrinos」、基礎物理学研究所研究会 「素粒子

物理学の進展 2015」2015年、招待講演

- 滝脇 知也「超新星爆発の長時間計算、その前に」、素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム、2017年、招待講演
- 日野原 伸生「原子核集団現象への平均場アプローチ」、第64回原子核三者若手夏の学校、2018年、招待講演
- 他70件

図書

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

研究成果

総括班 X00（宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究）

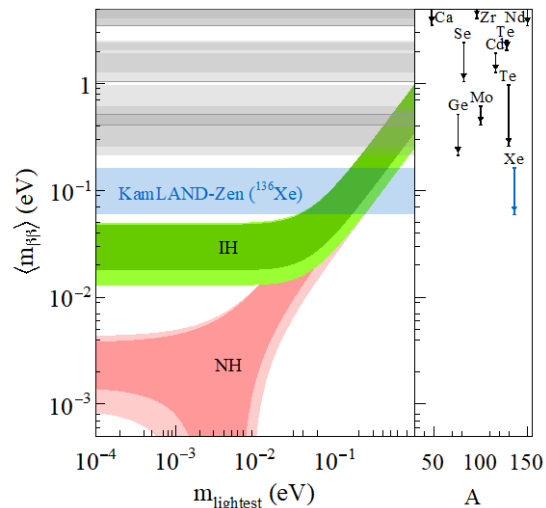
神岡地下の素粒子原子核研究が極低放射能を共通基盤として連携し、素粒子的宇宙像理論で橋渡しすることで、宇宙の歴史を系統的に解き明かしてきた。総括班は密接な運営会議・総括班会議によって連携を強く促進できた。特に極低バックグラウンド技術を共有化できたことで、各実験的研究が大幅に進展し世界をリードする成果をあげることができた。同時に、広い分野にまたがった研究対象を共通の技術や関心で取りまとめ新たな領域を定義できたことで、人材の流動性やキャリアパスの増加を生み出すことができた。国内・国際研究会を多数開催し、チュートリアルやパネルディスカッションなども企画することで、領域外も含めた連携を促進できた。

国際活動支援班 Y00（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）

相乗効果を生み出す技術連携の枠組みを、神岡地下から世界の地下施設に広げる活動を実施した。大型化が課題となり統合が進む暗黒物質探索では、地下素核研究の技術を携えて海外実験に合流し、大幅な性能向上を実現することとなった。また、方向感度を持つ暗黒物質探索では、神岡が世界のハブとして開発をリードしていく体制が作られた。さらに、極低放射能研究の将来技術として注目されている極低温蛍光熱量計開発においては、領域の蛍光結晶技術と韓国の低温熱量計技術を組み合わせた国際連携による開発が進んだ。共通基盤技術開発の国際協調体制が進んだことで、地下での素粒子原子核研究での将来に続くリーダーシップを発揮していく。

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

本研究では、世界最大量の二重ベータ崩壊核 (^{136}Xe 380kg) を、極低放射能環境を実現している KamLAND 検出器中央にミニバルーンを使って導入し、ニュートリノのマヨラナ性の検証を世界最高感度で実施した。作成当時に混入した福島原発由来の ^{110m}Ag を蒸留によって取り除くことに成功し、ミニバルーン以外の BG を大幅に低減することに成功した。キセノン蒸留には B01 班の装置を活用した。 ^{136}Xe のニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) に対して、90%信頼度で半減期の下限值 1.07×10^{26} 年を得た。さらにマヨラナ有効質量に換算して上限値 **61-165 meV** を得て、世界を大きくリードした。**達成目標を前倒しで実現**しており、ニュートリノ質量の縮退構造をほぼ全て排除することに成功している。 $0\nu 2\beta$ 探索は新たなステージに突入し、世界中が逆階層構造に届く感度を実現するための装置設計に大きく舵を切り始めた。



さらに、 ^{136}Xe 量を倍増するために B01 班や国外研究の技術を取り込みスーパークリーン環境で 2 倍サイズのミニバルーンを作成した。バルーン上のバックグラウンドは 10 分の 1 に低減され、ほぼ倍量の 745kg を導入できた。有効体積は 4 倍に拡大され、5 年以内に 40meV を切り込み複数の理論モデルを検証できる観測が開始しており、**当初の目標を達成**した。

将来への技術開発も進め、逆階層構造をカバーする 20meV の感度を達成する技術も整えた。同時に、地球ニュートリノや太陽ニュートリノの観測、近傍超新星前兆ニュートリノ観測の研究、天体现象に伴うニュートリノの探索など多様な研究を進めることができた。

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

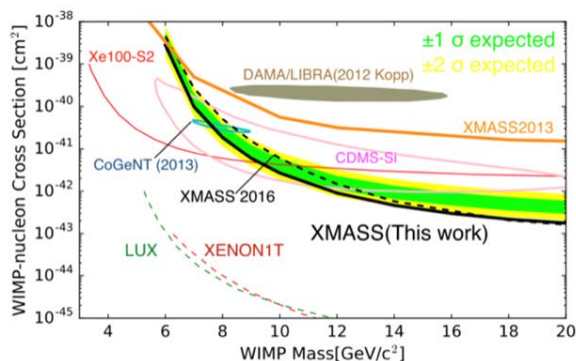
本研究では、 ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ の研究を推進した。具体的には ^{48}Ca 同位体濃縮技術の実用化と、高分解能蛍光熱量検出器の開発を進めた。並行して CANDLES 装置を用いて ^{48}Ca の $0\nu 2\beta$ の観測を進め、将来数 meV 領域までのマヨラナ性の検証を可能にする実験へ成長することを目指した。 ^{48}Ca の濃縮: 自然存在比が 0.19% と非常に低い ^{48}Ca を 2% 以上に高めるための、電気泳動法を基礎とする新しい手法 (MCCCE 法) で濃縮度を高め、量を増やす開発研究を進めた。泳動路を構成する BN を 10mm から 20mm に厚くし、装置の改良とパラメーターの探索を進めた結果、濃縮度でほぼ 100 倍となる $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比 15% を達成し、目標をはるかに超える結果

が得られた。 ^{48}Ca 濃縮同位体を購入し、クロスチェックを行ってこの結果の正しさを確認した。理論的考察から BN を厚くすることで更に高い濃縮度が期待できることも示した。新しい濃縮技術が誕生したと言える。蛍光熱量検出器開発： CaF_2 結晶の低温での特性を調べるために韓国のグループの冷凍機システムで特性を調べた。熱と蛍光の両方を測定できることが示され、研究の可能性が明確になってきた。連続する崩壊を捉えることで位置依存性を消せば高い分解能が得られることも確認した。二重ベータ崩壊測定：建設した遮蔽システムで、 γ 線と中性子起源のバックグラウンドをほぼ2桁減少させ、 $0\nu 2\beta$ の観測を進め、 ^{48}Ca での探索において世界で一番良い感度を達成した。

計画研究 B01 (大型実験装置による暗黒物質の直接検出)

本研究では、この宇宙最大の謎の1つである暗黒物質の謎に迫るべく、大型実験装置 XMASS を用いた暗黒物質探索と、次世代暗黒物質探索装置の開発・研究を行った。

前者では、先行研究の主張する暗黒物質信号、即ち季節変動事象の追試を行い、 3σ の信頼度で否定し、本研究の主目的を完了した。更に、Bosonic-SuperWIMP と呼ばれる暗黒物質探索を世界最高感度で実施し、Vector 型のもは暗黒物質ではあり得ないという結論を世界で始めて公表するなど、当初目標を越えた成果を得た。



後者では、世界最高感度の α 線検出器を開発し、極低放射能の測定や材質のスクリーニングが可能となった。これらを用いて、従来の約 10 分の 1 の放射線量の光電子増倍管の開発に成功し、次世代の暗黒物質探索装置の基礎を築いた。

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

ガス検出器、原子核乾板を用いた手法とともに、当初の予定通り検出器内の放射性物質定量評価、代替材料選択を行い、低 BG 検出器の製作に成功した。こうして製作したガス検出器を用いて、地下実験室にて方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行い、これまでよりも約 1桁強い制限を与えた。原子核乾板を用いた手法に関しては、予定通りの性能を持つ検出器の製作を経て地下実験の提唱を行うに至った。また、バックグラウンド研究の一環として行った地下環境での中性子測定は、領域内の連携を得て新たな研究へと発展した。

計画研究 C01 (超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究)

領域内の連携により、原料 Gd 化合物中の放射性不純物除去開発と水循環装置での陽イオン交換樹脂の開発を行い、低 BG かつ高い水透過率(水 15m に対するチェレンコフ光の透過

率 77%) が実現できた。これにより、超新星背景ニュートリノ (SRN) だけでなく、太陽ニュートリノも低閾値で継続観測できる。また、SRN モデルの理論的精密化も論文出版・Web 公開され、Gd 熱中性子捕獲 γ 線モデルの精密化の論文出版も進んだ。以上の成果により、SK-Gd 実験実施のための条件をすべて達成したと同時に、SK-Gd の観測データの解析準備も整えることができた。今後 SK-Gd の開始により世界初の SRN 観測が期待できる。

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

前兆ニュートリノを用いた超新星アラーム配信システムを構築し、2015 年 10 月から登録ユーザーに情報提供を開始した。また、アラームの信頼度向上へ向けて新しい前兆ニュートリノモデルを開発した。これは最新の恒星進化計算を基礎に、主な前兆ニュートリノ生成プロセスである電子/陽電子対消滅モデルの精密化、および爆発直前に重要となる原子核プロセスの組み込みからなる。さらに、近傍超新星爆発の超高頻度事象数に対応したデータ収集システムの強化を実現し、次世代地下実験に対応した新型フロントエンド電子回路の開発などを進めた。

計画研究 D01 (極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化)

(1) 極微量放射性不純物の除去技術により、NaI(Tl) 結晶に含まれるカリウム不純物濃度は、最終的に目標とする 20 ppb を達成した。(2) 高感度 80L Rn 検出器を開発・校正した。また、水中でのシート状素材の透過ラドンの分析など、新しい分析装置への応用も行った。(3) C01 班と協力し、1L Rn 検出器を A01, A02 班に提供して、神岡地下の全実験エリアでの環境 Rn モニターの整備を行った。(4) 極低放射能技術に関する研究会を毎年開催し領域内の技術連携を維持した。毎回、実験系の全ての計画研究・公募研究から 50~60 名ほどの参加があり、集中的な議論を行う大切な機会となった。(5) 2015 年(平成 27 年)以後、神岡地下に D01 班用の研究活動スペースを、宇宙線研究所の共同利用として確保し続けた。神岡坑内での低放射能技術開発を連携して進める体制を継続した。

計画研究 E01 (物質粒子の起源と宇宙進化の解明)

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

公募研究

本領域の公募研究は、H27～28年度に12件、H29～30年度は13件の研究が行われた。公募研究では、計画研究ではカバーしきれなかった研究課題、領域内の連携をより促進する研究課題を、個人の自由な発想・着眼点から推進することが重要である。その点では、寄田、梅原による極低バックグラウンド環境を活かした研究、上島、市川、黒澤、高田、丸藤、山下らによる萌芽的な実験手法の開発・研究によって、地下素核研究領域の拡大と深化を促進することができた。また、仁木、清水、吉田らによる極低BG技術の開発・研究は、本領域の最重要基盤である極低BG技術をより強固なものとする研究であった。本領域のもう1つの最重要基盤である理論的研究では、滝脇、中里、日野原、中村らによって、本領域で推進する実験に対する重要なインプットが与えられ、波場、浅賀らによって、歴史の解明と理解に向けた理論的研究が推進された。以下いくつかを抜粋する。

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

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

B01:「気液2相型アルゴン検出器による低質量暗黒物質探索」(寄田浩平)

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

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

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

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

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

C02:「ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明」(滝沢智也)

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

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

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

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

極低 BG 実験共通の課題である表面 BG 問題を解決するための、新しい検出器材料の開発として検出器材料表面に「薄膜蛍光フィルム」を溶着したアクティブな表面 BG 除去を提案した。ポリスチレンベースの蛍光材料を利用し、発光量 10^4 光子/MeV、時定数 10 ns と理想的な性能のフィルム開発に成功した。このフィルムを CaF_2 結晶と組み合わせ、発光波形の違いによる表面 BG 除去の原理検証を行い、これも成功した。さらに、塩化ビニル系の軟化剤添加で、検出器結晶と薄膜フィルムの密着性を向上させることにも成功し、汎用性のある薄膜蛍光フィルムが開発できた。

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

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

各班が連携した研究事例

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

などの技術および環境を提供し、世界トップレベルの低放射能結晶開発に貢献した。

A02 班の研究において、高エネルギーガンマ線に対する遮蔽体を導入する際に、検出器材料が環境熱中性子を捕獲し、数 MeV のガンマ線を発生する事象を大きく抑制する必要があった。そのため CANDLES 検出器の最外遮蔽体として、熱中性子を効率的に吸収するホウ素入りシリコンラバー製の熱中性子遮蔽シートを導入した。これにより、CANDLES 検出器に入ってくる熱中性子の量を 2000 分の 1 に低減することに成功した。この成果から、同質の材料が、B02 班で XMASS 検出器のキセノン循環ライン（水タンクの外部）で Xe の熱中性子捕獲による放射化を抑えるために利用された。また、神岡地下実験室での環境中性子測定（A01, A02, B01, B02, D01 班共同研究）において、熱中性子検出に感度の高い ^3He 比例係数検出器を用いた、高速中性子成分の測定セットアップにも利用され、中性子のフラックスの広範囲エネルギー領域での評価に大きな貢献をした。また、A02 班では、公募研究「二重ベータ崩壊実験用 Ca 同位体のレーザー濃縮」において、計画研究で開発を進めている電気泳動法とは異なる手法でのカルシウム同位体濃縮法開発が行われ、研究期間終了時には、70% 以上の高濃縮カルシウム 48 の生成に成功し、多様な方法でカルシウム同位体濃縮に取り組めるようになった。公募研究「カルシウム 48 のシングル β 崩壊の測定」では、研究協力者が中心となり、二重ベータ崩壊半減期の評価の際にバックグラウンドとなる崩壊モード（シングル β 崩壊）の測定に取り組み、研究協力を進めた。

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

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

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

D01 班では、領域内の技術的連携を維持するため、年に 1 度、極低放射能技術研究会を開

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

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