

領域略称名：ダークマター

領域番号：20A203

令和5年度  
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」  
に係る中間評価報告書

「ダークマターの正体は何か？」

- ・ 広大なディスカバリースペースの網羅的研究」

領域設定期間

令和2年度～令和6年度

令和5年6月

領域代表者 東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授・村山 斉

# 目 次

## **研究組織**

1	<a href="#">総括班・総括班以外の計画研究</a>	2
2	<a href="#">総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者</a>	4
3	<a href="#">公募研究</a>	11

## **研究領域全体に係る事項**

4	<a href="#">研究領域の目的及び概要</a>	14
5	<a href="#">審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況</a>	16
6	<a href="#">研究の進展状況及び主な成果</a>	18
7	<a href="#">研究発表の状況</a>	35
8	<a href="#">研究組織の連携体制</a>	40
9	<a href="#">若手研究者の育成に係る取組状況</a>	41
10	<a href="#">アウトリーチ活動に係る取組状況</a>	42
11	<a href="#">研究費の使用状況・計画</a>	43
12	<a href="#">今後の研究領域の推進方策</a>	44
13	<a href="#">総括班評価者による評価</a>	45

**研究組織**

(令和5年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

**1 総括班及び総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	20H05850 ダークマターの正体は何か？-広大なデ ィスカバリースペースの網羅的研究	村山 齊	東京大学・カブリ数物連携宇 宙研究機構・教授	2
A01 計	20H05851 軽いダークマターの生成と進化に関す る理論的探究	高橋 史宜	東北大学・理学研究科・教授	4
A02 計	20H05852 マルチメッセンジャーで探る重いダーク クマター	村瀬 孔大	京都大学・基礎物理学研究 所・特任准教授	5
A03 計	20H05853 原始ブラックホール・巨視的ダークマ ターの探究	柳 哲文	名古屋大学・理学研究科・講 師	5
B01 計	20H05854 重力波望遠鏡とレーザー干渉計実験に よる超軽量ダークマター探索	道村 唯太	東京大学・ビッグバン宇宙国 際研究センター・客員共同研 究員	4
B02 計	20H05855 すばる多天体分光観測によるダークマ ター探索	高田 昌広	東京大学・カブリ数物連携宇 宙研究機構・教授	6
B03 計	20H05856 広視野かつ高時間分解能天体イメージ ングによるダークマター探索	宮崎 聡	国立天文台・ハワイ観測所・ 教授	5
B04 計	20H05857 X線領域の観測技術の革新によるダーク クマター探索	山崎 典子	宇宙航空研究開発機構・宇宙 科学研究所・教授	9
B05 計	20H05858 電子陽電子加速器によるダークマター 探索	西田 昌平	高エネルギー加速器研究機 構・素粒子原子核研究所・准 教授	4
B06 計	20H05859 宇宙マイクロ波背景放射によるダーク クマター探索	小松 英一郎	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	2
C01 計	20H05860 量子重力理論から迫るダークマター	山崎 雅人	東京大学・カブリ数物連携宇 宙研究機構・教授	4

C02 計	20H05861 宇宙構造形成理論から迫るダークマター	安藤 真一郎	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員科学的研究員	6
総括班及び総括班以外の計画研究 計 12 件（廃止を含む）				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[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 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：ダークマターの正体は何か？-広大なディスカバリースペースの網羅的研究

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	村山 齊	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	領域代表・総括
分担	高田 昌広	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	領域事務
分担			
分担			
分担			
分担			
分担			
合計 2 名			

研究項目：A01

研究課題名：軽いダークマターの生成と進化に関する理論的探究

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高橋 史宜	東北大学・理学研究科・教授	研究総括・ダークマター理論
分担	山田 將樹	東北大学・学際科学フロン ティア研究所・助教	ダークマター進化
分担	川崎 雅裕	東京大学・宇宙線研究所・教 授	アクション宇宙論
分担	北嶋 直弥	東北大学・学際科学フロン ティア研究所・助教	ダークマター生成
分担			
分担			
分担			
合計 4 名			

**研究項目：A02**

**研究課題名：マルチメッセンジャーで探る重いダークマター**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	村瀬 孔大	京都大学・基礎物理学研究所・特任准教授	研究総括・宇宙粒子物理学
分担	藤井 俊博	大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授	観測データの解析
分担	廣島 渚	富山大学・学術研究部理学系・助教	宇宙粒子物理学理論
分担	山中 真人	横浜国立大学・大学院工学研究院・非常勤教員	素粒子理論
分担	成子 篤	京都大学・基礎物理学研究所・特定助教	重力理論
分担			
分担			
合計 5 名			

**研究項目：A03**

**研究課題名：原始ブラックホール・巨視的ダークマターの探索**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	柳 哲文	名古屋大学・理学研究科・講師	研究総括・数値シミュレーション
分担	原田 知広	立教大学・理学部・教授	PBH 形成過程と統計の理論解析
分担	黒柳 幸子	名古屋大学・理学研究科・招聘教員	観測的検証方法の提案
分担	佐々木 節	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授	宇宙初期モデル構築
分担	KUSENKO ALEXANDER	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	素粒子理論からの PBH 形式モデル構築
分担			
分担			
合計 5 名			

**研究項目：B01**

**研究課題名：重力波望遠鏡とレーザー干渉計実験による超軽量ダークマター探索**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	道村 唯太	東京大学・ビッグバン宇宙 国際研究センター・客員共 同研究員	研究総括・光リング共振器と KAGRA を用いたアクシ オン探索とゲージボソン探索
分担	藤田 智弘	早稲田大学・高等研究所・講 師	データ解析・新探査手法の開発
分担	LEONARDI MATTEO	国立天文台・重力波プロジ ェクト・特別客員研究員	重力波・光学素子評価
分担	三代木 伸二	東京大学・宇宙線研究所・准 教授	重力波・KAGRA 開発
分担			
分担			
分担			
合計 4 名			

**研究項目：B02**

**研究課題名：すばる多天体分光観測によるダークマター探索**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高田 昌広	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	研究総括・
分担	田村 直之	国立天文台・ハワイ観測所・ 教授	装置開発、プロジェクト管理
分担	石垣 美歩	国立天文台・ハワイ観測所・ 助教	観測戦略・立案
分担	砂山 朋美	名古屋大学・素粒子宇宙起 源研究所・客員研究員	観測パイプライン開発
分担	高橋 龍一	弘前大学・理工学研究科・准 教授	数値シミュレーション
分担	岡本 桜子	国立天文台・ハワイ観測所・ 助教	観測戦略・立案
分担			
合計 6 名			

**研究項目：B03**

**研究課題名：広視野かつ高時間分解能天体イメージングによるダークマター探索**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	宮崎 聡	国立天文台・ハワイ観測所・教授	研究総括・CMOS 開発
分担	鎌田 有紀子	国立天文台・先端技術センター・技師	CMOS 開発
分担	小宮山 裕	法政大学・理工学部・教授	CMOS カメラ制作・観測
分担	大栗 真宗	千葉大学・先進科学センター・教授	観測・データ解析
分担	川野元 聡	国立天文台・ハワイ観測所・特任研究員	ラッキーイメージングアルゴリズム開発
分担			
分担			
合計 5 名			

**研究項目：B04**

**研究課題名：X線領域の観測技術の革新によるダークマター探索**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	山崎 典子	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授	研究総括・観測データ解析・地上実験主導
分担	田村 隆幸	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教	観測的研究立案
分担	平山 文紀	産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・主任研究員	超電動回路・読み出し回路
分担	佐藤 昭	産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・主任研究員	超電動回路
分担	シミオネスク オーロラ	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員科学研究員	観測計画立案
分担	佐藤 浩介	埼玉大学・理工学研究科・准教授	観測立案・測定環境整備
分担	満田 和久	国立天文台・先端技術センター・特任教授	太陽アクシオン検出実験



分担	林 佑	立教大学・理学部・助教	分光検出器製作
分担	神代 暁	産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・総括研究主幹	超電動回路全般
合計 9 名			

**研究項目：B05**

**研究課題名：電子陽電子加速器によるダークマター探索**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	西田 昌平	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授	研究総括
分担	LAI Yun・Tsung	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教	トリガー研究
分担	角野 秀一	東京都立大学・理学研究科・教授	データ解析
分担	原 康二	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師	データ解析
分担			
分担			
分担			
合計 4 名			

**研究項目：B06**

**研究課題名：宇宙マイクロ波背景放射によるダークマター探索**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	小松 英一郎	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	研究総括・CMB を用いたダークマター探索の観測的研究
分担	白石 希典	公立諏訪東京理科大学・工学部・准教授	CMB を用いたダークマター探索の理論的研究
分担			

分担			
分担			
合計 2 名			

**研究項目：C01**

**研究課題名：量子重力理論から迫るダークマター**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	山崎 雅人	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	研究総括・超弦理論
分担	白井 智	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・特任助教	素粒子論・ダークマター理論
分担	野村 泰紀	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・客員上級科学 学研究員	量子重力・素粒子論
分担	齊藤 遼	山口大学・大学院創成科学 研究科・助教	量子重力・宇宙論
分担			
分担			
分担			
合計 4 名			

**研究項目：C02**

**研究課題名：宇宙構造形成理論から迫るダークマター**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	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	研究総括・準解析的理論モデルの開発（サブハローモ デル）
分担	樽家 篤史	京都大学・基礎物理学研究 所・准教授	準解析的理論モデルの開発（宇宙摂動論、位相空間）
分担	岡本 崇	北海道大学・理学研究院・教 授	シミュレーション（銀河形成、バリオン効果）
分担	西道 啓博	京都産業大学・理学部・准教 授	シミュレーション（空間統計、予言ツール）

分担	白崎 正人	統計数理研究所・統計思考院・助教	準解析的理論モデル開発（大規模構造形成理論）
分担	Dalal Neal	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	シミュレーション（サブハロー、SIDM）
合計 6 名			

### 3 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]
D02 公	21H05446 超伝導体から放出される、暗黒物質アクシオン由来電磁波の検出実験	令和3年度 ～ 令和4年度	岸本 康宏	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授	1
D02 公	21H05450 Search for Dark Matter of Axion and Dark Photon at the LHC – ATLAS Experiment	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 純一	東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授	1
D02 公	21H05454 ガンマ線・低表面輝度銀河・銀河間物質から探るダークマターの素粒子的性質	令和3年度 ～ 令和4年度	西澤 淳	岐阜聖徳学園大学・DX推進センター・准教授	1
D02 公	21H05455 XENONnT 検出器を用いた電子と弱く相互作用する暗黒物質の探索	令和3年度 ～ 令和4年度	風間 慎吾	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授	1
D02 公	21H05456 多波長データと弱重力レンズによるアセンブリバイアスとスプラッシュバック半径の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	宮武 広直	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授	1
D02 公	21H05460 デッドタイムフリーな暗黒物質探索用スペクトロメータ dSpec の開発研究	令和3年度 ～ 令和4年度	鈴木 惇也	京都大学・理学研究科・助教	1
D02 公	21H05461 新型X線ピクセル検出器で地上と宇宙から迫る相互作用の混合がないアクシオン探索実験	令和3年度 ～ 令和4年度	鶴 剛	京都大学・理学研究科・教授	1
D03 公	21H05447 すばる望遠鏡による銀河系矮小銀河の網羅的動力学研究とダークマターの正体解明	令和3年度 ～ 令和4年度	林 航平	一関工業高等専門学校・講師	1
D03 公	21H05448 銀河動力学と超低質量暗黒物質粒子の理論に基づく暗黒物質の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	千葉 柁司	東北大学・理学研究科・教授	1
D03 公	21H05449 ダークマターの性質が活動銀河核の統計的性質に及ぼす役割の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	大木 平	愛媛大学・宇宙進化研究センター・研究員	1
D03 公	21H05451 Astrophysical and Terrestrial Signals of Axion Stars	令和3年度 ～ 令和4年度	Joshua Eby	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員	1

D03 公	21H05452 (廃止) Refined relic abundance calculations for thermal and non-thermal Dark Matter	令和3年度 ～ 令和4年度	Tobias Binder	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員	1
D03 公	21H05453 重力波レーザー干渉計を用いた軽いダークマターの検証	令和3年度 ～ 令和4年度	須山 輝明	東京工業大学・理学院・准教授	1
D03 公	21H05459 高赤方偏移2.1 cm 線観測によるダークマターモデルの検証	令和3年度 ～ 令和4年度	田代 寛之	崇城大学・総合教育センター・准教授	1
D03 公	21H00075 量子重力で探る暗黒物質と標準模型粒子の相互作用	令和3年度 ～ 令和4年度	野海 俊文	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
D03 公	21H05463 Search for TeV - Range Dark Matter with Electron and Positron Cosmic Rays	令和3年度 ～ 令和4年度	Holger Motz	神奈川大学・工学部・研究員	1
D03 公	21H05465 コズミックバリエーションの考慮による大スケール構造形成に対するCDMモデルの妥当性確立	令和3年度 ～ 令和4年度	正木 彰伍	鈴鹿工業高等専門学校・機械工学科・講師	1
D03 公	21H05466 電子陽電子ビームを用いた固定標的実験によるダークマター探索	令和3年度 ～ 令和4年度	坂木 泰仁	高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・助教	1
D03 公	21H05467(廃止) GAN を応用したジーンズ方程式ソルバーによる暗黒物質分布の決定とその応用	令和3年度 ～ 令和4年度	野尻 美保子	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	1
E01 公	23H03999 25 $\mu\text{eV}$ とそれを越えた質量の暗黒物質 Axion、HP 探索のための共振空洞の開発・研究	令和5年度 ～ 令和6年度	岸本 康宏	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授	1
E01 公	23H04002 高性能計算と観測の協働で挑むダークマターの正体解明	令和5年度 ～ 令和6年度	石山 智明	千葉大学・大学院融合理工学府・准教授	1
E01 公	23H04004 ニュートリノから探る暗黒物質	令和5年度 ～ 令和6年度	藤間 崇	金沢大学・国際基幹教育院・助教	1
E01 公	23H04005 アセンブリ・バイアス入りの宇宙論エミュレータの開発と $\Lambda$ CDM標準宇宙論の徹底検証	令和5年度 ～ 令和6年度	宮武 広直	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授	1

E01 公	23H04006 新型X線検出器による相互作用の 混合のないアクション探索・長期 地上観測とその先へ	令和5年度 ～ 令和6年度	鶴 剛	京都大学・理学研究科・教授	1
E02 公	23H04007 量子重力に基づく暗黒物質現象論	令和5年度 ～ 令和6年度	野海 俊文	東京大学・大学院総合文化 研究科・准教授	1
E02 公	23H04009 すばる超広視野多天体分光器で迫 る銀河系矮小楕円体銀河のダーク マター分布	令和5年度 ～ 令和6年度	林 航平	一関工業高等専門学校・そ の他部局等・講師	1
公募研究 計 26 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

## 研究領域全体に係る事項

### 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「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、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** – ダークマターは一世紀近く重要な問題でありながら、その正体については未だに糸口が見えない。またその性質次第では宇宙の組成と物質分布に違いが生まれるため、今後の天文学・宇宙物理学の動向を大きく左右し、標準理論を超える素粒子物理学の方向性を決めるものである。そのため、広く網をかけてダークマターの正体の情報をつかむのが本領域の目的である。

ダークマターの存在については、天文学の分野で1930年代にまず Fritz Zwicky が銀河団の中での銀河の運動が速すぎることを発見し、「見えない重力源」としてその存在を指摘した。また1960年代以降 Vera Rubin らの銀河の平坦な回転曲線の観測から、ダークマターは全ての銀河に普遍的に存在することが確立した。一方、宇宙物理学とは対極のスケールにある素粒子物理学の分野では、標準理論の抱える不自然さを解決するために、新粒子の提案がなされてきた。重力と電弱相互作用の強さが30桁ほど異なる階層性問題は特に大きな問題として注目され、1980年代からは電弱相互作用のエネルギースケールである30-3000GeVに超対称性や余剰次元などの新粒子の存在が理論的に指摘されるようになった。その一つがダークマターとなる可能性が非常に魅力的であると考えられ、Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) というパラダイムとして分野で定着した。ヨーロッパ CERN の巨大ハドロン加速器 LHC はこの探索のために20年以上の歳月をかけて建設され、2012年のヒッグス粒子の発見で脚光を浴びたが、ダークマターの候補となる新粒子の発見には未だ至っていない。小柴昌俊や梶田隆章のノーベル賞に見られるように相互作用が弱いニュートリノを地下実験で研究した成功体験に基づき、超高感度・超低バックグラウンドの地下実験による WIMP の直接検出実験も進められてきた。世界中で激しい競争が続いているが、これも検出の兆候がない。



図1: それぞれの質量範囲スケールにおけるダークマター候補。「古典波」の性質を示す超軽量ダークマター、「軽い素粒子的ダークマター」、「重い素粒子的ダークマター」、プランク質量より重い「複合粒子」、原始ブラックホールなどの「巨視的天体」がある。下の各々の矢印は、本領域が提案する各ダークマター候補の探査法を表す。

このため、長年のあいだ素粒子物理学の要請に引きずられる形で、質量範囲で約2桁の狭い範囲にある WIMP ダークマターに探索が集中してきたことを反省し、より網羅的にダークマターの候補の理論を考察し、実験的・観測的に検証する必要性かつ重要性が近年認識されつつある。そもそも WIMP 以外にも標準理論に含まれない新粒子がある可能性は数多く指摘されており、ダークマターの候補も数多くの可能性がある。

本領域のこういった点が、学問分野に新たな変革や転換をもたらし、当該学問分野の強い先端的な部分の発展・飛躍的な展開などを期待できる基礎的研究に該当するのか – ダークマターのパラメータ空間

が広大であることは、逆に巨大なディスカバリースペースがあることを意味する。新しいアイデアさえあれば、今まで探索されてこなかったパラメータ空間を比較的小さな規模の実験・観測で探索できる。本領域では既存の施設を最大限活用し、理論の進展と新たな解析手法を組み合わせることでインパクトの大きい新たなダークマター探索を狙う。日本の持つ既存の施設としては、建設したばかりの重力波望遠鏡 KAGRA とそのために開発したレーザー干渉計の基礎技術、ハワイ島マウナケア山頂にあるすばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC; 現在世界最大) と現在建設が進む多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS; 8m 級以上の望遠鏡で最大視野・最多ファイバー数)、つくば市の高エネルギー加速器研究機構で始まったばかりの電子陽電子加速器 SuperKEKB の Belle II 実験、JAXA が 2023 年に打ち上げ予定で高エネルギー分解能の X 線分光観測が可能な XRISM 衛星、そして CMB 実験では米国主導の Atacama Cosmology Telescope、South Pole Telescope に加えて、日本が中心的な役割を果たしてチリで建設が進む Simons Array 地上実験と、日本がリードする衛星計画 LiteBIRD などがある。こうした日本の投資を最大限活かしてダークマターの探索を行う。並行して、将来のダークマター探査の性能向上を目指し、可視光カメラで読み出し時間のロスを最小化する高速読み出しの素子および将来の人工衛星での X 線観測のための基礎技術・基盤装置の開発を行う。

こうした実験・観測によるダークマター探索の戦略を立てるためには理論的な考察が欠かせない。そのため、本領域ではパラメータ空間を大きく三つに分けて考える。(1)「波」の性質を持つ古典的な場で記述される、質量が軽い領域 (eV 以下、アクシオン、ダークフォトン、ディラトンなど) から WIMP よりも軽い数 10 GeV までの範囲 (ステライルニュートリノ、Strongly Interacting Massive Particle=SIMP、非対称ダークマターなど)、(2)WIMP よりも重い数 TeV から「粒子」として存在し得るプランク質量までの範囲 (WIMPZILLAs、non-thermal relic など)、(3)プランク質量を超える複合物質 (例えば、Q ボールなどのソリトン) や数 100 太陽質量までの巨視的天体 (原始ブラックホールなど)。それぞれのダークマター候補について、理論班がその生成機構や物理を徹底的に研究し、観測・実験にフィードバックを与える。

2010 年代は LHC など WIMP の探索が急速に進み、結局兆候が見つからなかったことを鑑み、ダークマター研究は新しいパラダイムへ移行する時期が来ている。同時に、重力波観測のために開発してきたレーザー干渉計など様々な新しい技術が成熟してきており、重力波・宇宙線・高エネルギーニュートリノなどを含むマルチメッセンジャー天文学も進展しているため、総合的に新たな観測手段を考えることができるようになってきている。オープンな広い視野で網羅的な研究を行うことで、今までになかった多くの分野の研究者が属する研究グループを形成し、大きな研究の流れを作り出す。

**国際的な優位性** - 本領域は 2024 年に観測を開始する世界最高性能のすばるの多天体分光器 PFS や、JAXA と NASA が協力して 2023 年に打ち上げ予定の XRISM 衛星、稼働を始めたばかりの世界最高輝度の SuperKEKB 加速器など世界に類を見ない日本の最先端施設を最大限活用するので、国際的優位性は必然的に高い。また、日本の若手研究者のアイデアに基づく観測・実験の手法 (レーザー干渉計など) を本領域の研究費で実現し、世界に先駆けて超軽量ダークマターの新探査を期間中に行うため、その独創性・新規性が高い。

こうした網羅的な研究組織は世界になく、非常にタイムリーな研究である。特に、日本が投資してきた大規模施設を有効活用することでダークマターのパラメータ空間を調べていくことができるユニークさがある。また新しい分野であるため特に若い研究者が飛び込むのに適した研究テーマであり、実際に計画研究班の代表 11 人中 8 人が 45 歳以下である。ジェンダーのバランスにも留意し、チームの 17% が女性研究者である。研究内容のユニークな魅力から、国際的な関心も高く、アメリカ (UC Berkeley, Princeton U., Caltech, UCLA, Johns Hopkins U., Penn State U.)、カナダ (Perimeter Institute)、ドイツ (Max Planck Institut fuer Astrophysik)、オランダ (U. Amsterdam、SRON: オランダ宇宙研究所) などの一流研究機関から、当該分野で世界的に活躍する研究者も参加している。本領域で得られた研究成果は、速やかに査読雑誌および国内・国際研究会で発信することは言うまでもないが、本領域に所属する海外研究機関に所属する研究者、さらに国際的なネットワークを通し、ダークマター研究の大きな流れを作ることを目指す。



## 5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

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

### 【審査結果の所見において指摘を受けた事項】

#### 複数の計画研究で最終年度に高額設備備品の購入が予定されているが、どのように利用するのか

最終年度に高額設備備品の購入費を計上している計画研究は B01「レーザー干渉計」、B02「すばる分光」によるダークマター探査の研究項目である。

B01「レーザー干渉計」の最終年度には、光リング共振器の高感度化のための高出力レーザー光源、高出力レーザー光を用いた干渉計を入れる超高真空対応の真空槽のための経費を計上している。最終年度までに、レーザーの高出力化以外の開発を進め、実際に観測運転を行うことで、レーザーの高出力化さえすれば高感度化できる状態まで開発を進める。高出力化により、うまく行けば3桁の感度向上が可能であり、R5年度までに予定している1年の観測と同等の観測が30秒程度で可能となるため、アップグレード後の装置を用いたアクシオンダークマター探索も研究期間内に完了させることが十分に可能であり、さらなる将来の研究の展開にも目を向けた重要な経費である。このように期間前半年度における確実な実験設備、手法の確立を行い、実際の観測データによる検証を行い、最終年度にさらなる発展のための設備投資を行う。

B02「すばる分光」の最終年度には、B02グループ、国立天文台、プリンストン大学、台湾の中央研究院天文及天文物理研究所の研究者が協力して、現在製作中のすばる広視野多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)の高精度データ構成システム(ハード・ソフトウェア)を開発する経費を計上している。現在、ハワイ観測所のすばる望遠鏡サイトで、すばる PFS のサブコンポーネントの組み上げ、組み上げ済みの分光器で試験観測の実行、試験観測データの評価・検証を行っている。R2年度、3年度はコロナ禍で開発にやや遅れが出たものの、R4年度に加速的に進め、R4年度、今年度のR5年度には本格的に試験観測を行えるようになった。PFS装置は極めて複雑な装置であり、実PFSデータを用い、較正システムの開発・検証・評価・改良することが必須である。最終年度(R6年度)までには、全12台の分光器の試験観測データが取得できる予定であり、実データに基づいた開発を行う。このように実PFSデータを用いて較正システムを開発し、万全の体制を整え、領域研究期間内に速やかにサイエンスを行う。

### 【審査結果の所見において指摘を受けた事項】

#### 総括班代表(領域代表)のエフォートはマネジメントだけなのか、あるいは総説などを執筆を含むのか

領域代表の村山のエフォートは、領域のトップマネジメントだけでなく、アウトリーチ活動、ダークマターの研究、世界(主に米国)のダークマター研究の情勢の情報提供など、多岐に渡る。以下に述べるように、これらの活動の多くは村山にしかできないものであって、余人をもって替えがたい。加えて、領域の最終年度、あるいは領域の終了後には、ダークマター研究の将来のためにも、本領域の研究成果の総括の執筆なども予定している。本中間報告で述べるように、領域の研究は順調に進んでいる。

村山は、初代機構長としてカブリ IPMU をゼロから立ち上げ、世界的な研究機関の一つにまで育てた

マネジメントの実績があり、そのリーダーシップ能力には疑いの余地がない。領域の総括班会議では、依然として強力なマネジメント力を発揮しており、領域の方向性を打ち出している。ただし、超多忙を極め、領域の業務を分担している。例えば、領域の事務的作業については、カブリ IPMU の同僚である高田(B02 研究者代表)が行い、村山をバックアップしている。

村山は、超多忙にも関わらず、アウトリーチ活動を精力的に行っている。一般講演会も多数行っているが、例えば、NHK E テレビ/NHK BS プレミアム「コズミックフロント Ω」のなかの複数回“宇宙の終わり”、“謎の物質ダークマター”、“素粒子のヒミツ”、“アインシュタインの宿題”で監修を務め、また実際に解説のために番組にも出演している。コロナ渦中にもオンライン、新聞などを通して、積極的にアウトリーチ活動を行った。このように大手メディアなどを通し、アウトリーチ活動を行っており、小中高生の若者も含め、その波及効果は計り知れない。すでに村山の知名度は物理学の学術業界を超えて、認知度が最も高い研究者の一人である。

村山は、この状況のなかでも、ダークマターの研究も含む、継続的に査読論文を発表している。例えば、最近でも、物理業界で権威ある Phys Rev. Lett.でもダークマター理論の論文を共同研究者とともに発表している([Frumkin, Hochberg, Kuflik, Murayama Phys. Rev. Lett. 2021](#))。このようにダークマターの理論的研究では依然として業界のフロントランナーである。

さらに、村山は、米国での今後 10 年間の素粒子物理学研究プロジェクトの優先順位付け P5(Particle Physics Project Prioritization Panel) の議論をコミュニティで行う活動において、2022 年 10 月に議長に就任した。P5 のなかでも、本領域が掲げるように、広い質量範囲のダークマター探査を行うべきというサイエンス白書([Cosmic Probes of Dark Matter: Alex Drlica-Wagner など](#))が提出されている。つまり、本学術領域「ダークマター」はこれを先駆けており、タイムリーな研究提案であることがわかる。この他にも P5 では、S8 不一致問題など宇宙論の最前線の問題も議論されており、村山は米国でのダークマター研究の将来計画・戦略を最も良く知る人物になっている。P5 の最終報告書は 2023 年中に発表される予定であり、そのあとには米国での活動の情報共有を持つことができ、また本学術変革領域へのフィードバックが得られる予定である。例えば、2024 年に始動する、米国主導の超大型宇宙観測計画 Rubin Observatory LSST は、ダークマターの研究を進展させるはずであり、一方で、本領域のすばる PFS は LSST と極めて相補的な役割を果たすことができる。LSST と PFS を組み合わせることでダークマターの研究がさらに進展させることができる。P5 の戦略を受け、日本でのダークマター研究の戦略を練ることができる。

## 6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び (2) について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。  
(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する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。)

### 概要 (進展状況および主な成果のサマリー)

本学術変革領域「ダークマター」は、ダークマターの正体を解明するために、ダークマターの質量で90桁に亘る広大なディスカバリースペースを網羅的にカバーし、今までにない多角的な方法で理論から宇宙観測・地上実験に跨がる研究領域を拓くことを目的とする。

この3年間の本領域の研究で、当初は想定し得なかった、以下に述べるような特筆すべき研究成果を挙げている。宇宙背景放射(CMB)グループの研究者らは、CMB偏光の複屈折(birefringence)を測定する独自の手法を開発し、公開データであるWMAPおよびPlanck衛星のCMB偏光データに適用し、業界で初めてゼロでない複屈折角を $3.6\sigma$ 程度の統計的有意性で報告した。この複屈折角は、パリティ対称性を破るアキシオン場のようなダークマターがCMB光子と相互作用することで起こり得る。宇宙のアキシオン場を検出したとなれば、我々の宇宙観を変えるような宇宙論・物理学のブレークスルーとなる成果である。この研究は、本領域の理論的研究、地上実験のアキシオン研究にも波及効果を及ぼしただけでなく、業界にも活発な議論を巻き起こしている。

さらに、本領域の研究グループが中心となり、すばる望遠鏡広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC)の3年間宇宙観測データから宇宙大規模構造の弱重力レンズ効果を精密に測定し、宇宙の標準理論である $\Lambda$ CDMモデルの宇宙論パラメータを測定した。この解析では、客観性を担保し、信頼性の高い結果を得るために、素粒子実験などでよく用いられる「ブラインド解析」を採用した。また、重力レンズ効果を用いた宇宙論では最大の懸念である銀河の測光的赤方偏移の不定性について、業界で初めて保守的な手法を採用した。その結果、すばるHSCの支持する $\Lambda$ CDMは、初期宇宙のデータであるPlanck CMBデータから外挿した $\Lambda$ CDMと $2.5\sigma$ 程度の矛盾( $S_8$ 不一致問題)を示すことが独立に確認できた。この矛盾は、例えば上述のアキシオンがダークマターである場合に解決できる可能性があり、全く異なる宇宙観測が同様の示唆を与えており、今後の展開が非常に楽しみである。

上述の成果に加えて、実験グループ「重力波レーザー干渉計を用いたダークマター探査」、「すばる広視野多天体分光器Prime Focus Spectrographによるダークマター探査」、「高時間解像度イメージングによるダークマター探査」、「X線検出器によるアキシオン、keV質量スケールのダークマター探査」、「電子陽電子加速実験データからのダークマター探査」の研究に関する装置開発、基盤整備についても、コロナ禍の影響はあったものの、ほぼ順調に開発が進んでいる。「軽いダークマター」、「重いダークマター」、原始ブラックホールを含む「巨視的ダークマター」の理論的研究、トップダウン的アプローチである「量子重力」の観点からのダークマターの理論的研究、異なるダークマターモデルにおける宇宙構造形成の網羅的な研究でも様々な成果が出ており、異なる計画研究グループおよび公募研究間の共同研究の研究成果も得られている。

特筆すべきなのは、上記の研究成果について、ダークマターという誰もが興味をもつ研究テーマ、新しい手法の観測・実験・理論的研究、また高いレベルの国際共同研究の環境に後押しされるかたちで、大学院生、博士研究員の若手研究者が存分に実力を発揮し、大活躍していることである。本学術変革領域の研究環境により、次世代を担う、優秀かつ国際的な人材が育成できていることを実証している。

以上の理由により、本領域の研究は当初の予想を超えて大きく進展している。今後のさらなる発展が期待できる。

### 本文

本領域では、宇宙の物質質量の大部分を占めるダークマターの正体を解明するために、サイエンスの柱として「軽いダークマター」、「重いダークマター」、「巨視的ダークマター」を立て、約90桁の範囲に及ぶ広い質量範囲のダークマター候補を網羅的に調べる戦略をとっている。このサイエンステーマを調

べるために、研究項目として「理論班」(A01-A03)、「地上実験・宇宙観測班」(B01-B06)、「究極班」(C01-C02)の計 11 班の研究計画を組織した。これまで独立に進められていた「地上実験」および「宇宙観測」、またそれらの様々な手法の計画研究を個々に発展させるだけでなく、互いの相乗効果、共同研究を促してきた。

領域発足後 3 年間で、上記の研究促進の効果もあり、当初の予想を超えた様々な研究成果が出ている。特に、軽いダークマターの有力候補であるアクシオンの観測的、実験的、理論的な研究で、各計画研究班、あるいは異なる計画研究に跨がる共同研究で、様々な研究成果が出ている。これは領域発足前には予想できなかった研究成果、また新しい研究の展開であり、学術変革の特色が引き起こした成果と言える。以下では、まずアクシオンの研究成果について述べ、そのあとに各計画研究で得られた成果を述べる。特に、異なる計画研究、公募研究との共同研究の研究成果、大学院生など若手研究者がリードした研究成果については太字で強調する。各計画研究の記述は計 2 ページ以内となるように留意している。

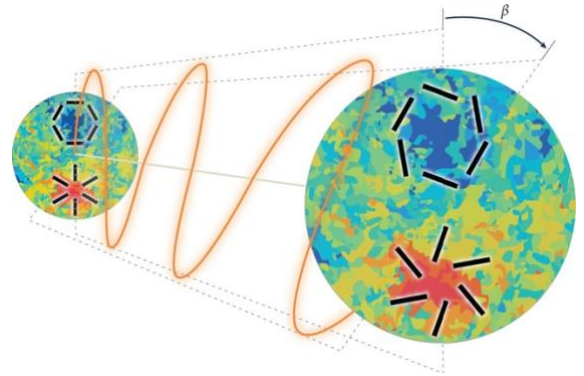


図 1: 宇宙複屈折効果の説明図。138 億年前に放射された CMB(左図)の光の波(オレンジ線)の偏光方向は、パリティ対称性を破るダークマターとの相互作用によって角度 $\beta$ だけ回転し、観測される CMB の偏光分布が変わる。

**アクシオンダークマターに関する研究成果 – 計画研究 B06「宇宙マイクロ波背景放射によるダークマター探索」(略称 CMB)** – B06 班の計画代表者小松英一郎は、CMB 観測衛星 WMAP のデータを用い、宇宙の標準理論 $\Lambda$ CDM の確立を決定的にした研究をリードした研究者である。B06 班の目的は、CMB の公開データからダークマター探査を推進することと、今後の CMB 観測で可能になるダークマター探査の手法を開発することである。この目的の下、この 3 年間で CMB の偏光データを用いたアクシオンダークマター探査の研究で大きな成果を挙げた。これは関係する研究分野の注目を集め、研究の大きな流れを引き起こした。

パリティ対称性を破るアクシオン場のようなダークマターが光子と相互作用を行うと、光子の偏光面は回転する(宇宙複屈折効果; 図 1 参照)。この効果により CMB の偏光パターンは変化し、E モードと B モード偏光の相互相関(EB 相関)が生じる。この相互相関は、パリティ対称性を保存する標準的な宇宙モデルでは得られないため、パリティ対称性を破るダークマター探査を可能にする。計画研究 B06 班の小松らは、公開データである NASA の WMAP 衛星と ESA の Planck 衛星から得られた CMB の偏光データから EB 相関のパワースペクトルを測定した(図 2; [Diego-Palazuelos et al., Phys. Rev. Lett. 2022](#); [Eskilt & Komatsu, Phys. Rev. D 2022](#))。この結果から、68% の信頼領域で回転角度として  $\beta = 0.34 \pm 0.09$  度が得られた([Eskilt & Komatsu 2022](#))。  $\beta = 0$  は 99.987% の確率で棄却され、ガウス分布を仮定した統計的有意性は  $3.6\sigma$  である。  $5\sigma$  にはまだ及ばないが、今後の研究でゼロでない  $\beta$  の存在が確認されれば、宇宙論研究におけるブレイクスルーとなる。 $\beta$  の発見はダークマターだけでなく、ダークエネルギーや宇宙初期のインフレーションに至るまで広範囲の基礎物理学に対して大きなインパクトを持つと期待されており([Komatsu, Nature Rev. Phys. 2022](#))、近年大きく注目されている。これは本計画研究あつての成果であるが、最初はこれほど統計的に有意な  $\beta$  の値が得られるとは考えておらず、中間評価までに予想を大きく上回る成果が得られた。

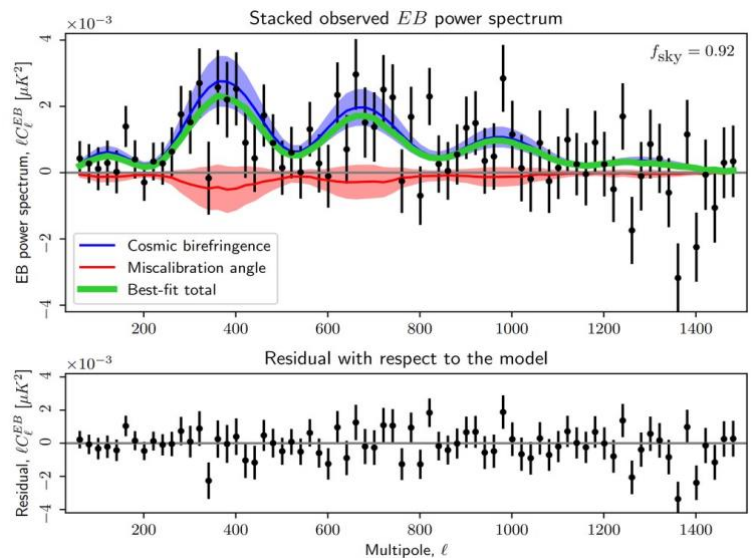


図 2: WMAP 衛星と Planck 衛星の偏光データから得られた EB 相関のパワースペクトルを、球面調和関数の  $l$  の関数として示す。上のパネルでは、EB 相関の測定データ(誤差棒付きの黒丸)をベストフィットのモデル(緑線)、検出器の偏光角度の較正誤差の寄与(赤線)、および  $\beta = 0.34 \pm 0.09$  度の寄与(青線)との比較を示す。下のパネルでは測定データとベストフィットモデルの残差を示し、これはゼロと無矛盾である。

測定された EB 相関がダークマターによるものか、あるいはダークエネルギーによるものかを判定するには、従来の単純化された理論予言では不十分である。B06 班の若手研究者のリードにより、ボルツマン方程式を解くことでより正確な EB 相関のパワースペクトルの理論予言を得た(図 3: [Nakatsuka et al., Phys. Rev. D 2022](#); [Murai et al., Phys. Rev. D 2023](#)) (中塚洋佑、村井開ともに当時大学院生)。アキシオン場に基づくモデルでは、ダークエネルギーは  $10^{-32}$ eV より小さな、非常に軽い質量を持つアキシオン場で記述される。質量がこれより大きいと、アキシオン場はダークマターの一部となる。質量の違いは EB 相関のパワースペクトルの形に現れる。違いは小さな  $l$  で顕著となるが、そのような小さな  $l$  は現在測定できていない。JAXA 主導で計画されている次世代の CMB 衛星 LiteBIRD で解明できると期待される。

アキシオン場は複数個あると考えるのは自然である。その場合、アキシオン場の線型結合の一つはダークエネルギーほどの軽い質量を持ち、もう一つの線型結合は全てのダークマターを説明できるほどの重い質量を持つことができる。前者は測定された  $\beta$  を説明でき、後者は B01 実験班で開発が進められているレーザー干渉計 (DANCE 計画) で発見できる可能性がある ([Obata, JCAP 2022](#)) (B01、B06 班の共同研究)。このような分野横断的な理論的発見は、本学術変革領域あつての成果である。

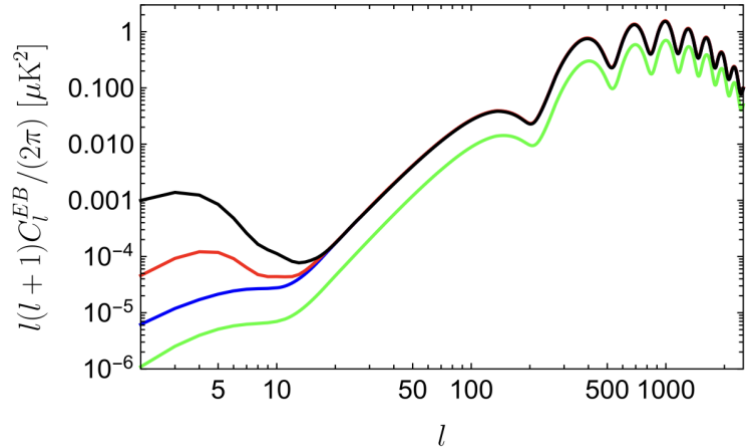


図 3: ボルツマン方程式を解いて得られた EB 相関のパワースペクトル。実線は異なるアキシオン場の質量に対応し、下から  $10^{-28}$  eV (緑線)、 $10^{-30}$  eV (青)、 $10^{-31}$  eV (赤)、 $10^{-32}$  eV (黒) を示す。

**計画研究 B01「重力波望遠鏡とレーザー干渉計実験による超軽量ダークマター探索」** (略称: レーザー干渉計) – B01 班は KAGRA のような重力波望遠鏡や、テーブルトップサイズのレーザー干渉計を用いて、超軽量ダークマター探索をかつてない精度で探索することを目標としている。極めて軽い新粒子は、宇宙論の観点から有力なダークマター候補である。特に、光子とわずかに相互作用するアキシオンや、鏡に非標準的な力を与えるゲージボゾンといった新粒子に着目した探索を行っている。

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を用いたアキシオン探索においては、2022 年度までに必要となる偏光光学素子の導入を完了した(図 4)。2024 年春に終了予定の観測運転期間中に、大型重力波望遠鏡としては初となるアキシオン探索データが取得できる見込みである。B06 班の記述にある宇宙複屈折効果と同様に、アキシオンはレーザー光とわずかに相互作用して、光の偏光を回転させる。KAGRA の 3 km の両腕の透過光に偏光光学素子を導入し、その偏光回転を測定することでアキシオン探索を行う。この手法は大学院生(当時)の長野晃士が中心になって提案した手法([Nagano et al., Phys. Rev. D 2021](#))である。重力波信号取得ポートを利用する方法に比べると最高感度は悪いものの、低質量側のアキシオンに対しては、高感度を実現することができる。また、両腕で偏光をモニタすることにより、相関解析によって疑似信号の除去なども可能となる。

KAGRA を用いたゲージボゾン探索においては、大学院生の糸潤哉が中心となり、2020 年 4 月に取得したデータを利用したデータ解析を進めている。2022 年度までに、100 時間に及ぶデータの解析は完了しており、鏡の位置変動に対する信号雑音比の計算や、疑似信号除去が完了している。LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーション内で結果をレビューし、2023 年秋頃に最終結果を公表予定である。本解析では、B01 班の研究代表者道村らが提案した B-L ゲージボゾン探索の手法を利用している ([Michimura et al., Phys. Rev. D 2020](#))。KAGRA にはサファイア鏡と石英鏡が用いられているが、B-L ゲージボゾンは材質によって振幅の異なった力を与えるため、サファイア鏡と石英鏡の

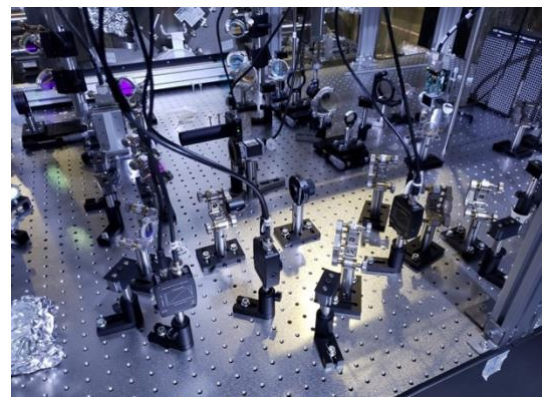


図 4: KAGRA に導入されたアキシオン探索のための偏光光学素子

間の距離を測定することで、高感度探索を行うことができる。これにより、石英鏡のみを用いている LIGO や Virgo に比べると、低質量領域で感度を向上させることができる。データ解析には、ゲージボゾン場の振幅や位相、偏極などの統計的な変動を考慮に入れる必要があるため、**大学院生(当時)の中塚洋佑**が中心となってその手法を開発した ([Nakatsuka et al., arXiv preprint 2022](#))。さらに、腕共振器からの信号を用いたゲージボゾン探索においては、レーザー光の有限の往復時間を考慮に入れると感度が向上することを見出した ([Morisaki et al., Phys. Rev. D 2021](#))。この影響を考慮に入れることで、LIGO や Virgo の O3 観測データを用いた上限値は 1 桁程度向上している ([Abbott et al., LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Phys. Rev. D 2022](#))。

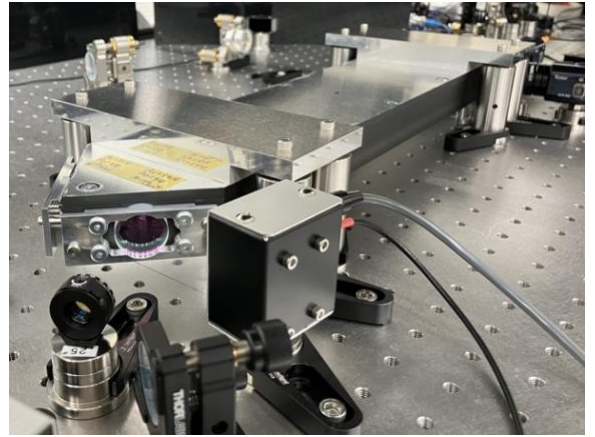


図 5: アクシオン探索実験 DANCE で用いている光リング共振器。

光リング共振器を用いたアクシオン探索実験 DANCE(図 5)においては、**大学院生の大島由佳と藤本拓希**が中心となって装置の製作やデータ取得システムの構築を行い、2021 年 5 月に初の観測運転を行った。このデータを解析することで、アクシオン-光子相互作用係数に対する初の上限值を得ることができた ([Oshima et al., arXiv preprint 2023](#))。上限値は先行研究に比べると悪いものの、磁場を用いずに光共振器で探索する手法としては、初めての上限值である(図 6)。このときの観測運転では、鏡の反射で生じる s 偏光と p 偏光の間のわずかな位相差のために両偏光が光リング共振器に同時共振できなかつたため、感度が 3 桁程度悪くなっていた。そこで、この位相差を補償するために、補助共振器を追加する手法を考案し、同時共振による高感度化の実証に成功した ([Fujimoto et al., Journal of Phys. 2021](#))。2022 年度までに、2021 年 5 月時に比べ、2 桁以上の感度向上に成功している。今後もレーザー光の強度安定化や防振などを行い、感度向上を図っていく予定である。

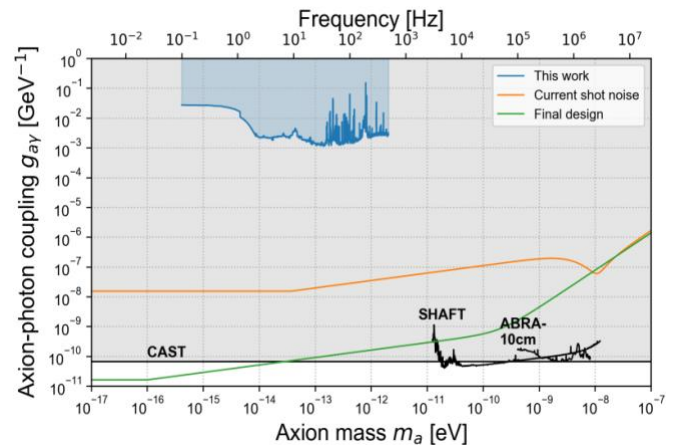


図 6: DANCE の初の観測運転から得られたアクシオンの制限結果。横軸はアクシオンの質量、縦軸はアクシオン-光子の結合係数。青の領域は今回の実験から得られた排除領域である。緑色は、実験の最終目標とする感度を示す。

さらに、本領域の申請時の計画にはなかった新たな進展として、スピン 2 ダークマターの研究も進めた。**大学院生間仁田侑典**が中心となりその生成シナリオを検討 ([Manita et al., Phys. Rev. D 2023](#))し、スピン 2 ダークマターに対するレーザー干渉計の応答の計算と、LIGO のデータを用いた解析の準備を進めている。また、**公募研究 D03**の**須山輝明**とともに、LIGO のデータを用いたスカラーダークマター探索を行い、第 5 の力を探索する先行研究と同程度の上限值を得ることに成功した ([Fukusumi et al., arXiv preprint 2023](#))。

上記のアクシオン実験・観測的研究は理論的な研究にも動機付けを与えた。

**計画研究 A01「軽いダークマターの生成と進化に関する理論的探究」(略称: 軽いダークマター)** – A01 班の研究代表者高橋史宜、本領域の専任博士研究員殷文は、等方的な宇宙複屈折効果による CMB 偏光の回転角度が、電磁相互作用の強さを表す微細構造定数から期待される大きさに近いことに注目した。光子と結合するアクシオンの位相欠陥であるドメインウォールの存在を仮定すると、質量および光子との結合定数の広範な領域にわたり自然に説明できることを示した ([Takahashi & Yin, JCAP 2021](#))。さらに、それと相関する非等方な宇宙複屈折効果のパワースペクトルの予言を解析的および数値的に導出し、LiteBIRD などの将来 CMB 観測によって検証可能であることを示した ([Kitajima et al., JCAP 2022](#))。この研究を端緒に、アクシオンのドメインウォールの進化に関して研究が進展した。特に、インフレーション揺らぎによるアクシオンドメインウォールは初期配位の非対称性に関して極めて安定であることを発見した ([Gonzalez et al., Phys. Lett. B 2023](#))。これは従来の定説を覆す発見であり、**大学院生の Diego Gonzalez** が中心となって行った研究である。この成果によってアクシオンドメインウォールが宇宙論的

なタイムスケールで安定となることが明らかとなり、宇宙複屈折効果の起源として有力な候補であることが示された。

等方的な宇宙複屈折効果を一様なアクシオン場によって説明するためには、再結合以降にアクシオン場が運動を開始する必要がある。そのタイミングが、ダークマターが宇宙の主要成分となる時期に近いことに着目し、ダークマターとアクシオンが結合することで、アクシオンの質量に下限を設定することなく、そのタイミングが自然に説明できることを示した(Nakagawa et al., Phys. Rev. Lett. 2021)。この研究は大学院生の中川翔太が主導して行った研究であり、この場合のダークマターの候補として WIMP よりも遥かに重いモノポールがあげられ、重いダークマターと非常に軽いアクシオンとが密接に結びつく良い例となっている。

アクシオンはその軽い質量のため、宇宙初期においては一般にポテンシャル最小値からずれたところにいると考えられ、その後最小値周りで振動を開始することによって生成される。このような生成機構が自然に組み込まれている点がアクシオンダークマターの長所のひとつである。大学院生の中川を中心に、この生成機構が、量子重力理論から期待される小さな Peccei-Quinn 対称性の破れが存在する場合にどのような変更を受けるかを調べ、アクシオンダークマターの存在量とその崩壊定数に依存せず一定の値となることを示した。これにより従来困難であった、比較的重い meV 程度の質量を持つ QCD アクシオンがダークマターの主成分となりうるということが明らかとなった(Jeong et al., JCAP 2022)。さらにこのシナリオを一般化し、一次相転移に基づいてアクシオン質量が生成される場合にはアクシオン存在量が増加し、従来では不可能であった広範な領域においてアクシオンがダークマターとなりうることを示すことができた(Nakagawa et al., Phys. Lett. B 2023)。

般らは eV 質量領域の軽いダークマターに関する理論的研究を行った。eV 質量のアクシオンダークマターには、いくつかの観測的な証拠と強力な理論的なモデルが存在する。般は、ハッブル宇宙望遠鏡による非等方宇宙背景光のデータを解析し、10eV 領域のダークマターに対する既存の最も強い制限を算出した(Nakayama & Yin, Phys. Rev. D 2022; 図 7 参照)。さらに、般の分野とは全く異なる分野である、分光器の専門家である池田らと共に、既存の高分解能赤外線分光器を用いて矮小楕円銀河を分光調査することで、数時間の観測により eV 領域のダークマターが検出可能であることを指摘し、マゼラン望遠鏡に搭載されている WINERED を用いたダークマターの探索を提案した(Bessho et al., Phys. Rev. D 2022)。公募研究 D03 の天文学者の林航平とともに、矮小楕円銀河中のダークマターおよび星の分布を詳細に調査し、狭い視野や高い角度分解能を持つ上記赤外線分光器、および同様の検出器では、従来の解析よりも優れたダークマターシグナルが得られると指摘し、すばる望遠鏡の近赤外線分光撮像装置 IRCS による eV 領域のダークマター探索を提案した(Yin & Hayashi, arXiv preprint 2023) (A01 と公募研究 D03 の研究成果)。これらの分野横断型の研究、また若手研究者がリードした研究は、本学術変革領域研究の成果である。

一方、keV 程度の質量をもつアクシオンダークマターはその光子への崩壊を通じ、X 線観測による探査が

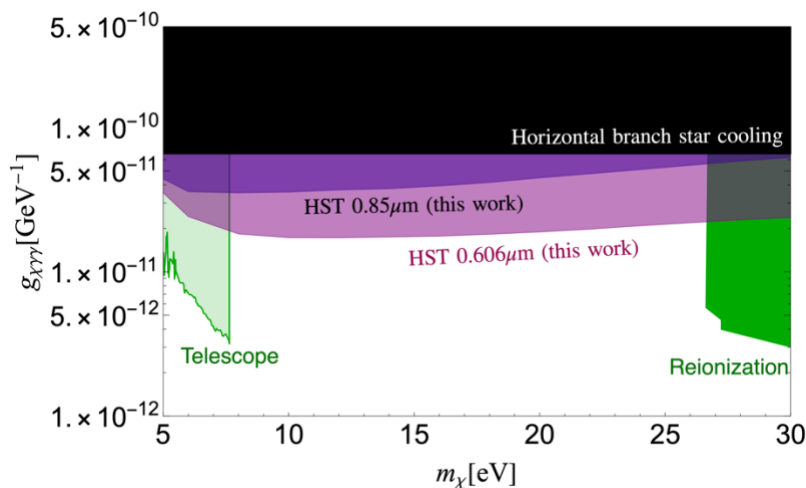


図 7: アクシオンダークマターの制限。横軸がアクシオンの質量[eV]、縦軸がアクシオンと光子の結合係数。色が塗られている領域が排除領域で、紫色の領域は、今回新たに得られたハッブル宇宙望遠鏡(HST)のデータから得られた結果。

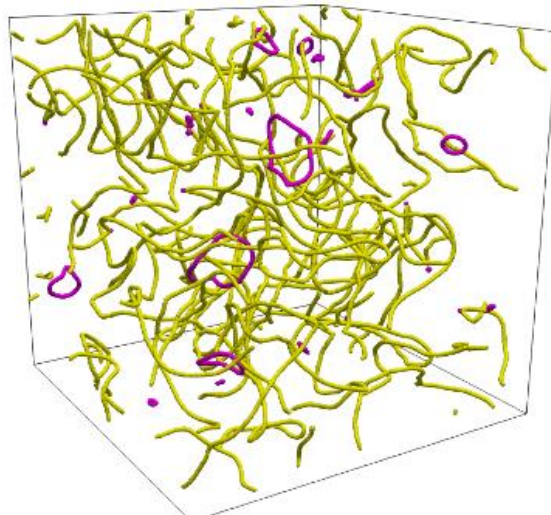


図 8: 宇宙ひも(cosmic string)の進化に関する 3次元格子シミュレーションの例。

可能である。これまで光子とアノマリー結合を持つアクシオンダークマターが主に調べられてきたが、最近、山田、殷、高橋がアノマリーを持たないアクシオンが電子の閾値効果によって光子に崩壊する新たなアクシオン模型を提唱した(Takahashi, Yamada & Yin, *Phys. Rev. Lett.* 2020)。従来の模型と比べ、アクシオンは電子と強く結合できるため、直接実験探索によって探索が可能である。さらにこのアクシオンを具体的にヒッグスセクターの拡張によって実現する模型を提唱し、B04 班の XRISM を代表とする将来の X 線観測、XENONnT などの直接検出実験、および B05 班の Belle-II 等の加速器実験によって探索可能であることを示した(Srakurai & Takahashi, *JHEP* 2022)。

A01 班研究分担者北嶋直弥は宇宙ひもによる軽いダークフォトン生成のシナリオに着目し、3 次元格子シミュレーションに基づく解析を行なった(図 8)。特に宇宙ひものループの崩壊によるダークフォトン生成に焦点を当て、存在量とスペクトルに関する解析により、生成されたダークフォトンがダークマターの存在量を説明できることを明らかにした。また、このシナリオが予言する特徴的な重力波のスペクトルを明らかにし、将来の多波長重力波観測で検証可能であることも明らかにした。また、北嶋は A03 班「巨視的ダークマター」の研究者との横断研究として、原始曲率揺らぎに非ガウス性が存在するときの原始ブラックホール形成に関する研究も行い、形成率に関する詳細な解析を行なった。

この他にも様々なアクシオン関係の研究成果が得られている。大学院生、B02 班、A03 班の研究者の共同研究者による、すばる望遠鏡のデータの重力マイクロレンズの探査結果を用いた、アクシオン星の存在量を制限した研究成果(Sugiyama, Takada & Kusenko, *Phys. Lett. B* 2023)、公募研究 D03 の千葉柁司、林航平らによる、 $10^{21}$ eV より軽いアクシオンがダークマターである場合に、ダークマターの波の性質を考慮した構造形成シミュレーションを用い、超矮小銀河の密度プロファイルに及ぼす影響を調べた研究(Chan et al., *MNRAS* 2022; Hayashi et al., *Astrophys. J. Lett.* 2021)、実験系の公募研究 D02 の田中純一による LHC ATLAS データからアクシオンの探査の結果(ATLAS Collaboration, *arXiv preprint* 2023)、などがある。

**計画研究 B04 「X 線領域の観測技術の革新によるダークマター探索」(略称：X 線)** – B04 班では、X 線領域での新たな検出技術を用いたダークマター探索をテーマとし、マイクロカロリメータを用いる X 線分光撮像衛星 XRISM による観測を念頭に置いたダークマター研究と、テーブルトップ規模の実験として、TES(超伝導転移端：Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータによる太陽アクシオン検出器の開発・実験の研究を進めている。

XRISM 衛星の打ち上げは、本変革領域研究開始時の想定より少し遅れ、2023 年度夏が予定されている。事前準備として、B04 班の研究グループは同等のカロリメータを搭載した「ひとみ」衛星のデータを詳細に解析することにより、その系統誤差の影響を理解することを進めた。「ひとみ」衛星による輝線探索はすでに論文が出版されているが、さらに広視野 CCD 観測と組み合わせるなどの可能性を検討している。また、研究代表者山崎、研究分担者 Simionescu を中心に、観測対象として超銀河団領域の可能性(Simionescu et al., *Exp. Astron.* 2021)、銀河からの重元素流出過程(Mao et al., *Astrophys. J. Lett.* 2021)、X 線背景放射の空間分布パワースペクトル(Zhou et al., *Astrophys. J.* 2022) など様々な観点から宇宙物理の前景放射の理解を進めている。また強い磁場をもつ中性子星付近でのアクシオン放射の可能性なども検討している。これらの一部は XRISM 打ち上げ後の初期観測データからも研究が可能であり、さらに初期観測データに基づき、独自の手法・解析の公募観測提案を行う予定である。

太陽アクシオン探査の研究においては、太陽での 57Fe 原子核の M1 遷移と光子により生成される 14.4 keV のアクシオンを、再び地球上で 57Fe により光子に変換し、それを TES で検出するという手法を用いる。通常のマイクロカロリメータでは金薄膜などをエネルギー吸収体に用いるが、それを 57Fe で製作する必要がある。磁性体である鉄を超伝導体の直上に置くことができないために、吸収体を少し離し、間を熱伝導パスでつなぐ、などの特殊な構造をとる必要がある。吸収体、熱パスなど新たなコンポーネントを MEMS 技術により基板上に作り込み、かつそれらは熱伝導がよい、すなわち格子欠陥の少ない密なものであることが要求されている。構造およびコンポーネントの特性を仮定したシミュレーションと実際の製作物を比較することにより、要素技術への要求の明確化を図っている(Mori et al., *Journal. Low Temp. Phys.* 2022)。筆頭著者の森匠平は当時大学院生である。

TES による太陽アクシオン検出器の開発においては、本研究のなかで、新たに TES を作成するのに必要な Ti/Au の蒸着装置を導入した。これにより宇宙研において TES を作成することが可能となり、上記のような要素の性能評価も含めた開発サイクルをあげることで性能の向上を図っている。2022 年度には、



大学院生八木雄大が研究をリードすることにより、 $^{56}\text{Fe}$ (同位体ではない通常鉄)で、64画素の鉄吸収体つき TES アレイを作成し、評価などを進めている(図9参照:[Yagi et al., IEEE 2023](#))。2023年度には $^{57}\text{Fe}$ での製作を開始する予定である。

また、平行して TES アレイを少ない配線で読み出すための信号多重化読み出し手法の開発を進めている。我々のグループでは、38画素の X 線 TES の同時読み出しに成功していた。さらにそれを発展させ、70画素の信号を重畳し66画素を読み出すことに成功した。この手法の X 線領域のチャンネル数としては現在世界最高で、上記64画素アレイであれば、1システムで読み出すことが可能となった。今後この2つを組み合わせ、できれば複数アレイを読み出す冷凍機システムを構築する。そのために必要なセットアップ、観測方法の検討などを進めている。

### すばるデータを用いたダークマターの研究成果 - すばる望

遠鏡は世界第一線級の光赤外大型望遠鏡であり、遠方銀河、宇宙論の研究で大きな研究成果を挙げている。本領域の研究者は、すばるの威力に注目し、すばるの装置のなかで独自性、優位性を有す広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)、および現在装置組み上げ・試験観測中の広視野多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)で可能になるダークマター研究を推進することを目的とした。以下にすばるのダークマター研究成果を述べる。

計画研究 B02「すばる多天体分光観測によるダークマター探索」(略称:すばる分光) - B02、B03班(主に B02班)の研究者のリードの下、大規模すばる HSC 宇宙イメージング観測の約3年間のデータから宇宙構造による弱重力レンズ効果を精密に測定し、宇宙の標準理論  $\Lambda\text{CDM}$  の宇宙論パラメータを測定した。国際共同研究チームは、この研究成果を2023年4月3日(日本時間)に世界に発信した(プレプリントおよびウェビナー; [Sugiyama et al., arXiv preprint 2023](#); [Miyatake, Sugiyama et al., arXiv preprint 2023](#); [Li et al., arXiv preprint 2023](#); [Dalal et al., arXiv preprint 2023](#)) (B02、B03班、公募研究 D02 の研究者も貢献した共同研究)。ウェビナーには約200名(主に欧米の研究者)の参加があり、その注目度を表している。国際研究チームは、客観性・信頼性を担保するために、素粒子実験などでよく用いられるブラインド解析を行った。特に、研究チームはこれらの物理パラメータを可能な限り「正確に」測定することに注力した。この種の解析では初めて、重力レンズ宇宙論の懸念になっていた測光的赤方偏移の不確定性について保守的な取り扱いを採用し、宇宙論パラメータを測定した。図10は、 $\Lambda\text{CDM}$  モデルの2つの物理パラメータ、現宇宙の物質の量の割合( $\Omega_m$ )および現宇宙の構造形成の進行度合い( $S_8$ )の測定結果を示す。宇宙の標準理論が正しければ、全ての宇宙論データはそれらの統計精度の範囲内で同じ値の宇宙論パラメータを示すはずである。しかし、HSC の  $S_8$  の結果は、初期宇宙の CMB Planck データの結果から外挿した  $S_8$  の値と  $2.5\sigma$  程度の不一致を示すことがわかった。HSC の結果は、これまで報告されていた  $S_8$  不一致問題を新たに確かめるかたちになった。これは、標準理論  $\Lambda\text{CDM}$  の綻び、つまり宇宙の新しい物理を示唆している可能性があり、今後の展開が楽しみである。この研究成果については、公募研究 D02 の西澤淳、宮武広直も共同研究者として貢献している。ダークマターに関して言えば、質量を持つニュートリノの構造形成への影響、あるいはアクシオンがダークマターである場合、この  $S_8$  不一致を解決できる可能性がある。本領域の研究チームは、 $S_8$  の真偽をさらに検証し、真である場合に備えて、宇宙の新しい物理を究明する予定である。

上記の HSC 宇宙論の研究成果では、若手研究者が大活躍した。例えば、2023年3月に東京大学で学位を取得した杉山素直(2023年秋には米国ペンシルバニア大学の博士研究員に異動予定)、2021年に東京大学で学位を取得した Xiangchong Li(米国カーネギー・メロン大学の博士研究員)、プリンストン大学の大学院生 Roohi Dalal が中心的な役割を果たした。世界最高品質の HSC データを用いた研究に対する高いモチベーションと、日本・プリンストン大学の研究者が参加するレベルの高い国際共同研究の環境に後押しされ、次世代を担う若手研究者が育った。これら若手研究者、HSC チームのメンバーは上記の研

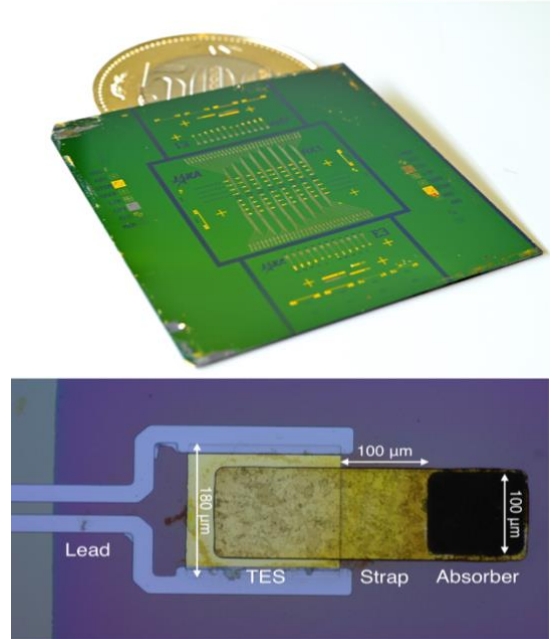


図9: 製作した鉄吸収体つき64画素 TES アレイの全体図と1画素の拡大図。

究成果発表のあとに、米国の稼働中の大型分光銀河サーベイ DESI、欧米の大型計画 RO LSST、ESA Euclid 衛星の電話会議に招聘され、研究成果を発表している。これも HSC の研究成果の注目度を表していると言える。

B02 班の次世代すばる広視野多天体分光器 PFS の開発研究も進んだ。すばる PFS は世界の 8m 級望遠鏡のなかでは唯一製作されている広視野多天体分光器である。その注目度は高く、実際プリンストン大学、カリフォルニア工科大学、ドイツマックスプランク研究所などの一流の研究機関が資金を持ち寄り、参加している。コロナ禍の影響で開発がやや遅れが出たものの、ハワイ観測所すばる望遠鏡サイトで装置の組み上げを行い、2022 年、2023 年に PFS の試験観測を行うことができた。PFS の観測でまず重要になるのが、主焦点面の約 2400 本のファイバーの各々を遠隔操作で動かし、正確に観測対象のターゲット天体の位置に合わせ、直径 1 秒角のファイバーに入る光量を最大にすることである。このときファイバーの物理的な指向精度はもとより、天球面上での天体の位置、望遠鏡、主焦点装置、ガイドカメラの相対位置の座標変換を正確に考慮する必要がある。これ

までの試験観測を通して、2023 年 5 月の時点で、各ファイバーを典型的に焦点面で約  $15\mu\text{m}$  の統計精度(天球上では約 0.15 秒角以内)で配置できた。すばるサイトの大気ゆらぎによるシーイング(点源の広がり)が約 0.6 秒角であることから、目標とする最終要求精度 0.1 秒角は、今後の試験観測で実現できると考えている。その他、分光観測に対しての装置全体の感度の評価など、今年度中に PFS 装置の各要素の性能評価を詰める予定である。2024 年度のサイエンス観測を目指し、特にダークマターが卓越する矮小銀河のメンバー星の分光観測を可能な限り早い段階で行う予定である。矮小銀河について、これまでにない多数かつ自己重力圏内の広い領域にわたるメンバー星の分光観測が可能になり、メンバー星の速度分布から、ダークマターの空間分布を精密に復元できる。ダークマターがアクシオンなどの「波」の性質を持つ場合、矮小銀河のダークマター分布に特徴的な痕跡を残すため、B02 の世界最高精度の観測データにより、「波」の性質を持つダークマターを観測的に検証できる。

公募研究 D03 の千葉証司、林航平、E01 の石山智明は、約 8 個の矮小銀河の PFS 観測からダークマターの性質を明らかにするための準備研究をカリフォルニア工科大学、ジョンズ・ホプキンス大学の研究者らと進め、その観測戦略、予想される結果を査読論文で発表している ([Hayashi, Chiba & Ishiyama, Astrophys. J. 2020](#))。

計画研究 B03 「広視野かつ高時間分解能天体イメージングによるダークマター探索」(略称：イメージング) – B03 班では高速読み出し可能な CMOS センサー及びそれを用いたカメラを開発し、これまで誰も見たことがないパラメータスペースで宇宙を観測し、ダークマターに関する知見を得ることを目標としている。

開発中の CMOS は、 $2560 \times 10000$  ピクセル、 $7.5\mu\text{m}$  ピクセルの裏面照射型で、フレームレート 10fps で動作させる。この開発は浜松ホトニクス株式会社と共同で行っている。10fps で駆動するとき発生したデジタルエラーやリニアリティ不良は、マスクを改定することで改善した。2019 年度までに製作した

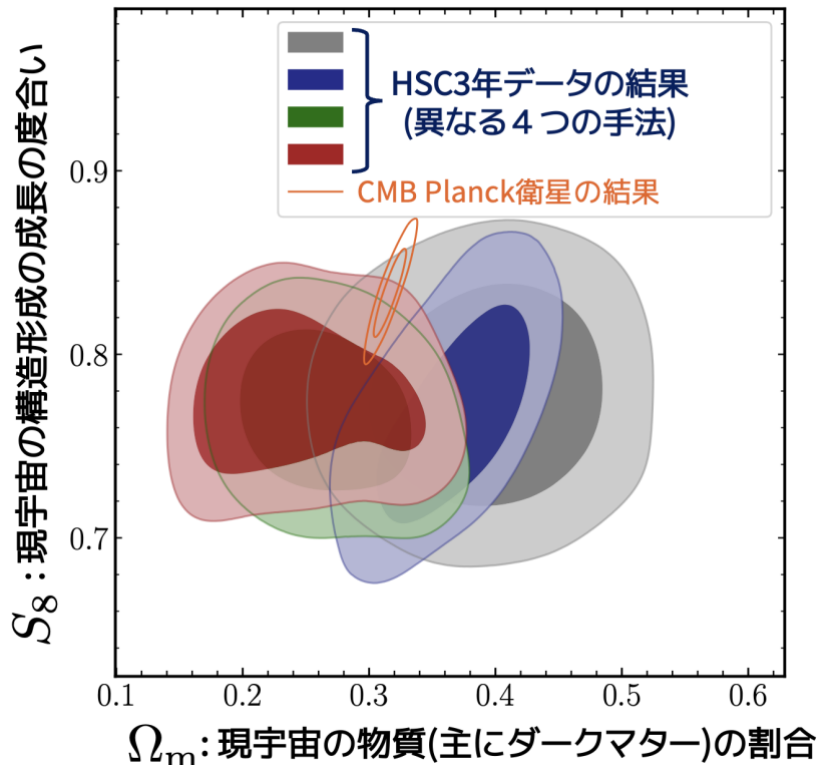


図 10: すばる HSC 3 年間データを用いた、宇宙の標準模型  $\Lambda$ CDM モデルの宇宙論パラメータの測定結果。横軸は、宇宙の物質密度パラメータ、縦軸は宇宙の構造形成の進行度合いを表す物理パラメータ  $S_8$ 。4 つの色の領域は、異なる 4 つの手法を用いた結果であり、全て無矛盾である。オレンジの線は、初期宇宙の CMB 衛星 Planck データから得られた  $\Lambda$ CDM モデルから、現宇宙まで外挿した結果。

CMOS を使って受光部厚を変えた素子を試作しテストした結果、解像度(PSF)の数値が低減する一方で感度(QE)は下がることを確認した。その結果を踏まえて、QE と PSF が両立することを期待して高抵抗ウエハを使用した素子を試作した。一方で、異常分散(蓄積時間により決まる特定の入射光を境に出力にオフセットがのる現象)を解消するために画素レイアウトの条件振りを行ったところ、その発生メカニズムが判明し、ホトマスクの改定とタイミングチャートを修正することで改善した。さらに高速で読むことを見据え、2022 年度は部分読み出しの機能を追加した。100 行単位で読出すことができ、最大フレームは 1000fps となる。2021 年度、2022 年度に各 5 個、計 10 個の CMOS センサーを製作し、順次検査中である。

2022 年度までに、12 個の CMOS センサーを最小の間隔で並べた焦点面を持ち、すばる望遠鏡の前主焦点広視野 CCD カメラ(Suprime-Cam)の焦点面部デュワーを置き換えて使えるようなデュワーの設計・開発を行った(図 11)。このカメラは、スターリング冷凍機により焦点面の CMOS センサーを  $-50^{\circ}\text{C}$  に冷却することが可能である、CMOS センサーに接続される多数の配線を効率よくデュワー内から取り出す仕組みを持つ、などの特長を持っている。さらにセンサー読み出し回路を主焦点部にどのように配置するかを検討も進めてきた。またこれと並行して、発熱の大きい CMOS センサーを並べた焦点面を均質に冷却する方法についても検討を進めてきた。

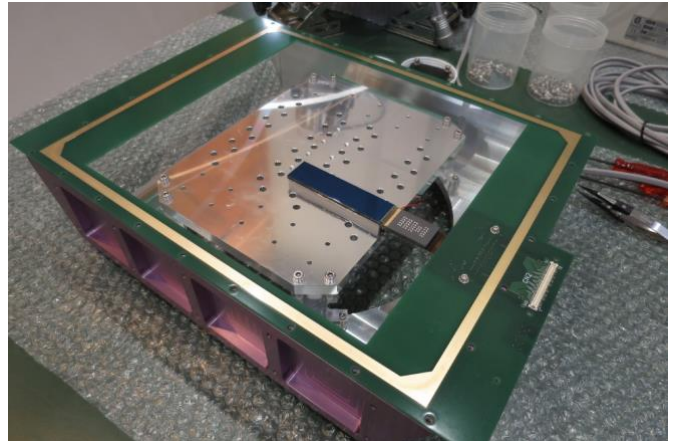


図 11: 12 個の CMOS センサーを載せるために開発した、すばる主焦点面部デュワー。

また、CMOS を用いて達成される高時間分解能観測で狙うサイエンス検討の研究も、研究分担者の大栗真宗を中心に大きな進展が得られている。当初主要な目標の一つであった、ラッキーイメージングを利用した弱重力レンズの高精度ダークマター分布再構築については、観測との比較に必要な現実的な密度分布に対する重力レンズ計算の 2 桁以上の高速化を達成する新しいアルゴリズムの提唱(Oguri, PASP 2021)、当時大学院生だった Xiangchong Li が主導した、銀河の測光的赤方偏移の情報を組み込んだ高精度三次元ダークマター分布再構築の、スパースモデリングと呼ばれる手法を用いた新しい手法の開発(Li et al., Astrophys. J. 2021)など、多くの理論的研究の進展も得られた。また、すばる HSC イメージング観測の弱重力レンズ解析で再構築された質量マップにおいて、質量マップピークからダークマターが大量に付随した天体である銀河団を選択する手法を改良し、重力レンズで発見した銀河団サンプルの数を 2 倍以上増やすことができた(Oguri et al., PASJ 2021)。すなわち、CMOS で狙う高精度ダークマター分布再構築に向けて、理論およびデータ解析手法開発の面で大きな進展が得られている。

当初のもう一つの主要な目標である、銀河団観測による変動天体観測を用いたダークマター探査についても、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた予備研究で大きな進展が得られた。単独の星が何千倍と大幅に増光される現象である焦線通過マイクロ重力レンズについて、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測によりこれまでの最遠方記録を大幅に更新する赤方偏移 6.2 の焦線通過マイクロ重力レンズ現象を発見した(Welch et al. including M. Oguri, Nature 2022)。また重力レンズ効果により複数に分裂して観測される重力レンズ超新星についても、ハッブル宇宙望遠鏡アーカイブデータの再解析によって、貴重な爆発初期の様子を捉えた三重像重力レンズ超新星を発見した(Chen et al. including M. Oguri, Nature 2022)。このように本研究グループから、天文業界では権威ある査読雑誌 Nature に 2 編の論文を出版することができた。これらの研究は、銀河団で増光され観測される時間変動現象が普遍的に存在することを意味し、CMOS を用いたサーベイ観測に向けて弾みがつく結果である。またこれらの変動天体観測から具体的にどのようにダークマターモデルを制限するかについての理論研究も並行して行なっている。一つの重要な成果として、大学院生の河合宏紀が主導する研究によって、アクシオンのような非常に軽いダークマターの量子干渉効果による重力レンズ天体中の小スケールゆらぎパワースペクトルの解析的な表式を導いた(Kawai et al., Astrophys. J. 2022)。

また、当初考えられていなかった、CMOS を用いたダークマター研究の新しいアプローチについてもいくつか重要な成果が得られている。例えば、小分離角強重力レンズは質量の小さい矮小銀河により引き起こされるため、小スケール密度ゆらぎに敏感であり従ってダークマター研究の新しいツールとなり

うる。これまでの困難は、観測的にそのような小分離角強重力レンズを発見することが空間分解能の制約から難しい点にあったが、我々は一連の研究によって位置天文観測衛星ガイアの全天観測データを利用することで小分離角強重力レンズの候補を効率的に選び出すことができることを見出した(Shen et al. including M. Oguri, *Nature Astronomy* 2021)。これらの候補は CMOS 観測のラッキーイメージングの絶好のターゲットである。また他の新しい可能性として、B02 班の高橋龍一との共同研究によって、重力波伝搬の波動光学効果に基づく重力波波形のゆがみから、0.1 太陽質量以上の原始ブラックホールなどの小スケールダークマター分布を直接測定する手法を提案した (Oguri & Takahashi, *Astrophys. J.* 2021; Oguri & Takahashi, *Phys. Rev. D* 2022)。これらは B02, B03 班の研究者の共同研究の成果である。通常の重力波天体に対しては波形のゆがみは非常に小さくその観測的検出は容易ではないが、これらの研究によって、重力レンズによって増光された天体に対してはそのような波形のゆがみが大幅に増幅され、容易に検出されることが明らかになった。将来の LIGO や KAGRA の観測によって重力レンズ重力波候補天体を同定し、CMOS 観測を活用した電磁波対応天体の観測などによって重力レンズであることを確定できれば、これらの研究者が提唱する手法によってパーセクスケールの非常に小さな長さスケールのダークマター分布を測定する研究分野を開拓できることが期待される。このように、B03 班の研究グループから、A01 班(軽いダークマター)、A03 班(原始ブラックホール)、B01 班(重力波)、B02 班(すばる分光)に跨がる研究成果が得られており、学術変革領域研究の成果と言える。

**計画研究 A02 「マルチメッセンジャーで探る重いダークマター」(略称：重いダークマター)** – ダークマターが TeV を超える重い粒子(超重ダークマター)の場合、その質量スケールが地上の加速器実験で到達できるエネルギーを超えていることや、数密度が少なく相互作用も弱いことから、その探査には宇宙線やニュートリノ、ガンマ線を用いた間接探査が鍵となる。さらに最近進展が著しい宇宙のマルチメッセンジャー観測のデータを最大限活用し、超重ダークマターへの新たな知見を得ることが A02 班の目的である。

これまでの A02 班グループからの研究成果は以下のものがある。ダークマターの寿命や対消滅断面積についての一般的制限を行うため、銀河内や銀河間空間を超高エネルギー宇宙線や超高エネルギーニュートリノ、高エネルギーガンマ線が伝搬する際に起こす反応を計算するコードを整備した。特に銀河系内の任意の位置から地球へ飛来するガンマ線が伝搬する際に受ける吸収の影響を考慮した上で、Tibet で観測された拡散銀河系内 sub-PeV ガンマ線(PeV=10<sup>15</sup>eV)のデータから示唆される拡散銀河系内高エネルギーニュートリノ放射への一般的な上限値を導いた(Fang & Murase, *Astrophys. J.* 2021)。

この結果は今後の IceCube や KM3Net によるニュートリノ観測で検証可能な重要な結果であり、未知のダークマターの寄与にも上限を与える。更に、本領域で雇用した専任博士研究員の Saikat Das を中心として、重いダークマターの崩壊から生成される超高エネルギーガンマ線フラックスを計算し、最新の Auger による超高エネルギーガンマ線フラックスへの上限値を用いて 10<sup>21</sup>eV を超える重いダークマターについて 10<sup>23</sup> 年以上というこれまでで最も厳しい寿命への制限を得た(Das et al., *Phys. Rev. D* 2023; 図 12 参照)。Auger による超高エネルギー宇宙線のスペクトルと組成の両方のデータを用いた解析を行ったのは世界で初めてである。

ニュートリノは宇宙遠方からも地球に到達できるので、ダークマター間接探査には銀河系外からやってくる超高エネルギーニュートリノの情報も重要である。A02 研究代表者村瀬は大学院生 Jose Carpio と共同でニュートリノ伝搬を解く一般的なコードを開発し(Carpio & Murase, *JCAP* 2023)、素粒子の標準模型を超える理論で期待されるニュートリノとダークマターの相互作用やニュートリノ自己相互作用について、高エネルギーニュートリノや超新星ニュートリノの観測から新しい制限が得られることを示し

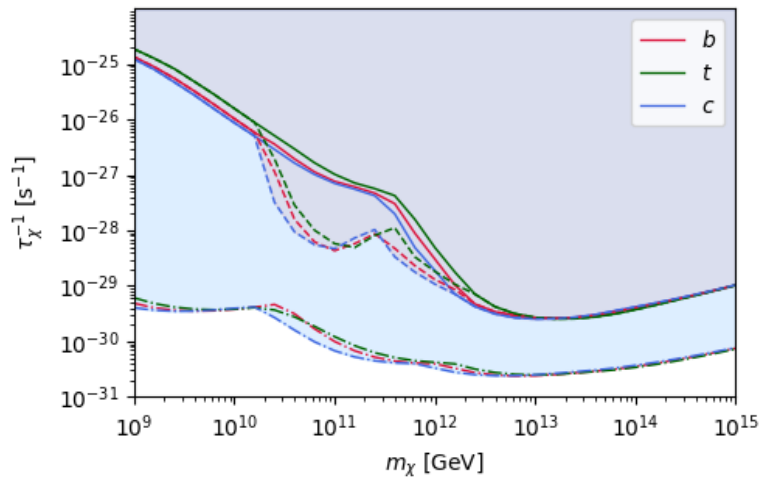


図 12: 超高エネルギー宇宙線と超高エネルギーガンマ線データによる、重いダークマターの寿命への制限(塗られている領域は排除領域)。

た(Carpio et al., Phys. Rev. D 2023; Eskenasy et al., Phys. Rev. D 2023; Carpio et al., JCAP 2023)。さらに大統一スケールに達するような重いダークマターにも適用して、将来のニュートリノ観測装置で探索可能なパラメータ範囲を計算した。

マルチメッセンジャーの手法でダークマターにアプローチする際に必須となるダークマターハロー関係の研究を進めた。A02 班研究分担者廣島渚、C02 班安藤真一郎、公募研究 E0 石山智明との連携により、最小スケールから最大スケールのハローを包括的に記述可能な枠組みを構築し、統計性の問題でシミュレーションでは特性が探りにくく、かつ観測的には高エネルギー粒子のフラックスの期待しやすい比較的大質量のサブハローの存在可能性を検証した(Hiroshima et al., MNRAS 2022)。また、これまでの成果に基づき、サブハローとしての矮小楕円銀河進化を考慮した密度分布を準備しており、重たい暗黒物質の反応で生成するガンマ線探査の準備を進めている。特に Fermi 衛星によって得られた 14 年のガンマ線データを解析しつつ、重いダークマターの対消滅や崩壊によって生まれるガンマ線やレプトンのスペクトルを計算し、更にガンマ線の伝搬コードを適用して遠方銀河から地球に到達するまでのスペクトルへの影響も考慮した。これまでの探査は主にダークマターからの直接的なガンマ線に着目しており、この詳細な計算によって MAGIC や HAWC で得られた TeV より重いダークマターへの制限よりも強い制限を Fermi 衛星のデータから得ることができた。銀河団についての結果をまとめた論文、ニュートリノによる制限についての論文も準備中である。

分担者廣島は、MAGIC コラボレーションと共同で、チェレンコフガンマ線望遠鏡による銀河中心の TeV 帯域のガンマ線観測データから輝線探査を行い、ダークマターの対消滅由来の輝線フラックスに制限をつけた(Abe et al. MAGIC Collaboration including N. Hiroshima, Phys. Rev. Lett., 2323)。またダークマターの対消滅が電波望遠鏡で観測可能な 21cm 線吸収に与える影響を調べ、N 体シミュレーションの結果を利用しブースト因子を評価することで、凍結機構で生成された熱的な残存ダークマターの質量への新しい制限を得た。

極めて弱い相互作用を持つダークマターの探索には、通常膨大な量のターゲット物質が必要とされる。これに対し天然の鉱物結晶は、地質学的時間スケールで稼働しているため、少量でも十分な露出量が期待できるターゲット物質として期待されている。代表者村瀬は、全く異なる分野の海洋研究開発機構(JAMSTEC)の廣瀬重信らと共に、天然白雲母の中に存在するダークマター由来の原子核反跳の痕跡を探る実験「DMica」を進めており(Baum et al. including K. Murase, Phys. of Dark Universe 2023)、原子核反跳のシミュレーションを行いつつ重いダークマターへの感度計算を行っている(A02 班の研究者、海洋研究開発機構の研究者の共同研究)。全く異なる分野の研究者の共同研究であり、本学術変革領域の機会なしには実現し得なかった研究成果と言える。

研究分担者藤井俊博は、B03 の計画研究の代表者である国立天文台の宮崎聡のグループと連携し、すばる望遠鏡 HSC のデータに入射した宇宙線空気シャワーの解析を進めた。非常に頻度は低いがすばる望遠鏡の CCD に大量の宇宙線空気シャワー粒子が入射した画像が取得されており、前例のない位置分解能での空気シャワー粒子の撮像に成功している(図 13 参照)。この予期せぬ発見は、A02 班と B03 班の研究者の共同研究で初めて可能となった、また今あるデータを有効活用するという本学術変革領域の方針とも合致しており、幅広い研究領域での融合から生まれた成果である。解析手法および結果、そして本計画研究グループ内で議論した応用方法についてまとめた論文を投稿し、現在は査読が進んでいる状況である。

研究分担者山中真人は、廣島、村瀬、中国の中山大学の榎本成志と共に、重いダークマターの残存量について再検討を行なった。一般に、熱平衡が続く限り、数密度は温度低下と共に小さくなる。ところが、ダークマターを十分に減らすだけの長時間平衡は、既存の描像(摂動論に基づく反応遷移振幅)による反応率では実現できない。重いダークマターを現実的シナリオとするため、その時間発展の計算において新しいアプローチが必要である。長時間の平衡維持を可能とする新奇的過程として、ダークマターの多

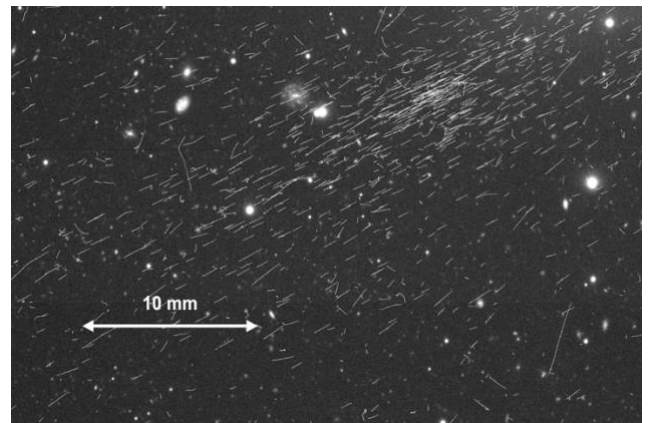


図 13: すばる HSC の CCD 画像に写っている(捉えられた)宇宙線によって引き起こされた空気シャワー粒子の軌跡。

体終状態対消滅やそれに及ぶ量子統計効果に注目した。こういった機構をヒッグス粒子が介するダークマター生成モデルに応用した場合、観測残存量と合致するダークマターの質量として、先行研究の結果と比べ2桁以上大きくなり得ることを明らかにした。成果は2022年度末の研究会で発表済みであり、論文を近日中に投稿予定である。重いダークマターの生成メカニズムは熱的な生成とは限らない。別の有力候補の一つとして、宇宙初期における宇宙の相転移が挙げられる。宇宙の相転移が起きると、物質場の生成と共に重力波が生成されることが予想される。それゆえ、ダークマター探査は言うまでもないが、生成される重力波のスペクトル等を詳細に理解することが、このシナリオの検証において決定的に重要になる。通常、位相欠陥からの重力波については、数値的な手法を用いた解析が主流であるが、研究分担者成子篤は定性的・定量的な理解を深めるために解析的な手法に関する研究を進めた。特に、共同研究者 George Zahariade と Mainak Mukhopadhyay らが提案する、量子-古典対応の計算手法を用いることで、宇宙ひもとダークマター生成の関係を調べている。

**計画研究 A03「原始ブラックホール・巨視的ダークマターの探究」(略称：マクロ DM)** – A03 班の目標は、原始ブラックホール(PBH: Primordial Black Hole)および巨視的コンパクト天体に関して、形成過程をより深く理解し(深化)、可能性のある多様なモデルを提案し(拡張)、有効な観測的検証方法を提案(検証)することである。PBHについては、中村卓史らの先駆的な研究([Nakamura et al., Astrophys. J. 1998](#))をはじめとする理論的研究、すばる望遠鏡などの観測的研究で日本が顕著な業績を挙げてきた研究分野である。2015年のLIGOによる30太陽質量程度の連星合体の重力波検出以来、PBHの重要性が再考され、近年活発に議論されている研究分野である。PBH研究の「深化・拡張・検証」の3つの方向性をつなぎ合わせることによって、これまでにないレベルでPBHのダークマターとしての可能性を追求、検証し、独創的で先進的な研究成果を挙げることが領域設定期間内の目的である。

今回の中間評価実施時までには、主に個々の研究をより進展させることに注力しつつも、全7回を数えるレギュラーミーティングを通して情報を共有し、すでにいくつかの融合的研究成果も実現している。今後A03班内の3つの方向性、及び他の計画研究班との共同研究を加速させ、可能なPBH形成モデルに対する信頼度の高い定量的な観測的制限と将来観測を用いた検証手法の提案を行う。PBHは、LIGOなどのレーザー干渉計重力波望遠鏡によって観測された連星ブラックホールの起源として注目されており、他の連星ブラックホール形成モデルと区別する上で、重力波波形から推定可能な質量比と連星ブラックホールの有効スピンのような値を取り得るかを明らかにすることが重要と考えられている。A03班では、研究費で雇用されている、専任博士研究員である古賀泰敬が中心となり、研究代表者柳哲文、研究分担者原田知広を含む共同研究者とともに、標準的な輻射優勢期に形成されるPBHについて、それらが連星を形成した場合に期待される質量比、有効スピンの確率分布を明らかにした([Koga et al., Astrophys. J. 2022](#))。重力波望遠鏡によって、今後より多くの連星ブラックホールがより高精度で観測されることは間違いなく、この論文は、PBHがこれらの起源となり得る可能性を検証し、対応する質量スケールにおけるPBHダークマター量の観測的制限を得る上で基礎となる重要な研究成果と言える。

現在ダークマターとして寄与するPBH量に対して、その素となるインフレーション起源の量子揺らぎの性質が大きな影響を与えることが知られている。特に、PBH形成を議論する上で良く用いられる、一つのインフラトン場を用いたモデルでは、生成される曲率揺らぎの振幅が一般に強い原始非ガウスの統計性を持ち、大きな振幅の領域に長いテールを持つ。このような場合、比較的小さな平均振幅でもテール部分の寄与により、より多くのPBHが形成される。A03班の柳哲文とA01班の北嶋直弥は他の共同研究者と協力し、この原始非ガウステールを持つ曲率揺らぎに対して、信頼度の高い精密な解析手法を用いてPBH量を理論的に見積もり、PBH質量スペクトルを明らかにした([Kitajima et al., JCAP 2021](#)) (A01班、A03班の共同研究)。現在のダークマターとしてのPBH量と単一場インフレーションモデルをつなぐ上で基礎となる重要な研究成果といえる。

標準的なPBH形成過程では、インフレーション起源の断熱揺らぎが放射優勢期に成長を開始し、PBHを形成する。一方、PBH形成が議論されるような、CMBの非等方性によって観測されるスケールに比べて極端に小さなスケールでは、等曲率揺らぎと呼ばれる、物質成分間の密度比の空間的揺らぎに対して、CMBスケールのような強い観測的制限は得られていない。A03班の研究分担者佐々木節は共同研究者とともに、冷たいダークマター(CDM)と輻射成分に対する等曲率揺らぎが大きな振幅を持つ場合も断熱揺らぎの場合と同様にPBH形成が起こることを指摘し、PBH量に対する観測的制限から、小スケールにおけるCDM等曲率揺らぎに対する観測的制限を与えた([Passaglia & Sasaki, Phys. Rev. D 2022](#))。こ

これは等曲率揺らぎからの PBH 形成を議論した初めての先駆的研究成果である。

原始曲率揺らぎから生成される PBH によってダークマターを説明するためには、原始曲率揺らぎの振幅が特定のスケールで増幅されている必要がある。その場合、この原始曲率揺らぎがソースとなって誘起される 2 次的な背景重力波の振幅も普遍的に大きくなるため、背景重力波の観測は PBH ダークマターシナリオの観測的検証として非常に重要である。A03 班の研究分担者佐々木節らは、早くからこの 2 次的背景重力波の重要性に着目し、LIGO 重力波望遠鏡、あるいはパルサータイミングアレイなどの観測から背景重力波を調べることが、PBH ダークマターシナリオの検証になることを指摘し、インパクトのある成果を挙げている。A03 班の研究者は重力波宇宙論の分野を拓き、業界で活発な議論を巻き起こしている。

PBH が矮小銀河内に存在すると、星間物質との相互作用による星間ガスの加熱機構（降着円盤からの放射、運動摩擦、円盤風）が働くと考えられている。A03 班の研究分担者 Alex Kusenko、**公募研究 D03 林航平**は他の共同研究者と共に、この加熱機構が観測データから予測される冷却率に比べて小さくなくてはならないという制限から、1 太陽質量から  $10^7$  太陽質量までの PBH 存在量に対して新しい観測的制限を与えた([Takhistov et al., JCAP 2022](#)) (A03 班と公募研究 D03 の共同研究)。Kusenko は、**当時大学院生の杉山素直、B02 班の高田昌広らとの共同研究**で、QCD アクシオンを含むアクシオンダークマターシナリオで生成される可能性があるアクシオン星(巨視的天体)の存在量を重力マイクロレンズから制限する論文を発表した([Sugiyama et al., Phys. Lett. B 2023](#)) (大学院生、A03 班、B02 班の共同研究)。

これまでブラックホール連星の合体から放出される重力波が 90 イベント検出されているが、これらは比較的距離の近いものであり、さらに遠くにあつて強度が小さい多くのイベントは確率的背景重力波として観測することができる。各イベントが重なり合う場合、連続的な背景重力波となり、重力波の強度はガウス分布に従う一方で、イベント数が重なり合うほど多くない場合、背景重力波は非ガウスの性質をもつ。A03 班の研究分担者黒柳幸子は、共同研究者らと共に、天体ブラックホールや PBH によって生成される背景重力波の原始非ガウス性の度合いを調査し、様々な PBH の質量分布を考慮しながら比較を行い、モデルごとに原始非ガウス性に違いが現れることを示した([Braglia et al., MNRAS 2023](#))。ブラックホール連星起源の背景重力波は近いうちに検出できることが確実視されており、本研究はその原始非ガウス性を測ることで、ブラックホールの起源に言及することができる点を初めて示した重要な成果である。

**計画研究 B05「電子陽電子加速器によるダークマター探索」(略称:  $e^+e^-$ 加速器)** – B05 班の目的は、世界最高輝度の SuperKEKB 加速器を用いたフレーバー物理実験である Belle II(電子陽電子衝突型加速器)を用いたダークマター探索の研究を行うことである。2019 年から本格運転を開始した SuperKEKB 加速器での Belle II 実験は、新型コロナウイルスの影響下の困難な状況ではあったが、2022 年夏までに、前身の Belle 実験のデータの半分程度に相当する 420/fb のデータを蓄積した。今後、2023 年末に運転を再開する予定となっている。

Belle II のトリガーは B 中間子などのハドロンが生成される事象に最適化されており、B05 班ではダークマター探索のためのトリガー改良を行っている。ダークマター探索では衝突で出てくる粒子が少ない事象が解析の対象となっていて、このような事象は現時点ではデータ収集されているが、加速器の性能が向上し、データ収集性能が逼迫するようになると、トリガー条件から外してデータ収集できなくなる恐れがある。このような事態を防ぐため、ダークマター探索に用いるイベントに対するトリガー効率を維持しつつ、ビームバックグラウンドなどへのトリガーを抑制したい。

そこで、高度なアルゴリズムの実装を可能にできるよう、Belle II 用に開発された汎用トリガーボード UT4 (図 14) へのトリガーアルゴリズムの実装を行い、使用されているトリガーボードの置き換えを進めた。また、実際に、ドリフトチェンバーからのトリガー情報としてチェンバーのアナログ情報(パルス高の情報)を後段に送り、これを用いて偽のトラックを取り除くロジックを開発した。これにより、加速器性能向上時のトリガーレート削減とダークマター用トリガーの維持が期待される。また、Belle II のトラックとカロリメータのマッチングを行って孤立した光子を探索することにより、終状態に光子だけ



図 14: Belle II 用に開発した汎用ドリナーがボード UT4。

が存在するモードの探索を可能にする単光子トリガーの開発を行った。このトリガーは、これまでの運転には使われていないが、加速器性能が向上した時には必要になると予想され、将来、利用可能なように研究をすすめている。

ダークマター探索の物理解析としては、Belle 実験のデータを用いてダークゲージボゾン  $Z'$  がミュオン対に崩壊する探索の研究を行った。ここで対象としている  $Z'$  は、レプトンファミリー数の差に結合する新しい  $U(1)$  ゲージボゾンで、ミュオンの異常磁気能率の理論予想と実験値のずれを説明し得るとされる。Belle のデータを解析した結果、信号はみつからず、図 15 のように  $Z'$  がミュオン異常磁気能率の理論値と実験値のずれを説明するパラメータ領域の大半を排除した。このほか、Belle II 実験データを用いて  $Z'$  が invisible な粒子に崩壊する場合の探索や、アクシオンの探索、ダークフォトンの探索などで新結果を得た。いずれも、信号はみつからず、新しい制限を得た。また、Belle II のデータを用いて、B 中間子の崩壊中で重い QCD アクシオンへの崩壊を探索する解析を進めている。

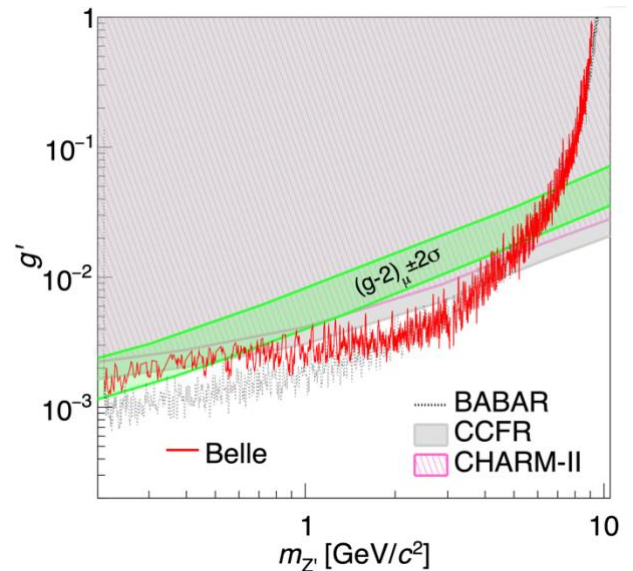


図 15: Belle 実験データを用いたゲージボゾン  $Z'$  の探索結果。横軸は  $Z'$  の質量で、縦軸はレプトンファミリーの差と  $Z'$  の間の結合の強さ。赤が今回の結果。緑のバンドは、 $Z'$  がミュオン  $g-2$  異常磁気能率のずれを説明するための領域。同種の BaBar 実験とともに大半の領域を排除する。CHARM-II、CCFR は過去の Neutrino Trident Production の実験データを再解釈して得られる排除領域。

**計画研究 C01「量子重力理論から迫るダークマター」** (略称: 量子重力理論) – C01 班が目標とするのは、究極理論たる量子重力理論の知見をいかすことで、ダークマターを記述する有効場の理論の広大なディスプレイスペースに制限をあたえ、本学術研究のダークマター研究に一つの指針を与えようとするものである。また、その過程において、量子重力理論そのものの理解を深めることも目指している。

ダークマターについてはこれまでの観測事実から複数の証拠が挙げられているが、それら全ては重力相互作用を用いている。したがって、重力以外の力を用いてダークマターを検出しようとする実験・観測においては、いくら精度をあげても何も観測がされずに終わってしまう「悪夢のシナリオ」が論理的には排除されていない。しかし、量子重力の効果を考えて、そのような可能性は排除されるという証拠が積み重なっている。これは一言でいえば、量子重力においては「重力が他の力に比べて弱い」と予想されるからであり、既にわかっている重力の効果により、その他の力による相互作用に下限が与えられるからである。つまり、ダークマターやより一般のダークセクターの検出実験でその効果を発見できる保証が得られることになる。

「重力が他の力に比べて弱い」という主張にはいくつかの異なる定式化が知られている。例えば、研究代表者山崎雅人、研究分担者白井智は、スカラー場からの力が重力よりも強いという「スカラー版弱い重力予想」を定式化し、その宇宙論的帰結について論じた (Shirai & Yamazaki, *Class. Quantum Grav.* 2021)。またより最近、C01 班の白井、山崎、研究分担者斎藤遼、および公募研究 E02 の野海俊文を含むグループにより、ダークセクターに存在する軽いゲージボゾンについての制限について調べた (Aoki et al., arXiv preprint 2023) (C01 と公募研究 E01 の共同研究)。この研究では、ダークゲージボゾンの散乱振幅の解析性とその positivity (正值性) を駆使することにより、ダークゲージボゾンの質量と相互作用について強い制限が得

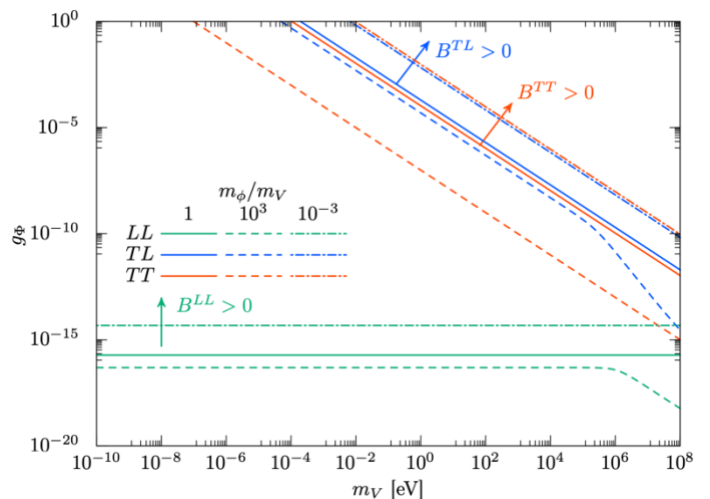


図 16: ダークセクターのゲージボゾンが、ヒッグズ機構において質量を得た場合の結合定数 (縦軸) と質量 (横軸) についての positivity (正值性) からの制限 ( $B > 0$  の領域が許される範囲)。



られることが示された (図 16)。この図から理論的な考察から結合係数に下限が得られ、実験に指針を与える結果になっている。

B-L ゲージボゾンの場合に、positivity からどのような制限が得られるか、を表したのが図 17 である。この図に示されているように、positivity からの制限を素朴に信じると、実験で許されているほとんどの領域が既に理論的に排除されることになり、これは例えば B01 班の研究である KAGRA でのゲージボゾン探索に直接に影響する可能性がある。しかし、positivity についての我々の議論では、不安定粒子の散乱振幅をどう扱うかなどの理論的な問題が残されているほか、高エネルギーの散乱振幅がストリングスケールにおいて Regge 化するなどの仮定が課されていることには注意が必要である。もし仮に positivity からの制限が破れていることが実験的に観測された場合には、量子重力の標準的なシナリオについての我々の理解が書き換わることになり、量子重力の研究に大きなインパクトがある。

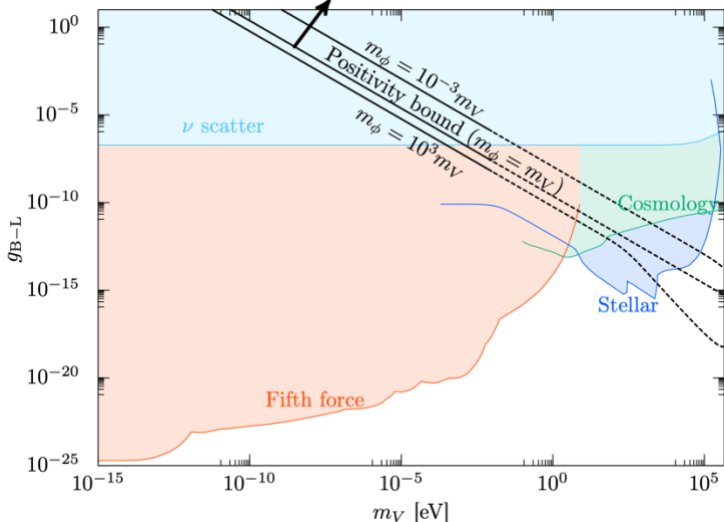


図 17: ダークセクターの例として、バリオン-レプトン (B-L)対称性をゲージ化したゲージ場がヒッグズ機構により質量を得た場合のパラメーターについての暫定的な制限。黒の線が量子重力の考察からの下限(矢印の領域が許される範囲)。他の色付き領域は、実験で排除(棄却)されている領域。

ダークマターの一つの特徴はそれが宇宙論的スケールで安定であることである。この安定性はしばしば大域対称性を用いることで説明されてきたが、実は大域対称性は量子重力において破れなければいけないことが示唆されている。研究分担者野村泰紀はブラックホールの内部について考察することで、大域的対称性が  $O(1)$  で破れていなければならないことを示し (Nomura, Phys. Rev. D 2020)、この主張にさらなる証拠を与えた。一方、近年ブラックホールの情報喪失問題に関連して、アンサンブル平均により粗視化された量子重力の理論では大域対称性が実は許されることが指摘されており、山崎および本計画研究の専任博士研究員 Meer Ashminkumar らそのアンサンブル平均のホログラフィーについて新たな例で調べた (Ashwinkumar et al., JHEP 2021)。またその発展として、超弦理論の T 双対からアンサンブル平均により大域対称性が双発することを指摘した (Ashwinkumar et al., arXiv preprint 2023)。

超弦理論においてはアクシオンの候補が多数 (カラビ・ヤウ多様体の種類に依存するが例えば 100 個) 存在することが知られているので、本学術変革領域において考えられてきた様々な質量や崩壊定数を持つアクシオンを自然に内包している可能性がある。しかしその一方で、本当に質の高い Peccei-Quinn 対称性をもつアクシオンが超弦理論において許されるのかは定量的な議論を必要とするデリケートな問題であり、特に B06 班の小松らの CMB 観測で示唆されているパリティ対称性の破れを説明するためのアクシオンなど、とても軽いアクシオンの場合には実際にはそのようなアクシオンを超弦理論の立場から構成するのは困難である。そこで山崎は研究領域代表者である村山およびカブリ IPMU の大学院生数名とともに、宇宙論におけるアクシオンについて、その量子重力及び超弦理論からの制限について研究を進めている。この研究においては、超弦理論の立場からアクシオンの有効場理論に対して制限があたえられる一方、逆に観測から量子重力についての知見を得ることも可能であると期待できる。

本学術変革領域の他班との交流についても積極的に推進していることを付記しておく。例として、A03 班と共同のミーティングにおいて PBH について情報交換を行った。また、本班 C01 齋藤遼は B06 班並河俊弥、A02 班成子篤、C02 班樽家篤志らとともに CMB の B モードの非線形効果を考慮した手法を開発した (Namikawa et al., JCAP 2021) (A02, B06, C01, C02 の共同研究)。さらに、本研究班の研究者は、B06 班の博士研究員小幡一平らと、CMB 宇宙複屈折効果を軽いアクシオン場なしで説明できる可能性が存在するかについて研究を進めている。

**計画研究 C02「宇宙構造形成理論から迫るダークマター」**(略称: **宇宙構造形成理論**) – C02 班は、解析的な手法と大規模数値シミュレーションを用い、異なるダークマター候補が及ぼす宇宙の構造形成過程への影響を定量的に調べ、宇宙観測からのダークマター探査手法を提案、あるいは宇宙物理起源の系統誤差の除去の手法を調べることを目的とする。特に、C02 班の宇宙構造形成理論は本学術変革の**計画研究間の協奏**を実務的に助ける役割を果たすことを目的とする。この目的から、これまで冷たいダークマター(CDM)、温かいダークマター(WDM)、自己相互作用するダークマター(SIDM)、アクシオンダークマターを含む粒子質量が極端に軽く、銀河スケールで波のように振る舞うファジーダークマター(FDM)の全てにおいて研究成果を挙げている。以下ではそれぞれにおける成果と、そこから派生したダークマター分布に深く関連する研究成果をまとめる。

**冷たいダークマター(CDM)** – 宇宙全体に存在する CDM ハローの統計的性質をより精密に理解するため、高解像度 N 体シミュレーションを使って、広範囲の質量・赤方偏移到渡るダークマターハローの存在量を調べた。そしてそのシミュレーション結果を再現するフィッティング公式を開発した([Shirasaki, Ishiyama & Ando, \*Astrophys. J.\* 2021](#))。また、**A02 班の廣島渚**とともに、サブハローの親ハローへの降着を記述する extended Press-Schechter モデルを改良し、最小スケールから最大スケールまで、ハロー分散まで含めて包括的に記述する定式化を行なった([Hiroshima, Ando & Ishiyama, \*MNRAS\* 2022](#))。

実際の観測と照らし合わせる際に、直接観測可能な銀河とハローを紐づけることが重要となる。そこで、宇宙の大規模構造のなかでダークマターの作る 4 つの特徴的な構造、ボイド、シート、フィラメント、ノットのどこに銀河が位置しているかを決定するために、シミュレーションデータと機械学習を用いた研究を行った。銀河形成の物理も考慮した、世界最先端の宇宙論的流体力学シミュレーション「IllustrisTNG」のダークマター分布からその構造を 4 つに分類し、各銀河がどの構造に位置するかをその銀河の周辺の銀河分布とセットで学習した。その機械学習の結果、70%程度の精度で銀河の分布だけから、その銀河の属する構造を推定できるようになった([Inoue et al., \*MNRAS\* 2022](#))。

大学院生**榎本耀介**のリードの下、CDM ハローの位相空間の構造を理解するため、宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた数値的研究を行なった。細かい時間間隔で保存されたシミュレーションのスナップショットを用いて、現在の宇宙で同定されたハローから時間的に遡り、ハローを構成する各 CDM 粒子に対し、ハローの中心を何度周回したかをカウントした。カウント数毎に分類した CDM 粒子に対し、動径方向の密度プロファイルを測定し、これが二重べき乗則でよく記述できることを見出した。特に、周回数が 5 回程度以上の粒子のハロー中心部の冪が、ハローの質量や合体史などに依らず、普遍的にマイナス 1 で記述できることを発見した([Enomoto et al., \*arXiv preprint\* 2023](#))。これは、よく知られた Navarro-Frenk-White の密度プロファイル (NFW profile) に対し、構成粒子の速度情報を加えることで、位相空間で見ても CDM ハローに普遍的な構造が存在することを示唆するものであり、CDM モデルを他のダークマターモデルから見分ける際に有用な新しい特徴となり得る。

**温かいダークマター(WDM)** – CDM の場合に見つけた、ダークマターハローの存在量に関するフィッティング公式と、別グループによる先行研究の結果を組み合わせ、WDM の観測的に許される質量範囲を調べた。結果として、粒子質量 2.71 keV 以下の WDM は赤方偏移 6 の銀河個数密度と相入れないことがわかった([Shirasaki, Ishiyama & Ando, \*Astrophys. J.\* 2021](#))。

本計画研究開始時に CDM 用に開発済みだったサブハローの準解析的モデルを WDM に適用し、それを用いて銀河ハロー内の衛星銀河の数から WDM の質量に対して、3.5–5 keV より重くなければならないという制限を与えた。これは銀河形成モデルに寄らずに得られた最もロバストな制限である。さらに、WDM の有力な候補粒子の一つであるステライル・ニュートリノに対して上記の議論を適用し、その質量・混合角のパラメータ空間の大部分を棄却することに成功した。とりわけ X 線観測からの制限と合わせることで、20 keV 以下の質量のステライル・ニュートリノを完全に棄却できることを示した([Dekker et al., \*Phys. Rev. D\* 2022](#)) (研究をリードした **Ariane Dekker** は当時大学院生)。

**自己相互作用するダークマター(SIDM)** – 準解析的サブハローモデルを SIDM に適用するため、まずはサブハローの性質について孤立系 N 体シミュレーションを用いて網羅的に調査した([Shirasaki, Okamoto & Ando, \*MNRAS\* 2022](#))。天の川銀河サイズのダークマターハロー内部を運動する矮小銀河の潮汐破壊が SIDM モデルにおいてどのように進行するかを調べ、シミュレーション結果を説明できる準解析モデルを構築した。このモデルは、天の川銀河観測結果と直接比較可能なものであり、**B02 班が進めるすばる PFS 計画などの観測への応用**が期待される。

SIDM モデルの強い根拠の一つとして、銀河内の衛星銀河の数が CDM の予言と合わないことがあっ

た。研究分担者岡本は、**公募研究 D02 千葉柁司、林航平**らとの共同研究で、この衛星銀河問題が系外銀河にも存在するかどうかを調べる観測プロジェクトに参加した ([Nashimoto et al., \*Astrophys. J.\* 2022](#)) (**C02 と公募研究 D02 の共同研究**)。その結果、局所銀河群外の銀河では天の川銀河の衛星銀河に見られるような中心集中した半径方向の分布や、特定の平面上に分布する性質が見られなかった。このことは天の川銀河の特殊性を示していることを示唆している。

**ファジーダークマター(FDM)** – 質量  $10^{-23}\text{eV}$  程度の超軽量の FDM 候補において、数値シミュレーションで知られていたダークマターハローの中心コアの半径、およびその質量とハロー質量との関係 (コア・ハロー関係) について考察を行った。基礎方程式であるシュレーディンガー・ポアソン方程式から出発し、いくつかの仮定にもとづき解析的なコア・ハロー関係の表式の導出に成功した。その結果、コア・ハロー関係はハローの中心集中パラメータに強く依存することがわかった ([Taruya & Saga, \*Phys. Rev. D\* 2022](#))。このことは、コア・ハロー関係は、従来示唆されていたものと異なり、宇宙論パラメータ、特にハロー合体形成史に依存し、単純なべき則には従わないことを意味する。そのため、コア・ハロー関係を観測に応用してダークマター質量を制限する際は注意を要する。

FDM の特徴として、密度プロファイルの小スケールでのゆらぎが大きい ( $\sim O(1)$  程度) ことが挙げられる (ゆらぎの空間スケールは FDM の質量で決まる)。このため、衛星銀河内の星が移動中に FDM の重力ポテンシャルの揺らぎに伴い、運動学的な反跳をうけ、その速度分散が影響を受ける。この影響は小さい衛星銀河でより顕著となる。分担研究者 Neal Dalal はそれらの超低輝度衛星銀河内の星の速度分散データを、シミュレーション結果と比べて解析することで、FDM の質量として  $10^{-19}\text{eV}$  よりも小さい値を棄却することに成功した ([Dalal & Kravtsov, \*Phys. Rev. D\* 2022](#))。これは現存する FDM の制限のなかで最も厳しい下限値になっている。

**その他の関連する展開** – 銀河分光・撮像観測データを用いて、 $\text{eV}$  程度の質量をもつアクシオンダークマターの崩壊現象を探索する新たな手法を開発した ([Shirasaki, \*Phys. Rev.\* 2021](#))。米国の将来観測計画を想定すると、この質量範囲のアクシオンの崩壊係数に  $10^{-11}/\text{GeV}$  の上限が課せられることを示した。この期待される制限は、既存の制限と比べて 10 倍程度厳しいものである。

銀河内に存在する衛星銀河や、銀河中心周辺のコアの密度分布を用いることで、崩壊するダークマターについての研究を将来観測計画に照らし合わせて行った ([Dekker et al., \*Phys. Rev. D\* 2021](#); [Ando et al., \*Phys. Rev. D\* 2021](#))。超重ダークマター、 $\text{keV}$  領域のステライル・ニュートリノなど広い質量領域に渡り包括的な議論を行なった。

宇宙初期のインフレーションによって、スケール不変なパワースペクトルから物質の構造ができたと考えられてきたが、このスケール不変性は銀河よりも小さいスケールでは検証されていない。C02 グループはサブハローの準解析的モデルを用い、衛星銀河の数から小スケールのパワースペクトルに最も強力な制限を与えることに成功した ([Ando, Hiroshima & Ishiwata, \*Phys. Rev. D\* 2022](#))。

## 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、主催シンポジウム等の状況。令和5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。

- (1) **主な査読論文**: 領域発足後3年間(2020–2022年度)に計**450編**(2023年6月時点)を超える査読論文を発表した。以下には、領域代表者、11計画研究の各計画研究、公募研究の主な論文を記載する。既に引用数が高い論文については、ADSあるいはINSPIREから参照した数字(2023年6月15日時点)を記載する。(ここでは既に査読雑誌に掲載済みの論文だけをリストする)

領域代表者：村山齊(26編中5編を記載)

1. **“Thermal Dark Matter from Freeze-Out of Inverse Decays”**, \*R. Frumkin, Yo. Hochberg, E. Kuflik, H. Murayama, Phys. Rev. Lett. **130**, 121001 (2023)
2. **“Resonant Self-Interacting Dark Matter from Dark QCD”**, \*Y. Tsai, R. McGehee, H. Murayama, Phys. Rev. Lett. **128**, 172001 (2022) (40 citations)
3. **“Linear sigma dark matter”**, \*D. Kondo, R. McGehee, T. Melia, H. Murayama, JHEP **9**, 41 (2022)
4. **“Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles”**, M. Kawasaki, K. Kohri, \*T. Moroi, K. Murai, H. Murayama, JCAP **12**, 48 (2020) (29 citations)
5. **“A practical and consistent parametrization of dark matter self-interactions”**, \*X. Chu, C. Garcia-Cely, H. Murayama, JCAP **6**, 43 (2020) (32 citations)

計画研究 A01 「軽いダークマターの生成と進化に関する理論的探究」(68編中5編を記載)

1. **“Power spectrum of domain-wall network, and its implications for isotropic and anisotropic cosmic birefringence”**, N. Kitajima, F. Kozai, F. Takahashi, \*W. Yin, JCAP **10**, 43 (2022)
2. **“Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination”**, \*S. Nakagawa, F. Takahashi, M. Yamada, Phys. Rev. Lett. **127**, 181103 (2021)
3. **“Kilobyte Cosmic Birefringence from ALP Domain Walls”**, F. Takahashi, \*W. Yin, JCAP **4**, 7 (2021) (33 citations)
4. **“Gravitational Waves and Dark Radiation from Dark Phase Transition: Connecting NANOGraV Pulsar Timing Data and Hubble Tension”**, Y. Nakai, \*M. Suzuki, F. Takahashi, M. Yamada, Phys. Rev. Lett. **B 816**, 136238 (2021) (91 citations).
5. **“NANOGraV Results and LIGO-Virgo Primordial Black Holes in Axionlike Curvaton Models”**, \*K. Inomata, M. Kawasaki, K. Mukaida, T. T. Yanagida, Phys. Rev. Lett. **126**, 131301 (2021) (50 citations)

計画研究 A02 「マルチメッセンジャーで探る重いダークマター」(46編中5編を記載)

1. **“Revisiting ultrahigh-energy constraints on decaying superheavy dark matter”**, \*S. Das, K. Murase, T. Fujii, Phys. Rev. D **107**, 103013 (2022) (31 citations)
2. **“Simulating neutrino echoes induced by secret neutrino interactions”**, \*J. A. Carpio, K. Murase, JCAP **2**, 42 (2023)
3. **“Semi-analytical frameworks for subhaloes from the smallest to the largest scale”**, \*N. Hiroshima, S. Ando, T. Ishiyama, MNRAS **517**, 2728 (2022)
4. **“Search for Gamma-ray Spectral Lines from Dark Matter Annihilation up to 100 TeV towards the Galactic Center with MAGIC”**, MAGIC Collaboration (including N. Hiroshima); corresponding authors: \*T. Inada, \*D. Kerszberg, \*M. Hutten, Phys. Rev. Lett. **130**, 061002 (2023)
5. **“Mineral detection of neutrinos and dark matter. A whitepaper”**, \*S. Baum et al. (including K. Murase), Phys. Dark Univ. **41**, 101245 (2022)

計画研究 A03 「原始ブラックホール・巨視的ダークマターの探究」 (54 編中 5 編を記載)

1. “Tracking the origin of black holes with the stochastic gravitational wave background popcorn signal”, \*Matteo Braglia, Juan Garcia-Bellido, Sachiko Kuroyanagi, MNRAS **519**, 6008 (2023)
2. “Effective Inspiral Spin Distribution of Primordial Black Hole Binaries”, \*Y. Koga, T. Harada, Y. Tada, S. Yokoyama, C. Yoo, Astrophys. J. **939**, 65 (2022)
3. “Primordial black holes from CDM isocurvature perturbations”, \*S. Passaglia, M. Sasaki, Phys. Rev. D **105**, 103530 (2022)
4. “Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail”, \*N. Kitajima, Y. Tada, S. Yokoyama, C. Yoo, JCAP **10**, 53 (2021) (32 citations)
5. “Constraining Primordial Black Holes with Dwarf Galaxy Heating”, \*P. Lu, V. Takhistov, G. B. Gelmini, K. Hayashi, Y. Inoue, A. Kusenko, Astrophys. J. Lett. **908**, L23 (2021) (47 citations)

計画研究 B01 「重力波望遠鏡とレーザー干渉計実験による超軽量ダークマター探索」 (32 編中 5 編を記)

1. “Axion dark matter search using arm cavity transmitted beams of gravitational wave detectors”, \*K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, Phys. Rev. D **104**, 062008 (2021)
2. “Improved sensitivity of interferometric gravitational-wave detectors to ultralight vector dark matter from the finite light-traveling time”, \*S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, H. Nakatsuka, I. Obata, Phys. Rev. D **103**, 051702 (2021)
3. “Ultralight vector dark matter search with auxiliary length channels of gravitational wave detectors”, \*Y. Michimura, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata, Phys. Rev. D **102**, 102001 (2020)
4. “Constraints on dark photon dark matter using data from LIGO’s and Virgo’s third observing run”, LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, KAGRA Collaboration (including M. Leonardi, Y. Michimura, S. Miyoki), Phys. Rev. D **105**, 063030 (2022)
5. “Gravitational wave trispectrum in the axion-SU(2) model”, \*T. Fujita, K. Murai, I. Obata, M. Shiraishi, JCAP **1**, 7 (2022)

計画研究 B02 「すばる多天体分光観測によるダークマター探索」 (60 編中 5 編を記載)

1. “Analysis method for 3D power spectrum of projected tensor fields with fast estimator and window convolution modeling: An application to intrinsic alignments”, \*T. Kurita, M. Takada, Phys. Rev. D **105**, 123501 (2022)
2. “Cosmological inference from an emulator based halo model. II. Joint analysis of galaxy-galaxy weak lensing and galaxy clustering from HSC-Y1 and SDSS”, \*H. Miyatake, \*S. Sugiyama, \*M. Takada et al. (including T. Nishimichi, M. Shirasaki, M. Oguri, H. Murayama, S. Miyazaki), Phys. Rev. D **106**, 083520 (2022) (34 citations)
3. “Full-shape cosmology analysis of the SDSS-III BOSS galaxy power spectrum using an emulator-based halo model: A 5% determination of  $\sigma_8$ ”, \*Y. Kobayashi, T. Nishimichi, M. Takada, H. Miyatake, Phys. Rev. D **105**, 083517 (2022) (45 citations)
4. “Blinded challenge for precision cosmology with large-scale structure: Results from effective field theory for the redshift-space galaxy power spectrum” \*T. Nishimichi et al. (including M. Takada), Phys. Rev. D **102**, 123541 (2020) (92 citations)
5. “Exploring Primordial Black Holes from the Multiverse with Optical Telescopes”, \*A. Kusenko, M. Sasaki, \*S. Sugiyama, M. Takada, V. Takhistov, E. Vitagliano, Phys. Rev. Lett. **125**, 181304 (2020) (80 citations)

計画研究 B03 「広視野かつ高時間分解能天体イメージングによるダークマター探索」 (36 編中 5 編を記)

1. “Fast Calculation of Gravitational Lensing Properties of Elliptical Navarro Frenk White and Hernquist Density Profiles”, \*M. Oguri, PASP **133**, 074504 (2021)
2. “Hundreds of weak lensing shear-selected clusters from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S19A data”, \*M. Oguri, S. Miyazaki, et al., PASJ **73**, 817 (2021)
3. “Shock cooling of a red-supergiant supernova at redshift 3 in lensed images”, \*W. Chen, P. L.

Kelly, M. Oguri, T. J. Broadhurst, J. M. Diego, N. Emami, A. V. Filippenko, T. L. Treu, A. Zitrin, *Nature* **611**, 256 (2022)

4. “An Analytic Model for the Subgalactic Matter Power Spectrum in Fuzzy Dark Matter Halos”, \*H. Kawai, M. Oguri, A. Amruth, T. Broadhurst, J. Lim, *Astrophys. J.* **925**, 61 (2022)
5. “Amplitude and phase fluctuations of gravitational waves magnified by strong gravitational lensing”, \*M. Oguri & R. Takahashi, *Phys. Rev. D*, **106**, 043532 (2022)

計画研究 B04 「X線領域の観測技術の革新によるダークマター探索」(5編)

1. “Fabrication of A 64-pixel TES Microcalorimeter Array with Iron Absorbers Uniquely Designed for 14.4-keV Solar Axion Search”, \*Y. Yagi, T. Hayashi, K. Tanaka, R. Miyagawa, R. Ota, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, N. Yoshida, M. Saito, T. Homma, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **33** (5) (2023) accepted for publication
2. “Simulation of TES X-ray Microcalorimeters Designed for 14.4 keV Solar Axion Search”, \*S. Mori, Y. Nishida, N. Iyomoto, Y. Yagi, R. Konno, T. Hayashi, K. Tanaka, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Sato, M. Saito, T. Homma, *Journal of Low Temperature Physics* **209**, 518 (2022)
3. “Spatial Power Spectral Analysis of the Suzaku X-ray Background”, \*Y. Zhou, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, *Astrophys. J.* **929**, 128 (2022)
4. “Voyage through the hidden physics of the cosmic web”, \*A. Simionescu et al., *Experimental Astronomy* **51**, 1043 (2021)
5. “Elemental Abundances of the Hot Atmosphere of Luminous Infrared Galaxy Arp 299”, \*J. Mao, P. Zhou, A. Simionescu, Y. Su, Y. Fukazawa, L. Gu, H. Akamatsu, Z. Zhu, J. de Plaa, F. Mernier, J. Kaastra, *Astrophys. J. Lett.*, 918, L17 (2021)

計画研究 B05 「電子陽電子加速器によるダークマター探索」(7編中5編を記載)

1. “Search for Lepton-Flavor-Violating  $\tau$  Decays to a Lepton and an Invisible Boson at Belle II”, I. Adachi et. al. (Belle II Collaboration) including H. Kakuno, S. Nishida, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 181803 (2023)
2. “Search for a dark photon and an invisible dark Higgs boson in  $\mu^+\mu^-$  and missing energy final states with the Belle II experiment”, F. Abudinen et. al. (Belle II Collaboration) including K. Hara, H. Kakuno, Y.-T. Lai, S. Nishida, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 071804 (2023)
3. “Search for a Light Higgs Boson in Single-Photon Decays of  $Y(1S)$  Using  $Y(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- Y(1S)$  Tagging Method”, \*S. Jia et. al. (Belle Collaboration) including S. Nishida, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 081804 (2022)
4. “Search for  $Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$  in the  $L_\mu-L_\tau$  gauge-symmetric model at Belle”, \*T. Czank et. al. (Belle Collaboration) including S. Nishida, Y.-T. Lai, *Phys. Rev. D* **106**, 012003 (2022)
5. “Search for the dark photon in  $B^0 \rightarrow A'A'$ ,  $A' \rightarrow e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ , and  $\pi^+\pi^-$  decays at Belle”, \*S.-H. Park et. al. (Belle Collaboration) including S. Nishida, *JHEP* **4**, 191 (2021)

計画研究 B06 「宇宙マイクロ波背景放射によるダークマター探索」(32編中5編を記載)

1. “Isotropic cosmic birefringence from early dark energy”, \*K. Murai, F. Naokawa, T. Namikawa, E. Komatsu, *Phys. Rev. D* **107**, L041302 (2023)
2. “Improved constraints on cosmic birefringence from the WMAP and Planck cosmic microwave background polarization data”, \*J. R. Eskilt, \*E. Komatsu, *Phys. Rev. D* **106**, 063503 (2022) (32 citations)
3. “Is cosmic birefringence due to dark energy or dark matter? A tomographic approach”, \*H. Nakatsuka, T. Namikawa, E. Komatsu, *Phys. Rev. D* **105**, 123509 (2022)
4. “New physics from the polarized light of the cosmic microwave background”, \*E. Komatsu, *Nat. Rev. Phys.* **4**, 452–469 (2022) (46 citations)
5. “Cosmic birefringence from the Planck Data Release 4”, \*P. Diego-Palazuelos, \*J.R. Eskilt, Y. Minami, et al. including E. Komatsu, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 091302 (2022) (55 citations)

計画研究 C01 「量子重力理論から迫るダークマター」(25 編中 5 編を記載)

1. “**Black hole and de Sitter microstructures from a semiclassical perspective**”, \*C. Murdia, Y. Nomura, K. Ritchie, Phys. Rev. D **107**, 026016 (2023)
2. “**Searching for the QCD axion with the proposed International Linear Collider beam facility**”, \*H. Fukuda, H. Otono, S. Shirai, Phys. Rev. D **106**, 055029 (2022)
3. “**Chern-Simons Invariants from Ensemble Averages**”, \*M. Ashwinkumar, M. Dodelson, A. Kidambi, \*J. M. Leedom, M. Yamazaki, JHEP **8**, 44 (2021)
4. “**On Stability of Fermionic Superconducting Current in Cosmic String**”, M. Ibe, S. Kobayashi, \*Y. Nakayama, S. Shirai, JHEP **5**, 217 (2021)
5. “**Unified approach to secondary effects on the CMB B-mode polarization**”, T. Namikawa, A. Naruko, \*R. Saito, A. Taruya, D. Yamauchi, JCAP **10**, 29 (2021)

計画研究 C02 「宇宙構造形成理論から迫るダークマター」(51 編中 5 編を記載)

1. “**Universal multi-stream radial structures of cold dark matter halos**”, \*Y. Enomoto, T. Nishimichi, A. Taruya, Astrophys. J., accepted; arXiv:2302.01531
2. “**Warm dark matter constraints using Milky Way satellite observations and subhalo evolution modeling**”, \*A. Dekker, S. Ando, C. A. Correa, K. C. Y. Ng, Phys. Rev. D **106**, 123026 (2022)
3. “**Excluding fuzzy dark matter with sizes and stellar kinematics of ultrafaint dwarf galaxies**”, \*N. Dalal, A. Kravtsov, Phys. Rev. D **106**, 063517 (2022)
4. “**Modelling self-interacting dark matter substructures - I. Calibration with N-body simulations of a Milky-Way-sized halo and its satellite**”. \*M. Shirasaki, T. Okamoto, S. Ando, MNRAS **516**, 4594 (2022)
5. “**Constraining the primordial curvature perturbation using dark matter substructure**”, S. Ando, N. Hiroshima, K. Ishiwata, Phys. Rev. D **106**, 103014 (2022)

公募研究

1. “**First Identification of a CMB Lensing Signal Produced by 1.5 Million Galaxies at  $z \sim 4$  : Constraints on Matter Density Fluctuations at High Redshift**”, \*H. Miyatake et al. including A. Nishizawa, Phys. Rev. Lett. **129**, 061301 (2021) (PRL Editor’s suggestion)
2. “**Diversity of Dark Matter Density Profiles in the Galactic Dwarf Spheroidal Satellites**”, \*K. Hayashi, M. Chiba, T. Ishiyama, Astrophys. J. **904**, 45 (2020) (53 citations)

(2) 学会発表：多くの国内・国際学会招待講演のうち一部を記載

1. “**Cosmology with Subaru HSC/PFS**” (invited talk), M. Takada, 国際会議 “International Conference on the Physics of the Two Infinities”, March 2023, Kyoto Japan
2. “**Axion dark matter and its cosmological implications**” (invited talk), F. Takahashi, KPS-JPS Joint symposium, March 2023, Daejeon, Korea
3. “**Cosmic Birefringence: A New Probe of Dark Matter and Dark Energy**” (invited talk), E. Komatsu, 国際会議 “ICASU Inaugural Conference”, May 2022, Urbana-Champaign, Illinois, USA
4. “**Theory vision: the questions before us**” (invited plenary talk), H. Murayama, 国際会議, Seattle Snowmass 2022, July 2022, Seattle USA

(3) 書籍

1. 「なぜ宇宙は存在するのか-はじめての現代宇宙論」野村泰紀(C01)、講談社ブルーバックス 2022 年
2. 「宇宙はなぜ美しいのか」幻冬舎 村山齊(X00) 2021 年
3. 「数理の窓から世界を読みとく-素粒子・AI・生物・宇宙をつなぐ-」岩波書店 廣島渚他(A02)2021 年

(4) 主催シンポジウム・研究会: 主催、共催の研究会のうち 2 つを掲載

1. 国際研究会議 “Future Science with CMBxLSS” (共催)、基礎物理学研究所, 京都大学, April 10 – 14,

2023 (海外から 100 名ほどの参加者があった)

2. 国際シンポジウム“ダークマターの正体は何か？領域中間成果シンポジウム”(ハイブリッド), Kavli IPMU, March 7–9, 2023

(5) **報道発表:** 多くの研究成果の報道発表うち一部を記載

1. 「再出現」した超新星爆発の観測により宇宙の膨張速度を測定 50 年以上前に提唱された手法を初めて実現」、2023 年 5 月、大栗真宗千葉大学先進科学センター教授グループ (B03)
2. 「ダークマター地図作成のための解析手段を新開発-新たなダークマター地図がアインシュタインの一般相対性理論を裏付ける」、2023 年 5 月、並河俊弥カブリ数物特任助教研究グループ(B06)
3. 「ダークマターを見る！-HSC 国際チームが宇宙の標準理論を検証」、2023 年 4 月、高田昌広カブリ数物教授研究グループ(B02)
4. 「宇宙マイクロ波背景放射の偏光に「パリティ対称性」を破る新しい物理の兆候を観測 - 暗黒エネルギーの正体解明の糸口になるか? -」、2020 年 10 月、小松英一郎マックスプランク宇宙物理学研究所長研究グループ(B06)

(7) **受賞:** 領域の研究者の多くが受賞、その一部を記載(若手の受賞については\*を付ける)

1. 小松英一郎(B06)「宇宙背景放射を用いた標準宇宙論への貢献」、第 68 回仁科記念賞、2022 年 12 月
2. 宮崎聡(B03)「すばる望遠鏡広視野カメラの開発による観測的宇宙論の展開」、第 67 回仁科記念賞、2021 年 12 月
3. \*杉山素直(B02)、令和 4 年度 東京大学 理学系研究科研究奨励賞、2023 年 3 月
4. \*直川史寛(B06)、令和 4 年度 東京大学 理学系研究科研究奨励賞、2023 年 3 月
5. \*藤本 拓希(B01)、日本物理学会 2023 年春季大会学生優秀発表、2023 年 4 月
6. 山崎雅人(C01)「超対称筋ゲージ理論及び 4 次元チャーン・サイモンズ理論を用いた可積分模型の研究」、令和 4 年度日本学術振興会賞、2022 年 12 月
7. 千葉柁司(公募研究 D03)「銀河考古学および銀河スケールのダークマター分布の研究」、令和 4 年度天文学会林忠四郎賞、2022 年 3 月
8. \*中川翔太(A01)、令和 3 年度青葉理学振興会賞、2022 年 3 月
9. \*直川史寛(B06)、令和 4 年度 東京大学 理学系研究科研究奨励賞、2023 年 3 月
10. \*中塚洋佑(B03)、第 77 回年次大会日本物理学会学生優秀発表賞、2022 年 3 月
11. 山田將樹(A01)、第 17 回素粒子メダル奨励賞、2022 年 6 月
12. 廣島渚(A02)、富山大学学長賞 第 5 回「未知に挑む女性研究者賞」、2021 年 12 月
13. \*藤田智弘(B01)、第 16 回日本物理学会若手奨励賞、2021 年 10 月
14. \*糸潤哉(B01)、日本物理学会 2021 年秋季大会学生優秀発表賞、2021 年 10 月
15. \*小幡一平(B01)、第 16 回中村誠太郎賞、2021 年 9 月
16. \*西澤篤志(B01)、令和 3 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞、2021 年 4 月
17. 小松英一郎(B06)「宇宙マイクロ波背景放射を用いた初期宇宙理論の検証」、第 38 回井上學術賞、2021 年 2 月
18. \*糸潤哉(B01)、OUTSTANDING PRESENTATION AWARD GOLD PRIZE、2020 年 12 月
19. \*糸潤哉(B01)、日本物理学会 2020 年秋季大会学生優秀発表賞、2020 年 11 月
20. 村瀬孔大(A02)「高エネルギーニュートリノを軸にしたマルチメッセンジャー観測に基づく宇宙粒子物理学の先駆的研究」、西宮湯川記念賞、2020 年 3 月



## 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。

本学術変革「ダークマター」では様々なかたちで計画研究および公募研究間での連携、共同研究、連携体制を構築してきた。様々な方法をとってきたが、特に有効であったものは、複数の計画研究グループによるワークショップ・研究会を開催する、異なるグループ間を跨がる(国際)共同研究プロジェクトを立ち上げる(参加する)、機動力のある大学院生・博士研究員が共同研究プロジェクトに参加する(あるいはリードする)、異なる研究グループ間を来訪し、活発な人事交流を行う、ことであった。

アクション、軽いダークマターの研究は、本領域の主な成果であるが、A01、B01、B06の研究者が中心になり、軽いダークマター関連のワークショップを開催してきた。コロナ禍中の2021年9月はオンラインで開催し、180名ほどの参加者(そのうち外国人参加者数は110名ほど)があった。2023年3月は対面で開催し、100名ほどの参加があった。この研究会を契機に多くの共同研究が派生した。

2023年4月には、B02、B06の研究者も世話人になり、宇宙背景放射および銀河サーベイによる宇宙論を議論する対面形式の研究会を京都大学で開催した。120名ほどの参加者があったが、約100名が外国からの参加者があり、日本・欧米の研究プロジェクト、最先端の研究の状況・成果の情報を共有することができた。この研究テーマの注目度の高さが確認できた。

A03の研究グループが中心になり、原始ブラックホールに焦点を当てたワークショップを定期的に開催してきた(2021年10月はオンライン、2022年12月、2023年6月・12月は対面)。このワークショップを通して、多くの共同研究が自発的に発生した。

2022年5月には、B02、A02の研究グループが東北大で対面式のワークショップを開催し、マルチメッセンジャー天文学時代のすばる望遠鏡、重力波望遠鏡、高エネルギーガンマ線・ニュートリノ望遠鏡とのあいだの協奏について意見交換の場を持った。

また、総括班の主催で、各年度領域全体のシンポジウムを開催し、各計画研究の進捗状況・研究成果を共有し、意見交換を持つ場を持った。シンポジウムでは若手研究者に意図的に発表の機会を与え、研究成果の宣伝だけでなく、他の研究グループとの議論の場、共同研究の機会を提供するように配慮した。

右の図は、異なる計画研究および公募研究間の共同研究を定量的に指標化したものである。必ずしも正確でなく、まだ論文になっていない共同研究が現れていないことに注意が必要である。例えば、すばるHSCの大型宇宙観測プロジェクトは多くの研究者が参加しており、必然的に多くの計画研究・公募研究の研究者が参加し、共同研究の数字が多くなっている。また、少人数の計画研究のグループもある。宇宙観測データは公開のものが多く、必然的に共同研究が多い。一方、B04班のX線、B05班の電子陽電子加速器は機器開発、基盤研究が主な活動であり、またそれらはプロジェクト内にしかデータアクセス権がないので、外部との共同研究が现阶段では不可能である(この理由で表からは除外した)。それでも、表からわかるように、既に論文になっている多くの共同研究が生まれていることがわかる。今後も共同研究を促し、ダークマターの研究について長期的な大きな流れを作り、新しい研究分野を拓くのを目指していく。

	A02	A03	B01	B02	B03	B06	C01	C02	公募
A01 軽いDM	-	1	3	-	-	3	-	-	2
A02 重いDM		3	-	1	-	-	1	-	-
A03 巨視的DM			-	2	-	-	1	-	2
B01 レーザー干渉計				-	-	8	-	-	-
B02 すばる分光					8	1	1	20	16
B03 イメージング						-	-	2	-
B06 CMB							1	1	-
C01 量子重力								-	1
C02 構造形成									2
公募									3

図: 異なる計画研究あるいは公募研究間の共同研究の論文数。(注: 一つの論文で複数計画研究、公募研究の研究者が関わっている場合は重複してカウント)

## 9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

本領域が取り組むべき優先課題として、若手研究者の育成には注力してきた(ここでの若手研究者は、大学院生および博士研究員である)。本領域の目的とするダークマターの正体の解明は、物理学・宇宙物理学における最も重要な課題であり、同時に最も魅力ある研究テーマの一つである。本領域では、若手研究者にダークマター研究に参加あるいはリードできる環境を与え、また大型国際共同研究プロジェクトであっても、そのなかの研究プロジェクトに参加あるいはリードできる環境を与えるようにしてきた。また、若手研究者にはワークショップ、研究会にも積極的に参加して貰い、ダークマター研究の最先端の情報を得る、自発的な共同研究を立ち上げる機会を提供するように努めてきた。本領域が主催するシンポジウムでも、積極的に若手研究者に研究成果を発表する機会を提供してきた。

これらの取り組みが功を奏し、多くの若手研究者が存分に実力を発揮し、活躍した。例えば、若手研究者がリードした多くの査読論文が出版された。すばる HSC データによる宇宙論の最新の研究成果では、4つの主要論文を若手研究者がリードした。また、その成果を世界に発信するウェビナー(国立天文台 [リリースページ HSC-Y3 Weak Lensing Results](#) 参照)では、それら若手研究者が研究成果を発表し、業界からも好評価を得ている。2023年3月の領域の国際シンポジウムでは、多くの若手研究者が研究成果を英語で発表した。また、領域に関わる若手研究者の研究成果に対して、日本物理学会学生優秀発表賞など10件以上の受賞があった。このように学術変革領域の貴重な研究環境・機会の下、多くの優秀かつ国際的な若手研究者を育成できている。

## 10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域では本領域の研究、研究成果を社会に還元するために、積極的にアウトリーチ活動を行っている。特に、小中高校生を含む若い世代に向けたアウトリーチには力を入れている。コロナ禍にあった時期もオンライン、TV、新聞等の媒体を通して活動した。以下に、その一部を記載する。

1. NHK Eテレ/NHK BS プレミアム「コズミックフロント Ω」(2022年11月)“宇宙の終わり”監修、(2022年9月)“謎の物質ダークマター”“素粒子のヒミツ”監修、(2022年8月)“アインシュタインの宿題”村山斉出演
2. WIRED Tech WEB 公開質問(2022年9月)“宇宙物理学者 村山斉だけど質問ある?”村山斉 日本版初回(94万回視聴 38.5万人チャンネル登録)
3. NHK ACADEMIA TV 講演会“宇宙と人生は数学の言葉で書かれている”村山斉 2022年6月
4. NHK カルチャーオンライン講座“暗黒物質・暗黒エネルギーから宇宙を考える”村山斉 2022年3月
5. KEK 一般講演会 ILC 企画 宇宙落語会 福丸さん×研究者対談「落語と科学の相互作用」村山斉 2021年11月
6. 東京大学柏キャンパス一般講演会(2021.10)“私たちと元素の起源 -超対称性で迫る強い力の対称性の破れと南部理論-”村山斉 2021年10月
7. KEK 一般公開 2021 オンライン 宇宙落語会「ILC ってなんやねん?」村山斉 2021年9月
8. 国立科学博物館 企画展「加速器 -とてつもなく大きな実験施設で宇宙と物質と生命の謎に挑んでみた-」講演会“夢を追う道具:加速器”村山斉 2021年7月
9. サイエンスアゴラ 2020 素粒子物理×加速器×Life“素粒子物理 X 加速器 X Life =?”村山斉 2020年11月
10. 高校生向け出張講義: 山形東高校(2022年8月)、秋田南高校(2021年6月)、秋田花輪高校(2021年11月)“物理と宇宙の話”高橋史宜
11. 中日子供新聞記事“アインシュタイン相対性理論”柳哲文 2021年3月
12. 一般講演会(小中学生向け)「膨張する宇宙の不思議」、高田昌広、コラッセふくしま、福島, 2022年12月24日
13. 日本経済新聞“宇宙の暗黒物質を探せ 素粒子実験が難航、研究広がる”道村唯太 2022年3月
14. NHK BS「コズミックフロント」(2021.6)“原始ブラックホール 宇宙創成のマスターキー”高田昌広・当時大学院生杉山素直出演
15. 宇宙への夢を現実へと紡ぐ ヒルズ×金沢大学 宇宙航空人材育成プログラム(小中学生向け)“宇宙の謎、ダークマターって何?”高田昌広 2021年11月
16. 名古屋市科学館プラネタリウム(2022.2)“ダークマター”宮崎聡、大栗真宗 2022年2月
17. KEK キャラバン(出張授業)、堀川高校「加速器で探る素粒子と宇宙」西田昌平 2020年12月
18. 筑波サイエンスワークショップ(京都の高校向けの実習と講演)“加速器で探る素粒子と宇宙”西田昌平 2021年12月, 2022年12月
19. 2022年度聖光学院高等学校講演会“宇宙の始まり、そして終わり”小松英一郎 2022年6月
20. 一般講演会「Where are we from? Clues from the light of the fireball Universe」、小松英一郎(ノーベル物理学受賞者 Roger Penrose 教授とともに), Cambridge University, UK, Jan 2021, <https://stephenhawkingfoundation.org/big-bang-and-black-holes/>
21. 現代ビジネス(2022年4月・6月)“「宇宙が1つって、誰が決めた?」多様な世界の仮定から生まれた無数の宇宙の存在”、“「宇宙を加速膨張させるエネルギー」科学者たちも棚上げしようとした2つの矛盾”“無数に存在する宇宙たちと、その謎に挑み続ける物理学者たち”野村泰紀
22. Discovery+ TV show “Fright Club”野村泰紀 2021年9月
23. 日経ビジネス“「宇宙は複数ある」は本当か 野村教授に聞く”野村泰紀 2021年4月
24. 西宮湯川記念科学セミナー(2020.12)“広がる宇宙、つながる世界”樽家篤史 2020年12月

## 11 研究費の使用状況・計画

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

以下に各研究グループの研究費の使用状況や今後の使用計画を述べる。高額の研究費を要するのは実験系の研究であるが、本領域の観測・実験の研究は、既に日本の持つ既存の施設を利用している。重力波望遠鏡 KAGRA、すばる望遠鏡、始動した電子陽電子加速器 Belle II、また 2023 年夏に打ち上げ予定の X 線衛星 XRISM である。これらの設備に機能強化、あるいはこれら実験・観測データへの優先的なアクセス権を活用して、ダークマター研究を展開するのが、本領域の研究費の効果的使用について工夫している点と言える。

計画研究 B01「レーザー干渉計」では、専任博士研究員の雇用および狭線幅固体レーザー光源の購入に使用した。今後はショットノイズ低減のためにレーザー光量を高出力化するレーザーアンプの導入や、様々な環境雑音を低減するための大型真空槽の購入を予定している。また、超高真空対応の偏光測定系を開発し、KAGRA の真空槽内に導入することでさらに高感度なアクシオン探索を行う予定である。

計画研究 B02「すばる分光」では、ハワイ島すばる望遠鏡サイトで、広視野多天体分光器 PFS のカメラモジュールを開発し、高精度分光データ較正システムを構築している。2022 年度からは本格的に試験観測が始まり、実際の PFS 試験観測データの評価を行い、また較正システムの改良を行っている。2020 年度、2021 年度はコロナ禍の影響で遅れが出たものの、2022 年度には開発が順調に進んだ。2023 年度、2024 年度は PFS のサブコンポーネントの組み上げを行い、さらなる試験観測データを取得する。実データを用いた較正システムの開発・評価・改良が極めて重要であり、研究費でこれらを確実に進める。

計画研究 B03「イメージング」では、浜松ホトニクス株式会社と共同で、7.5um ピクセルの裏面照射型の 2560×10000 ピクセルの CMOS センサーおよびカメラを開発した。2021 年度、2022 年度に各 5 個、計 10 個の CMOS センサーを製作した。今後この CMOS センサーを用いたカメラを評価、試験し、初期観測まで行う予定である。

計画研究 B04「X 線」の研究費の主な使用用途は、専任博士研究者の雇用および TES マイクロカロリメータ成膜用の蒸着装置の購入である。この蒸着装置により、Ti/Au 薄膜を用いたカロリメータがインハウスで製作が可能となり、アクシオン探索などに特化した設計、製作を行っている。今後アクシオン観測を始めるために、専用冷凍機の導入、読み出し回路類の購入を予定している。また XRISM 衛星打ち上げ後は、速やかにデータ解析等を行うために、海外の共同研究者の長期来訪の旅費などに執行する。

B05 班の主な研究費の使用用途は、若手研究者（伊藤慎太郎研究員ほか）の雇用およびトリガー実装用の UT4 ボードの購入である。UT4 ボードの購入は完了しており、Belle II 測定器に組み込まれて動作している。

理論的研究あるいは公開観測データを用いた研究が中心の計画研究 A01–A03, B06, C01–C02 については、研究を効率的に進めるために、専任博士研究員の雇用に主に研究費を執行している。今後も博士研究員の雇用経費に執行する予定である。また、データ解析、理論計算のための計算機環境の整備のために研究費を使用しており、また今後もこの目的に執行する予定である。

本領域の研究は、人材交流、ワークショップ、研究会を行い、互いの研究の情報共有、意見交換を行い、常に新しいアイデアを歓迎し、共同研究を自然に誘発する環境を提供することが極めて重要である。このため、研究打ち合わせのための旅費、ワークショップ、研究会の開催のための旅費、運営費に研究費を使用しており、今後もそのように使用する予定である。

若手研究者の育成も極めて重要であるが、研究会、国際研究会での研究成果の発表のための出張旅費をこれまで十分に確保しており、これからもその予定である。

## 12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本学術変革領域研究のこれまでの3年間の活動により、当初の予想を超えた成果が出ている。今後の主な研究推進方策については以下の通りである。

本研究グループが報告した CMB の偏光データの複屈折効果の兆候は、宇宙のバリティ対称性の破れを予言するアクシオンの発見に繋がる可能性がある。今後、本領域の専任若手研究者を中心に、最先端の CMB 地上実験である Atacama Cosmology Telescope および BICEP3 の偏光データを解析し、複屈折効果を調べる。並行して、本領域の理論、観測グループの共同研究を通して、複屈折効果を引き起こす物理が素粒子物理学の標準理論を超える物理学なのか、あるいは標準理論の枠組みで説明できる余地があるのかを調べる。

本研究グループのすばる HSC の精密宇宙論の成果から明らかになった、初期宇宙データと後期宇宙データが示唆する標準理論  $\Lambda$ CDM の不一致問題、いわゆる  $S_8$  不一致問題の真偽を究明する。今後、すばる HSC 宇宙観測の全データを用い、宇宙大規模構造の弱重力レンズ効果を精密に測定し、統計精度を向上させ、 $S_8$  不一致問題に決着をつける。領域内の共同研究を推進し、 $S_8$  不一致が真である場合に備え、すばるデータとアクシオンダークマターを含む構造形成理論との比較などの研究を進め、標準理論  $\Lambda$ CDM を超える新しい物理の発見に備える。

2024 年には、本領域に属する研究者はユニークかつ世界最高のデータを得る予定である。まず、すばる広視野多天体分光器 PFS が 2024 年度に始動する。この装置を用い、天の川銀河の伴銀河である、ダークマターが支配的な矮小銀河のメンバー星を分光観測し、これまでにない精度でダークマターの空間分布を復元する。この観測と理論予言を比較し、ダークマターの性質(冷たいダークマター、アクシオンダークマターなど)を導出する。2023 年夏頃に打ち上げ予定である、日本主導の X 線衛星 XRISM は、これまでの X 線データに比較して約 20 倍向上した高エネルギー分解能の分光観測を可能にする。XRISM のデータを用い、X 線領域(keV 質量スケール)のダークマター探査を進める。実験室系でのレーザー干渉計、KAGRA を用いたアクシオン探査についても、レーザー光の高出力化や光リング共振器の大型真空槽への導入、レーザー光の強度安定化や防振などを行い、感度向上を図り、探査を進める。電子陽電子加速器 Belle II の研究については、2023 年末から運転を再開する予定であり、その高いルミノシティのデータを用いたダークマター探査を進める。

ワークショップ、研究会なども通して、理論的研究、宇宙観測・地上実験、公募研究間の共同研究を引き続き促進し、データサイエンスおよび機械学習など新しい手法も取り入れた研究も展開していく。また、若手研究者(博士研究員、大学院生)にエキサイティングな研究テーマ、能力を発揮できる研究環境を提供し、若手研究者の育成を積極的に進める。

## 13 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。

これまで総括班戦略会議ミーティング、また電話会議を開催してきた。そのなかのミーティングの幾つかで、総括班評価者を招いて、各計画研究代表者が当該計画研究の進捗状況を報告し、議論する場を設けてきた。このミーティングにより、総括班評価者から研究・運営に関する有益な評価・助言を頂いてきた。評価担当の総括班メンバーは以下の4名の方である。

### 評価者の氏名・所属・職・専門分野（五十音順、敬称略）

伊藤 好孝（名古屋大学・教授・宇宙線物理学）

都丸 隆行（国立天文台・教授・重力波天文学）

久野 純治（名古屋大学・教授・素粒子理論）

藤田 裕（東京都立大学・教授・宇宙物理学）

### 【評価者よりのコメント】

本研究領域は、従来の WIMP 的ダークマターの枠組みにとらわれず、非常に軽い素粒子から天体規模まで、ダークマターの多様な可能性に挑戦することをコンセプトにしている。実際に CMB 偏光の複屈折の報告や CMB と HSC 間での宇宙論パラメータの不一致など、ダークマターの関与が疑われる重大な成果が得られており、新たなダークマター探索の潮流を確立したと言える。宇宙論、天文学、加速器実験、量子実験など全く異なる分野から多くの若い研究者が参加し、活発に交流することで新たなサイエンスを生み出すことに成功している。本研究領域はこのような基盤を作り上げた点でも高く評価出来る。以下、主な研究活動に対してコメントを記す。

### CMB の宇宙複屈折効果の観測

計画研究 B06 では、CMB 観測データを用いてアクシオンダークマターの探査を行い、大きな成果を挙げた。研究班は独自の手法を WMAP および Planck 衛星の CMB 偏光データに適用し、初めて統計的に有意なゼロでない複屈折角を示唆した。現在の有意性は  $3.6\sigma$  でまだ  $5\sigma$  には至っていないため、独立した観測、手法による検証が必要である。特に最先端の地上実験による検証が重要である。今後複屈折角がゼロでないことが確認できれば、ダークエネルギーや宇宙初期のインフレーションなど広範囲な基礎物理学に大きなインパクトを与える。本研究成果を高く評価すると共に、今後の着実な進展を期待したい。

### すばる HSC データによる宇宙論パラメータの不一致の確認

計画研究 B02 では、約3年間のすばる HSC 宇宙イメージング観測データから、宇宙構造による弱重力レンズ効果を精密に測定し、宇宙論パラメータを求めた。本測定では物理パラメータの中心値の正確性を得ることに注力し、かなり保守的な解析を行ったが、宇宙論パラメータである  $\Omega_m$  と  $S_8$  の値が CMB Planck データからの予測と  $2.5\sigma$  程度で不一致を示し、これまで報告されていた  $S_8$  不一致問題を新たに確認する結果となった。これは、 $\Lambda$ CDM モデルの綻びや新たな物理の存在を示唆しており、非常に重要な成果である。今後他の観測データや理論モデルと比較することで新たな展開を期待したい。

### 理論的研究の進展

計画研究 B06 の CMB 偏光の複屈折測定結果を受けて、理論的研究も活発に行われている。計画研究 A01 では、CMB 偏光の複屈折はアクシオン場の位相欠陥であるドメインウォールによって導かれることを示すとともに、複屈折をより統一的な描像として扱う議論がなされている。

アクシオン以外のダークマターの可能性についても多様な研究が進み、宇宙ひもによるダークマター生成と将来の多波長重力波観測での検証可能性 (A01)、量子重力の観点から軽いゲージボゾンの結合定

数の下限と大域的対称性の破れ (C01)、質量が TeV を超える重い素粒子に対する制限 (A02)、重いダークマターとしての原始ブラックホールおよび巨視的コンパクト天体 (A03)、宇宙の構造形成過程の定量的理解 (C02) などが進展しており、若手研究者を中心に非常に多くの論文が出されている。

これらの研究の進展は、理論班(A)、実験班(B)、究極班(C)各計画研究でそれぞれ独自にダークマター研究を進めつつも、本領域の枠組み内で効果的な連携が実現できている結果と言える。研究期間後半においても強い連携で本領域からさらに多くの成果が生まれることを期待したい。

### 実験的研究の進展

実験的研究では、多くの新しい技術的チャレンジがなされており、今後のダークマター研究に大きなブレークスルーを与える可能性がある。

大型プロジェクトをベースとしたダークマター探査として、重力波望遠鏡 KAGRA を用いた非常に軽いアクシオン場探査 (B01)、すばる望遠鏡での高視野多天体分光器 (PFS) 開発と観測 (B02)、すばる望遠鏡での高速 CMOS カメラ開発と高時間分解能天体イメージング (B03)、X 線撮像分光衛星 XRISM による探査 (B04)、SuperKEKB 加速器によるトリガー開発と探査 (B05) などが進行中である。いずれの計画も新しい観測装置を導入して未開のダークマター探査を実施しようとするものであり、順調にハードウェア開発が行われている点が評価できる。本領域研究の後半において、良い観測結果が得られる事を期待したい。また、ハッブル望遠鏡を用いたデータ解析で、今後 B03 計画で用いるような様々な変動天体が見つかっており、Nature 誌に 2 編の論文が掲載されるなど優れた成果も出ている。

全く新しい観測技術開発も活発に行われており、光リング共振器を用いたアクシオン探査 (B01) や最先端の TES カロリメータと MEMS 技術を融合させた太陽アクシオン探査 (B04) など順調に開発が進んでいる。これらの新しい技術は、ダークマター探査に留まらず、様々な基礎物理研究に応用可能となるため、我が国の技術力アップのためにも大いに期待したい。

### 連携体制および若手育成

本領域は、分野、プロジェクト、理論・実験の垣根を越えてダークマター研究に取り組む画期的な試みであり、それぞれの研究計画班を超えた有機的な連携が中間報告の段階にもかかわらず論文数約 250 編という卓越した成果に結びついている。特に、積極的なワークショップ・研究会の開催やグループ横断の国際プロジェクト、積極的人事交流により多くの派生研究が生まれている点は注目に値する。また、これらの研究・交流を通して若手人材の育成に成功しており、若手研究者が主導した査読論文は 70 編に及んでいる。CMB 観測による宇宙複屈折観測やすばる HSC による  $S_8$  不一致の確認など本研究領域で得られた卓越した成果も若手の活躍に寄るところが多い。結果として、日本物理学会学生優秀発表や東大理学系研究科奨励賞など計 10 件もの若手の受賞に繋がっており、多くの若手研究者が国内外の研究職にキャリアアップできている点も高く評価出来る。

### 今後の発展への期待

CMB の宇宙複屈折観測やすばる HSC による  $S_8$  不一致確認など、当初の予想を超えた極めて科学的重要性の高い結果が示唆されており、残りの研究期間で統計的有意性を示すことが今後の課題である。どちらも今後の研究方針が明確に示されており、成功の期待は大きい。現段階で準備段階にある PFS、KAGRA、XRISM、Belle II などのプロジェクトは 2023-2024 年に観測開始予定であり、また、レーザーアクシオン探査実験や TES による太陽アクシオン探査など先進的な検出技術開発も順調に進んでいる。これらのプロジェクトにより本領域研究終了までに新たなダークマターの兆候が観測されれば、本研究領域の狙い通りダークマターの広大なパラメータスペースを網羅する卓越した成果となる。

今後は計画研究だけでなく、公募研究からも次のブレークスルーとなる様な研究が生まれることを期待したい。また、若手の育成はすでに十分な成果を得ているが、残り期間でより一層若手の活躍が見られることを期待している。