

地上実験・飛翔体観測と理論による宇宙像研究の拠点形成

平成 26 年度～平成 30 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
研究成果報告書

令和 1 年 5 月

学校法人名 学校法人 立教学院
大学名 立教大学
研究組織名 先端科学計測研究センター
研究代表者 北本俊二
(立教大学大学院・理学研究科・教授)

はしがき

立教大学大学院理学研究科では、文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成 支援事業の選定を受け、先端科学計測研究センターが母体となって、2014 年度から 2018 年度の 5 年間にわたり、研究プロジェクト「地上実験・飛翔体観測と理論による宇宙像研究の拠点形成」を推進してきました。このたび、研究期間が終了したことを受け、本研究プロジェクトの研究成果を本冊子にまとめました。

本研究プロジェクトは、「天体现象と物質と空間の理解」を深めること、すなわち「宇宙像を解明」しようとするもので、具体的に次の3つの目的を掲げました。第1に「天体现象の解明」として、電荷交換反応をはじめとする宇宙プラズマ過程の明確化、第2に「物質の起源の解明」として、宇宙初期物質の性質と元素の起源の解明、第3に「空間構造の解明」として、ダークマターの観測的性質の解明と時空のミクロな構造の探索です。これらを、理論、地上実験、飛翔体観測の3つの方向から研究し、宇宙像の解明を目指し、同時に地上実験、飛翔体観測では、測定装置の開発も研究目的としてきました。

本研究プロジェクトの期間には、目的毎に多くの成果をあげることができました。また、理論、地上実験、飛翔体観測に携わる研究者が協働して研究を進めることにも、一定の成果が上がりました。そして、先端科学計測研究センターが宇宙像研究の拠点としての役割を果たし、今後も継続していくことができると考えます。研究成果の詳細については、本報告書をご覧ください。本研究プロジェクトに関しまして、ご意見・ご助言をお寄せいただけましたら幸いです。

最後に、本プロジェクト研究を遂行するにあたり、様々な形でご協力・ご支援いただいた立教大学の関連部署の皆様、外部評価をお願いした委員の皆様に深く感謝いたします。

令和1年5月

研究代表者 北本俊二

立教大学大学院・理学研究科・教授

目次

第 1 部:研究成果報告書の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第 2 部:研究成果報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63

第1部: 研究成果報告書の概要

平成 26 年度選定「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」

研究成果報告書概要

1 学校法人名 立教学院 2 大学名 立教大学

3 研究組織名 先端科学計測研究センター

4 プロジェクト所在地 東京都豊島区西池袋 3-34-1

5 研究プロジェクト名 地上実験・飛翔体観測と理論による宇宙像研究の拠点形成

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
北本 俊二	理学研究科	教授

8 プロジェクト参加研究者数 20 名

9 該当審査区分 理工・情報 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
【学内】			
平山 孝人	理学研究科・教授	(A-1)原子・分子・クラスター・低温固体表面の性質と宇宙での役割の研究 (B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応の研究	(A-1)地上実験と理論による、天体現象の解明 (B-1)飛翔体観測と理論による、天体現象の解明
中野 祐司	理学研究科・准教授	(A-1)原子・分子・クラスター・低温固体表面の性質と宇宙での役割の研究	
亀田 真吾	理学研究科・教授	(A-1)ダスト表面での物理と化学、多価イオンと中性原子・分子・固体表面との相互作用の解明 (B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明	
田口 真	理学研究科・教授	(B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明	

福原 哲哉	理学研究科・助教	(B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明	
栗田 和好	理学研究科・教授	(A-2)元素合成における中性子過剰核の役割(超新星等での r-process)と宇宙初期物質の起源の実験的、理論的研究による解明 (B-2)超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	(A-2)地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2)飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明 尚、内山は、(B-3)飛翔体観測と理論による、空間構造の解明も行う。
家城 和夫	理学研究科・教授	(A-2)元素合成における中性子過剰核の役割(超新星等での r-process)と宇宙初期物質の起源の実験的研究による解明	
梅野 泰宏	理学研究科・助教	(A-2)元素合成における中性子過剰核の役割(超新星等での r-process)と宇宙初期物質の起源の実験的研究による解明	
田中 秀和	理学研究科・教授	(A-2)宇宙初期物質の起源の理論的研究による解明	
内山 泰伸	理学研究科・教授	(A-2)元素合成における中性子過剰核の役割(超新星等での r-process)と宇宙初期物質の起源の実験的、理論的研究による解明 (B-2)超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	
一戸 悠人	理学研究科・助教	(B-2)超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	
村田 次郎	理学研究科・教授	(A-3)余剰次元の存在の実験的検証と、時空のミクロな構造の理論的研究 (B-3)ダークマター探索	(A-3)地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3)飛翔体観測と理論による、空間構造の解明 尚、北本は、(B-2)飛翔体観測と理論による。物質の起源の解明も行う。
原田 知広	理学研究科・教授	(B-3)ブラックホール近傍の物理の理論的研究による空間構造の解明	
小林 努	理学研究科・准教授	(B-3)ブラックホール近傍の物理の理論的研究による空間構造の解明	
中山 優	理学研究科・准教授	(A-3)時空のミクロな構造の理論的研究	
初田 泰之	理学研究科・助教	(A-3)時空のミクロな構造の理論的研究	
北本 俊二	理学研究科・教授	(A-3)余剰次元の存在の実験的検証 (B-3)ダークマター探索、ブラックホール近傍の物理の観測的研究による空間構造の解明	
【共同研究機構等】			
本林 透	理化学研究所・RIBF施設共用コーディネーター	(A-2)元素合成における中性子過剰核の役割(超新星等での r-process)と宇宙初期物質の起源の実験的研究による解明	(A-2)地上実験と理論による、物質の起源の解明
吉岡 和夫	先端科学計測研究センター・客員研究員／東京大学大学院理学研究科・助教	(B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明	(A-1)地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1)飛翔体観測と理論による、天体现象の解明
佐藤 浩介	先端科学計測研究センター・客員研究員	(B-2)超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	(A-2)地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2)飛翔体観測と理論による

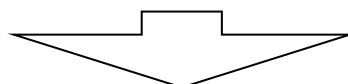
	／埼玉大学 理学部・准教授		る、物質の起源の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明
--	---------------	--	---

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(B-3)ブラックホール近傍の物理の理論的研究による空間構造の解明	理学研究科・准教授	原田 知広	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

(変更の時期：平成 27 年 4 月 1 日)



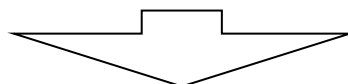
新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理学研究科・准教授	理学研究科・教授	原田 知広	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 27 年 4 月 1 日)



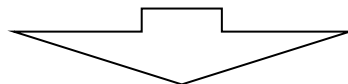
新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・助教	横山 修一郎	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 27 年 4 月 1 日)



新

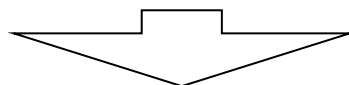
変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・助教	吉岡 和夫	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(B-1) 惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、	理学研究科・助教	吉岡 和夫	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明			る、天体现象の解明
-----------------------	--	--	-----------

(変更の時期：平成 27 年 9 月 30 日)



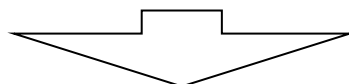
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理学研究科・助教	先端科学計測研究センター・客員研究員 / 東京大学大学院理学研究科・助教	吉岡 和夫	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-3) 時空のミクロな構造の理論的研究	理学研究科・助教	疋田 泰章	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

(変更の時期：平成 28 年 3 月 31 日)



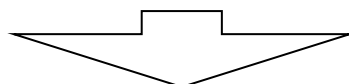
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 28 年 4 月 1 日)



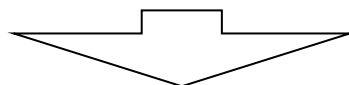
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・助教	福原 哲哉	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 28 年 4 月 1 日)



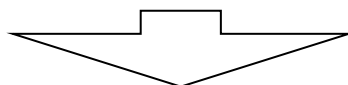
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・准教授	中山 優	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-2) 元素合成における中性子過剰核の役割（超新星等での r-process）と宇宙初期物質の起源の実験的、理論的研究による解明 (B-2) 超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	理学研究科・准教授	内山 泰伸	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

(変更の時期：平成 28 年 4 月 1 日)



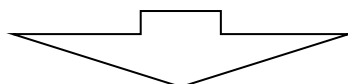
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理学研究科・准教授	理学研究科・教授	内山 泰伸	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-1) 原子・分子・クラスター・低温固体表面の性質と宇宙での役割、ダスト表面での物理と化学、多価イオンと中性原子・分子・固体表面との相互作用の解明	理学研究科・教授	小泉 哲夫	(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

(変更の時期：平成 29 年 3 月 31 日)



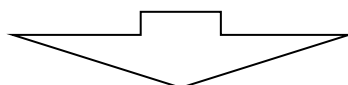
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-1) 原子・分子・クラスター・低温固体表面の性質と宇宙での役割の研究	理学研究科・助教	立花 隆行	(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

(変更の時期：平成 29 年 3 月 31 日)



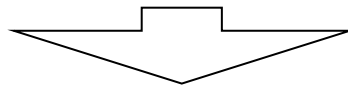
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-2) 元素合成における中性子過剰核の役割（超新星等での r-process）と宇宙初期物質の起源の実験的研究による解明	理学研究科・助教	榎園 昭智	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

(変更の時期：平成 29 年 3 月 31 日)



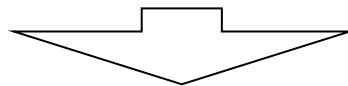
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 29 年 4 月 1 日)



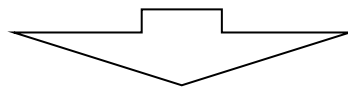
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・准教授	中野 祐司	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 29 年 4 月 1 日)



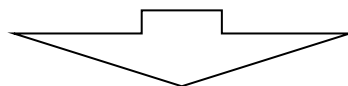
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・助教	初田 泰之	(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 29 年 4 月 1 日)



新

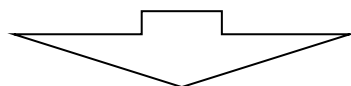
変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

	理学研究科・助教	梅野 泰宏	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明
--	----------	-------	---

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 29 年 4 月 1 日)



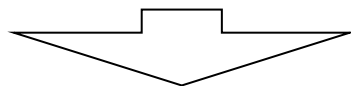
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	理学研究科・助教	植田 寛和	(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(B-2) 超新星とその残骸の元素組成の観測的研究による解明	理学研究科・助教	星野晶夫	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

(変更の時期：平成 29 年 9 月 30 日)



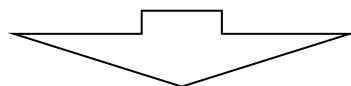
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期：平成 29 年 11 月 1 日)



新

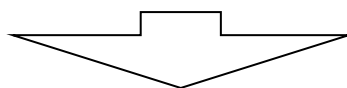
変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
	先端科学計測研究センター・客員研究員 / 埼玉大学 理学部・准教授	佐藤 浩介	(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明 (B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明 (B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

--	--	--	--

(変更の時期：平成 30 年 4 月 1 日)



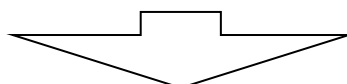
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
首都大学東京学振 PD 特別 研究員	立教大学理学部・助教	一戸悠人	(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
(A-1)ダスト表面での物理と化学、多価イオンと中性原子・分子・固体表面との相互作用の解明 (B-1)惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面での観測的研究から電荷交換反応、光電離、光脱離、スパッタリングの役割の解明	理学研究科・准教授	亀田 真吾	(A-1)地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1)飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

(変更の時期：平成 30 年 4 月 1 日)



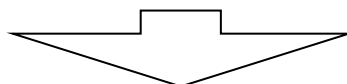
新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理学研究科・准教授	理学研究科・教授	亀田 真吾	(A-1)地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1)飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
B-3) ブラックホール近傍の物理現象の理論的研究による空間構造の解明	理学研究科・助教	横山 修一郎	(A3)地上実験と理論による、空間構造の解明 (B3)飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

(変更の時期：平成 30 年 7 月 31 日)



新

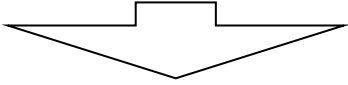
--	--	--	--

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
A-1) 原子・分子・クラスター・低温固体表面の性質と宇宙での役割の研究	理学研究科・助教	植田 寛和	(A-1)地上実験と理論による、天体现象の解明 (B-1)飛翔体観測と理論による

			る、天体現象の解明
--	--	--	-----------

(変更の時期：平成 30 年 11 月 30 日)



新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1)研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

この研究は、人類にとって基本的な設問である「天体现象と物質と空間の理解」を深めることである。空間に存在する物質が繰り広げる現象とは、宇宙そのものであり、本研究は「宇宙像を解明」しようとする研究である。具体的に次の3つの目的を掲げる。第1に「天体现象の解明」として、電荷交換反応をはじめとする宇宙プラズマ過程の明確化、第2に「物質の起源の解明」として、宇宙初期物質の性質と元素の起源の解明、第3に「空間構造の解明」として、ダークマターの観測的性質の解明と時空のミクロな構造の探索である。これらを、理論、地上実験、飛翔体観測の3つの方向から研究し、最終的には、空間の中で物質がどう生まれ、どう振る舞うかを解き明かす第1歩とする。

たとえば、惑星大気・プラズマや固体惑星・ダスト表面は太陽紫外線や太陽風プラズマにさらされている。この現象を固体表面に多価イオンや紫外線を照射する地上実験と比較して、惑星で生じている物理過程を解明していく。また、本プロジェクトの実施期間中にも、飛翔体観測により、超新星残骸から多くの中・重元素が新たに検出されていく一方で、地上実験で不安定核の衝突断面積の測定も進む。これらの結果の融合から、星内部や超新星爆発時等での元素合成の研究を進める事ができる。さらに、飛翔体観測から分かるダークマターの分布の測定と、地上実験での余剰次元探索やダークマター探索も計画している。同時に、地上実験、飛翔体観測で、測定装置の開発も計画している。

この学問領域は、立教大学理学研究科物理学専攻が伝統的に研究を深めてきた領域であり、同研究科に付属する先端科学計測研究センターには人材が豊富で、これまでも多くの実績をあげてきた。また、同センターによる私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」(平成21~25年度)の成果を基礎として、より明確な科学的目標を定めて「天体现象と物質と空間の解明」に迫り、飛翔体観測、理論、地上実験をより有機的に連結することにより初めて導出される新しい成果を創生する研究拠点として、同センターを発展させる。

(2)研究組織

本プロジェクトに研究代表者が中心となる統括チームを置く。統括チームは、先端科学計測研究センターの運営委員が兼ねる。また、研究内容に応じた研究チームを編成する。研究チームは「地上実験と理論」、「飛翔体観測と理論」という軸でAとB、「天体现象の解明」「物質の起源の解明」「空間構造の解明」の3つの目標に応じて1、2、3という2次元の構造として、A-1、A-2、A-3、B-1、B-2、B-3の6チームを編成する。各チームは連携し、学術的研究を進めるとともに光・粒子線検出器を協力しながら開発する。各チームにはチームリーダーをおき、それぞれのチームの進捗状況をリーダーが統括チームに定期的に報告する。また、メンバー全員による検討会を定期的に行うことで、研究の進捗状況を共有し、それを受け、統括チームは研究の進め方を決定する。また、若手の育成を兼ねて、3名のPDを雇用し、1、2、3の各チームに配置する。さらに、関連分野の有識者に外部評価委員を依頼し、2年目および4年目に評価・コメントを頂き、それらを反映したうえで研究を推進する。

(3)研究施設・設備等

本プロジェクトは、既存の研究設備に加え、研究遂行上必須の研究設備として以下の機器を導入した。

26年度購入	2次元イオン検出器	使用者数	4名	利用時間	15h/week
26年度購入	イオン照射装置	使用者数	6名	利用時間	15h/week

26年度購入	冷凍機（予冷＋希釈冷凍機）	使用者数	3名	利用時間	8h/week
26年度購入	X線波面センサー	使用者数	3名	利用時間	12h/week
27年度購入	固体表面実験用ビームライン	使用者数	4名	利用時間	15h/week
27年度購入	ファブリーペロー干渉計	使用者数	3名	利用時間	1h/week
26年度購入	余剰次元探索装置（1）	使用者数	7名	利用時間	4000h/3years
27年度購入	余剰次元探索装置（2）	使用者数	6名	利用時間	3000h/2years
28年度購入	余剰次元探索装置（3）	使用者数	5名	利用時間	2000h/10monthes

を導入した。これらの装置は、それぞれ担当者が管理し、プロジェクト研究員の利用に供するとともに大学院学生にも開放している。

(4) 研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び*を付すこと。

全体的に、ほぼ計画通り各チームの研究が遂行、公表され、固体表面現象と惑星表面現象の情報交換、ダークマターの理論と観測や実験結果の情報交換も進み、それぞれの相互議論も開始されている。また、実験技術においても、地上実験で開発された工夫が、飛翔体観測技術へ応用する試みがスタートするなど、宇宙像の解明に向けた拠点形成という目的に合致した成果が上がった。詳細は以下の通りである。

(A-1) 地上実験と理論による、天体现象の解明

希ガス固体に低エネルギー多価イオンを入射し、多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる脱離イオンの観測を行った。新しい絶対値測定方法を開発することにより、精度の高い絶対脱離収率の測定に成功し、ポテンシャルエネルギーによる脱離の寄与が明確に示された。この実験結果は既存の脱離モデルでは説明することができず、中性原子の脱離に伴ってイオンが脱離するという新しいモデルを提唱し、そのモデルを使うことによって我々の実験結果を再現することに成功した[340, 347, 392, 435]。多価イオン・固体表面相互作用のより詳細な情報を得るために、反射イオン・脱離イオン同時計測システムを構築し、入射イオンのポテンシャルエネルギーの移行量と脱離イオン種の相関を明らかにした [341, 463, 475, 508, 509, 539, 540, 565, 577, 579, 601, 606]。固体表面からのイオンの脱離機構の解明を目的として、陽電子入射によるイオン脱離過程の観測を行った。本研究においてTiO₂表面に入射した陽電子が酸素原子の特定の軌道と対消滅することが発見された[1, 47, 95, 356, 362, 373, 391-393, 440, 441, 461, 462, 476, 他2, 9]。真空紫外光励起による凝縮性固体標的実験において、混合希ガス固体における脱離過程を明らかにした [94, 161, 348, 363, 372, 430]。また、宇宙空間における氷星間塵表面での分子進化過程の解明を目的として、低温面に凝縮したH₂O (D₂O), CO吸着層における光化学反応による生成物の観測を行った [578]。

我々のグループで開発した超高真空対応型電子ビーム源 [162, 439, 501] を用いて、希ガス固体を標的とした電子衝撃脱離実験を行った。励起原子の脱離収率の入射電子エネルギー依存性を詳細に測定することにより、Ne 固体内で一時的な負イオン共鳴状態が生成し、その過程が励起原子の脱離に大きな寄与をすることを発見した[394, 419, 435, 541, 542]。特に、希ガス固体表面から負イオンが脱離していることを強く示唆する実験結果を得ており、宇宙空間における極低温環境での電子のエネルギー消費についての基礎的知見を与えることが期待される。

多価イオンの原子過程では電荷移行反応断面積の絶対値測定を目指した。太陽風の中に存在するC, N, O原子の多価イオンの関与する反応を測定するため、2~5keVのO⁵⁺とArの間の1電子および2電子移行に関する断面積を測定し、理論的にも矛盾のない結果を得た。

低エネルギーイオン-分子反応の研究では比較的大きな分子の移動度を測定している。比較的大きな分子イオンでは、点電荷と近似できず分子のサイズを考慮しなければならないことがわかった[46]。イオンの大きさを系統的に変えて、イオンの大きさと移動度の関係を明らかにした [94, 166]。またイオンの構造異性体で移動度の違いが出ることを明確にした[240, 376, 386]。これはイオン移動度質量分析法の基礎過程として重要である。また、これら計測のために、高感度化を目的に MCP 入射口にテーパーをつけて開口率 100%の T-MCP を開発、性能測定し、テーパー部に MgO をコートした CT-MCP では、10keV 程度の入射エネルギーで検出効率が 100% になることが明らかとなった[2, 374, 375, 465, 509]。

星間空間における低エネルギーイオン分子反応に関して、合流ビーム法による衝突実験を行うために高速分子イオンビームの生成を行った。プラズマ型イオン源に試料ガスを導入し、アーク電流値等を調整することにより、試料分子を壊さずにイオン化してエネルギー10keV 程度のビームとして引き出すことに成功した。同じく合流ビーム実験のための中性ビーム生成に取り組み、大強度半導体レーザーによる炭素負イオンビームの中性化を観測した。また中性化効率向上のため光増幅キャビティを製作した [545]。深紫外光による星間分子の異性化ダイナミクスを探究するために、イオンモビリティ分析装置の開発を行った。既存の装置を改良して光照射実験用にセットアップし、電子衝撃による試料ガスのイオン化および質量分析が可能になった [587, 588]。

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) 加速器施設では核子あたり 345 MeV まで加速されたウランに至る各種のイオンを入射核破砕または飛行核分裂を用いて安定線から遠く離れた原子核を生成し、それらを分析、分離することにより二次ビームを供給する。我々は、ドリップライン近傍の不安定な原子核である中性子過剰核の構造解明として、本グループ等により開発した NaI (Tl) 複合検出器である DALI2 を用いた実験で ^{30}Ne , ^{36}Mg および ^{132}Sn の論文を発表した [13, 58]。DALI2 の NaI (Tl) 検出器の増強も計画通り行われて、実験精度を上げたデータ収集が可能となった。中性子過剰核の構造解明のためのクーロン励起実験および中重核領域の新同位元素探索実験を継続してそれぞれ結果を論文として公表した[98, 99, 103, 106]。クーロン励起実験では測定可能な偶偶核の 2+励起状態をすべて決定するという野心的な計画をフランスのサクレー研究所との共同実験で開始した。世界では、陽子過剰な錫同位体である ^{100}Sn の構造決定を目標に様々な研究が進行中である。その中で我々の ^{104}Sn に関する 2つの論文[4, 59]は、 ^{100}Sn へ向かって核構造がどのように変化してゆくかについて、重要な情報を与えている[54]。中性子魔法数 20, 28, 50, 82 を含む領域の研究が大きく進展した。新しい魔法数の確立、新しい変形核領域の発見がこの5年でのハイライトである。また r-過程経由核の領域までは 28, 50 の中性子魔法数が健在であることがわかってきた。また、中性子捕獲反応に強く影響を与えると考えられているピグミー双極子共鳴 (PDR) を $^{50,52}\text{Ca}$ の光応答で探る実験を行い、その結論を考察中である [580, 581]。

中性子検出器の開発としては位置検出改善のために6角形のシンチレータに WLSbar を貼り付けて使用し、MPPC 読み出しによる試作器を完成させた。さらに WLSbar の8面読み出しに改善して性能評価を行った。実験結果とシミュレーションを比較することによって位置精度を上げる努力を続けている。また、新たな γ 線検出用シンチレータとして GAGG (Ce) のテストを行い、波形を用いて入射中性子と γ 線の弁別が可能であることを発見した[607]。これにより、今まで問題であった中性子バックグラウンドが低減可能となった。

イオン照射装置は検出器開発のために少量のビームでもその位置や広がりモニターする必要がある。ビーム電流を MCP で増幅するモニターで $10^5/s$ 程度でも判別可能であることが分かった[378, 396, 420, 442]。また、SCRIT 実験では不安定核電子散乱実験のセットアップのチェーンテストを ^{132}Xe を用いて行い、初めての物理結果を発表するとともに、不安定核実験が可能であることを証明することができた[176, 他 9]。また、最大の課題であったイオン蓄積後にパルスビームとして取り出すバッファリングの技術開発が大きく進展し、真の不安定核実験の準備が完全に整った[250]。

物質の起源を探る理論的側面からはクォーク、グルオンの系を理解する試みを進めた。まず、地上実験に関しては、ハドロン散乱におけるハドロン内部のクォーク・グルーオンのとる 3 次元運動量分布を量子色力学の高次効果を含めて評価した[60]。また、非平衡系の非摂動効果を評価する方法の一つとして、実時間法における再帰的方程式がある。実時間法はミンコフスキー時空で定式化されており、直接再帰的方程式を解く方法について検討を行った。そして、ミンコフスキー空間における質量関数の非摂動計算を強結合量子電磁力学の場合に行った。虚数部も含めた計算を行った結果、有効質量の不安定性なども評価できるようになった。結果は、この分野では権威のある学術雑誌 PTEP に掲載された [251]。

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

重力の法則の距離依存性が空間次元に敏感である事を利用し、三次元空間という認識の根拠となっている万有引力の法則の実験検証を、実験的に未開拓でかつ、理論的に余剰次元の存在可能性が強く示唆されているミクロンスケールにて推進する事を目標として推進した[16, 18, 19, 他 17]。本研究の準備研究として、センチメートルから一連の重力検証装置を用いて万有引力の法則の検証を進めてきた[20, 21, 25, 29, 30, 65, 他 4, 他 15, 他 16]。本研究では、ミクロンスケールでの検証を進めることとした。ミクロンスケールでは、新たにワイヤーカンチレバーとデジタル顕微鏡を組み合わせた計測原理を一から開発した。ワイヤーカンチレバーの熱雑音や弾性変形に関する基礎研究の後に、具体的に万有引力の法則の検証を行うため、余剰次元探索装置 1, 2, 3 を導入し、試験することで Newton-V 号の開発と建設を行い、初期段階の物理実験を行った。結果として最近接距離が本研究開始前の Newton-IVh 号における 3mm[183]から、本研究での最近接距離が 83 ミクロンに達した[598, 604]。これはミクロン距離での余剰次元の探索を成功裏に開始した事を示す象徴的な成果である。

理論的側面の研究としては、時空のミクロな構造を調べるために超弦理論の研究を行った。超弦理論の高エネルギー極限では、高いスピンのゲージ対称性が現れることが期待されていた。ゲージ/重力対応に関するこれまでの研究を拡張することで、具体的に超弦理論がどのような高いスピンのゲージ理論で記述できるのか明らかにした。高いスピンのゲージ対称性を破ることでゲージ場が質量を持つようになるが、3 次元の場合に質量を一般のスピンの場に対して求めた[66]。この結果について超弦理論の立場からどこまで何が言えるのか検証した。さらに、これまで開発した解析手法を、より現実に近い 4 次元の高いスピンのゲージ理論に応用した [117]。最も基本的と思われる例において、対称性の破れにしたがって生じる質量をこれまでとは異なる手法で再現した。この解析によって、対称性の破れに関する理解を深める研究成果をあげることができた。ブラックホールの質量スペクトルの研究は、ダークマター候補のブラックホールの性質研究として (B-3) と共同して進めている。

理論と実験両方にまたがる研究として、余剰次元の物理が素粒子スケールから天体スケールにわたるまでどの様に検証されているかを統一的に理解する枠組みを構築する事に成功した。

その結果、LHC と mm 距離の実験が直接比較可能となり、むしろ LHC よりも実験室実験が精度を上げている事を示す事に成功した[65]。さらに、研究期間中に重力波が検出されたことを受け、余剰次元に対する重力波のデータによる制限について解析を行い、国際会議の招待講演にて発表した[604]。

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

極域成層圏からの惑星観測を目指した極周回成層圏テレスコープ(FUJIN-2)のフライトモデルの製作及び試験を進めた。各サブシステムの設計、試作製作、試験を行い、気球実験の準備は着実に進んでいる[119, 195, 344, 360, 361, 364, 370, 408, 456, 524, 589, 595]。しかし、気球実験のための資金調達は芳しくない。打開のため FUJIN-2 の科学目的を見直し、金星紫外スペクトル観測のために地上予備実験を始めた。一方で、金星大気の研究に関しては、金星探査機「あかつき」から送信されるデータを使った研究が進展している。中間赤外カメラ、紫外イメージャによる撮像観測、電波掩蔽観測、地上観測のデータ解析及び計算機シミュレーションによる複数の研究が同時進行しており、多くの研究成果が発表された [31, 118, 120, 194, 196-198, 264, 405, 421, 425, 426, 436, 450, 451, 457-459, 488, 489, 491-494, 502-504, 521-523, 529, 553, 554, 557, 558, 590-594, 他 6, 他 12]。

惑星水素コロナの温度分布と D/H 比を測定する水素重水素吸収セルを開発した。2016 年 7 月及び 2018 年 6 月にフランス・パリ近郊の SOLEIL 放射光施設で水素吸収セルの吸収プロファイル測定実験を行った。実験結果からフィラメント形状、封入水素ガス密度、フィラメント電力、光路長を最適化した。また吸収の位置依存性から水素原子の空間分布を推定した[265, 460, 466, 513, 536, 556, 585, 602]。2018 年 11 月には封じ切りセルを試作し、分子科学研究所 UVSOR において吸収性能を評価した。フィラメントの耐久性が残された課題である。米国 SIHLA ミッションに水素吸収セルの搭載を提案している。

月惑星着陸探査においてその場放射年代測定を実現するために、レーザー誘起絶縁破壊分光(LIBS)でカリウムの量を測定し、質量分析計でアルゴンの量を測定する手法の技術開発を進めた。まず実験室レベルでの技術実証を完了し、引き続いて装置の小型化など、リソース制約の厳しい着陸探査に必要な技術開発を進めた[121, 122, 200, 他 7]。2016 年 11 月には伊豆大島裏砂漠においてフィールド実験を行い、小型ローバに搭載できる~20kg の観測装置によって年代測定を行えることが実証できた。並行して、採取試料を設置する真空槽の開発を進めた。特に真空封止部が主要な開発項目となり、本研究では、近年になって開発された低温耐性のあるフッ素ゴムを使い、差動排気によって十分な真空度を得られることが確認された。

超小型深宇宙探査機 PROCYON に搭載される紫外撮像装置 LAICA を開発し、ジオコロナ及び彗星の撮像に成功した[202, 345, 369, 382, 406, 559, 561, 他 3, 他 14]。大学がプレスリリース[他 10]を行った結果、大きな反響があった。LAICA を使用して彗星のコマを観測した[199, 414, 他 11, 他 13]。系外惑星大気観測用のための基礎実験として、ファブリーペロー干渉計を導入し、可視光を用いた干渉実験による性能確認試験を実施した。真空紫外光での性能を確認するためにピエゾアクチュエータの調整を進めた。ファブリーペロー干渉計の鏡面精度を確認し、十分な精度が得られていることを確認した。

ロシアの 1.7m 紫外望遠鏡(WSO-UV)を用いて紫外線トランジット法で地球に似た水や酸素を持つ系外惑星の検出を計画している[266, 267, 566, 583, 584]。赤色矮星の紫外線スペクトルを推定して組み込んだモデルを開発し、酸素コロナを持つ地球型惑星のトランジット観測をシミュレーションした。ロシアチームと共同で 1.7m 紫外望遠鏡システムに追加する観測装置を考

案した[268]。

極低温環境下の星間塵表面での水分子生成過程を解明するために、レーザープラズマ光源を用いて、低温表面に凝縮したアモルファス氷上での光化学反応の観測実験を開始した。水分子の吸着によって生成した氷薄膜の厚さを昇温脱離法を用いて測定した[582]。

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

将来の高エネルギー分解能 X 線観測を目指した極低温 X 線検出器の開発している。2016 年に打ち上げられた「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」に搭載した極低温 X 線検出器の開発、試験に携わった。その軌道上での分光性能を確認した[125, 126, 127, 128]。さらに、LMC 内の超新星残骸 N132D から、LMC の星間ガスに比べて、およそ 800km/s で後退するガスからの鉄輝線を検出した。これは、超新星放出物の非等方性を意味している。一方、硫黄輝線は LMC 星間ガスとの速度差はみられなかった[277]。また、これまでシンクロトン放射しか検出されておらず、ほとんど放出物が観測されていない、超新星残骸 Crab Nebula で熱プラズマからの放射成分を探した。「ひとみ衛星」により、X 線熱放射プラズマの質量に、半径や温度等広い範囲での仮定をおこなってもこれまで以上に強い 1 太陽質量以下という強い制限を与えた[279]。

一方で、「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」は 2016 年 3 月 26 日に深刻なトラブルにより消失してしまったため、超新星残骸の観測データを解析し、各種元素組成比を解析研究する方針の変更を余儀なくされてしまった。そこで、米国のチャンドラ衛星や NuSTAR 衛星による超新星残骸の観測データの解析を行うことで、当初の研究を進めている[346, 407, 445]。チャンドラ衛星による超新星残骸カシオペア座 A の観測データ解析を進め、特に超新星爆発のメカニズムそして爆発的要素合成を観測的に研究する上で興味深いカシオペア座 A のジェット部の解析から、放射性でない安定なチタンからの X 線輝線放射を発見した。そしてチタンの生成量を推定するためにプラズマモデルによる不定性を評価した[411, 429]。現在は、これらの成果を国際査読誌への投稿論文としてまとめているところである。また、このチームでは大マゼラン銀河の超新星残骸 N157B のフェルミ衛星によるガンマ線観測を進めている。超新星残骸 N157B のパルサー星雲は、ガンマ線スペクトルに今までに知られていないような成分を持ち、非常に効率の良い電子加速が働いていることがわかった。この天体のガンマ線観測は中性子星の慣性モーメントを制限する新しい手法となることがわかった。さらに、ガンマ線放射が卓越している 2 つの超新星残骸についての研究を進めている。そのうちの一方である超新星残骸 RX J1713.7-3946 の X 線観測と力学的進化についての論文が国際査読誌に受理された[82, 151, 412, 433]。超新星残骸 RX J1713.7-3946 の NuSTAR 衛星による硬 X 線観測をはじめて行った[151, 433]。

超伝導遷移端 (TES) 型 X 線マイクロカロリメータの抵抗温度特性の評価を行った。磁気シールドに囲まれた環境に TES 素子 SII-209H を置き、3K に設置した SQUID 読み出し回路に素子を接続した。断熱消磁冷却前後の温度変化時の SQUID の出力電圧の変化を測定し超伝導遷移温度 240-280mK という結果を得た。また、断熱消磁冷凍機の性能測定を行なった。最低到達温度は 133mK で 200mK 以下の保持時間は約 30 分、リサイクル時間も約 30 分という性能を確認した[480]。さらに、ヒートスイッチの改造、磁性体の改造にも注力し、GdLiF₄ 焼成実験を繰り返した。その結果、振動ミル粉碎を注意深く行うことにより、高密度(4.72g/cm³)で均質な焼成体の施策に成功した。これにより、より冷却性能の良い磁性体として機能することが期待できる。

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

宇宙ダークマターの新しい観測手法として、銀河団ガスの輝線放射の重力赤方偏移を検出し、新たなダークマターの存在の証拠取得のために計算機シミュレーションを行ってきた。そして、「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」に搭載する軟 X 線スペクトロメーター (SXS) での銀河団観測での観測可能性を検討してきた。その結果、銀河団の中心あたりと周辺部では重力赤方偏移の量がドップラーシフトにして 10km/s 程度存在するはずであることを示した [349]。「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」は 2016 年度 2 月に打ち上げられ [274, 275, 284]、ペルセウス銀河を観測した。観測結果を信頼性ある解析をするため、スペア窓の X 線透過率を測定し、予想外の Be の結晶構造に起因する、X 線透過率のエネルギー軸での不連続性を発見した [204, 205]。その結果、銀河団ガスからの輝線の精密観測に人類史上初めて成功した。結果は、銀河団での乱流等による輝線幅の増加も予想外に小さく [123]、見積もった重力赤方偏移の量は「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」に搭載した軟 X 線スペクトロメーター (SXS) での観測精度範囲であることがわかった。観測により、銀河団での乱流、あるいはガスのバルクな流れの定量化を行い、重力赤方偏移はガスの速度場計測に対する系統的な誤差として扱い公表した [283]。またダークマター消滅輝線として、3.5 keV の輝線検出の報告があり、その結果から、ダークマターの寿命が推定されていた。「ひとみ」衛星によるペルセウス座銀河団のデータからも 3.5 keV の輝線の上限を与えることができた。その結果は以前の報告を否定する小さな上限値を与えることができた [211]。そのほか、「ひとみ衛星」で取得したデータでの結果を公表した [207, 270, 273, 276-282, 337]。さらなる重力赤方偏移の観測は「ひとみ衛星」の観測中止により不可能になったが、SXS とほぼ同じマイクロカロリメーターを搭載する XRISM 衛星が承認され、2021 年度打ち上げに向けて、準備を始めた [285]。

高精度 X 線干渉系 [568] と補償光学を適用した直入者型 X 線望遠鏡の開発を進めている。X 線望遠鏡の開発では、補償光学としての動作確認ができ可視光でのほぼ回折限界である約 2 秒角の分解能を達成している [567, 569]。(A-1) のチームと共同で使用しているレーザープラズマ光源を使用し 13.5nm の EUV による撮像、補償光学の実証試験も行なった。その結果、0.24~0.43 秒角の分解能が達成できた。この分解能は、現存する X 線望遠鏡では最高の分解能である。より精度の高い測定のために、ピンホールサイズを小さくしたり、撮像 CCD のピクセルを小さくすることが必要であることがわかった。結果の公表は今後準備する。なお、天体観測への応用の考察は [34] で議論している。X 線干渉計として、天体観測用に考案したマイケルソン型の望遠鏡を実証するために、マッハツェンダー型の X 線干渉計の実現に向けて実験を進め、可視光であるが、鮮明度を測定することで、天体を模擬したピンホールサイズを測定できることを示した。飛翔体観測によるブラックホール近傍の観測として、白鳥座 X-1 の降着円盤で、高温コロナが外縁近くまで続いている事を明らかにした [124]。白鳥座 X-1 の high/soft 状態での X 線強度変化の原因を明らかにした [209]。さらに、中性子星の周りでの強い重力と磁場中での降着流の研究も進んだ。中性子星の自転に伴う鉄輝線の強度の変動から、降着流に付随する鉄輝線放射領域や、強度変動の原因を明らかにした [208, 210, 271]。そして、降着流の形状が幾何学的に非常に薄いカーテン状の構造であることを結論着けた [570]。また中性子星の半径と磁場の関係も、降着駆動型 X 線パルサーを使い、降着物質と自転速度の変化率から見積もり、約 2Mo の質量を推定した [272]。

ダークマター模型あるいはその代替模型として、スカラー場を用いた模型が広く考えられている。このようなスカラー場の諸側面を研究した。スカラー・テンソル理論による新しい宇宙創生シナリオの研究 [85, 86, 157] と、その種の模型に一般的に不安定性が存在することの証明

[159]をおこなった。また、そのようなスカラー場による原始重力波の生成可能性や観測からの制限[69, 296]も議論した[366, 387, 401, 413, 452]。その他、スカラー場を伴うブラックホールの安定性解析[153, 154, 155]、スカラー場の遮蔽機構の研究[84, 379]などもおこなった。超対称性理論に基づいた具体的な暗黒物質生成モデルに着目し、現在の宇宙論的観測からモデルへの制限を得た[36, 37, 438]。また暗黒物質密度の空間的な揺らぎは銀河・銀河団といった宇宙大規模構造の形成過程にとっても重要である。暗黒物質密度揺らぎの進化に注目し将来の宇宙論的観測で期待される初期宇宙モデルへの制限 [70, 76, 137, 139]や、高赤方偏移宇宙における中性水素 21cm 線の空間分布に関する統計量の計算[70, 136]を行なった。暗黒物質候補である原始ブラックホールに関する研究も行なった[72, 138]。特に 2015 年に検出された重力波源が原始ブラックホールである可能性に関する研究[138]はプレスリリースされた。ダークマターの候補天体として原始ブラックホールの生成条件と生成率に関する基礎理論の研究を行った[89, 90, 133, 135, 290, 291, 389, 416, 423, 449, 454]。原始ブラックホールに迫るためには当然ながらブラックホールの性質を知ることが必要である。そこでブラックホールの諸性質に関する研究を行った[44, 130, 131, 160, 288, 289, 365, 384, 422, 434]。また観測的にブラックホールと区別が付きにくい天体としてワームホールなどが挙げられており、その観測的性質及び安定性に関する研究を行った[45, 91, 92, 93, 129, 130, 134, 212, 286, 415]。

また原始ブラックホールの形成モデルの構築のため FLRW 時空の共形構造を調べた[287]。さらに、ブラックホールとほぼ同じ半径をもつ極めてコンパクトな星ができるときの粒子生成を調べた[339]。

ある種のダークマターモデルに触発された一般的な縮退重力理論を構築し、そのハミルトニアン解析等をおこなった[239]。重力波イベント GW170817 により一般相対論の拡張理論が強く制限されたあとに生き残った理論で、相対論的天体の数値解を作り、強重力場環境下で理論の検証が可能であることを指摘した[333]。また、GW170817 から重力セクターのパリティの破れに対し制限を与えた[335]。

<優れた成果が上がった点>

(A-1) 電子・光・イオンという 3 種類の量子ビームをプローブとして、同じ標的（凝縮性固体）との相互作用を明らかにすることに成功した。低エネルギー粒子検出に一般的に用いられている Microchannel Plate (MCP) において 100%の検出効率を達成した。

(A-2) 中性子数 20 以上のマグネシウム同位体周辺に大きく変形した原子核の領域が広がっていることを発見した。⁵²Ca が二重魔法核であることを確認した。

(A-3) 余剰次元探索装置 1, 2, 3 を導入し、試験することで Newton-V 号の開発と建設を行い、最近接距離が本研究開始前の Newton-IVh 号における 3mm から、本研究での最近接距離が 83 ミクロンに達した。すなわち、ミクロン距離での余剰次元の探索を可能にした。

(B-1) 超小型深宇宙探査機に搭載された LAICA はこれまで知られていたよりも遙か遠くまで広がるジオコロナを捉えた。予想に反してジオコロナは地球公転面に対して対称な形状をしていることがわかった。金星探査機「あかつき」搭載中間赤外カメラは金星雲頂に現れる巨大な弓状定在温度擾乱を発見した。これは低緯度の高地で発生した山岳波と呼ばれる波動が雲層上端まで達して温度変動を引き起こすことで出現することを突き止めた。

(B-2) ADR 開発で、100mK 以下を達成し、世界の最高水準に迫りつくことができた。

(B-3) 「ひとみ衛星」の高エネルギー分解能 X 線検出器の観測により、ダークマターの崩壊と解釈されている 3.5keV 輝線の上限值を先行研究の報告以下に抑えた。EUV での補償光学を使った

試作望遠鏡で、米国チャンドラ衛星の性能を超える世界最高レベルの分解能を達成した。GW170817/GRB 170817A の同時観測により重力理論に対し非常に強い制限がついたが、それでもなお生き残った一般相対論の拡張理論が、2014 年に提唱した「スクリーニング機構の部分的破れ」という性質を普遍的にもつ理論であることが判明し、当該研究の先駆性が際立った。ダークマターの有力候補である原始ブラックホールの生成率を新しい物理的な議論に基づいて精密に評価することに成功した。

<課題となった点>

(A-2) 現在の測定装置で研究できる不安定原子核は、ほぼ尽くしたため、今後はより精度の高い装置の導入が必要である。

(B-1) FUJIN の実現には数億円の気球実験経費が必要で、科学研究費補助金及び JAXA 競争的資金の獲得を目指している。吸収セル開発は大詰めを迎えているが、フィラメント耐久性が課題である。太いフィラメントを使えば解決するが、フィラメント電力が増加する。それらの最適化にさらなる実験が必要である。

B-2, B-3) 「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」の消失により、超新星残骸の観測からの元素組成比の研究、及び、複数の銀河団から統計的手法あるいは、特別な銀河団における、ダークマターの検証等が不可能になった。できなくなった研究を可能とするため、「ひとみ衛星 (ASTRO-H)」の後継としての「XRISM」衛星の開発をスタートしている。

<自己評価の実施結果と対応状況>

毎年の研究報告会で自己評価を行い、進捗状況の確認を行なっている。特に、3 年目 (2016 年) には各班から自己評価報告書を関係者内の web ページで回覧した。また、5 年目 (2018 年) の研究報告会では、各班からの自己評価の報告も行った。3 年目の自己評価での、進捗に関連する課題 (「ひとみ」衛星の消失等) が報告され、その後の研究方向を確認した。また、装置開発での協働の進展が少ないことが浮き彫りになり、2017 年 11 月 11 日には「先端科学計測技術ワークショップ」として、チームを超えた計測技術の紹介と意見交換をおこなった。

<外部 (第三者) 評価の実施結果と対応状況>

井上一氏 (明星大学・理工学部総合理工学科・教授)、上野 秀樹 氏 (理化学研究所・主任研究員)、河内 宣之 氏 (東京工業大学・理学院化学系・教授) に外部評価委員を依頼した。2015 年度の研究報告会 (2016 年 2 月 27 日) と 2017 年度の研究報告会 (2018 年 2 月 24 日) は、外部評価委員を招待し、評価をお願いした。評価していただきたい結果は、web ページ (http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/referees.html#side_navigation) に掲載している。

2015 年度の評価では、本研究プロジェクトの意義や個々の研究の進捗には、概ねよい評価を頂いているものの、個々の研究のプロジェクト全体の中での位置付けをはっきりさせること、研究の有機的な関係性を強化することが指摘された。また、大学院生の活躍も外から見える様にする工夫の必要性も指摘された。その後、プロジェクト間での協働のさらなる推進に努めるとともに、大学院生を含んだ論文の出版にも心がけるようにしている。

2017 年度の評価では、拠点形成しての全体目標への到達度の不明確さのためプログラム終了後の拠点としての考え方が必要であること、さらなる、連携の必要性が指摘された。2018 年度以降は、さらなるチーム間の連携を意識しつつ研究を進めている。また、本プロジェクト終了後もセンターとしての活動は継続していくことになっている。

＜研究期間終了後の展望＞

(A-2) 不安定核の構造の解明に向けた実験的研究の拠点としての役割を果たしていく。理論の新しい解析手法の開発により、素粒子から原子核の性質を統合的に探る方向を目指す。

(B-1) 本課題で獲得された観測技術のいくつかはすでに宇宙ミッション提案段階にあり、ロシアの 1.7m 紫外望遠鏡(WSO-UV)を用いて紫外線トランジット法で地球に似た水や酸素を持つ系外惑星の検出計画のロシアとの共同実験、および、米国 SIHLA ミッションに水素吸収セルの搭載の提案を行なっている。

(B-3) EUVでの望遠鏡の性能が上がり、性能評価（分解能測定）が難しくなり、十分な性能を測定仕切れていない。検出器やピンホール等を改良することにより、より正確な性能測定を行い、成果を内外に宣伝していきたい。

(B-3) 「ひとみ衛星」にかわる「XRISM衛星」が2022年初頭に打ち上がれば、たくさんの銀河団等の観測に挑戦したい。重力波の初検出以降、重要性も増してきた重力波に関わる理論研究にもやや研究のウェイトを置くようにシフトする。今後の重力波観測の蓄積により波源の連星ブラックホールの物理的性質に関する有意なデータが取り出せるので、連星ブラックホールについて原始ブラックホール起源説からの定量的な予言を行いたい。

＜研究成果の副次的効果＞

(A-2) 2 MeV くらいまでの低エネルギー陽子による放射捕獲反応の断面積は核種により大きくことなることを利用して、 γ 線検出により微量分析実現の可能性がある。

(A-3) 余剰次元探索の為の超高精度変位計の技術は、カーリング競技のストーンの動きの解析に応用され、オリンピック日本代表チームへのフィードバックに活用されつつある。

(B-1) 本課題によりファネル型 MCP 検出器により真空紫外光の検出効率が向上することが分かり、海外学会での成果発表を通じて、日本独自の技術として、国際大型宇宙望遠鏡計画(WSO-UV, LUVUIR)での採用が検討されている。

(B-3) 本研究に関連する研究課題を研究員とともに遂行した多くの大学院生が修士（理学）や、10名が博士（理学）を授与されるなど、大学院教育にも重要な役割を果たした。

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| (1) <u>元素</u> | (2) <u>空間構造</u> | (3) <u>惑星</u> | (4) <u>暗黒物質</u> |
| (5) <u>原子核</u> | (6) <u>分子</u> | (7) <u>固体表面</u> | (8) <u>極低温検出器</u> |

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。)

上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには*を付すこと。

<雑誌論文>

No.	査読	著者名	論文表題	雑誌名	ページ	発行年
*1	※	T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima	Positron-annihilation-induced ion desorption from TiO ₂ (110)	Phys. Rev. B89	201409(R)	2014
*2	※	S. Matoba, G. Ishikawa, S. Moriya, K. Takahashi, T. Koizumi, and H. Shiromaru	Absolute detection efficiency of a tapered microchannel plate for Ne ⁺ ions	Rev. Sci. Instrum. 85	86105	2014
3	※	C. Aidala et al., A. Enokizono (349名中67番目), K. Kurita (349名中160番目), J. Murata (349名中207番目)	Nuclear matter effects on J/ψ production in asymmetric Cu+Au collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Phys.Rev. C90	64908	2014
*4	※	P. Doornenbal, et al, T. Motobayashi (28名中20番目)	Intermediate-energy Coulomb excitation of ¹⁰⁴ Sn: Moderate E2 strength decrease approaching 100Sn	Phys. Rev. C90	61302	2014
5	※	A. Adare et al., A. Enokizono (590名中125番目), K. Kurita (590名中283番目), J. Murata (590名中359番目)	Measurement of K _s ⁰ and K* ⁰ in p+p, d+Au, and Cu+Cu collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Phys.Rev. C90	54905	2014
6	※	S. Takeuchi, et al, T. Motobayashi(8名中2番目), Y. Togano(8名中3番目)	DALI2: A NaI(Tl) detector array for measurements of γ γ rays from fast nuclei	Nucl. Instr. and Meth. A763	596	2014
7	※	A. Adare et al., A. Enokizono (485名中99番目), K. Kurita (485名中229番目), J. Murata (485名中292番目)	Cross section and transverse single-spin asymmetry of η mesons in p ⁺ +p collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV at forward rapidity	Phys.Rev. D90	72008	2014
8	※	K. Tshoo, T. Motobayashi (37名中17番目)	Neutron occupancy of the 0d _{5/2} orbital and the N=16 shell closure in 240	Phys. Lett. B, 739	19	2014
9	※	A. Adare et al., A. Enokizono (470名中93番目), K. Kurita (470名中219番目), J. Murata (470名中280番目)	Low-mass vector-meson production at forward rapidity in p+p collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Phys.Rev. D90	52002	2014
10	※	A. Adare et al., A. Enokizono (380名中83番目), K. Kurita (380名中185番目), J. Murata (380名中230番目)	System-size dependence of open-heavy-flavor production in nucleus-nucleus collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Phys.Rev. C90	34903	2014
11	※	A. Adare et al., A. Enokizono (377名中82番目), K. Kurita (377名中178番目), J. Murata (377名中227番目)	Centrality categorization for R _{p(d)+A} in high-energy collisions	Phys.Rev. C90	34902	2014
12	※	N.N. Ajitanand et al., A. Enokizono (521名中102番目), K. Kurita (521名中243番目), J. Murata (521名中314番目)	Comparison of the space-time extent of the emission source in d+Au and Au+Au collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Nucl.Phys.A931	1082	2014
*13	※	A. Adare et al., A. Enokizono (380名中77番目), K. Kurita (380名中178番目), J. Murata (380名中230番目)	Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in collisions at √(S _{NN}) = 200 GeV	Phys.Rev. D90	12007	2014
14	※	A. Adare et al., A. Enokizono (451	Measurement of	Phys.Rev. D90	12006	2014

		名中 103 番目), <u>K. Kurita</u> (451 名中 218 番目), <u>J. Murata</u> (451 名中 277 番目)	transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p+p collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ and 62.4 GeV			
15	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (368 名中 75 番目), <u>K. Kurita</u> (368 名中 174 番目), <u>J. Murata</u> (368 名中 224 番目)	Heavy-quark production and elliptic flow in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 62.4$ GeV	Phys.Rev. C91	44907	2014
*16	※	村田次郎, 田中佐季, 二宮一史, 村上遥菜	余剰次元探索を目指した近距離重力実験	高エネルギーニュー ス Vol.32	No. 4	2014
17	※	<u>J. Murata</u> (21 名中 1 番目), et al.	The MTV experiment: a test of time reversal symmetry using polarized ^8Li	Hyperfine Interact 225	193	2014
*18	※	Saki Tanaka et al., <u>J. Murata</u> (11 名中 11 番目)	Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin geodetic precession	EPJ Web Conf. 66	5021	2014
*19	※	<u>J. Murata</u> (20 名中 1 番目) et al.	T-Violation experiment at TRIUMF-ISAC using polarized ^8Li	EPJ Web Conf. 66	5017	2014
*20	※	Y. Totsuka et al., <u>J. Murata</u> (21 名中 21 番目)	First result from the MTV experiment at TRIUMF searching T-violation in nuclear beta decay	Phys.Part.Nucl. 45	244	2014
*21	※	R. Tanuma, et al., <u>J. Murata</u> (7 名中 7 番目)	A new FPGA-based trigger/DAQ system for the MTV experiment at TRIUMF	Phys.Part.Nucl. 45	241	2014
22	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (380 名中 77 番目), <u>K. Kurita</u> (380 名中 178 番目), <u>J. Murata</u> (380 名中 230 番目)	Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in $\vec{p}+\vec{p}$ collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV	Phys.Rev. D90	12007	2014
23	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (386 名中 78 番目), <u>K. Kurita</u> (386 名中 179 番目), <u>J. Murata</u> (386 名中 231 番目)	Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys.Rev. Lett.112	222301	2014
24	※	S. Tanaka, et al., <u>J. Murata</u> (16 名中 16 番目)	Development of a novel scintillation-trigger detector for the MTV experiment using aluminum-metallized film tapes	Nucl.Instrum.Meth. A752	47	2014
*25	※	Saki Tanaka et al., <u>J. Murata</u> (16 名中 16 番目)	MTV/MTV-G Experiment at TRIUMF Search of T-Violation and Gravity Signal at Nuclear Scale	JPS Conf.Proc. 1	13063	2014
26	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (391 名中 83 番目), <u>K. Kurita</u> (391 名中 196 番目), <u>J. Murata</u> (391 名中 237 番目)	Transverse-energy distributions at midrapidity in p+p, d+Au, and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=62.4$ -200 GeV and implications for particle-production models	Phys.Rev. C89	44905	2014
27	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (449 名中 103 番目), <u>K. Kurita</u> (449 名中 218 番目), <u>J. Murata</u> (449 名中 277 番目)	Heavy-flavor electron-muon correlations in $p+p$ and $d+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV	Phys.Rev. C89	34915	2014
28	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (424 名中 92 番目), <u>K. Kurita</u> (424 名中 205 番目), <u>J. Murata</u> (424 名中 262 番目)	Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward and Backward Rapidity in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys.Rev. Lett.112	252301	2014
*29	※	Saki Tanaka et al., <u>J. Murata</u> (9	MTV-G experiment : probing a	J.Phys.Conf.Ser. 453	12018	2014

		名中 9 番目)	non-standard strong gravitational field at nuclear scale using geodetic precession			
*30	※	Kazufumi Ninomiya, et al., <u>Jiro Murata</u> (7 名中 7 番目)	Short-range Gravity experiment using digital image analysis	J. Phys. Conf. Ser. 453	12007	2014
*31	※	Masato Nakamura, et al., <u>Tetsuya Fukuhara</u> (22 人中 11 番目), <u>Makoto Taguchi</u> (22 人中 18 番目)	Return to Venus of the Japanese Venus Climate Orbiter AKATSUKI	Acta Astronautica, 93	384	2014
32	※	Takei, Dai; Tsujimoto, Masahiro; Drake, Jeremy J.; <u>Kitamoto, Shunji</u>	X-ray development of the classical nova V2672 Ophiuchi with Suzaku	Publications of the Astronomical Society of Japan, 66	37T	2014
33		<u>Kitamoto, S.</u> (22 名中 1 番目) et al.	ASTRO-H White Paper - Accreting Pulsars, Magnetars, and Related Sources	arXiv1412	1165K	2014
*34		<u>Kitamoto, S.</u> (12 名中 1 番目), et al.; <u>Hoshino, A.</u> (12 名中 10 番目);	Estimation of observation possibility of the x-ray interferometer with an x-ray beam-splitter	Proceedings of the SPIE	91441Z	2014
35	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> and Norihiro Tanabashi	Exact black hole solutions in shift-symmetric scalar-tensor theories	PTEP 2014	073E02	2014
*36	※	Keisuke Harigaya, Taku Hayakawa, Masahiro Kawasaki, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	CDM/baryon isocurvature perturbations in a sneutrino curvaton model	JCAP 1410	068	2014
*37	※	Naoya Kitajima, David Langlois, Tomo Takahashi, Tomohiro Takesako, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Thermal Effects and Sudden Decay Approximation in the Curvaton Scenario	JCAP 1410	32	2014
38	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (121 名中 111 番目)	Dark matter constraints from observations of 25 Milky Way satellite galaxies with the Fermi Large Area Telescope	Phys. Rev. D89	42001	2014
39	※	Chernyakova, M. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (17 名中 11 番目)	Multiwavelength observations of the binary system PSR B1259-63/LS 2883 around the 2010-2011 periastron passage	MNRAS, 439	432	2014
40	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (127 名中 118 番目)	Search for Cosmic-Ray-induced Gamma-Ray Emission in Galaxy Clusters	ApJ, 787	18	2014
41	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (154 名中 141 番目)	Fermi establishes classical novae as a distinct class of gamma-ray sources	Science, 345	554	2014
42	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (135 名中 129 番目)	The Spectrum and Morphology of the Fermi Bubbles	ApJ, 793	64	2014
43	※	Xian Gao, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Masahide Yamaguchi, Daisuke Yoshida	Covariant Stueckelberg analysis of dRGT massive gravity with a general fiducial metric	Phys. Rev. D90	124073	2014
*44	※	<u>Tomohiro Harada</u> and Masashi Kimura	Black holes as particle accelerators: a brief review	Class. Quant. Grav. 31	243001	2014
*45	※	Ken-Ichi Nakao, Masashi Kimura, <u>Tomohiro Harada</u> , <u>Mandar Patil</u> and Pankaj S. Joshi	How small can an over-spinning body be in general relativity?	Phys. Rev. D 90	124079	2014
*46	※	K. Takaya, et al., <u>T. Koizumi</u> (7 名中 4 番目)	Mobilities of Li ⁺ (2-butanol) _n (<i>n</i> =1-2) ions in He gas	J. Phys. : Conference Series. 635	32087	2015
*47	※	<u>T. Tachibana</u> , <u>T. Hirayama</u> , and Y. Nagashima	Comparative study of ion desorption from clean and contaminated TiO ₂ (110) surfaces by slow positron impacts	e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 13	261	2015
48	※	岩淵あづさ, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	レーザープラズマ光源を用いた希ガス	J. Vac. Soc. Jpn. 58	165	2015

			混合凝縮層からの光励起脱離の観測			
49	※	A. Adare et al., A. Enokizono (484名中97番目), K. Kurita (484名中223番目), J. Murata (484名中285番目)	ϕ meson production in d+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C92	44909	2015
50	※	A. Adare et al., A. Enokizono (630名中133番目), K. Kurita (630名中302番目), J. Murata (630名中381番目)	Measurements of elliptic and triangular flow in high-multiplicity $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. Lett. 115	142301	2015
51	※	A. Adare et al., A. Enokizono (499名中94番目), K. Kurita (499名中226番目), J. Murata (499名中293番目)	Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C92	34914	2015
52	※	A. Adare et al., A. Enokizono (424名中89番目), K. Kurita (424名中207番目), J. Murata (424名中258番目)	Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in Cu+Cu and Au+Au Collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 62.4$ and 200 GeV	Phys. Rev. C92	34913	2015
53	※	A. Adare et al., A. Enokizono (446名中86番目), K. Kurita (446名中207番目), J. Murata (446名中265番目)	Dielectron production in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C93	14904	2015
*54	※	K. Li, et al., T. Motobayashi (10名中2番目)	Relativistic Coulomb excitation in ^{32}Mg near 200 MeV/nucleon with a thick target	Phys. Rev. C 92	014608	2015
55	※	D. Steppenbeck, et al., T. Motobayashi (23名中13番目)	Low-Lying Structure of ^{60}Ar and the N=32 Subshell Closure	Phys. Rev. Lett., 114	252501	2015
56	※	Zs. Vajta, T. Motobayashi (23名中13番目)	γ -ray spectroscopy of ^{15}C via the single-neutron knock-out reaction	Phys. Rev. C 91	64315	2015
57	※	A. Adare et al., A. Enokizono (480名中95番目), K. Kurita (480名中225番目), J. Murata (480名中296番目)	Centrality dependence of low-momentum direct-photon production in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C91	64904	2015
*58	※	A. Adare et al., A. Enokizono (424名中92番目), K. Kurita (424名中204番目), J. Murata (424名中261番目)	Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and (anti)protons in central d+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. Lett. 114	192301	2015
*59	※	A. Corsi, K. Matsui, T. Motobayashi (31名中22番目)	Neutron-driven collectivity in light tin isotopes: Proton inelastic scattering from ^{104}Sn	Phys. Lett. B, 743	451	2015
*60	※	H. Tanaka	TMD Parton Distributions based on Three-Body Decay Functions in NLL Order of QCD	PTEP2015	043B03	2015
61	※	A. Adare et al., A. Enokizono (581名中126番目), K. Kurita (581名中281番目), J. Murata (581名中357番目)	Search for dark photons from neutral meson decays in p + p and d + Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C91	31901	2015
62	※	A. Adare et al., A. Enokizono (428名中93番目), K. Kurita (428名中202番目), J. Murata (428名中259番目)	Measurement of ν (1S+2S+3S) production in p+p and Au+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200\text{GeV}$	Phys. Rev. C91	24913	2015
63	※	A. Adare et al., A. Enokizono (381名中78番目), K. Kurita (381名中178番目), J. Murata (381名中230番目)	Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized p+p collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. D91	32001	2015
64	※	A. Adare et al., A. Enokizono (375名中82番目), K. Kurita (375名	Cross section for b production via dielectrons in d+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C91	14907	2015

		中 178 番目), <u>J. Murata</u> (375 名中 227 番目)	(SNN) = 200 GeV			
*65	※	<u>Jiro Murata</u> , Saki Tanaka.	A review of short-range gravity experiments in the LHC era	Class. Quant. Grav. 32	33001	2015
*66	※	T. Creutzig, <u>Y. Hikida</u>	Higgs phenomenon for higher spin fields on AdS ₃	JHEP 1510	164	2015
67	※	<u>Kameda, S.</u> (19 名中 1 番目), et al.	Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa2 spacecraft	Advances in Space Research 56	1519	2015
68	※	Hubrig, S.; et al.; <u>Hoshino, A.</u> (10 名中 5 番目); <u>Kitamoto, S.</u> (10 名中 6 番目)	New multiwavelength observations of the Of?p star CPD -28° 2561	MNRAS, 447	1885H	2015
*69	※	Tomohiro Fujita, Jun'ichi Yokoyama, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Can a spectatr scalar field enhance inflationary tensor mode?	PTEP	043E01	2015
*70	※	Hayato Shimabukuro, Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, <u>Shuichiro Yokoyama</u> , Kiyotomo Ichiki	Studying 21cm power spectrum with one-point statistics	Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 451	467	2015
71	※	Atsuhisa Ota, Toyokazu Sekiguchi, Yuichiro Tada, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Anisotropic CMB distortions from non-Gaussian isocurvature perturbations	JCAP 1503	013	2015
*72	※	Yuichiro Tada, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Primordial black holes as biased tracers	Phys. Rev. D 91	123534	2015
73	※	Shuntaro Mizuno, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Halo/Galaxy bispectrum with equilateral-type primordial trispectrum	Phys. Rev. D 91	123521	2015
74	※	<u>Takahisa Igata</u> , Shinya Tomizawa	Gravitational solitons in Levi-Civita spacetime	Physical Review D 91	124008	2015
75	※	<u>Takahisa Igata</u>	Stable Bound Orbits in Six-dimensional Myers-Perry Black Holes	Physical Review D 92	24002	2015
*76	※	Sachiko Kuroyanagi, Tomo Takahashi, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Blue-tilted Tensor Spectrum and Thermal History of the Universe	JCAP 1502	3	2015
77	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (144 名中 137 番目)	The Spectrum of Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission between 100 MeV and 820 GeV	ApJ, 799	86	2015
78	※	Takei, D.; Drake, J. J.; Yamaguchi, H.; Slane, P.; <u>Uchiyama, Y.</u> ; Katsuda, S.	X-Ray Fading and Expansion in the "Miniature Supernova Remnant" of GK Persei	ApJ, 801	92	2015
79	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (177 名中 166 番目)	Erratum: "The Second Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope" (2011, ApJ, 743, 171)	ApJ, 806	144	2015
80	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (148 名中 144 番目)	The Third Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope	ApJ, 810	14	2015
81	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (141 名中 127 番目)	Multiwavelength Evidence for Quasi-periodic Modulation in the Gamma-Ray Blazar PG 1553+113	ApJ, 813	L41	2015
*82	※	Katsuda, S. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (17 名中 17 番目)	Evidence for Thermal X-Ray Line Emission from the Synchrotron-dominated Supernova Remnant RX J1713.7-3946	ApJ, 814	29	2015
83	※	Fermi LAT Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (116 名中 112 番目)	An extremely bright gamma-ray pulsar in the Large Magellanic Cloud	Science, 350	801	2015
*84	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> , Yuki Watanabe, Daisuke Yamauchi	Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond	Phys. Rev. D91	064013	2015

			Horndeski			
*85	※	Sakine Nishi and <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generalized Galilean Genesis	JCAP 03	057	2015
*86	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> , Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama	Galilean Creation of the Inflationary Universe	JCAP 07	017	2015
87	※	Seiju Ohashi, Norihiro Tanahashi, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Masahide Yamaguchi	The most general second-order field equations of bi-scalar-tensor theory in four dimensions	JHEP 07	08	2015
88	※	Kohji Yajima, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity	Phys.Rev. D92	103503	2015
*89	※	B. J. Carr and <u>Tomohiro Harada</u>	The separate universe problem: 40 years on	Phys. Rev. D 91	084048	2015
*90	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Chul-Moon Yoo, Tomohiro Nakama and Yasutaka Koga	Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation	Phys. Rev. D 91	084057	2015
*91	※	<u>Mandar Patil</u> , Pankaj S. Joshi, Ken-ichi Nakao, Masashi Kimura and <u>Tomohiro Harada</u>	Timescale for trans-Planckian collisions in Kerr spacetime	Europhys. Lett. 110	30004	2015
*92	※	Takafumi Kokubu and <u>Tomohiro Harada</u>	Negative tension branes as stable thin shell wormholes	Class. Quant. Grav. 32	205001	2015
*93	※	Takafumi Kokubu, Hideki Maeda and <u>Tomohiro Harada</u>	Does the Gauss-Bonnet term stabilize wormholes?	Class. Quant. Grav. 32	235021	2015
*94	※	K. Takaya, Y. Hasegawa, <u>T. Koizumi</u> and H. Tanuma	Mobilities of polyatomic molecular ions in He gas	Int. J. Ion Mobil. Spec. 19	183	2016
*95	※	<u>T. Tachibana</u> , L. Chiari, M. Nagira, <u>T. Hirayama</u> and Y. Nagashima	Ion desorption from TiO ₂ (110) by low energy positron impact	Defect and Diffusion Forum, 373	324	2016
96	※	H. Wang, <u>T. Motobayashi</u> (26 名中 5 番目)	First spectroscopic information from even-even nuclei in the region "southeast" of 132Sn: Neutron-excitation dominance of the 2+ state in 132Cd	Phys. Rev. C 94	51301	2016
97	※	J. Lee et al., <u>T. Motobayashi</u> (23 名中 20 番目) <u>Y. Togano</u> (23 名中 23 番目)	Asymmetry dependence of reduction factors from single-nucleon knockout of 30Ne at ~ 230 MeV/nucleon	Prog. Theor. Exp. Phys.	083D01	2016
*98	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (335 名中 60 番目), <u>K. Kurita</u> (335 名中 150 番目), <u>J. Murata</u> (335 名中 191 番目)	Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized p+p collisions at √(S)=510 GeV	Phys.Rev. D94	112008	2016
*99	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (387 名中 78 番目), <u>K. Kurita</u> (387 名中 178 番目), <u>J. Murata</u> (387 名中 231 番目)	Measurement of the higher-order anisotropic flow coefficients for identified hadrons in Au+Au collisions at √(SNN)=200 GeV	Phys.Rev. C93	51902	2016
100	※	P. Doornenbal, <u>T. Motobayashi</u> (20 名中 15 番目)	Mapping the deformation in the "island of inversion": Inelastic scattering of 30Ne and 36Mg at intermediate energies	Phys. Rev. C 93	44306	2016
101	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (483 名中 97 番目), <u>K. Kurita</u> (483 名中 223 番目), <u>J. Murata</u> (483 名中 285 番目)	Centrality-dependent modification of jet-production rates in deuteron-gold collisions at √(SNN)=200 GeV	Phys.Rev.Lett. 116	122301	2016
102	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (451	Measurement of parity-violating spin	Phys.Rev. D93	51103	2016

		名中 86 番目), <u>K. Kurita</u> (451 名中 207 番目), <u>J. Murata</u> (451 名中 265 番目)	asymmetries in W^\pm production at midrapidity in longitudinally polarized p+p collisions			
*103	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (402 名中 75 番目), <u>K. Kurita</u> (402 名中 181 番目), <u>J. Murata</u> (402 名中 232 番目)	Forward J/ψ production in U+U collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle}=193$ GeV	Phys. Rev. C93	34903	2016
104	※	Y. Shiga, <u>K. Ieki</u> (39 名中 19 番目), <u>T. Motobayashi</u> (39 名中 23 番目)	Investigating nuclear shell structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$	Phys. Rev. C 93	24320	2016
105	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (629 名中 127 番目), <u>K. Kurita</u> (629 名中 296 番目), <u>J. Murata</u> (629 名中 381 番目)	Scaling properties of fractional momentum loss of high- p_T hadrons in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 62.4$ GeV to 2.76 TeV	Phys. Rev. C93	24911	2016
*106	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (510 名中 99 番目), <u>K. Kurita</u> (510 名中 234 番目), <u>J. Murata</u> (510 名中 300 番目)	ϕ meson production in the forward/backward rapidity region in Cu+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C93	24904	2016
107	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (706 名中 143 番目), <u>K. Kurita</u> (706 名中 337 番目), <u>J. Murata</u> (706 名中 431 番目)	Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 7.7$ to 200 GeV	Phys. Rev. C93	24901	2016
108	※	N. Kobayashi, et al., <u>T. Motobayashi</u> (30 名中 18 番目)	One-neutron removal from Ne29: Defining the lower limits of the island of inversion	Phys. Rev. C 93	14613	2016
109	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (512 名中 100 番目), <u>K. Kurita</u> (512 名中 237 番目), <u>J. Murata</u> (512 名中 313 番目)	Measurement of higher cumulants of net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle S_{NN} \rangle} = 7.7$ -200 GeV	Phys. Rev. C93	11901	2016
110	※	A. Adare et al., <u>A. Enokizono</u> (413 名中 76 番目), <u>K. Kurita</u> (413 名中 188 番目), <u>J. Murata</u> (413 名中 240 番目)	Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π_0 production at midrapidity in p+p collisions at $\sqrt{\langle S \rangle} = 510$ GeV	Phys. Rev. D93	11501	2016
111	※	P. Doornenbal et al., <u>T. Motobayashi</u> , (20 名中 15 番目) <u>Y. Togano</u> (20 名中 19 番目)	Mapping the deformation in the island of inversion: Inelastic scattering of ^{30}Ne and ^{36}Mg at intermediate energies	Phys. Rev. C 93	44306	2016
112	※	H. Wang et al., <u>T. Motobayashi</u> , (26 名中 5 番目)	First spectroscopic information from even-even nuclei in the region "southeast" of ^{132}Sn : Neutron-excitation dominance of the 2+ state in ^{132}Cd	Phys. Rev. C 94	51301	2016
113	※	<u>J. Murata</u> (23 名中 1 番目) et al.	The MTV experiment: searching for T-violation in polarized Li-8 at TRIUMF	Hyperfine Interact. 237	125	2016
114	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (404 名中 75 番目), <u>K. Kurita</u> (404 名中 183 番目), <u>J. Murata</u> (404 名中 234 番目)	Measurements of directed, elliptic, and triangular flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{\langle s_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C94	54910	2016
115	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (552 名中 104 番目), <u>K. Kurita</u> (552 名中 255 番目), <u>J. Murata</u> (552 名中 332 番目)	Azimuthally anisotropic emission of low-momentum direct photons in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle s_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C94	64901	2016
116	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (432 名中 84 番目), <u>K. Kurita</u> (432 名中 198 番目), <u>J. Murata</u> (432 名中 280 番目)	Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au+Au collisions at $\sqrt{\langle s_{NN} \rangle} = 200$ GeV	Phys. Rev. C93	34904	2016

		Murata (432 名中 254 番目)	$\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV			
*117	※	Y. Hikida	The masses of higher spin fields on AdS ₄ and conformal perturbation theory	Phys. Rev. D94	99050Y 10 pp	2016
*118	※	Naomoto Iwagami, Takehiko Satoh, Makoto Taguchi, Takeshi Imamura, and Masato Nakamura	Infrared cameras onboard Venus Orbiter Akatsuki	J. Jpn Soc. Infrared Science & Technology, 26	5	2016
*119	※	Yasuhiro Shoji, et al., Makoto Taguchi (10 名中 2 番目)	FUJIN-2: Balloon Borne Telescope for Optical Observation of Planets	Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 14	Pk_95	2016
*120	※	Masato Nakamura, et al., Makoto Taguchi (52 人中 13 番目), Tetsuya Fukuhara (52 人中 14 番目)	AKATSUKI returns to Venus	Earth Planets Space, 68:75		2016
*121	※	Yuichiro Cho, et al., Shingo Kameda (7 名中 7 番目)	An in-situ K-Ar isochron dating method for planetary landers using a spot-by-spot laser-ablation technique	Planetary and Space Science 128	14	2016
*122	※	Cho, Y., Horiuchi, M., Shibasaki, K., Kameda, S., and Sugita, S.	Quantitative Potassium Measurements with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Using Low-Energy Lasers: Application to In Situ K-Ar Geochronology for Planetary Exploration	Applied Spectroscopy 71	1969	2016
*123	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix et al. Kitamoto S. (216 名中 79 番目), Hoshino, A. (216 名中 54 番目), Uchiyama, Y. (216 名中 191 番目)	The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster	Nature, 535	117H	2016
*124	※	Sugimoto, Juri; et al.; Kitamoto, Shunji (8 名中 3 番目);	MAXI observations of long-term variations of Cygnus X-1 in the low/hard and the high/soft states	Publications of the Astronomical Society of Japan, 68S	17S	2016
*125		Kelley, Richard L.; Hoshino, A. (57 名中 16 番目)、Kitamoto, S. (57 名中 22 番目)	The Astro-H high resolution soft x-ray spectrometer	Proceedings of the SPIE, Volume 9905	id. 99050V 17 pp	2016
*126	※	Fujimoto, Ryuichi, Kitamoto S. (39 名中 12 番目), Hoshino, A. (39 名中 13 番目)	Performance of the helium dewar and cryocoolers of ASTRO-H SXS	Proceedings of the SPIE, Volume 9905	id. 99053S 11 pp	2016
*127	※	Tsujimoto, Masahiro, Hoshino, A. (49 名中 17 番目), Kitamoto, S. (49 名中 22 番目)	In-orbit operation of the ASTRO-H SXS	Proceedings of the SPIE, Volume 9905	id. 99050Y 10 pp	2016
*128	※	Takahashi, Tadayuki; et al.; Hoshino, A. (269 名中 71 番目), Kitamoto, S. (269 名中 102 番目), Uchiyama, Y. (269 名中 229 番目)	The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite	Proceedings of the SPIE, Volume 9905	id. 99050U 17 pp.	2016
*129	※	Mandar Patil, Tomohiro Harada, Ken-Ichi Nakao, Pankaj S. Joshi and Masashi Kimura	Infinite efficiency of the collisional Penrose process: Can a overspinning Kerr geometry be the source of ultrahigh-energy cosmic rays and neutrinos?	Phys. Rev. D 93	104015	2016
*130	※	Tomohiro Harada, Shunichiro Kinoshita and Umpei Miyamoto	Vacuum excitation by sudden appearance and disappearance of a Dirichlet wall in a cavity	Phys. Rev. D 94	25006	2016
*131	※	Tomohiro Harada, Kota Ogasawara and Umpei Miyamoto	Consistent analytic approach to the efficiency of collisional Penrose process	Phys. Rev. D 94	24038	2016

132	※	Yasutaka Koga and <u>Tomohiro Harada</u>	Correspondence between sonic points of ideal photon gas accretion and photon spheres	Phys. Rev. D 94	44053	2016
*133	※	<u>Tomohiro Harada</u> and Sanjay Jhingan	Spherical and nonspherical models of primordial black hole formation: exact solutions	Prog. Theor. Exp. Phys	093E04	2016
*134	※	<u>Takahisa Igata</u> , Tsuyoshi Houri and <u>Tomohiro Harada</u>	Self-similar motion of a Nambu-Goto string	Phys. Rev. D 94	064029	2016
*135	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao and Sanjay Jhingan	Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe	Astrophys. J. 833	61	2016
*136	※	Hayato Shimabukuro, Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, <u>Shuichiro Yokoyama</u> , Kiyotomo Ichiki	21cm line bispectrum as a method to probe cosmic dawn and epoch of reionization	Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 458	3003	2016
*137	※	Ichihiko Hashimoto, Atsushi Taruya, Takahiko Matsubara, Toshiya Namikawa, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Constraining higher-order parameters for primordial non-Gaussianities from power spectra and bispectra of imaging surveys	Phys. Rev. D 93	103537	2016
*138	※	Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Primordial black hole scenario for the gravitational-wave event GW150914	Phys. Rev. Lett. 117	061101	2016
*139	※	Ichihiko Hashimoto, Shunaro Mizuno, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Constraining equilateral-type primordial non-Gaussianities from imaging surveys	Phys. Rev. D 94	043532	2016
140	※	<u>Takahisa Igata</u> , Shinya Tomizawa	Gravitational two solitons in Levi-Civita spacetime	Classical and Quantum Gravity 33	185005	2016
141	※	Shunichiro Kinoshita, <u>Takahisa Igata</u> , Kentaro Tanabe	Energy extraction from Kerr black holes by rigidly rotating strings	Physical Review D 94	124039	2016
142	※	Ajello, M. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (123 名中 118 番目)	Fermi-LAT Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission toward the Galactic Center	ApJ, 819	44	2016
143	※	Ajello, M. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (110 名中 106 番目)	Deep Morphological and Spectral Study of the SNR RCW 86 with Fermi-LAT	ApJ, 819	90	2016
144	※	Ajello, M. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (102 名中 98 番目)	Search for Spectral Irregularities due to Photon-Axionlike-Particle Oscillations with the Fermi Large Area Telescope	P. R. L. 116	1101	2016
145	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (167 名中 160 番目)	Fermi-LAT Observations of the LIGO Event GW150914	ApJ, 823L	2	2016
146	※	Acero, F. <u>Uchiyama, Y.</u> (160 名中 154 番目)	The First Fermi LAT Supernova Remnant Catalog	ApJS, 224	8	2016
147	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (109 名中 106 番目)	Minute-timescale >100 MeV γ -Ray Variability during the Giant Outburst of Quasar 3C 279 Observed by Fermi-LAT in 2015 June	ApJ, 824	20	2016
148	※	Abbott, B et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (1574 名中 1298 番目)	Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914	ApJ, 826L	13	2016
149	※	Abbott, B et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (1548 名中 1296 番目)	Supplement: "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914" (2016, ApJL, 826, L13)	ApJS, 225	8	2016
150	※	Hampton, E. J.; Rowell, G.; Hofmann, W.; Horns, D.; <u>Uchiyama, Y.</u> ; Wagner, S.	Chandra observations of the HII complex G5.89-0.39 and TeV gamma-ray source HESSJ1800-240B	HEAp, 11	1	2016
*151	※	Tsuji, Naomi;	Expansion measurements of supernova	PASJ, 68	108	2016

		<u>Uchiyama, Yasunobu</u>	remnant RX J1713.7-3946			
152	※	Yuji Akita, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Removing Ostrogradski's ghost from cosmological perturbations in $f(R, R_{\mu\nu}^2, C_{\mu\nu\rho\sigma}^2)$ gravity	Mod.Phys.Lett. A31	1650067	2016
*153	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> , Masaru Siino, Masahide Yamaguchi, Daisuke Yoshida	Perturbations of Cosmological and Black Hole Solutions in Massive gravity and Bi-gravity	Prog. Theor. Exp. Phys. (2016)	103E02	2016
*154	※	Hiromu Ogawa, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Teruaki Suyama	Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories	Phys.Rev. D93	064078	2016
*155	※	Kazufumi Takahashi, Teruaki Suyama, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions	Phys.Rev. D93	064068	2016
156	※	Yuji Akita, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Primordial non-Gaussianities of gravitational waves beyond Horndeski	Phys.Rev. D93	043519	2016
*157	※	Sakine Nishi, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Reheating and Primordial Gravitational Waves in Generalized Galilean Genesis	JCAP 1604	018	2016
158	※	Shin'ichi Hirano, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Shuichiro Yokoyama	Ultra slow-roll G-inflation	Phys.Rev. D94	103515	2016
*159	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem	Phys.Rev. D94	043511	2016
*160	※	Kota Ogasawara, <u>Tomohiro Harada</u> and Umpei Miyamoto	High efficiency of collisional Penrose process requires heavy particle production	Phys. Rev. D 93	044054	2016
*161	※	A. Iwabuchi, <u>T. Tachibana</u> , and <u>T. Hirayama</u>	Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on Ne solids	J. Electr. Spectr. Rel. Phen. 220	25	2017
*162	※	H. Sawa, M. Anazai, T. Konishi, <u>T. Tachibana</u> , and <u>T. Hirayama</u>	Development of a UHV-compatible low-energy electron gun using the photoelectric effect	J. Vac. Soc. Jpn. 60	467	2017
163	※	倉橋光紀, <u>植田寛和</u>	高エネルギー状態選別酸素分子ビームの開発とPt(111)表面へのO ₂ 吸着実験への応用	J. Vac. Soc. Jpn. 60	307	2017
164	※	<u>H. Ueta</u> and M. Kurahashi	Steric effect in CO oxidation on Pt(111)	J. Chem. Phys. 147	194705	2017
165	※	<u>Y. Nakano</u> , Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma	Design and commissioning of the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)	Rev. Sci. Instr. 89,	033110	2017
*166	※	<u>Kazunari Takaya</u> , Yuya Hasegawa, <u>Tetsuo Koizumi</u>	Mobilities of CH ₃ ⁺ , C ₂ H ₃ ⁺ and C ₃ H ₃ ⁺ ions in He gas	Chem. Phys. Lett. 679,	21	2017
167	※	H.N. Liu et al. <u>T. Motobayashi</u> (22名中16番目) <u>Y. Togano</u> (22名中20番目)	Intruder configurations in the ground state of ³⁰ Ne	Phys. Lett. B 767	58	2017
168	※	H.N. Liu et al. <u>T. Motobayashi</u> (73名中21番目)	Are There Signatures of Harmonic Oscillator Shells Far from Stability? First Spectroscopy of ¹¹⁰ Zr	Phys. Rev. Lett. 118	032501	2017
169	※	<u>Shuji Sasagawa</u> and <u>Hidekazu Tanaka</u>	Schwinger-Dyson equation in Minkowski space beyond the IE approximation	Prog. Theor. Exp. Phys.	013B04	2017
170	※	<u>Shuji Sasagawa</u> and <u>Hidekazu Tanaka</u>	The Low-Z Shore of the "Island of Inversion" and the Reduced Neutron Magicity Towards ²⁸ O	Phys. Rev. C 95	041301(R)	2017
171	※	V. Vaquero et al. <u>T. Motobayashi</u> (34名中24番目)	Gamma decay of unbound neutron-hole states in ¹³³ Sn	Phys. Rev. Lett. 118	202502	2017

172	※	J. Hwang et al. <u>T. Motobayashi</u> (45名中25番目), <u>Y. Togano</u> (45名中42番目)	Single-neutron knockout from ^{20}C and the structure of ^{19}C	Phys. Lett B 768	387	2017
173	※	S. Chen et al. <u>T. Motobayashi</u> (63名中15番目)	Low-lying structure and shape evolution in neutron-rich Se Isotopes	Phys. Rev. C 95	041392(R)	2017
174	※	F. Flavigny et al. <u>T. Motobayashi</u> (62名中15番目)	Shape Evolution in Neutron-Rich Krypton Isotopes Beyond $N=60$: First Spectroscopy of $^{98,100}\text{Kr}$	Phys. Rev. Lett. 118	242501	2017
175	※	M. Lettmann et al., <u>T. Motobayashi</u> (64名中19番目)	Triaxiality of neutron-rich $^{84,86,88}\text{Ge}$ from low-energy nuclear spectra	Phys. Rev. C 96	011301(R)	2017
*176	※	K. Tsukada et al. <u>A. Enokizono</u> (17名中2番目), <u>K. Kurita</u> (17名中10番目)	First Elastic Electron Scattering from ^{132}Xe at the SCRIT Facility	Phys. Rev. Lett. 118	262501	2017
177		<u>H. Tanaka</u> and <u>S. Sasagawa</u>	Quark mass function in Minkowski space	arXiv:	1705.09781	2017
178	※	C. M. Shand et al. <u>T. Motobayashi</u> (95名中25番目)	Shell evolution beyond $Z=28$ and $Z=50$: Spectroscopy of $^{81,82,83,84}\text{Zn}$	Phys. Lett. B 773	492-497	2017
179	※	L. Olivier et al. <u>T. Motobayashi</u> (65名中22番目)	Persistence of the $Z = 28$ Shell Gap Around ^{78}Ni : First Spectroscopy of ^{79}Cu	Phys. Rev. Lett, 119	192501	2017
180	※	D. Steppenbeck et al. <u>T. Motobayashi</u> (24名中12番目)	Structure of ^{55}Sc and development of the $N = 34$ subshell closure	Phys. Rev. C 96	064310	2017
181	※	<u>H. Tanaka</u> and <u>S. Sasagawa</u>	Quark mass function in Minkowski space	Prog. Theor. Exp. Phys.	123B02	2017
182	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (246名中44番目), <u>K. Kurita</u> (246名中105番目), <u>J. Murata</u> (246名中139番目)	Measurements of azimuthal anisotropy and charged-particle multiplicity in d+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200, 62.4, 39,$ and 19.6 GeV	Phys. Rev. C96	64905	2017
*183	※	K. Ninomiya (Rikkyo U.) et al., <u>J. Murata</u> (23名中23番目)	Short-range test of the universality of gravitational constant G at the millimeter scale using a digital image sensor	Class. Quant. Grav. 34	185005	2017
184	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (436名中77番目), <u>K. Kurita</u> (436名中191番目), <u>J. Murata</u> (436名中253番目)	Cross section and transverse single-spin asymmetry of muons from open heavy-flavor decays in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV	Phys. Rev. D95	112001	2017
185	※	H. Kawamura, et al., <u>J. Murata</u> (24名中24番目)	A new measurement of electron transverse polarization in polarized nuclear β -decay	Mod. Phys. Lett. A32	1750058	2017
186	※	<u>Jiro Murata</u> (24名中1番目) et al.	The MTV Experiment: from T-violation to Lorentz-violation	PoS INPC2016	185-192	2017
187	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (459名中83番目), <u>K. Kurita</u> (459名中199番目), <u>J. Murata</u> (459名中265番目)	B-meson production at forward and backward rapidity in p+p and Cu + Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV	Phys. Rev. C96	64901	2017
188	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (503名中102番目), <u>K. Kurita</u> (503名中230番目), <u>J. Murata</u> (503名中301番目)	Measurements of e^+e^- pairs from open heavy flavor in p+p and d+A collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV	Phys. Rev. C96	24907	2017
189	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (431名中77番目), <u>K. Kurita</u> (431名中190番目), <u>J. Murata</u> (431名中248番目)	Measurements of $B \rightarrow J/\psi$ at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV	Phys. Rev. D95	92002	2017
190	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (390名中73番目), <u>K. Kurita</u> (390名中171番目), <u>J. Murata</u> (390名中248番目)	Angular decay coefficients of J/ψ mesons at forward rapidity from p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV	Phys. Rev. D95	92003	2017

		<u>Murata</u> (390 名中 224 番目)				
191	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (361 名中 67 番目), <u>K. Kurita</u> (361 名中 157 番目), <u>J. Murata</u> (361 名中 206 番目)	Measurement of the relative yields of ϕ (2S) to ϕ (1S) mesons produced at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and 3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys. Rev. C95	34904	2017
192	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (435 名中 85 番目), <u>K. Kurita</u> (435 名中 206 番目), <u>J. Murata</u> (435 名中 271 番目)	Nonperturbative-transverse-momentum effects and evolution in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV	Phys. Rev. D95	72002	2017
193	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (309 名中 47 番目), <u>K. Kurita</u> (309 名中 121 番目), <u>J. Murata</u> (309 名中 155 番目)	Measurement of long-range angular correlations and azimuthal anisotropies in high-multiplicity p+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys. Rev. C95	34910	2017
*194	※	<u>Tetsuya Fukuhara</u> , et al., <u>Makoto Taguchi</u> (Corresponding Author) (19 人中 14 番目)	Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus	Nature Geoscience, 10	85	2017
*195	※	Toshihiko Nakano, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (10 名中 2 番目)	Characteristics Evaluation and Performance Improvement Method of Balloon-Borne Telescope Pointing Control System	31th International Symposium on Space Technology and Science	2017-k-06	2017
*196	※	<u>Tetsuya Fukuhara</u> , et al., <u>Makoto Taguchi</u> (30 人中 2 番目)	Absolute calibration of brightness temperature of the Venus disk observed by the Longwave Infrared Camera onboard Akatsuki	Earth Planets Space, 69	141	2017
*197	※	Kazunori Ogohara, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (31 人中 16 番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (31 人中 20 番目)	Overview of Akatsuki data products: definition of data levels, method and accuracy of geometric correction	Earth Planets Space, 69	167	2017
*198	※	Toru Kouyama, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (26 人中 3 番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (26 人中 4 番目)	Topographical and Local-Time Dependence of Large Stationary Gravity Waves observed at the cloud top of Venus	Geophys. Res. Lett., 44	12,098	2017
*199	※	<u>Kameda, S.</u> (13 名中 1 番目) et al., <u>Yoshioka, K.</u> (13 名中 7 番目), <u>Taguchi, M.</u> (13 名中 9 番目)	Ecliptic North-South Symmetry of Hydrogen Geocorona	Geophysical Research Letters 44	11706	2017
*200	※	Yuichiro Cho, et al., <u>Shingo Kameda</u> (11 名中 2 番目), <u>Kazuo Yoshioka</u> (11 名中 9 番目)	Experimental characterization of elastomeric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K-Ar dating on Mars	Advances in Space Research 60	1453	2017
201	※	<u>Kameda, S.</u> (15 名中 1 番目), et al.	Preflight Calibration Test Results for Optical Navigation Camera Telescope (ONC-T) Onboard the Hayabusa2 Spacecraft	Space Science Reviews 208	17	2017
*202	※	Yoshiharu Shinnaka, et al., <u>Shingo Kameda</u> (11 名中 4 番目), <u>Makoto Taguchi</u> (11 名中 10 番目)	Imaging Observations of the Hydrogen Coma of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2015 September by the PROCYON/LAICA	The Astronomical Journal 153	76	2017
203	※	A. Iwabuchi, <u>T. Tachibana</u> , and <u>T. Hirayama</u>	Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on Ne solids	J. Electr. Spectr. Rel. Phen. 220	25	2017
*204		Yoshida, Yuki; et al.; <u>Hoshino, Akio</u> (12 名中 2 番目); <u>Kitamoto, Shunji</u> (12 名中 3 番目)	Transmission measurement of the spare Beryllium window of the SXS onboard the Hitomi satellite in 2.0-12 keV with KEK-PF	Proceedings of the SPIE, Volume 10397	1DY	2017

*205		<u>Hoshino, Akio</u> (9名中1番目); et al.; <u>Kitamoto, Shunji</u> (9名中3番目);	The evaluation of the Hitomi (Astro-H)/SXS spare beryllium window in 3.8-30 keV	Proceedings of the SPIE, Volume 10397	0EH	2017
206		<u>Sugimoto, Juri</u> ; <u>Kitamoto, Shunji</u> ; Mihara, Tatehiro; MAXI Team	Observation of the long-term variability of Cygnus X-1 with MAXI	7 years of MAXI: monitoring X-ray Transients,	77	2017
*207	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (194名中71番目), <u>Hoshino, A.</u> (194名中52番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (194名中172番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (194名中,54番目)	Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster	Nature, 551	478H	2017
*208	※	<u>Yoshida, Yuki</u> ; <u>Kitamoto, Shunji</u> ; <u>Hoshino, Akio</u>	The Intensity Modulation of the Fluorescent Line by a Finite Light Speed Effect in Accretion-powered X-Ray Pulsars	The Astronomical Journal, 849	116Y	2017
*209	※	<u>Sugimoto, Juri</u> ; <u>Kitamoto, Shunji</u> ; Mihara, Tatehiro; Matsuoka, Masaru	Orbital modulations of X-ray light curves of Cygnus X-1 in its low/hard and high/soft states	Publications of the Astronomical Society of Japan, 69	52S	2017
*210	※	<u>Yoshida, Yuki</u> ; et al.; <u>Kitamoto, Shunji</u> (6名中2番目); <u>Hoshino, Akio</u> (6名中4番目)	A Suzaku View of Accretion-powered X-Ray Pulsar GX 1+4	The Astronomical Journal, 838	30Y	2017
*211	※	Aharonian, F. A, et al. <u>Kitamoto S.</u> (218名中80番目), <u>Hoshino, A.</u> (218名中52番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (218名中173番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (218名中,54番目)	Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster	The Astronomical Journal, 837L	15A	2017
*212	※	Naoki Tsukamoto and <u>Tomohiro Harada</u>	Light curves of light rays passing through a wormhole	Phys. Rev. D 95	024030	2017
213	※	Chul-Moon Yoo, <u>Tomohiro Harada</u> and Hirotsada Okawa	3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System	Class. Quant. Grav. 34	105010	2017
214	※	Kota Ogasawara, <u>Tomohiro Harada</u> , Umpei Miyamoto and <u>Takahisa Igata</u>	Escape probability of the super-Penrose process	Phys. Rev. D 95	124019	2017
215	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri and Ken-Ichi Nakao	Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe	Phys. Rev. D 96	083517	2017
216	※	Guillem Domènech, <u>Takashi Hiramatsu</u> , Chunshan Lin, Misao Sasaki, Maresuke Shiraishi, Yi Wang	CMB Scale Dependent Non-Gaussianity from Massive Gravity during Inflation	JCAP 1705	034	2017
217	※	Hayato Shimabukuro, Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, <u>Shuichiro Yokoyama</u> , Kiyotomo Ichiki	Constraining the epoch-of-reionization model parameters with the 21-cm bispectrum	Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 468	1542	2017
218	※	Daisuke Yamauchi, <u>Shuichiro Yokoyama</u> , Keitaro Takahashi	Multitracer technique for galaxy bispectrum: An application to constraints on nonlocal primordial non-Gaussianities	Phys. Rev. D 95	063530	2017
219	※	Takeshi Chiba, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Spin distribution of primordial black holes	PTEP	083E01	2017
220	※	Naoya Kitajima, David Langlois, Tomo Takahashi, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Refined study of isocurvature fluctuations in the curvaton scenario	JCAP 1712	042	2017
221	※	Daisuke Yamauchi, <u>Shuichiro Yokoyama</u> , Hiroyuki Tashiro	Constraining modified theories of gravity with the galaxy bispectrum	Phys. Rev. D 96	123516	2017

222	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (250 名中 218 番目)	First limits on the very-high energy gamma-ray afterglow emission of a fast radio burst. H. E. S. S. observations of FRB 150418	A&A 597	115	2017
223	※	Racusin, J. L.; et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (143 名中 140 番目)	Searching the Gamma-Ray Sky for Counterparts to Gravitational Wave Sources: /Fermi GBM and LAT Observations of LVT151012 and GW151226	ApJ, 835	82	2017
224	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (247 名中 217 番目)	Characterizing the γ -ray long-term variability of PKS 2155-304 with H. E. S. S. and Fermi-LAT	A&A, 598	39	2017
225	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (106 名中 101 番目)	Observations of M31 and M33 with the Fermi Large Area Telescope: A Galactic Center Excess in Andromeda?	ApJ, 836	208	2017
226	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (331 名中 221 番目)	Gamma-ray blazar spectra with H. E. S. S. II mono analysis: The case of PKS 2155-304 and PG 1553+113	A&A, 600	89	2017
227	※	Katsuta, J.; <u>Uchiyama, Y.</u> ; Funk, S.	Extended Gamma-Ray Emission from the G25.0+0.0 Region: A Star-forming Region Powered by the Newly Found OB Association?	ApJ, 839	129	2017
228	※	Ackermann, M et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (132 名中 127 番目)	The Fermi Galactic Center GeV Excess and Implications for Dark Matter	ApJ, 840	43	2017
229	※	Petroff, E. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (376 名番目)	A polarized fast radio burst at low Galactic latitude	MNRAS, 469	446	2017
230	※	Harris, D. E. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (17 名中 16 番目)	A Multi-band Study of the Remarkable Jet in Quasar 4C+19.44	ApJ, 846	119	2017
231	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (250 名中 219 番目)	Measurement of the EBL spectral energy distribution using the VHE γ -ray spectra of H. E. S. S. blazars	A&A, 606	59	2017
232	※	Abbott, B et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (3541 名中 2987 番目)	Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger	ApJ, 848L	12	2017
233	※	Inoue, Susumu; <u>Uchiyama, Yasunobu</u> ; Arakawa, Masanori; Renaud, Matthieu; Wada, Keiichi	Cosmic Rays and Non-thermal Emission Induced by Accretion of Cool Gas onto the Galactic Disk	ApJ, 849	22	2017
234	※	Abdalla, H et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (252 名中 220 番目)	TeV Gamma-Ray Observations of the Binary Neutron Star Merger GW170817 with H. E. S. S.	ApJ, 850	22	2017
235	※	Sakine Nishi, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Scale-invariant perturbations from NEC violation: A new variant of Galilean Genesis	Phys. Rev. D95	064001	2017
236	※	Shingo Akama, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies	Phys. Rev. D95	064011	2017
237	※	Kazufumi Takahashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	General invertible transformation and physical degrees of freedom	Phys. Rev. D95	084053	2017
238	※	Shin'ichi Hirano, Sakine Nishi, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Healthy imperfect dark matter from effective theory of mimetic cosmological perturbations	JCAP 1707	009	2017
*239	※	Kazufumi Takahashi, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities	JCAP 1711	038	2017
*240	※	<u>K. Takahashi</u> , K. M. Moriya, <u>S. Matoba</u> , <u>T. Koizumi</u> , H. Tanuma	Mobilities of Li ⁺ -attached butanol isomers in helium gas at 85.5 K	Chem. Phys. Lett. 691.	258	2018

241	※	S. Menk, P. Bertier, Y. Enomoto, T. Masunaga, T. Majima, <u>Y. Nakano</u> , and T. Azuma	A cryogenic linear ion trap beamline for providing keV ion bunches	Rev. Sci. Instr. 89,	113110	2018
242	※	L. Atar et al., <u>Y. Togano</u> (102名中93番目)	Quasifree (p, 2p) Reactions on Oxygen Isotopes: Observation of Isospin Independence of the Reduced Single-Particle Strength	Phys. Rev. Lett. 120	052501	2018
243	※	T. Inakura and <u>Y. Togano</u>	Skyrme random-phase approximation analysis of low-energy dipole states in oxygen isotopes	Phys. Rev. C 97	054330	2018
244	※	M.L. Cortes et al. <u>T. Motobayashi</u> (68名中24番目)	Inelastic scattering of neutron-rich Ni and Zn isotopes off a proton target	Phys. Rev. C 97	044315	2018
245	※	A. Corsi et al. <u>T. Motobayashi</u> (30名中19番目)	Spectroscopy of nuclei around ^{100}Sn populated via two-neutron knockout reactions	Phys. Rev. C 97	044321	2018
246	※	Zs. Vajta et al. <u>T. Motobayashi</u> (35名中6番目), <u>K. Ieki</u> (37名中21番目)	Proton single particle energies next to ^{78}Ni : Spectroscopy of ^{77}Cu via single proton knock-out reaction	Phys. Lett. B 782	99	2018
247	※	X.Y. Liu et al. <u>T. Motobayashi</u> (74名中18番目)	Spectroscopy of $^{65,67}\text{Mn}$: Strong coupling in the N=40 “island of inversion”	Phys. Lett. B 784	392	2018
248	※	K. Wimmer et al. <u>T. Motobayashi</u> (34名中21番目)	Shape coexistence and isospin symmetry in A = 70 nuclei: Spectroscopy of the Tz = -1 nucleus ^{70}Kr	Phys. Lett. B 785	441	2018
249	※	J. Yasuda et al. <u>T. Motobayashi</u> (60名中29番目), <u>Y. Togano</u> (60名中53番目)	Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in ^{132}Sn	Phys. Rev. Lett. 121	132501	2018
*250	※	M. Wakasugi et al. <u>M. Togasaki</u> (7名中2番目), <u>K. Kurita</u> (7名中4番目)	FRAC: Fringing-RF-field-activated dc-to-pulse converter for low-energy ion beams	Review of Scientific Instruments 89	095107	2018
*251	※	<u>H. Tanaka</u> and <u>S. Sasagawa</u>	Quark mass function at finite temperature in real-time formalism	PTEP, 2019	033B04	2019
252	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (404名中65番目), <u>K. Kurita</u> (404名中157番目), <u>J. Murata</u> (368名中208番目)	Pseudorapidity Dependence of Particle Production and Elliptic Flow in Asymmetric Nuclear Collisions of p+Al, p+Au, d+Au, and 3He+Au at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys. Rev. Lett. 121	222301	2018
253	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (404名中73番目), <u>K. Kurita</u> (404名中182番目), <u>J. Murata</u> (404名中238番目)	Production of π^0 and η mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys. Rev. C 98	54903	2018
254	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (454名中92番目), <u>K. Kurita</u> (454名中214番目), <u>J. Murata</u> (454名中271番目)	Low-momentum direct photon measurement in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV	Phys. Rev. C 98	54902	2018
255	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (293名中51番目), <u>K. Kurita</u> (293名中128番目), <u>J. Murata</u> (293名中167目)	Nonperturbative transverse-momentum-dependent effects in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV	Phys. Rev. D 98	72004	2018
256	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (293名中51番目), <u>K. Kurita</u> (293名中127番目), <u>J. Murata</u> (293名中173番目)	Single-spin asymmetry of J/ ϕ production in p+p, p+Al, and p+Au collisions with transversely polarized proton beams at $s_{NN}=\sqrt{s}=200$ GeV	Phys. Rev. D 98	12006	2018

257	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (431名中79番目), <u>K. Kurita</u> (431名中193番目), <u>J. Murata</u> (431名中252番目)	Cross section and longitudinal single-spin asymmetry AL for forward $W^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \nu$ production in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV	Phys. Rev. D98	32007	2018
258	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (475名中94番目), <u>K. Kurita</u> (475名中219番目), <u>J. Murata</u> (475名中292番目)	Measurement of emission angle anisotropy via long-range angular correlations with high pT hadrons in d+Au and p+p collisions at $\sqrt{sNN}=200$ GeV	Phys. Rev. C98	14912	2018
259	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (353名中61番目), <u>K. Kurita</u> (353名中151番目), <u>J. Murata</u> (353名中199番目)	Measurements of mass-dependent azimuthal anisotropy in central p+Au, d+Au, and 3He+Au collisions at $\sqrt{sNN}=200$ GeV	Phys. Rev. C97	64904	2018
260	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (358名中61番目), <u>K. Kurita</u> (358名中156番目), <u>J. Murata</u> (358名中259番目)	Measurement of ϕ -meson production at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV and its energy dependence from $\sqrt{s}=200$ GeV to 7 TeV	Phys. Rev. D98	92006	2018
261	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (448名中83番目), <u>K. Kurita</u> (448名中205番目), <u>J. Murata</u> (449名中267番目)	Lévy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in $\sqrt{sNN}=200$ GeV Au+Au collisions	Phys. Rev. C97	64911	2018
262	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (317名中56番目), <u>K. Kurita</u> (317名中137番目), <u>J. Murata</u> (317名182番目)	Measurements of Multiparticle Correlations in d+Au Collisions at 200, 62.4, 39, and 19.6 GeV and p+Au Collisions at 200 GeV and Implications for Collective Behavior	Phys. Rev. Lett.120	62302	2018
263	※	PHENIX Collaboration, <u>A. Enokizono</u> (315名中56番目), <u>K. Kurita</u> (315名中136番目), <u>J. Murata</u> (315名中180番目)	Nuclear Dependence of the Transverse-Single-Spin Asymmetry for Forward Neutron Production in Polarized p+A Collisions at $\sqrt{sNN}=200$ GeV	Phys. Rev. Lett.120	22001	2018
*264	※	Sanjay S. Limaye, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (29人中7番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (29人中8番目)	Venus Looks Different at Different Wavelengths: Morphology of the Global Day and Night Cloud Cover at Different Wavelengths from Akatsuki Cameras	Earth Planets Space, 70	24	2018
*265	※	Kuwabara, M., et al., <u>M. Taguchi</u> (9名中2番目), <u>K. Yoshioka</u> (9名中3番目), <u>S. Kameda</u> (9名中7番目)	Evaluation of hydrogen absorption cells for observations of the planetary coronas	Rev. Sci. Instr., 89	23111	2018
*266	※	Leonardo A. dos Santos, Vincent Bourrier, David Ehrenreich, and <u>Shingo Kameda</u>	Observability of hydrogen-rich exospheres in Earth-like exoplanets	Astronomy & Astrophysics 622	A46	2018
*267	※	Giovanna Tinetti, et al., <u>S. Kameda</u> (252人中169番目)	A chemical survey of exoplanets with ARIEL	Experimental Astronomy 46	135	2018
*268	※	Alexander Tavrov, et al., <u>Shingo Kameda</u> (14名中2番目)	Stellar imaging coronagraph and exoplanet coronal spectrometer: two additional instruments for exoplanet exploration onboard the WSO-UV 1.7-m orbital telescope	Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4	44001	2018
269	※	H. Suzuki, et al., <u>S. Kameda</u> (15名中5番目)	Initial inflight calibration for Hayabusa2 optical navigation camera (ONC) for science observations of asteroid Ryugu	Icarus 300	341	2018
*270	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix et al. <u>Kitamoto S.</u> (194名中72番目), <u>Hoshino, A.</u> (192名	Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	113H	2018

		中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (192 名中 173 番目), <u>Ichinohe, Y</u> (192 名中, 55 番目)				
*271	※	Yoshida, Yuki; et al.; <u>Kitamoto, Shunji</u> (6 名中 2 番目); <u>Hoshino, Akio</u> (6 名中 4 番目)	Erratum: “A Suzaku View of Accretion-powered X-Ray Pulsar GX 1+4” (2017, ApJ, 838, 30)	The Astronomical Journal, 868	153Y	2018
*272	※	Yatabe, Fumiaki; et al.; <u>Kitamoto, Shunji</u> (8 名中 6 番目)	An application of the Ghosh & Lamb model to the accretion-powered X-ray pulsar X Persei	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	89Y	2018
*273	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (197 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (192 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (192 名中 172 番目), <u>Ichinohe, Y</u> (197 名中, 55 番目)	Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	38A	2018
*274	※	Eckart, Megan E, et al. <u>Kitamoto S.</u> (28 名中 12 番目), <u>Hoshino, A.</u> (28 名中 9 番目)	Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer	Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4b	1406E	2018
*275	※	Takahashi, Tadayuki, et al. <u>Kitamoto S.</u> (270 名中 103 番目), <u>Hoshino, A.</u> (270 名中 71 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (270 名中 242 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (270 名中, 73 番目)	Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite	Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4b	1402T	2018
*276	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (194 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (194 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (194 名中 173 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (194 名中, 55 番目)	Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	17H	2018
*277	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (191 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (194 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (194 名中 174 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (194 名中, 55 番目)	Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	16H	2018
*278	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (204 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (204 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (204 名中 174 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (204 名中, 55 番目)	Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	15H	2018
*279	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (195 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (195 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (195 名中 174 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (195 名中, 55 番目)	Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	14H	2018
*280	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (194 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (194 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y</u> (194 名中 174 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (194 名中, 55 番目)	Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	13H	2018
*281	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (195 名	Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution	Publications of the Astronomical Society	12H	2018

		中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (195 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (195 名中 174 番目) , <u>Ichinohe, Y.</u> (195 名中, 55 番目)	X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi	of Japan, 70		
*282	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (195 名中 72 番目), <u>Hoshino, A.</u> (195 名中 53 番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (195 名中 174 番目) , <u>Ichinohe, Y.</u> (195 名中, 55 番目)	Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	11H	2018
*283	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (198 名中 75 番目), <u>Hoshino, A.</u> (198 名中 55 番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (198 名中 177 番目) , <u>Ichinohe, Y.</u> (198 名中, 57 番目)	Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	9H	2018
*284	※	Fujimoto, Ryuichi, et al. <u>Kitamoto S.</u> (38 名中 12 番目), <u>Hoshino, A.</u> (38 名中 13 番目)	Performance of the helium dewar and the cryocoolers of the Hitomi soft x-ray spectrometer	Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4a	1208F	2018
*285		Tashiro, Makoto, et al. <u>Kitamoto S.</u> (180 名中 88 番目), <u>Hoshino, A.</u> (180 名中 73 番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (180 名中, 74 番目)	Concept of the X-ray Astronomy Recovery Mission	Proceedings of the SPIE, Volume 10699	22T	2018
*286	※	Ken-ichi Nakao, Pankaj S. Joshi, Jun-Qi Guo, Prashant Kocherlakota, Hideyuki Tagoshi, <u>Tomohiro Harada</u> , <u>Mandar Patil</u> , Andrzej Krolak	On the stability of a superspinar	Phys. Lett. B 780	410	2018
*287	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Bernard J. Carr and <u>Takahisa Igata</u>	Complete conformal classification of the Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker solutions with a linear equation of state	Class. Quant. Grav. 35	105011	2018
*288	※	Takafumi Kokubu, Sanjay Jhingan and <u>Tomohiro Harada</u>	Energy emission from a high curvature region and its backreaction	Phys. Rev. D 97	104014	2018
*289	※	Yasutaka Koga and <u>Tomohiro Harada</u>	Rotating accretion flows in D dimensions: sonic points, critical points and photon spheres	Phys. Rev. D 98	024018	2018
*290	※	Chul-Moon Yoo, <u>Tomohiro Harada</u> , Jaume Garriga and Kazunori Kohri	Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold	PTEP 2018	123	2018
*291	※	Takafumi Kokubu, Koutaro Kyutoku, Kazunori Kohri and <u>Tomohiro Harada</u>	Effect of Inhomogeneity on Primordial Black Hole Formation in the Matter Dominated Era	Phys. Rev. D 98	123024	2018
292	※	D. A. Steer, Marc Lilley, Daisuke Yamauchi, <u>Takashi Hiramatsu</u>	Y-junction intercommutations of current carrying strings	Phys. Rev. D 97	023507	2018
293	※	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Eiichiro Komatsu, Masashi Hazumi, Misao Sasaki	Reconstruction of primordial tensor power spectra from B-mode polarization of the cosmic microwave background	Phys. Rev. D 97	123511	2018
294	※	Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, Hiroyuki Tashiro, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	21cm angular power spectrum from minihalos as a probe of primordial spectral runnings	JCAP 1802	053	2018
295	※	Shohei Saga, Hiroyuki Tashiro,	Magnetic reheating	Mon. Not. Roy.	L52	2018

		<u>Shuichiro Yokoyama</u>		Astron. Soc. 474		
*296	※	Bence Kocsis, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Hidden universality in the merger rate distribution in the primordial black hole scenario	Astrophys. J. 854	41	2018
297	※	Rampey Kimura, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, Daisuke Yamauchi, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Are redshift-space distortions actually a probe of growth of structure?	Publ. Astron. Soc. Jap. 70	L5	2018
298	※	Tomohiro Fujita, Ippei Obata, Takahiro Tanaka, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Statistically anisotropic tensor modes from inflation	JCAP 1807	023	2018
299	※	Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Primordial black holes--perspectives gravitational astronomy	Class. Quant. Grav. 35	063001	2018
300	※	Shohei Saga, Hiroyuki Tashiro, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Lmits on primordial magnetic fields from direct detection experiments of gravitational wave background	Phys. Rev. D 98	083518	2018
301	※	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Shuichiro Yokoyama, Tomohiro Fujita, Ippei Obata	Hunting for statistical anisotropy in tensor modes with B-mode observations	Phys. Rev. D 98	083522	2018
302	※	Shunichiro Kinoshita, <u>Takahisa Igata</u>	The essence of the Blandford--Znajek process	Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018	33	2018
303	※	<u>Takahisa Igata</u>	Scale invariance and constants of motion	Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018	63	2018
304	※	<u>Takahisa Igata</u> , Hideki Ishihara, Masataka Tsuchiya, Chul-Moon Yoo	Rigidly Rotating String Sticking in a Kerr Black Hole	Physical Review D 98	64021	2018
305	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (247 名中 215 番目)	Detection of variable VHE γ -ray emission from the extra-galactic γ -ray binary LMC P3	A&A610	17	2018
306	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (260 名中 228 番目)	The H.E.S.S. Galactic plane survey	A&A, 612	1	2018
307	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (257 名中 226 番目)	The population of TeV pulsar wind nebulae in the H.E.S.S. Galactic Plane Survey	A&A, 612	2	2018
308	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (254 名中 222 番目)	Population study of Galactic supernova remnants at very high γ -ray energies with H.E.S.S.	A&A, 612	3	2018
309	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (256 名中 223 番目)	The supernova remnant W49B as seen with H. E. S. S. and Fermi-LAT	A&A, 612	5	2018
310	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (257 名中 225 番目)	H. E. S. S. observations of RX J1713.7-3946 with improved angular and spectral resolution: Evidence for gamma-ray emission extending beyond the X-ray emitting shell	A&A, 612	6	2018
311	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (261 名中 229 番目)	Deeper H. E. S. S. observations of Vela Junior (RX J0852.0-4622): Morphology studies and resolved spectroscopy	A&A, 612	7	2018
312	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (235 名中 199 番目)	A search for new supernova remnant shells in the Galactic plane with H. E. S. S.	A&A, 612	8	2018
313	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (258 名中 227 番目)	Characterising the VHE diffuse emission in the central 200 parsecs of our Galaxy with H. E. S. S.	A&A, 612	9	2018

314	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (262 名中 230 番目)	Systematic search for very-high-energy gamma-ray emission from bow shocks of runaway stars	A&A, 612	12	2018
315	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (254 名中 216 番目)	HESS J1741-302: a hidden accelerator in the Galactic plane	A&A, 612	13	2018
316	※	MAGIC Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (410 名中 378 番目)	Constraints on particle acceleration in SS433/W50 from MAGIC and H. E. S. S. observations	A&A, 612	14	2018
317	※	Hagino, K. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (41 名中 37 番目)	In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)	JATIS, 4	1409	2018
318	※	Nakazawa, K. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (37 名中 33 番目)	Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)	JATIS, 4	1410	2018
319	※	Tajima, H. et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (42 名中 37 番目)	Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite	JATIS, 4	1411	2018
320	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (256 名中 224 番目)	H. E. S. S. discovery of very high energy γ -ray emission from PKS 0625-354	MNRAS, 476	4187	2018
321	※	Abdallah, H et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (258 名中 226 番目)	Search for γ -Ray Line Signals from Dark Matter Annihilations in the Inner Galactic Halo from 10 Years of Observations with H. E. S. S.	PRL, 120	1101	2018
322	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (234 名中 204 番目)	The starburst galaxy NGC 253 revisited by H. E. S. S. and Fermi-LAT	A&A, 617	73	2018
323	※	Tanaka T, et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (13 名中 12 番目)	NuSTAR Detection of Nonthermal Bremsstrahlung from the Supernova Remnant W49B	ApJ, 866	26	2018
324	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (253 名中 215 番目)	The γ -ray spectrum of the core of Centaurus A as observed with H. E. S. S. and Fermi-LAT	A&A, 619	71	2018
325	※	Abdalla, H, et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (235 名中 202 番目)	Searches for gamma-ray lines and 'pure WIMP' spectra from Dark Matter annihilations in dwarf galaxies with H. E. S. S.	JCAP, 11	37	2018
326	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (243 名中 213 番目)	First ground-based measurement of sub-20 GeV to 100 GeV γ -Rays from the Vela pulsar with H. E. S. S. II	A&A, 620	66	2018
327	※	Khangulyan, Dmitry; Bosch-Ramon, Valentí; <u>Uchiyama, Yasunobu</u>	Inverse Compton emission from relativistic jets in binary systems	MNRAS, 481	1455	2018
328	※	Katsuragawa, Miho; et al.; <u>Uchiyama, Yasunobu</u> (9 名中 7 番目)	Suzaku X-ray observations of the mixed-morphology supernova remnant CTB 1	PASJ, 70	110	2018
329	※	H. E. S. S. Collaboration; <u>Uchiyama, Y.</u> (229 名中 201 番目)	Particle transport within the pulsar wind nebula HESS J1825-137	A&A, 621	116	2018
330	※	Abdalla, H, et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (229 名中 199 番目)	The 2014 TeV γ -Ray Flare of Mrk 501 Seen with H. E. S. S.: Temporal and Spectral Constraints on Lorentz Invariance Violation	ApJ, 870	93	2018
331	※	Abdalla, H, et al. <u>Uchiyama, Y.</u> (234 名中 204 番目)	VHE γ -ray discovery and multiwavelength study of the blazar 1ES 2322-409	MNRAS, 482	3011	2018
332	※	Shin'ichi Hirano, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Hiroyuki Tashiro, <u>Shuichiro Yokoyama</u>	Matter bispectrum beyond Horndeski	Phys.Rev. D97	103517	2018
*333	※	Tsutomu Kobayashi, <u>Takashi Hiramatsu</u>	Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories	Phys.Rev. D97	104012	2018

			after GW170817			
334	※	Hiroaki W. H. Tahara, Sakine Nishi, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Jun'ichi Yokoyama	Self-anisotropizing inflationary universe in Horndeski theory and beyond	JCAP 1807	058	2018
*335	※	Atsushi Nishizawa, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Parity-violating gravity and GW170817	Phys. Rev. D 98	124018	2018
336	※	Aya Iyonaga, Kazufumi Takahashi, <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Extended Cuscuton: Formulation	JCAP 1812	2	2018
*337	※	Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix, et al. <u>Kitamoto S.</u> (195名中72番目), <u>Hoshino, A.</u> (195名中53番目), <u>Uchiyama, Y.</u> (195名中174番目), <u>Ichinohe, Y.</u> (195名中,55番目)	Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS	Publications of the Astronomical Society of Japan, 70	10H	2018
338	※	H. Ogawa, <u>T. Hiramatsu</u> and <u>T. Kobayashi</u>	Anti-screening of the Galileon force around a disk center hole	Mod. Phys. Lett. A 34	1950013	2019
*339	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Vitor Cardoso and Daiki Miyata	Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object	Physical Review D	accepted	2019
*340	※	K. Ban, M. Akiwa, <u>H. Ueta</u> , <u>T. Tachibana</u> , and <u>T. Hirayama</u>	New ion desorption mechanism from rare gas solids by multiply charged ion impacts	Low Temperature Physics	submitted	2019
*341	※	H. Sawa, S. Uchida, <u>H. Ueta</u> , and <u>T. Hirayama</u>	System for coincidence measurements of the ions desorbed and projectiles scattered from noble gas solid surfaces by slow multiply-charged ion impacts	X-Ray Spectrometry	submitted	2019

<学会発表>

No	発表者名	発表標題	学会名	開催地	発表年月
342	<u>Tomohiro Harada</u>	Threshold of primordial black hole formation	The 15th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics	University of Winnipeg	2014年5月
343	<u>小林努</u>	一般相対論の拡張	背景放射で拓く宇宙創成の物理 - インフレーションからダークエイジまで - シンポジウム 2014	理研和光キャンパス	2014年6月
*344	<u>Makoto TAGUCHI</u> (11名中1番目), 他	A Circumpolar Stratospheric Telescope for Observations of Planets - FUJIN	11th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Royton Sapporo Hotel, Sapporo	2014年7月
*345	<u>KAMEDA, Shingo</u> (9名中1番目); 他; <u>TAGUCHI Makoto</u> (9名中5番目)	Observation of Geocorona using Lyman Alpha Imaging Camera (LAICA) onboard the very small deep space explorer PROCYON	COSPAR 2014	Moscow (Russia)	2014年8月
*346	<u>Yasunobu Uchiyama</u>	X-ray and Gamma-ray Observations of Supernova Remnants	超新星・ガンマ線バースト研究会	理化学研究所	2014年8月
*347	K. Ban, M. Akiwa, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Mechanism of Ion Desorption from Rare Gas Solids by Low Energy Multiply-charged Ion Impact, [Selected Topic]	17th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI-2014)	San Carlos de Bariloche, Argentina,	2014年9月

*348	岩渕あづさ, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	レーザープラズマ光源を用いた希ガス固体における光励起脱離実験 II,	日本物理学会 2014 年秋季大会	中部大学春日井キャンパス	2014 年 9 月
*349	<u>北本俊二</u> , 津村大樹, 林祐	銀河団の高エネルギー分光観測における重力赤方偏移の影響	日本天文学会 2014 年秋季年会	山形大学	2014 年 9 月
350	津村大樹, <u>北本俊二</u> , 小松飛斗, <u>星野晶夫</u>	早期型星の X 線放射機構の観測的研究	日本天文学会 2014 年秋季年会	山形大学	2014 年 9 月
351	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Vainshtein mechanism in the Horndeski theory and beyond	Relativistic Cosmology	京都大学基礎物理学研究所	2014 年 9 月
352	<u>小林努</u> , 棚橋典大	Exact black hole solutions in shift symmetric scalar-tensor theories	日本物理学会秋季大会	佐賀大学	2014 年 9 月
353	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Primordial non-Gaussianity in large scale structure	Relativistic Cosmology	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University	2014 年 9 月
354	<u>Jiro Murata</u>	The MTV T-Violation Experiment with ^8Li	Solvay Workshop on "Beta-Decay Weak Interaction Studies in the Era of the LHC"	International Solvay Institute Brussels, Belgium	2014 年 9 月
355	<u>原田知広</u> , 柳哲文	漸近的準一様 解について	日本物理学会 2014 年秋季大会	佐賀大学	2014 年 9 月
*356	<u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u> , 長嶋泰之	Ion desorption from $\text{TiO}_2(110)$ surface induced by positron annihilations, [Hot Topics]	原子衝突学会第 3 9 回年会	東北大学片平キャンパス	2014 年 10 月
357	S. Matoba, et al., <u>T. Koizumi</u> (10 名中 9 番目)	Detection efficiencies of a tapered microchannel plate with high open-area-ratio	11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics	東北大学	2014 年 10 月
358	<u>A. ENOKIZONO</u> (15 名中 1 番目), et al., <u>K. KURITA</u> (15 名中 6 番目),	Development of the electron spectrometer for the SCRIT experiment	4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan	Waikoloa, Hawaii	2014 年 10 月
359	DAICHI MURAI, et al., <u>KAZUO IEKI</u> (10 名中 2 番目)	Development of the electron spectrometer for the SCRIT experiment	4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan	Waikoloa, Hawaii	2014 年 10 月
*360	<u>Makoto Taguchi</u> (12 名中 1 番目), et al.	Observation of planets by a circumpolar stratospheric telescope system FUJIN	地球電磁気・地球惑星圏学会、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	キッセイ文化ホール、松本	2014 年 10 月
*361	前田惇徳、他、 <u>田口 真</u> (11 名中 2 番目)	惑星観測を目指した極周回成層圏望遠鏡 FUJIN	地球電磁気・地球惑星圏学会、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	キッセイ文化ホール、松本	2014 年 10 月
*362	<u>T. Tachibana</u> , <u>T. Hirayama</u> , and Y. Nagashima	Positron-annihilation-induced ion desorption from $\text{TiO}_2(110)$	7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)	Matsue, Japan,	2014 年 11 月
*363	岩渕あづさ, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	レーザープラズマ光源を用いた希ガス凝縮層からの光励起脱離の観測,	第 55 回真空に関する連合講演会	大阪府立大学「I-site なんば」	2014 年 11 月
*364	<u>田口 真</u> (10 名中 1 番目)、他	極周回成層圏テレスコープ(FUJIN)による惑星大気観測計画	平成 26 年度大気球シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2014 年 11 月

*365	<u>Tomohiro Harada</u>	Black holes as particle accelerators: a brief review	The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	University of Tokyo	2014年11月
*366	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generalized Galilean Genesis	CosPA 2014	Auckland, New Zealand	2014年12月
367	<u>村田次郎</u>	重力と時空の謎 ～三次元を超える宇宙を探る～	長崎総科大 新技術創成研究所 基礎科学部門 設立記念シンポジウム 「21世紀の科学技術」	長崎	2014年12月
368	<u>Jiro Murata</u>	Testing Gravity at Short Scale	Testing Gravity 2015	Vancouver, Canada	2015年1月
*369	佐藤允基, 他, <u>亀田真吾</u> (8名中2番目), <u>田口真</u> (8名中5番目)	PROCYON 搭載 LAICA によるジオコロナの撮像	第15回宇宙科学シンポジウム	宇宙科学研究所, 相模原	2015年1月
*370	Atsunori MAEDA, 他, <u>Makoto TAGUCHI</u> (10名中2番目)	極周回成層圏望遠鏡による惑星観測 - FUJIN プロジェクト -	第15回宇宙科学シンポジウム	宇宙科学研究所, 相模原	2015年1月
371	<u>原田知広</u>	宇宙論的長波長解と原始ブラックホール形成	第16回特異点研究会 「特異点と時空、および関連する物理」	名古屋大学	2015年1月
*372	岩渕あづさ, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	レーザープラズマ光源を用いた希ガス固体における光励起脱離実験 III,	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学早稲田キャンパス	2015年3月
*373	<u>立花隆行</u> , L. Chiari, 柳楽勝, <u>平山孝人</u> , 長嶋泰之	低速陽電子入射による TiO ₂ (110)からの内殻電子消滅誘起イオン脱離の観測2	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学早稲田キャンパス	2015年3月
*374	的場史朗, 他, <u>小泉哲夫</u> , (11名中9番目)	高開口率テーパー型マイクロチャンネルプレートでのイオン検出効率測定	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学	2015年3月
*375	加藤遼也, 他, <u>小泉哲夫</u> (7名中7番目)	高開口率テーパー型マイクロチャンネルプレート検出効率のイオン入射角依存性	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学	2015年3月
*376	<u>高谷一成</u> (7名中1番目), 他, <u>小泉哲夫</u> (7名中4番目)	Li ⁺ -(2-butanol) _n (n=1-3)のヘリウム中における移動度測定	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学	2015年3月
377	松尾咲希, 他, <u>榎園昭智</u> (16名中3番目), <u>栗田和好</u> (16名中5番目)	SCRIT 実験における散乱電子スペクトロメーターの開発	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学	2015年3月
*378	<u>榎園昭智</u> (15名中1番目), 他, <u>栗田和好</u> (15名中4番目), <u>戸ヶ崎衛</u> (15名中9番目)	SCRIT 法を用いた電子・不安定核散乱実験に向けたルミノシティ決定精度の評価	日本物理学会第70回年次大会	早稲田大学	2015年3月
*379	<u>小林 努</u> , 渡辺悠貴, 山内大介	Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski	日本物理学会年次大会	早稲田大学	2015年3月
380	<u>村田次郎</u>	余剰次元探索としての近距離重力実験のレビューと Newton 実験	KMI 分野横断セミナー	名古屋大学	2015年3月
381	<u>原田知広</u> , 柳哲文, 中間智弘, 古賀恭敬	宇宙論的非線形ゆらぎと原始ブラックホール形成	日本物理学会2015年次大会	早稲田大学	2015年3月
*382	池澤祥太, <u>亀田真吾</u> , 佐藤允基, 桑原正輝, 吉川一朗, <u>田口真</u>	ジオコロナ撮像装置 LAICA の開発と撮像結果	日本地球惑星科学連合2015年大会	千葉	2015年5月
383	<u>Jiro Murata</u>	The MTV experiment : Searching T-Violation in polarized Li-8 at TRIUMF	the 6th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (SSP 2015)	Victoria, Canada	2015年6月
*384	<u>Tomohiro Harada</u>	High energy particle collision and collisional Penrose process near a Kerr black hole	One Hundred Years of Strong Gravity	Instituto Superior Técnico in Lisbon	2015年6月
385	K. Ban, et al., <u>T. Tachibana</u> (7名中6番目), <u>T. Hirayama</u> , (7名	New mechanism of ion desorption from rare gas solids by	24th International Conference on	Toledo, Spain,	2015年7月

	中7番目)	multiply-charged ion impact	Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2015)		
*386	<u>K. Takaya</u> , (7名中1番目), et al., <u>T. Koizumi</u> (7名中4番目)	Mobilities of $\text{Li}^+-(2\text{-butanol})_n$ (n=1-2) ions in He gas	XXIX International Conference of Photonic, Electronic, and Atomic Collisions	Toledo	2015年7月
*387	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Galilean Creation of the Inflationary Universe	MG14	Rome, Italy	2015年7月
388	<u>Kitamoto, Shunji</u> (6名中1番目); et al.; ASTRO-H Collaboration, High-Mass Binaries; Magnetars	Prospect with ASTRO-H on New Sciences of Accreting Pulsars, Magnetars, & Related Sources	American Astronomical Society, AAS Meeting #225, id. 345.22	Seattle, USA	2015年7月
*389	<u>Tomohiro Harada</u>	Primordial black hole formation from cosmological fluctuations	the international conference 'Hot Topics in General Relativity and Gravitation 2''	Quy Nhon	2015年8月
390	<u>Jiro Murata</u> for the MTV collaboration	Report from the MTV experiment searching T-Violation in polarized Li-8 at ISAC	TRIUMF Nuclear Physics Seminar	Vancouver, Canada	2015年8月
*391	<u>T. Tachibana</u> , L. Chiari, M. Nagira, <u>T. Hirayama</u> and Y. Nagashima,	Observation of positron-annihilation-induced ion desorption from a $\text{TiO}_2(110)$ surface	International Conference on Positron Annihilation (ICPA-17)	Wuhan, China,	2015年9月
*392	柳楽勝, <u>立花隆行</u> , L. Chiari, <u>平山孝人</u> , 長嶋泰之	$\text{TiO}_2(110)$ 上における陽電子消滅誘起イオン脱離	日本物理学会 2015 年秋季大会	関西大学千里山キャンパス	2015年9月
*393	<u>立花隆行</u> , L. Chiari, 柳楽勝, <u>平山孝人</u> , 長嶋泰之	$\text{TiO}_2(110)$ 表面上における陽電子刺激イオン脱離の入射エネルギー依存性	日本物理学会 2015 年秋季大会	関西大学千里山キャンパス	2015年9月
*394	安西央, 高野順也, 菊池朝海, 河田恭佑, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	光電効果を利用した低エネルギー電子線を用いた電子衝撃脱離実験	日本物理学会 2015 年秋季大会	関西大学千里山キャンパス	2015年9月
395	<u>高谷一成</u> , 羽賀友音, <u>小泉哲夫</u> , 的場史朗, 小島隆夫, 田沼肇	ヘリウム中におけるクラスターイオンの移動度測定と MOBCAL による理論計算	日本物理学会秋季大会	関西大学	2015年9月
*396	<u>榎園昭智</u> (15名中1番目), 他, <u>栗田和好</u> (15名中4番目), <u>戸ヶ崎衛</u> (15名中9番目)	SCRIT 法を用いた電子・不安定核散乱実験に向けたルミノシティ決定精度の評価	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
397	<u>戸ヶ崎衛</u> (7名中1番目), 他, <u>栗田和好</u> (7名中3番目)	SCRIT 実験のためのイオンビームクロー・バンチャーの開発	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
398	村井大地, 他, <u>家城和夫</u> (22名中2番目)	大強度 ^{48}Ca ビームを用いた F 中性子ドリップラインの探索	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
399	志賀慶明, 他, <u>家城和夫</u> (37名中18番目), <u>本林透</u> (37名中22番目)	中性子過剰 Zn 同位体の低励起状態観測による二重魔法核 ^{78}Ni 近傍の核構造の研究	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
400	村井大地, 他, <u>家城和夫</u> (22名中2番目)	大強度 ^{48}Ca ビームを用いた中性子ドリップライン探索 II	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
*401	<u>小林 努</u> , 山口昌英, 横山順一	Galilean Creation of the Inflationary Universe	日本物理学会秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
402	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Excavating primordial non-Gaussianities in large scale structure	International Workshop on Particle Physics and Cosmology	Tohoku University	2015年9月
403	北嶋直弥, David Langlois, 高橋智, 横山修一郎	カーバトンシナリオにおける物質等曲率揺らぎ	日本物理学会 2015 年秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
404	<u>原田知広</u> , Sanjay Jhingan	Szekeres 解の宇宙物理学への応用	日本物理学会 2015 年秋季大会	大阪市立大学	2015年9月
*405	<u>田口 真</u> , 他	「あかつき」搭載中間赤外カメラが目指すサイエンス	日本気象学会 2015 年度秋季大会	京都テルサ、京都	2015年10月

*406	池澤祥太, 亀田真吾, 佐藤允基, 桑原正輝, 吉川一朗, 田口真	ジオコロナ撮像装置 LAICA の開発と撮像結果	地球電磁気・地球惑星圏学会 2015 年秋学会	千葉	2015 年 10 月
*407	Y. Uchiyama	X-ray and Gamma-ray Study of Supernova Remnants	TeV Particle Astrophysics	Kashiwa (Japan)	2015 年 10 月
*408	田口 真 (11 名中 1 番目)、他	極周回成層圏望遠鏡 (FUJIN) による惑星大気観測計画	平成 27 年度大気球シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2015 年 11 月
409	Kitamoto, S.	Two Challenges for a High Angular Resolution X-ray Telescope: The Adaptive Optics and The Interferometer	「第 13 回 X 線結像光学シンポジウム」	名古屋大学	2015 年 11 月
410	吉田裕貴, 北本俊二	X 線補償光学 望遠鏡と X 線干渉計の開発	「X 線望遠鏡勉強会 2015」	名古屋大学	2015 年 11 月
*411	Takuma Ikeda, Yasunobu Uchiyama	Detection of Ti-K X-ray Line Emission from Cassiopeia A Using Chandra Observations	JAXA 宇宙科学シンポジウム SNSNR2015	相模原	2015 年 11 月
*412	Naomi Tsuji, Yasunobu Uchiyama	Confronting SNR Evolution Models with X-ray Observations of RX J1713.7-3946 and Vela Jr	JAXA 宇宙科学シンポジウム SNSNR2015	相模原	2015 年 11 月
*413	Tsutomu Kobayashi	Galilean Creation of the Inflationary Universe	Second LeCosPA International Symposium Everything About Gravity	Taipei, Taiwan	2015 年 12 月
*414	亀田真吾, 他	PROCYON/LAICA によるチュリュモフ・グラシメンコ彗星が放出した水素ガスの観測	第 16 回宇宙科学シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2016 年 1 月
*415	原田知広	Can an over-spinning Kerr geometry be the source of ultra-high energy cosmic rays and neutrinos?	第 17 回特異点研究会 「特異点と時空、および関連する物理」	慶應義塾大学	2016 年 1 月
*416	原田知広	PBH の非球対称形成モデル	第 17 回特異点研究会 「特異点と時空、および関連する物理」	慶應義塾大学	2016 年 1 月
417	伊形尚久	自己相似ストリング	第 17 回特異点研究会 「特異点と時空、および関連する物理」	慶応大学	2016 年 1 月
418	上野雅知, 三浦大地, 喜多一真, 野村哲平, 立花隆行, 平山孝人	電子エネルギー損失分光法による希ガスクラスターにおける電子的励起過程の研究	日本物理学会第 71 回年次大会	東北学院大学 泉キャンパス	2016 年 3 月
*419	安西央, 河田恭佑, 菊地朝海, 立花隆行, 平山孝人	Ne 固体における Feshbach 共鳴を経由した励起原子の脱離	日本物理学会第 71 回年次大会	東北学院大学 泉キャンパス	2016 年 3 月
*420	榎園昭智 (18 名中 1 番目), 他, 栗田和好 (18 名中 5 番目), 戸ヶ崎衛 (18 名中 10 番目)	SCRIT 法を用いた Xe 同位体標的における電子散乱のルミノシティ測定	日本物理学会第 71 回年次大会	東北学院大学	2016 年 3 月
*421	田口 真 (12 名中 1 番目)、他、福原哲哉 (12 名中 2 番目)	「あかつき」中間赤外カメラによる金星雲頂温度観測	第 29 回大気圏シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2016 年 3 月
*422	原田知広	ブラックホール周辺: 衝突 Penrose 過程・光子球/音速点对 応	ブラックホール磁気圏研究会 2016	北海道夕張市 ホテルマウントレースイ	2016 年 3 月
*423	原田知広, Sanjay Jhingan	原始ブラックホールの非球対称形成モデル: 厳密解	日本物理学会 2016 年 年次大会	東北学院大学	2016 年 3 月
424	伊形尚久, 富沢真也	Levi-Civita の重力 2 ソリトン	日本物理学会第 71 回年次大会	東北学院大学	2016 年 3 月
*425	Taguchi, M. (13 名中 1 番目), et al., T. Fukuhara (13 名中 2 番目)	Initial results of the Venusian cloud-top temperature observations by Akatsuki/LIR	International Venus Conference 2016	Merton College, Oxford, UK	2016 年 4 月
*426	田口 真 (12 名中 1 番目)、他、福原哲哉 (12 名中 2 番目)	あかつき搭載中間赤外カメラによる金星雲頂温度観測の初期結果	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	幕張メッセ、千葉県	2016 年 5 月
427	Kazuyoshi Kurita	How electron scattering	International	立教大学	2016 年 6 月

		experiments with the unstable nuclei target	Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOT016)		
428	<u>Tohru Motobayashi</u>	Technological and methodological developments	International Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOT016)	立教大学	2016年6月
*429	Takuma Ikeda, <u>Yasunobu Uchiyama</u>	Detection of Ti-K X-ray Line Emission from Cassiopeia A with Chandra Observatory	Many Riddles About Core-Collapse Supernovae	NAOJ, Japan	2016年6月
*430	A. Iwabuchi, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on solid Ne,	39th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX-39)	Zurich, Switzerland,	2016年7月
431	A. Iwabuchi, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on solid Ne,	39th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX-39)	Zurich, Switzerland,	2016年7月
432	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Primordial non-Gaussianities of gravitational waves beyond Horndeski	21st International Conference on General Relativity and Gravitation	Columbia University, New York, US	2016年7月
*433	Naomi Tsuji, <u>Yasunobu Uchiyama</u> , Satoru Katsuda, David Berge, Felix Aharonian	Chandra and NuSTAR observations of SNR RXJ1713.7-3946	6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016)	Heidelber, Germany	2016年7月
*434	<u>Tomohiro Harada</u>	Correspondence between sonic points of ideal photon gas accretion and photon spheres	the 21st International Meeting on General Relativity and Gravitation	Columbia University, New York	2016年7月
*435	<u>T. Hirayama</u>	Electronic excitations and decay processes in condensed rare gases studied by low-energy electron, photon, and ion impact [Invited Talk]	77th IUVESTA Workshop on Surface Processes, Gas Dynamics, and Vacuum Technology of Cryogenic Vacuum Systems	Fuefuki-city, Yamanashi, Japan	2016年8月
*436	<u>Makoto Taguchi</u> (12名中1番目), et al., <u>Testuya Fukuhara</u> (12名中2番目)	Venusian Cloud-Top Temperature Observed by Akatsuki/LIR	13th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	China National Convention Centre, Beijing, China	2016年8月
437	S. Kitamoto (8名中1番目), et al., <u>A. Hoshino</u> (8名中8番目)	Recent performance of the normal incident X-ray telescope with adaptive optics	SPIE, 9965-19	San Diego, USA	2016年8月
*438	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Revisiting matter isocurvature fluctuations in the curvaton scenario	COSMO-16	Michigan, USA	2016年8月
*439	H. Sawa, M. Anzai, T. Konishi, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Development of a low-energy electron gun using the photoelectric effect	32th European Conference on Surface Science (ECOSS32)	Grenoble, France,	2016年9月
*440	山下貴志, <u>立花隆行</u> , 柳楽勝, 矢吹壽国, <u>平山孝人</u> , 長嶋泰之	TiO ₂ (110)表面における陽電子刺激イオン脱離取量と S-parameter の比較	日本物理学会 2016 年秋季大会	金沢大学角間キャンパス	2016年9月
*441	<u>立花隆行</u> (7名中1番目), <u>平山孝人</u> (7名中6番目)	TiO ₂ (110) および H ₂ O/TiO ₂ 表面上における陽電子刺激イオン脱離	日本物理学会 2016 年秋季大会	金沢大学角間キャンパス	2016年9月

*442	藤田峻広, 他, 榎園昭智 (17 名中 4 番目), 栗田和好 (17 名中 6 番目), 戸ヶ崎衛 (17 名中 10 番目)	SCRIT 法を用いた Xe 同位体標的・電子散乱実験における ルミノシティ測定	日本物理学会秋季大会	宮崎大学	2016 年 9 月
443	<u>Akitomo ENOKIZONO</u>	The performance of the SCRIT detectors for electron-RI scattering experiment	International Nuclear Physics Conference	Adelaid Convention Center, Austraria	2016 年 9 月
444	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	PBH scenario for GW150914	Workshop on Particle Physics, Cosmology, and Gravitation	TiTech	2016 年 9 月
*445	<u>Y. Uchiyama</u>	<u>Gamma Rays from Supernova Remnants</u>	Cosmic Ray Origin - Beyond the Standard Models	San Vito di Cadore (Italy)	2016 年 9 月
446	平松尚志, 齊藤遼, 成子篤, 佐々木節	CMB bispectrum of tensor perturbations	日本物理学会 2016 年秋季大会	宮崎大学	2016 年 9 月
447	<u>伊形尚久</u>	定常回転ストリングによる Kerr ブラックホールからのエネルギー引き抜き	五色浜相対論研究会	ウエル五色浜リゾートセンター	2016 年 9 月
448	<u>Jiro Murata for the MTV collaboration</u>	The MTV Experiment: from T-violation To Lorentz-violation	International Nuclear Physics Conference 2016 (INPC 2016)	Adelaide, Australia	2016 年 9 月
*449	<u>原田知広</u> , Sanjay Jhingan, 郡 和範, 中尾憲一, 柳哲文	楕円体の重力崩壊のブラックホール形成条件	日本物理学会 2016 年秋季大会	宮崎大学	2016 年 9 月
*450	<u>Makoto Taguchi</u> (12 名中 1 番目), et al., <u>Tetsuya Fukuhara</u> (12 名中 2 番目)	A bow-shaped thermal structure traveling upstream of the zonal wind flow of Venus atmosphere	DPS 48/EPSC 11	Pasadena Convention Center, Pasadena, U. S. A.	2016 年 10 月
*451	<u>福原哲哉</u> (17 名中 1 番目)、他、 <u>田口 真</u> (17 名中 13 番目)	金星雲頂高度に発見された巨大重力波	日本気象学会 2016 年度秋季大会	名古屋大学、名古屋	2016 年 10 月
*452	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem	JGRG26	大阪市立大学	2016 年 10 月
453	<u>Takashi Hiarmatsu</u> , Daisuke Yamauchi, Daniele Steer	Colliding strings coupled to matter field	JGRG26	大阪市立大学	2016 年 10 月
*454	<u>Tomohiro Harada</u>	Primordial black hole formation in a matter-dominated universe	The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Osaka City University	2016 年 10 月
455	<u>Takahisa Igata</u>	Self-similar motion of a Nambu-Goto string	The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Osaka City University	2016 年 10 月
*456	<u>田口 真</u> (10 名中 1 番目)、他	極周回成層圏テレスコープ (FUJIN) による惑星大気観測計画	平成 28 年度大気球シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2016 年 11 月
*457	<u>田口 真</u> (19 名中 1 番目)、他、 <u>福原哲哉</u> (19 名中 5 番目)	金星大気中に発見された巨大定在重力波	地球電磁気・地球惑星圏学会、第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	九州大学、福岡	2016 年 11 月
*458	高村真央、他、 <u>田口 真</u> (14 名中 3 番目)、 <u>福原哲哉</u> (14 名中 4 番目)	あかつき中間赤外カメラによる金星極域大気温度構造の解析	地球電磁気・地球惑星圏学会、第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	九州大学、福岡	2016 年 11 月
*459	神山 徹、他、 <u>田口 真</u> (7 名中 2 番目)、 <u>福原哲哉</u> (7 名中 3 番目)	LIR によって観測された金星雲頂高度における温度構造とその時間変化	地球電磁気・地球惑星圏学会、第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	九州大学、福岡	2016 年 11 月
*460	Masaki Kuwabara, <u>Makoto</u>	Evaluation of hydrogen absorption	地球電磁気・地球惑星圏	九州大学、福岡	2016 年 11 月

	Taguchi, Kazuo Yoshioka, Tokio Ishida, Shingo Kameda, and Ichiro Yoshikawa	cells for observation of the planetary coronas	学会、第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会		
*461	山下貴志, 立花隆行, ルカ・チアリ, 柳楽勝, 矢吹壽国, 平山孝人, 長嶋泰之	二酸化チタン表面における陽電子刺激イオン脱離収率と S-parameter の入射エネルギー依存性	平成 28 年度京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」	京都大学原子炉実験所	2016 年 12 月
*462	山下貴志, 立花隆行, 柳楽勝, 矢吹壽国, L. Chiari, 平山孝人, 長嶋泰之	TiO ₂ (110)表面からの陽電子刺激イオン脱離と電子刺激イオン脱離の比較 [優秀ポスター賞]	原子衝突学会第 41 回年会	富山大学五福キャンパス	2016 年 12 月
*463	佐和弘祥, 内田俊太郎, 高久旭, 山口雄太, 立花隆行, 平山孝人	希ガス固体表面への低速多価イオン小角衝突における散乱イオン・脱離イオン同時計測装置の開発	原子衝突学会第 41 回年会	富山大学五福キャンパス	2016 年 12 月
464	長谷川優也, 高谷一成, 小泉哲夫	He, Ne 気体中における分子イオン C ₂ H ₂ O ⁺ 構造異性体の移動度	原子衝突学会第 41 回年会	富山大学	2016 年 12 月
*465	的場史朗, 岡嶋将司, 森屋穰, 小泉哲夫, 城丸春夫, 高橋果林	コーティンググレーパー型マイクロチャンネルプレートのイオン検出効率	原子衝突学会第 41 回年会	富山大学	2016 年 12 月
*466	田口 真	水素吸収セル法による惑星コロナ観測	「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会	核融合科学研究所、土岐	2016 年 12 月
467	Tomohiro Takamatsu, Shingo Kameda, Seiji Sugita	Laboratory Studies on Multi-Band Imaging of Hydrated Mineral Distribution by Hayabusa2/ONC-T	AGU Fall meeting 2016	San Francisco (USA)	2016 年 12 月
468	Hiroki Horikoshi, Shingo Kameda, Go Murakami, Masahiro Ikoma, Norio Narita	Feasibility studies for the detection of atomic oxygen exospheres of terrestrial planets in the habitable zone of a low-temperature star with a UV space telescope	AGU Fall meeting 2016	San Francisco (USA)	2016 年 12 月
469	村田次郎	近距離重力実験	第 29 回理論懇話会シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」	東北大学	2016 年 12 月
470	村田次郎	画像認識型変位計を用いた余剰次元探索実験	東工大先端物理計測開発室キックオフワークショップ	東京工業大学	2016 年 12 月
471	原田知広	原始ブラックホール形成と縮予想	第 18 回特異点研究会	立教大学	2016 年 12 月
472	伊形尚久	Energy extraction from Kerr black holes by rigidly rotating strings	第 18 回特異点研究会『特異点と時空、および関連する物理』	立教大学	2016 年 12 月
473	喜多一真, 野村哲平, 竹田駿, 平山孝人, 立花隆行	混合希ガスクラスタを標的とした電子的励起過程の研究	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学豊中キャンパス	2017 年 3 月
474	野村哲平, 喜多一真, 竹田駿, 平山孝人, 立花隆行	電子衝撃によりクラスタから解離した準安定励起原子の観測	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学豊中キャンパス	2017 年 3 月
*475	佐和弘祥, 高久旭, 山口雄太, 内田俊太郎, 立花隆行, 平山孝人	希ガス固体表面への低速多価イオン小角衝突における散乱イオン・脱離イオン同時計測装置の開発 II	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学豊中キャンパス	2017 年 3 月
*476	山下貴志, 他, 立花隆行, (9 名中 2 番目), 平山孝人(9 名中 8 番目)	TiO ₂ (110)表面における陽電子刺激イオン脱離と表面捕獲陽電子	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学豊中キャンパス	2017 年 3 月
477	山田耕平, 他, 栗田和好 (8 名中 3 番目), 戸ヶ崎衛 (8 名中 4 番目)	SCRIT 実験のためのイオンビームバンチャーの開発	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学	2017 年 3 月
478	藤田峻広, 他, 榎園昭智 (21 名中 5 番目), 栗田和好 (21 名中 8 番目), 戸ヶ崎衛 (21 名中 13 番)	電子蓄積リングにおける電子散乱実験の制動輻射を用いたルミノシティ測定	日本物理学会第 72 回年次大会	大阪大学	2017 年 3 月

	目)				
479	中島秀, 栗田和好	イオン照射装置性能評価のためのビームプロファイルモニター及びペーパーポットエミッタンスメータの開発	日本物理学会第72回年次大会	大阪大学	2017年3月
*480	星野晶夫, 石井亮太, 大木悠生, 佐藤清香, 糠森里美, 北本俊二	TES型X線マイクロカロリメータ動作環境の構築と評価	日本天文学会2017年春季年会		2017年3月
481	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generic instabilities of non-singular cosmologies in second-order theories: A no-go theorem	新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」	KEK	2017年3月
482	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Refined study of isocurvature fluctuations in the curvaton	Why does the Universe accelerate?-MAR2017	KEK, Tsukuba	2017年3月
483	関口豊和, 高橋智, 田代寛之, 横山修一郎	running of spectral index を用いたインフレーションモデルの峻別	第72回日本物理学会年会	大阪大学	2017年3月
484	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Ryo Saito, Atsushi Naruko, Misao Sasaki	A new code for non-linear evolution of CMB anisotropy	新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」	高エネルギー加速器研究機構	2017年3月
485	平松尚志, 山内大介	Gravitational waves from cosmic strings	第72回日本物理学会年会	大阪大学	2017年3月
486	<u>原田知広</u> , 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一, Sanjay Jhingan	物質優勢期における原始ブラックホール形成	日本物理学会2017年年次大会	大阪大学	2017年3月
487	<u>Jiro Murata</u> for the MTV collaboration	THE MTV EXPERIMENT 原子核のベータ崩壊: 時間反転対称性	基礎物理勉強会	KEK, Tokai	2017年4月
*488	<u>Tetsuya Fukuhara</u> (10名中1番目), et al., <u>Makoto Taguchi</u> (10名中3番目)	Correction of brightness offset seen in Akatsuki LIR image	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
*489	Hiroyuki Maezawa, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (10名中4番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (10名中5番目)	Synergetic mission of simultaneous observations toward bow-shaped structures induced by atmospheric gravity wave on Venus with ALMA and Venus Climate Orbiter "Akatsuki"	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
490	Takehiko Akiba, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (11名中10番目)	Study of the horizontal distribution of Venusian sulfuric clouds using a general circulation model: Comparison with the Akatsuki data	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
*491	<u>Makoto Taguchi</u> (15名中番1目), et al., <u>Tetsuya Fukuhara</u> (15名中2番目)	Characteristic features in cloud-top temperature of Venus	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
*492	Takao M. Sato, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (15名中4番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (15名中12番目)	Coordinated observation of Venus cloud top with Subaru and Akatsuki	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
*493	Toru Kouyama, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (14名中3番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (14名中4番目)	Frequent appearance of large stationary gravity waves in Venus atmosphere	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
*494	Mao Takamura, et al., <u>Makoto Taguchi</u> , (15名中2番目) <u>Tetsuya Fukuhara</u> (15名中3番目)	Characteristic of polar dipoles seen by LIR onboard the Venus orbiter Akatsuki	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	Makuhari Messe, Chiba	2017年5月
495	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Isocurvature fluctuations in the curvaton scenario	The origin and evolution of the Universe	Jeju, Korea	2017年5月

496	<u>Yuji Nakano</u>	Development of RICE [Invited Talk]	7th International workshop on electrostatic storage devices (ESD2017)	Université Claude Bernard Lyon 1	2017年6月
497	<u>Yuji Nakano</u>	Cryogenic ion storage ring RICE for atomic and molecular physics [Invited Talk]	The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI' 17)	Kanazawa Theatre	2017年6月
498	<u>横山修一郎</u>	観測的インフレーション宇宙論	2017年度第47回天文・天体物理若手夏の学校	長野	2017年7月
499	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Eiichiro Komatsu, Masahi Hazumi, Misao Sasaki	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	RESCEU Summer School	山口大学	2017年7月
500	K. Kita, T. Nomura, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u>	Observation of Shell Structure in Mixed Ar/Kr Clusters Studied by Electron Energy Loss Spectroscopy	33th European Conference on Surface Science (ECOSS33),	Szeged, Hungary,	2017年8月
*501	佐和弘祥, 安西央, 小西達也, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	超高真空に対応した光電効果型低エネルギー電子銃の開発	2017年真空・表面科学合同講演会	横浜市立大学	2017年8月
*502	<u>Makoto TAGUCHI</u> (15名中1番目), et al., <u>Tetsuya FUKUHARA</u> (15名中2番目)	Characteristic Features in Cloud-Top Temperature of Venus	14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore	2017年8月
*503	Mao TAKAMURA, et al., <u>Makoto TAGUCHI</u> (15名中2番目), <u>Tetsuya FUKUHARA</u> (15名中3番目)	Characteristic of Polar Dipoles Seen by LIR Onboard the Venus Orbiter Akatsuki	14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore	2017年8月
*504	<u>Tetsuya FUKUHARA</u> (9名中1番目), et al., <u>Makoto TAGUCHI</u> (9名中3番目)	Precision of Brightness Temperature for Akatsuki LIR Observation on Orbit	14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore	2017年8月
505	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem	COSM017	Paris Diderot University	2017年8月
506	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Daisuke Yamauchi, Daniele Steer	Field-theoretic simulations of colliding superconducting strings	COSM017	Université Paris Diderot	2017年8月
507	<u>平松尚志</u> , <u>小松英一郎</u> , <u>羽澄昌史</u> , <u>佐々木節</u>	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	東北研究会	東北大学	2017年8月
*508	内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	反射イオン測定による希ガス固体と多価イオン間の相互作用の研究	日本物理学会 2017年秋大会	上智大学四ツ谷キャンパス	2017年9月
*509	佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	Ne 固体への低速 Ar ⁴⁺ 衝撃における脱離イオン質量分布のイオン入射角依存性	原子衝突学会第41回年会	岩手大学	2017年9月
510	伊五澤涼, 山口貴之, <u>中野祐司</u> , 久間晋, 東俊行	極低温静電型イオン蓄積リング RICE 中で輻射冷却された N ₂ O ⁺ の回転分光	日本物理学会 2017年秋大会	岩手大学	2017年9月
511	<u>岡田信二</u> , 他, <u>一戸悠人</u> (23名中19番目), <u>中野祐司</u> (23名中14番目)	分子検出に向けた多素子 TES マイクロカロリメータの性能評価	日本物理学会 2017年秋大会	岩手大学	2017年9月
512	<u>塚田暁</u> , 他, <u>榎園昭智</u> (15名中4)	SCRIT 実験: 安定核標的による成果と	日本物理学会秋大会	宇都宮大学	2017年9月

	番目), <u>栗田和好</u> (15名中6番目), <u>戸ヶ崎衛</u> (15名中10番目)	今後			
*513	<u>吉岡和夫</u> (11名中1番目)、他、 <u>田口真</u> (11名中番5目)、 <u>亀田真吾</u> (11名中6番目)	超小型探査機による光学観測手法の惑星科学への応用	日本惑星科学会秋季講演会	大阪	2017年9月
514	<u>横山修一郎</u>	原始ブラックホール	新学術領域「加速宇宙」A01, A03, B01 合同コアミーティング	名古屋大学	2017年9月
515	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Naoya Oishi, Atsushi Taruya	Gravitational clustering of massive neutrinos around cold dark matter halos	ICG-NAOC-YITP joint workshop, "Next-generation cosmology with large-scale structure"	基礎物理学研究所	2017年9月
516	平松尚志, 小松英一郎, 羽澄昌史, 佐々木節	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	日本物理学会 2017 年秋季大会	宇都宮大学	2017年9月
517	平松尚志, 小松英一郎, 羽澄昌史, 佐々木節	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	新学術領域研究「加速宇宙」合同グループミーティング	名古屋大学	2017年9月
518	<u>原田知広</u> 、 <u>柳哲文</u> 、 <u>郡和範</u> 、 <u>中尾憲一</u>	物質優勢期の原始ブラックホール形成における角運動量の効果	日本物理学会 2017 年秋季大会	宇都宮大学	2017年9月
519	<u>Tomohiro Harada</u>	Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe	Workshop on ``Gravitational Dynamics and Black Holes''	Nagoya University	2017年9月
520	<u>伊形尚久</u>	磁力線とストリングとの対応関係にもとづいて理解する BZ 過程	不惑 BZ77 研究会:回転ブラックホールからの電磁気的エネルギー引き抜き	琵琶湖クラブ	2017年9月
*521	Mao Takamura, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (14名中2番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (14名中3番目)	Study on the thermal structure of the Venusian polar atmosphere	142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Uji Campus, Kyoto University, Kyoto	2017年10月
*522	<u>Tetsuya Fukuhara</u> , Hiroki Ando, Masahiro Takagi, Takeshi Imamura, <u>Makoto Taguchi</u> , and Akatsuki RS/LIR team	Comparison of Akatsuki radio occultation experiments with thermal infrared image obtained by LIR	142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Uji Campus, Kyoto University, Kyoto	2017年10月
*523	Takeru Yamada, Takeshi Imamura, <u>Tetsuya Fukuhara</u> , and <u>Makoto Taguchi</u>	A numerical simulation of the large-scale stationary gravity waves in the Venus atmosphere	142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Uji Campus, Kyoto University, Kyoto	2017年10月
*524	<u>田口真</u> 、 <u>莊司泰弘</u> 、 <u>中野壽彦</u> 、 <u>高橋幸弘</u> 、 <u>今井正堯</u> 、 <u>白藤祐稀子</u>	極周回成層圏望遠鏡 FUJIN	平成 29 年度大気球シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2017年11月
525	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Eiichiro Komatsu, Masahi Hazumi, Misao Sasaki	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	JGRG27	広島大学	2017年11月
526	<u>Tomohiro Harada</u>	Formation of primordial black holes from primordial fluctuations	Focus Week on Primordial Black Holes	Kavli IPMU	2017年11月
527	<u>Tomohiro Harada</u>	Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era	The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Higashi Hiroshima Arts and Culture Hall Kurara	2017年11月

528	<u>Jiro Murata</u>	Probing strong gravity using geodetic precession	Workshop on Gravitational physics with particle accelerators	KEK, Tokai	2017年11月
*529	Mao Takamura, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (15名中2番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (15名中3番目)	Study on the thermal structure of the Venusian polar atmosphere	2017 AGU Fall Meeting	New Orleans, Louisiana, U. S. A.	2017年12月
530	<u>Takashi Hiarmatsu</u> , Daisuke Yamauchi, Daniele Steer	Field-theoretic simulations of colliding superconducting strings	CosPa2017	基礎物理学研究所	2017年12月
531	<u>Tomohiro Harada</u>	Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era	International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics ``CosPA 2017``	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University	2017年12月
532	<u>原田知広</u>	原始ブラックホールの形成	第30回理論懇シンポジウム	東京大学	2017年12月
533	<u>原田知広</u>	FLRW 解について	第19回特異点研究会	大阪市立大学	2017年12月
534	<u>伊形尚久</u>	磁力線とストリングの対応関係と Blandford-Znajek 過程	第19回特異点研究会 『特異点と時空、および関連する物理』	大阪市立大学	2017年12月
535	<u>Tomohiro Harada</u>	Primordial black holes formed in the matter-dominated era	International Workshop ``Gravity and Cosmology 2018``	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University	2018年1月
*536	<u>吉岡和夫</u> , <u>桑原正輝</u> , <u>田口真</u> , <u>川原琢也</u> , <u>亀田真吾</u> , <u>吉川一朗</u>	D/H吸収セルの開発と惑星科学への貢献	第19回惑星圏研究会	東北大学、仙台	2018年2月
537	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Eiichiro Komatsu, Masahi Hazumi, Misao Sasaki	Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations	新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」	東北大学	2018年2月
538	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Kazuya Koyama	Dynamical screening of scalar waves in Cubic Galileon model	GC2018 "Gravity and Cosmology 2018"	基礎物理学研究所	2018年2月
*539	佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における反射イオン・脱離イオン同時計測	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月
*540	内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	希ガス固体での多価イオン衝撃における反射イオンの観測	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月
*541	河田恭佑, 菊地朝海, 寺田まなみ, 飯田真以, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	希ガス固体における電子入射による負イオン共鳴状態の観測	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月
*542	菊地朝海, 河田恭佑, 飯田真以, 寺田まなみ, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	電子衝撃による希ガス固体からのイオンの脱離	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月
543	山田真也, 他, <u>一戸悠人</u> , (23名中18番目), <u>中野祐司</u> , (23名中20番目)	超伝導カロリメータを用いた低温下の星間分子計測実験(1)	日本天文学会2018年春季年会	千葉大学西千葉キャンパス	2018年3月
544	<u>中野祐司</u>	周期クーロン場による原子状態制御と精密分光 [招待講演]	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月
*545	<u>飯田進平</u> , 東俊行, <u>中野祐司</u>	合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発	日本物理学会第73回年次大会	東京理科大学野田キャンパス	2018年3月

546	<u>中野祐司</u>	周期クローン場による原子状態制御と精密分光 [招待講演]	日本物理学会第 73 回年次大会	東京理科大学 野田キャンパス	2018 年 3 月
547	堀充希, 他, <u>榎園昭智</u> (7 名中 2 番目), <u>栗田和好</u> (7 名中 5 番目)	電子蓄積リングにおける二光子相関を用いたバンチ長モニター開発	日本物理学会第 73 回年次大会	東京理科大学	2018 年 3 月
548	内田信昭, 他, <u>榎園昭智</u> (18 名中 4 番目), <u>栗田和好</u> (18 名中 7 番目), <u>戸ヶ崎衛</u> (18 名中 11 番目)	SCRIT 実験における捕獲されたイオンのモジュレーション依存性	日本物理学会第 73 回年次大会	東京理科大学	2018 年 3 月
549	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities	The first annual symposium of the innovative area “Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis”	東京大学柏キ ャンパス	2018 年 3 月
550	<u>平松尚志</u> , 山内大介	CMB bispectrum	バイスペクトル研究会	基礎物理学研 究所	2018 年 3 月
551	<u>原田知広</u>	原始ブラックホールについて	ブラックホール磁気圏研究会 2018	熊本大学	2018 年 3 月
552	<u>原田知広</u> , Bernard J. Carr, <u>伊形尚久</u>	FLRW 解の共形構造の完全分類: 線形状態方程式の場合	日本物理学会 2018 年 年次大会	東京理科大学	2018 年 3 月
*553	Takeru Yamada, Takeshi Imamura, <u>Tetsuya Fukuhara</u> , and <u>Makoto Taguchi</u>	Vertical Propagation of the Large Stationary Gravity Waves in the Venus Atmosphere	JpGU-AGU Joint Meeting 2018	Makuhari Messe, Chiba	2018 年 5 月
*554	<u>Tetsuya Fukuhara</u> , Aya Nagata, <u>Makoto Taguchi</u> , Takeshi Imamura, and LIR Team	Local-time dependence of the cloud-top Temperature of Venus obtained by close-up observations of LIR on board Akatsuki	JpGU-AGU Joint Meeting 2018	Makuhari Messe, Chiba	2018 年 5 月
555	村上 豪, <u>亀田 真吾</u> , 塩谷 圭吾, 生駒 大洋, 成田 憲保	Ultraviolet Spectrograph for Exoplanet (UVSPEX) onboard World Space Observatory - Ultraviolet (WSO-UV)	JpGU-AGU Joint Meeting 2018	Makuhari Messe, Chiba	2018 年 5 月
*556	M. Kuwabara, <u>M. Taguchi</u> , <u>K. Yoshioka</u> , <u>S. Kameda</u> , F. Suzuki, and I. Yoshikawa	Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated for ultra-small missions	JpGU-AGU Joint Meeting 2018	Makuhari Messe, Chiba	2018 年 5 月
*557	Takeru YAMADA, Takeshi IMAMURA, <u>Tetsuya FUKUHARA</u> , <u>Makoto TAGUCHI</u>	Vertical Propagation of the Large Stationary Gravity Waves in the Venus Atmosphere	15th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, U. S. A.	2018 年 6 月
*558	<u>Tetsuya FUKUHARA</u> , Aya NAGATA, Takeshi IMAMURA, <u>Makoto TAGUCHI</u> , Team LIR	Temperature Deviation at the Cloud-Top Level of Venus Obtained by Close-Up Observations of LIR on Board Akatsuki	15th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society	Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, U. S. A.	2018 年 6 月
*559	<u>S. Kameda</u> (8 名中 1 番目) et al., <u>M. Taguchi</u> (8 名中 7 番目)	Hydrogen Geocorona Observed by PROCYON/LAICA	15th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (Invited)	Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, U. S. A.	2018 年 6 月
560	<u>Takashi Hiramatsu</u> , Kazuya Koyama	Dynamical screening of scalar waves in Cubic Galileon model	Workshop “Essential next steps on gravity and cosmology”	東北大学	2018 年 6 月
*561	<u>S. Kameda</u> (7 名中 7 番目) et al.,	FAR-EXTENDED HYDROGEN EXOSPHERE	COSPAR2018	パサデナ	2018 年 7 月

	K. Yoshioka (7名中6番目)	OBSERVED BY PROCYON/LAICA			
562	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST	MG15	Rome, Italy	2018年7月
563	<u>Shuichiro Yokoyama</u>	Gravitational Wave Background from Primordial Magnetic Fields	The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation	Hokkaido	2018年7月
564	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST	MOGRA2018	名古屋大学	2018年8月
*565	H. Sawa, S. Uchida, <u>H. Ueta</u> and <u>T. Hirayama</u>	Coincidence Measurements of Scattered and Desorbed Ions from Solid Ne Surfaces by Slow Ar ^{q+} Ion Impact	19th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2018),	Lisboa, Portugal,	2018年9月
*566	<u>S. Kameda</u> (8名中1番目) et al.	VUV Spectroscopy for terrestrial exoplanetary exosphere	EPSC2018	ベルリン	2018年9月
*567	津久井豊、 <u>北本俊二</u> 、細田翔	補償光学を応用した高角度分解能 X線望遠鏡の開発	第12回「補償光学研究開発のための情報交換会」	大阪電気通信大学寝屋川キャンパス	2018年9月
*568	稲垣徳晃、 <u>北本俊二</u> 、吉田裕貴	天体観測用 X線干渉計開発に向けた真空紫外線干渉計の開発	日本天文学会 2018 年秋季年会	兵庫県立大学	2018年9月
*569	津久井豊、 <u>北本俊二</u> 、細田翔	高角度分解能 X線望遠鏡 Xmas の開発	日本天文学会 2018 年秋季年会	兵庫県立大学	2018年9月
*570	吉田裕貴、 <u>北本俊二</u>	降着駆動型 X線パルサーにおける鉄 K 吸収線の光学的深さの自転位相変動	日本天文学会 2018 年秋季年会	兵庫県立大学	2018年9月
571	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Relativistic stars in degenerate scalar-tensor theories after GW170817	COSMO18	Daejeon, Korea	2018年9月
572	<u>小林 努</u> 、 <u>平松尚志</u>	Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817	日本物理学会秋季大会	信州大学	2018年9月
573	<u>Tomohiro Harada</u>	Complete conformal classification of the FLRW solutions with a linear equation of state	Spanish-Portuguese Relativity Meeting 2018	Biblioteca Publica de Palencia	2018年9月
574	<u>Tomohiro harada</u>	Complete conformal classification of the FLRW solutions with a linear equation of state	YITP International Molecule-type Workshop ‘‘Dynamics in Strong Gravity Universe’’	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University	2018年9月
575	<u>平松尚志</u> 、 <u>藤田智弘</u> 、 <u>小幡一平</u> 、 <u>横山修一郎</u>	Statistical anisotropy of CMB B-mode	日本物理学会 2018 年秋季大会	信州大学	2018年9月
576	<u>原田知広</u> 、 <u>宮田大輝</u> 、 <u>Vitor Cardoso</u>	地平面のない時空による粒子生成	日本物理学会 2018 年秋季大会	信州大学	2018年9月
*577	H. Sawa, S. Uchida, <u>H. Ueta</u> and <u>T. Hirayama</u>	Ion desorption from solid Ne surfaces induced by grazing incidence of slow multiply-charged Ar ions [Invited Talk]	13th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps (EBIST2018),	Fudan University, Shanghai, China,	2018年10月
*578	<u>植田寛和</u> 、 <u>福島悠騎</u> 、 <u>大野航</u> 、 <u>平山孝人</u>	水星間塵での光反応による新たな分子進化経路の探索	原子衝突学会第 43 回年会	京都大学宇治キャンパス	2018年10月
*579	<u>佐和弘祥</u> 、 <u>渡辺峻也</u> 、 <u>植田寛和</u> 、 <u>平山孝人</u>	Ne 固体表面への低速多価イオン衝撃における散乱イオン・脱離イオン同時計測法を用いたポテンシャルスパッタリング過程の理解 [Hot Topics]	原子衝突学会第 43 回年会	京都大学宇治キャンパス	2018年10月

*580	<u>Yasuhiro Togano</u>	Electric dipole response of $^{50,52}\text{Ca}$	5th Joint Meeting of the APS DNP and JPS	Wikoloa, Hawaii	2018年10月
*581	Yusuke Fujino, <u>Yasuhiro Togano</u> , <u>Kazuo Ieki</u>	Coulomb excitation of ^{52}Ca	5th Joint Meeting of the APS DNP and JPS	Wikoloa, Hawaii	2018年10月
*582	植田寛和, 福島悠騎, 大野航, <u>平山孝人</u>	氷星間塵での光反応による新たな分子進化経路の探索	原子衝突学会第43回年会	京都大学宇治キャンパス	2018年10月
*583	<u>S. Kameda</u> (10名中1番目) et al.	UVSPEX onboard WSO-UV	The Ninth Moscow Solar System Symposium	モスクワ	2018年10月
*584	M. Ikoma, Y. Ito, Y. Kawashima, N. Osada, <u>S. Kameda</u>	THEORETICAL SPECTRA OF HIGHLY-IRRADIATED ATMOSPHERES OF TRANSITING EXOPLANETS	The Ninth Moscow Solar System Symposium	モスクワ	2018年10月
*585	<u>吉岡和夫</u> (7名中1番目), 他, <u>田口真</u> (7名中4番目)	超小型探査機と光学観測	第62回宇宙科学技術連合講演会	久留米	2018年10月
586	<u>伊形尚久</u>	Blandford-Znajek 機構の本質	BZ77 研究会 2018 : 回転ブラックホールからのエネルギー引き抜き	名古屋大学	2018年10月
*587	<u>Y. Nakano</u> , R. Uesugi, <u>H. Ueta</u> , <u>T. Hirayama</u>	An experimental study of the UV-induced photo-isomerization of interstellar molecules	Workshop on Interstellar Matter 2018,	Hokkaido University, Sapporo,	2018年11月
*588	<u>Yuji Nakano</u>	An experimental study of the UV-induced photo-isomerization of interstellar molecules	International workshop on Interstellar Matter 2018	Hokkaido University	2018年11月
*589	<u>田口 真</u> (7名中1番目), 他	極周回成層圏テレスコープ FUJIN による金星大気観測	平成30年度大気球シンポジウム	宇宙科学研究所、相模原	2018年11月
*590	Naoya Kajiwara, Takeshi Imamura, <u>Makoto Taguchi</u> , <u>Tetsuya Fukuhara</u> , and Toru Kouyama	Periodic analysis of Venus' cloud-top temperature fluctuation using by LIR images	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
*591	Takeru Yamada, Takeshi Imamura, <u>Tetsuya Fukuhara</u> , and <u>Makoto Taguchi</u>	Vertical propagation of the large stationary gravity waves in the Venus atmosphere	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
*592	Kiichi Fukuya, Takeshi Imamura, <u>Makoto Taguchi</u> , <u>Tetsuya Fukuhara</u> , and Toru Kouyama	Stationary features at Venusian cloud top extracted by averaging multiple mid-infrared images	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
*593	Shinichiro Kawase, <u>Makoto Taguchi</u> , and <u>Tetsuya Fukuhara</u>	Comparison of horizontal distributions of temperature and UV absorbers at the Venus cloud-tops	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
*594	Minori Narita, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (10名中8番目), <u>Tetsuya Fukuhara</u> (10名中9番目)	Feature extraction from Venusian cloud morphology using principal component analysis	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
*595	Yukiko Shirafuji, et al., <u>Makoto Taguchi</u> (7名中2番目)	Identification of a UV absorber in the Venus atmosphere by FUJIN	144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences	Nagoya University, Nagoya	2018年11月
596	<u>小林努</u>	Parity-violating gravity and GW170817	第7回観測的宇宙論ワークショップ	山口大学	2018年11月

597	平松尚志, 藤田智弘, 小幡一平, 横山修一郎	Hunting for Statistical Anisotropy in Tensor Modes with B-mode observations	第7回観測的宇宙論ワークショップ	山口大学	2018年11月
*598	<u>Jiro Murata</u>	Laboratory Tests of Newtonian Gravity	The 28th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28)	Rikkyo, Tokyo	2018年11月
599	<u>Tomohiro Harada</u>	Uniqueness of static, isotropic low-pressure solutions of the Einstein-Vlasov system	The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Rikkyo University, Tokyo	2018年11月
600	<u>Takahisa Igata</u>	Bright edge of a near-extremal Kerr black hole shadow	The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Rikkyo University, Tokyo	2018年11月
*601	H. Sawa, S. Uchida, <u>H. Ueta</u> and <u>T. Hirayama</u>	Coincidence study of scattered and desorbed ions from solid rare gas by slow multiply-charged ion impact	TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions 2018,	Tokyo Metropolitan University, Tokyo,	2018年12月
*602	Masaki Kuwabara, <u>Makoto Taguchi</u> , Kazuo Yoshioka, <u>Shingo Kameda</u> , and Ichiro Yoshikawa	Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated to small satellite missions	2018 AGU Fall Meeting	Washington, D. C., U. S. A.	2018年12月
603	<u>小林努</u>	一般相対論とその拡張	第31回理論懇シンポジウム	京都大学基礎物理学研究所	2018年12月
*604	<u>Jiro Murata</u>	Experimental Tests of Gravitational Inverse Square Law	Testing Gravity 2019	Vancouver, Canada	2019年1月
605	<u>Tomohiro Harada</u>	Primordial black hole formation	International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2019 ``Primordial Black Hole''	KEK, Tsukuba	2019年1月
*606	佐和弘祥, 渡辺峻也, <u>植田寛和</u> , <u>平山孝人</u>	Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における散乱イオン・脱離イオン同時計測 II	日本物理学会第74回年次大会	九州大学伊都キャンパス	2019年3月
*607	西村未生, <u>家城和夫</u> , 梅野泰宏, 藤野佑亮	GAGG シンチレータによる中性子の応答と n-gamma 波形弁別	日本物理学会第74回年次大会	九州大学伊都キャンパス	2019年3月

＜研究成果の公開状況＞（上記以外）

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等ホームページで公開している場合には、URL を記載してください。

＜既に実施しているもの＞

平成 26 年度研究成果報告会：2015 年 2 月 28 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/pdf/report_2014.pdf

平成 27 年度研究成果報告会：2016 年 2 月 27 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/conference_2015.html

平成 28 年度研究成果報告会：2016 年 12 月 3 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/conference_2016.html

平成 29 年度先端科学計測技術ワークショップ：2017 年 11 月 11 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/workshop_2017.html

平成 29 年度研究成果報告会：2018 年 2 月 24 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/conference_2017.html

平成 30 年度研究成果報告会：2019 年 2 月 13 日

http://www2.rikkyo.ac.jp/web/z3000145/project2014/conference_2018.html

14 その他の研究成果等

「12 研究発表の状況」で記述した論文、学会発表等以外の研究成果及び企業との連携実績があれば具体的に記入してください。また、上記 11(4)に記載した研究成果に対応するものには * を付してください。

以下のような受賞等があった

1. 2015 年度仁科記念賞受賞 本林 透

2. * 立花隆行，日本陽電子科学会 2015 年度奨励賞受賞

3. * 池澤翔太の学生発表賞[406] 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回講演会(2016 年)

4. * Classical and Quantum Gravity 誌において、余剰次元探索の近距離重力実験の論文[65]が Highlight 論文 に選出された。

5. 中野祐司、第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (2018 年 3 月)

6. *福原と田口らが Earth Planets and Space 誌に発表した論文[196]が 2017 年の Highlighted Paper に選出された。2018 年 5 月

7. *亀田らが Applied Spectroscopy 誌に発表した論文[122]が 2017 年の Editors' Choice に選出された。

8. 第 33 回西宮湯川記念賞 (2018 年度) 小林努

以下のプレス発表が行われた。

9*. 栗田和好，榎園昭智，戸ヶ崎衛，若杉昌徳（理化学研究所チームリーダー），須田利美（東北大学教授），プレス発表（2017 年 6 月）。立教大学・理化学研究所・東北大学共同。日経電子版他に掲載。

10*. 亀田真吾准教授他「アポロ 16 号以来、42 年ぶりにジオコロナ全体の撮影に挑む -理学部 亀田研究室が「PROCYON」に搭載される望遠鏡「LAICA」を開発」（2014 年 12 月 3 日）

11*. 理学部 亀田准教授と学生が開発した宇宙望遠鏡「LAICA」が彗星の放出した水素ガスの撮影に成功！（2015 年 10 月 14 日）

12*. 金星の巨大な弓状模様の成因を解明- 金星探査機「あかつき」の観測を数値シミュレーションで解析 - (2017 年 1 月 17 日)

13*. 超小型探査機が彗星の水のなぞを解明－理学部亀田准教授が参加する研究グループ
(2017年1月24日)

14*. 24万 km 以上まで広がる地球水素コロナの撮像に世界で初めて成功
超小型深宇宙探査機「PROCYON」に搭載された望遠鏡「LAICA」(2017年12月8日)

その他報道等取り上げられたもの

15*. 科学雑誌 Newton にて、「高次元」が特集され、巻頭特集で立教大学の余剰次元探索実験が特集インタビューとして紹介された。

16*. 日本経済新聞の科学欄にて、余剰次元探索実験が企画初回記事として紹介された。

17*. NHK のテレビ番組 「コズミックフロント」にて、重力実験の様子が紹介された。

15 「選定時」に付された留意事項とそれへの対応

<「選定時」に付された留意事項>

なし

<「選定時」に付された留意事項への対応>

なし

<「中間評価時」に付された留意事項>

なし

<「中間評価時」に付された留意事項への対応>

なし

法人番号	131095
プロジェクト番号	S1411024

16 施設・装置・設備・研究費の支出状況(実績概要)

(千円)

年度・区分	支出額	内 訳						備考
		法人負担	私学助成	共同研究機関負担	受託研究等	寄付金	その他()	
平成26年度	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	39,971	15,310	24,661	0	0	0	
	研究費	31,770	17,622	14,148	0	0	0	
平成27年度	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	23,932	7,978	15,954	0	0	0	
	研究費	39,286	25,085	14,201	0	0	0	
平成28年度	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	5,950	1,984	3,966	0	0	0	
	研究費	39,965	28,581	11,384	0	0	0	
平成29年度	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	
	研究費	38,880	25,515	13,365	0	0	0	
平成30年度	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	
	研究費	39,975	25,813	14,162	0	0	0	
総額	施設	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	
	設備	69,853	25,272	44,581	0	0	0	
	研究費	189,876	122,616	67,260	0	0	0	
総計	259,729	147,888	111,841	0	0	0		

法人番号	131095
プロジェクト番号	S1411024

17 施設・装置・設備の整備状況 (私学助成を受けたものはすべて記載してください。)
 《施設》(私学助成を受けていないものも含め、使用している施設をすべて記載してください。) (千円)

施設の名 称	整備年度	研究施設面積	研究室等数	使用者数	事業経費	補助金額	補助主体
池袋キャンパス4号館	1937	359 m ²	20	10	-	-	-
池袋キャンパス13号館	2002	793 m ²	15	12	-	-	-

※ 私学助成による補助事業として行った新增築により、整備前と比較して増加した面積

0 m²

《装置・設備》(私学助成を受けていないものは、主なもののみを記載してください。) (千円)

装置・設備の名称	整備年度	型 番	台 数	稼働時間数	事業経費	補助金額	補助主体
(研究装置)							
(研究設備)							
2次元イオン検出器	H26		一式	15h/week	7,992	4,931	私学助成
イオン照射装置	H26		一式	15h/week	11,988	7,396	私学助成
冷凍機(予冷+希釈冷凍機)	H26		一式	8h/week	7,992	4,931	私学助成
X線波面センサー	H26		一式	12h/week	5,999	3,701	私学助成
余剰次元探索装置(1)	H26		一式	4000h/3years	6,000	3,702	私学助成
固体表面実験用ビームライン	H27	KS-RH001S	一式	15h/week	7,992	5,328	私学助成
ファブリーペロー干渉計	H27		一式	1h/week	9,990	6,660	私学助成
余剰次元探索装置(2)	H27		一式	3000h/2years	5,950	3,966	私学助成
余剰次元探索装置(3)	H28		一式	2000h/10 months	5,950	3,966	私学助成
(情報処理関係設備)							

18 研究費の支出状況 (千円)

年 度	平成 26 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	10,143	消耗品費、用品費	10,143
光 熱 水 費	0		
通 信 運 搬 費	0		
印 刷 製 本 費	8	印刷費	8
旅 費 交 通 費	1,010	旅費交通費、海外出張費	1,010
報 酬・委 託 料	67	報酬・手数料	67
(賃借料)	9	施設・設備等賃借料	9
(諸会費)	50	諸会費	50
(その他)	360	その他図書資料費、雑費、燃料費	360
計	11,647		11,647
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人 件 費 支 出 (兼務職員)	1,259	アルバイト	1,259
教育研究経費支出	0		0
計	1,259		1,259
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	14,137	機器購入	14,137
図 書			
計	14,137		14,137
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント	0		0
ポスト・ドクター	4,727		4,727
研究支援推進経費	0		0
計	4,727		4,727

法人番号	131095
プロジェクト番号	S1411024

年 度	平成 27 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	8,477	消耗品費、用品費	8,477
光 熱 水 費	0		
通 信 運 搬 費	2	郵便費	2
印 刷 製 本 費	42	印刷費	42
旅 費 交 通 費	2,858	旅費交通費、海外出張費	2,858
報 酬・委 託 料	198	報酬・手数料	198
(諸 会 費)	345	諸会費	345
(出 版 物 費)	3	その他の図書資料費	3
(雑 費)	100	雑費	100
計	12,025		12,025
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)	864	アルバイト	864
教育研究経費支出	0		0
計	864		864
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	12,294	機器購入	12,294
図 書	0		0
計	12,294		12,294
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント	954		954
ポスト・ドクター	13,149		13,149
研究支援推進経費	0		0
計	14,103		14,103

年 度	平成 28 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	9,842	消耗品費、用品費	9,842
光 熱 水 費	0		0
通 信 運 搬 費	0	郵便費	0
印 刷 製 本 費	8	印刷費	8
旅 費 交 通 費	3,015	旅費交通費、海外出張費	3,015
報 酬・委 託 料	392	報酬・手数料	392
(諸 会 費)	320	諸会費	320
(出 版 物 費)	34	その他の図書資料費	34
計	13,611		13,611
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)	860	アルバイト	860
教育研究経費支出	0		0
計	860		860
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	12,576	機器購入	12,576
図 書	0		0
計	12,576		12,576
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント	960		960
ポスト・ドクター	11,958		11,958
研究支援推進経費	0		0
計	12,918		12,918

		法人番号		131095
		プロジェクト番号		S1411024
年 度	平成 29 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	10,400	消耗品費、用品費	10,400	実験器具、計算ソフト
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	0	郵便費	0	
印 刷 製 本 費	0	印刷費	0	
旅 費 交 通 費	2,683	旅費交通費、海外出張費	2,683	国内出張費、海外出張費
報 酬・委 託 料	1,097	報酬・手数料	1,097	講演会講師謝礼
(諸 会 費)	181	諸会費	181	学会参加登録費
(機 器 備 品 修 繕 保 守 料)	93	機器備品修繕保守料	93	機器備品修繕
(その他)	410	雑費、燃料費、その他図書 資料費、施設・設備等賃借 料	410	振込手数料、論文掲載料、ガソリン代、図書資料、車両賃借 料
計	14,864		14,864	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)	428	アルバイト	428	時給1,000円、年間時間数349時間、交通費 実人数 1人
教 育 研 究 経 費 支 出	0		0	
計	428		428	
設 備 関 係 支 出 (1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	11,765	機器購入	11,765	デジタイザー式、携帯型分光放射計、サーマルセンター等
図 書	0		0	
計	11,765		11,765	
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	960		960	学内1人
ポスト・ドクター	10,863		10,863	学内3人
研究支援推進経費	0		0	
計	11,823		11,823	学内4人

		法人番号		131095
		プロジェクト番号		S1411024
年 度	平成 30 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	17,084	消耗品費、用品費	17,084	実験器具、計算ソフト、パソコン
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	0	郵便費	0	
印 刷 製 本 費	0	印刷費	0	
旅 費 交 通 費	5,480	旅費交通費、海外出張費	5,480	招聘旅費、学会参加費
報 酬・委 託 料	869	報酬・手数料	869	講師謝礼、設計料
(諸 会 費)	159	諸会費	159	学会参加登録費
(機 器 備 品 修 繕 保 守 料)	208	機器備品修繕保守料	208	機器備品修繕
(その他)	318	雑費、燃料費、その他図書 資料費、施設・設備等賃借 料	318	振込手数料、ガソリン代、図書資料、車両賃借 料
計	24,118		24,118	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)	1,561	アルバイト	1,561	時給 1,000円、年間時間数 1360時間、交通費 実人数 19人
教 育 研 究 経 費 支 出	0		0	
計	1,561		1,561	
設 備 関 係 支 出 (1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	0		0	
図 書	0		0	
計	0		0	
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	675		675	学内1人
ポスト・ドクター	13,621		13,621	学内4人
研究支援推進経費	0		0	
計	14,296		14,296	学内5人

第 2 部: 研究成果報告

1. 研究プロジェクトの概要

この研究は、人類にとって基本的な設問である「天体现象と物質と空間の理解」を深めること、すなわち「宇宙像を解明」しようとするものである。本研究では、具体的に次の3つの目的を掲げる。第1に「天体现象の解明」として、電荷交換反応をはじめとする宇宙プラズマ過程の明確化、第2に「物質の起源の解明」として、宇宙初期物質の性質と元素の起源の解明、第3に「空間構造の解明」として、ダークマターの観測的性質の解明と時空のミクロな構造の探索である。これら三つの課題を、地上実験と理論から研究するチームをA-1, A-2, A-3 と、飛翔体観測と理論から研究するチームをB-1, B-2, B-3 と割り当てた。それぞれのチームが研究を進めるとともにチーム間での共同も目指した。同時に、地上実験、飛翔体観測では、測定装置の開発も研究目的とする。図1に研究プロジェクト全体のチームと関連する研究課題を示した。

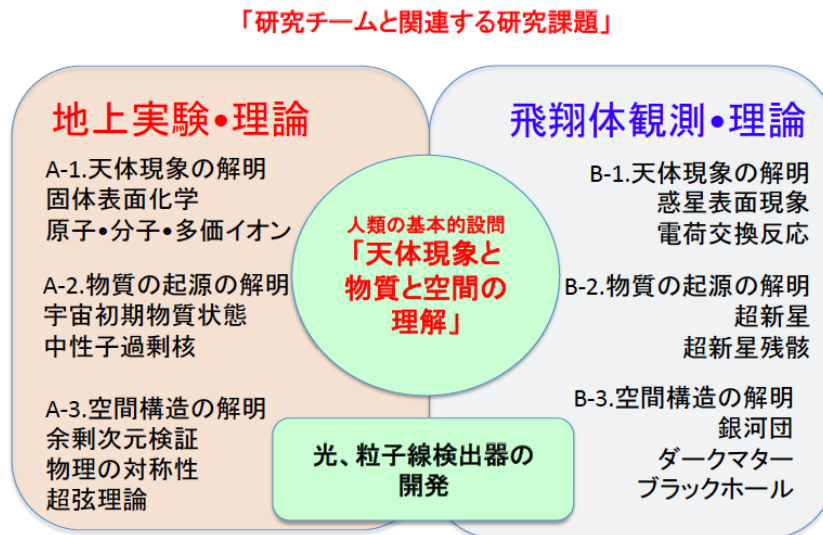


図1. 研究プロジェクト全体のチームと関連する研究課題

2. 研究組織

本プロジェクトに研究代表者が中心となり統括チームを置く。統括チームは申請主体である先端科学計測研究センターの運営委員が兼ねる。また、研究内容に応じた研究チームを編成する。研究チームは「地上実験と理論」、「飛翔体観測と理論」という軸でAとB、「天体现象の解明」「物質の起源の解明」「空間構造の解明」の3つの目標に応じて1、2、3という2次元の構造として、A-1、A-2、A-3、B-1、B-2、B-3と6個のチームを編成する（図1）。各チームは学術的研究とともに光・粒子線検出器を協力しながら開発する。各チームにはチームリーダーをおき、それぞれのチームの進展状況をリーダーが統括チームに定期的に報告する。また、メンバー全員による検討会を定期的に行うことで、研究の進捗状況を共有し、それを受け、統括チームは研究の進め方を決定する。また、若手の育成を兼ねて、3

名程度のPDを雇用し、1、2、3の各チームに配置する。さらに、関連分野の有識者に外部評価委員を依頼し、2年目および4年目に評価を取り入れて、研究を推進する。

平成26年度

総括チーム

北本 俊二(理学研究科・教授)
栗田 和好(理学研究科・教授)
平山 孝人(理学研究科・教授)
原田 知広(理学研究科・准教授)
村田 次郎(理学研究科・教授)
田口 真 (理学研究科・教授)

(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：平山 孝人(理学研究科・教授)

小泉 哲夫(理学研究科・教授)
立花 隆行(理学研究科・助教)
亀田 真吾(理学研究科・准教授)

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：栗田 和好(理学研究科・教授)

家城 和夫(理学研究科・教授)
榎園 昭智(理学研究科・助教)
田中 秀和(理学研究科・教授)
本林 透(理化学研究所・RIBF 施設共用コーディネーター)
内山 泰伸(理学研究科・准教授)

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：村田 次郎(理学研究科・教授)

疋田 泰章(理学研究科・助教)
北本 俊二(理学研究科・教授)

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：田口 真 (理学研究科・教授)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)
平山 孝人(理学研究科・教授)

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：内山 泰伸(理学研究科・准教授)

星野 晶夫(理学研究科・助教)
栗田 和好(理学研究科・教授)

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：北本 俊二(理学研究科・教授)

原田 知広(理学研究科・准教授)
小林 努(理学研究科・准教授)
村田 次郎(理学研究科・教授)

平成27年度

総括チーム

栗田 和好(理学研究科・教授)
平山 孝人(理学研究科・教授)

北本 俊二(理学研究科・教授)
村田 次郎(理学研究科・教授)
田口 真 (理学研究科・教授)
小林 努 (理学研究科・准教授)

(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：平山 孝人(理学研究科・教授)

小泉 哲夫(理学研究科・教授)
立花 隆行(理学研究科・助教)
亀田 真吾(理学研究科・准教授)

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：栗田 和好(理学研究科・教授)

家城 和夫(理学研究科・教授)
榎園 昭智(理学研究科・助教)
田中 秀和(理学研究科・教授)
本林 透(理化学研究所・RIBF 施設共用コーディネーター)
内山 泰伸(理学研究科・准教授)

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：村田 次郎(理学研究科・教授)

疋田 泰章(理学研究科・助教)
北本 俊二(理学研究科・教授)

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：田口 真 (理学研究科・教授)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)
平山 孝人(理学研究科・教授)
吉岡 和夫(理学研究科・助教／東京大学大学院理学研究科・助教)

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：内山 泰伸(理学研究科・准教授)

星野 晶夫(理学研究科・助教)
栗田 和好(理学研究科・教授)

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：北本 俊二(理学研究科・教授)

原田 知広(理学研究科・教授)
小林 努(理学研究科・准教授)
横山 修一郎(理学研究科・助教)
村田 次郎(理学研究科・教授)

平成28年度

総括チーム

栗田 和好(理学研究科・教授)
平山 孝人(理学研究科・教授)
北本 俊二(理学研究科・教授)
村田 次郎(理学研究科・教授)
田口 真 (理学研究科・教授)
小林 努 (理学研究科・准教授)

(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：平山 孝人(理学研究科・教授)

小泉 哲夫(理学研究科・教授)

立花 隆行(理学研究科・助教)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：栗田 和好(理学研究科・教授)

家城 和夫(理学研究科・教授)

榎園 昭智(理学研究科・助教)

田中 秀和(理学研究科・教授)

本林 透(理化学研究所・RIBF 施設共用コーディネーター)

内山 泰伸(理学研究科・教授)

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：村田 次郎(理学研究科・教授)

中山 優(理学研究科・准教授)

北本 俊二(理学研究科・教授)

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：田口 真 (理学研究科・教授)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)

福原 哲哉(理学研究科・助教)

平山 孝人(理学研究科・教授)

吉岡 和夫(理学研究科・助教／東京大学大学院理学研究科・助教)

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：内山 泰伸(理学研究科・教授)

星野 晶夫(理学研究科・助教)

栗田 和好(理学研究科・教授)

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：北本 俊二(理学研究科・教授)

原田 知広(理学研究科・教授)

小林 努(理学研究科・准教授)

横山 修一郎(理学研究科・助教)

村田 次郎(理学研究科・教授)

平成29年度

総括チーム

栗田 和好(理学研究科・教授)

平山 孝人(理学研究科・教授)

北本 俊二(理学研究科・教授)

村田 次郎(理学研究科・教授)

田口 真 (理学研究科・教授)

小林 努 (理学研究科・准教授)

(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：平山 孝人(理学研究科・教授)

中野 祐司(理学研究科・准教授)

植田 寛和(理学研究科・助教)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：栗田 和好(理学研究科・教授)

家城 和夫(理学研究科・教授)
梅野 泰宏(理学研究科・助教)
田中 秀和(理学研究科・教授)
本林 透(理化学研究所・RIBF 施設共用コーディネーター)
内山 泰伸(理学研究科・教授)

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：村田 次郎(理学研究科・教授)

中山 優(理学研究科・准教授)
初田 泰之(理学研究科・助教)
北本 俊二(理学研究科・教授)

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：田口 真 (理学研究科・教授)

亀田 真吾(理学研究科・准教授)
福原 哲哉(理学研究科・助教)
平山 孝人(理学研究科・教授)
吉岡 和夫(理学研究科・助教／東京大学大学院理学研究科・助教)

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：内山 泰伸(理学研究科・教授)

星野 晶夫(理学研究科・助教)10月31日まで
佐藤 浩介(埼玉大学・理学部・准教授)11月1日から
栗田 和好(理学研究科・教授)

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：北本 俊二(理学研究科・教授)

原田 知広(理学研究科・教授)
小林 努(理学研究科・准教授)
横山 修一郎(理学研究科・助教)
村田 次郎(理学研究科・教授)

平成30年度

総括チーム

平山 孝人(理学研究科・教授)
原田 知広(理学研究科・教授)
北本 俊二(理学研究科・教授)
村田 次郎(理学研究科・教授)
田口 真 (理学研究科・教授)
小林 努 (理学研究科・准教授)

(A-1) 地上実験と理論による、天体現象の解明

チームリーダー：平山 孝人(理学研究科・教授)

中野 祐司(理学研究科・准教授)
植田 寛和(理学研究科・助教) 11月30日まで
亀田 真吾(理学研究科・教授)

(A-2) 地上実験と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：栗田 和好(理学研究科・教授)

家城 和夫(理学研究科・教授)
梅野 泰宏(理学研究科・助教)
田中 秀和(理学研究科・教授)

本林 透(理化学研究所・RIBF 施設共用コーディネーター)

内山 泰伸(理学研究科・教授)

(A-3) 地上実験と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：村田 次郎(理学研究科・教授)

中山 優(理学研究科・准教授)

初田 泰之(理学研究科・助教)

北本 俊二(理学研究科・教授)

(B-1) 飛翔体観測と理論による、天体现象の解明

チームリーダー：田口 真 (理学研究科・教授)

亀田 真吾(理学研究科・教授)

福原 哲哉(理学研究科・助教)

平山 孝人(理学研究科・教授)

吉岡 和夫(理学研究科・助教／東京大学大学院理学研究科・助教)

(B-2) 飛翔体観測と理論による、物質の起源の解明

チームリーダー：内山 泰伸(理学研究科・教授)

一戸 悠人(理学研究科・助教)

佐藤 浩介(埼玉大学・理学部・准教授)

栗田 和好(理学研究科・教授)

(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明

チームリーダー：北本 俊二(理学研究科・教授)

原田 知広(理学研究科・教授)

小林 努(理学研究科・准教授)

横山 修一郎(理学研究科・助教)10月31日まで

村田 次郎(理学研究科・教授)

3. 研究成果

原始ブラックホールに関する理論的研究	原田知広..... 71
低温凝縮固体と量子ビームの相互作用	平山孝人、立花隆行、植田寛和..... 78
地上実験による物質の起源の解明—「中性子過剰核の構造と崩壊」—	家城和夫..... 86
惑星系の進化・大気散逸の観測に向けた観測技術の開発	亀田真吾..... 91
ダークマターサーチと、X線望遠鏡、干渉計の開発	北本俊二、星野晶夫..... 96
一般相対論の拡張と宇宙論、ブラックホール	小林 努..... 104
電子散乱でのぞく不安定核構造	栗田和好、榎園昭智..... 109
γ 線測定装置DALI2の増強と不安定原子核の研究	本林 透..... 113
時間反転対称性と余剰空間次元の探索	村田次郎..... 118
宇宙空間における原子・分子・光反応：粒子ビーム実験によるアプローチ	中野祐司..... 134
共形場理論を用いた量子的宇宙像の解明	中山 優..... 143
極周回成層圏望遠鏡(FUIJN)の開発	田口 真..... 147
水素吸収セルの開発	田口 真、亀田真吾、吉岡和夫..... 153
金星大気の研究	田口 真、福原哲哉..... 157
クォーク・グルーオン系の基本相互作用からのアプローチ	田中秀和..... 165
核反応を用いた爆発的元素合成の研究	梶野泰宏..... 169

原始ブラックホールに関する理論的研究

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 原田知広

1. 背景と目的

本地上実験・飛翔体観測と理論による宇宙像研究の拠点形成事業のプロジェクトは、1. 天体現象の解明 (宇宙プラズマ過程の明確化)、2. 物質の起源の解明 (宇宙初期物質の性質と元素の起源の解明)、3. 空間構造の解明 (ダークマターの観測的性質の解明と時空のミクロな構造の探索)、の3つの研究課題から構成される。これらを、理論・地上実験・飛翔体観測の3つの方向から研究し、宇宙像の解明を目指す。私はB3班の一員として主に空間構造の解明に取り組んだ。

観測によると、宇宙のエネルギーの組成は、約73%が暗黒エネルギー、約23%が暗黒物質からなっており、我々がよく知っている原子が占める割合は約4%に過ぎない。我々は、暗黒物質 (ダークマター) 候補として重要性が増している原始ブラックホールに注目した。原始ブラックホールとは宇宙の極初期に恒星進化段階を経ずに形成されるブラックホールである。原始ブラックホールは初期宇宙のどの時期に形成されるかによってその質量には Planck 質量 (約10万分の1グラム) から100億倍の太陽質量を超える超大質量まで極めて多様な可能性がある。

観測的には、LIGO や VIRGO によって2019年2月現在で10例の連星ブラックホールからの重力波が検出されているが、それらの質量が太陽質量の30倍程度と予想外に重いことからこれらのブラックホールが原始ブラックホールである可能性も指摘されている。その一方で一兆キログラムの原始ブラックホールの存在量は Hawking 輻射によって非常に厳しく制限されている。このような厳しい観測的制限にも関わらず、原始ブラックホールの質量分布によっては暗黒物質のかなりの部分を占める可能性がある。

また、原始ブラックホールに限らず、ブラックホールは宇宙物理学や素粒子物理学さらには熱力学・統計力学・凝縮系物理学なども関連し、現代物理学研究の中心的存在であると言っても過言ではない。ブラックホールの物理的性質を理解することは我々の時空構造を解明することにつながる。Einstein 方程式のブラックホール時空解は既に見つかっているが、それに基づいてその物理的性質の理解することが重要である。

2. 研究成果

主な研究結果は以下のとおりである。参照番号は原著論文リスト中の番号である。

(1) 原始ブラックホールの形成理論

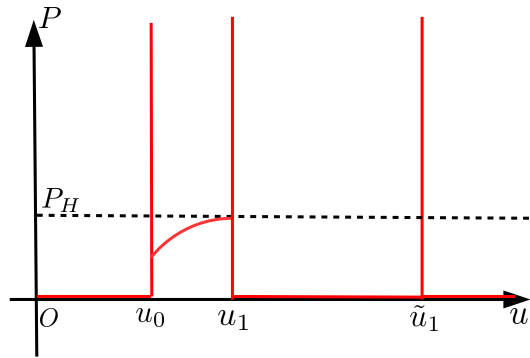
初期宇宙のインフレーション期に生成された超地平線長の揺らぎはインフレーション後の輻射優勢期に地平線より小さなスケールになった後に重力不安定性によって成長して原始ブラックホールが形成されたというシナリオが、これまで伝統的に調べられてきた。我々は原始ブラックホールの大きさに対する上限を与える宇宙分離条件について調べた [25]。また、輻射優勢期の原始ブラックホール形成条件と形成率について、宇宙論的な長波長解の定式化を行なってこれまで行われた一般相対論的数値シミュレーションの結果を統一的に理解し、また不規則なガウスの場の理論を援用して調べた [4,24]。最近ではインフレーション直後のインフラトン振動期における物質優勢期での原始ブラックホール形成が注目されており、この場合には非球対称的な効果が本質的に重要である。我々は非等方性と角運動量の効果を系統的に解析的に調べ、ブラックホール形成条件と形成率さらにブラックホールの自転の統計的性質を求めた [3,9,13,15]。

(2) ブラックホールの物理的性質の理解

回転ブラックホールが中性粒子をその慣性系の引きずりの効果によって無制限の高エネルギーにまで加速することができるというシナリオが提示されている。そうした中で、我々は回転ブラックホールによる粒子加速および回転ブラックホールからのエネルギー引き抜きについて詳細に調べた [10,17,20,23,27]。また、4次元 Schwarzschild ブラックホールにおいては光子球とよばれる光が円軌道を描く球面が存在することが知られている。ブラックホールの地平線とは異なり光子球はブラックホールの外側の観測者によって原理的に観測可能な対象であり、相対論的に強い重力場の証拠であると考えられる。我々は、任意次元の任意の静的球対称時空において輻射流体の定常降着流における音速点と光子球とが一致することを証明した [5,16]。

(3) 地平線のないコンパクト天体

電磁波や重力波による観測によってブラックホールが次々に見つかっているが、それが本当にブラックホールだと言い切れるのかを一般相対論の知見から調べることが重要となっている。我々は、重力崩壊の結果ブラックホールではなく非常にコンパクトな地平線のない天体が形成されるシナリオを与え、ブラックホールの存在が原理的に証明できないことを示した [2]。一方、そのような地平線のないコンパクト天体の形成に伴う量子論的粒子生成を明らかにした [1]。図はその一例であり、最初の人工的なバーストの後、一時的な Hawking 輻射があり、その直後と長時間後にデルタ関数的なバーストが見られる。また、ブラックホールと似たコンパクト天体として超回転星とワームホールの可能性がある。我々は超回転星の安定性とその最小の大きさについて調べ [8,26]、また超回転星による衝突 Penrose 過程でエネルギー引き抜き効率が無限に大きくなることを示した [19]。一方、ワームホールについては、穴の向こう側の光源による光度曲線を求めた [12]。またワームホールの安定性について、Einstein 重力と Gauss-Bonnet 重力の場合に分けて調べた [21,22]。さらに、空洞中に Dirichlet 境界条件をもつ壁が出現したり消失したりすることによる量子論的な真空励起について調べ、ワームホールの出現や消失に伴う量子論的效果について論じた [18]。



(4) その他の関連する基礎研究

我々は、重力崩壊によって宇宙検閲官予想の破れを示唆するものとして知られる紡錘型重力崩壊を対称性を仮定しない 3次元コードによって Einstein 方程式を数値相対論の手法によって数値シミュレーションを行い、有限のスムージング長を導入することによって特異点を正則化しその後の時間発展を追うことに成功した [11]。重力崩壊によって高曲率領域が生じた際のエネルギー放射とその反作用について調べた [6]。線形状態方程式をもつ Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker 解の完全な共形分類を行った [7]。定常時空における定常弦の拡張として、自己相似時空における自己相似弦を導入し、その運動方程式を書き下し解を構築した [14]。

3. 優れた成果が上がった点

特に優れた成果が上がった点として、物質優勢期における原始ブラックホール形成に関する基礎理論を樹立したことを上げたい。これまでの先行研究は、この問題について定性的、直感的かつ断片的な理解しか提示されていなかった。本研究による一連の論文によって物質優勢期原始ブラックホール形成について初めて包括的に定量的に調べることが可能になったのである。

4. 課題となった点

特にない。

5. 研究期間終了後の展望

LIGO や VIRGO によって観測された重力波源である連星ブラックホールの初期宇宙起源説の成否を確かめる上で、原始ブラックホールの自転に関する統計的な情報を理論的に予言することが重要である。私は今後、輻射優勢期に形成される原始ブラックホールの自転に関する研究を進めて予定である。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object,
Tomohiro Harada, Vitor Cardoso and Daiki Miyata,
Phys. Rev. D **99** 044039 (2019).
2. Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?,
Ken-ichi Nakao, Chul-Moon Yoo and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **99** 044027 (2019).
3. Effect of Inhomogeneity on Primordial Black Hole Formation in the Matter Dominated Era,
Takafumi Kokubu, Koutaro Kyutoku, Kazunori Kohri and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **98** 123024 (2018).
4. Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold,
Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Jaume Garriga and Kazunori Kohri,
PTEP **2018** 123 (2018).
5. Rotating accretion flows in D dimensions: sonic points, critical points and photon spheres,
Yasutaka Koga and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **98** 024018 (2018).
6. Energy emission from a high curvature region and its backreaction,
Takafumi Kokubu, Sanjay Jhingan and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **97** 104014 (2018).
7. Complete conformal classification of the Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker solutions with a linear equation of state,
Tomohiro Harada, Bernard J. Carr and Takahisa Igata,
Class. Quant. Grav. **35** 105011 (2018).
8. On the stability of a superspinar,
Ken-ichi Nakao, Pankaj S. Joshi, Jun-Qi Guo, Prashant Kocherlakota, Hideyuki Tagoshi, Tomohiro Harada,
Mandar Patil, Andrzej Krolak,
Phys. Lett. B **780** 410 (2018).
9. Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe,
Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri and Ken-Ichi Nakao,
Phys. Rev. D **96** 083517 (2017).
10. Escape probability of the super-Penrose process,
Kota Ogasawara, Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto and Takahisa Igata,
Phys. Rev. D **95** 124019 (2017).
11. 3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System,
Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Hirotada Okawa,
Class. Quant. Grav. **34** 105010 (2017).
12. Light curves of light rays passing through a wormhole,
Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **95** 024030 (2017).
13. Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe,
Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao and Sanjay Jhingan,
Astrophys. J. **833** 61 (2016).
14. Self-similar motion of a Nambu-Goto string,
Takahisa Igata, Tsuyoshi Houri and Tomohiro Harada,
Phys. Rev. D **94** 064029 (2016).

15. Spherical and nonspherical models of primordial black hole formation: exact solutions, **Tomohiro Harada** and Sanjay Jhingan, Prog. Theor. Exp. Phys. 093E04 (2016).
16. Correspondence between sonic points of ideal photon gas accretion and photon spheres, Yasutaka Koga and **Tomohiro Harada**, Phys. Rev. D **94** 044053 (2016).
17. Consistent analytic approach to the efficiency of collisional Penrose process, **Tomohiro Harada**, Kota Ogasawara and Umpei Miyamoto, Phys. Rev. D **94** 024038 (2016).
18. Vacuum excitation by sudden appearance and disappearance of a Dirichlet wall in a cavity, **Tomohiro Harada**, Shunichiro Kinoshita and Umpei Miyamoto, Phys. Rev. D **94** 025006 (2016).
19. Infinite efficiency of the collisional Penrose process: Can a overspinning Kerr geometry be the source of ultrahigh-energy cosmic rays and neutrinos?, **Mandar Patil**, **Tomohiro Harada**, Ken-Ichi Nakao, Pankaj S. Joshi and Masashi Kimura, Phys. Rev. D **93** 104015 (2016).
20. High efficiency of collisional Penrose process requires heavy particle production, Kota Ogasawara, **Tomohiro Harada** and Umpei Miyamoto, Phys. Rev. D **93** 044054 (2016).
21. Does the Gauss-Bonnet term stabilize wormholes?, **Takafumi Kokubu**, Hideki Maeda and **Tomohiro Harada**, Class. Quant. Grav. **32** 235021 (2015).
22. Negative tension branes as stable thin shell wormholes, **Takafumi Kokubu** and **Tomohiro Harada**, Class. Quant. Grav. **32** 205001 (2015).
23. Timescale for trans-Planckian collisions in Kerr spacetime, **Mandar Patil**, Pankaj S. Joshi, Ken-ichi Nakao, Masashi Kimura and **Tomohiro Harada**, Europhys. Lett. **110** 30004 (2015).
24. Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation, **Tomohiro Harada**, Chul-Moon Yoo, Tomohiro Nakama and Yasutaka Koga, Phys. Rev. D **91** 084057 (2015).
25. B. J. Carr and **Tomohiro Harada**, The separate universe problem: 40 years on, Phys. Rev. D **91** 084048 (2015).
26. How small can an over-spinning body be in general relativity?, Ken-Ichi Nakao, Masashi Kimura, **Tomohiro Harada**, **Mandar Patil** and Pankaj S. Joshi, Phys. Rev. D **90** 124079 (2014).
27. Black holes as particle accelerators: a brief review, **Tomohiro Harada** and Masashi Kimura, Class. Quant. Grav. **31** 243001 (invited) (2014).

【著書・総説・解説等】

1. **Tomohiro Harada**, Primordial black hole formation from cosmological fluctuations, to appear in the proceedings of the conference Hot Topics in General Relativity and Gravitation - 2 (Quy Nhon, Vietnam, 2015), arXiv:1601.06235 [astro-ph.CO].

2. **Tomohiro Harada** and Masashi Kimura, High-velocity collision of an ISCO particle around a Kerr black hole, as a contribution paper in the Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 1-7 July 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden, ed. K. Rosquist, R. Jantzen and R. Ruffini, p.1388-1390 (World Scientific, Singapore, 5/2015).
3. **原田知広**, 椎野克, 時空特異点とトポロジー～宇宙の因果～数理科学第 53 卷 1 号 (2015 年 1 月号) 特集：科学における〈時間〉－ありふれた存在を多角的に捉える－ 32 頁-37 頁, (サイエンス社, 東京, 2015 年 1 月)

【国際学会発表】

1. Primordial black hole formation
as a seminar for International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2019 Primordial Black Hole (KEK, Tsukuba, Japan, 22nd - 24th January 2019)
Tomohiro Harada (Invited)
2. Complete conformal classification of the FLRW solutions with a linear equation of state
YITP International Molecule-type Workshop Dynamics in Strong Gravity Universe (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 1-14 Sep 2018)
Tomohiro Harada
3. Complete conformal classification of the FLRW solutions with a linear equation of state
Spanish-Portuguese Relativity Meeting 2018 (Biblioteca Publica de Palencia, Palencia, Spain, 1-7 Sep 2018)
Tomohiro Harada
4. Primordial black holes formed in the matter-dominated era
International Workshop Gravity and Cosmology 2018 (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, 29 Jan 2018 - 9 Mar 2018)
Tomohiro Harada
5. Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era
International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics CosPA 2017 (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, 11-15 Dec 2017)
Tomohiro Harada
6. Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era
The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Higashi Hiroshima Arts and Culture Hall Kurara, Higashihiroshima, Japan, 27 Nov-1 Dec 2017)
Tomohiro Harada
7. Formation of primordial black holes from primordial fluctuations
Focus Week on Primordial Black Holes (Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, 13-17 Nov 2017) **Tomohiro Harada** (Invited)
8. Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe
Workshop on Gravitational Dynamics and Black Holes (Nagoya University, Japan, 26-27 Sep 2017)
Tomohiro Harada (Invited)
9. Primordial black hole formation in a matter-dominated universe,
The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Osaka City University, Japan, 24-28 Oct 2016)
Tomohiro Harada
10. Primordial black hole formation from cosmological fluctuations
the international conference Hot Topics in General Relativity and Gravitation 2 (Quy Nhon, Vietnam, 9-15 Aug 2015)
Tomohiro Harada(Invited)

11. High energy particle collision and collisional Penrose process near a Kerr black hole
the workshop One Hundred Years of Strong Gravity (Instituto Superior Técnico in Lisbon, Lisbon, Portugal, 10-12 Jun 2015)
Tomohiro Harada(Invited)
12. Black holes as particle accelerators: a brief review
The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, 10-14 Nov 2014)
Tomohiro Harada
13. Threshold of primordial black hole formation
The 15th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics (University of Winnipeg, Winnipeg, Canada, 21-23 May 2014)
Tomohiro Harada,

【国内学会発表】

1. 地平線のない時空による粒子生成
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 2018 年 9 月 16 日)
原田知広, 宮田大輝, Vitor Cardoso
2. FLRW 解の共形構造の完全分類：線形状態方程式の場合
日本物理学会 2018 年年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 22 日)
原田知広, Bernard J. Carr, 伊形尚久
3. 物質優勢期の原始ブラックホール形成における角運動量の効果
日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学, 2017 年 9 月 13 日)
原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一
4. 物質優勢期における原始ブラックホール形成
日本物理学会 2017 年年次大会 (大阪大学, 2017 年 3 月 17 日)
原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一, Sanjay Jhingan.
5. 楕円体の重力崩壊のブラックホール形成条件
日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大学, 2016 年 9 月 23 日)
原田知広, Sanjay Jhingan, 郡和範, 中尾憲一, 柳哲文
6. 原始ブラックホールの非球対称形成モデル：厳密解
日本物理学会 2016 年年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日)
原田知広, Sanjay Jhingan,
7. Szekeres 解の宇宙物理学への応用
日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日)
原田知広, Sanjay Jhingan
8. 宇宙論的非線形ゆらぎと原始ブラックホール形成
日本物理学会 2015 年年次大会 (早稲田大学, 2015 年 3 月 24 日)
原田知広, 柳哲文, 中間智弘, 古賀恭敬
9. 漸近的準一様解について
日本物理学会 2014 年秋季大会 (佐賀大学, 2014 年 9 月 21 日)
原田知広, 柳哲文
10. 地平線のないコンパクト天体の形成による粒子生成
第 20 回特異点研究会 (九州大学, 2019 年 1 月 12 日-14 日)
原田知広
11. 原始ブラックホールについて
ブラックホール磁気圏研究会 2018 (熊本大学, 2018 年 3 月 2 日-4 日)
原田知広

12. 原始ブラックホールの形成
第 30 回理論懇シンポジウム (東京大学, 2017 年 12 月 25 日-27 日)
原田知広 (招待講演)
13. FLRW 解について
第 19 回特異点研究会 (大阪市立大学, 2017 年 12 月 28 日-30 日)
原田知広
14. 原始ブラックホール形成と籟予想
第 18 回特異点研究会 (立教大学, 2016 年 12 月 27 日-29 日)
原田知広
15. ブラックホール周辺: 衝突 Penrose 過程・光子球/音速点对応
ブラックホール磁気圏研究会 (北海道夕張市ホテルマウントレースイ, 2016 年 3 月 2 日-5 日)
原田知広 (招待講演)
16. PBH の非球対称形成モデル
第 17 回特異点研究会特異点と時空, および関連する物理 (慶應義塾大学, 2016 年 1 月 9 日-11 日)
原田知広
17. Can an over-spinning Kerr geometry be the source of ultra-high energy cosmic rays and neutrinos?
第 17 回特異点研究会特異点と時空, および関連する物理 (慶應義塾大学, 2016 年 1 月 9 日-11 日)
原田知広
18. 宇宙論的長波長解と原始ブラックホール形成
第 16 回特異点研究会特異点と時空, および関連する物理 (名古屋大学, 2015 年 1 月 10 日-12 日)
原田知広
19. Analytic formula for the threshold of primordial black hole formation
The workshop on wormholes and primordial black holes: theories and observations, (Nagoya University, Nagoya, Japan, 25th and 26th of November 2013)
Tomohiro Harada

【受賞】

1. 共著論文 Ken-ichi Nakao, Chul-Moon Yoo and Tomohiro Harada, Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?, accepted for publication in Physical Review D, arXiv:1809.00124 [gr-qc] が Editor's Suggestion に選出。
2. 共著論文 Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Hirotada Okawa, 3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System, Class. Quant. Grav. **34** (4/2017), 105010 (17pp), が CQG 2017 Highlights Selection に選出。
3. Tomohiro Harada: Distinguished Referee of Europhysics Letters by the European Physical Society (2015)

【マスコミでの発表】

1. なし。

低温凝縮固体と量子ビームの相互作用

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 平山孝人

¹立花隆行²植田寛和

1. 背景と目的

我々のグループでは以前より凝縮性固体と量子ビームの相互作用に関する実験的研究を行ってきた。特に、脱離現象の観測により、固体中および固体表面で起こる電子の励起および脱励起過程の動的現象を理解することを目的としている。本期間中には低速多価イオン・真空紫外光・低エネルギー陽電子・低エネルギー電子を量子ビームとして用い、主に希ガス固体を始めとした低温凝縮固体を標的とした研究を行った。以下にそれぞれについての成果を記す。

2. 研究成果

(1) 多価イオンと希ガス固体表面の相互作用

我々は以前低速多価イオン照射により固体 Ne から脱離するイオンの観測を行い、入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる相対脱離収率の測定に成功した。今回我々は、新たな測定法を開発し、絶対脱離イオン収率の観測を行った。Figure 1 に絶対イオン脱離収率の入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギー依存性を示す。イオン脱離収率はポテンシャルエネルギーと線形関係を持ち、ポテンシャルエネルギーによる脱離 (Potential Sputtering) が起きていることが明らかになった。

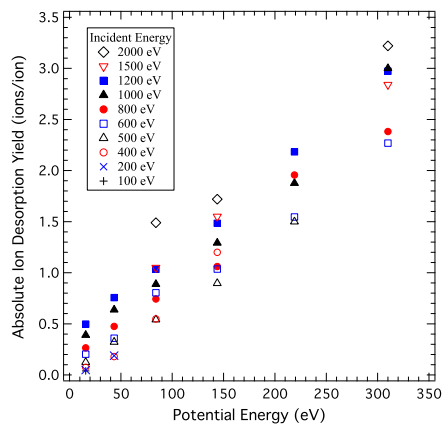


Figure 1: Absolute ion desorption yield Y_{ion} from solid Ne by Ar^{q+} ($q = 1 - 6$) impact as a function of the potential energy of the incident ions.

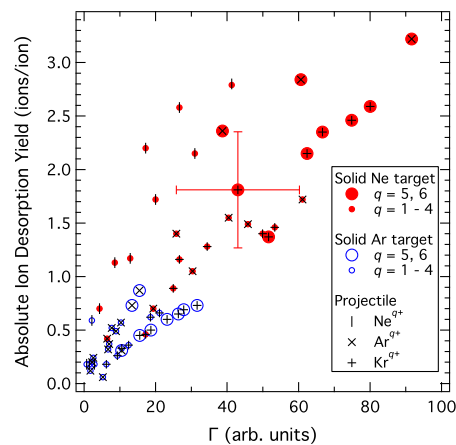


Figure 2: Absolute ion desorption yields Y_{ion} as a function of $\Gamma \equiv (q/E_{\text{IP}}^2) \times Y_{\text{total}}$. See text for details.

我々は、この実験結果を中性原子の脱離に伴ってイオンが脱離するという新しいモデルで説明することに成功した。これは、入射イオンの持つポテンシャルエネルギーにより固体中にイオンが生成し、入射イオンの持つ運動エネルギーによる大量の中性原子の脱離 (Kinetic Sputtering) とともにイオンが脱離するというモデルである。この場合、脱離イオン収率はイオンの生成数と中性原子の脱離数の積に比例することになる。ここでイオンの生成数は、入射イオンの価数が5価以上の場合に有効であることが知られている多価イオン・原子間の電荷移行断面積のスケール式 (Kimura et al., 1995) から、中性原子の脱離数は我々が測定した絶対脱離収率の値を用いて、 $\Gamma \equiv (q/E_{\text{IP}}^2) \times Y_{\text{total}}$ というスケールパラメーターを導出した。ここで q は入射イオンの価数、 E_{IP} は標的原子のイオン化エネルギー

¹現：東京理科大学理学部²現：日本原子力研究開発機構

である。Figure 2 は絶対脱離イオン収率と、我々の新しいモデルでのパラメーター Γ の関係を示す。標的は固体 Ne と固体 Ar, 入射イオンは Ne^{q+} ($q = 1 - 4$), Ar^{q+} ($q = 1 - 6$), Kr^{q+} ($q = 2 - 6$), イオンの入射エネルギーは 1.0, 1.5, 2.0 keV である。入射イオンの価数が 5 価以上の場合 (図中の大きな記号) は標的, 入射イオンの種類・価数・エネルギーによらず, ほぼ直線にのっていることがわかる。

多価イオン・固体表面相互作用のより詳細な情報を得るために、反射イオン・脱離イオン同時計測システムを構築した。この装置を用いた測定により入射イオンのポテンシャルエネルギーの移行量と脱離イオン種の相関を明らかにすることが可能である。Figure 3 は、200 原子層の Ne 固体に 3keV の Ar^{6+} を入射した際の、反射イオンの反射角 (水平方向) と価数 (垂直方向) の分布の測定結果である。この結果に見られる水平方向の筋状の構造がそれぞれ反射イオンの価数を表し、下から中性原子, Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} である。入射した多価イオンは標的が絶縁物であるにもかかわらず、非常に効率的に電荷移行を起こしていることがわかる。各価数の反射イオンの検出時刻を基準として測定した、脱離イオンの飛行時間スペクトルを Fig. 4 に示す。反射イオンの価数に応じて脱離イオンの分布に変化が見られ、標的表面で消費された入射イオンのポテンシャルエネルギーの違いが脱離過程に影響を及ぼしていることが明らかになった。

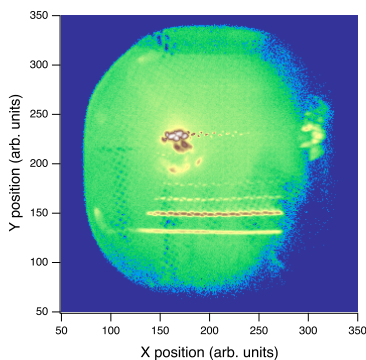


Figure 3: 2D image of the scattered Ar ions from a surface of solid Ne (200 monolayers) by 3 keV Ar^{6+} impact.

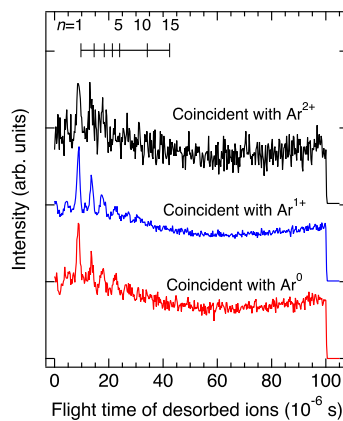


Figure 4: TOF spectra of the desorbed ions measured in coincidence with the scattered Ar ions from a surface of solid Ne (200 monolayers) by 3 keV Ar^{6+} impact. The n denotes the size of desorbed Ne_n^+ .

(2) 真空紫外光照射による凝縮性固体からの脱離過程

我々は、以前から希ガス固体における光励起脱離の観測を行い、様々な脱離過程に関する知見を得てきた (Hirayama and Arakawa, 2006)。これらの研究により純希ガス固体における脱離過程はほぼ明らかになったが、混合固体における現象についてはまだ未解明な部分が多い。我々はその脱離過程を明らかにするために、固体 Ne 上に Ar 薄膜を吸着させた固体を標的とした光脱離実験を行った。

光衝撃により脱離する Ne 準安定励起原子の脱離収率、脱離運動エネルギー、励起子生成エネルギーは、吸着させた Ar 薄膜の膜厚とともに変化した。我々は特に脱離運動エネルギーに着目して解析を行った。固体 Ne のバルク 1 次励起子生成により脱離した準安定励起原子の運動エネルギーの Ar 薄膜吸着量依存性の測定結果を Fig. 5 に示す (赤丸)。縦軸の値は純 Ne 固体を励起した場合の脱離運動エネルギーからの差である。脱離準安定励起原子の持つ運動エネルギーの最大値 E_{Max} は

$$E_{\text{Max}} = E_x - E_a - E_{\text{coh}}$$

で求められることが知られている。ここで E_x, E_a, E_{coh} はそれぞれ励起子生成エネルギー、気相での励起状態生成エネルギー、および固体の凝集エネルギーである。Ar 薄膜の膜厚により変化する励起子生成エネルギーは実測し、凝集エネルギーは Lennard-Jones ポテンシャルから見積もることにより、脱離運動エネルギーの Ar 吸着量依存性を計算した。その結果を Fig. 5 の青い領域に示す。膜厚依存性の様子が絶対値も含めてよく再現されていることがわかる。

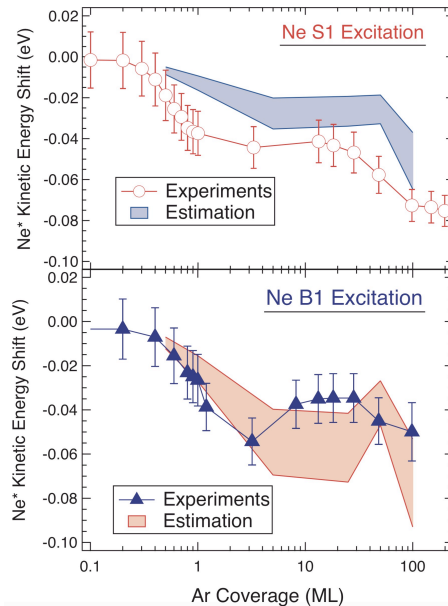


Figure 5: The kinetic energies of Ne metastable atoms from Ar/Ne solids as a function of the thickness of the Ar coverage. Photon energies correspond to the creation energies of the S1 and B1 excitons in a Ne solid.

(3) 低エネルギー電子ビーム照射による希ガス固体中での負イオン生成

我々のグループで開発した超高真空対応型電子ビーム源を用いて、希ガス固体を標的とした電子衝撃脱離実験を行った。励起原子の脱離収率の入射電子エネルギー依存性を詳細に測定することにより、Ne 固体内で一時的な負イオン共鳴状態が生成し、その過程が励起原子の脱離に大きな寄与をすることを発見した。特に、希ガス固体表面から負イオンが脱離していることを強く示唆する実験結果を得ており、宇宙空間における極低温環境での電子のエネルギー消費についての基礎的知見を与えることが期待される。

(4) 低速陽電子衝撃による TiO₂ 表面からの脱離過程の観測

固体表面からのイオンの脱離機構の解明を目的として、陽電子入射によるイオン脱離過程の観測を行った。Figure 6 は、TiO₂ 表面に陽電子を 3 - 44 eV で入射させた際に脱離したイオンの飛行時間スペクトルである。陽電子が固体中で電子と対消滅した際に放出された γ 線の検出時刻を時間の基準としている。観測された脱離 O⁺ イオンの脱離収率の入射陽電子エネルギー依存性を Fig. 7 に示す。TiO₂ 表面への電子衝撃実験は古くから行われており、O⁺ イオンの脱離しきい値は Ti の 3p 内殻軌道のイオン化エネルギーに対応する 34 eV であることがわかっている。本研究においては、TiO₂ 表面に入射した陽電子が酸素原子の特定の軌道と対消滅することが発見された。

3. 優れた成果が上がった点

- 多価イオン・陽電子・電子・真空紫外光の 4 種類の量子ビームをプローブとして、固体表面で起きる動的過程を明らかにすることに成功した。
- 希ガス固体におけるイオンの脱離機構を明らかにした。
- 固体中での陽電子の対消滅に起因するイオンの脱離過程を明らかにし、陽電子が対消滅する電子軌道に選択性があることを発見した。

4. 課題となった点

星間塵表面における光化学反応による分子進化の研究を開始したが、現状では入射光に含まれる二次光による寄与を正確に見積もることができず、定量的な議論に至っていない。

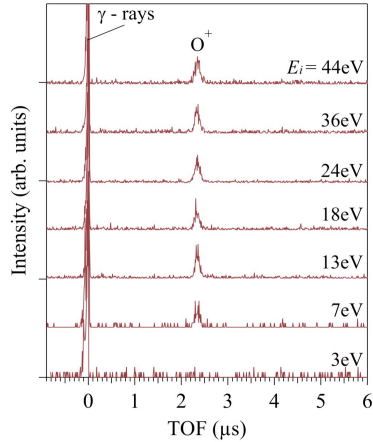


Figure 6: Time-of-flight spectra of desorbed O^+ ions from the TiO_2 surface by positron impact triggered by the emission of annihilation γ rays at $t = 0$.

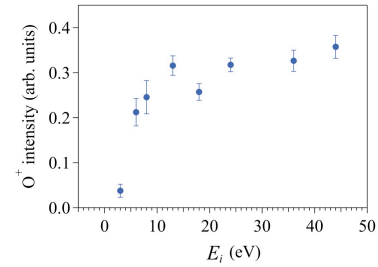


Figure 7: Desorption yields of O^+ ions from the TiO_2 surface as a function of the positron energy.

5. 研究期間終了後の展望

低エネルギー電子ビーム源と真空紫外光源を用いて同じ希ガス固体中で起きる現象を観測することにより、希ガス固体における脱離の動的過程を明らかにすることができるようになった。これらの知見を元に、多価イオン衝撃により起きる複雑な過程を解き明かすことが今後の目標である。

6. 研究成果公表

【原著論文】

- Positron-annihilation-induced ion desorption from $TiO_2(110)$
T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima
 Phys. Rev., **B89**, 201409(R) (2014).
- Comparative study of ion desorption from clean and contaminated $TiO_2(110)$ surfaces by slow positron impacts
T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima
 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, **13**, 261 (2015).
- レーザープラズマ光源を用いた希ガス混合凝縮層からの光励起脱離の観測
 岩瀬あづさ, 立花隆行, 平山孝人
 J. Vac. Soc. Jpn., **58**, 165 (2015).
- Ion desorption from $TiO_2(110)$ by low energy positron impact
T. Tachibana, L. Chiari, M. Nagira, T. Hirayama and Y. Nagashima
 Defect and Diffusion Forum, **373**, 324 (2016).
- Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on Ne solids
 A. Iwabuchi, T. Tachibana, and T. Hirayama
 J. Electr. Spectr. Rel. Phen., **220**, 25 (2017).
- Development of a UHV-compatible low-energy electron gun using the photoelectric effect
 H. Sawa, M. Anazai, T. Konishi, T. Tachibana, and T. Hirayama
 J. Vac. Soc. Jpn., **60**, 467 (2017).
- New ion desorption mechanism from rare gas solids by multiply charged ion impacts
 K. Ban, M. Akiwa, H. Ueta, T. Tachibana, and T. Hirayama
 Low Temperature Physics, , submitted.

8. System for coincidence measurements of the ions desorbed and projectiles scattered from noble gas solid surfaces by slow multiply-charged ion impacts
H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta, and T. Hirayama
X-Ray Spectrometry, , submitted.

【国際学会発表】

1. Mechanism of Ion Desorption from Rare Gas Solids by Low Energy Multiply-charged Ion Impact, [Selected Topic]
17th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI-2014) (San Carlos de Bariloche, Argentina, 2014 年 9 月)
K. Ban, M. Akiwa, T. Tachibana and T. Hirayama,
2. Positron-annihilation-induced ion desorption from TiO₂(110)
7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7) (Matsue, Japan, 2014 年 11 月)
T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima
3. New mechanism of ion desorption from rare gas solids by multiply-charged ion impact
24th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2015) (Toledo, Spain, 2015 年 7 月)
K. Ban, M. Akiwa, A. Sumita, Y. Nidaira, Y. Kuwabara, T. Tachibana and T. Hirayama,
4. Observation of positron-annihilation-induced ion desorption from a TiO₂(110) surface
International Conference on Positron Annihilation (ICPA-17) (Wuhan, China, 2015 年 9 月)
T. Tachibana, L. Chiari, M. Nagira, T. Hirayama and Y. Nagashima,
5. Photon-stimulated desorption of Ne metastable atoms from Ar adsorbed on solid Ne,
39th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX-39) (Zurich, Switzerland, 2016 年 7 月)
A. Iwabuchi, T. Tachibana and T. Hirayama,
6. Electronic excitations and decay processes in condensed rare gases studied by low-energy electron, photon, and ion impact [Invited Talk]
77th IUUVSTA Workshop on Surface Processes, Gas Dynamics, and Vacuum Technology of Cryogenic Vacuum Systems (Fuefuki-city, Yamanashi, Japan 2016 年 8 月)
T. Hirayama,
7. Development of a low-energy electron gun using the photoelectric effect
32th European Conference on Surface Science (ECOSS32) (Grenoble, France, 2016 年 9 月)
H. Sawa, M. Anzai, T. Konishi, T. Tachibana and T. Hirayama,
8. Observation of Shell Structure in Mixed Ar/Kr Clusters Studied by Electron Energy Loss Spectroscopy
33th European Conference on Surface Science (ECOSS33), (Szeged, Hungary, 2017 年 8 月)
K. Kita, T. Nomura, T. Tachibana and T. Hirayama
9. Coincidence Measurements of Scattered and Desorbed Ions from Solid Ne Surfaces by Slow Ar^{q+} Ion Impact
19th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2018), (Lisboa, Portugal, 2018 年 9 月)
H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta and T. Hirayama
10. Ion desorption from solid Ne surfaces induced by grazing incidence of slow multiply-charged Ar ions [Invited Talk]
13th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps (EBIST2018), (Fudan University, Shanghai, China, 2018 年 10 月)
H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta and T. Hirayama
11. Coincidence study of scattered and desorbed ions from solid rare gas by slow multiply-charged ion impact
TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions 2018, (Tokyo Metropolitan University, Tokyo, 2018 年 12 月)
H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta and T. Hirayama

【国内学会発表】

1. レーザープラズマ光源を用いた希ガス固体における光励起脱離実験 II,
日本物理学会 2014 年秋季大会 (中部大学春日井キャンパス 2014 年 9 月)
岩渕あづさ, 立花隆行, 平山孝人
2. Ion desorption from $\text{TiO}_2(110)$ surface induced by positron annihilations, [Hot Topics]
原子衝突学会第 39 回年会 (東北大学片平キャンパス 2014 年 10 月)
立花隆行, 平山孝人, 長嶋泰之
3. レーザープラズマ光源を用いた希ガス凝縮層からの光励起脱離の観測,
第 55 回真空に関する連合講演会 (大阪府立大学「I-site なんば」 2014 年 11 月)
岩渕あづさ, 立花隆行, 平山孝人
4. レーザープラズマ光源を用いた希ガス固体における光励起脱離実験 III,
日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス 2015 年 3 月)
岩渕あづさ, 立花隆行, 平山孝人
5. 低速陽電子入射による $\text{TiO}_2(110)$ からの内殻電子消滅誘起イオン脱離の観測 2
日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス 2015 年 3 月)
立花隆行, L. Chiari, 柳楽勝, 平山孝人, 長嶋泰之
6. $\text{TiO}_2(110)$ 上における陽電子消滅誘起イオン脱離
日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学千里山キャンパス 2015 年 9 月)
柳楽勝, 立花隆行, L. Chiari, 平山孝人, 長嶋泰之
7. $\text{TiO}_2(110)$ 表面上における陽電子刺激イオン脱離の入射エネルギー依存性
日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学千里山キャンパス 2015 年 9 月)
立花隆行, L. Chiari, 柳楽勝, 平山孝人, 長嶋泰之
8. 光電効果を利用した低エネルギー電子線を用いた電子衝撃脱離実験
日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学千里山キャンパス 2015 年 9 月)
安西央, 高野順也, 菊池朝海, 河田恭佑, 立花隆行, 平山孝人
9. 電子エネルギー損失分光法による希ガスクラスタールにおける電子的励起過程の研究
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学泉キャンパス 2016 年 3 月)
上野雅知, 三浦大地, 喜多一真, 野村哲平, 立花隆行, 平山孝人
10. Ne 固体における Feshbach 共鳴を経由した励起原子の脱離
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学泉キャンパス 2016 年 3 月)
安西央, 河田恭佑, 菊池朝海, 立花隆行, 平山孝人
11. $\text{TiO}_2(110)$ 表面における陽電子刺激イオン脱離収量と S-parameter の比較
日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学角間キャンパス 2016 年 9 月)
山下貴志, 立花隆行, 柳楽勝, 矢吹壽国, 平山孝人, 長嶋泰之
12. $\text{TiO}_2(110)$ および $\text{H}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 表面上における陽電子刺激イオン脱離
日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学角間キャンパス 2016 年 9 月)
立花隆行, 山下貴志, 柳楽勝, 矢吹壽国, L. Chiari, 平山孝人, 長嶋泰之
13. 二酸化チタン表面における陽電子刺激イオン脱離収率と S-parameter の入射エネルギー依存性
平成 28 年度京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」 (京都大学原子炉実験所
2016 年 12 月)
山下貴志, 立花隆行, ルカ・チアリ, 柳楽勝, 矢吹壽国, 平山孝人, 長嶋泰之
14. $\text{TiO}_2(110)$ 表面からの陽電子刺激イオン脱離と電子刺激イオン脱離の比較 [優秀ポスター賞]
原子衝突学会第 41 回年会 (富山大学五福キャンパス 2016 年 12 月)
山下貴志, 立花隆行, 柳楽勝, 矢吹壽国, L. Chiari, 平山孝人, 長嶋泰之

15. 希ガス固体表面への低速多価イオン小角衝突における散乱イオン・脱離イオン同時計測装置の開発
原子衝突学会第 41 回年会 (富山大学五福キャンパス 2016 年 12 月)
佐和弘祥, 内田俊太郎, 高久旭, 山口雄太, 立花隆行, 平山孝人
16. 混合希ガスクラスタを標的とした電子的励起過程の研究
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス 2017 年 3 月)
喜多一真, 野村哲平, 竹田駿, 平山孝人, 立花隆行
17. 電子衝撃によりクラスターから解離した準安定励起原子の観測
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス 2017 年 3 月)
野村哲平, 喜多一真, 竹田駿, 平山孝人, 立花隆行
18. 希ガス固体表面への低速多価イオン小角衝突における散乱イオン・脱離イオン同時計測装置の開発 II
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス 2017 年 3 月)
佐和弘祥, 高久旭, 山口雄太, 内田俊太郎, 立花隆行, 平山孝人
19. TiO₂(110) 表面における陽電子刺激イオン脱離と表面捕獲陽電子
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス 2017 年 3 月)
山下貴志, 立花隆行, L. Chiari, 柳楽勝, 矢吹壽国, 萩原聡, 渡辺一之, 平山孝人, 長嶋泰之
20. 超高真空に対応した光電効果型低エネルギー電子銃の開発
2017 年真空・表面科学合同講演会 (横浜市立大学 2017 年 8 月)
佐和弘祥, 安西央, 小西達也, 立花隆行, 平山孝人
21. 反射イオン測定による希ガス固体と多価イオン間の相互作用の研究
日本物理学会 2017 年秋季大会 (上智大学四ツ谷キャンパス 2017 年 9 月)
内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, 植田寛和, 平山孝人
22. Ne 固体への低速 Ar^{q+} 衝撃における脱離イオン質量分布のイオン入射角依存性
原子衝突学会第 41 回年会 (岩手大学 2017 年 9 月)
佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 植田寛和, 平山孝人
23. Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における反射イオン・脱離イオン同時計測
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス 2018 年 3 月)
佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 植田寛和, 平山孝人
24. 希ガス固体での多価イオン衝撃における反射イオンの観測
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス 2018 年 3 月)
内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, 植田寛和, 平山孝人
25. 希ガス固体における電子入射による負イオン共鳴状態の観測
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス 2018 年 3 月)
河田恭佑, 菊地朝海, 寺田まなみ, 飯田真以, 植田寛和, 平山孝人
26. 電子衝撃による希ガス固体からのイオンの脱離
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス 2018 年 3 月)
菊地朝海, 河田恭佑, 飯田真以, 寺田まなみ, 植田寛和, 平山孝人
27. 氷星間塵での光反応による新たな分子進化経路の探索
原子衝突学会第 43 回年会 (京都大学宇治キャンパス 2018 年 10 月)
植田寛和, 福島悠騎, 大野航, 平山孝人
28. Ne 固体表面への低速多価イオン衝撃における散乱イオン・脱離イオン同時計測法を用いたポテンシャルスパッタリング過程の理解 [Hot Topics]
原子衝突学会第 43 回年会 (京都大学宇治キャンパス 2018 年 10 月)
佐和弘祥, 渡辺峻也, 植田寛和, 平山孝人
29. Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における散乱イオン・脱離イオン同時計測 II
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学伊都キャンパス 2019 年 3 月)
佐和弘祥, 渡辺峻也, 植田寛和, 平山孝人

【受賞】

1. 立花隆行，日本陽電子科学会 2015 年度奨励賞受賞
<https://www.rikkyo.ac.jp/news/2015/12/17104.html>
2. 山下貴志，立花隆行，柳楽勝，矢吹壽国，L. Chiari，平山孝人，長嶋泰之，原子衝突学会第 41 回年会優秀ポスター賞

【マスコミでの発表】

1. 立花隆行，平山孝人，長嶋泰之。「二酸化チタン表面における陽電子消滅誘起イオン脱離の観測に成功 ～陽電子を用いた固体最表面の改質に道～」，プレスリリース（2014 年）。
<https://www.rikkyo.ac.jp/news/2014/05/14663.html>

地上実験による物質の起源の解明 —— 「中性子過剰核の構造と崩壊」 ——

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 家城 和夫

1. 背景と目的

地上実験で物質の起源を探るにあたっては、宇宙の元素合成過程にかかわる原子核の情報が必要となる。特に r 過程では中性子ドリップライン核が重要な役割を果たしており、これに関連して以下のような研究を行ってきた。

1. 中性子過剰核の生成断面積と中性子ドリップラインの探索 (村井、天野、家城)
2. 核分光を用いた中性子過剰核の核構造 (志賀、藤野、梶野、本林、家城)
3. 中性子過剰核の測定に必要な新たな中性子検出器及び周辺技術の開発 (松澤、吉田、西村、梶野、家城)

なお、一部の成果については本林の報告もあわせて参照されたい。

2. 研究成果

(1) 中性子過剰核生成断面積

元素合成過程の研究を地上実験で行う場合に問題となるのは不安定核ビームの生成量である。

村井は理化学研究所仁科加速器研究センターにある BigRIPS チームの一員として ^{238}U の飛行核分裂反応を用いた同位体生成実験に参加し、その生成率の導出を行っている。この実験では $Z=60\sim 68$ 領域と $Z=56\sim 63$ 領域の異なる Z 領域を標的とした設定で測定が行われた。解析においてはバックグラウンドイベントの除去や速度依存性の補正、輸送行列の値を調整などにより質量電荷の比 A/Q の分解能を 0.040% まで向上し荷電状態の異なる同位体の識別が可能になった。これらの解析によって得られた生成率を $Z=20\sim 50$ 領域で比較的良く実験結果を再現していた Abrasion-fission model 等による計算と比較したところ、 $Z=56\sim 63$ の領域においても $Z=60\sim 68$ 領域と同様に実験値のほうが 2 桁以上大きいことがわかった。

天野は U の入射核破砕反応によって生成する中重核領域の中性子過剰新同位元素の探索実験に参加しデータ解析を行った。目的とする $N=126$ 近傍の原子核の生成を確認することができたが、その荷電状態が双極子電磁石の間におかれた測定器を通過する際に変化する事象が存在し、目的とする ^{200}W 領域ではそれらを識別することが現状では困難であったために核の同定には至らなかった。

原子核の存在限界を示す中性子ドリップラインは水素から酸素まで確定しているがそれよりも先のフッ素から上に関しては未だ確定していない。炭素、窒素及び酸素の存在できる最も重い同位体は中性子数 N が 16 である ^{22}C , ^{23}N , ^{24}O であるが、一方でフッ素はさらに中性子が 6 個増えた ^{31}F ($N = 22$) まで存在が確認されている。酸素の最も重い同位体に対するフッ素の束縛可能な中性子数の急激な増加は極めて奇妙な現象で酸素ドリップライン異常と呼ばれている。この酸素とフッ素の中性子束縛数の違いは陽子-中性子間のテンソル相互作用によると考えられており、さらに深く理解するためにはフッ素がこの先どれだけ中性子を束縛できるのかが非常に重要となってくる。村井は F および Ne の中性子ドリップライン探索測定を行ったが、目的核近傍の同位体は観測されたにも関わらず $^{32,33}\text{F}$, $^{35,36}\text{Ne}$ は 1 イベントも観測されなかった。EPAX2.15 や Q_g と呼ばれる原子核反応の半経験的なモデルによる計算と比較したところ、 $^{32,33}\text{F}$ の存在は強く否定され、フッ素の中性子ドリップラインが実験的に確定した。ネオンの場合についても、同様に $^{35,36}\text{Ne}$ が非束縛核でありネオンの最も重い同位体は ^{34}Ne であることがわかった。

(2) 中性子過剰核の核構造

^{78}Ni は二重魔法数を持つ核と考えられており、元素合成過程では r 過程の waiting point となるため重要な役割を果たす。しかし、 ^{78}Ni 核近傍の核構造は実験的にはまだまだあまりよくわかっておらず、より軽い中性子過剰核で見られたように魔法数が増えることがあれば元素合成過程にも大きな影響を与えると考えられる。志賀はこの領域でのインビーム γ 線による核分光実験に参加し、偶偶核の低励起状態を系統的に調べた。 2^+ と 4^+ の励起状態の励起エネルギー、およびその比 ($R_{4/2}$) は核構造に特徴的である。

^{80}Zn の 2^+ の励起エネルギーを他の Zn 同位体や $N=50$ と比較することにより ^{78}Ni が魔法数を保っていることがわかった。また、 γ 線のドップラー効果から評価した 4^+ の寿命の値は 2^+ とほぼ同じとなっている。これと得られた $R_{4/2}$ の値とから、これらが ^{78}Ni を不活性コアとした 2 陽子配位のセニョリティ 2 の励起として説明できた。これは ^{80}Zn の一粒子準位では $(\pi p_{3/2})^2$ 配位と $(\pi f_{5/2})^2$ 配位が逆転していることを示唆しており、この領域での殻構造進化に関する重要な知見が得られた。

陽子閉殻である Ca 同位体については $N=32$ が新たな魔法数であることが高い励起エネルギーなどから示唆されていたが確定的な結論は得られておらず、換算励起確率の測定が望まれていた。藤野、梶野は理化学研究所 RIBF において ^{70}Zn の核破碎反応で得られた ^{52}Ca のクーロン励起により中性子過剰核 ^{52}Ca の $0^+ \rightarrow 2^+$ 遷移の換算遷移確率を求め、核構造を調べた。得られた値は予測通り近傍の核に比べて小さく新たな魔法数を支持するものであったが、殻模型による理論計算に比べると有意に大きく、芯励起の影響が残っていることを示唆しているものであった。

(3) 中性子検出器の開発

元素合成過程の研究では (n, γ) 反応の断面積が重要であるが、これは逆反応であるクーロン分解反応を用いた中性子測定で調べることができる。また中性子過剰核の構造や崩壊の研究においても放出中性子の測定は必要である。その際、終状態に放出される中性子のエネルギー・運動量を精度良く測定することが重要であり、我々はそのための新たな中性子検出器の開発を行ってきた。

中性子の検出においては、荷電粒子の測定にはない困難がある。一つはバックグラウンドを低減する上で同じく中性である γ 線との識別が必要な点である。従来、液体シンチレータについては励起密度の違いを利用して発光波形により弁別ができることが知られていたが、近年、固体シンチレータについても波形弁別の可能性が指摘されており、これについても調べた。多数の検出器を利用することを考慮すると、専用の回路ではなく汎用のモジュール等を用いて識別できることを目指している。

もう一つは核反応を利用して検出することから検出効率が低く、そのために大型の測定器が必要となる点である。そのため、エネルギー・運動量の測定精度を上げるには測定位置を限定することが必要となる。これらを解決するために 3次元で入射位置を特定できる中性子検出器の研究を行ってきた。

(3-1) n/γ 識別法の改善

松澤は次世代 PSD 型中性子検出器 NiGIRI (Neutron, ions and Gamma-rays Identification for Radioactive Isotope beam) の開発に参加した。この検出器は波形分析により γ 線と中性子、軽荷電粒子の識別が可能なプラスチックシンチレーターを用いた検出器アレイであり、配置を実験に合わせて変更して多粒子同時計測が可能である。HIMAC からのビームを利用して性能評価を行った結果、 γ 線・中性子の識別はできたが識別能についてはまだ改善の余地があることが分かった。軽荷電粒子についても波形弁別による識別が可能であることがわかった。

吉田は FPGA を用いて TDC の開発を行ってきたが、その応用としてトリガー条件をオンラインで調整することによりイベントの n/γ 比率を改善することに成功した。

西村、梶野は GAGG シンチレーターの中性子応答について調べ、波形弁別法によって 0.5MeV 以上で n/γ が可能であることを示した。

(3-2) 3次元位置感応型中性子検出器の開発

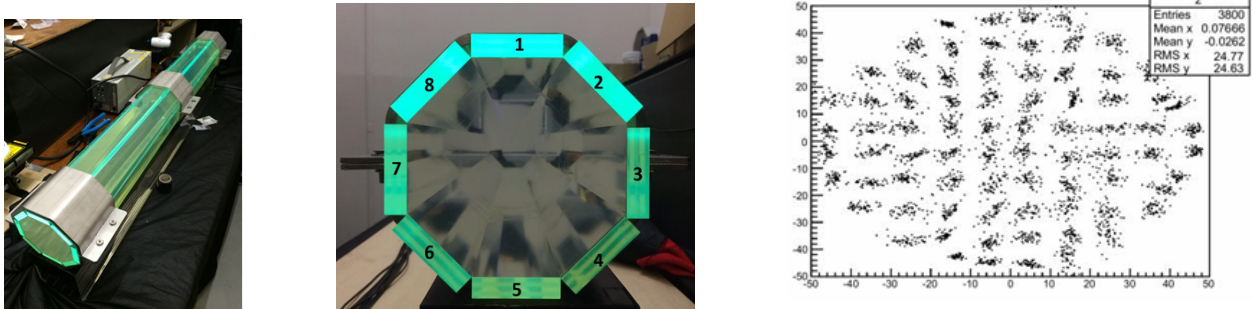
不安定核反応から放出される速中性子の測定では十分な検出効率を得るために大きな体積の検出器が必要であり、通常 1~2 m 程度の長さを持つプラスチックシンチレーターをアレイ状に使うことが多いが、エネルギーを飛行時間で決める際にはシンチレーター内での中性子の反応位置の不定性がエネルギー・運動量分解能の精度を制限してしまう。この点は中性子の検出位置を 1cm 以下の精度で 3次元的に知ることができる検出器を開発することにより解決できる。

長い直方体型シンチレーターではシンチレーション光の大部分は側面での全反射を繰り返し、両端の光電子増倍管で光量を検出される。この際、全反射条件を満たさずに側面に入射した光の一部は屈折して外部に捨てられていた。この光を利用すれば発光位置の情報を得ることが可能と考えられる。これまでは側面に波長変換型の光ファイバー (WLS ファイバー) を多数設置し、それを両端で読みだすことにより位置情報を得る方式を検討してきた。光センサとして高感度な MPPC を利用することで検出は可能となったが、波長変換後にファイバー両端まで到達できる光量が不足していたために位置の識別には至らなかった。そこで今回のプロジェクトでは 2つの点での改善を行った。

1. WLS ファイバーに替えて同じく波長変換が可能な WLS bar を使用しシンチレーション光の変換効率を増加させる。WLS bar についてはその吸収・再発光効率の絶対値が不明であったため、吸収係数を測定して厚さを 10mm

と決定した。同時に bar 端面からの光読み出しも新たに開発された大面積の MPPC を使用して効率を上げることにした。

2. プラスチックシンチレーターを八角形の断面をもつ形 (図中) とし、WLS bar をその 8 つの側面につけた。以前に行った 3 次元位置感応型 γ 線検出器開発の経験に基づき、WLS bar が検出可能なプラスチックシンチレーター内の発光領域を最適化したものである。



実際にシンチレーター内の光伝搬のモンテカルロシミュレーションを行ったところ、各 bar に入る光子数の非対称性から neural network 計算で発光位置を数ミリ程度で再現できることが確認できた (図右)。

そこで、実際に上図 (左) の八角形型の検出器を製作し、テストを行った。シンチレーター内の特定の位置で発光を起こすことは困難であるので、テストはシンチレーター光に近い波長をもつピコ秒のパルスレーザーをシンチレーター内に入射させ、散乱した光を利用した。この場合、「発光」はレーザーの通過する直線上で起こる。

シンチレーターの軸方向の位置については側面に出る光の広がりシミュレーションと同程度であることを確認し、実際にシンチレーター両端の PMT や bar 両端の MPPC 出力の非対称を用いて位置情報を再現することができた。この場合、光量比よりも光の到達時間差のほうが高い位置精度が得られることが分かった。

一方で、シンチレーター断面内での位置情報については、bar 毎の非対称のデータは観測できているものの、シミュレーションに比べると非対称の度合いが低く、位置を十分に再現するには至っていない。その原因については

- MPPC の増幅度が温度、印加電圧などに強く依存するが、これを較正する方法が確立できていない
- WLS bar や MPPC への集光効率がまだ不十分である
- 長さ方向の発光位置の広がりが非対称を弱めるが、その効果が考慮できていない

などが考えられる。

3. 優れた成果が上がった点

中性子過剰核の生成断面積や核構造の研究、および検出器周辺技術の研究については学会発表、原著論文、学位論文等の形でその成果を公表することができた。

4. 課題となった点

3 次元位置感応型検出器の開発については、これまでにない特徴を持つ検出器の設計やシミュレーションまでは順調に進んだが、テスト・較正の段階でいくつか問題が生じ、当初の予定からは遅れが生じることとなった。

5. 研究期間終了後の展望

中性子過剰核を用いた核構造研究は引き続き実施していく。

遅れている検出器の開発についても早急に問題点の改善を行い、実用化に向けて引き続き取り組んでいく予定である。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei ^{23}Al and ^{22}Mg
Y.G.Ma, D.Q.Fang, ... (掲載順：46人中16番目 **K. Ieki**)
Phys. Lett., **B 743**, 306 (2015).
2. Investigating nuclear shell structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$
Y.Shiga, K.Yoneda, ... (掲載順：41人中19番目 **K. Ieki**)
Phys. Rev., **C 93**, 024320 (2016).
3. Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of ^{23}Al and ^{22}Mg
D.Q.Fang, Y.G.Ma, ... (掲載順：46人中16番目 **K. Ieki**)
Phys. Rev., **C 94**, 044621 (2016).
4. New K isomers in the neutron-rich $N=100$ isotones ^{162}Sm , ^{163}Eu , and ^{164}Gd
R.Yokoyama, S.Go, ... (掲載順：36人中27番目 **K. Ieki**)
Phys. Rev., **C 95**, 034313 (2017).
5. Discovery of new isotopes $^{81,82}\text{Mo}$ and $^{85,86}\text{Ru}$ and a determination of the particle instability of ^{103}Sb
H.Suzuki, T.Kubo, ... (掲載順：37人中22番目 **K. Ieki**)
Phys. Rev., **C 96**, 034604 (2017)
6. Observation of isoscalar and isovector dipole excitations in neutron-rich ^{20}O
N.Nakatsuka, H.Baba, ... (掲載順：58人中15番目 **K. Ieki**)
Phys. Lett., **B 768**, 387 (2017).
7. Proton single particle energies next to ^{78}Ni : Spectroscopy of ^{77}Cu via single proton knock-out reaction
Zs.Vajta, D.Sohler, ... (掲載順：37人中21番目 **K. Ieki**)
Phys. Lett., **B 782**, 99 (2018).
8. Identification of New Neutron-Rich Isotopes in the Rare-Earth Region Produced by 345 MeV/nucleon ^{238}U
N.Fukuda, T.Kubo, ... (掲載順：34人中25番目 **K.Ieki**)
J. Phys. Soc. Jpn., **87**, 014202 (2018).

【国際学会発表】

1. Production yield measurement for neutron-rich nuclei around $Z=60$ from in-flight fission of a ^{238}U beam at 345 MeV/nucleon
4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Waikoloa, Hawaii, October 11, 2014)
Daichi Murai, **Kazuo Ieki**, Toshiyuki Kubo, Naohito Inabe, Daisuke Kameda, Naoki Fukuda, Hiroyuki Takeda, Hiroshi Suzuki, Koichi Yoshida
2. Coulomb excitation of ^{52}Ca
5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Waikoloa, Hawaii, October 27, 2018)
Yusuke Fujino, Yasuhiro Togano, **Kazuo Ieki**

【国内学会発表】

1. 大強度 ^{48}Ca ビームを用いた F 中性子ドリップラインの探索
日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大, 2015 年 9 月 25 日)
村井大地, **家城和夫**, ... (掲載順：22人中2番目 **家城和夫**)
2. 中性子過剰 Zn 同位体の低励起状態観測による二重魔法核 ^{78}Ni 近傍の核構造の研究
日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大, 2015 年 9 月 27 日)
志賀慶明, 米田健一郎, ... (掲載順：37人中18番目 **家城和夫**)

3. 大強度 ^{48}Ca ビームを用いた F 中性子ドリップライン探索 II
 日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 2016 年 3 月 20 日)
 村井大地, 家城和夫, ... (掲載順: 22 人中 2 番目 家城和夫)
4. $^{50,52}\text{Ca}$ の E1 応答測定
 日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大, 2017 年 9 月 12 日)
 梶野泰宏, 中村隆司, 小林俊雄, 近藤洋介, 藤野佑亮, 家城和夫, ...
5. ^{238}U の入射核破碎反応を用いた N=126 近傍の中性子過剰核の生成
 日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大, 2018 年 3 月 23 日)
 福田直樹, ... (掲載順: 20 人中 19 番目 家城和夫, 天野順貴)
6. $^{50,52}\text{Ca}$ の束縛 1-励起状態の探索
 日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大, 2018 年 3 月 24 日)
 藤野佑亮, 梶野泰宏, 小林俊雄, 中村隆, 近藤洋介, 家城和夫
7. ^{52}Ca の換算遷移確率 $B(E2;0^+ \rightarrow 2^+)$
 日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大, 2019 年 3 月 15 日)
 藤野佑亮, 梶野泰宏, 小林俊雄, 中村隆司, 近藤洋介, 家城和夫, ...
8. GAGG シンチレータによる中性子の応答と n-gamma 波形弁別
 日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大, 2019 年 3 月 15 日)
 西村未生, 家城和夫, 梶野泰宏, 藤野佑亮

惑星系の進化・大気散逸の観測に向けた観測技術の開発

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 亀田真吾

1. 背景と目的

広大な宇宙において、地球のように生命を有する惑星は他にあるのだろうか？地球の様に表層に海洋を有し、生命を育む環境を持つ惑星はまだ発見されていない。一方、太陽系外には3500個以上の惑星が見つかっている。多くは地球とは大きく異なる環境にあると考えられるものの、その大きさと熱輻射量が地球と同程度の惑星も見つかっている。これらの惑星を調査し、生命保有惑星を発見することは天文・惑星科学分野の究極的な目標である。この目標達成に向けて、惑星系での生命発生に必要な条件を解明し、それを満たす惑星を観測できる技術を獲得する必要がある。

生命保有惑星の発見に向け、数百から数千億円規模の大型地上・宇宙望遠鏡計画が天文学分野を中心に進められている。これらの設備を用いることを想定し、地球と全く同じ大気組成・表層環境の惑星があることを仮定した観測実現性検討が行われている。しかし、実際にはそのような惑星が存在するとは考えにくい。生命保有惑星であることを決定付けるためには、現在の姿だけではなく、その惑星系の進化過程を理解する必要がある。もし仮に観測時の大気組成が似ていたとしても、その惑星が辿ってきた環境進化過程に依って、海洋の存在した期間や、生命の発生条件等は大きく異なるだろう。

惑星科学分野では、「太陽系における生命前駆環境の進化」の解明に向けて、小惑星探査はやぶさ2や火星衛星探査MMXといった小天体探査計画が進められている。これにより、現在の地球には情報が残されていない有機物などの生命材料物質や、水輸送・循環といった生命の誕生と維持を可能とする環境の解明を目標としている。特に、生命材料物質や水の供給源となる小惑星帯以遠の物質分布とその輸送過程は、内側の地球型惑星の環境進化にとって非常に重要である。さらに惑星大気散逸による物質の輸送過程と惑星進化の理解も必要となる。太陽系外には様々な年齢の惑星が存在しており、これらの惑星系で起きている大気散逸現象を捉えることで、惑星大気進化過程に関する理論を検証することができる。

2. 研究成果

本研究では、惑星大気散逸現象の理解に向けた紫外観測器の開発、小天体探査用観測装置の開発、惑星進化史を解き明かすためのその場年代測定装置の開発を進めてきた。それぞれの成果について以下に示す。

(1) 惑星大気散逸現象の理解に向けた紫外線観測器の開発

深紫外線観測によって地球型惑星高層大気の観測が可能であり、さらに主星深紫外線輻射に応じて大気散逸量が大きく異なることを示した。系外惑星を持つ恒星の中で、深紫外線輻射量が測定されているものはごく一部である。「深紫外線輻射に応じて、系外惑星がどのような大気・気候を持ち、どのように進化するのか」を明らかにするためには、太陽系外にある様々な年齢を持つ惑星系での深紫外線輻射量と、そこにある惑星大気を観測する必要がある。現在進行中の望遠鏡計画は深紫外線領域に対応していないが、2030年代以降の実現に向けて検討されている超大型国際共同宇宙望遠鏡計画では、観測波長に深紫外線が含まれている。このような計画への参入に向け高感度深紫外線検出器の技術開発を進めてきた。特にファネル型MCPを紫外線検出器に利用するという手法

により高い効果が得られており、次世代の10m級宇宙望遠鏡LUVOIR計画において、要開発項目として挙げられている。

(2) 小天体探査用観測装置の開発

小惑星サンプルリターン計画はやぶさ2に参加し、3台の光学航法カメラ(ONC-T, W1, W2)の開発を進めた。組立そのものはメーカーで行われており、本研究では性能検証を兼ねた較正試験設備の開発と試験の実行に取り組んだ。その結果として、小惑星物質に類似していると推測される隕石試料と探査機に搭載した実機を使い分光スペクトルから、含水鉱物の有無を見分けるために十分な性能を持つことが確認された。また、各種較正実験の結果が輝度較正、歪曲補正などに用いられており、小惑星到着後にこのカメラデータを用いて得られた成果がScience誌に3編受理された。

(3) 惑星進化史解明に向けたその場年代測定装置の開発

惑星表層の形成年代を求めるためには、クレーターの密度分布が用いられている。この手法では、相対的な年代しか求められないが、月ではアポロ計画などで用いられた岩石試料の形成年代が絶対値として求められているため、この情報を合わせて年代分布が推定されている。また、別天体である火星でもこの手法と火星への小天体衝突履歴モデルを基にして、表面の年代分布がクレータ計数によってもとめられている。一方で、月面で得られた岩石資料の年代に偏りがあるために、小天体衝突履歴モデルの精度は充分ではない。そこで、月面試料の得られていない地域や、火星表面の試料が持ち帰られると良いが、重力天体からのサンプルリターンはまだ困難である。そこで、我々はその場で年代測定を行うために、K-Ar年代測定装置の開発を行い、主要な技術開発を完了した。

3. 優れた成果が上がった点

地球外圏水素大気の撮像を目的として、深宇宙探査機プロキオンに水素ライマン α 線カメラLAICAを搭載して観測を行った。アポロ計画以来42年振りに水素外圏大気の外から大気全体の分布を捉える事に成功した。この結果として、太陽系外惑星科学分野において、地球型惑星の高層大気観測の重要性が認識され、検討・開発中の大型計画に参加する足掛かりが出来た。

4. 課題となった点

その場年代測定装置の主要な技術開発は完了しており、装置の小型化にも成功しているが、惑星探査機に搭載するためには更なる小型化が必要である。また、この装置の要素としてレーザー絶縁破壊分光装置(LIBS)が必要であり、宇宙実証を進めるために、月探査計画や火星衛星探査計画といった着陸計画に提案したが不採択となっており、引き続き宇宙実証の機会を探す必要がある。

5. 研究期間終了後の展望

地球型惑星高層大気観測に向けた紫外線検出器の開発を継続する。現在は、ロシアが2023-2024年に打ち上げ予定の1.7m宇宙望遠鏡WSO-UV計画に参加しており、我々の開発する紫外線分光器を搭載する設計で2019年5月にロシア内の設計審査会が行われる予定である。この計画が実現すれば、世界に先駆けて地球型惑星の酸素大気を検出する可能性がある。また、はやぶさ2計画の後継として位置づけられる火星衛星探査計画では、望遠カメラ、可視分光カメラの提案を行った採択されており、本研究で得られた知識・経験を活かし、後継機でも性能検証・較正実験を進める。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa2 spacecraft
Kameda, S.; Suzuki, H.; ... (掲載順：1 9人中1 番目 **Kameda, S**)
Advances in Space Research **56**, 1519 (2015).
2. Quantitative Potassium Measurements with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Using Low-Energy Lasers: Application to In Situ K-Ar Geochronology for Planetary Exploration
Cho Y, Horiuchi M, Shibasaki K, **Kameda S**, Sugita S
Applied Spectroscopy **71**, 1969 (2016).
3. An in-situ K-Ar isochron dating method for planetary landers using a spot-by-spot laser-ablation technique
Cho, Yuichiro; Sugita, Seiji;... (掲載順：7 人中7 番目 **Kameda, Shingo**)
Planetary and Space Science **128**, 14 (2016).
4. Imaging Observations of the Hydrogen Coma of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2015 September by the PROCYON/LAICA
Shinnaka, Yoshiharu; Fougere, Nicolas; ... (掲載順：1 1 人中4 番目 **Kameda, Shingo**)
The Astronomical Journal **153**, 76 (2017).
5. Preflight Calibration Test Results for Optical Navigation Camera Telescope (ONC-T) Onboard the Hayabusa2 Spacecraft
Kameda, S.; Suzuki, H.; ... (掲載順：1 5 人中1 番目 **S. Kameda**)
Space Science Reviews **208**, 17 (2017).
6. Experimental characterization of elastomeric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K-Ar dating on Mars
Cho, Yuichiro; Kameda, Shingo; ... (掲載順：1 1 人中2 番目 **S. Kameda**)
Advances in Space Research **60**, 1453 (2017).
7. Ecliptic North-South Symmetry of Hydrogen Geocorona
S. Kameda, S. Ikezawa, ... (掲載順：1 3 人中1 番目 **S. Kameda**)
Geophysical Research Letters **44**, 11706 (2017).
8. Initial inflight calibration for Hayabusa2 optical navigation camera (ONC) for science observations of asteroid Ryugu
H.Suzuki, et al., (掲載順：1 5 人中5 番目 **S. Kameda**)
Icarus **300**, 341 (2018).
9. Stellar imaging coronagraph and exoplanet coronal spectrometer: two additional instruments for exoplanet exploration onboard the WSO-UV 1.7-m orbital telescope
Alexander Tavrov, Shingo Kameda,,,, (掲載順：1 4 人中2 番目 **S. Kameda**)
Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems **4**, 44001 (2018).

1 0. A chemical survey of exoplanets with ARIEL
Giovanna Tinetti, Pierre Drossart, Paul Eccleston, (掲載順：252人中169番目 **S. Kameda**)
Experimental Astronomy **46**, 135 (2018).

1 1. Observability of hydrogen-rich exospheres in Earth-like exoplanets
Leonardo A. dos Santos, Vincent Bourrier, David Ehrenreich, **Shingo Kameda**
Astronomy & Astrophysics **622**, A46 (2018).

【著書・総説・解説等】

なし

【国際学会発表】

1. Hydrogen Geocorona Observed by PROCYON/LAICA
AOGS2018(Invited) (シンガポール, June 2018)
S. Kameda et al. (掲載順：8人中1番目 **S. Kameda**)
2. FAR-EXTENDED HYDROGEN EXOSPHERE OBSERVED BY PROCYON/LAICA
COSPAR2018 (パサデナ, July 2018)
S. Kameda et al. (掲載順：7人中7番目 **S. Kameda**)
3. VUV Spectroscopy for terrestrial exoplanetary exosphere
EPSC2018(ベルリン, September 2018)
S. Kameda et al. (掲載順：8人中1番目 **S. Kameda**)
4. UVSPEX onboard WSO-UV
The Ninth Moscow Solar System Symposium (モスクワ, October 2018)
S. Kameda et al. (掲載順：10人中1番目 **S. Kameda**)
5. THEORETICAL SPECTRA OF HIGHLY-IRRADIATED ATMOSPHERES OF TRANSITING EXOPLANETS
The Ninth Moscow Solar System Symposium (モスクワ, October 2018)
M. Ikoma, et al. (掲載順：5人中5番目 **S. Kameda**)
6. Detection of Ar emission lines for K-Ar dating using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in vacuum
AOGS (poster) (Sapporo, July 2014)
Yu Okumura, et al. (掲載順：8人中5番目 **Shingo Kameda**)
7. An in-situ K-Ar Isochron Dating System for a Mars Rover Mission,
International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions (Maryland, Nov. 2014)
Y. Cho, **S. Kameda**, Y. N. Miura, H. Miyamoto, and S. Sugita
8. Laboratory Studies on Multi-Band Imaging of Hydrous Mineral Distribution by Hayabusa2/ONC-T,
AGU Fall meeting 2016 (poster) (San Francisco, Dec. 2016)

Tomohiro Takamatsu, Shingo Kameda, Seiji Sugita

9. Feasibility studies for the detection of atomic oxygen exospheres of terrestrial planets in the habitable zone of a low-temperature star with a UV space telescope
AGU Fall meeting 2016 (poster) (San Francisco, Dec. 2016)
Hiroki Horikoshi, Shingo Kameda, Go Murakami, Masahiro Ikoma, Norio Narita

- 1 0. Observation of Geocorona using Lyman Alpha Imaging CAmera (LAICA) onboard the very small deep space explorer PROCYON,
COSPAR 2014 (Moscow, 2014)
KAMEDA, Shingo; SATO, Masaki; ... (掲載順：7人中1番目 KAMEDA, Shingo)

- 1 1. Development of geocoronal Hydrogen Lyman Alpha Imaging CAmera (LAICA) onboard the very small deep space explorer PROCYON,
AOGS 2014 (poster) (Sapporo, June 2014)
SATO, Masaki; et al. (掲載順：6人中2番目 KAMEDA, Shingo)

【マスコミでの発表】

1. 2017/12/5 「24万kmまで広がる地球水素コロナの撮像に世界で初めて成功」プレスリリース

ダークマターサーチと、X線望遠鏡、干渉計の開発

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 北本俊二
星野晶夫

1 はじめに

「(B-3) 飛翔体観測と理論による、空間構造の解明」のうち、観測および実験の部分を報告する。観測では、Hitomi衛星でのダークマターに関する二つの結果と、ブラックホールや中性子星等のコンパクト星周りでの現象の観測がある。実験では、将来のブラックホール近傍等のX線による観測を目指すための、高角度分解能への二つの挑戦、「補償光学を用いた直入射X線望遠鏡の開発」と「X線干渉計の実現を目指して、可視、真空紫外線での干渉計の開発」について、それぞれ報告する。

2 ダークマターサーチ

銀河団は、銀河やガスから見積もられる質量では、高温ガスを閉じ込めるための質量には不足しており、ダークマターの存在を検証するには都合の良い天体である。北本他 [1] は、ペルセウス座銀河団でのガスの温度と密度の分布から推定されている質量分布を仮定して、中心部から出た光と周辺部から出た光の重力赤方偏移を推定した。図1がその例である。中心部と中心部から100pc離れて所から放射された光はおおよそ2~7km/sの速度に相当する赤方偏移の差が現れる。一方、2016年に打ち上げられた「ひとみ」衛星に搭載された軟X線スペクトロメーター(SXS)は、初めて、広がった天体に対して数km/sのドップラー効果を検出できる精度で輝線の中心エネルギーを決定できる。また、原子のイオン化状態や電子の遷移も特定できるため、複数の輝線の混合による中心エネルギーの見掛けの偏移の可能性を排除できる。一方、銀河団の高温ガスは乱流状態、またはバルク的な運動による大きなドップラー効果が推測されていた。

「ひとみ」衛星は、ガスの運動を調べることを主目的として、ペルセウス座銀河団を観測した。鉄輝線あたりのエネルギースペクトルを図2に示す。その結果、ガスの乱流的運動の大きさは予想されたものよりはるかに小さく、輝線の中心エネルギーは、まさに数km/sの精度で決定できる事がわかった[2]。そこで、場所による中心エネルギーの違いを解析したところ、図3のように中心から100kpcの範囲で100~150km/sにおよぶ変化があった。これを重力赤方偏移であるという根拠はなく、むしろガスのバルクな運動と考えるのが自然である。その結果は、[3]にまとめられている。そこでは、これまでに観測から推定される重力赤方偏移の大きさは、速度場測定系の系統誤差として考慮する事とした。ペルセウス座銀河団は中心に活動銀河核(AGN)があるので、赤方偏移はAGNからのガスの放出を一つの原因としてあげている。

この結果から、他の銀河団もガスの乱流的な動きは小さく、輝線の中心エネルギーを数km/sの精度での決定も可能であると推定できる。中心での活動の小さな銀河団で赤方偏移の観測を行うことで、ダークマターの分布や量に制限をつけることができる可能性が見えてきた。

ダークマターは、崩壊により光子を出す場合がある。そして、我々の銀河中心や、ペルセウス座銀河団を含む複数の天体を観測して、3.5 keVの未知の輝線を有意に検出したという報告がある。この輝線を7keVの”Sterile Neutrino”の崩壊時のX線であると仮定して、その量と寿命に制限を与えている[4, 5]。「ひとみ」衛星が観測したペルセウス座銀河団のデータを解析することで、3.5 keVの輝線を探した。その結果、有意な検出はなく、以前の検出報告を否定する、より厳しい上限値を与えることができた[6]。

3 望遠鏡の開発

我々は、将来は、ブラックホール近傍の様子をX線で撮像したという夢を持って、少しでも角度分解能の高いX線光学系を開発しようという試みを続けている。その一つが、補償光学を適用した、直入射型のX線望遠鏡の開発である。この方法で、波長域を13.5nmに限定した口径100mmの望遠鏡を試作している。この試作望遠鏡ではブラックホールの撮像は期待できないものの、理想的に作成できた場合は30ミリ秒角の分解能となり、X線望遠鏡としては

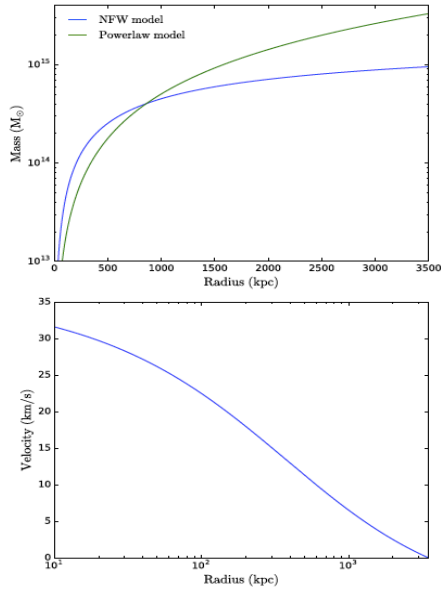


Figure 1: ペルセウス座銀河団の NFW Profile を仮定した質量分布 (上) とその時の赤方偏移量 (下)。

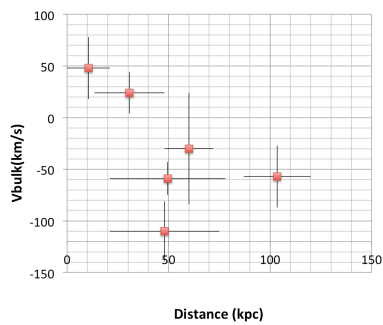


Figure 3: Hitomi 搭載の SXS によるペルセウス座銀河団の He 様 Fe K 線の偏移量。横軸は銀河団の中心からの距離である。

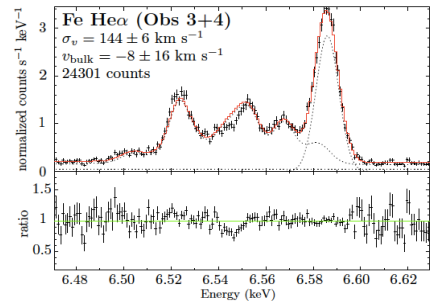


Figure 2: Hitomi 搭載の SXS によるペルセウス座銀河団の X 線エネルギースペクトル。鉄 K 輝線のエネルギー帯を拡大している。

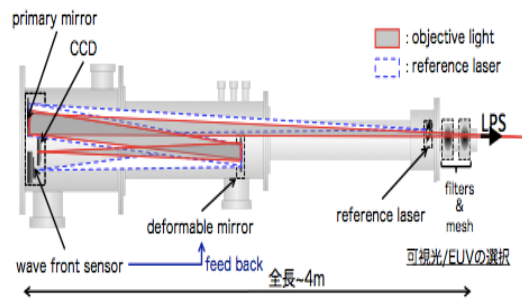


Figure 4: X-mosa 望遠鏡の全体図

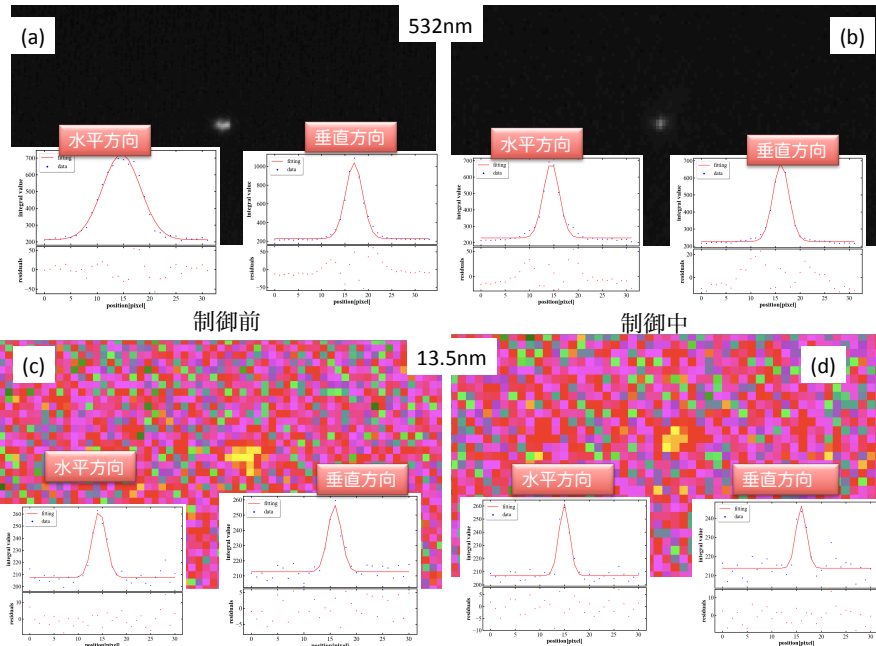


Figure 5: X-mra 望遠鏡による直径 50um のピンホールの像. CCD のピクセルサイズは 12um である。可視光での像を (a),(b) に、13.5nm の像を (c),(d) に示す。(a),(c) は補償光学による制御前、(b)(d) は制御中である。挿入したグラフは、像を水平方向、垂直方向に積算したグラフである。

世界最高の分解能となる。この分解能で、近傍の星や、連星系を観測すると、まだ、誰も見たことが無い太陽以外の星の様子を撮像することが可能となる。

図 4 に試作望遠鏡の全体像を示す。主鏡の焦点距離は 4000mm で、副鏡は可変形鏡である。光源はレーザープラズマ光源を使って 13.5nm の EUV または、可視光を切り替えることができる。また参照用の可視光レーザーを備え、その波面は波面センサーで測定する。光源からの光は裏面照射型でピクセルサイズ 12um の CCD で測定する。波面センサーで取得した波面形状を解析し、副鏡である可変形鏡を変形させることで、光学系の歪みを無くし、理想的な分解能に近づける。

図 5(a),(b) は直径 50um のピンホールを通した可視光の取得した像で、波面測定による制御をしない場合と、制御中の場合を示した。画面の垂直方向、水平方向での像の明るさ分布も示している。この像の広がりから、直径 50um のピンホールがつくる広がりを差し引いた残りの広がりから、レイレーの基準に換算して求めた角度分解能を表 1 に示す。回折限界での角度分解能は 1.34 秒角であるので、少し悪いが、制御により像がシャープになることがわかる。同様の測定を、同じく直径 50um のピンホールを通した 13.5nm の EUV で行なった。取得した像の水平、垂直の強度分布を制御前と、制御中のものを図 5(c),(d) 示した。同じように求めた分解能を表 1 に示す。水平、垂直方向で 0.43 秒角、0.24 秒角という結果を得ることができた。これは、今、X 線では世界で一番分解能の良い米国のチャンドラ衛星を超えるものであり、可視光、赤外の世界で名だたる大望遠鏡の性能に匹敵する。

今、最も分解能を悪くする要因は CCD のピクセルサイズが大き過ぎて像を量子化している事である。また、ピンホールも大きいものを使っているので、補正時の系統的な誤差も十分に見積もる必要がある。

Table 1: 角度分解能.

方向	可視光 (制御前)	可視光 (制御中)	EUV(制御前)	EUV(制御中)
水平 (秒角)	6.23	2.29	1.42	0.43
垂直 (秒角)	2.67	2.23	1.28	0.24

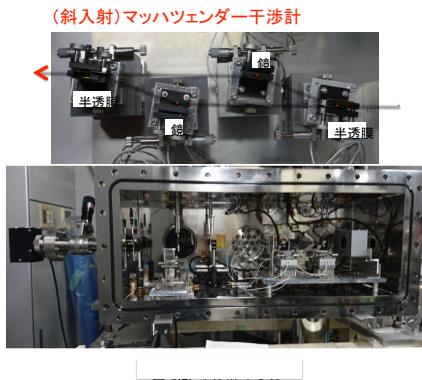


Figure 6: (上) 斜入射型マッハツェンダー型干渉計と、(下) 真空チェンバーに組み入れたところ。

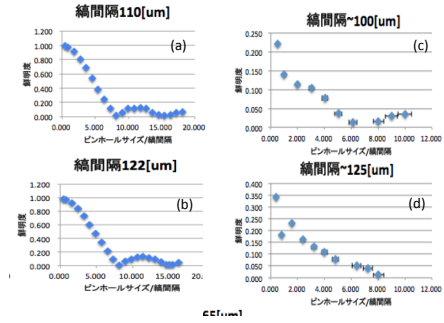


Figure 7: シミュレーションによる (ピンホールサイズ)/(縞間隔) を横軸にした鮮明度で縞間隔 110um の場合 (a)、縞間隔 122um の場合 (b)。横軸 (ピンホールサイズ)/(縞間隔) でプロットした実験で求めた鮮明度で、縞間隔 100um の場合と縞間隔 125um の場合。

4 X線干渉計の開発

通常、X線は斜入射でしか反射しない。一般に使用されているX線望遠鏡はWolter1型等の光学系で、曲率の大きな非球面鏡を用いることが多い。そのため、高い形状精度を出すことが難しく、理想的な角度分解能を達成することが困難である。一つの解決方法は、高い形状精度が期待できる平面鏡だけを使ったX線干渉計で、高い角度分解能を達成する方法である。Cash et al. (2004)[7]は、干渉計でさらに像を結ぶ画期的なアイデアでMAXIM計画を遂行した。しかし、複数の衛星の編隊飛行を要請する巨大な装置となることが避けられない。そこで、我々は、撮像を諦め、見かけのサイズだけを測定することに限定すること、X線のビームスプリッターを使うことで、マイケルソン型の干渉計にすれば、一つの衛星に搭載できる程度の大きさにすることができ、原理的にはいくつかのブラックホールの近傍からのX線放射のサイズを測定できることを示した[8]。そして、そのデモンストレーションのための実験を始めた。

実験では、可干渉な光源が必要である。マイケルソン型では非常に広がった可干渉な光源が必要である。そこで、ビームスプリッターをもう一つ加えてマッハツェンダー型すれば、細いビームで実験が可能となる。また、X線では要求精度が高いので、まずは可視光、真空紫外光の順に実験を進める事とした。図6に実験用に組み上げた干渉計と実験用の真空チェンバーを示す。可視光光源は浜松ホトニクス製の670nmの赤色LED(L6112-02)、160nmの真空紫外線光源として、浜松ホトニクス(HPK L10366)を使用する。

一方、マッハツェンダー型の場合、ピンホールを使いコヒーレントな光を作る。ピンホールサイズと干渉縞間隔の比をパラメータにして、鮮明度が変化する。図7(a),(b)は干渉縞間隔を一定にして、ピンホールサイズを変化させたときの期待される鮮明度を、光線追跡シミュレーションにより計算したものである。ピンホールサイズが大きくなると鮮明度が悪くなるのがわかる。ピンホールは星を模擬しているの、縞間隔がわかっているならば星のサイズが測定できるということである。

図7(c),(d)は、赤色LEDで縞間隔を100umおよび125umに固定して、ピンホールサイズを色々変えるながら鮮明度を取得したデータを示している。鮮明度の絶対値が小さくデータのばらつきは見られるものの、期待される鮮明

度の振る舞いが確認できた。現在、真空紫外での実験をはじめているところであり、まだデータの取得に至っていない。

5 コンパクト星近傍の物質流の研究

「ひとみ」衛星の観測、特に高質量連星系での観測に期待した [9] が残念ながら、コンパクト星では、たまたま視野の端に入っていた一つの天体 (IGR J 16318-4848) の観測で、19 光子の検出に止まった [10]。

すぎく、および、MAXI 等のデータ解析からは、コンパクト星近傍での物質流の研究を進めた。Yatabe et al.(2018) [11] では、X-Persei の自転周期の変化率と X 線の明るさの相関から、中性子星の半径、質量、磁場の大きさに制限を与えた。質量は系統誤差を大きく考える場合を除けば $(2.03 \pm 0.17)\text{Mo}$ という結果を示した。Yshida et al. (2017)[14] では、GX1+4 での鉄輝線の強度が中性子星の自転周期で変動していることを示した。また、Yoshida et al.(2018)[12] では、X 線パルサーが照射する星周物質での蛍光輝線は、強度変調が生じたり、照射する X 線の強度変動からの位相の遅れが生じることを示した。Sugimoto et al. (2016) [15] では、ブラックホールと考えられている Cyg X-1 の周りにできる降着円盤は、表面層と中心部での降着速度が異なり、表面であまり早い時間スケールで降着が起こっていることを示した。また、Sugimoto et al. (2017) [13] では、同じく Cyg X-1 の降着円盤の high/soft 状態で、初めて、公転位相による X 線の強度変動を発見し、その原因として、星風の影響であるという解釈を与えた。

6 研究成果公表

【原著論文】

1. Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector
Hitomi Collaboration, (掲載順：194 人中 72 番目 Kitamoto, S.)
PASJ, **70**, 113 (2018).
2. Erratum: “ A Suzaku View of Accretion-powered X-Ray Pulsar GX 1+4 ” (2017, ApJ, 838, 30)
Yoshida Y., Kitamoto, S., Suzuki, H., Hoshino, A., Naik, S., Jaiswal, G.W.
ApJ, **868**, 153 (2018).
3. An application of the Ghosh & Lamb model to the accretion-powered X-ray pulsar X Persei
Yatabe, F., Makishima, K., Mihara, T., Nakajima, M., Sugizaki, M., Kitamoto, S., Yoshida, Y., Takagi, T.
PASJ, **70**, 89 (2018).
4. Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9
Hitomi Collaboration, (掲載順：197 人中 72 番目 Kitamoto, S.)
PASJ, **70**, 38 (2018).
5. Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer
Megan, E.E. et al., (掲載順：28 人中 12 番目 Kitamoto, S.)
JATIS, **4b**, 1406 (2018).
6. Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite
Takahashi, T. et al., (掲載順：270 人中 103 番目 Kitamoto, S.)
JATIS, **4b**, 1402 (2018).
7. Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi
Hitomi Collaboration, (掲載順：194 人中 72 番目 Kitamoto, S.)
PASJ, **70**, 17 (2018).
8. Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta
Hitomi Collaboration, (掲載順：191 人中 72 番目 Kitamoto, S.)
PASJ, **70**, 16 (2018).

9. Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar
Hitomi Collaboration, (掲載順：195人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 15 (2018).
10. Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer
Hitomi Collaboration, (掲載順：195人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 14 (2018).
11. Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus
Hitomi Collaboration, (掲載順：194人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 13 (2018).
12. Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi
Hitomi Collaboration, (掲載順：195人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 12 (2018).
13. Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi
Hitomi Collaboration, (掲載順：195人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 11 (2018).
14. Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS
Hitomi Collaboration, (掲載順：195人中72番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 10 (2018).
15. Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi
Hitomi Collaboration, (掲載順：198人中75番目 **Kitamoto, S.**)
PASJ, **70**, 9 (2018).
16. Performance of the helium dewar and the cryocoolers of the Hitomi soft x-ray spectrometer
Fujimoto, R. et al., (掲載順：38人中12番目 **Kitamoto, S.**)
JATIS, **4b**, 1208 (2018).
17. Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster
Hitomi Collaboration, (掲載順：194人中71番目 **Kitamoto, S.**)
Nature, **551**, 478 (2017).
18. The Intensity Modulation of the Fluorescent Line by a Finite Light Speed Effect in Accretion-powered X-Ray Pulsars
Yoshida Y., **Kitamoto, S.**, **Hoshino, A.**
ApJ, **849**, 116 (2017).
19. Orbital modulations of X-ray light curves of Cygnus X-1 in its low/hard and high/soft states
Sugimoto, S., **Kitamoto, S.**, Mihara, T., Matsuoka, M.
PASJ, **69**, 52 (2017).
20. A Suzaku View of Accretion-powered X-Ray Pulsar GX 1+4
Yoshida Y., **Kitamoto, S.**, Suzuki, H., **Hoshino, A.**, Naik, S., Jaiswal, G.W.
ApJ, **849**, 116 (2017).
21. Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster
Aharonian, F.A. et al, (218人中52番目 **Kitamoto, S.**)
ApJ, **837**, 15 (2017).
22. The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster
Hitomi Collaboration, (掲載順：216人中79番目 **Kitamoto, S.**)
Nature, **535**, 117 (2016).

23. MAXI observations of long-term variations of Cygnus X-1 in the low/hard and the high/soft states
Sugimoto, Juri; Mihara, Tatehiro; **Kitamoto, Shunji**; Matsuoka, Masaru; Sugizaki, Mutsumi; Negoro, Hitoshi; Nakahira, Satoshi; Makishima, Kazuo
PASJ, **68**, 17 (2016).
24. The Astro-H high resolution soft x-ray spectrometer
Kelley, Richard L.; **Hoshino, A.**(57名中16番目)、**Kitamoto, S.** (57名中22番目)
Proc. of SPIE, **99050**, 99050V17 (2016).
25. Performance of the helium dewar and cryocoolers of ASTRO-H SXS
Fujimoto, Ryuichi, Kitamoto S.(39名中12番目), **Hoshino, A.** (39名中13番目)
Proc. of SPIE, **99053**, 99053S11 (2016).
26. In-orbit operation of the ASTRO-H SXS
Tsuji moto, Masahiro, **Hoshino, A.**(49名中17番目), **Kitamoto, S.** (49名中22番目)
Proc. of SPIE, **99050**, 99050Y10 (2016).
27. The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite
Takahashi, Tadayuki; **Hoshino, A.**(269名中71番目), **Kitamoto, S.** (269名中102番目), Uchiyama, Y. (269名中229番目)
Proc. of SPIE, **99050**, 99050U17 (2016).
28. New multiwavelength observations of the Of?p star CPD -28° 2561
Hubrig, S.; Scholler, M.; Kholtygin, A. F.; Tsumura, H.; **Hoshino, A.**; **Kitamoto, S.**; Oskino va, L.; Ignace, R.; Todt, H.; Ilyin, I.
MNRAS, **447**, 1885 (2015).
29. X-ray development of the classical nova V2672 Ophiuchi with Suzaku
Takei, Dai; Tsujimoto, Masahiro; Drake, Jeremy J.; **Kitamoto, Shunji**
PASJ, **66**, 37 (2014).
30. ASTRO-H White Paper - Accreting Pulsars, Magnetars, and Related Sources
Kitamoto, S.; Enoto, T.; et al.
arXiv, **1412**, 1165 (2014).
31. Estimation of observation possibility of the x-ray interferometer with an x-ray beam-splitter
Kitamoto, S.; Ogawa, S.; et al.
Proc. of SPIE, **9144**, 91441Z (2014).

【国際学会発表】

1. Recent performance of the normal incident X-ray telescope with adaptive optics
SPIE, 9965-19 (San Diego, USA, 2016.8)
Kitamoto, S., Ishii, R et al.,
2. Two Challenges for a High Angular Resolution X-ray Telescope: The Adaptive Optics and The Interferometer
「第13回 X線結像光学シンポジウム」(名古屋大学, 2015.11)
Kitamoto, S.,
3. Prospect with ASTRO-H on New Sciences of Accreting Pulsars, Magnetars, & Related Sources
American Astronomical Society, AAS Meeting (Seattle, USA, 2015.1)
Kitamoto, S., et al.

【国内学会発表】

1. 補償光学を応用した高角度分解能 X線望遠鏡の開発
大阪電気通信大学寝屋川キャンパス (大阪, 2018年9月)
津久井豊、**北本俊二**、細田翔

2. 天体観測用 X 線干渉計開発に向けた真空紫外線干渉計の開発
日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 2018 年 9 月)
稲垣徳晃、北本俊二、吉田裕貴
3. 高角度分解能 X 線望遠鏡 Xmas の開発
日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 2018 年 9 月)
津久井豊、北本俊二、細田翔
4. 降着駆動型 X 線パルサーにおける鉄 K 吸収端の光学的深さの自転位相変動
日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 2018 年 9 月)
吉田裕貴、北本俊二
5. TES 型 X 線マイクロカロリメータ動作環境の構築と評価
日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 2017 年 9 月)
星野晶夫, 石井亮太, 大木悠生, 佐藤清香, 糠森里美, 北本俊二
6. X 線補償光学 望遠鏡と X 線干渉計の開発
「X 線望遠鏡勉強会 2015」(名古屋大学, 2015 年 11 月)
吉田裕貴、北本俊二
7. 銀河団の高エネルギー分光観測における重力赤方偏移の影響
日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 2014 年 9 月)
北本俊二、津村大樹、林祐

References

- [1] 北本俊二、津村大樹、林祐, 日本天文学会 2014 年秋季大会、山形大学、2014 年 9 月.
- [2] Hitomi Collaboration et al. 2017, Nature, 535, 117.
- [3] Hitomi Collaboration et al. 2018, PASJ, 70, 9.
- [4] Sturuder, L. Briel, U, Denner, K. et al. 2001, A&A, 365, L18.
- [5] Turner, M.J.L. Abbey, A, Arnaud, M. et al. 2001, A&A, 365, L27.
- [6] Aharonian, F.A. et al. 2017, ApJ, 3837, L15.
- [7] Cash, W. 2004, Experimental Astronomy, 16, 91.
- [8] Kitamoto, S., et al. 2014, Proc. of SPIE, 9144, 91441z.
- [9] Kitamoto, S., et al. 2014, ASTRO-H White Paper- Accreting Pulsars, Magnetars and Related Sources, aXiv1412
- [10] Hitomi Collaboration 20148, PASJ, 70, 17.
- [11] Yatabe, F. et al. 2018, PASJ, 70, 89.
- [12] Yoshida, Y. et al. 2018, ApJ, 849, 116.
- [13] Sugimoto, J. et al. 2017, PASJ, 69, 52.
- [14] Yoshida, Y. et al. 2017, ApJ, 838, 30.
- [15] Sugimoto, J. et al. 2016, PASJ, 68, 17.

一般相対論の拡張と宇宙論、ブラックホール

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 小林 努

1. 背景と目的

宇宙物理学のさまざまな場面にスカラー場が登場する。スカラー場と重力場の相互作用する系は、インフレーション、ダークエネルギー、ダークマター、ブラックホール等の研究で特に重要である。そこで、スカラー場と重力場で記述される一般的な(したがって一般相対論を拡張したような理論を自然に含む)理論にもとづいて、そのような宇宙物理学の諸側面を研究することを目的とする。

2. 研究成果

- (1) スカラー・テンソル理論におけるブラックホール摂動論の一般論の構築
- (2) スカラー・テンソル理論におけるブラックホールとその安定性の解析
- (3) 有質量重力理論の諸側面の研究
- (4) ガリレイ的宇宙創世シナリオの提唱
- (5) 複数スカラー・テンソル理論の構築、インフレーションへの応用
- (6) 特異点のない宇宙禁止定理の証明
- (7) 可逆変換で物理的自由度の数が不変であることの証明
- (8) ミメティック重力の宇宙論とその不安定性の研究
- (9) 修正重力理論の遮蔽機構に関する諸研究
- (10) 修正重力理論における相対論的天体の研究
- (11) 修正重力理論を宇宙論的観測から制限することを目指した研究
- (12) 一般的な2次元ディラトン重力に関する考察と時間依存解の導出
- (13) 重力波観測から重力セクターのパリティ対称性の破れに対し制限を与える

3. 優れた成果が上がった点

ある種の修正重力理論では、物質内部でのみ重力法則の変更が起こることを指摘した。結果的に、重力波イベントGW170817により修正重力理論に厳しい制限が課されて以降も生き残っている理論はこの性質を持つクラスの理論であったため、当該論文の被引用回数も伸びている(2019年2月20日時点で87回)。また、運動方程式が2階となる理論で特異点のない宇宙が必ず不安定になることを証明した論文も強い結果であるため話題になり、2019年2月20日時点で61回引用されている。ブラックホール摂動論の一般論を構築した論文は、重力波の初検出以降特に注目され、2019年2月20日時点で62回引用されている。

4. 課題となった点

GW170817の観測が報告された直後に関連する理論の論文が大量に現れたが、その波に乗ってすぐには論文を出せなかった点。

5. 研究期間終了後の展望

今後は重力波に絡んだ研究が一層重要になってくる。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector
T. Kobayashi, H. Motohashi and T. Suyama
Phys. Rev. D **89**, 084042 (2014)
2. Exact black hole solutions in shift symmetric scalar-tensor theories
T. Kobayashi and N. Tanahashi
PTEP **2014**, 073E02 (2014)
3. Covariant Stekelberg analysis of de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity with a general fiducial metric
X. Gao, **T. Kobayashi**, M. Yamaguchi and D. Yoshida
Phys. Rev. D **90**, 124073 (2014)
4. Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski
T. Kobayashi, Y. Watanabe and D. Yamauchi
Phys. Rev. D **91**, 064013 (2015)
5. Generalized Galilean Genesis
S. Nishi and **T. Kobayashi**
JCAP **1503**, 057 (2015)
6. Galilean Creation of the Inflationary Universe
T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama
JCAP **1507**, 017 (2015)
7. The most general second-order field equations of bi-scalar-tensor theory in four dimensions
S. Ohashi, N. Tanahashi, **T. Kobayashi** and M. Yamaguchi
JHEP **1507**, 008 (2015)
8. Y. Akita and **T. Kobayashi**
Removing Ostrogradski's ghost from cosmological perturbations in $f(R, R_{\mu\nu}^2, C_{\mu\nu\rho\sigma}^2)$ gravity
Mod. Phys. Lett. A **31**, 1650067 (2016)
9. Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity
K. Yajima and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **92**, 103503 (2015)
10. Perturbations of Cosmological and Black Hole Solutions in Massive gravity and Bi-gravity
T. Kobayashi, M. Siino, M. Yamaguchi and D. Yoshida
PTEP **2016**, 103E02 (2016)
11. Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories
H. Ogawa, **T. Kobayashi** and T. Suyama
Phys. Rev. D **93**, 064078 (2016)
12. Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions
K. Takahashi, T. Suyama and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **93**, 064068 (2016)
13. Primordial non-Gaussianities of gravitational waves beyond Horndeski theories
Y. Akita and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **93**, 043519 (2016)
14. Reheating and Primordial Gravitational Waves in Generalized Galilean Genesis
S. Nishi and **T. Kobayashi**
JCAP **1604**, 018 (2016)

15. Ultra slow-roll G-inflation
S. Hirano, **T. Kobayashi** and **S. Yokoyama**
Phys. Rev. D **94**, 103515 (2016)
16. Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem
T. Kobayashi
Phys. Rev. D **94**, 043511 (2016)
17. Scale-invariant perturbations from NEC violation: A new variant of Galilean Genesis
S. Nishi and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **95**, 064001 (2017)
18. Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies
S. Akama and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **95**, 064011 (2017)
19. General invertible transformation and physical degrees of freedom
K. Takahashi, H. Motohashi, T. Suyama and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **95**, 084053 (2017)
20. Healthy imperfect dark matter from effective theory of mimetic cosmological perturbations
S. Hirano, S. Nishi and **T. Kobayashi**
JCAP **1707**, 009 (2017)
21. Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities
K. Takahashi and **T. Kobayashi**
JCAP **1711**, 038 (2017)
22. Matter bispectrum beyond Horndeski theories
S. Hirano, **T. Kobayashi**, H. Tashiro and **S. Yokoyama**
Phys. Rev. D **97**, 103517 (2018)
23. Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817
T. Kobayashi and **T. Hiramatsu**
Phys. Rev. D **97**, 104012 (2018)
24. Self-anisotropizing inflationary universe in Horndeski theory and beyond
H. W. H. Tahara, S. Nishi, **T. Kobayashi** and J. Yokoyama
JCAP **1807**, 058 (2018)
25. Parity-violating gravity and GW170817
A. Nishizawa and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D **98**, 124018 (2018)
26. Extended Cuscuton: Formulation
A. Iyonaga, K. Takahashi and **T. Kobayashi**
JCAP **1812**, 002 (2018)
27. Anti-screening of the Galileon force around a disk center hole
H. Ogawa, **T. Hiramatsu** and **T. Kobayashi**
Mod. Phys. Lett. A **34**, 1950013 (2019)
28. General theory of cosmological perturbations in open and closed universes from the Horndeski action
S. Akama and **T. Kobayashi**
Phys. Rev. D accepted, arXiv:1810.01863 [gr-qc].
29. Generalized 2D dilaton gravity and KGB
K. Takahashi and **T. Kobayashi**
submitted to Class. Quant. Grav., arXiv:1812.08847 [gr-qc].

30. Horndeski theory and beyond: a review
T. Kobayashi
submitted to Rept. Prog. Phys., arXiv:1901.07183 [gr-qc].
31. Constraining DHOST theories with linear growth of matter density fluctuations
S. Hirano, **T. Kobayashi**, D. Yamauchi and **S. Yokoyama**
submitted to Phys. Rev. D, arXiv:1902.02946 [astro-ph.CO].

【著書・総説・解説等】

1. **小林 努** 「相対性理論」 日本評論社
2. **小林 努** 「特異点のない宇宙とその不安定性」 日本物理学会誌 **73** (2018) 221-226.

【国際学会発表】

1. Vainshtein mechanism in the Horndeski theory and beyond
Relativistic Cosmology (京都大学基礎物理学研究所, 9月9日, 2014)
Tsutomu Kobayashi
2. Generalized Galilean Genesis
CosPA 2014 (Auckland, New Zealand, 12月9日, 2014)
Tsutomu Kobayashi
3. Galilean Creation of the Inflationary Universe
MG14 (Rome, Italy, 7月14日, 2015)
Tsutomu Kobayashi
4. Galilean Creation of the Inflationary Universe
Second LeCosPA International Symposium *Everything About Gravity* (Taipei, Taiwan, 12月15日, 2015)
Tsutomu Kobayashi
5. Primordial non-Gaussianities of gravitational waves beyond Horndeski
21st International Conference on General Relativity and Gravitation (Columbia University, New York, US, 7月11日, 2016)
Tsutomu Kobayashi
6. Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem
JGRG26 (大阪市立大学, 10月24日, 2016)
Tsutomu Kobayashi
7. Generic instabilities of non-singular cosmologies in second-order theories: A no-go theorem
新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」 (KEK, 3月9日, 2017)
Tsutomu Kobayashi
8. Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem
COSMO17 (Paris Diderot University, 8月30日, 2017)
Tsutomu Kobayashi
9. Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities
The first annual symposium of the innovative area Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis (東京大学柏キャンパス, 3月5日, 2018)
Tsutomu Kobayashi
10. Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST
MG15 (Rome, Italy, 7月6日, 2018)
Tsutomu Kobayashi
11. Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST
MOGRA2018 (名古屋大学, 8月9日, 2018)
Tsutomu Kobayashi

【国内学会発表】

1. 一般相対論の拡張
背景放射で拓く宇宙創成の物理 – インフレーションからダークエイジまで – シンポジウム 2014 (理研和光キャンパス, 6月3日, 2014)
小林 努
2. Exact black hole solutions in shift symmetric scalar-tensor theories
日本物理学会秋季大会 (佐賀大学, 佐賀市, 9月20日, 2014)
小林 努, 棚橋典大
3. Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski
日本物理学会年次大会 (早稲田大学, 3月21日, 2015)
小林 努, 渡辺悠貴, 山内大介
4. Galilean Creation of the Inflationary Universe
日本物理学会秋季大会 (大阪市立大学, 9月27日, 2015)
小林 努, 山口昌英, 横山順一
5. Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817
日本物理学会秋季大会 (信州大学, 9月15日, 2018)
小林 努, 平松尚志
6. Parity-violating gravity and GW170817
第7回観測的宇宙論ワークショップ (山口大学, 11月13日, 2018)
小林 努
7. 一般相対論とその拡張
第31回理論懇シンポジウム (京都大学基礎物理学研究所, 12月)
小林 努

【受賞】

1. 第33回西宮湯川記念賞 (2018年度) 「最も一般的な単一場インフレーション宇宙論の構築」

電子散乱でのぞく不安定核構造

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 栗田和好
榎園昭智

1. 背景と目的

我々は主として不安定核ビームを用いて元素合成機構の実験的解明と、そのさらにその内部構造であるクォーク・グルオンレベルでの物質生成の理論的解明というアプローチで宇宙における物質の起源の解明を目指している。宇宙初期のクォーク・グルオン系物質の振る舞いとビッグバン後の宇宙で膨張冷却後に起きている元素合成過程を探究することにより、物質の発展の歴史を宇宙の時間軸に対応させることが可能となる。

不安定核の構造理解は超新星爆発や中性子星マージャーなど爆発的に元素合成が成し遂げられ s-過程で実現される元素分布と現実を結びつける原子核モデルの精密化に役立つ。我々は世界に先駆けて、その r-過程で主役となる不安定核で最も信頼のおける電子散乱データでその形、大きさについて明確な情報を提供することを目指している。

2. 研究成果

(1) SCRIT法で実現した電子散乱実験による不安定核電荷分布の研究

原子核の構造理解で最も基本的な物理量である大きさと形状は過去の原子核物理ではその体系の根幹をなす物理量である。それを提供してくれるのが電子散乱実験であるが、固定標的作成の困難さからこれまで実現されることは無かった。我々は電子蓄積リングにトラップ領域を設け、不安定核イオンを閉じ込めて電子散乱実験をおこなう原理検証を済ませていた。しかし、不安定核の生成、蓄積、測定を実現するための装置の準備や運用技術の確立には多くの未知の開発が必要であった。我々はその様々な困難を乗り越えて2017年には不安定核実験に必要な全ての装置のチェーンテストに当たる ^{132}Xe 実験を実現させて、その成果を公表した[論1]。今後は世界に先駆けて標的核を我々のISOLイオン源であるERISから作られるUの核分裂辺を用いて真の不安定核電子散乱実験で基礎データを提供していく。

(2) ビームバンチャーの研究

我々がイオンを蓄積電子ビーム中に打ち込んでトラップさせることに成功したのは2008年のことである。その後、更地からスタートして電子蓄積リングおよび不安定核生成のためのISOLイオン源を稼働させ、実験の準備を進めてきた。しかし、最大の技術的課題は連続的に生成されるイオンを溜めておき、電子ビームに入射する際にエミッタンスの小さいパルスビームとして引き出すクーラーバンチャーの開発であった。いくつかの試みを行なった末に四重極リニアポールトラップをまず作成してバッファ領域に閉じ込める装置のフリッジ電場を利用して入射したばかりのイオンを減速できること、また少量のバッファガスを導入することで数十%のイオンを蓄積リングに入射可能にする手法を確立した[論2]。

(3) ビームモニタの研究

生成量の少ない不安定核イオンを蓄積領域であるSCRITデバイスまで輸送する際には、 10^5 程度のイオン数の通り道をモニターする必要があった。イオンの蛍光イメージが微弱である点を改良するために、立教大学に建設したイオン照射装置でイオン信号をMCP増幅してその問題の克服に成功した[学会8]。

3. 優れた成果が上がった点

世界で初めての不安定核電子散乱実験を可能ならしめたことと、高真空環境下でクーラーバンチャーを動作させる技術を確立したこと。

4. 課題となった点

本来は高エネルギー天体観測との連携を強め、より独自性の高い研究拠点形成を目指した。しかし、観測においては特性 γ 線のピークの測定が困難であることなどから、原子核の構造情報と天体からの光子の対応を直接結びつけることができていない。原子核モデルを介して間接的に統合的理解に至る手法の開拓が必要である。

5. 研究期間終了後の展望

不安定原子核の電子散乱実験装置は所定の性能に達したため、今後は ^{137}Cs を皮切りに不安定核データの量産体制にはいる予定である。一部の原子核は光核分裂反応における生成断面積が小さいために、十分な統計をためることができない。我々のイオン源ERISからの生成量を増加するためのドライバーの出力アップグレード（数W→20W→1kW）を段階的に進めて行き、核子系の元素合成の謎に迫るモデルの精密化を推し進めていく。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. First Elastic Electron Scattering from ^{132}Xe at the SCRIT Facility
K. Tsukada et al. (掲載順:17人中2番目 [A. Enokizono](#) 10番目 [K. Kurita](#))
Phys. Rev. Lett. 118, 262501(2017).
2. FRAC: Fringing-RF-field-activated dc-to-pulse converter for low-energy ion beams
M. Wakasugi et al. (掲載順:7人中2番目 [M. Togasaki](#) 4番目 [K. Kurita](#))
Review of Scientific Instruments 89,095107(2018).

【著書・総説・解説等】

1. 「実験技術 不安定核構造を映す電子顕微鏡を作る」若杉昌徳、大西哲也、須田利美、栗田和好、日本物理学会誌68(12)810-817.
2. “The SCRIT Electron Scattering Facility at RIKEN: The World’s First Electron Femtoscope for Short-Lived Unstable Nuclei” [A. Enokizono](#), T. Ohnishi and K. Tsukada, Nuclear Physic News Vol.28 No.2 (2018)18-22.

【国際学会発表】

1. Development of the electron spectrometer for the SCRIT experiment
4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Waikoloa, Hawaii, 8 October, 2014)
[A. Enokizono](#) et al.

2. Development of a Buffer Gas-Free Buncher for Low Energy RI Ion Beam
 HIAT2015 (Yokohama, Japan, 7–11 September 2015)
M. Togasaki, K. Kurita, K. Yamada, M. Hara, T. Ohnishi, M. Wakasugi, R. Toba
3. How electron scattering experiments with the unstable nuclei target
 International Symposium on MOdern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOTO16) (Rikkyo University
 26 June, 2016)
Kazuyoshi Kurita
4. The performance of the SCRIT detectors for electron-RI scattering experiment
 International Nuclear Physics Conference (Adelaid Convention Center, Austraria, 13 September, 2016)
Akitomo Enokizono et al.

【国内学会発表】

1. SCRIT法を用いた電子・不安定核散乱実験に向けたルミノシティ決定精度の評価
 日本物理学会秋季大会 (大阪市立大学, 2015年9月26日)
榎園昭智, 市川進一, 大西哲哉, 栗田和好, 須田利美, 玉江忠明, 塚田暁, 水流照明, 戸ヶ崎衛, 原正弘, 堀利匡, 松田一衛, 山田耕平, 若杉昌徳, 渡辺正満
2. SCRIT実験のためのイオンビームクーラー・バンチャの開発
 日本物理学会秋季大会 (大阪市立大学, 2015年9月26日)
戸ヶ崎衛, 大西哲哉, 栗田和好, 鳥羽瞭太, 原雅弘, 山田耕平, 若杉昌徳
3. SCRIT実験における散乱電子スペクトロメーターの開発
 日本物理学会第70回年次大会(早稲田大学, 2015年3月22日)
松尾咲希, 市川進一, 榎園昭智, 大西哲哉, 栗田和好, 須田利美, 玉江忠明, 塚田暁, 水流輝明, 戸ヶ崎徹, 堀利匡, 原雅弘, 松田一衛, 森谷洋祐, 米山俊平, 若杉昌徳
4. SCRIT法を用いたXe同位体標的における電子散乱のルミノシティ測定
 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 2016年3月20日)
榎園昭智, 足立江介, 市川進一, 大西哲哉, 栗田和好, 須田利美, 玉江忠明, 塚田暁, 水流照明, 戸ヶ崎衛, 原正弘, 藤田峻広, 堀利匡, 堀充希, 松田一衛, 山田耕平, 若杉昌徳, 渡辺正満
5. SCRIT法を用いたXe同位体標的・電子散乱実験におけるルミノシティ測定
 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学, 2016年9月23日)
藤田峻広, 足立江介, 市川進一, 榎園昭智, 大西哲哉, 栗田和好, 須田利美, 玉江忠明, 塚田暁, 戸ヶ崎衛, 原雅弘, 堀利匡, 堀充希, 松田一衛, 山田耕平, 若杉昌徳, 渡辺正満
6. SCRIT実験のためのイオンビームバンチャの開発
 日本物理学会第72回年次大会 (大阪大学, 2017年3月23日)
山田耕平, 大西哲哉, 栗田和好, 戸ヶ崎衛, 鳥羽僚太, 原雅弘, 渡辺正満, 若杉昌徳

7. 電子蓄積リングにおける電子散乱実験の制動輻射を用いたルミノシティ測定
日本物理学会第72回年次大会（大阪大学，2017年3月23日）
藤田峻広，足立江介，市川進一，内田信昭，榎園昭智，大西哲哉，笠間桂太，栗田和好，笹村薪之介，須田利美，玉江忠明，塚田暁，戸ヶ崎衛，南波和希，原雅弘，堀利匡，堀充希，松田一衛，山田耕平，若杉昌徳，渡邊正満
8. イオン照射装置性能評価のためのビームプロファイルモニター及びペッパーポットエミッタンスメータの開発
日本物理学会第72回年次大会（大阪大学，2017年3月23日）
中島秀，栗田和好
9. SCRIT実験：安定核標的による成果と今後
日本物理学会秋季大会（宇都宮大学，2017年9月14日）
塚田暁，市川進一，内田信昭，榎園昭智，大西哲哉，栗田和好，笹村薪ノ介，須田利美，玉江忠明，戸ヶ崎衛，原雅弘，堀利匡，堀充希，若杉昌徳，渡邊正満
10. 電子蓄積リングにおける二光子相関を用いたバンチ長モニター開発
日本物理学会第73回年次大会（東京理科大学，2018年3月22日）
堀充希，榎園昭智，大西哲哉，原雅弘，栗田和好，若杉昌徳，渡邊正満
11. SCRIT実験における捕獲されたイオンのモジュレーション依存性
日本物理学会第73回年次大会（東京理科大学，2018年3月22日）
内田信昭，足立江介，市川進一，榎園昭智，大西哲哉，笠間桂太，栗田和好，須田利美，玉江忠明，塚田暁，戸ヶ崎衛，原雅弘，藤田峻広，堀充希，堀利匡，山田耕平，若杉昌徳，渡邊正満

【受賞】

なし

【マスコミでの発表】

1. 2017/06/28 (WED)プレスリリース「原子核を見る新型電子顕微鏡の完成 —不安定核の陽子分布測定という新世界の扉を開けた—」（立教大学，理化学研究所，東北大学の同時リリース）

γ線測定装置DALI2の増強と不安定原子核の研究

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 本林透

1. 背景と目的

宇宙における元素合成には、有限の寿命を持つ不安定な原子核が関与する爆発的過程が重要な役割を果たす。理研RIビームファクトリー（RIBF）などの新しい加速器施設により、そのような不安定原子核の研究が可能となってきた。DALI2（Detector Assembly for Low Intensity Radiation 2）は、そのような原子核の低励起状態の分光を行うために立教大学で設計され、理研と共同で建設されたγ線検出装置である。特に、RIBFによって初めて到達できる中性子がまたは陽子が過剰な原子核の性質が通常のものとはどう異なるかを明らかにし、元素合成過程の理解を大きく進展させることを目指している。

2. 研究成果

事業期間内に29編の査読つき原著論文が出版されている。研究課題を大別して挙げる。

(1) 中性子過剰核での魔法数の挙動

中性子数20の領域で見られる配位反転について、 $29,30,32\text{Ne}$, 32Mg が研究され、いわゆる反転の島の全貌が明らかになった。中性子数40でも配位反転が起きることもわかってきた。

中性子数 32, 34 が中性子過剰領域では魔法性を持つことが、 52Ca , 54Ca に続いて 50Ar , 52Ar , 55Sc で確認され、新しい魔法数の出現が確立した。

中性子数28での魔法性は、特にr過程元素合成の関連で注目されるが、 76Ni , $76,77,79\text{Cu}$, $80-84\text{Zn}$ の構造が明らかになり、さらに 78Ni が二重魔法核の性格を持つことがわかった。これは、爆発的重元素合成の計算で仮定されていることを大局的には支持する。

(2) 新たな変形核の領域の発見

$36,28,40\text{Mg}$ の低い励起準位を観測することに成功した。理論予想とは異なり、非常に安定した回転帯が確立しており、新たな大変形領域が付近広がっていることが示唆される。さらに広い範囲での研究が必要だが、爆発的要素合成、特にその初期の挙動を知る上で、重要な寄与をされると考えられる。

(3) r-過程経由核の分光

元素組成の第2ピークを作るもとなる中性子数82付近の中性子過剰 Cd , Te , Sn 核のγ線分光が行われた。二重魔法数核 132Sn 周辺の挙動は、比較的簡単な理論的描像で理解できることがわかり、元素合成計算への貢献が期待できる。

3. 優れた成果が上がった点

2. (成果) で記述したように、中性子魔法数 20, 28, 50, 82を含む領域の研究が大きく進展した。新しい魔法数の確立、新しい変形核領域の発見がこの5年でのハイライトである。またr-過程経由核の領域までは28, 50 の中性子魔法数が健在であることがわかってきたことは、重い核の元素合成についての描像を大きく変更する必要がないことを示している。

4. 課題となった点

現在の加速器の性能を前提にすると、DALI2 で低励起状態を研究できる不安定原子核は、ほぼ尽くしたと考えられる。そういう意味では大成功である。これを越えるには、よりエネルギー分解能が良く、かつ効率の高い検出装置が必要である。

例えば、中性子魔法数126が関与するr-過程第3ピークの理解のためには、関与する原子核の生成自体が挑戦課題であるが、その分光を行うために、そのような検出器が必須である。

5. 研究期間終了後の展望

上に述べたように、DALI2の主な使命は達成したと考えられるが、その強力な性能により、今後も様々な研究に組み合わされて使われ、増強は続くと考えられる。より高い検出効率を持つ装置 CATANA の建設が梅野研究員を中心に進んでいる。効率とエネルギー分解能を兼ね備えた装置については、半導体検出器を用いるものや、新しいシンチレーターを用いるものなどが提案され、検討が進んでいる。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Low-Lying Structure of ^{50}Ar and the $N=32$ Subshell Closure
D. Steppenbeck, ... (掲載順: 23人中13番目 **T. Motobayashi**)
Phys. Rev. Lett. **114**, 252501 (2015)
2. γ -ray spectroscopy of ^{19}C via the single-neutron knock-out reaction
Zs. Vajta, ... (掲載順: 23人中13番目 **T. Motobayashi**)
Phys. Rev. C **91**, 064315 (2015)
3. Relativistic Coulomb excitation in ^{32}Mg near 200 MeV/nucleon with a thick target
K. Li, ... (掲載順: 11人中3番目 **T. Motobayashi**)
Phys. Rev. C **92**, 014608 (2015)
4. One-neutron removal from ^{29}Ne : Defining the lower limits of the island of inversion
N. Kobayashi, ... (掲載順: 30人中18番目 **T. Motobayashi**)
Phys. Rev. C **93**, 014613 (2016)
5. Investigating nuclear shell structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$
Y. Shiga, ... (掲載順: 39人中23番目 **T. Motobayashi**)
Phys. Rev. C **93**, 024320 (2016)

6. Asymmetry dependence of reduction factors from single-nucleon knockout of ^{30}Ne at ~ 230 MeV/nucleon
 J. Lee,... (掲載順 : 23人中20番目 T. Motobayashi)
 Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 083D01 (2016)
7. Mapping the deformation in the ‘island of inversion’: Inelastic scattering of ^{30}Ne and ^{36}Mg at intermediate energies
 P. Doornenbal,... (掲載順 : 20人中15番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C 93 044306 (2016)
8. First spectroscopic information from even-even nuclei in the region “southeast” of ^{132}Sn : Neutron-excitation dominance of the 2^+ state in ^{132}Cd
 H. Wang,... (掲載順 : 26人中5番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **94**, 051301 (2016)
9. The Low-Z Shore of the “Island of Inversion” and the Reduced Neutron Magicity Towards 280
 P. Doornenbal,... (掲載順 : 21人中16番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **95**, 041301 (2017)
10. Gamma decay of unbound neutron-hole states in ^{133}Sn
 V. Vaquero,... (掲載順 : 34人中24番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. Lett. **118**, 202502 (2017)
11. Single-neutron knockout from ^{20}C and the structure of ^{19}C
 J. Hwang,... (掲載順 : 45人中25番目 T. Motobayashi)
 Phys. Lett. B **769**, 503 (2017)
12. Low-lying structure and shape evolution in neutron-rich Se Isotopes
 S. Chen,... (掲載順 : 63人中15番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **95**, 041302 (2017)
13. Intruder configurations in the ground state of ^{30}Ne
 H.N.Liu,... (掲載順 : 22人中16番目 T. Motobayashi)
 Phys. Lett. B **767**, 58 (2017)
14. Shape Evolution in Neutron-Rich Krypton Isotopes Beyond $N=60$: First Spectroscopy of $^{98,100}\text{Kr}$
 F. Flavigny,... (掲載順 : 62人中15番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. Lett. **118**, 242501 (2017)
15. Triaxiality of neutron-rich $^{84,86,88}\text{Ge}$ from low-energy nuclear spectra
 M. Lettmann,... (掲載順 : 64人中19番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **96**, 011301 (2017)

- 1 6. In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{35}Mg via knockout reactions at intermediate energies
S. Momiyama, ... (掲載順: 2 4 人中 1 8 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. C **96**, 034328
- 1 7. Shell evolution beyond $Z=28$ and $Z=50$: Spectroscopy of $^{81,82,83,84}\text{Zn}$
C.M. Shand, ... (掲載順: 9 6 人中 2 5 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Lett. **773** 492 (2017)
- 1 8. Persistence of the $Z = 28$ Shell Gap Around ^{78}Ni : First Spectroscopy of ^{79}Cu
L. Olivier, ... (掲載順: 6 5 人中 2 2 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. Lett. **119**, 192501 (2017)
- 1 9. Structure of ^{55}Sc and development of the $N = 34$ subshell closure
D. Steppenbeck, ... (掲載順: 2 4 人中 1 2 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. C **96**, 064310 (2017)
- 2 0. Inelastic scattering of neutron-rich Ni and Zn isotopes off a proton target
M.L. Cortes, ... (掲載順: 6 8 人中 2 4 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. C **97**, 044315 (2018)
- 2 1. Spectroscopy of nuclei around ^{100}Sn populated via two-neutron knockout reactions
A. Corsi, ... (掲載順: 3 0 人中 1 9 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. C **97**, 044321 (2018)
- 2 2. Proton single particle energies next to ^{78}Ni : Spectroscopy of ^{77}Cu via single proton knock-out reaction
Zs. Vajta, ... (掲載順: 3 5 人中 6 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Lett. B **782**, 99 (2018)
- 2 3. Spectroscopy of $^{65,67}\text{Mn}$: Strong coupling in the $N=40$ “island of inversion”
X.Y. Liu, ... (掲載順: 7 4 人中 1 8 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Lett. B **784**, 392 (2018)
- 2 4. Shape coexistence and isospin symmetry in $A = 70$ nuclei: Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus ^{70}Kr
K. Wimmer, ... (掲載順: 3 4 人中 2 1 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Lett. B **785**, 441 (2018)
- 2 5. Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in ^{132}Sn
J. Yasuda, ... (掲載順: 6 0 人中 2 9 番目 [T. Motobayashi](#))
Phys. Rev. Lett. **121**, 132501 (2018)

26. Spectroscopy of strongly deformed ^{32}Ne by proton knockout reactions
 I. Murray, ... (掲載順: 22人中12番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **99**, 011302 (2019)
27. Nuclear structure of ^{76}Ni by (p,2p) reaction
 Z. Elekes, ... (掲載順: 65人中21番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C **99**, 014312 (2019)
28. How Robust is the N=34 Subshell Closure? First Spectroscopy of ^{52}Ar
 H.N. Liu, ... (掲載順: 84人中30番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. Lett. **122**, 072502 (2019)
29. In-beam gamma-ray Spectroscopy of ^{136}Te at Relativistic Energies
 V. Vaquero, ... (掲載順: 34人中24番目 T. Motobayashi)
 Phys. Rev. C (2019) in print
30. ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation
 R. Taniuchi, ... (掲載順: 70人中20番目 T. Motobayashi)
 Nature, accepted

【著書・総説・解説等】

1. 極限原子核のフロンティア開拓 - ニホニウムとRIビームファクトリー
 小特集『平成の飛跡』、日本物理学会誌 (2019) in press

【国際学会発表】

1. Coulomb dissociation - another “Trojan Horse”
 Nuclear Physics in Astrophysics VIII (NPA8) (Catania, Italy, June 18-23, 2017)
Tohru Motobayashi

【国内学会発表】

1. 短寿命核直接反応で探る魔法数の消長
 日本物理学会 (宮崎大学、2016年9月)
本林透

【受賞】

1. 2015年度仁科記念賞 「中性子過剰核における魔法数の異常性の発見」
 (櫻井博儀氏と共同受賞)

時間反転対称性と余剰空間次元の探索

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 村田 次郎

1. 背景と目的

3次元空間と、1次元の時間からなる4次元時空は、通常、物理学の出発点に位置する概念である。我々の身体的な知覚に基づく直感は空間が3次元である事を支持し、また、時間の流れの感覚は一方方向へ流れる機能を持つ時間軸、という本来物理学として誤った概念に多分に影響を受けながら、過去と未来へ向かう物理法則は別物であると予想する。

一方で、実証科学としての物理学は別の根拠でこれら、すなわち3次元空間と流れない時間軸を支持する。本研究では、これらの根拠に立ち返り、実験的な証拠を最も厳しく精査すると共に、新たな物理の兆候がないかを検証する事を目的とする。上記の目的を達成するため、空間が3次元である事を検証する手段として、重力逆二乗則の検証実験を行い、かつ、時間反転対称性の破れを弱い相互作用において探索する実験を行った。

2. 研究成果

上記の目的を達成するため、空間が3次元である事を検証する手段として、重力逆二乗則の検証実験を行い、かつ、時間反転対称性の破れを弱い相互作用において探索する実験を行った。

(1) 時間反転対称性の破れ

空間反転に対して物理法則が形を変えない性質はパリティ対称性と呼ばれており、通常、物理法則が満たすべき基本対称性である。日常生活で目にする左右対称性の破れは偶然による現象の破れであり、化学物質、生命を構成する分子の左右非対称性を含めて物理法則から生じるものではない。ところが、このパリティ対称性は弱い相互作用においては破れる事が半世紀前に発見された。素粒子の標準模型はこのパリティ対称性、更にはその後にはCP対称性の破れと共に理論的な枠組みに取り込んでおり、全ての実験事実を高精度で説明する。しかし、それらの破れがどこから来ているものなのか、なぜ破れる必然性があるのかは未知のままである。

CP対称性の破れは物質と反物質に本質的に違いがある事を意味する。「右」と「左」を区別する手段は存在せず、ただパリティの破れの現象を使ってのみそれが実現できる。同様に、「物質」と「反物質」を区別する方法は存在しないが、弱い相互作用におけるCP対称性の破れを使えば実現できる。しかし、そもそも我々の宇宙には反物質は殆ど存在しない。だから、「多い方が物質」と考えて構わない。

では、なぜ宇宙は物質を選択できたのか。物質と反物質が区別出来ないならば、宇宙にも物質を選んで存在比を多くする事は出来なかったはずである。従って、宇宙はCP対称性の破れを宇宙開闢時に使ったはずである。これが、CP対称性が成り立つならばビッグバンで宇宙が生成した際に等量作られたはずの物質と反物質が、圧倒的に物質ばかりが観測される理由である。しかし、問題がある。CP対称性を破る弱い相互作用の性質が、現在知られている小林・益川機構では宇宙の物質・反物質存在比を定量的に説明するには全く不足しているのである。破れの程度が小さすぎるのである。

そこで、これまでに観測されているCP対称性の破れる現象以外に、破れが未発見のまま存在しているはずだと考えられている。これが小林・益川模型が確立しノーベル賞を受賞した後も対称性の破れの探索が続けられている動機である。小林・益川ではない、つまり標準模型を超える現象の発見を目指した試みである。

CP対称性と時間反転対称性は密接に関係しており、現象としては全く別のものであるが、CPT定理の下でそれらの破れは等価と見なせる。本研究は、以上の動機に基づき標準模型を超える物理を探索する手段として弱い相互作用における時間反転対称性の破れを世界最高精度で実行する事を目指して進められた。

本研究の準備段階として、平面型ドリフトチェンバーを用いた偏極リチウム8核のベータ崩壊による放出電子の横方向偏極の有無を検証する試験的な試みを行い、その次世代機として円筒型ドリフトチェンバーを用いた検出システムを完成させていた。本研究では、これらをカナダのTRIUMF研究所の加速器施設に設置し、物理実験を実行させた。特に、物理実験の精度を決定する主要因である系統誤差の性質を明らかにする事に集中し、その効果的な抑制と評価方法、そして解析方法の確立に成功した。

科学研究費補助金で進めたMTV実験のデータ収集は本研究の成果を受けて成功裏に終わり、無事にTRIUMF研究所で計画されたビームタイムの全てを消化して終了した。検出器群は解体が既に進められており、MTV実験はここに一旦、幕を下ろす事となる。MTV実験は当初、時間反転対称性の破れの探索を目的として計画された。得られたデータを物理法則と比較する際にその中で最も大きな不確定要因となるものは偏極分解能という性質である。これは従来、計算によって求められてきたものであるが、計測によってそれを行う方が信頼性は高まる。

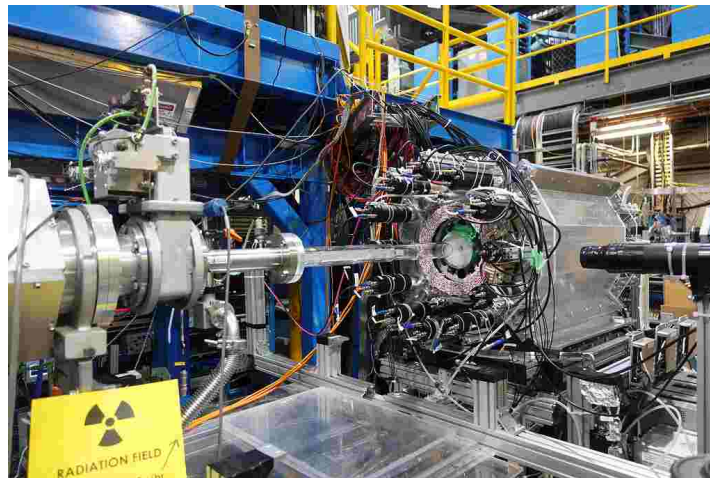


図1 MTV実験 円筒ドリフトチェンバーを用いたMott散乱による電子横偏極測定系

(2) N相関

MTV実験は当初、時間反転対称性の破れの探索を目的として計画された。得られたデータを物理法則と比較する際にその中で最も大きな不確定要因となるものは偏極分解能という性質である。これは従来、計算によって求められてきたものであるが、計測によってそれを行う方が信頼性は高まる。時間反転対称性の破れの指標となるR相関と全く同じ偏極分解能を持つ物理現象がN相関である。N相関は標準模型の範囲内でゼロでない値が予想されており、標準模型の計算値を用いる事でR相関の解析から偏極分解能の不定性を排除することが出来るようになる。

一方で、そもそもN相関という現象は物理現象として観測されたことがない。これは、測定に際してR相関と全く同じだけの困難さが伴う為であり、MTV実験が行われるまで原子核のベータ崩壊の実験データは存在していなかった。MTV実験では、本研究としてN相関の計測の為に専用の測定を行い、興味深い結果を得る事が出来た。初めて観測された物理現象として、公表予定である。

(3) ローレンツ対称性の破れ

弱い相互作用はパリティ対称性を破り、CP対称性を破る、実に奇妙な相互作用である。ここに、更に、ローレンツ対称性を疑うアイデアが流行している。動機としては量子重力理論の困難を解消する点が挙げられる。そこで、考えられる限り全ての観測系において、ローレンツ対称性が破れていないかが徹底的に調査された。とりわけ、重力や電磁相互作用は高精度で検証された。一方、弱い相互作用は今度も、もっとも緩い制限しかかかっていない。何かが起こるとすれば弱い相互作用である、という機運が高まっている。

そこで、弱い相互作用における対称性の破れを超高精度で検証しているMTV実験に期待が集まった。MTV実験の主眼であるR相関と平行して、ローレンツ対称性の検証を科研費国際化加速事業として進める事とした。TRIUMF研究所の偏極ビームを用いて初めて実現可能になるものだからである。本研究では、その測定に必要なデータ収集システムの開発を行った。それまで用いていた汎用のシステムとは違い、時間測定の信頼性を高めた専用システムで、この実装によりローレンツ対称性の物理データ収集とその科学的な成果へつなげる事が出来た。

(4) 近距離重力実験

MTV実験が超高精度で検証し続けている素粒子標準模型は、また、その拡張版である大統一理論などでも、重力は範囲外である。重力を統一的に説明できる可能性は超弦理論であるが、これは空間が3次元を超える余剰次元が存在するという。重力は遮蔽が出来ないため、余剰次元方向にも広げられる。我々の3次元宇宙で重力が弱く、統一を阻むのは余剰次元へ重力が逃げているため、という未検証の考え方がある。

余剰次元空間の存在は、重力現象を調べればわかる。本研究は、実験で未検証のミクロン距離における重力の逆二乗則の検証を行う事を目的に進められた。

本研究の前段階で、Newton-IV号を建設しミリメートル距離での逆二乗則の検証に成功していた。これはねじれ秤を用いたもので、10%程度の相対精度で重力がニュートン重力と矛盾なくはたらいっている事が確認された。これは余剰次元空間が存在するとしてもこの大きさを超えてはならない、という強い制限を課すことになる重要な成果である。しかし、この結果には先行研究があり、初めてのデータではない。

そこで、本研究では未検証のミクロン距離に視点を移し、この距離での余剰次元の探索を行う事とした。そのため、ねじれ秤ではなく全く新たにワイヤーカンチレバーを採用し、その基礎開発を進めて来た。重力センサーとしての性能評価と、具体的な実装を行った上で物理測定を行った。結果として、統計精度は予想通りの高精度を達成したが、重力センサーと重力源の物体の近接距離を設計距離まで縮める事が出来なかった。原理的には10ミクロン程度まで接触なく達するはずの設計であったが、設置精度の問題で80ミクロンにまでしか接近できず、ここで打ち止めとなった。

本研究では、その設置精度の問題を排除可能な全く新しい重力源設計とし、その試験的な導入を行った。併せて、重力センサーの計測系も干渉型レーザー変位計の導入という大きな方向転換を行って、本研究終了後の展開へ結びつけつつある。

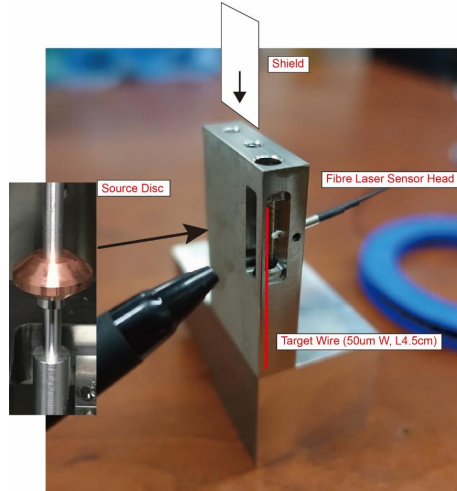


図2 導入中の干渉型レーザー変位計を用いたミクロン距離における測定系

(5) 等価原理の検証

近距離重力実験としては、逆二乗則の検証による余剰次元の探索の他、等価原理の検証と解釈できる万有引力定数の物質依存性の検証も同時に進めた。本グループでの近距離重力実験は初号機からNewton-何号機と名付けられているが、Newton-I、およびII号機において、その信号が本当に重力起源のものであって電気的な系統誤差ではない事を確認する為に当初進めた重力定数の物質依存性の検証を、意味を逆手にとって等価原理の検証として科学測定として進めた。得られた結果はセンチメートル距離での世界初の検証となっており、プレスリリースにつながった成果となった。

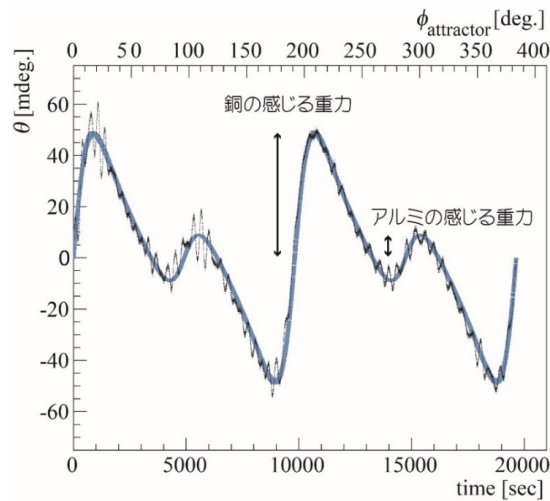


図3 Newton-IIを用いたセンチメートル距離の重力の物質依存性

3. 優れた成果が上がった点

MTV実験は本研究の支援があって成功裏にデータ収集を完了し、長年の目的を果たす事が出来た。その一方でローレンツ対称性やN相関など、新しいアイデアが研究期間中に得られ、それらに対する展開を素早く行う事が出来た。

近距離重力実験はミクロン距離における検証を実行するに至っており、既に余剰次元の探索において世界で有数の存在という地位を確固とするに至った。

4. 課題となった点

MTV実験は系統誤差の処理に困難を抱えた。その処理だけで3年間をかけて対策を続け、ようやく信頼性を確保するに至った。得られたデータから系統誤差をさらに除去する試みは継続的に可能であり、今後も結果の精度が飛躍的に向上する可能性を残している。

近距離重力実験は研究計画であげていた物理実験を実行にこぎつけたが、設計仕様の実現に精度上の限界が存在する事が明らかとなった。そこで、抜本的に重力センサーを入れ替える事でミクロン距離における逆二乗則の検証へつなげる予定である。

5. 研究期間終了後の展望

MTV実験は一旦完了であり、次の展開は大量に取得したデータの解析、公表後となる。準備として、ローレンツ対称性の検証、太陽ニュートリノ起源のベータ不安定核半減期変動の検証実験の開発は進める。

近距離重力実験は直ちに新機構の実装によるミクロン距離における逆二乗則の検証を物理測定として早期に行い、成果をまとめる予定である。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Pseudorapidity Dependence of Particle Production and Elliptic Flow in Asymmetric Nuclear Collisions of p+Al, p+Au, d+Au, and 3He+Au at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：368人中208番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev.Lett. **121** 222301 (2018)
2. Production of π^0 and η mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：404人中238番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. C **98** 054903 (2018)
3. Low-momentum direct photon measurement in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：454人中271番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. C **98** 054902 (2018)
4. Nonperturbative transverse-momentum-dependent effects in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：293人中167番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. D **98** 072004 (2018)

5. Single-spin asymmetry of J/ψ production in p+p, p+Al, and p+Au collisions with transversely polarized proton beams at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：293人中173番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. D **98** 012006 (2018)
6. Cross section and longitudinal single-spin asymmetry AL for forward $W^{\pm} \rightarrow \mu \pm \nu$ production in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：431人中252番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. D **98** 032007 (2018)
7. Measurement of emission angle anisotropy via long-range angular correlations with high pT hadrons in d+Au and p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：475人中292番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. C **98** 014912 (2018)
8. Measurements of mass-dependent azimuthal anisotropy in central p+Au, d+Au, and $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：353人中199番目 [J. Murata](#))
Phys.Rev. C **97** 064904 (2018)
9. Measurement of ϕ -meson production at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV and its energy dependence from $\sqrt{s}=200$ GeV to 7 TeV
PHENIX Collaboration (掲載順：358人中259番目 [J. Murata](#))
Phys. Rev. D **98** 092006 (2018)
10. Lévy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au collisions
PHENIX Collaboration (掲載順：449人中267番目 [J. Murata](#))
Phys. Rev. C **97** 064911 (2018)
11. Measurements of azimuthal anisotropy and charged-particle multiplicity in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200, 62.4, 39, \text{ and } 19.6$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：246人中139番目 [J. Murata](#))
Phys. Rev. C **96** 064905 (2017)
12. Measurements of Multiparticle Correlations in d+Au Collisions at 200, 62.4, 39, and 19.6 GeV and p+Au Collisions at 200 GeV and Implications for Collective Behavior
PHENIX Collaboration (掲載順：317人中182番目 [J. Murata](#))
Phys. Rev. Lett. **120** 062302 (2018)
13. Nuclear Dependence of the Transverse-Single-Spin Asymmetry for Forward Neutron Production in Polarized p+A Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：315人中180番目 [J. Murata](#))

Phys. Rev. Lett. **120** 022001 (2018)

- 1 4. Short-range test of the universality of gravitational constant G at the millimeter scale using a digital image sensor
K. Ninomiya, ... (掲載順：2 3 人中 2 3 番目 **J. Murata**)
Class. Quant. Grav. **34** 185005 (2017)
- 1 5. Cross section and transverse single-spin asymmetry of muons from open heavy-flavor decays in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 3 6 人中 2 5 3 番目 **J. Murata**)
Phys. Rev. D **95** 112001 (2017)
- 1 6. A new measurement of electron transverse polarization in polarized nuclear β -decay
H. Kawamura, ... (掲載順：2 4 人中 2 4 番目 **J. Murata**)
Mod. Phys. Lett. A **32** 1750058 (2017)
- 1 7. The MTV Experiment: from T-violation to Lorentz-violation
Jiro Murata, ... (掲載順：2 4 人中 1 番目 **Jiro Murata**)
PoS INPC2016 185-192 (2017)
- 1 8. B-meson production at forward and backward rapidity in p+p and Cu + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 5 9 人中 2 6 5 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **96** 064901 (2017)
- 1 9. Measurements of $e+e^-$ pairs from open heavy flavor in p+p and d+A collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：5 0 3 人中 3 0 1 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **96** 024907 (2017)
- 2 0. Measurements of $B \rightarrow J/\psi$ at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 3 1 人中 2 4 8 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. D **95** 092002 (2017)
- 2 1. Angular decay coefficients of J/ψ mesons at forward rapidity from p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 9 0 人中 2 2 4 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. D **95** 092003 (2017)
- 2 2. Measurement of the relative yields of $\psi(2S)$ to $\psi(1S)$ mesons produced at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and 3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 6 1 人中 2 0 6 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **95** 034904 (2017)

- 2 3. Nonperturbative-transverse-momentum effects and evolution in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：4 3 5 人中 2 7 1 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. D **95** 072002 (2017)
- 2 4. Measurement of long-range angular correlations and azimuthal anisotropies in high-multiplicity p+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
 C. Aidala, ... (掲載順：3 0 9 人中 1 5 5 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. C **95** 034910 (2017)
- 2 5. The MTV experiment: searching for T-violation in polarized Li-8 at TRIUMF
 J. Murata, ... (掲載順：2 3 人中 1 番目 [Jiro Murata](#))
 Hyperfine Interact. **237** 125 (2016)
- 2 6. Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：3 3 5 人中 1 9 1 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. D **94** 112008 (2016)
- 2 7. Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π^0 production at midrapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：4 1 3 人中 2 4 0 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. D **93** 011501 (2016)
- 2 8. Measurements of directed, elliptic, and triangular flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：4 0 4 人中 2 3 4 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. C **94** 054910 (2016)
- 2 9. Azimuthally anisotropic emission of low-momentum direct photons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：5 5 2 人中 3 3 2 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. C **94** 064901(2016)
- 3 0. Scaling properties of fractional momentum loss of high- p_T hadrons in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ from 62.4 GeV to 2.76 TeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：6 2 9 人中 3 8 1 番目 [Jiro Murata](#))
 Phys. Rev. C **93** 024911 (2016)
- 3 1. Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from $\sqrt{s_{NN}}=7.7$ to 200 GeV
 PHENIX Collaboration (掲載順：7 0 6 人中 4 3 1 番目 [Jiro Murata](#))

Phys. Rev. C **93** 024901 (2016)

- 3 2. ϕ meson production in the forward/backward rapidity region in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 5 1 0 人中 3 0 0 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **93** 024904 (2016)
- 3 3. Forward J/ψ production in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 4 0 2 人中 2 3 2 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **93** 034903 (2016)
- 3 4. Dielectron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 4 4 6 人中 2 6 5 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **93** 014904 (2016)
- 3 5. Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
A. Adare,... (掲載順： 4 3 2 人中 2 5 4 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **93** 034904 (2016)
- 3 6. Centrality-dependent modification of jet-production rates in deuteron-gold collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 4 8 4 人中 2 8 5 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. Lett. **116** 122301 (2016)
- 3 7. Measurement of the higher-order anisotropic flow coefficients for identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 3 8 7 人中 2 3 1 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **93** 051902 (2016)
- 3 8. Measurements of elliptic and triangular flow in high-multiplicity $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 6 3 1 人中 3 7 0 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. Lett. **115** 142301 (2015).
- 3 9. ϕ meson production in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 4 8 4 人中 2 8 5 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **92** 044909 (2015)
- 4 0. Measurement of higher cumulants of net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=7.7\text{-}200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順： 5 1 2 人中 3 1 3 番目 [Jiro Murata](#))

Phys. Rev. C **93** 011901 (2016).

- 4 1. Measurement of parity-violating spin asymmetries in W^{\pm} production at midrapidity in longitudinally polarized $p+p$ collisions
PHENIX Collaboration (掲載順：4 5 1人中2 6 5番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. D **93** 051103 (2016).
- 4 2. Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 9 9人中2 9 3番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **92** 034914 (2015)
- 4 3. Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in $Cu+Cu$ and $Au+Au$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 2 4人中2 5 8番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **92** 034913 (2015)
- 4 4. Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 8 1人中2 3 0番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. D **91** 032001 (2015).
- 4 5. Search for dark photons from neutral meson decays in $p + p$ and $d + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：5 8 1人中3 5 7番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **91** 031901 (2015)
- 4 6. A review of short-range gravity experiments in the LHC era
[Jiro Murata](#), Saki Tanaka
Class.Quant.Grav. **32** 033001 (2015) 招待レビュー論文・Highlight論文に選出
- 4 7. Cross section for \bar{b} production via dielectrons in $d+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 7 5人中2 2 7番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **91** 014907 (2015)
- 4 8. Centrality dependence of low-momentum direct-photon production in $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 8 0人中2 9 6番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **91** 064904 (2015).
- 4 9. Measurement of $\Upsilon(1S+2S+3S)$ production in $p+p$ and $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

PHENIX Collaboration (掲載順：4 2 8 人中 2 5 9 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **91** 024913 (2015).

5 0. 余剰次元探索を目指した近距離重力実験,
村田次郎, 田中佐季, 二宮一史, 村上遥菜,
高エネルギーニュース Vol.32, No.4 (2014)

5 1. The MTV experiment: a test of time reversal symmetry using polarized ^8Li
J. Murata, ... (掲載順：2 1 人中 1 番目 **Jiro Murata**)
Hyperfine Interact **225** 193-196 (2014)

5 2. Cross section and transverse single-spin asymmetry of η mesons in
 $p^{\uparrow}+p$ collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV at forward rapidity
PHENIX Collaboration (掲載順：4 8 5 人中 2 9 2 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. D **90** 072008 (2014)

5 3. Low-mass vector-meson production at forward rapidity in $p+p$ collisions at
 $\sqrt{s}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 7 0 人中 2 8 0 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. D **90** 052002 (2014)

5 4. Measurement of K_S^0 and K^{*0} in $p+p$, $d+Au$, and $Cu+Cu$ collisions at
 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：5 9 0 人中 3 5 9 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **90** 054905 (2014)

5 5. Heavy-quark production and elliptic flow in $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=62.4$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 6 8 人中 2 2 4 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **91** 044907 (2015)

5 6. Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and
(anti)protons in central $d+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 2 4 人中 2 6 1 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. Lett. **114** 192301 (2015)

5 7. Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin geodetic precession
Saki Tanaka, ... (掲載順：1 1 人中 1 1 番目 **Jiro Murata**)
EPJ Web Conf. **66** 05021 (2014)

5 8. T-Violation experiment at TRIUMF-ISAC using polarized ^8Li
J. Murata, ... (掲載順：2 0 人中 1 番目 **Jiro Murata**)
EPJ Web Conf. **66** 05017 (2014)

- 5 9. Comparison of the space-time extent of the emission source in $d+Au$ and $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：5 2 1 人中 3 1 4 番目 **Jiro Murata**)
Nucl. Phys. A **931** 1082-1087 (2014)
- 6 0. Nuclear matter effects on J/ψ production in asymmetric Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 4 9 人中 2 0 7 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. C **90** 064908 (2014)
- 6 1. First result from the MTV experiment at TRIUMF searching T-violation in nuclear beta decay
Y. Totsuka, ... (掲載順：2 1 人中 2 1 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Part. Nucl. **45** 244-248 (2014)
- 6 2. A new FPGA-based trigger/DAQ system for the MTV experiment at TRIUMF
R. Tanuma, H. Baba, K. Ninomiya, Y. Nakaya, S. Tanaka, Y. Totsuka, **J. Murata**
Phys. Part. Nucl. **45** 241-243 (2014)
- 6 3. Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in $\vec{p}+\vec{p}$ collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 8 0 人中 2 3 0 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. D **90** 012007 (2014)
- 6 4. Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to second- and third-order event planes in $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 8 6 人中 2 3 1 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Rev. Lett. **112** 222301 (2014)
- 6 5. Development of a novel scintillation-trigger detector for the MTV experiment using aluminum-metallized film tapes
S. Tanaka, S. Ozaki, Y. Sakamoto, R. Tanuma, T. Yoshida, **J. Murata**
Nucl. Instrum. Meth. A **752** 47-53 (2014).
- 6 6. FPGA-based Trigger/DAQ system for the MTV experiment at TRIUMF
R. Tanuma, ... (掲載順：7 人中 7 番目 **Jiro Murata**)
Phys. Part. Nucl. **45**, 241 (2014)
- 6 7. Report of the Next Generation TRIUMF-MTV Experiment Run-IV Using Cylindrical Drift Chamber
R. Tanuma, ... (掲載順：1 8 人中 1 8 番目 **Jiro Murata**)
JPS Conf. Proc. **1** 013069 (2014).
- 6 8. MTV/MTV-G Experiment at TRIUMF Search of T-Violation and Gravity Signal at Nuclear Scale
Saki Tanaka, ... (掲載順：1 6 人中 1 6 番目 **Jiro Murata**)

JPS Conf. Proc. **1** 013063 (2014)

- 6 9. Transverse-energy distributions at midrapidity in p+p, d+Au, and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=62.4-200$ GeV and implications for particle-production models
PHENIX Collaboration (掲載順：3 9 1 人中 2 3 7 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **89** 044905 (2014)
- 7 0. Measurement of transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ and 62.4 GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 5 1 人中 2 1 8 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. D **90** 012006 (2014)
- 7 1. Heavy-flavor electron-muon correlations in $p+p$ and $d+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 4 9 人中 2 7 7 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **89** 034915 (2014)
- 7 2. System-size dependence of open-heavy-flavor production in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：3 8 0 人中 2 3 0 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **90** 034903 (2014)
- 7 3. Centrality categorization for $R_{p(d)+A}$ in high-energy collisions
PHENIX Collaboration (掲載順：3 7 7 人中 2 2 7 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. C **90** 034902 (2014)
- 7 4. Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward and Backward Rapidity in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration (掲載順：4 2 4 人中 2 6 2 番目 [Jiro Murata](#))
Phys. Rev. Lett. **112** 252301 (2014)
- 7 5. MTV-G experiment : probing a non-standard strong gravitational field at nuclear scale using geodetic precession
Saki Tanaka,... (掲載順：9 人中 9 番目 [Jiro Murata](#))
J. Phys. Conf. Ser. **453** 012018 (2013)
- 7 6. Short-range Gravity experiment using digital image analysis
Kazufumi Ninomiya,... (掲載順：7 人中 7 番目 [Jiro Murata](#))
J. Phys. Conf. Ser. **453** 012007 (2013)

【著書・総説・解説等】

1. Newton別冊「次元のすべて」 村田次郎 2019年 142
2. Newton別冊「無(ゼロ)の科学」村田次郎, 向山信治, 陣内修, 2018年 (2013年元記事再掲載) 146-153
3. 子供の科学 2017年11月号 「ピサの斜塔の実験を数mmの近距離で確認」
4. Newton別冊 現代物理学3大理論 - 2017/1/19 村田次郎, 向山信治, 陣内修, ニュートン別冊 2017年 (2013年元記事再掲載)
5. 日本経済新聞 かがくアゴラ「5次元世界そこにあるかも」村田次郎, 2016/6/5 「特集 高次元の世界」p56-59
6. 雑誌Newton 特集: 「高次元の世界」, 2016年1月号巻頭特別インタビュー1 村田次郎, “LHCの衝突実験でヒッグス粒子に続いて発見が期待される” 「高次元の世界」協力 浅井祥仁/橋本幸士/村田次郎/寺師弘二/ミケランジェロ・マンガノ/セルジオ・ベルトルッチ 執筆 福田伊佐央 (編集部)
7. 雑誌MOKU 特集: 「次元を開く」2016年10月号 「この世界は本当に3次元なのですか？」 村田次郎
8. 特集「地球人が宇宙人になるとき」月刊みんぱく 2015年2月号“高次元宇宙はあるか?” 村田次郎 2ページ寄稿文 (8-9)
9. 「“生きる”時間のパラダイム」日本評論社 (共著) 2015 “素粒子・原子核物理学者による災害復興支援”(村田次郎) 10ページ解説 (54-63)
10. ニュートン別冊 「無と有の物理学」“見えない次元をさがしだせ!”6ページ記事 (148-153) 協力: 村田次郎, 向山信治, 陣内修 2015年9月15日発行(2013年元記事再掲載) 148-155
11. ヒッグスを超えて ポスト標準理論の素粒子物理学」中島林彦 (編集), 村田次郎, 別冊日経サイエンス 208 (2014) 132-141 (2013年元記事再掲載)
12. 「宇宙、無からの創生」村田次郎, 向山信治, 陣内修, Newton別冊 2014年 (2013年元記事再掲載) 120-121
13. 特許第5578667号「ねじれ秤による微小力測定装置及び微小力測定方法並びに埋没物体の探査方法」村田次郎, 二宮一史 2014年7月18日

【国際学会発表】

1. Experimental Tests of Gravitational Inverse Square Law
Testing Gravity 2019 (Vancouver, Canada, 2019年1月)
Jiro Murata (招待講演)
2. Laboratory Tests of Newtonian Gravity
The 28th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Rikkyo, Tokyo, 2018/11/5-9)

Jiro Murata

3. Probing strong gravity using geodetic precession
Workshop on Gravitational physics with particle accelerators (KEK, Tokai, 2017/11/30)
Jiro Murata (招待講演)
4. The MTV Experiment: from T-violation To Lorentz-violation
International Nuclear Physics Conference 2016 (INPC 2016) (Adelaide, Australia, 2016/9/11-6)
Jiro Murata for the MTV collaboration
5. Testing Gravity at Short Scale
Testing Gravity 2015 (Vancouver, Canada, 2015年1月)
Jiro Murata (招待講演)
6. The MTV experiment : Searching T-Violation in polarized Li-8 at TRIUMF
the 6th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (SSP 2015) (Victoria, Canada, 2015/6/8-12)
Jiro Murata for the MTV collaboration
7. Report from the MTV experiment searching T-Violation in polarized Li-8 at ISAC
TRIUMF Nuclear Physics Seminar (Vancouver, Canada, 2015/8/31)
Jiro Murata for the MTV collaboration (招待講演)
8. The MTV T-Violation Experiment with 8Li
Solvay Workshop on “Beta-Decay Weak Interaction Studies in the Era of the LHC” (International Solvay Institute Brussels, Brussels, Belgium, 2014/9/3-5)
Jiro Murata (招待講演)
9. Short range gravity and T-Violation
Asking Big Questions in the LHC ERA with Low Energy Precision Measurements of CPT and Gravity (Hawaii, Oct 2014)
Saki Tanaka for the MTV collaboration (招待講演)

【国内学会発表】

1. THE MTV EXPERIMENT 原子核のベータ崩壊：時間反転対称性
基礎物理勉強会 (KEK東海, 2017/4/7-8)
村田次郎 (招待講演)
2. 近距離重力実験
第29回理論懇話会シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」(東北大学, 2016/12/20-22)
村田次郎 (招待講演)

3. 画像認識型変位計を用いた余剰次元探索実験
東工大先端物理計測開発室キックオフワークショップ（東京工業大学, 2016/12/22）
村田次郎（招待講演）
4. 余剰次元探索としての近距離重力実験のレビューとNewton実験
KMI分野横断セミナー（名古屋大学, 2015/3/2）
村田次郎（招待講演）
5. 「重力と時空の謎 ～三次元を超える宇宙を探る～」
新技術創成研究所 基礎科学部門設立記念シンポジウム「21世紀の科学技術」（長崎総科大, 2014/12/20）
村田次郎（招待基調講演）

【マスコミでの発表】

1. 報道発表 立教大学・2017年8月8日
「現代のピサの斜塔の実験」に成功 -ミリメートル規模での自由落下の一様性を初確認-
Short-range test of the universality of gravitational constant G at the millimeter scale using a digital image sensor K.Ninomiya他 Class. Quantum Grav. 34 (2017) 185005 (15pp)
2. プレスリリース
立教大学・2014/4/25発表
「理学部物理学科の村田次郎教授が原発事故災害復興支援のための放射性ストロンチウム非破壊検出法を新規開発」<http://www.rikkyo.ac.jp/news/2014/04/14430/>
3. 「重力の神秘 宇宙を支配する力」, NHK BS「コズミックフロント」, 2014年11月13日放送
http://www.nhk.or.jp/space/program/cosmic_141113.html
(60分間の重力特集番組中、万有引力定数の測定部分で村田研究室の重力実験を詳しく紹介)

宇宙空間における原子・分子・光反応：粒子ビーム実験によるアプローチ

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 中野祐司

1. 背景と目的

宇宙空間で初めて分子が発見されてから半世紀以上が経過し、初期に台頭したアメリカ国立電波天文台の NRAO 11mを始め、野辺山宇宙電波観測所の NRO 45m, 欧州ミリ波電波天文学研究所の IRAM 30mなどを用いた電波観測によって既に200種近くの分子が検出された。現在では、星間分子から発せられる電波を観測することによって物質の動きや化学組成、周囲の環境を調べることは、天体の性質や起源を追究する強力な手法の一つとして確立されつつある。さらに近年、日米欧共同プロジェクトによる世界最大の望遠鏡群であるアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) が本格運用を開始し、その驚異的な感度と解像度によってこれまで見えてこなかった宇宙の姿が次々と明らかになってきている。

このような電波観測で得られる周波数スペクトルをもとに天文事象を理解するためには、分子種の分光データだけでなく、その性質や生成・崩壊経路に関する知見、すなわち星間空間における原子分子過程の理解が重要となる。低温で希薄な宇宙空間では吸熱反応や3体以上の関与する反応が起こる確率は低く、物質の進化を支配するのは反応障壁のない組み替え反応である。このような反応は分子の相互作用ポテンシャルや内部状態 (電子状態, 振動状態, 回転状態) に敏感であり、温度に対して指数関数的にスケールされるような統計モデルではなく、むしろ個々の量子状態を反映した特徴的な振る舞いを示すケースが少なくない。また、星間雲の光解離領域では深紫外光によって分子が形を変化させる光異性化プロセスが観測されており、異性化した分子の反応過程を考慮する必要性も示唆される。様々な過程の競合を考慮した反応ネットワークモデルの構築によって分子組成の進化を追うことこそが観測データの理解に必要不可欠なミッションであるが、その基礎となる反応メカニズムやその断面積等に関する実験的研究は圧倒的に不足している。本研究では極低温静電型イオン蓄積リングやイオントラップ、イオン移動度分析法などの最先端実験技術を用いてこのような反応の詳細を明らかにし、天文観測データに対する物理化学的解釈レベルの底上げを通じた宇宙像の探究を目的とした。

2. 研究成果

2017年度から立教大学に転入し、2017年4月～2019年3月の2年間、本事業の助成を受けて宇宙空間における原子・分子・光反応に関する実験研究を行った。主にイオン移動度分析 (IMS) による異性体光化学に関する研究の立上げ、および理化学研究所の極低温イオン蓄積リングを用いた振動回転分光とイオン・中性衝突反応の研究を中軸とし、以下5つの研究テーマを推進した。

(1) 星間分子の光異性化に関する研究

イオン移動度分析法 (IMS) は異性体 (形の異なる同組成の分子) を分離するための強力なツールとして知られている。主に生体分子や薬剤等の大きな分子に対して有効的に用いられているが、近年、立教大学のIMS装置において、緩衝ガスを冷却することによって分解能を向上するメカニズムが確認された。この手法によって比較的小さな分子、例えばオリオン座の分子雲でシーストランス光異性化 (図 1 (a)) が確認されているギ酸 (HCOOH) のような異性体分子も分離できる可能性がある。同じく立教大に設置されているレーザープラズマ光源を用いれば、星間雲で起こっている深紫外光による光異性化プロセスを実験的に確かめるだけでなく、その反応断面積を精密

に決定できる。さらに、異性体分離された分子イオンを用いて衝突反応実験を行うことにより、その性質の違いを詳細に調べることが可能となる。

このような研究を行うため既存のIMS装置の改造を行った。光源ビームラインと整合させるために架台を製作して装置を再構成し、電子衝撃型イオン源と四重極質量分析器、および前後のイオン輸送光学系の制御システム整備を行った。 $C_3H_7O^+$ イオンを用いて移動度測定の実験を行うために、試料ガスとして2-ブタノール ($C_4H_{10}O$)を用い、電子衝撃エネルギー150 eVにてイオン化したところ、ガスセル入口のアーチャーにて最大で10 nA程度のイオン電流が観測された。図1 (b)は引き出されたイオンの質量分析スペクトルを示しており、目的のイオン (質量電荷比 = 59) が0.3 nA程度観測された。今後イオン源の運転条件およびイオン輸送パラメータの最適化等の課題は残っているが、イオン生成と質量分析まで確認することができ、移動度測定を行うセットアップを完了することができた。

レーザープラズマ光源については、本研究で興味のある波長90-200 nmの範囲において発光強度を見積もることからスタートした。原子構造計算コードFACを用いてCu, W, Al等の金属を標的としたレーザー生成プラズマからの発光スペクトルのシミュレーションを行い、遷移を特定した。分光セットアップの構築を検討し、瀬谷波岡型モノクロメータを設置する新規ビームライン設計を行った。また、事前テストとして試験スペクトル測定のために汎用の分光器 (ACTON VM502型) を入手し、現在グレーティング制御等のセットアップが進行中である。

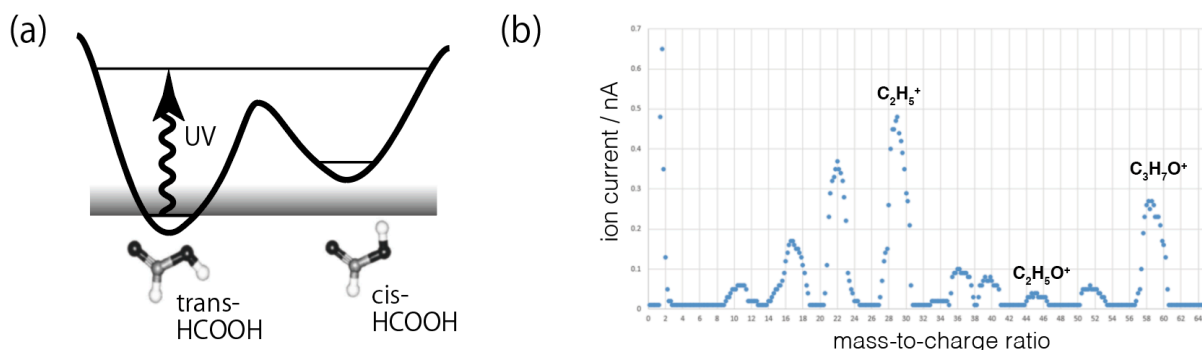


図1 (a) ギ酸 ($HCOOH$) 分子の光異性化の模式図。(b) 2-ブタノール試料より得られた質量スペクトル。

(2) イオン蓄積リングRICEを用いた分子冷却過程の観測

反応における余剰エネルギーはしばしば分子の内部エネルギーとして蓄えられ、解離エネルギーとして消費されるか、振動・回転自由度に等分配され、輻射によって徐々に外部に放出される。分子の振動・回転輻射による星間ガスの冷却は効率的な重力収縮によって星や惑星を形成するために不可欠であり、また、我々に天文観測的な手段を提供する重要なプロセスである。近年、極低温のイオン蓄積リングやイオントラップの登場によって、孤立分子の冷却ダイナミクスに関する実験研究が可能となり、再起蛍光による冷却の加速や、輻射冷却と償却冷却の競合プロセスなどが報告されている。本研究では、孤立分子の輻射冷却ダイナミクスをより直接的、定量的に解明することを目指し、時間分解レーザー分光によって、冷却の最中の分子の振動・回転状態分布の時間変化をリアルタイムに観測することを目的とした。

実験は理化学研究所の極低温イオン蓄積リングRIKEN Cryogenic Electrostatic ring (RICE)において行った。電子マイクロトン共鳴 (ECR) イオン源で生成した10 keVの N_2O^+ イオンビームをRICEに入射し、一定時間蓄積後にパルス色素レーザーを入射して $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi_{2/3} (000)-(200)$ 遷移の励起にともなう前期解離過程：



を観測した。図2 (a)に示す中性粒子検出器を用い、前期解離によって生成される中性フラグメントNの収量をレー

レーザー波長の関数として測定した。図2(b)の赤線は観測した測定結果の一例で、蓄積時間250 μs のときの振動回転スペクトルである。青線は既知の分光定数からPGOPHORコードを用いてシミュレーションした吸収スペクトルであり、分子内部温度を411 Kとして計算した結果である。実験データとシミュレーションは非常によく一致しており、シミュレーションにおける分子温度をパラメータとして両者を比較することにより、分子温度を高精度に評価することができた。また、最大で200 s程度までの長時間蓄積の実験を行い、振動状態と回転状態が異なる速度で冷却される様子を刻々と観測することに成功した。現在、詳細なデータ解析により冷却レートの評価を行うとともに、 SH^+ などの双極子モーメントの大きな分子を用いた、より早い時間スケールでの回転冷却の観測に向けて準備を行っている。

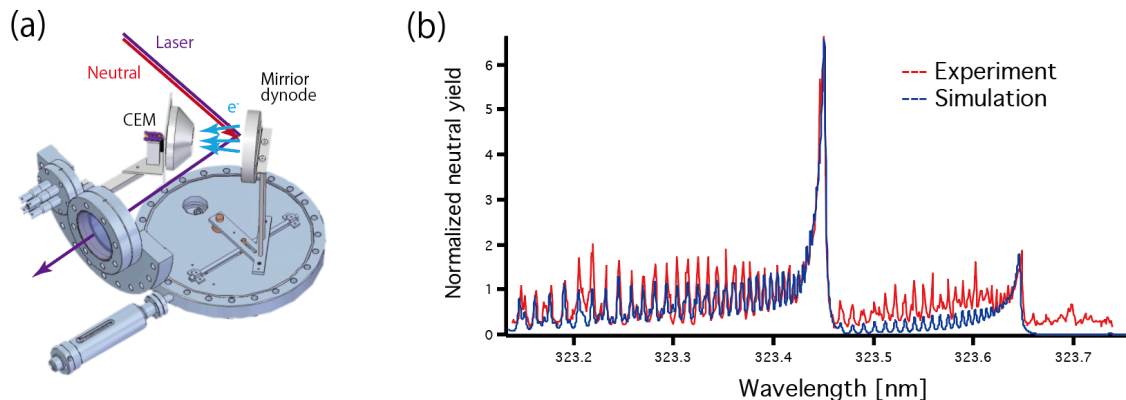


図2 (a) イオン蓄積リングRICEの中性粒子検出器。RICE内で250 μs 蓄積された N_2O^+ 分子イオンの振動回転スペクトル。赤線は測定された実験データ、青線はPGOPHORコードによるシミュレーションを示す。

(3) 中性原子ビーム生成装置の開発

気相における星間分子生成の鍵を握るイオン・中性反応に関する研究を行うため、イオンビームと中性ビームの合流実験を計画している。2つのビームをほぼ等速度で合流させ、その相対速度を精度良く制御することにより重心系においてmeV領域の低エネルギー衝突が実現可能になる。これは温度にして10 K程度の熱エネルギーに相当し、通常のビーム実験では到達することのできない極低エネルギー領域である。また、イオントラップなどを用いて行われる「温度に依存した反応速度」の測定が現象論的観測であるのに対して、合流ビーム実験による「衝突速度に依存した反応断面積」の測定は、相互作用ダイナミクスの本質を追究するアプローチである。

合流ビーム実験を行うための最も重要な技術のひとつが中性ビームの生成である。本研究では負イオンビームの光脱離によってビームを中性化する手法を採用した。負イオン源としてセシウムスパッタ型イオン源を用い、図3(a)に示すような試験ビームラインを立教大学に設置した。6-14 keVの範囲で炭素負イオンビームの引き出し、電磁石による質量分析、およびビームステアラー、四重極レンズを用いたビーム輸送の試験を行った。図3(b)はビームプロファイルモニターで観測された水平(X)、垂直(Y)方向のビーム形状の観測例である。また、光脱離用レーザーとして波長808 nm、最大出力5 kWの半導体レーザーアレイをセットアップし、10 keVの炭素負イオンビームを用いて中性化のテスト測定を行ったところ数nA相当の中性ビーム生成が確認された。レーザー出力3 kWに対して中性化効率は 10^{-3} 程度であり、C原子の光脱離断面積 $1.4 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ から見積もられた値とよく一致している。レーザー光のマルチパス増幅によって中性化効率を向上するため、光増幅キャビティの設計および光線追跡ソフトウェアZemaxを用いたシミュレーションを行った。最適化された幾何構造と材質、光学素子のコーティング条件に基づいたプロトタイプ機の製作まで完了し、大気中でのR&Dを行った。

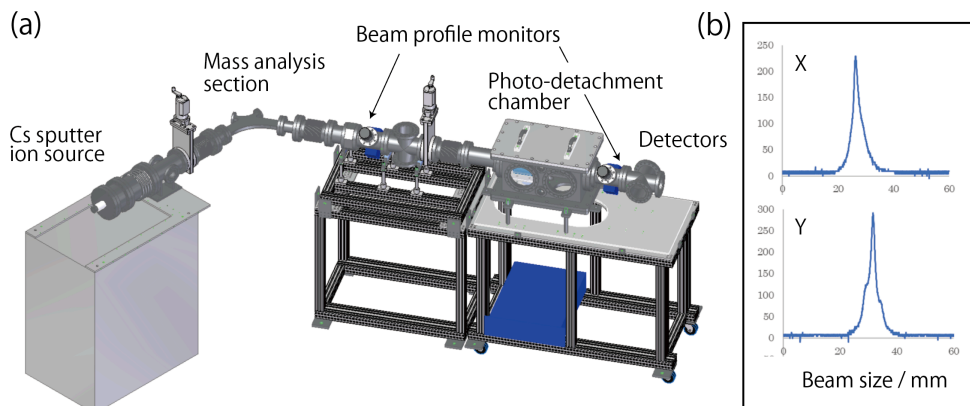


図3 (a) 中性原子ビームラインの概要。(b) ビームプロファイルモニターで観測されたビーム形状。

(4) デュオプラズマトロンイオン源の立上げ

真空中に星間分子イオンを用意する装置のひとつとして、デュオプラズマトロン型イオン源の立上げを行った。負イオンの生成も可能なイオン源であるので、水素・重水素・酸素など気体試料から中性ビームを生成する際の入射器としても使用を見込んでいる。耐電圧 30 kV の高電圧プラットフォームを製作してイオン源および電源装置一式と小型 PC を設置し、Wifi を利用した絶縁制御システムを構築した。折り畳んだ白金メッシュを硝酸でエッチングし、 $\text{BaCO}_3\text{:SrCO}_3\text{:CaCO}_3$ コート液を塗布した後に真空中でデガスしたものをアーク放電用フィラメントとして使用した (図 4 (a))。フィラメント形状やエッチング時間、コート材の塗布量については試行錯誤のうえ最もフィラメント寿命が長くなるような条件を選定した。動作テストは希ガス試料 (ヘリウム, ネオン, アルゴン) を用いて行い、それぞれの試料についてビーム引き出しと加速, 電磁石を用いた質量分析スペクトルの取得に成功した。図 4(b)はアルゴンガスを導入した際に得られた質量スペクトルを示す。目的の Ar^+ およびそのプロトン化種 ArH^+ のほか、混入した水や硝酸が起源と考えられるイオン種が観測された。液体試料からの分子イオン生成についてもテストを行い、エタノールを入れたガラス管を真空配管に接続することで安定なアーク放電とビーム生成を確認した。また試料として混合ガスを用いて、プラズマされたガスから引き出された分子イオン種を解析したところ、いくつか興味深い結果を得ることができている。

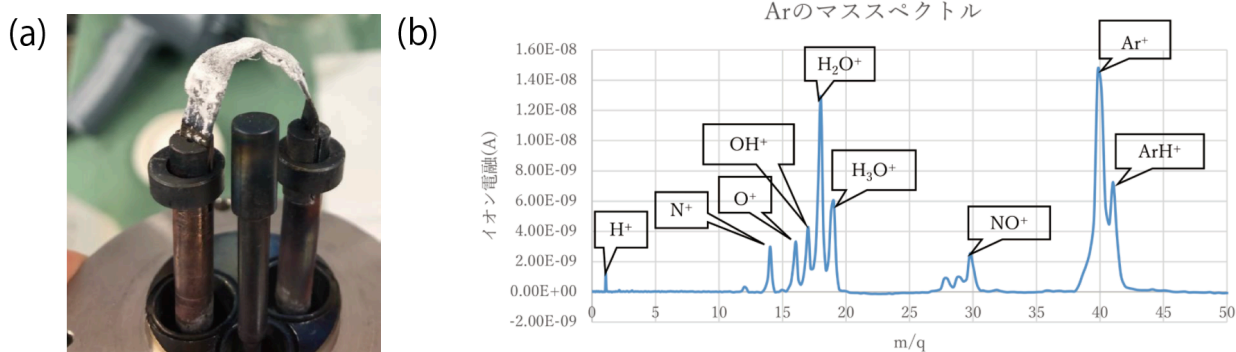


図4 (a) 作成したフィラメントの写真。(b) イオン源にアルゴンガスを導入した際の質量スペクトル。

(5) FPGAを用いたデータ収集システムの開発

実験科学においてデータ収集は重要な要素技術の一つである。従来、検出器の出力信号などを記録する際には、図5(a)①のようにアナログ回路にて波形処理を行った後にADCやTDCを用いて必要な情報を記録する手法が一般的であったが、本研究ではデジタル波形処理によるデータ収集システムの開発を行った。FPGA素子を搭載した高速(500 MSa)・高分解能(14 bit)のデジタイザを用いて、図5(a)②のように信号をまずデジタル化し、FPGA上でデジタル波形処理を行い、PCに記録するシステムを設計した。デジタル波形処理では、プログラミングによって複雑、高度な処理を柔軟に構築することができ、アナログ回路の苦手とする非線形処理や適応処理、離散フーリエ解析やデータ圧縮などを高精度に実現可能である。特にFPGAは書き換え可能な素子であり、回路の組み替えを行う事なく任意の波形処理をオンボードで高速に実施することができるので、例えば以下のようなアプリケーションへが考えられる。

- ・波形選別によるオフライン用生データおよび圧縮データの記録
- ・波形に応じた複雑なデータ処理やフィードバック
- ・波高とタイムスタンプなど異なる物理量の同時記録
- ・複数チャンネル間の波形相関を考慮したデータ処理
- ・ニューラルネットワーク処理による波形弁別

最小限の機能を実装したシステムとして、パルスを検出、ビットシフト演算を行って波形保存を行うプログラムを設計しテストを行った。PCからFPGAのレジスタに直接アクセスすることで、パルス検出の閾値などのパラメータは、ファームウェアを都度コンパイルすることなく変更が可能である。データの読み出しプログラムはC++言語で作成し、コールバック関数を用いてトリガー発生時に任意の処理を行えるよう設計した。粒子検出器としてマイクロチャンネルプレート(MCP)を用意し、イオン入射時のパルス信号、およびバックグラウンド信号についてデータ収集を行い、波形を記録することができた(図5(b))。FPGAに適切な処理プログラムを実装することにより、(1)~(4)に挙げた研究テーマはもちろん、多様な測定におけるデータ収集システムとして応用可能である。また、このようにして大量の波形サンプルを取得し、深層学習を用いて特徴抽出することにより、波形認識による粒子弁別技術への応用も期待できる。

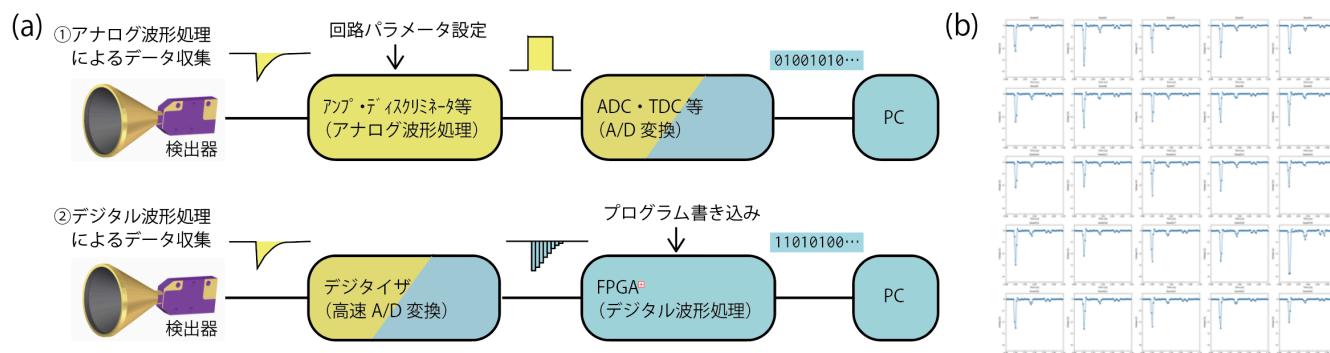


図4 (a) データ収集における①アナログ波形処理と②デジタル波形処理のスキーム。(b)開発したシステムを用いて記録したMCP検出器の出力信号波形。

3. 優れた成果が上がった点

理化学研究所の極低温イオン蓄積リングRICEを利用した分子イオンのレーザー分光においては、目的であった輻射冷却のリアルタイム観測に成功した。極低温リングとしてはストックホルム大学のDESIREE、マックスプラ

ンク原子核研究所のCSRに続く3番目の成果であるが、振動回転分光によりポピュレーションの時間変化を追跡するという観点では、初めて報告されるデータである。またリング入射前に分子を冷却するための極低温イオントラップの開発が完了し、論文発表(原著論文[1])した。イオン・中性ビーム合流衝突実験に向けて中性ビーム開発を行い、立教大学に設置した試験ビームラインで炭素原子ビーム生成をおよそ 10^{-3} の中性化効率で生成することができた。今後中性化効率を向上してRICEへインストールすることで、世界初の極低温イオン・中性合流ビーム実験が実現される。一連の開発状況について、国際会議プロシーディングス(原著論文[3])として報告した。

また、イオン移動度分析装置およびデュオプラズマトロンイオン源の立上げを行い、それぞれイオン生成と質量分析を行う段階まで開発を進めることができた。本格実験の開始は次年度以降の予定であるが、実験プロポーザルや新しい実験技術開発に関して、国際ワークショップの口頭発表に選出されるなど、関連分野の注目を集めている。

4. 課題となった点

大強度CWレーザーによって負イオンビームを中性化する際、レンズやミラー等の光学素子への熱流入が、理想的なシミュレーションに比べて大きくなることが分かった。真空中の素子については冷却水の流量を増やし、高真空用グリースを使用して素子とヒートシンクとの熱伝導を確保した。また大気中の素子については強制空冷による排熱を検討している。

5. 研究期間終了後の展望

本研究で実証した研究手法や新しい実験技術を基盤として、今後宇宙空間における原子・分子・光反応に関する先端的な実験研究を展開していく予定である。特に合流実験と光異性化実験については、実用フェーズに入り次第、様々な系においてデータが量産できる体制が見込まれる。開発したデータ収集システムもこれに大いに貢献する。ALMA等における天文観測も非常にアクティブであるので、観測グループとの有機的な連携によって学術的知見を構築し、ミクロな物質科学的な観点から宇宙像解明へ向けた研究を推進していく計画である。

また、本研究は極高真空の実験装置内に分子イオンを蓄積し、周囲からの輻射のない極低温環境下で分子を実験に用いることが特徴の一つである。その中で、分子が輻射によって振動回転基底状態に脱励起するということは、実験対象として、単一量子状態の分子アンサンブルが手に入ることを意味する。このような理想的な標的を持ちいて原子分子の反応を観測することができれば、これまでの研究を圧倒的に凌駕する高精度で少数多体系の量子状態や相互作用ダイナミクスを追究することが可能になる。星間空間の反応現象の理解にとどまらず、基礎科学的な観点においても意義の高い研究への展開が期待される。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. A cryogenic linear ion trap beamline for providing keV ion bunches
S. Menk, P. Bertier, Y. Enomoto, T. Masunaga, T. Majima, **Y. Nakano**, and T. Azuma
Rev. Sci. Instr. **89**, 113110 (2018)
2. Design and commissioning of the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)
Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma
Rev. Sci. Instrum. **88**, 033110 (2017)

3. Status of the Laser Spectroscopy and Merged-beam Experiments at RICE
Y. Nakano, R Igosawa, S Iida, S Okada, M Lindley, S Menk, R. Nagaoka, T. Hashimoto, S. Yamada,
T. Yamaguchi, S. Kuma, T Azuma,
JPS Conf. Proc. (submitted)

【著書・総説・解説等】

1. 数100 MeV/u重イオンと結晶標的 I — 2次元コヒーレント共鳴励起—
東俊行, 中野祐司
RADIOITOTOPE (accepted)
2. 数100 MeV/u重イオンと結晶標的 II — 3次元コヒーレント共鳴励起—
中野祐司, 東俊行,
RADIOITOTOPE (accepted)

【国際学会発表】

1. Development of RICE
7th International workshop on electrostatic storage devices (ESD2017) (Lyon, France, 2017/6/19-22)
Yuji Nakano (招待講演)
2. Cryogenic ion storage ring RICE for atomic and molecular physics
The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI'17) (Kanazawa, 2017/11/13-18)
Yuji Nakano (招待講演)
3. An experimental study of the UV-induced photo-isomerization of interstellar molecules
International workshop on Interstellar Matter 2018 (Sapporo, 2018/11/14-16)
Yuji Nakano (招待講演)
4. Transition-edge-sensor microcalorimeters for mass spectrometric identification of neutral molecules
International workshop on low temperature detector (LTD17) (Fukuoka, 2017/7/17-21)
S. Okada, T. Azuma, ... (掲載順: 2 3人中1 4番目 Y. Nakano)
5. Cryogenic detector for mass spectrometric identification of neutral molecules towards atomic and molecular collision experiments
International conference on exotic atoms and related topics (EXA2017) (Wien, Austria, 2017/9/11-15)
S. Okada, T. Azuma, ... (掲載順: 2 3人中1 4番目 Y. Nakano)
6. Commissioning of a new cryogenic ion storage ring RICE
30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) (Cairns, Australia, 2017/7/26-8/1)
Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma,
7. Status of the cryogenic ion storage ring RICE
Y. Nakano, R Igosawa, ... (掲載順: 1 2人中1 番目 Y. Nakano)
19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (Lisbon, 2018/9/3-7)
8. An experimental study of the gas-phase ion-neutral reaction by merged-beam collisions

R. Nagaoka, S Iida, M. Iizawa, S. Kuma, T Azuma, **Y. Nakano**
International workshop on Interstellar Matter 2018 (Sapporo, 2018/11/14-16)

【国内学会発表】

1. 極低温静電型イオン蓄積リング RICE 中で輻射冷却された N_2O^+ の回転分光
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学, 2017/9/21-24)
伊五澤涼, 山口貴之, **中野祐司**, 久間晋, 東俊行
2. 分子検出に向けた多素子 TES マイクロカロリメータの性能評価
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017/9/21-24, 岩手大学)
岡田信二, 東俊行, ... (掲載順: 23人中14番目 **中野祐司**)
3. 超伝導カロリメータを用いた低温下の星間分子計測実験(1)日
本天文学会 2018 年春季年会 (千葉大学西千葉キャンパス, 2018/3/14-18)
山田真也, 岡田信二, ... (掲載順: 23人中20番目 **中野祐司**)
4. 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月 22-25 日)
飯田進平, 東俊行, **中野祐司**
5. 周期クーロン場による原子状態制御と精密分光
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月 22-25 日)
中野祐司 (招待講演)
6. 極低温静電型イオン蓄積リング RICE を用いた N_2O^+ の輻射冷却の観測
第 19 回分子分光研究会 (静岡大学, 2019/3/26-27)
伊五澤涼, **中野祐司**, 久間晋, 山口貴之, 東俊行
7. 極低温型イオン蓄積リング RICE を用いた N_2O^+ の回転スペクトル測定
原子衝突学会第 42 回年会 (上智大学, 2017/9/8-9)
伊五澤涼, 山口貴之, **中野祐司**, 久間晋, 東俊行
8. 多素子超伝導遷移端マイクロカロリメータの中性分子質量分析応用
原子衝突学会第 42 回年会 (上智大学, 2017/9/8-9)
岡田 信二, 東 俊行, ... (掲載順: 23人中14番目 **中野祐司**)
9. 合流ビーム実験に向けた中性原子の開発
原子衝突学会第 42 回年会 (上智大学, 2017/9/8-9)
飯田進平, 根本拓海, 菅沢卓也, 林遼平, 長岡諒祐, 大森徹也, 江淵欣久, **中野祐司**
10. 合流ビーム実験による低速イオン・中性衝突実験
第 7 回イオン移動度研究会 (立教大学, 2018/4/14)
飯田 進平, **中野 祐司**
11. 移動管とレーザープラズマ光源を使った星間分子の光異性化の研究
第 7 回イオン移動度研究会 (立教大学, 2018/4/14)
根本 拓海, 飯田 進平, 高谷 一成, 植田 寛和, 平山 孝人, **中野 祐司**

【受賞】

1. 中野祐司, 第12回 (2018年) 日本物理学会若手奨励賞。

共形場理論を用いた量子的宇宙像の解明

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 中山 優

1. 背景と目的

我々の宇宙がどこからやってきて、どこへ行くのか？その根源的な疑問の答えを与えようとするのが現代素粒子物理学である。素粒子に働く力は、重力、電気力、弱い力、強い力と4種類知られているが、核力をつかさどる強い力は文字通り結合定数が大きく、その量子力学的な性質を第一原理から理解することは困難であった。私達の世界の質量の99%は強い力によって生まれているが、その起源は、強い力によって引き起こされる「カイラル対称性の自発的破れ」であると考えられている。しかし、実はカイラル対称性の自発的破れが宇宙の歴史でどのように実現されたかは理解されていない。特に、その相転移が潜熱を伴う1次相転移であるか、伴わない2次相転移であるかは、未だに理論物理学者の間で喧々諤々の議論が繰り返されている。

本研究では、量子色力学(QCD)のカイラル相転移現象を共形ブートストラップの方法を用いて解明することを目的とした。共形ブートストラップは、共形対称性と臨界現象の普遍性の概念に基づく、場の理論の非摂動的な知見を与える新しい道具である。これまでの直接的な計算機実験では判定が難しかったQCDのカイラル相転移が1次相転移であるか2次相転移であるかをこの新手法を用いて決定し、その相転移の性質と背後にある物理を明らかにする。本研究の目的をより広い見地から眺めると、場の量子論の繰り込み群的な普遍性を具現化することで、私達が住む宇宙において、物質の創造の瞬間に一体何が起こったのか？を理解するための新しい知見が得られることになる。

本研究には2つの具体的な目標と発展的な目標がある。まず、第1に理論的な目標として、共形ブートストラップがQCDのカイラル相転移現象を理解するために適切な手法であることを(経験的にではなく)理論的に証明することである。これは、カイラル相転移点においてスケール不変性だけでなくより拡大した時空の対称性である共形不変性が実現されていること、また、カイラル相転移点において内部対称性のアノマリーが回復することの2点を示すことである。これは純理論的な問題であり、計算機環境の整備とは独立に研究をすすめることができる。この問題は場の理論の重要な問題であり、臨界現象において共形対称性が実現される必要十分条件を確立したいと考えている。

この理論的な根拠の元で、第2の目標は、共形ブートストラップの方法を実際にQCDのカイラル相転移現象を適用し、計算機による解析を通して相転移の次数を決定することである。そのためには、私がここ数年来開発してきた共形ブートストラップのプログラムをカイラル相転移の物理に応用できるように改良し、臨界指数などの普遍的な物理量を計算できるようにする必要がある。とりわけ、現在のところ1つの共形ブートストラップ方程式を数値的に解く方法は確立されているが、いくつかの式を同時に処理する方法は完成していない。これを開発することでQCDの相転移の仕組みを解明したい。

QCDのカイラル相転移は物質の質量の99%をつかさどり、宇宙の歴史の開闢の時に起こった相転移である。この相転移の性質を解明することは宇宙の始まりの仕方を理解することにつながる。最終的には、本研究で得られた量子色力学のカイラル相転移の性質が宇宙の歴史でどのような役割を果たしていたかを議論し、今後の宇宙論の発展にも役立てたい。また、ハドロン加速器で、高温・高密度の核、ハドロンの性質が調べられつつある。カイラル相転移がそのような高温・高密度の核、ハドロンの世界でどのように見えるのかも明らかにしたい。

さらに、QCDを超えて臨界現象には普遍性という性質が備わっており、この普遍性の根源的な起源は共形対称性に関係していると考えられている。そこで、ローレンツ不変性のない系や重力でホログラフィックに実現された系で共形対称性が現れる条件、あるいはそういった性質がどのように実現されているのかに興味がある。関連した代数の表現論やアインシュタイン方程式の厳密解を構築することを目標に理論的な考察・計算を行った。

2. 研究成果

中山は2016年4月に立教大学に着任し、「地上実験・飛翔体観測と理論による宇宙像解明の研究拠点形成」に加わった。

(1) 2016年からの研究成果

中山は主として、QCDの相転移の性質を理論的に研究した。筑波大、広島大との共同研究による格子計算によると、QCDのカイラル相転移ではアノマリーによって破れていたはずの Z_2 の対称性が回復されることが示唆されている。これは、中山がこれまでに研究してきた共形ブートストラップの予言と組み合わせて、QCDのカイラル相転移の次数についての予言を与えることができる[2]。さらに、中山は共形ブートストラップの方法を用いて高次元の共形場理論の性質を調べた。この共形ブートストラップの研究は現在まで継続的に続いている[16]。

また、QCDのようなゲージ理論をホログラフィックに記述する重力理論において「バルクの局所演算子」と実射影空間上での場の理論の状態との関係を調べた [1]。

(2) 2017 年からの研究成果

中山は、2016年に続き、東京大学の桂・三ノ宮と共同研究し、格子上での超対称性の実現とその自発的破れを調べた [4][8]。この格子状の超対称性模型は、ホログラフィック的には極限ブラックホール解の量子的な状態と関係していることが示唆されており、その超対称性の自発的な破れは量子ブラックホールにも示唆を与えると考えられる。

また、共形場の理論にインスピレーションを受け、高次元のアインシュタイン方程式の厳密解をいくつか構築した [3][5][10]。特に、very special 共形場理論はローレンツ対称性を破りながら光速不変の原理と矛盾しないという特異な理論であり、このような理論が現実存在することができるのかは興味がある。中山は、具体的な場の理論での構築 [12]、また対応するホログラフィックな解を構築した [17]。

共形場理論を曲がった場の理論で解くことは一般には非常に難しい。中山は共形ブートストラップを用いて実射影空間という特殊な空間上ではその解が得られることを提案した。[6][13]では接道計算を援用しこのプログラムが理論的に上手く行っていることを確かめた。

(3) 2018 年からの研究成果

2018年には共形場理論に現れるアノマリーの性質を詳しく調べた。特に、4次元の共形場理論に特有の c という量が場の理論の変形に依って変わり得るか [9]、あるいは、それに由来する共形アノマリーを結合定数を時空に依存させることに依ってキャンセルできるか？を考察した [11]。

また、共形場理論には素朴に無矛盾性の要請からは現れてよいが、実際には現れない（と思われる）アノマリーが存在する。このようなアノマリーがどのような機構で現れ得るのか、あるいは実際に現れているのか？を [14]で調べた。

3. 優れた成果が上がった点

一般に（高次元の）アインシュタイン方程式と具体的な物質場の運動方程式を同時に解くことは非常に難しい。[5][17]ではその厳密解を得た。これは、ホログラフィックを利用して共形場理論から存在が示唆される解を具体的に得るという素粒子理論と重力理論の協力による成果である。

4. 課題となった点

QCDの性質を完全に再現するための共形ブートストラップの実装は未だに完成していない。特に、ゲージ群の情報をどのように取り込むのかは今後の課題である。ゲージ群の情報はメソンの量子数には現れず、バリオンの量子数のみに現れる。一般にバリオンは大きな共形次元を想定するために、たとえ共形ブートストラップ上で実現されたとしてもそこから予言が得られるかどうかは未知数である。

ローレンツ対称性を破る場の理論に対応する10次元アインシュタイン方程式の厳密解はゼロ温度の状況で作られた。これを有限理論で実現し、対応するブラックホール解を構築することは将来の課題である。

5. 研究期間終了後の展望

@@@@@@@@@@

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Bulk Local States and Crosscaps in Holographic CFT
Y. Nakayama and H. Ooguri
JHEP **1610**, 085 (2016)
2. Bootstrap bound for conformal multi-flavor QCD on lattice
Y. Nakayama
JHEP **1607**, 038 (2016)

3. Topologically twisted renormalization group flow and its holographic dual
Y. Nakayama
Phys. Rev. D **95**, 066010 (2017)
4. Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in an extended Nicolai model
N. Sannomiya, H. Katsura and Y. Nakayama
Phys. Rev. D **94**, 045014 (2016)
5. Euclidean M-theory background dual to a three-dimensional scale-invariant field theory without conformal invariance
Y. Nakayama
Phys. Rev. D **95**, 046006 (2017)
6. ϵ -Expansion in Critical ϕ^3 -Theory on Real Projective Space from Conformal Field Theory
C. Hasegawa and Y. Nakayama
Mod. Phys. Lett. A **32**, 1750045 (2017)
7. Interacting scale invariant but nonconformal field theories
Y. Nakayama, Phys. Rev. D **95**, 065016 (2017)
8. Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions with cubic dispersion
N. Sannomiya, H. Katsura and Y. Nakayama
Phys. Rev. D **95**, 065001 (2017)
9. Can we change c in four-dimensional CFTs by exactly marginal deformations?
Y. Nakayama
JHEP **1707**, 004 (2017)
10. Very special conformal field theories and their holographic duals
Y. Nakayama
Phys. Rev. D **97**, 065003 (2018)
11. Canceling the Weyl anomaly from a position-dependent coupling
Y. Nakayama
Phys. Rev. D **97**, 045008 (2018)
12. Local field theory construction of Very Special Conformal Symmetry
Y. Nakayama Phys. Rev. D **98**, 025007 (2018)
13. Three ways to solve critical ϕ^4 theory on $4 - \epsilon$ dimensional real projective space: perturbation, bootstrap, and Schwinger-Dyson equation
C. Hasegawa and Y. Nakayama
Int. J. Mod. Phys. A **33**, 1850049 (2018)
14. Realization of impossible anomalies
Y. Nakayama
Phys. Rev. D **98**, 085002 (2018)
15. Gravitating magnetic monopole via the spontaneous symmetry breaking of pure R^2 gravity
A. Edery and Y. Nakayama
Phys. Rev. D **98**, 064011 (2018)
16. Bootstrap experiments on higher dimensional CFTs
Y. Nakayama
Int. J. Mod. Phys. A **33**, 1850036 (2018)
17. Gravity Dual for Very Special Conformal Field Theories in type IIB Supergravity
Y. Nakayama
Phys. Lett. B **786**, 245 (2018)

【国際学会発表】

1. CFTs on real projective spaces
International Workshop “Boundary and Defect Conformal Field Theory: Open Problems and Applications.”
(Chicheley, September 2017)
Yu Nakayama (招待講演)
2. (Im)possible emergent symmetry and conformal bootstrap
Bootstrap Approach to Conformal Field Theories and Applications (@@@, March 2018)
Yu Nakayama (招待講演)

極周回成層圏テレスコープ(FUJIN)の開発

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 田口 真

1. 背景と目的

惑星の大気圏やプラズマ圏で起こる変動現象を研究するためには、長時間の連続観測が重要である。極周回成層圏テレスコープ(FUJIN)の観測サイトである成層圏からの観測は、良好なシーイング下で地上では観測できない 280nm 付近の紫外波長域まで観測可能である。特に極域ならば 24 時間以上の連続観測を行うことが出来る。これらの利点を生かして、惑星の長期的な変動現象を捉えて研究するために、極周回成層圏テレスコープを開発する。

2. 研究成果

高度 45~70 km にわたって存在する分厚い硫酸(H_2SO_4)の雲で全球を覆われた金星は、太陽放射による加熱が地表面ではなく高高度の雲層内で起こる惑星である(図 1)。高度 64 km よりも上空で太陽放射の 50%が散乱・吸収される[Tomasko et al., 1980]。また金星には、高度 70 km 付近で自転速度の 60 倍に達する 100 m/s の速さで惑星全体を西向きに循環する高速風(スーパーローテーション: SR)が卓越する特殊な大気大循環が存在する。しかし、現状、我々は SR が形成・維持されるメカニズムを地球版気象学の延長で説明できていない。金星は地球との比較によって惑星気象の普遍性を理解する上で最も身近で重要な天体であると言える。

数値モデルによって金星の SR を再現する試みは、その現象を理論的に説明するために必要不可欠なアプローチとして、これまでに数多くの研究がなされてきた。大気の太陽放射加熱は、惑星の大気大循環を決定する重要な要素の一つであるが、雲層内での太陽放射加熱率の正確な分布は分かっていない。それが、現実的な太陽放射加熱を反映させた精密なモデル構築や観測とモデルの比較を困難にしている。その最大の理由は、波長 320~500 nm の近紫外領域に幅広い吸収帯が存在することにある。観測からは 280~500 nm の波長領域で 8 K/day の加熱があるとされている[Crisp, 1986]。この紫外線吸収帯のうち、320 nm より短波長側は波長 283 nm を中心とする SO_2 による吸収で良く説明される。

一方で、320 nm より長波長側の吸収の原因物質としては、S (硫黄) を含んだ物質など複数の候補 (S_3 , S_4 , S_8 , S_2O , $FeCl_3$ など) が提唱されてきた[e.g., Esposito et al., 1997]。しかし、過去の観測スペクトル(図 2)の波長分解能は 4 nm 程度であり、明瞭な構造のない幅広い吸収帯という乏しい情報に基づいて物質を推定することは困難であった。加えて、吸収帯の中心波長 365 nm 付近の反射率は、高い時空間変動を示すことが知られており、未知物質の吸収スペクトルを理解するには、この時空間変動も合わせた解釈が必要である。

最近、Perez-Hoyos et al. [2018]は、400~500 nm における吸収帯

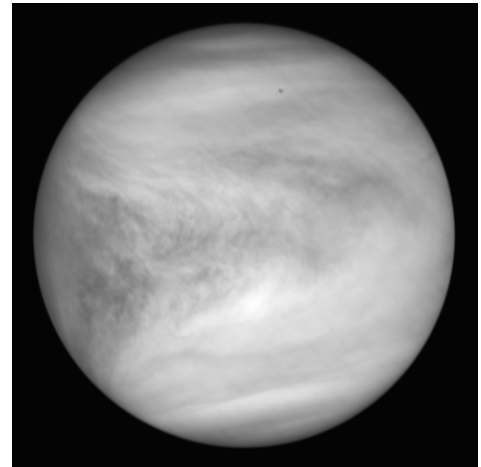


図 1. 金星探査機「あかつき」搭載紫外イメージャ(UVI)が波長 365 nm で捉えた金星。

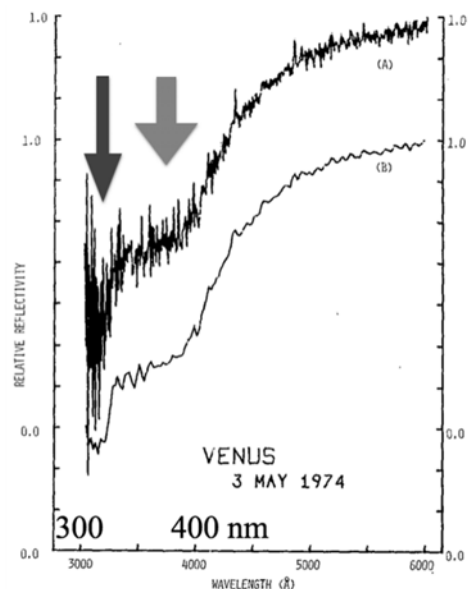


図 2. Pioneer Venus によって観測された 300~600 nm の金星スペクトル。320 nm より長波長側に SO_2 では説明できない吸収帯が存在する。

の端を再現するには S_2O か OSSO が最も有力な候補であることを示した (図 3)。両吸収物質は、反射率変動の大きい波長 365 nm 付近に強い吸収をもつため、これらの物質の存在量の空間分布が惑星規模の紫外模様を形成する可能性が高い。したがって、未知物質を同定するには、 S_2O と OSSO の存在の有無を観測的に調べ、吸収への寄与を定量的に理解することが必須である。

本研究では S_2O と OSSO を観測的に捉えるために、両物質の吸収スペクトル形状の違いに着目し、高波長分解能分光観測を提案する。図 3 に見られるように OSSO は cis-型と trans-型で中心波長の異なる広がった吸収が重なった二山の吸収構造を示す。一方、 S_2O には 339.0, 346.0, 353.0, 360.0, 368.0 nm に < 8% の深さをもった鋭い吸収線が存在する。このため、金星の紫外領域を 0.4 nm 程度の波長分解能で観測できれば、 S_2O が示す特徴的な吸収線の有無を定量的に評価し、 S_2O 存在量を推定することが可能である。 S_2O の存在量を決定できれば、OSSO を含めた硫黄化合物合計の吸収量を推定することで、現在最も有力な 2 つの候補物質の紫外線吸収への寄与を初めて見積もることができる。また、S, SO などの既知の物質との化学平衡状態を計算し、 S_2O の生成と消滅の時間スケールから明暗模様の形成を説明することも可能である。

しかし、地上望遠鏡を利用して対象波長領域を観測することは、地球大気による吸収・散乱が強いため不可能である。また、新たな探査機による観測を実現するには、長い時間と大きなコストが要求される。これらの制約が簡単に解明できると見られたこの課題を長く未解決の問題としてきた。

そこで、本研究を遂行する手段として極周回成層圏望遠鏡 (風神、FUJIN-2) を提案する。FUJIN-2 は広い観測波長領域、高い空間分解能を実現し、機動的観測や長時間連続観測によって、最先端の惑星科学を切り拓くことができる新たな観測プラットフォームである。

FUJIN-2 実験は金星の分光及び撮像観測によって、金星大気中の紫外吸収物質の同定と太陽放射加熱率分布の解明を目的とする。図 4 に金星大気力学及び化学過程における研究課題と本研究で目指す目標を図示する。

Crisp [1986] による 8 K/day の大気加熱を単に気象力学の数値モデルに入力しただけでは、空間分布と時間変動を示す実際の金星気象を理解できない。SR など未解明の気象現象を理解するためには、化学と力学双方を陽に解

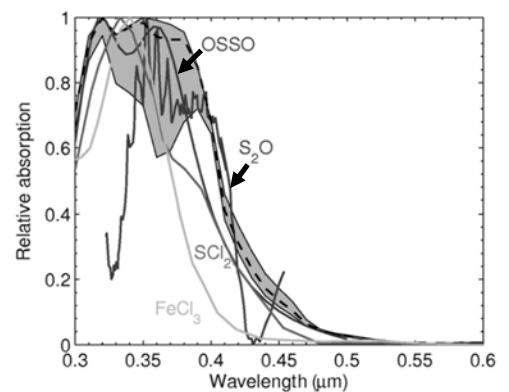


図 3. Messenger による観測スペクトル (破線) とモデル内の有力候補物質の吸収スペクトル。黒い実線内に挟まれた灰色の領域は、観測スペクトルが持つ広がりを示し、365 nm 付近に最大コントラストを持つ明暗模様に対応して、吸収量に広い幅を持っていると考えられる。

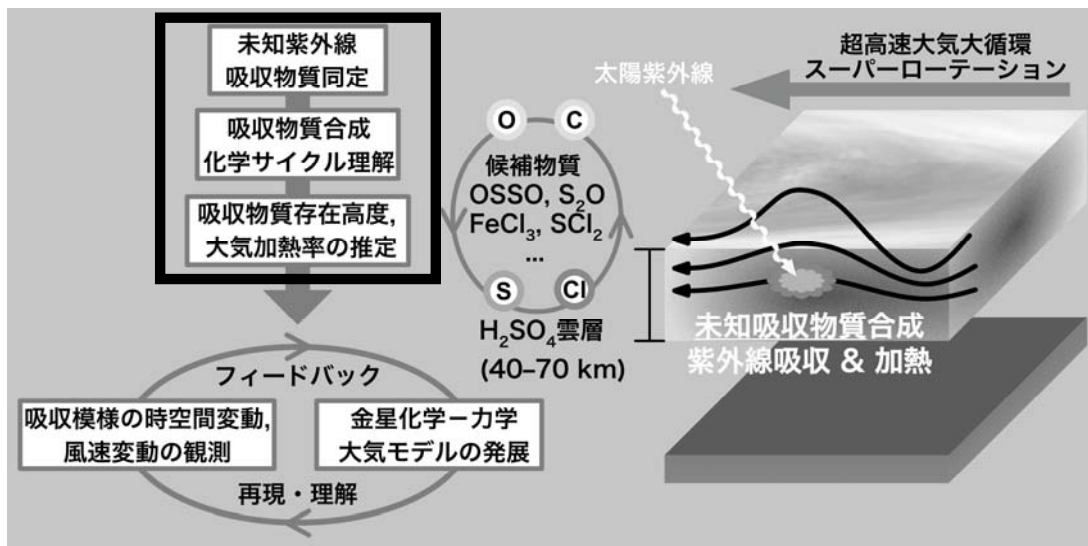


図 4. 金星大気力学及び化学過程の理解における FUJIN-2 実験の位置づけ (太枠内)。

く数値モデルを構築し、より現実的な金星気象を再現して観測量と比較検証する必要がある。しかし、現状は、320 nm より長波長側の吸収を説明する物質が未知であるため、雲層内の化学サイクルを閉じることができていない。

そこで、FUJIN-2 の高分解能スペクトル観測によって、雲頂における未知の紫外吸収物質を同定し、その密度分布及び変動を明らかにする。雲頂における物質組成が決まれば、それを制約条件として光化学モデルに与えることで雲層内の物質の鉛直分布を決定できる。物質の分布を用いて、金星大気中の平均的な加熱領域と加熱率を推定する。これが FUJIN-2 実験の目的（図 4 で太枠内に示す部分）である。

この成果は金星化学-力学大気モデルの構築に不可欠な情報を与える。金星探査機「あかつき」による紫外吸収模様のモニタリングから風速場や Kelvin 波や Rossby 波などの波動現象の時空間変動が得られている。それらに加えて太陽放射加熱率をモデルへ与えることで、モデルが現実の大気をより正確に再現するように修正することが可能となる。精密化されたモデルによる計算結果を詳しく解析することで、金星大気システムの包括的な理解につながる。

金星紫外吸収物質を同定する手段としては紫外分光観測が最も有効である。しかし、先に述べた理由により、多くの研究者が上記研究シナリオを考えついたとしても実現できず諦めていた。FUJIN-2 の独創性は、気球で到達できる成層圏から金星の紫外分光観測を実現する点にある。気球を利用した成層圏からの紫外分光観測は衛星望遠鏡や探査機と同等の性能を、それらよりもはるかに短時間に安価に実現可能である。

本研究の前段階として、国内での気球実験用に3段階の姿勢制御システムを備えたFUJIN-1を開発した。FUJIN-1は2013年度実験時に精指向精度が0.4”の精度で観測できることが地上実験において実証された。FUJIN-1の開発目的は姿勢制御システムの確立だったため、FUJIN-1の開発は終了し、サイエンスデータを得ることを主目的としたFUJIN-2の開発に着手した。

FUJIN-2はナスミス焦点付きカセグレン式望遠鏡である。有効口径は400mmで焦点距離は2倍のバローレンズを含め最大18000mmである。検出器は撮像用CCDカメラ1台、直前に最大10枚のバンドパスフィルターを装着できるフィルターターレットを配置した。FUJIN-2の電源系はリチウムイオン電池と太陽電池パネルで構成されている。昼は太陽電池パネルで発電した電力でFUJIN-2サブシステムに電力を供給し、余剰電力をバッテリーに充電する。夜間はバッテリーからフライトに必要最低限の電力を供給する。この条件で極域実験なら1週間程度、オーストラリアならば24時間程度のフライトを計画している。



図 5. FUJIN-2 用口径 400 mm カセグレン望遠鏡に CFRP フードを取り付けた状態。

FUJIN-2を新規開発するにあたり、望遠鏡に装着するフードを開発した(図5)。このフードは太陽離隔15度以上の水星等の星を観測するために用いる。またフードと望遠鏡を接続する治具も設計した。その他、ナスミス停止機構やフォーカス停止機構など必要なものを適宜設計・開発した。CMGを新規に4台開発し、FUJIN-1実験時に確認された振り子運動の解消と Gondola の3軸制御を確立する。

光学系では、観測に用いるカメラの波長感度特性の試験と光軸調整試験を行った。この実験より300 nmの波長に感度があることが実験で確認された。電源系では気密容器(C1容器)の熱真空試験を行った。C1容器内に充放電回路とバッテリー、PCの発熱を模擬したヒーターを設置した。センサーにはサーミスタを用いて、適当な箇所7箇所の温度を測定した。この測定結果と一致するように熱解析を行い、熱真空試験環境下で保温に必要な断熱材やヒーター等の性能を見積もった。

成層圏での太陽電池パネルの温度を地上実験と熱解析によって求めた。太陽電池パネルの温度が及ぼす影響は主に2つあり、ひとつは、温度上昇によって太陽電池パネルの発電効率が低下する点と、太陽電池パネルからの赤外放射によって、望遠鏡鏡筒の熱歪みが発生し、主鏡が歪んだりピントがずれたりするために解像度が悪くなることあげられる。熱モデルを作成するためには、太陽電池パネルの赤外放射率 ϵ と、対流によって太陽電池パネルから放出される熱量 Q が分かっている必要がある。それらを求めるために、太陽電池パネルを使った地上実験を行った。実験では、太陽電池パネルの温度や発電量をはじめ、周囲の気温や湿度を測定した。太陽電池パネルと周囲のエネルギー収支は①太陽からの放射エネルギー、②赤外放射、③対流によるパネルからの熱放出、④発電された電力量である。以上を用いて未知数である ϵ と Q を導出した。実験で求めた赤外放射率と対流の係数を使って、熱解析を行った。解析は地上と成層圏で分け、それぞれパネル温度を計算した。その結果、成層圏での太陽電池パネルの温度は約53°Cであることが分かった。懸念事項であった、発電効率の著しい低下と赤外放射による望遠鏡筒の熱歪みの影響はほぼないと言える。成層圏環境でも断熱材や冷却材は必要ないとわかった。

NASAジェット推進研究所(JPL)が提供しているSPICE Toolkit(以下、SPICE)を利用してFUJIN-2の電源収支フライトシミュレーション・プログラムを開発した。SPICEとは惑星ミッションの補助データを扱うソフトウェアである。このプログラムを利用して、ある時刻に成層圏高度に浮遊しているFUJIN-2から見た太陽や観測対象となる惑星の赤経赤緯を入手し、高度角と方位角を算出する。FUJIN-2に一定の角度で取り付けられた太陽電池パネルの法線に対する太陽光線の入射角を得る。法線と入射角との割合から太陽電池パネルの発電量を得る。最大1週間程度のフライトを想定したシミュレーションを行う。このプログラムの利用により、現在計画されているフライトの電源収支計画を立てることが可能である。

3. 優れた成果が上がった点

成層圏環境は薄いながらも無視できない空気が存在し、熱解析をやっかいなものにしている。本研究で成層圏環境下での熱解析を実施し、気密容器温度や太陽電池温度を予測することができるようになった。

4. 課題となった点

2対のCMGを用いてGondolaを3軸姿勢制御するシステムを製作した。しかし、まだ数値シミュレーションでの性能評価しかしていない。実機との誤差を考えると、エンジニアリングモデルを用いた地上実験で姿勢制御性能を評価する必要がある。その実験は2020年春に実施する予定である。

観測で得られる金星大気近紫外スペクトルからフィッティングによって吸収分子種毎の雲頂領域での存在量の推定は容易にできる。しかし、その値から雲層中での太陽光加熱率を導出するには、雲層中の物質分布や太陽放射伝達を解く高度なモデルが必要である。その手法を検討している。

5. 研究期間終了後の展望

プロジェクトの実現のためには1.5～2億円の気球実験資金が必要である。科学研究費補助金及びJAXA公募「小規模計画」に申請して、資金の調達を図る。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. FUJIN-2: Balloon Borne Telescope for Optical Observation of Planets
Yasuhiro Shoji, Makoto Taguchi, Toshihiko Nakano, Atsunori Maeda, Masataka Imai, Yuya Goda, Makoto Watanabe, Yukihiro Takahashi, Yuji Sakamoto, and Kazuya Yoshida
Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 14, ists30, Pk_95–Pk_102, (2016).
2. Characteristics Evaluation and Performance Improvement Method of Balloon-Borne Telescope Pointing Control System
Toshihiko Nakano, Makoto Taguchi, Yasuhiro Shoji, Mao Takamura, Daiki Sunaguchi, Masataka Imai, Makoto Watanabe, Yukihiro Takahashi, Yuji Sakamoto, and Kazuya Yoshida
31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-m-06 (2017).

【国際学会発表】

1. A Circumpolar Stratospheric Telescope for Observations of Planets – FUJIN
11th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society, (Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Jul. 28 – Aug. 1, 2014)
Makoto TAGUCHI, Atsunori MAEDA, Toshihiko NAKANO, Kazuya YOSHIDA, Yuji SAKAMOTO, Yasuhiro SHOJI, Yukihiro TAKAHASHI, Masataka IMAI, Junpei NAKAMOTO, Makoto WATANABE, and Yuya GOUDA

【国内学会発表】

1. Observation of planets by a circumpolar stratospheric telescope system FUJIN
136th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Kissei Bunka Hall, Matsumoto, Oct. 31-Nov. 3, 2014)
Makoto Taguchi, Atsunori Maeda, Kazuya Yoshida, Yuji Sakamoto, Toshihiko Nakano, Yasuhiro Shoji, Yukihiro Takahashi, Jumpei Nakamoto, Masataka Imai, Makoto Watanabe, Yuki Goda, and Takeshi Kawahara
2. 極周回成層圏望遠鏡(FUJIN)による惑星大気観測計画
2014年度大気球シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原、2014年11月6、7日)
田口 真、前田惇徳、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、莊司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、今井正堯、合田雄哉
3. 極周回成層圏望遠鏡による惑星観測 – FUJINプロジェクト –
第15回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2015年1月6、7日)
Atsunori MAEDA, Makoto TAGUCHI, Yasuhiro SHOJI, Toshihiko NAKANO, Masataka IMAI, Yuya GODA, Makoto WATANABE, Yukihiro TAKAHASHI, Yuji SAKAMOTO, and Kazuya YOSHIDA

4. 極周回成層圏望遠鏡(FUJIN)による惑星大気観測計画
平成27年度大気球シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原、2015年11月5日～6日)
田口 真、前田惇徳、高村真央、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、莊司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、今井正堯、
合田雄哉
5. 極周回成層圏望遠鏡(FUJIN)による惑星大気観測計画
平成28年度大気球シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原、2016年11月1日～2日)
田口 真、高村真央、砂口大樹、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、莊司泰弘、高橋幸弘、今井正堯、渡辺 誠
6. 極周回成層圏望遠鏡FUJIN
平成29年度大気球シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原、2017年11月9日～10日)
田口 真、莊司泰弘、中野壽彦、高橋幸弘、今井正堯、白藤祐稀子
7. 極周回成層圏望遠鏡FUJINによる金星大気観測
平成30年度大気球シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原、2018年11月1日～2日)
田口 真、莊司泰弘、中野壽彦、高橋幸弘、佐藤光輝、今井正堯、白藤祐稀子
8. Identification of a UV absorber in the Venus atmosphere by FUJIN
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya
University, Nagoya, Nov. 23-27, 2018)
Yukiko Shirafuji, Makoto Taguchi, Masataka Imai, Yukihiro Takahashi, Mitsuteru Sato, Toshihiko
Nakano, and Yasuhiro Shoji

水素吸収セルの開発

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 田口 真
亀田真吾、吉岡和夫

1. 背景と目的

惑星、衛星、小惑星、彗星などの太陽系内天体に含まれる水は太陽紫外線によって水素原子と酸素原子に解離する。それらは熱的あるいは非熱的な散逸過程を経て天体の重力を振り切って宇宙空間に散逸する。天体の周囲に分布するそれらの原子は太陽光を共鳴散乱して惑星コロナを形成する。水素吸収セル法は惑星探査機に搭載され、惑星コロナを観測するための光学的観測手法である。巨大な分光器を要しない小型軽量のセンサーで水素ライマン α 光の発光スペクトルプロファイルを推定できる。水素吸収セル法を用いると、惑星コロナの発光強度の空間分布のみならず、コロナを形成する水素原子の温度や D/H 比を推定することも可能である。日本初の火星探査機「のぞみ」に水素吸収セルフォトメーターが搭載されたが、探査機の不具合のため観測はできなかった。それ以来、より高性能の吸収セルの開発を継続してきた。本研究では実際に具体的なミッションに搭載可能な吸収セルの開発を目標とする。

2. 研究成果

水素と重水素は質量が2倍異なるため、惑星大気からの散逸速度に大きな差がある。それを利用すると、惑星大気の水素・重水素比から過去に失われた水の量を推定できる。水の存在量は、惑星において生命体の有無や存在の条件を得る手がかりとなる。惑星から散逸する水素・重水素比をリモートセンシングする手段として、惑星コロナの水素・重水素ライマン α 発光強度を計測する方法がある。惑星コロナとは惑星の外気圏の原子が太陽光を散乱して光る現象である。水素吸収セル法は小型軽量低消費電力という特徴を生かして、人工衛星や惑星探査機に搭載して惑星コロナの観測が可能である。また、発光のドップラー幅を測定することが可能で、外気圏の温度を導出することができる。本研究では新規開発された水素吸収セルの吸収性能評価を行い、吸収セルの性能に関する様々なパラメーターにおいて最適な数値を導き出すことが目的である。

水素吸収セルは円筒状のガラスの両底面に MgF_2 窓が取り付けられた構造をしており、内部には水素分子が封入されている。 MgF_2 は波長 110 nm-7500 nm の光を透過する光学結晶である。セル内部に置かれたフィラメントを点灯すると、セル内部の水素分子は水素原子に熱解離する。 MgF_2 窓から入射した惑星コロナからの水素ライマン α 線 (121.567 nm) はフィラメントが OFF のときにはセル内を透過するが、フィラメントが ON のときには解離生成した水素原子が共鳴散乱するためセルを透過しない。フィラメント OFF 時と ON 時の透過光量の差とすることで水素ライマン α 線の強度を測定することができる。重水素吸収セルには重水素が封入されており、同様にフィラメントの ON/OFF によって重水素ライマン α 線 (121.534 nm) を検出可能である。中心波長が近接した水素ライマン α 線と重水素ライマン α 線を分光器で分離するには米国の火星探査機 MAVEN に搭載されたような巨大な分光器が必要である。しかし、吸収セルを用いることで小型軽量のセンサーで水素、重水素ライマン α 線の強度を測定することが可能となる。

吸収セルの吸収幅は水素ガスの解離率と温度によって決まる。フィラメント電力が大きいくほど吸収幅は大きくなる。一方、惑星コロナの温度が高いほど、原子の速度は速くなり、放つ光が受けるドップラー幅は大きくなる。その結果、フィラメント電力とライマン α 光の透過率の関係は、惑星コロナの温度によって傾きに違いが出る。この傾きから惑星コロナの温度を推定することが可能である。

2016年7月にフランスのパリ郊外にあるSOLEIL Synchrotronという放射光実験施設で吸収セルの吸収性能評価を目的とした実験を行った。SOLEILでは、シンクロトロン放射による真空紫外領域の強い連続光を利用でき、DESIRSと呼ばれる高い波長分解能がフーリエ変換分光計に備えられている。本実験ではセル内のガス密度、電力、光路長、フィラメントの種類、フィラメントの数の条件を変え、吸収セルのフィラメントをつけたときの吸収スペクトルの変化を測定した。その結果、最も吸収効率が高いのは水素ガス圧力が1~2 hPa、フィラメント線径が0.0244 mm、フィラメント長さが14.8 mmで、電力が3 Wのときであることがわかった。

2018年6月に再びSOLEILにおいて吸収セルの性能評価実験を行った。主に吸収の位置依存性を調べた。ビームが通る位置がフィラメントに近いほど吸収を強く受ける結果を得た。セル内部の水素原子密度分布を解くシミュレーションと合わせた詳しい解析を進めている。

これまで吸収セルのガス導入管はオープンのまま、内部の水素ガスを出し入れして実験を行っていた。しかし、搭載する吸収セルはガスを封じ切らなければならない。そこで、これまでSOLEILでの実験で使用した光路長60 mmと100 mmの2種類の吸収セルを使って、ガスを封じた吸収セルを試作した(図1)。

試作した吸収セルのフィラメントの耐久性を調べるためにフィラメントに流れた電流値の時間変化を求めた。実験中フィラメントには10 Vの電圧のON/OFFを繰り返していたため、電圧ON/OFF時の時間を累積しそれに伴う電流値の変化を調べた。フィラメントは吸収セルの上部と下部にそれぞれ5本ずつの計10本取り付けられているが、それぞれ1本ずつを使用して同時に点灯させた。約62.5時間で1本目のフィラメントが切れた。2本目のフィラメント約69時間点灯し続けたが切れなかったが、徐々に流れる電流は低下した。最初に切れたフィラメントと同じ電流値で切れるとすると、残りのフィラメントも約90時間点灯し続けると切れると予測される。

今後吸収セルを用いた観測として視野に入れている地球コロナの観測ではミッションライフを24ヶ月、マージンとして2倍の48ヶ月を10本のフィラメントで平均して、1本あたりの目標耐久時間は約4.8ヶ月である。そのため、フィラメントの耐久性は改善の必要がある。フィラメントの寿命を縮めた要因としては、吸収効率を重視してフィラメント径を細くしすぎたこと、吸収セルのベーキングが十分ではなく、脱ガスによりフィラメントが酸化することが考えられる。そのため、フィラメント径については吸収効率だけでなく耐久性の面も含めた最適化をしていかなければならない。ベーキングについては、吸収セルと真空装置の接続部分のカルレッツ製Oリングの耐熱温度が300℃であること、使用している一部の温度調節器の警報出力温度が200℃であることによる温度上限を改善することでベーキング温度をより高く設定可能にする必要がある。吸収セルと真空装置の接続部分には、Oリングでなく銅ガスケットを使用することができれば耐熱温度による温度上限は解消され、Oリングシール部



図1. 試作した光路長 60 mm の吸収セル (左) 及び 100 mm の吸収セル (右)。

からのマイクロリークの心配も排除される。さらに、吸収セルのフィラメントは現在10本であるがフィラメントの本数を20本に増やし1本あたりの目標耐久時間を減らすなど対策を検討している。

3. 優れた成果が上がった点

Synchrotron SOLEILのフーリエ変換分光計を利用して、吸収セルの吸収プロファイルを精密に測定することができた。ガス圧、フィラメント電力、フィラメント形状など多くのパラメーターを網羅した体系的なデータを取得し、セルの吸収性能の最適化ができた。得られた結果は論文として上梓した。

4. 課題となった点

フィラメント耐久性能の不足していることがわかった。これは吸収効率を追求しすぎたためと考えられる。単にフィラメント径を太くすることで寿命は改善されると見込まれる。しかし、それにしただってフィラメント電力は増加するので、両者のバランスをとることが必要である。

5. 研究期間終了後の展望

本研究で水素吸収セルを宇宙ミッションに採用されることが現実的になってきた。NASAのプログラムに応募しているSIHLAミッションに吸収セルを搭載する。このミッションは地球コロナ及び惑星間水素風の観測を目的としている。2019年夏に採否が決定する。採用された場合は搭載品を製作し、供給する。他の惑星探査小型ミッションへ水素吸収セルの搭載も検討している。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Evaluation of hydrogen absorption cells for observations of the planetary coronas
Kuwabara, M., M. Taguchi, K. Yoshioka, T. Ishida, N. de Oliveira, K. Ito, S. Kameda, F. Suzuki, and I. Yoshikawa
Rev. Sci. Instr., 89, (2018).

【国際学会発表】

1. Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated to small satellite missions
2018 AGU Fall Meeting (Washington, D. C., U.S.A., Dec. 10-14, 2018)
Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Shingo Kameda, and Ichiro Yoshikawa

【国内学会発表】

1. Evaluation of hydrogen absorption cells for observation of the planetary coronas
地球電磁気・地球惑星圏学会、第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会（九州大学、福岡、2016年11月）
Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Tokio Ishida, Shingo Kameda, and Ichiro Yoshikawa

2. 水素吸収セル法による惑星コロナ観測
「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」「原子分子データ応用フォーラム
セミナー」合同研究会（核融合科学研究所、土岐、2016年12月20日～22日）
田口 真
3. D/H吸収セルの開発と惑星科学への貢献
第19回惑星圏研究会（東北大学、仙台、2018年2月）
吉岡和夫、桑原正輝、田口 真、川原琢也、亀田真吾、吉川一朗
4. Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated for ultra-small missions
JpGU-AGU Joint Meeting 2018 (Makuhari Messe, Chiba, 2018年5月)
M. Kuwabara, M. Taguchi, K. Yoshioka, S. Kameda, F. Suzuki, and I. Yoshikawa

金星大気の研究

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 田口 真
福原哲哉

1. 背景と目的

2010年5月に打ち上げられた金星探査機「あかつき」は同年12月の金星周回軌道投入に失敗したが、2015年12月に軌道投入再挑戦し成功した[Nakamura et al., 2014; 2016]。「あかつき」は金星の大気ダイナミクスの解明を目標とした惑星気象衛星で、搭載された5台のカメラは金星大気異なる高度から発する光を検出し、電波掩蔽観測と合わせて3次的に大気を観測する。3年余りの観測期間に金星を100回以上周回し、2019年3月現在も観測を継続している。搭載観測機器の一つである中間赤外カメラ(LIR)は金星雲頂からの波長8~12 μm の赤外放射を捉える[Fukuhara et al., 2011; 2017b]。得られた画像からは雲頂輝度温度分布が得られる。本研究では主にLIRによる輝度温度分布を使用した研究成果を報告する。

2. 研究成果

(1) 定在温度構造の研究

「あかつき」が周回軌道投入直後にLIRが撮像した画像を図1に示す。金星ディスク中心のやや左

(西)から上下(北南)方向に伸びる弓状の高温領域、その更に西側には同様の低温領域が認められる。この温度構造はその後少なくとも4日間は同じ場所に観測された。金星雲頂高度では赤道上で100 m/sにも達する東風が吹いていて、4~5日間で金星を一周する。しかし、この弓状温度構造はゆっくりと自転する金星の同じ経度上にとどまっていた[Fukuhara et al., 2017a]。その後、この弓状定在温度構造は低緯度高地の上空に金星ローカルタイムの正午から夕方にかけてのみ出現することがわかった[Kouyama et al., 2017]。弓状定在温度構造は高地で発生した重力波(山岳波)が上空及び南北方向に伝播し、雲頂温度に与えた擾乱と考えられている。重力波の伝播過程を数値シミュレーションで再現した結果、弓状定在温度構造出現のローカルタイム依存性は、重力波の伝播過程ではなく、発生源に原因があると推測されている。

(2) 極渦の研究

金星の両極には、ポーラーダイポール・ポーラーカラーという特異な温度構造があることが知られている。ポーラーダイポールは極周りの渦の中心にある高温領域で極付近を中心に西向きに回転する。ポーラーカラーは極渦

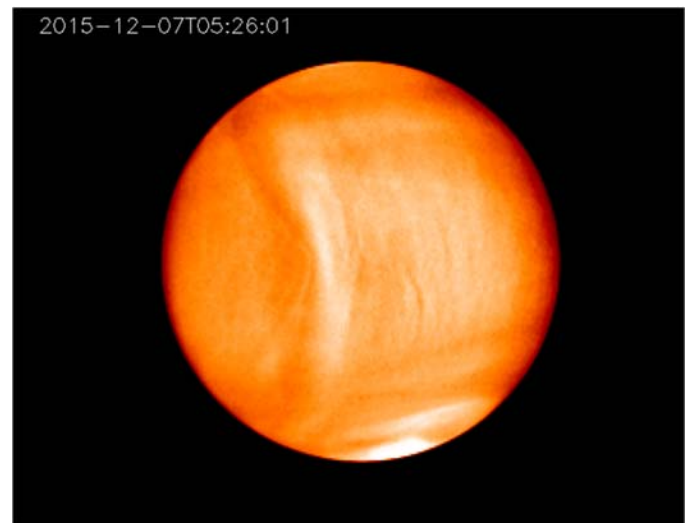


図1. 金星探査機「あかつき」が金星周回軌道に投入された直後に中間赤外カメラ(LIR)が捉えた金星雲頂温度分布。白い方が輝度温度が高い。上が北。中央やや左に南北に伸びる弓状の温度構造、南極に高温領域(極冠)、南北半球高緯度地域には東西方向の帯状低温領域、低緯度には南北方向に伸びる筋状や不規則な微細構造が見える。また、ディスク中心から周辺へ向かって温度が下がる傾向(リムダークニング)が認められる。

の周りに広がる低温領域である。過去の金星ミッションPioneer Venus (PV)の赤外観測でこれらの構造は発見され、Venus Express (VEx)搭載赤外分光器VIRTISで詳しく調査された。

極渦の形状は経度方向の波数 (0, 1, 2) によって分類され、数時間から数日の時間スケールで変化する。さらに極渦の回転周期は、PVの観測で北極の雲頂で2.8~3.2日、VExの観測で南極の雲頂よりもやや低い高度62~63 km付近において2.5日と導出されている。この南北半球非対称の理由は時間変化によるものなのか太陽光加熱などの外的要因によるものなのかはまだ明らかになっていない。また、南北極渦の同時観測の前例はこれまで地上観測しかない。

2016年から2017年にかけてLIRが取得した輝度温度画像から極渦の動態を調べた。LIRが極渦を観測している高度は雲粒子の高度分布及びジオメトリーを考慮すると約70 kmである。本研究の結果、その高度での極渦の回転周期は、南極で約3.8~4.6日、北極で約3.1日と初めて求められた。今回特定できた形状はすべて波数2となった。本研究では、過去の観測によって得られた南極及び北極の極渦の回転周期よりも有意に大きい値が得られた。この違いが時間変化によるものか、観測高度の違いによるものかは明らかにならなかった。また、データ同化を取り入れたシミュレーションによる極域大気の循環周期は約2日で、それと比較しても今回得られた極渦の回転周期は大きい。その違いは物質の移動速度と波動の位相速度の違いかもしれない。今後もLIRで極渦の観測を続け、極渦の長期的な変動を捉えれば、それらの答えが得られると期待される。

(3) 小さい水平スケールの温度構造の研究

LIRは画素毎のオフセットのばらつきをなくすため、観測対象画像（シャッター開状態で取得された画像）からシャッター画像（シャッター閉状態で取得された画像）を減算し差分画像を取得する。また、LIRはランダムノイズを低減するため、2段階の画像積算機能を備える。1段階目は30 Hzで連続出力される画像を通常32枚積算し、約4秒間に1組の観測対象画像とシャッター画像を出力する。2段階目は1段階目の積算で得られた観測対象画像とシャッター画像の差分画像をさらに通常32枚積算し、約2分間に1枚画像出力する。探査機が近金点を通過する前後では探査機の手速は速くなる。約2分間での衛星直下点の移動距離は近金点を通過する前後において約280 kmである。また、LIRが慣性空間指向している場合と金星中心指向している場合に約2分間で画素中心付近で撮像された地点が移動する画素数はそれぞれ2.2ピクセル、6.0ピクセルである。そのためそのまま積算すると画像がぶれてしまう。そこで近金点観測時には、2段階目の積算をしない画像を連続して32回取得し、地上にデータを降ろしてから位置補正をして積算する手法がとられる。その際にLIRの画素の1/10のサイズのサブピクセルに画像を分割し、サブピクセルの精度で位置補正をしてから積算する手法を採用すると、本来の空間分解能よりも若干空間分解能が改善される[Taguchi et al., 2012]。

そのような処理をして得られた近金点付近の画像に現れている雲頂の温度擾乱の特徴がローカルタイム（金星時間）によってどのように変化するかを調べた。ローカルタイム13~18時と23時周辺に温度擾乱の波が見えている。13~18時は前出の弓状定在温度構造をとらえていると考えられ、23時周辺では夜間に波長100 km付近の温度擾乱の強度が高いことからImamura et al. [2014]のシミュレーション結果と整合する。このことから、23時周辺で見える温度擾乱の波は雲層内の対流を起源とした内部重力波に伴う大気の上下動である可能性がある。そして、正午~夕方、夜間に温度擾乱が見られ、その他のローカルタイムではあまり大きな温度擾乱が見られないことから、雲頂の温度擾乱はローカルタイム依存性があるといえる。今後の画像数の増加でより一般的なデータを得ることや、雲層における対流の数値シミュレーションをLIRで観測する高度65 kmまでのばすことにより精度を増すことが可能である。

(4) リムダークニングの研究

LIRが撮像した金星画像には中低緯度領域で金星ディスク中心から周辺に向かって温度が低下するリムダークニングと呼ばれる特徴が見られる。リムダークニングはリムに近づくほどLIRが計測する赤外光が放射される高度

が高くなり、高度が高いほど気温が低いことによって生じる。リムダークニングの形状に着目し金星大気の温度や雲粒子分布の鉛直構造を調べた。まず、「あかつき」が高度60,000 km~100,000 kmの範囲にいる期間にLIRが撮像した金星大気の輝度温度分布から赤外放射の天頂角の関数としてリムダークニングを捉える。緯度帯毎に天頂角に対する輝度温度分布に関数をフィッティングしてリムダークニングの傾斜をパラメータ化する。リムダークニング傾斜及び雲頂大気温度の緯度ローカルタイム依存性について調べた。

その結果、図2に示すように、どの緯度帯でもリムダークニング傾斜がローカルタイムによって波数2の構造を持っていることが判明した。波数2の波の振幅は赤道付近が最も大きく緯度が高くなるにしたがって減少する。金星大気温度がローカルタイムによって波数2を持っていて、それが太陽光照射によって起こる熱潮汐の一つの半日潮汐によるものであることがわかっている[Zasova et al., 2007]。本研究で金星大気温度の緯度ローカルタイム依存について調べた結果でも同様の分布を得たことから、リムダークニング傾斜にも半日潮汐があると考えられる。

これらによりリムダークニングはローカルタイムによって変化する半日潮汐が存在することが示された。さらに温度とリムダークニングの係数の半日潮汐成分は位相が若干ずれている。今後、他の「あかつき」搭載観測機器によるデータや数値モデルによるシミュレーション結果と比較することで、リムダークニングに半日潮汐が観測されるメカニズムを明らかにしていく。熱潮汐は金星大気のスーパーローテーションの維持に重要な役割を果たしていると予想されており、本研究の今後の発展によってスーパーローテーションのメカニズム解明に近づくと期待される。

これらによりリムダークニングはローカルタイムによって変化する半日潮汐が存在することが示された。さらに温度とリムダークニングの係数の半日潮汐成分は位相が若干ずれている。今後、他の「あかつき」搭載観測機器によるデータや数値モデルによるシミュレーション結果と比較することで、リムダークニングに半日潮汐が観測されるメカニズムを明らかにしていく。熱潮汐は金星大気のスーパーローテーションの維持に重要な役割を果たしていると予想されており、本研究の今後の発展によってスーパーローテーションのメカニズム解明に近づくと期待される。

3. 優れた成果が上がった点

優れた成果として弓状定在温度構造の発見が上げられる。これは過去の観測では捉えられていなかった現象で、LIRによって熱赤外スナップショットを多数取得できたことが発見につながった。地球大気にもこの構造と類似の定在重力波の存在は見つかっていたが、これほど大規模な構造は他の惑星も含めて見つかっていなかった。弓状定在温度構造はスーパーローテーションにとっては減衰させる効果を持つと考えられる。過去の観測データを見直して、弓状定在温度構造が再発見されるか、それとも過去には存在しなかったのか見極める必要がある。

4. 課題となった点

弓状定在温度構造を作り出していると考えられる山岳波の励起メカニズムとローカルタイム依存性を明らかにすることが今後の課題である。当初目的のスーパーローテーションの維持メカニズムの解明は道半ばまできているかどうかというところである。LIR観測によって導出された大気潮汐波の構造を詳しく解析することで、大気潮汐波がスーパーローテーション維持に果たす役割が定量的に明らかになると期待される。

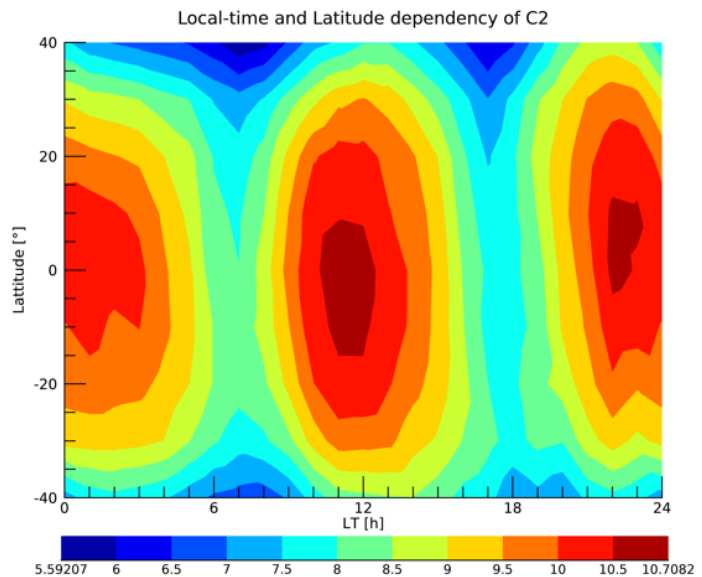


図2. リムダークニングの傾斜を表す係数 C2 のローカルタイム・緯度分布。

5. 研究期間終了後の展望

「あかつき」データの生産に解析や研究が追いついていない状況である。引き続き「あかつき」データ及び数値シミュレーションを使った金星大気の研究を進展させ、金星大気ダイナミクスの解明、ひいては一般惑星気象学の確立を目指す。

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. Return to Venus of the Japanese Venus Climate Orbiter AKATSUKI
Masato Nakamura, et al., Tetsuya Fukuhara (22人中11番目) , Makoto Taguchi (22人中18番目)
Acta Astronautica, 93, 384–389, (2014).
2. Infrared cameras onboard Venus Orbiter Akatsuki
Naomoto Iwagami, Takehiko Satoh, Makoto Taguchi, Takeshi Imamura, and Masato Nakamura
J. Jpn Soc. Infrared Science & Technology, 26, 5–12, (2016).
3. AKATSUKI returns to Venus
Masato Nakamura, et al., Makoto Taguchi (52人中13番目) , Tetsuya Fukuhara (52人中14番目)
Earth Planets Space, 68:75, (2016).
4. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus
Tetsuya Fukuhara, et al., Makoto Taguchi (Corresponding Author) (19人中14番目)
Nature Geoscience, 10, 85–88, (2017a).
5. Absolute calibration of brightness temperature of the Venus disk observed by the Longwave Infrared Camera onboard Akatsuki
Tetsuya Fukuhara, et al., Makoto Taguchi (30人中2番目)
Earth Planets Space, 69:141, (2017b).
6. Overview of Akatsuki data products: definition of data levels, method and accuracy of geometric correction
Kazunori Ogohara, et al., Makoto Taguchi (31人中16番目) , Tetsuya Fukuhara (31人中20番目)
Earth Planets Space, 69:167, (2017).
7. Topographical and Local-Time Dependence of Large Stationary Gravity Waves observed at the cloud top of Venus
Toru Kouyama, et al., Makoto Taguchi (26人中3番目) , Tetsuya Fukuhara (26人中4番目)
Geophys. Res. Lett., 44, 12,098–12,105, (2017).
8. Venus Looks Different at Different Wavelengths: Morphology of the Global Day and Night Cloud Cover at Different Wavelengths from Akatsuki Cameras
Sanjay S. Limaye, et al., Makoto Taguchi (29人中7番目) , Tetsuya Fukuhara (29人中8番目)
Earth Planets Space, 70:24, (2018).

【国際学会発表】

1. Initial results of the Venusian cloud-top temperature observations by Akatsuki/LIR
International Venus Conference 2016 (Merton College, Oxford, UK、2016年4月)
Taguchi, M., T. Fukuhara, T. Imamura, M. Nakamura, M. Suzuki, T. M. Sato, N. Iwagami, M. Ueno, G. L. Hashimoto, T. Kouyama, S. Takagi, and M. Sato
2. Venusian Cloud-Top Temperature Observed by Akatsuki/LIR
13th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (China National Convention Centre, Beijing, China、2016年8月)
Makoto Taguchi, Testuya Fukuhara, Takeshi Imamura, Masato Nakamura, Takao M. Sato, Naomoto Iwagami, George Hashimoto, Toru Kouyama, Munetaka Ueno, Mitsuteru Sato, Seiko Takagi, Makoto Suzuki
3. A bow-shaped thermal structure traveling upstream of the zonal wind flow of Venus atmosphere
DPS 48/EPSC 11 (Pasadena Convention Center, Pasadena, U.S.A.、2016年10月)
Makoto Taguchi, Testuya Fukuhara, Takeshi Imamura, Toru Kouyama, Masato Nakamura, Takao M. Sato, Munetaka Ueno, Makoto Suzuki, Naomoto Iwagami, Mitsuteru Sato, George L. Hashimoto, and Seiko Takagi
4. Correction of brightness offset seen in Akatsuki LIR image
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、2017年5月)
Tetsuya Fukuhara, Akane Hayashitani, Makoto Taguchi, Takeshi Imamura, Toru Kouyama, Takao M. Sato, George Hashimoto, Mitsuteru Sato, Naomoto Iwagami, and Masato Nakamura
5. Synergetic mission of simultaneous observations toward bow-shaped structures induced by atmospheric gravity wave on Venus with ALMA and Venus Climate Orbiter “Akatsuki”
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、2017年5月)
Hiroyuki Maezawa, Ryosuke Aoki, Daiki Haraguchi, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Hideo Sagawa, Kazuya Saigo, Takao M. Sato, Yeon Joo Lee, and Takeshi Imamura
6. Study of the horizontal distribution of Venusian sulfuric clouds using a general circulation model: Comparison with the Akatsuki data
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、2017年5月)
Takehiko Akiba, Takeshi Kuroda, Kohei Ikeda, Naoki Terada, Yasumasa Kasaba, Arihiro Kamada, Masaaki Takahashi, Takao M. Sato, Takehiko Satoh, Makoto Taguchi, and Shigeto Watanabe
7. Characteristic features in cloud-top temperature of Venus
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、2017年5月)
Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Takao M. Sato, Masahiko Futaguchi, Mao Takamura, Takeru Yamada, Naomoto Iwagami, Makoto Suzuki, Munetaka Ueno, Mitsuteru Sato, George Hashimoto, Seiko Takagi, and Masato Nakamura

8. Coordinated observation of Venus cloud top with Subaru and Akatsuki
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、 2017年5月)
Takao M. Sato, Hideo Sagawa, Toru Kouyama, Makoto Taguchi, Yeon Joo Lee, Javier Peralta, Masahiro Takagi, George Hashimoto, Takehiko Satoh, Yasumasa Kasaba, Shohei Aoki, Tetsuya Fukuhara, Atsushi Yamazaki, Takeshi Imamura, and Masato Nakamura
9. Frequent appearance of large stationary gravity waves in Venus atmosphere
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、 2017年5月)
Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Takao M. Sato, George Hashimoto, Masahiko Futaguchi, Naomoto Iwagami, Makoto Suzuki, Munetaka Ueno, Mitsuteru Sato, Seiko Takagi, Takehiko Satoh, and Masato Nakamura
10. Characteristic of polar dipoles seen by LIR onboard the Venus orbiter Akatsuki
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (Makuhari Messe, Chiba、 2017年5月)
Mao Takamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Takao M. Sato, Masahiko Futaguchi, Takeru Yamada, Masato Nakamura, Naomoto Iwagami, Makoto Suzuki, Munetaka Ueno, Mitsuteru Sato, George Hashimoto, and Seiko Takagi
11. Characteristic Features in Cloud-Top Temperature of Venus
14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore、 2017年8月)
Makoto TAGUCHI, Tetsuya FUKUHARA, Toru KOUYAMA, Takeshi IMAMURA, Takao M. SATO, Mao TAKAMURA, Takeru YAMADA, Masahiko FUTAGUCHI, Naomoto IWAGAMI, Makoto SUZUKI, Munetaka UENO, Mitsuteru SATO, George HASHIMOTO, Seiko TAKAGI, and Masato
12. Characteristic of Polar Dipoles Seen by LIR Onboard the Venus Orbiter Akatsuki
14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore、 2017年8月)
Mao TAKAMURA, Makoto TAGUCHI, Tetsuya FUKUHARA, Toru KOUYAMA, Takeshi IMAMURA, Takao M. SATO, Masahiko FUTAGUCHI, Takeru YAMADA, Masato NAKAMURA, Naomoto IWAGAMI, Makoto SUZUKI, Munetaka UENO, Mitsuteru SATO, George HASHIMOTO, and Seiko TAKAGI
13. Precision of Brightness Temperature for Akatsuki LIR Observation on Orbit
14th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, Singapore、 2017年8月)
Tetsuya FUKUHARA, Akane HAYASHITANI, Makoto TAGUCHI, Takeshi IMAMURA, Toru KOUYAMA, Takao M. SATO, George HASHIMOTO, Mitsuteru SATO, and Masato NAKAMURA
14. Study on the thermal structure of the Venusian polar atmosphere
2017 AGU Fall Meeting (New Orleans, Louisiana, U.S.A.、 2017年12月)
Mao Takamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Takao M. Sato, Masahiko Futaguchi, Takeru Yamada, Masato Nakamura, Naomoto Iwagami, Makoto Suzuki, Munetaka Ueno, Mitsuteru Sato, George L. Hashimoto, and Seiko Takagi

15. Vertical Propagation of the Large Stationary Gravity Waves in the Venus Atmosphere
JpGU-AGU Joint Meeting 2018 (Makuhari Messe, Chiba, 2018年5月)
Takeru Yamada, Takeshi Imamura, Tetsuya Fukuhara, and Makoto Taguchi
16. Local-time dependence of the cloud-top Temperature of Venus obtained by close-up observations of LIR on board Akatsuki
JpGU-AGU Joint Meeting 2018 (Makuhari Messe, Chiba, 2018年5月)
Tetsuya Fukuhara, Aya Nagata, Makoto Taguchi, Takeshi Imamura, and LIR Team
17. Vertical Propagation of the Large Stationary Gravity Waves in the Venus Atmosphere
15th Annual Meeting, Asia Oceania Geoscience Society (Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, U.S.A., 2018年6月)
Takeru Yamada, Takeshi Imamura, Tetsuya Fukuhara, and Makoto Taguchi

【国内学会発表】

1. 「あかつき」中間赤外カメラによる金星雲頂温度観測
第29回大気圏シンポジウム (宇宙科学研究所、相模原, 2016年3月)
田口 真、福原哲哉、神山 徹、今村 剛、中村正人、鈴木 睦、佐藤隆雄、上野宗孝、岩上直幹、はしもとじょーじ、佐藤光輝、高木聖子
2. あかつき搭載中間赤外カメラによる金星雲頂温度観測の初期結果
日本地球惑星科学連合2016年大会 (幕張メッセ、千葉県、2016年5月)
田口 真、福原哲哉、今村 剛、中村正人、鈴木 睦、佐藤 隆雄、神山 徹、岩上直幹、はしもとじょーじ、佐藤光輝、高木聖子、上野宗孝
3. 金星雲頂高度に発見された巨大重力波
日本気象学会2016年度秋季大会 (名古屋大学、名古屋、2016年10月)
福原哲哉、はしもとじょーじ、堀之内武、今村 剛、岩上直幹、神山 徹、村上真也、中村正人、小郷原一智、佐藤光輝、佐藤隆雄、鈴木 睦、田口 真、高木聖子、上野宗孝、渡部重十、山田 学
4. 金星大気中に発見された巨大定在重力波
第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 (九州大学、福岡、2016年11月)
田口 真、神山 徹、今村 剛、堀之内武、福原哲哉、二口将彦、はしもとじょーじ、岩上直幹、村上真也、小郷原一智、佐藤光輝、佐藤隆雄、鈴木 睦、高木聖子、上野宗孝、渡部重十、山田 学、山崎 敦、中村正人
5. あかつき中間赤外カメラによる金星極域大気温度構造の解析
第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 (九州大学、福岡、2016年11月)
高村真央、神山 徹、田口 真、福原哲哉、今村 剛、佐藤隆雄、二口将彦、はしもとじょーじ、鈴木 睦、岩上直幹、佐藤光輝、高木聖子、上野宗孝、中村正人
6. LIRによって観測された金星雲頂高度における温度構造とその時間変化
第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 (九州大学、福岡、2016年11月)
神山 徹、田口 真、福原哲哉、佐藤隆雄、二口将彦、はしもとじょーじ、今村 剛

7. Study on the thermal structure of the Venusian polar atmosphere
142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Uji Campus, Kyoto University, Kyoto、2017年10月)
Mao Takamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Takao M. Sato, Masahiko Futaguchi, Masato Nakamura, Naomoto Iwagami, Makoto Suzuki, Munetaka Ueno, Mitsuteru SATO, George Hashimoto, and Seiko Takagi
8. Comparison of Akatsuki radio occultation experiments with thermal infrared image obtained by LIR
142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Uji Campus, Kyoto University, Kyoto、2017年10月)
Tetsuya Fukuhara, Hiroki Ando, Masahiro Takagi, Takeshi Imamura, Makoto Taguchi, and Akatsuki RS/LIR team
9. A numerical simulation of the large-scale stationary gravity waves in the Venus atmosphere
142nd Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Uji Campus, Kyoto University, Kyoto、2017年10月)
Takeru Yamada, Takeshi Imamura, Tetsuya Fukuhara, and Makoto Taguchi
10. Periodic analysis of Venus' cloud-top temperature fluctuation using by LIR images
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya University, Nagoya、2018年11月)
Naoya Kajiwara, Takeshi Imamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, and Toru Kouyama
11. Vertical propagation of the large stationary gravity waves in the Venus atmosphere
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya University, Nagoya、2018年11月)
Takeru Yamada, Takeshi Imamura, Tetsuya Fukuhara, and Makoto Taguchi
12. Stationary features at Venusian cloud top extracted by averaging multiple mid-infrared images
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya University, Nagoya、2018年11月)
Kiichi Fukuya, Takeshi Imamura, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, and Toru Kouyama
13. Comparison of horizontal distributions of temperature and UV absorbers at the Venus cloud-tops
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya University, Nagoya、2018年11月)
Shinichiro Kawase, Makoto Taguchi, and Tetsuya Fukuhara
14. Feature extraction from Venusian cloud morphology using principal component analysis
144th Annual Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (Nagoya University, Nagoya、2018年11月)
Minori Narita, Takeshi Imamura, Yusuke Nara, Yeon Joo Lee, Shigeto Watanabe, Atsushi Yamazaki, Takehiko Satoh, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, and Manabu Yamada

クォーク・グルーオン系の基本相互作用からのアプローチ

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 田中秀和

1. 背景と目的

クォーク・グルーオン系は関与するエネルギー、温度、密度などによりその様相が大きく異なる。従って、宇宙進化の各段階や高温・高密度状態の星内部などで様々な異なった様相を示していると考えられる。ここで、クォーク・グルーオン間の結合定数の性質により、高いエネルギーの関与する短距離領域では相互作用が弱くなり、低いエネルギーに対応する長距離領域では相互作用が強くなる。但し、短距離領域においても結合定数は電磁相互作用の場合のように十分に小さくなりきらず、運動学的領域によっては高次効果が無視できなくなり、摂動の無限次数を足し上げることによって始めて意味のある結果を得ることができる。また、高エネルギー極限では小さな運動量の粒子生成が増大し、散乱過程に於ける評価で高次効果の考慮が必要となる。一方、長距離領域では非摂動的効果によりクォークの閉じ込めやカイラル対称性の破れにより本来は軽いクォークが大きな有効質量を持つことが可能となる。しかし、このような性質も温度や密度の変化により異なる様相を示す。これにより、宇宙の進化過程においても様々な相が生じると考えられる。これらの現象を評価するためには現在のところ一つの描像や手法で全ての領域に対応することは実現していない。本プロジェクトでは、物質の起源を探る理論的側面からクォーク、グルーオン系を理解する試みを進めた。このようなクォーク・グルーオン系の複雑な性質の様々な外的要因による変化を調べ、宇宙進化過程や星内部における物質の性質や変化を研究するための手法を開発する試みを行った。

そこで本プロジェクトでは、以下の2つの点について検討することにした。

- (1) 核子・原子核散乱現象を評価する高次補正項を含めた計算アルゴリズムの検討
- (2) 有限温度・有限密度におけるカイラル対称性の破れを評価する計算手法の検討

2. 研究成果

本プロジェクトでは摂動的取り扱いが可能な領域と非摂動的な手法が必要な領域について、以下の2点についてアルゴリズムの検討を行った。

- (1) 核子・原子核散乱現象を評価する高次補正項を含めた計算アルゴリズムの検討

宇宙進化における高温状態を再現するための地上実験は核子や原子核の散乱実験であるが、これらの強い相互作用の関与する散乱現象をより精密に評価するためには、位相空間を積分した包含過程の計算のみでは不十分である。そこで、散乱現象において位相空間の領域ごとの情報を与える非包含過程を計算するアルゴリズムを用いて、散乱の始状態における横運動量に依存するパートン（クォーク・グルーオン）分布の評価を検討した。

まず、始状態にあるパートンは核子の運動方向に対しての縦運動量とそれに垂直方向の横運動量を持つ。通常の解析的な計算では、横運動量は積分をして縦運動量の情報のみを用いているが、この方法では散乱現象における横運動量分布を正しく評価することが出来ないことが知られている。近年、核子内のパートンについて、縦運動量分布と横運動量分布の相関が問題となってきている。これまでに開発してきた計算処方では縦運動量と共に横運動量も生成可能であることから、この相関を含むパートン分布の干渉効果を含めた評価が可能であるかを検討した。

一方、原子核内のクォーク・グルーオンの分布は、真空中にある核子内の場合と明らかに異なっていることが実験で示されている。しかしこの原因は、核子の原子核内での運動、核子同士の重なり合いや、多重散乱などの複雑な要素を含んでいると考えられている。その情報を得るためには、自由な核子での散乱現象の結果との比較により、その差を同定して物理的な原因を見つける必要がある。

まず、地上実験に関しては、ハドロン散乱におけるハドロン内部のクォーク・グルーオンのとる3次元運動量分布をクォーク・グルーオン系の基礎理論である量子色力学の高次効果を含めて評価した。その結果、小さな横運動量の領域では高次効果の影響が顕著であることが分かった。(原著論文1)

(2) 有限温度・有限密度におけるカイラル対称性の破れを評価する計算手法の検討

クォーク・グルーオン系はクォークの質量をゼロにする極限でカイラル対称性という新たな対称性を持つ。しかしながら、この対称性は絶対零度においてはクォーク・グルーオン間の相互作用により自発的に破れることが知られている。その結果、クォークは質量を持つように振舞う。一方、この対称性の破れは高温・高密度の状態では回復していると考えられている。このような温度や密度の変化によるクォーク・グルーオン系の振舞いを知ることは核子や原子核の性質を調べることに留まらず、宇宙初期の様相や宇宙進化、中性子星の内部構造などを知る上でも重要になってきている。

このカイラル対称性の破れは非摂動的効果により起こると考えられており、格子ゲージ理論などの非摂動的手法でも調べられているが、格子ゲージ理論においてはフェルミオンの取り扱いに難点があり評価が難しいことが知られている。そこで、格子ゲージ理論と相補的に用いられている場の量子論から求められた再帰的方程式(Schwinger-Dyson (SD) 方程式)を有限温度・有限密度系に拡張してカイラル対称性の破れを評価する計算手法の検討を行った。

格子シミュレーションを含めて、これまでは主に平衡系に対する研究が行われてきたが、本プロジェクトでは非平衡系を取り扱うことにより系の不安定性も調べることを目標とした。非平衡系の非摂動効果を評価する方法の一つとして、実時間法における再帰的方程式があるが、取り扱いが難しくこれまではエネルギー依存性を無視する近似での解析が行われてきた。これは時間依存性を無視することになり、系の時間変化を評価することが出来ない。そこで、実時間法においてエネルギー依存性を無視しないで評価する手法の開発を行った。

(a) 絶対零度における強結合量子電磁力学

まず、簡単な例として絶対零度における強結合する量子電磁力学についてエネルギー依存性を考慮する計算を行った。その結果、エネルギー依存性を無視する近似は相転移を起こす結合定数の大きさが著しく異なり、計算精度似が悪いことが分かった。更に、この結果は虚時間法の絶対零度の極限に対応するユークリッド空間における評価とも一致していることを確かめた。実時間法はミンコフスキー時空で定式化されており、質量関数の非摂動効果を虚数部も含めて計算し、有効質量の不安定性なども評価できるようになった。そこでは、空間的運動量領域において虚数部は現れず不安定性は存在しないが、時間的運動量領域においては、不安定性が大きいことが分かった。これは、場の量子論における摂動計算とも定性的に一致する結果である。(原著論文2)

(b) 絶対零度におけるクォーク・グルーオン系

次に、この手法をクォーク・グルーオン系の評価に拡張した。絶対零度では、クォークに数100MeVの有効質量が生じ、これにより本来は軽いクォークとグルーオンで構成されている陽子や中性子の1GeV程度の質量を説明できる。計算の結果、4元運動量の空間的領域における有効質量は虚時間法の絶対零度極限であるユークリッド空間による評価と概ね一致したが、時間的領域における有効質量は1GeV以下のエネルギー領域において差異が生じることが分かった。これは、4元運動量の時間的領域においては、有効質量に虚部が生じることによるもので、系の不安定性を表している。更に、この領域の一部のエネルギー領域では、漸近場が存在する通常の場合の理論とは異なる結果が得られた。(原著論文3)

(c) 有限温度におけるクォーク・グルーオン系

更に、新しい手法を有限温度に対して拡張した。ここで、強い相互作用に現れるスケールパラメータを絶対零度におけるクォークの有効質量3つで核子の質量を再現するように決めると、カイラル対称性が回復する温度はスケールパラメータの約半分であることを見出した。これは、格子シミュレーションの結果とも一致していることを見出した。また、有限温度においても、有効質量の虚数部が通常の場合の量子論の場合と異なる符号を持つ領域が存在することが分かった。(原著論文4)

3. 優れた成果が上がった点

(1) 核子・原子核散乱現象を評価する高次補正項を含めた計算アルゴリズムの検討

強い相互作用の高次効果に対応する干渉効果も含めた多粒子生成のアルゴリズムを発展させることにより、これまでよりも精密に地上実験におけるハドロン散乱の理論的評価が行えるようになった。これにより更に詳細にハドロン散乱において生成された終状態の粒子から、中心領域の情報を得ることが可能になると期待される。

(2) 有限温度・有限密度におけるカイラル対称性の破れを評価する計算手法の検討

非平衡系の非摂動計算は格子シミュレーションでも行われておらず、その格子ゲージ理論と相補的に用いられている場の量子論から求められた再帰的方程式 (Schwinger-Dyson (SD) 方程式) を有限温度・有限密度系に拡張してカイラル対称性の破れを評価する計算処方検討を行った。

その結果として、平衡系の計算では調べることの出来なかった系の不安定性を評価することが出来るようになった。更に、一部のエネルギー領域では漸近場が存在する通常の場合の量子理論とは異なる結果が得られた。その理由は質量関数の虚数部が通常とは異なる符号を持つことに起因することを新たに発見した。ここで得られた結果は、これまでの手法では直接得ることの出来なかった新しい結果である。

4. 課題となった点

数値的評価を確実にするための計算アルゴリズムの開発は不可欠であるが、本研究で扱うような非線形積分方程式の解を求めるのは非常に難しい。特に、解析する領域によっては解の収束性や安定的を確保することが難しく、全ての領域でのより精密な解析が可能な計算手法の開発が必要である。

5. 研究期間終了後の展望

将来的には、非平衡系における非摂動効果を含めてハドロン散乱過程の評価を行い、地上実験における観測値と理論値の比較を行うことによりクォーク・グルーオン系の相転移現象を調べ、初期宇宙や星内部の状態の解明につなげたいが、まずは温度と密度の変化によるクォーク・グルーオン系の性質を系の不安定性も含めた相図として求めたい。

これにより、様々な環境下におけるクォーク・グルーオン系の性質とその変化を調べる事が可能となり、宇宙像の確立を含めて様々な領域における物理現象の理解に寄与することが可能になると期待される。

6. 研究成果公表

【原著論文】 ・

1. TMD Parton Distributions based on Three-Body Decay Functions in NLL Order of QCD
H. Tanaka
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2015, 043B03 (2015).
2. Schwinger-Dyson Equation in Minkowski Space beyond the IE Approximation
S. Sasagawa and H. Tanaka
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2017, 013B04 (2017).
3. Quark mass function in Minkowski Space
H. Tanaka and S. Sasagawa
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2017, 013B04 (2017).
4. Quark mass function at finite temperature in real-time formalism
H. Tanaka and S. Sasagawa
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2019, to be published (2019).

核反応を用いた爆発的元素合成の研究

立教大学大学院理学研究科・先端科学計測研究センター 梅野泰宏

1. 背景と目的

マルチメッセンジャー観測により現在注目されている中性子星合体では、金、ウラン、それよりさらに重い超重元素を数秒間のうちに生成する元素合成過程であるr過程が起こる。この過程では非常に中性子の多い環境で元素合成が進むため不安定な中性子過剰核が多量に生成され、その中性子過剰核が中性子捕獲反応と β 崩壊を繰り返すことによってより重い元素が合成されていく。合成反応の経路の途中には停留点と呼ばれる中性子捕獲反応とその逆反応過程である光分解反応が平衡状態になり、ベータ崩壊でしか反応が進まなくなる領域が存在する。この停留点の存在することにより、r過程によって生成される物質の質量分布には特徴的なピーク構造が現れる。

r過程では中性子数が原子核の魔法数50,82,126である中性子過剰核の周辺が停留点となる。停留点は核の質量、 β 崩壊強度、そして中性子捕獲反応断面積によって決まるが、魔法数周辺が停留点となるのは、核の質量と β 崩壊強度が魔法数前後で大きく変化するからである。

近年の原子核構造の研究において、中性子過剰な不安定核領域ではよく知られた安定核の魔法数2,28,20,28,50,82,126が一部の領域で消失していることがわかるとともに、別の領域では新魔法数16,32,34等が発見されている。R過程経路上でこのような魔法数の変化が発生していれば、r過程の経路は大きく変化する。

また不安定な中性子過剰核が起こす中性子捕獲反応の反応強度は測定が困難を極めるため、ほとんど測定されていない。

我々の目的はこの中性子過剰領域における魔法数の変化と、不安定な中性子過剰核の中性子捕獲反応強度の系統的变化を知ることから、元素合成がどのように進むか?の予言能力を高めるとともに、将来のこれらの研究に不可欠な次世代ガンマ線検出器の開発を行うことである。

2. 研究成果

(1) 魔法数N=32の研究

我々は新魔法数である中性子数N=32を検証するため、N=32である不安定なカルシウム同位体 ^{52}Ca の第1励起状態への換算遷移確率を決定した。魔法数の検証は第1励起状態のエネルギー、換算遷移確率、核の質量、そして荷電半径を用いて行われる。N=32に関しては、第1励起状態のエネルギーと核の質量の測定では魔法数であることが示されているが、荷電半径の測定では魔法性が示されず、議論となっていた。我々の測定から、 ^{52}Ca の第1励起状態への換算遷移確率がN=20と28の魔法数をもつ ^{40}Ca や ^{48}Ca と同程度であることがわかり、N=32が魔法数であることを確認した。

(2) 不安定な中性子過剰核の中性子捕獲反応強度の系統性の研究

近年の研究から、中性子過剰核の光応答にはピグミー双極子共鳴(PDR)と呼ばれる新励起モードの存在が示唆されている。このPDRが存在する励起エネルギー領域はちょうど中性子捕獲反応に大きな影響を与える領域であるため、中性子捕獲反応の断面積を知るためにはこのPDRがどのような構造に起因するものなのかを知ることが必要であるが、どのような核構造がPDRを生み出しているのかは未だ謎のままである。近年ある理論的研究において、カルシウム同位体のPDRは中性子数が28→30→32とおおきくなるにつれ、その励起強度が急速に大きくなることが示唆された。これはPDRが殻構造の影響を受けることを示唆している。そこで我々はこのPDRがN=30,32においてどのように進化していくかを調べるため、 $^{50,52}\text{Ca}$ の光応答を測定する実験を行った。その結果 ^{52}Ca は ^{50}Ca に比べて大きい強度のPDRを持っていることがわかった。この結果が殻構造による影響かどうかは現在解析中である。

(3) 次世代ガンマ線検出器のための検出器開発

立教大学で2002年に建設したNaI(Tl)シンチレータ検出器アレイDALI2は、高検出効率という特徴を生かして今まで不安定核研究の最先端で利用されてきた。今後の不安定核研究には高検出効率だけでなく、高エネルギー分解能であることも重要である。そこで注目されているのがGAGG(Ce)シンチレータである。このシンチレータは高原子番号、高密度、かつNaI(Tl)の約1.5倍の光量を持つという特徴があり、高エネルギー分解能が達成できると考えられている。我々はこのGAGG(Ce)を用いて、波形を用いて入射中性子と γ 線の弁別が可能であることを発見した。これにより、不安定核の γ 線検出において今まで問題であった中性子バックグラウンドが低減可能となった。

3. 優れた成果が上がった点

原子番号 $Z=20$,中性子数 $N=32$ を持つ核 ^{52}Ca の第1励起状態への換算遷移確率 $B(E2)$ を測定し、その値から $N=32$ が魔法数であることを確認した。また $^{50,52}\text{Ca}$ の光応答も世界で初めて測定した。

4. 課題となった点

特になし

5. 研究期間終了後の展望

特になし

6. 研究成果公表

【原著論文】

1. How Robust is the $N=34$ Subshell Closure? First Spectroscopy of ^{52}Ar
H. N. Liu et al., (掲載順:80人中40番目 Y. Togano)
Physical Review Letters 122, 072502 (2019).
2. First Observation of 20B and 21B
S. Leblond et al., (掲載順:48人中45番目 Y. Togano)
Physical Review Letters 121, 262502 (2018).

3. Low-lying dipole response in the unstable ^{70}Ni nucleus
O. Wieland et al., (掲載順:48人中43番目 Y. Togano)
Physical Review C 98, 064313 (2018).
4. Extraction of the Landau-Migdal parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in ^{132}Sn
J. Yasuda et al., (掲載順:60人中53番目 Y. Togano)
Physical Review Letters 121, 132501 (2018).
5. Skyrme random-phase approximation analysis of low-energy dipole states in oxygen isotopes
T. Inakura and Y. Togano, (掲載順:2人中2番目 Y. Togano)
Physical Review C 97, 054330 (2018).
6. Proton elastic scattering at 200 A MeV and high momentum transfer of $1.7\text{-}2.7\text{fm}^{-1}$ as a probe of the nuclear matter density of ^6He
S. Chebotaryov et al., (掲載順:62人中51番目 Y. Togano)
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 053D01 (2018).
7. Strong Neutron Pairing in core+4n Nuclei
A. Revel et al., (掲載順:101人中89番目 Y. Togano)
Physical Review Letters 120, 152504 (2018).
8. Ground-State configuration of neutron-rich ^{35}Al via Coulomb breakup
S. Chakraborty et al., (掲載順:48人中42番目 Y. Togano)
Physical Review C 96, 034301 (2017).
9. Low-Z shore of the “island of inversion” and the reduced neutron magicity toward 280
P. Doornenbal et al., (掲載順:21人中20番目 Y. Togano)
Physical Review C 95, 041301 (2017).
10. Spectroscopy of ^{61}Fe via the neutron transfer reaction $^2\text{H}(^{60}\text{Fe},\text{p})^{61}\text{Fe}$
S. Giron et al., (掲載順:39人中39番目 Y. Togano)
Physical Review C 95, 035806 (2017).
11. Single neutron knockout from ^{20}C and the structure of ^{19}C
J. W. Hwang et al., (掲載順:45人中42番目 Y. Togano)
Physics Letters B 769, 503 (2017).
12. Study of proton- and deuteron-induced spallation reactions on the long-lived fission product ^{93}Zr at 105 MeV/nucleon in inverse kinematics
S. Kawase et al., (掲載順:49人中43番目 Y. Togano)
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2017, 093D03 (2017).

- 1 3. Intruder configurations in the ground state of ^{30}Ne
H. N. Liu et al., (掲載順:23人中21番目 Y. Togano)
Physics Letters B 767, 58 (2017).
- 1 4. In-beam γ -ray spectroscopy of ^{35}Mg via knockout reactions at intermediate energies
S. Momiyama et al., (掲載順:24人中21番目 Y. Togano)
Physical Review C 96, 034328 (2017).
- 1 5. Observation of isoscalar and isovector dipole excitations in neutron-rich ^{200}O
N. Nakatsuka et al., (掲載順:58人中50番目 Y. Togano)
Physics Letters B 768, 387 (2017).

【著書・総説・解説等】

なし

【国際学会発表】

1. Matter radius of two-neutron halo nucleus ^{22}C
13th international conference on nucleus-nucleus collisions (Saitama, Japan, 4-8 December, 2018)
Y. Togano
2. Electric dipole response of $^{50,52}\text{Ca}$
5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Hawaii, USA, 23-27 October, 2018)
Y. Togano
3. New gamma-ray detector CATANA for in-beam gamma-ray spectroscopy with fast RI beams
International conference on electromagnetic isotope separators and related topics (EMIS XVIII) (CERN Geneva, Switzerland, 16-21 September 2018)
Y. Togano, Y. Fujino, T. Nakamura, Y. Kondo, M. Shikata, T. Ozaki, A. Saito, T. Tomai, M. Yasuda, H. Yamada, N. Chiga, H. Otsu, V. Panin, Y. Zaihong
4. Studies of ^{22}C and $^{50,52}\text{Ca}$ at SAMURAI
IX International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2018) (Petrozavodsk Russia, 10-15 September, 2018)
Y. Togano
5. E1 response of neutron-rich Ca isotopes ^{50}Ca and ^{52}Ca
10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) (Matsue Japan, 4-8 June, 2018)
Y. Togano

【国内学会発表】

1. 50、52CaのE1応答測定

日本物理学会 2017年秋季大会 (宇都宮大学,2017年9月12日)

榎野泰宏, 中村隆司, 小林俊雄, 近藤洋介, 藤野佑亮, 家城和夫

【受賞】

1. NuPECC best poster prize, EMIS2018 conference, CERN Geneva, Switzerland ,16-21 September 2018

【マスコミでの発表】

なし