
「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年度～平成25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

平成26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 小泉哲夫（立教大学理学研究科教授）

センター長 北本俊二（立教大学理学研究科教授）

はじめに

立教大学では、理学研究科の研究センターである先端科学計測研究センターが母体となって、2009年度から2013年度の5カ年間、文部科学省の補助金(私立大学戦略的研究基盤形成支援事業)を受け、「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」というタイトルでプロジェクト研究を続けてきました。この研究プロジェクトも2013年度で最終年を迎えることとなりました。本冊子は本研究プロジェクトの5年間の研究成果を報告するものです。

本研究プロジェクトは「A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造」のテーマのもとに(A-1)宇宙ブラックホールの探求、(A-2)時空対称性の探求、そして「B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造」のテーマのもとに(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明、(B-2)原子核構造の解明の4班を構成し、研究プロジェクトを推進してきました。これらは、本学理学研究科物理学専攻が伝統的に得意とする「計測」を中心に、やはり、伝統的に研究を進めてきた、宇宙や時空の研究、原子核や原子分子の構造の研究を更に推し進めるプロジェクトです。物理学専攻の教員を中心に、客員研究員として3名の学外教員を、また、本プロジェクトの予算で、3名の博士研究員(PD)とリサーチアシスタント(RA)1名を雇用し、理論系の教員も実験系の教員もそれぞれ有機的に協力しつつ研究を進めてきました。その結果、上記テーマにおいて数々の成果をあげたと自負しております。研究成果の詳細は本報告書をご覧いただきたいと思っております。今後この成果を活かして、理学研究科の更なる発展を図りたいと考えております。

最後になりましたが、先端科学計測研究センターを運営するにあたって協力を得ております立教大学関連部署の方々に感謝の意を表し、今後とも御支援をお願いする次第です。

2014年5月

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
研究代表者 理学研究科教授 小泉哲夫

目次

第1部：研究成果報告書概要	
研究成果報告書概要	1
添付書類	55
第2部：各テーマによる研究成果	65
(A-1)宇宙ブラックホールの探求：X線干渉計の開発	
北本俊二、村上弘志、瀬田裕美、幸村孝由、星野晶夫	67
衛星搭載用可搬型計測器の開発	
田口 真、鈴木秀彦	73
惑星探査機搭載用分光器の開発～真空紫外分光によるK-Ar年代測定～	79
宇宙ブラックホールの探求：一般相対性理論によるブラックホールの研究	
原田知広、小林努、西條統之、前田秀基、宮本雲平、宝利剛	83
(A-2)時間反転対称性検証実験及び、ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験	
村田次郎	89
弦理論による余剰次元の理論的研究	
疋田泰章、木村哲士、黒木経秀、矢彦沢茂明	95
(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明—原子・分子クラスターの構造の実験的研究—	
小泉哲夫、的場史朗、高橋果林	99
金属表面の電子状態の測定	
枝元一之、掛札洋平	103
希ガスクラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究	
平山孝人、神野智史、立花隆行	107
(B-2)SCRIT実験における電子蓄積リング内のイオン捕獲特性	
栗田和好、榎園昭智	112
3次元位置検出型シンチレーターの開発	
志賀慶明、本林透、家城和夫	118
不安定原子核の構造	
本林 透	122
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	127

第1部：研究成果報告書の概要

プロジェクト番号

S0901029

平成21年度～平成25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 3-34-15 研究プロジェクト名 ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用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
小泉 哲夫	理学研究科	教授

8 プロジェクト参加研究者数 22 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
北本 俊二	理学研究科・教授	(1)ブラックホール観測のための X 線干渉計の開発	(A-1)宇宙ブラックホールの探求 (1)角度分解能 10prad 実現のための X 線干渉計の開発および衛星搭載機器開発を行い、ブラックホールの観測への道を拓く。 (2)同時にブラックホールの理論的探究を進める。 理論と実験の連携の基で、実験技術の制限の中でブラックホールの理論と観測の接点について探求する。
内山 泰伸	理学研究科・准教授	(1)衛星取得データ処理技術の開発	
星野 晶夫	理学研究科・助教	(1)衛星取得データ処理技術の開発	
田口 真	理学研究科・教授	(1)衛星搭載用可搬型計測器の開発	
亀田 真吾	理学研究科・准教授	(1)衛星搭載用可搬型計測器の開発	
鈴木 秀彦	理学研究科・助教	(1)衛星搭載用可搬型計測器の開発	
原田 知広	理学研究科・准教授	(2)一般相対性理論によるブラックホールの研究	
小林 努	理学研究科・准教授	(2)一般相対性理論によるブラックホールの研究	

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

前田 秀基	理学研究科・助教	(2)一般相対性理論によるブラックホールの研究	
柳町 朋樹	立教大学先端科学計測研究センター・客員研究員	(1)衛星搭載用可搬型計測器の開発	
【学外】 村上 弘志	東北学院大学教養学部情報科学科・准教授	(1)ブラックホール観測のためのX線干渉計の開発	
村田 次郎	理学研究科・教授	(1)余剰次元探索実験・時間反転対称性の破れ探索実験	(A-2)時空対称性の探究 (1)ピコメートル精度の画像処理変位形を用いての近距離重力測定からの余剰次元探索およびMWPC偏極度計による時間反転対称性の破れ探索を行う。 (2)弦理論による余剰次元の研究をすすめる。 理論と実験の連携の基で理論による予測を実験にフィードバックしつつ、時空構造の知見を得る。
矢彦沢 茂明	理学研究科・教授	(2)弦理論による余剰次元の理論的研究	
疋田 泰章	理学研究科・助教	(2)弦理論による余剰次元の理論的研究	
小泉 哲夫	理学研究科・教授	(1)原子・分子クラスターの構造の実験的研究	(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明 (1)イオンエネルギー分光、電子分光、スパッタイオン分光などにより孤立原子から固体表面までの構造を実験的に解明する。 (2)光電子分光法により金属表面および金属付着分子の電子状態の解明を行う。量子化学計算も行い物質構造の解明にあたる。 (1)と(2)の連携の基で孤立原子から固体表面までの構造を電子状態の変化という観点から解明する。
平山 孝人	理学研究科・教授	(1)クラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究	
立花 隆行	理学研究科・助教	(1)クラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究	
栗田 和好	理学研究科・教授	(1)不安定原子核の電子散乱実験をめざした超低エネルギー反跳イオン検出器の開発	(B-2)原子核の構造の解明 (1)不安定核の電子散乱実験および3次元検出器の開発による原子核構造の実験的解明を進める。 (2)クォーク・グルオン系の基本相互作用からの理論的アプローチをおこなう。 理論と実験の連携の基で理論の結果を参照しつつ実験を進めクォーク・グルオン系の構造を解明する。
家城 和夫	理学研究科・教授	(1)3次元位置検出シンチレータの開発	
榎園 昭智	理学研究科・助教	(1)不安定原子核の電子散乱実験をめざした超低エネルギー反跳イオン検出器の開発	
田中 秀和	理学研究科・教授	(2)クォーク・グルオン系の基本相互作用からのアプローチ	

プロジェクト番号

S0901029

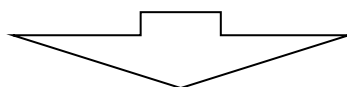
【学外】 本林 透	理化学研究所・仁科 加速器研究センター RIBF 施設共用コー ディネーター	(1)不安定原子核の構造	
--------------	---	--------------	--

<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
不安定原子核の電子散乱実験 をめざした超低エネルギー反跳 イオン検出器の開発	理学研究科・准教 授	栗田 和好	原子核の構造の解明

(変更の時期:平成21年 4月 1日)



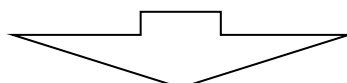
新

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	栗田 和好	原子核の構造の解明

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21年 4月 1日)



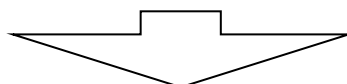
新

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	掛札 洋平	原子・分子・クラスタ ー・固体表面の構造の解 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
不安定原子核の構造	理化学研究所・主任 研究員	本林 透	原子核の構造の解明

(変更の時期:平成22年 4月 1日)



プロジェクト番号

S0901029

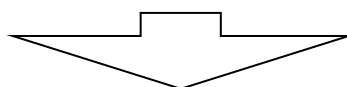
新

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
理化学研究所・主任 研究員	理化学研究所・仁科加速器 研究センター RIBF施設共 用コーディネーター	本林 透	原子核の構造の解明

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23年 4月 1日)



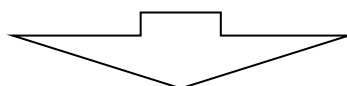
新

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	亀田 真吾	宇宙ブラックホールの探 求

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
金属表面の電子状態の 測定	理学研究科・教授	枝元 一之	原子・分子・クラスター・ 固体表面の構造の解明
	理学研究科・助教	掛札 洋平	

(変更の時期:平成23年 4月 1日)



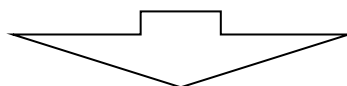
新

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

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
余剰次元探索実験・時間反転 対称性の破れ探索実験	理学研究科・准教 授	村田 次郎	時空対称性の探究

(変更の時期:平成24年 4月 1日)



プロジェクト番号

S0901029

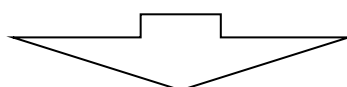
新

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	村田 次郎	時空対称性の探究

旧

プロジェクト外での研究課題	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24年 4月 1日)



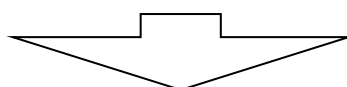
新

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	小林 努	宇宙ブラックホールの探求
	理学研究科・助教	立花 隆行	原子・分子・クラスター・ 固体表面の構造の解明
	理学研究科・助教	榎園 昭智	原子核の構造の解明
	理学研究科・助教	鈴木 秀彦	宇宙ブラックホールの探求

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
一般相対性理論によるブラックホールの研究	理学研究科・助教	西條 統之	宇宙ブラックホールの探究
弦理論による余剰次元の理論的研究	理学研究科・助教	黒木 経秀	時空対称性の探究

(変更の時期:平成25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

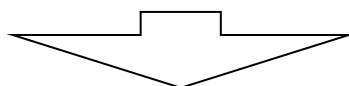
プロジェクト番号

S0901029

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
衛星取得データ処理技術の開発	理学研究科・准教授	柳町 朋樹	宇宙ブラックホールの探究
ブラックホール観測のためのX線干渉計の開発	理学研究科・助教	村上 弘志	宇宙ブラックホールの探究

(変更の時期:平成25年 4月 1日)



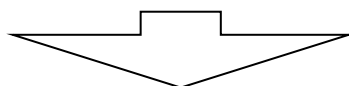
新

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	立教大学先端化学計測研究センター・客員研究員	柳町 朋樹	宇宙ブラックホールの探究
理学研究科・助教	東北学院大学教養学部情報科学科・准教授	村上 弘志	宇宙ブラックホールの探究

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25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	内山 泰伸	宇宙ブラックホールの探究
	理学研究科・助教	星野 晶夫	宇宙ブラックホールの探究
	理学研究科・助教	前田 秀基	宇宙ブラックホールの探究
	理学研究科・助教	疋田 泰章	時空対称性の探究

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

近年、ナノスケールの計測技術はそれほど特殊なものではなくなってきた。本研究はさらに精度の高いピコスケール精度の計測技術開発を目指し、その技術を応用して基礎科学の先端的課題である「時空の構造」および「物質の構造」の解明にあたることを目的とする。最近の素粒子物理学の理論は余剰次元の存在や時空対称性の破れを予言している。また時空の特異点というべきブラックホールの存在も理論的にも観測的にも支持されるようになってきた。

本プロジェクトではピコスケール計測技術を開発し、それを用いて立教大学理学研究科内の施設を中心にこれらの問題の解明にあたった。素粒子や時空対称性の実験研究は大型加速器を用いて行われることが多いが、当研究では精密計測技術を用いることで、大型加速器実験に匹敵する成果を立教大学内のインハウス実験で上げることも可能となった。

本プロジェクトではピコスケール計測技術の開発、およびそれを用いての最先端科学の世界的研究拠点として「先端科学計測研究センター」を発展させる。

(2) 研究組織

「先端科学計測研究センター」に所属する立教大学理学研究科教員13名が中心となり、2つのテーマ「A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造」、「B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造」のもと、4つの研究班(A-1)宇宙ブラックホールの探求、(A-2)時空対称性の探究、(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明、(B-2)原子核の構造の解明を構成し研究プロジェクトを推進した。それぞれの班は独自の課題に取り組むが、粒子精密計測法・高速データ処理など共通する計測技術開発を相互に活用して研究プロジェクトの効率的な推進をはかった。実験的研究だけでなく、立教大学理学研究科に所属する素粒子理論の研究者や、量子化学計算の研究者とも連携し理論的なサポートを受けながら研究を進めた。立教大学と理化学研究所で共同開発した装置を用いての原子核実験も継続し、成果を上げている。

また、大学院生(20~30名、年度によって異なる)も積極的に研究に参加した。大学院生(博士課程)のうち1~2名をリサーチアシスタントに採用している。また主に学外の博士号取得者をポスト・ドクトラル・フェロー(PD)として1~3名採用している。研究代表者を委員長とし、各研究班から選出された数名からなる運営委員会を組織し、プロジェクトの進捗状況、成果報告会、会計、人事、成果の公開などを検討し、センターの運営が潤滑にいくようにしている。

さらに、本プロジェクトの外部評価を行うため、外部有識者3名(科学技術振興機構(JST)山下廣順、J-PARCセンター長永宮正治、京都大学工学部教授伊藤秋男)からなる外部評価委員会を組織した。なお、1名の事務員が研究支援に従事した。

(3) 研究施設・設備等

研究設備の詳細は「17 施設・装置・設備の整備状況」に記載した。本研究プロジェクトでは計画遂行のため「コヒーレント光源」、「大立体角 MWPC」、「クラスター分子分光装置」、「反跳イオン検出装置」などを整備し、各担当者が管理しながら、プロジェクトメンバーで共同利用を行った。また、大学院生にも積極的に開放しプロジェクト研究の進展に役立てた。

(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。

研究プロジェクトの計画や目的・意義と関連づけて、当初の目標をどれだけ達成したか記述するとともに、新たに得られた知見などについても具体的に記述してください。

(*論は論文発表、*学は学会発表)

平成 21 年度

初年度はピコスケール計測技術の確立のための、実験装置の性能評価、立ち上げなど、理論グループでは方法論の検討などを中心に研究をすすめた。各課題の成果を以下に記述する。

(A-1)「宇宙ブラックホールの探求」では新型X線干渉計(*[論 130](#)、[学 175](#))の可視光による動作確認実験とコヒーレント光源の開発を開始し(*[学 137,142,157,170,175](#))、新型X線干渉計の可視光による動作確認実験を実施した。光源はHe/Neレーザーで鏡は可視光用の鏡および半透膜を使用している。その結果、斜入射マツハツエンダー型の干渉縞を取得し動作を確認した。一方、コヒーレント光源の真空チャンバーを購入し、X線発生装置との組付けを行った。

理論的研究では相対論的流体動力学で、世界で最も速く回転するブラックホールを動的に形成することに成功した(*[論 85,173](#))。関連して、高速回転するブラックホールに関する研究(*[論 113,132,134,171](#))、流体・重力対応に関する研究に着手した(*[論 113,138](#))。

(A-2)「時空対称性の探究」では、余剰次元探索を目的とした重力の逆二乗則の検証実験を、1mmを切るスケールでの計測を可能にする画像処理型変位計と高い対称性をもつ振れ秤を組み合わせたシステムを構築して初めて成功させると共に、この距離での等価原理の検証に世界で初めて成功した(*[学 108](#))。時間反転対称性の実験を立ち上げるため、ベータ線源を用いた実機テストや解析コードの構築をまず行い、準備を整える事ができた。理論的研究では複雑な背景場が登場しているとき、超重力場と低エネルギーの超弦の場の理論(SSFT)が正確に一致しているかどうかについて計算を行った。そして、NS-NS pp-wave の背景場の場合に、超重力場の作用と低エネルギーの SSFT の作用が2次摂動展開までにおいて一致していることを示し、更に、NS-NS pp-wave の背景場の場合に、超重力場のゲージ変換と低エネルギーの SSFT のゲージ変換が一致していることを示した(*[論 121](#))。

(B-1)「原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明」ではクラスター分子分光装置を開発し、大型真空排気システムを持ったクラスター生成槽を新規に導入した。装置の動作チェックを行い、正常に動作することを確認した。Ar クラスターにおける電子エネルギー損失スペクトルを測定し、低エネルギー電子ビームをプローブとして用いることにより、クラスター粒子の表面原子のみの電子的励起過程の観測に成功した(*[論 125,184,185](#))。さらに低エネルギーイオン-希ガス固体衝突により脱離したクラスターイオンの運動エネルギー分布・膜厚依存性を測定し、固体内でのクラスターイオンの成長過程についての新しいモデルを提唱した(*[論 145](#))。多価イオン-希ガス固体表面衝突実験を行い、入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる脱離イオンの観測に成功した(*[論 144](#))。またキラル分子イオンの移動度測定のための準備として入射イオン型移動管の質量分析計を四重極質量分析計に変え、質量分解能の向上を図った。金属表面の研究では自然酸化膜に覆われた Si(100)基板を金ナノ粒子(粒径 5~20nm)のコロイド溶液に浸し、基板上へのナノ粒子の析出を利用して、これらのナノ粒子を自己組織化的に直鎖状に配列させることに成功した。生成した直線状の自己組織化構造の線幅は数 nm から数百 nm の範囲であった。この構造は粒径に依存しないことも見出した(*[論](#)

[186](#)。開発した技術は、廉価にナノ粒子の規則構造を形成しうるものであり、応用的にも重要なものである。

(B-2)「原子核の構造の解明」では立教大学と理化学研究所で共同開発した γ 線検出装置 DALI2 を用いて、自然界には存在しない不安定な原子核を対象とした γ 線核分光実験を行い、中性子過剰領域で見られる魔法数の発現・消失などの原子核構造の研究を行っている。これまでの研究では、DALI2 と理化学研究所 RIBF で供給される大強度二次ビームを組み合わせることで実験効率を向上させ、魔法数近傍の原子核を対象とした実験を行った。本プロジェクトではそれを発展させてさらに広い範囲の不安定核を対象として研究を進める。また、電子蓄積リングのイオントラップ現象を応用して不安定核の電子散乱実験の実現を目指す。電子散乱実験では反跳イオン検出用の真空装置を導入して 10^{-8} Pa の電子蓄積リングと検出器の接続を可能にした。低エネルギーイオン検出装置のプロトタイプを製作し含浸型イオン源を組み込み動作確認を行った。問題点の発見及び解決法を検討し、装置デザインの最終調整を行った。3次元位置感応型中性子検出器については、位置検出の方式を検討した。シンチレータの側面のみぞに張られた波長変換ファイバーを MPPC によって読みだす方式を採用し、プロトタイプを作成して読み出し方法のテストを行った。同様の手法で側面からのシンチレーション光を直接 MPPC を用いて読みだす位置感応型 γ 線検出器についても試作を行い、10mm 程度の位置分解能を達成することができた。

理論的研究では核子散乱断面積における QCD の効果とその任意性を調べた。更に、高次項まで評価する方法として、Jet-Calculus 処方¹の性質を検討した(*[学 202](#))。また、有限温度系を評価する計算処方については、場の量子論から得られる方程式である Schwinger-Dyson 方程式の有限温度への拡張を行った。特に、有限温度における SD 方程式のゲージパラメーター依存性を調べ、ワード・高橋恒等式を満たす解が存在することを示した(*[論 155](#))。

平成 22 年度

初年度に引き続き、ピコスケール計測技術開発のための研究を推進した。初年度導入のプロトタイプ装置による性能評価にもとづく装置の設計や、購入した設備の本格利用を始めた。以下に成果を記述する。

(A-1)「宇宙ブラックホールの探求」ではコヒーレント光源の開発と新型 X 線干渉計の X 線による駆動試験を行った(*[学 137,142,157,170,176](#))。コヒーレント光源と X 線発生装置、および、裏面照射 CCD とを組み合わせた。X 線は Al-KX 線を使って 100 μ m および 20 μ m のピンホールを通した X 線の像を撮像する事ができた。さらに、光源からの X 線のエネルギースペクトルも取得し、Al-KX 線が主たる成分であることを確認した。

理論的研究では、世界で最も速く回転する動的ブラックホール自身の多重極モーメントの抽出に成功し、その諸性質を議論した(*[論 116,118](#))。関連して、高速回転するブラックホールに関する研究(*[論 107](#))、流体・重力対応に関する研究を進めた(*[論 115](#))。

(A-2)「時空対称性の探究」では、前年の結果を受けて、時間反転対称性の破れ探索実験である TRIUMF 研究所における MTV 実験を立ち上げ、その為に開発した電子線飛跡検出器(大立体角 MWPC)を用いた⁶Li から放出される電子横偏極度計の構築に成功した。理論的研究では行列模型の高い超対称性が large-N 極限(N は行列のランク)でどのように破れ、我々の世界が再現されているのか明らかにすることが重要であったので、行列模型の超対称性の自発的破れを実際に計算した(*

[論 123](#))。さらに、弦理論と関連している M 理論の超膜の低エネルギー有効作用の提案の ABJM 模型について研究し、ABJM 模型においてもやはり超膜は不安定であることを示した(* [論 122](#))。

(B-1)「原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明」では新たに低エネルギー(10 eV-100 eV)真空紫外光ビームラインを設置した。これにより、10 eV-300 eV の範囲において、シンクロトロン放射光施設を用いた強度に匹敵する光子強度を得られることを確認した。新たに設置した真空紫外ビームラインを用いて、希ガス固体からのイオン脱離の観測を開始した。Ne 固体からのイオン脱離のしきい値を初めて決定することに成功した。また低エネルギーイオン衝撃により希ガス固体から脱離する粒子の運動エネルギーの試料温度依存性を測定した。クラスター分子分光装置を用いて大きなクラスターを標的とした測定を開始した。イオン衝撃脱離において、入射イオンの持つポテンシャルエネルギーの消費過程の定量的観測に成功した(* [論 145](#))。イオン移動度測定では新しい付着型イオン源を開発し、約10倍のクラスターイオンを得ることができた。このイオン源を用いてキラル分子クラスターイオンのヘリウム気体中の移動度測定に成功した(* [論 143](#))。またこのような実験で一般的によく使われる Micro Channel Plate (MCP)の高検出効率のものを開発し、その絶対検出効率を測定した(* [学 144,182,184,197](#))。イオン検出金属表面の研究では表面増強ラマン散乱(SERS)測定のためのテンプレートとして、金ナノ粒子(粒径 5~20nm)を自己組織化的に直鎖状に配列させることに成功した。生成した直線状の自己組織化構造の線幅は数 nm から数百 nm の範囲であった。この構造は粒径に依存せず、また表面に低密度に形成できるため、微粒子からなる擬 1 次元構造 1 本の SERS を測定することが可能となる。金ナノ粒子の表面電子状態は線幅に依存してわずかに異なると考えられることから、SERS 効果も異なると期待できる。これらの自己組織化ワイヤに対して SERS 測定を行うために位置合わせのためのマーカーを作成することが重要であると考えられるが、金ナノ粒子は加熱プロセスによって容易に変質することから、電子線リソグラフィによるマーカー作成は適用できないことが分かった。

(B-2)「原子核の構造の解明」では反跳イオン検出装置読出システムを購入し、イオンの識別能の最適化を行った。低エネルギーイオン検出装置の導入を行い、検出器内部へのベロシティーフィルターの導入設計に着手した。また3次元位置検出器の開発では 10x10x100 cm³ のプラスチックシンチレータに 10 本のファイバーを張った検出器・測定回路を製作した。MPPC の動作条件を調べ、また、時間情報、波高情報からニューラルネットワークを利用して位置情報を求めるアルゴリズムを開発した。2次元については位置に相関するデータが得られた。

理論的研究では前年度に検討した Jet-Calculus 処方を陽子-反陽子散乱におけるレプトン対生成過程に適用し、この処方の有用性を検証した。結果としては他の処方よりも摂動の高次項の振舞いが非包含過程の評価には適していることが分かった。別の観点から原子核内のクォークの状態を知る材料として、原子核の β 崩壊から得られる情報を測定精度との関係から調べた(* [論 156](#))。また、前年度の有限温度系に拡張した Schwinger-Dyson 方程式のゲージ依存性を解析的な方法でさらに理解する研究を行った(* [学 181](#))。さらにこの方法を有限密度系にも適用できるように拡張し、化学ポテンシャルの加わった効果を調べた。その結果、有限密度に拡張する際の定式化に結果が依存することをスペクトル関数の場合について示し、その違いはフーリエ変換の取り方による見かけ上のものであることを指摘した(* [論 127](#))。

平成 23 年度

引き続き、ピコスケール計測技術開発のための研究を推進した。計画した設備の購入は予定通り

完了し本格利用を始めた。以下に成果を記述する。

(A-1)宇宙ブラックホールの探究では X 線干渉計を実現させるためのデザインを考察し、天体観測を模擬できるシミュレーションプログラムを開発した。そして、ブラックホールによる降着円盤の影の観測が可能である事を示した(*論 62)。衛星搭載機器の開発では、真空紫外シュミットカメラに使用する MgF₂非球面補正板の高精度製造技術を確立した(*論 68)。平成 23 年度からは、新たに惑星大気に含まれる水素と重水素の存在比を計測する探査機搭載用ガラス吸収セルの開発に取りかかった。火星探査機「のぞみ」搭載吸収セルの口径を倍増した吸収セル構造モデルを製作した。火星散逸大気研究の目的と吸収セル開発状況を学会にて報告した(*学 122)。また月惑星探査機搭載用元素分析器 LIBS の試作を行い、JAXA が開発する探査車に取り付けて光学系の自動焦点調整機能の実証を行った。真空紫外 LIBS によるその場 K-Ar 年代測定法を考案し、装置設計を行った。この手法について平成 24 年 6 月に特許出願を行った。

理論的研究では宇宙ブラックホールの起源天体である中性子星の相対論的天体の準静的時間スケールでの進化についての数学的定式化に成功した(*論 86)。極小ブラックホール生成可能性が議論されている高エネルギー加速器実験において同時に生成される裸の時空特異点の量子論的粒子生成を議論した(*論 103)。宇宙の回転ブラックホール周辺の高エネルギー現象としての、粒子衝突・コンパクト天体衝突の物理的実現可能性について考察した(*論 80,100,107)。

(A-2)時空対称性の探究では、前年までに立ちあげた電子横偏極度計を応用し、原子核距離での一般相対論的な歳差運動を利用した重力の逆二乗則の検証にも世界で初めて成功している(*学 107)。理論的研究としては、弦理論の非摂動論的定式化として有力視されている行列模型の研究を行った。特に、ボソンとフェルミオンの入れ替えに関する対称性である、超対称性に注目した。低次元の場合ではあるが、超対称性をもつ弦理論が、ある行列模型で記述できることを示した。

(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明では、低エネルギー電子・真空紫外光・低エネルギーイオン衝撃による希ガス固体表面からの脱離粒子の観測を行った。低エネルギーイオン衝撃によるイオンの脱離過程におよぼす温度の効果を測定し、固体中のホール移動度に関する知見を得た(*論 126)。平成 21-22 年度に製作したクラスター分子分光装置がほぼ完成し、Ar クラスターの電子エネルギー損失スペクトルのクラスターサイズ依存性を測定した。光をプローブとした場合、表面原子に起因する信号がバルク信号に隠されてしまう問題があるが、我々は低エネルギー電子をプローブに用いることによりバルク信号を減らすことが可能であることを示し、表面励起の効率的な観測方法の開発に成功した(*論 125)。

クラスターイオンの動的過程の測定では、Li⁺付着2ブタノールクラスターイオンの He 気体中の移動度を測定し低エネルギー領域での衝突過程を研究した。特にクラスターの付着分子数の違いに着目し断面積の分子数依存性について議論した(*学 113,125,131,133,144)。また原子衝突実験で重要な粒子検出器である MCP について検出効率の高いものを開発し、様々なイオンで絶対検出効率を測定した(*論 90,*学 112,133,144)。

(B-2)原子核の構造の解明では、中性子魔法数 N=50 の ⁷⁸Ni、元素合成過程で重要となる領域に位置する ¹²⁶Pd について第一励起エネルギーを決定するための実験を行った。電子散乱実験では反跳イオン検出器を理化学研究所に持ち込みチャンネルトロンでイオンの総量を測定することにより、イオンのトラップ効率の最適化を図り、安定核の ¹³³Cs を用いたテスト実験では 150MeV の電子電流

240mA においてルミノシティー $L=10^{27}/\text{cm}/\text{s}$ を達成し、原子核構造解明に必要な条件をクリアした。3次元位置感応型中性子検出器については、発光位置に関する情報を得るために、検出器側面に設置した WLS ファイバーにより波長変換されたシンチレーション光を小型で大きな増倍能力をもつ半導体素子の MPPC によって読み出す方法を研究し、ファイバーや MPPC の設置方法について比較検討を行い、発光位置に依存する信号を得ることができた。

理論的研究では Jet-Calculus (JC) 処方を用いて、ハドロン散乱断面積の数値計算アルゴリズムを構築した。この処方は他の因子化処方に比べて数値的に正負の強い相殺が無く、数値計算の精度が著しく改善されることが分かった(*論 91)。また、Schwinger-Dyson (SD) 方程式の有限密度系への拡張を試みた。有限密度においては、化学ポテンシャルを加えることにより、SD方程式には虚数部分を生じる。ここでは、虚数部分を無視した場合と含めた場合の違いを数値的に比較し、有効ポテンシャルにおいて虚数部が無視できない寄与を与えることを指摘した。更に、非摂動計算法の一つである格子場の理論にフェルミオンを導入するときに生ずるフェルミオン多重問題について、カイラル対称性を保持した場合に格子上で保たれる他の対称性との関連について調べ、連続極限において少数のフェルミオンに帰着する場合の格子化手法の違いにより、保たれる対称性が異なることを指摘した(*学 115,116)。

平成 24 年度

ピコスケール計測技術開発のための研究を推進し、その技術を応用して基礎物理の研究をおこなった。以下に成果を記述する。

(A-1)宇宙ブラックホールの探究では、線干渉計について X 線の反射鏡、および、半透膜を購入し、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory で反射鏡の反射率を測定し、ほぼ、設計通りである事を確かめた。この結果を元に23年度に開発したコンピューターシミュレーションにより、ブラックホール撮像のために必要な波長と基線長を検討した。その結果、波長5nm で SgrA* のブラックホールでは 8.7m、M87 のブラックホールでは 18.9m の基線長でそれらのサイズ測定が可能である事を示した(*論 62)。衛星搭載用可搬型計測器の開発では火星探査機「のぞみ」搭載吸収セルの構造モデルが 15 Grms のランダム振動で壊れないことを確認した。試作セルの製作を目指して、セルに水素ガスを封入するための排気装置の整備、ガラスセルボディー加工、フィラメント取付を行った。さらに JAXA の月探査計画 SELENE-2 への搭載に向け LIBS の概念設計を完了し、主任開発者 (PI) として提案を行った (選定自体は確定していない)。真空紫外 LIBS 装置を完成させ、その場 K-Ar 年代測定実験の準備を完了した。

理論的研究ではこれまでの純理論的な研究を継続しつつ、それを踏まえて観測の可能性についての考察を行った。中性子星の r モード不安定性の動力学的な性質を研究し、飽和振幅の特定に成功した(*学 46,53,61,69,72,90,96,127)。アインシュタイン重力とは異なる重力理論の一つである一般的なスカラー・テンソル理論におけるブラックホール解の安定性に関する研究をおこなった。ブラックホールの安定性研究から端を発した流体・重力対応の観点から重要となる、ゼロでない圧縮率をもつ液滴・液柱の新しい不安定性を発見した(*論 84)。回転ブラックホール周辺の高エネルギー粒子衝突によって放射される粒子のエネルギーに対する普遍的な上限を与えた(*論 82)。

(A-2)時空対称性の探究では、大立体角 MWPC と高速デジタルデータ収集系を組み合わせた MTV 実験の次世代実験装置を TRIUMF 研究所に建設し、実際に ${}^6\text{Li}$ を用いた時間反転対称性の破れ探索実験を実行し、計画通りの世界最高精度での検証に成功した(*学 79)。理論的研究では、現在の世

界には超対称性は存在していないため、なんらかの形で超対称性が破れていることを示す必要がある。実際23年度に明らかにした行列模型において、超対称性が自発的に破れることを見いだした(*[論 45](#))。

(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明では、低エネルギー電子衝撃による中性励起原子の脱離過程の温度依存性を測定し、脱離角度分布が結晶格子の熱振動に起因することを見いだした(*[論 76](#))。また、イオン脱離の絶対収率の測定に成功し、多価イオンの持つ大きなポテンシャルエネルギーの消費過程の定量的議論を可能にした(*[論 76](#))。クラスターイオンの動的過程の測定では、Li⁺にブタノールの構造異性体を付着させ、クラスターイオンの構造と移動度の関係を測定した。構造の違いはわずかであるので、精密な移動度測定法を完成し、構造により移動度が違うことを明らかにした(*[論 35](#)、[学 99](#))。量子化学的計算に基づきクラスターの構造をもとめ動的過程の関連の検討を開始した。高感度 MCP の開発では、検出効率 100%を期待して開口率 100%の MCP を特注し、その絶対検出効率の測定を開始した(*[学 97](#))。

(B-2)原子核の構造の解明では、中性子数 N=34 の閉殻性を研究するために ⁵⁴Ca の第一励起エネルギーの決定を目指した実験を行った(*[学 73](#))。また、⁴²Si の研究成果をまとめ発表した(*[論 66](#)、[学 64,78,95,121](#))。電子散乱実験ではイオントラップの機構に電子ビームのシンクロトロン振動が大変重要な役割を果たすことを発見し、そのビームの挙動を制御することにより、標的となる重イオンと残留ガスから供給される軽イオンを選択的にトラップする手法の可能性が開けてきた。3 次元位置感応型中性子検出器の開発では、位置の決定精度を向上させるため、MPPC のダークカウントが多いという欠点を克服すべく MPPC の温度特性から素子を-15°C~-30°C程度に冷却する方法を開発した。

理論的研究では、原子核内のクォークの状態を知る材料として有用な原子核のβ崩壊の輻射補正の効果を調べた(*[論 60](#))。また、Schwinger-Dyson(SD)方程式を有限温度・有限密度系に拡張し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。特に、有限密度において化学ポテンシャルを加えることにより生ずる虚数部分の寄与を含めてポテンシャル密度による変化を調べ、相転移の様相を解析した。結果は、相転移の起こる化学ポテンシャルの値が数10MeV程度引き下げられる効果として現れ、無視できない効果があることを指摘した(*[論 58](#))。さらに、カイラル対称性の破れと閉じ込め・非閉じ込め相転移は異なった機構で起こっているかどうかを調べるために、仮想的に曲がった空間上でSD方程式を解き、相転移点の違いを調べた。その結果、時空の曲率により二つの相転移の様子が分離して観測されることが分かった(*[論 59](#))。

平成 25 年度

最終年度のため、研究の総括を行うとともに、研究の今後の発展を展望する。

(A-1)宇宙ブラックホールの探究では、新型X線干渉計について高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory で反射鏡に加え、半透膜の反射率と透過率を測定した。これらの反射鏡と半透膜を使い、コヒーレント光源の真空チェンバー内に 2nm 波長で 10mm のベースラインを持つ干渉計を構成した。

理論的研究では、アインシュタイン重力とは異なる重力理論の一つである有質量重力理論における回転ブラックホール解を求めるための手法について考察をおこなった。宇宙物理学的に現実的なパラメータ領域における重力崩壊では裸の特異点は現れずブラックホールができることを示した(*[論 43](#))。最大回転ブラックホールに類似した最大荷電ブラックホール周辺の高エネルギー荷電粒子衝突

によって放射される粒子の質量・エネルギーが極めて大きくなりうることを示した(*論42)。

(A-2)「時空対称性の探究」では、1mm のスケールで約 10%の精度で万有引力の法則と矛盾がない事を、二番目の追試として成功させた(*論1)。また、時間反転実験についても最終テスト実験を完了させると共に、最初の物理データの収集に成功した(*論2)。さらに、最大の国際会議である国際核物理会議で重要なプロジェクトとして選定されて発表し、国際的な評価を得ている(*学40)。カナダの TRIUMF 研究所の将来計画を示す 5 年計画でも重要テーマとして掲げられ、今後の発展を期待されている。これらの成果はテレビの科学番組でも特集され、一般にも注目されている(*ガリレオX)。

理論的研究では、この5年間で余剰次元を自然に含む超弦理論の非摂動論的定式化に関して、新たな理解を得ることができた。特に、行列モデルによる定式化により、超対称性が自発的に破れるモデルを構成することに成功した。

以上により、余剰空間次元、時間反転対称性、理論研究ともに目的をほぼ達成できたと言える。

(B-1)原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明」では、低エネルギー多価イオン衝撃により希ガス固体表面からのイオン脱離過程が今まで知られていたポテンシャルスパッタリング機構では説明できない新しい現象であることを明らかにし、固体中原子の電離過程と中性原子の脱離過程の両方を考えた新しい脱離モデルを提唱した(*学28)。

クラスターイオンの動的過程の測定では、構造異性体による移動度の違いを理論的に検討し、構造が異なることによって相互作用および衝突過程が異なることを明らかにした(*論35)。また He 気体を低温(衝突エネルギーが低い領域)にすることで、異性体による違いが顕著になると考えられるので、液体窒素温度での測定を行っている。高感度 MCP の開発では開口率 100%の MCP の絶対検出効率が 70-80%程度にしかならないことが判明しその原因を追及中である。

(B-2)原子核の構造の解明では、前年度までに得られたデータの解析を進めるとともに、引き続き国際会議発表を行った(*学39)。これらの実験データの解析を進め、核構造研究にとって重要な情報を得ることに成功している。特に、 ^{42}Si の研究では、この原子核が魔法数による安定性が大きく崩れ、パンケーキ型に変形していることを突き止め、長年にわたる論争に終止符を打った(*論66)。電子散乱実験ではイオントラップを確立し電子散乱測定器系の完成も目前となり、電子散乱実験の実現性は確実なものと判断している。散乱電子検出器系の開発にも着手した。プログラマブル集積回路を用いたカスタマイズ可能なデータ収集システムの構築に取り組んでいる。この技術は本来高価であった電子回路群の簡素化・低価格化を実現するだけでなく、アナログシグナルの検出器直下でのデジタル化により、ノイズ環境に強い長所がある。この技術を用いたデータ収集システムの構築し、今年度より世界初の不安定核・電子散乱実験用の電子スペクトロメータ(ドリフトチェンバー)の読み出しを行う予定である。3次元位置感応型中性子検出器の開発では前置増幅器を読み出し回路の近くに設置することにより、信号の S/N 比を向上させ安定に動作させる目途がついたため、これらを多数設置することにより 3次元の位置情報を得るための開発を続けている。位置感応型の γ 線検出器については MPPC 信号の位置依存性を系統的に調べており、その情報から発光位置を一定程度制限することに成功している。

理論的研究では格子ゲージ理論におけるフェルミオン多重問題について、格子上でカイラル対称性を持ち連続極限において2つのフェルミオンに帰着するモデルについて、格子上で成立すべき対称性が輻射補正によりどの様に変化するかを調べた(*論29)。有限温度・有限密度のクォーク・グルオン

系は重い原子核の衝突による原子核内の状態に対応しており、これまでの研究により、カイラル対称性の破れを含めてその性質が理論的にかなり分かってきた。さらに、摂動領域におけるクォーク・グルオン系の効果を調べ、この効果を精密に取り入れた散乱断面積の計算法と組み合わせることにより、原子核内部の状態を散乱現象を通して精密に調べる手法を得た。

<優れた成果があがった点>

(A-1)「宇宙ブラックホールの探求」では、研究期間内では新型干渉計の完成にはいたらなかったが、ブラックホール撮像のための新型干渉計の有用性は、コンピュータシミュレーションにより、確かめる事ができた。開発のための実験室実験では、要素技術として、鏡の性能評価ができ、半透膜の性能評価ができた。また、これら要素を組み上げ、全体の構成としての動作試験を行い、今後の開発の問題点を洗い出す実験中である。これらの独創的研究結果は国際学会の招待講演として発表した(*学13)。月惑星探査機搭載用元素分析器 LIBS の開発では岩石中に含まれる微量物質の分析や岩石の年代測定に応用でき特許出願を行った(特願 2012-126314 K-Ar 年代測定装置及び方法)。

理論的研究では相対論的流体動力学で、世界で最も速く回転するブラックホールを動的に形成することに成功し、その諸性質を議論した。本プロジェクト研究者の原田はアメリカ物理学会(American Physical Society)の Outstanding Referee(特に優れたレフリー)に選出された。

(A-2)「時空対称性の探究」では近距離重力観測装置を建設し、それをを用いて 1mm を切るスケールでの逆二乗則の検証実験を世界で初めて成功させる事が出来た。また 100 ミクロンスケールでの余剰次元探索実験を実行し、等価原理検証実験を世界最高精度で行うことができた(*学108)。これらの成果は『余剰次元』と逆二乗則の破れ(村田、2011 年、講談社ブルーバックス)として出版されると共に、技術面では特許申請に結びついた。その後の研究では 1mm を切るスケールでの重力実験を初めて成功させると共に、この距離での等価原理の検証に世界で初めて成功した。さらに重力実験の原子核距離での検証にも初めて成功した。これらの成果も国際会議等で注目されており、TRIUMF 研究所においても研究所を代表する高優先度課題として非常に高く評価されている。また著書出版で一般に広く周知されると共に、科学雑誌日経サイエンスや Newton にて特集記事を組まれる所まで注目される成果をあげている。

(B-1)「原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明」では多価イオン-希ガス固体表面衝突実験を行い、入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる脱離イオンの観測に成功した。発表論文は英国物理学会の IOP Select に選ばれた(*論145)。低エネルギー多価イオン衝撃による希ガスイオン脱離過程が今まで知られていた機構では説明できない新しい現象であることを明らかにし、固体中原子の電離過程と中性原子の脱離過程の両方を考えた新しい脱離モデルを提唱した。

(B-2)「原子核の構造の解明」では、研究期間内では電子散乱実験装置は完成に至らなかったが、十分なマシンスタディができ、不安定核標的による実験に必要なルミノシティを得るめどが立った。安定核ではこの手法による散乱電子の観測に世界で初めて成功している。不安定核標的による実験を近日中に実行するよう計画中である。また家城らのグループの論文が第 18 回日本物理学会論文賞を受賞した(*論164)。(添付資料1)

<問題点>

「光電子分光法による金属表面」の研究を担当していた枝元が平成 23 年度より本学の他研究組織

(未来分子研究センター)にやむをえず異動せざるを得なかったが、プロジェクト全体としては当初の研究目的を達成し、十分な成果を挙げることができた。

<評価体制>

(研究プロジェクトの目標等に照らした自己評価の実施や、その結果を研究費等の資源の配分へ反映させるためのルールの適切な設定、また、本プロジェクトに係る費用対効果(かけた費用に見合う効果が見られるか)について、どのように分析しているか。また、それらについて、外部(第三者)による評価を受ける体制ができていないか等について記述してください。)

本研究プロジェクトでは4つの研究班から構成されているが、年度ごとの研究成果報告会で各研究課題相互の討論を行う他、各グループ同士の討論を随時行い、課題間の交流を図っている。研究の進捗状況は、研究テーマ調書に記載した各年度別の具体的研究内容の実施進捗計画を指標として、当研究センター運営委員会が毎年度評価する。また研究成果の外部評価を行なうための外部評価委員会を設置し、3年目終了時に行われた成果報告会(2012年3月17日)に外部評価委員(科学技術振興機構(JST)山下廣順、J-PARCセンター長永宮正治、京都大学工学部教授伊藤秋男)に出席していただき、研究体制・成果などについて詳細な評価を仰いだ。この外部評価は概ね高評価であったが、理論と実験の間でもう少しお互いに議論し、理論・実験両面からの課題解決に取り込むこと、原子核の研究グループ間で一体化して研究を進めた方が研究効率が上がることなど、主にグループ間の連携に関するコメントをいくつかいただいた、そのコメントをもとにグループ間の連携を密にし、成果が最大になるように研究プロジェクトを進めた。

<研究期間終了後の展望>

(本プロジェクト終了後における研究の継続の有無、有の場合は今後の研究方針、無の場合は当該研究施設・装置・設備の活用方針を記述してください。)

本プロジェクトで得た研究成果を基に、さらに研究の発展を図る。立教大学理学研究科の特徴を活かし、宇宙における現象を衛星による観測と地上実験で研究することを中心としたプロジェクト、「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」を立ち上げ、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に申請した。

<研究成果の副次的効果>

(研究成果の活用状況又は今後の活用計画(実用化・企業化の見通しや、特許の申請があればその申請状況・取得状況等)について、記述してください。)

「時空対称性の探究」で開発されたハイビジョン技術を用いた100マイクロスケールでの画像解析技術は産業界への応用も可能である。実際、ねじれ秤と画像処理を用いた微小力計測方法で特許申請を行った(特願2010-122928(2010年5月28日: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)。月惑星探査機搭載用元素分析器LIBSの開発は岩石中に含まれる微量物質の分析や岩石の年代測定に応用でき、特許出願を行った(特願2012-126314 K-Ar年代測定装置及び方法)。

またMCPは撮像管などにも利用されているので高感度MCPの開発は暗視スコープへの応用なども考えられる。

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) ブラックホール (2) X線干渉計 (3) 余剰次元
 (4) 時間反転対称性 (5) 希ガス固体表面 (6) クラスター分子
 (7) 不安定原子核 (8) 電子散乱

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	論文標題	雑誌名(巻)	発行年	ページ
1*	※	村田次郎、田中佐季、三宮一史、村上暹菜	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	233-240
2*	※	J. Murata et. al.	The MTV experiment: a test of time reversal symmetry using polarized ^8Li	Hyperfine Interactions 225	2014	193-196
4	※	Saki TANAKA, Jiro Murata et. al.	MTV/MTV-G experiment at TRIUMF Search of T-Violation and gravity signal at nuclear scale	JPS Conf. Proc. 1	2014	013063
4	※	R. Tanuma, J. Murata et. al.	Report of the next generation TRIUMF-MTV experiment Run-IV using Cylindrical Drift Chamber	JPS Conf. Proc. 1	2014	013069
5	※	J. Murata et. al.	T-Violation experiment at TRIUMF-ISAC using polarized ^8Li	EPJ Web of Conferences 66	2014	05017
6	※	Saki Tanaka, Jiro Murata et. al.	Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin geodetic precession	EPJ Web of Conferences 66	2014	05021
7	※	S. Tanaka, J. Murata et. al.	Development of a novel scintillation-trigger detector for the MTV experiment using aluminum-metallized film tapes	Nucl. Instrum. Meth. A 752	2014	47 - 53
8	※	Tomohiro Harada,	High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole	J. Phys.: Conf. Ser. 484	2014	12016
9	※	Tomohiro Nakama, Tomohiro Harada, A. G. Polnarev and Jun'ichi Yokoyama	Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation	JCAP01	2014	037
10	※	Naoki Tsukamoto, Masashi Kimura and Tomohiro Harada	High Energy Collision of Particles in the Vicinity of Extrinsic Hemal Blackholes in Higher Dimensions: Banados-Silk-West Process as Linear Instability of Extremal Black Holes	Phys. Rev. D 89	2014	024020
11	※	Sourav Bhattacharya and Hideki Maeda	Can a black hole with conformal scalar hair rotate?	Physical Review D	2014	in press
12	※	Gabor Kunstatter and Hideki Maeda	Throat quantization of the Schwarzschild-Tangherlini(-AdS) Black Hole	Classical and Quantum Gravity	2014	submitted
13	※	Tetsuji Kimura and Shin Sasaki	Worksheet description of exotic five-brane with two gauged isometries	JHEP	2014	in press
14	※	Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama	Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector	Phys. Rev. D	2014	in press

15	※	Sakine Nishi, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Norihiro Tanahashi, Masahide Yamaguchi	Cosmological matching conditions and galilean genesis in Horndeski's theory	JCAP 03	2014	008
16	※	K. Hinoue, <u>T. Houri</u> , C. Rugina and Y. Yasui	'General Wahlquist Metrics in All Dimensions'	Phys. Rev. D	2014	submitted
17	※	Kazufumi Ninomiya, <u>Jiro Murata et. al.</u>	<u>Short-range Gravity experiment using digital image analysis</u>	Journal of Physics, Conrerence Series 453	2013	012007
18	※	Saki Tanaka, <u>Jiro Murata et. al.</u>	MTV-G experiment : probing a non-standard strong gravitational eld at nuclear scale using geodetic precession	Journal of Physics, Conrerence Series 453	2013	012018
19	※	T.Creutzig, <u>Y.Hikida</u> , P.B.Rønne	Extended higher spin holography and Grassmannian models	JHEP 1311	2013	038
20	※	<u>Y.Hikida</u>	Conical defects and N=2 higher spin holography	JHEP 1308	2013	127
21	※	<u>疋田泰章</u>	高いスピンのゲージ理論による AdS/CFT 対応の理解に向けて	日本物理学会誌 68	2013	378-381
22	※	Naoki Tsukamoto and <u>Tomohiro Harada</u>	A No-Go Theorem for Rotating Stars of a Perfect Fluid without Radial Motion in Projectable Horava-Lifshitz Gravity	Galaxies	2013	261-274
23	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Chul-Moon Yoo and Kazunori Kohri	Threshold of primordial black hole formation	Phys. Rev. D88(8)	2013	084051
24		<u>原田知広</u> 、 <u>木村匡志</u>	「ブラックホールは天然の粒子加速器になるか？」	日本物理学会誌第 68 巻 第 2 号	2013	102
25	※	S. Kawamoto, D. Tomino and <u>T. Kuroki</u> ,	Large-N renormalization group on fuzzy sphere	Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 21	2013	151
26	※	<u>Tetsuji Kimura</u> and Shin Sasaki	Worldsheet instanton corrections to 522-brane geometry	JHEP	2013	1308 (2013) 126
27	※	<u>Tetsuji Kimura</u> and Shin Sasaki	Gauged linear sigma model for exotic five-brane	Nuclear Physics B	2013	876 (2013) 493
28		Takei, D.; Drake, J. J.; Tsujimoto, M.; Ness, J.-U.; Osborne, J. P.; Starrfield, S.; <u>Kitamoto, S.</u>	X-Ray Eclipse Diagnosis of the Evolving Mass Loss in the Recurrent Nova U Scorpii 2010	ApJ	2013	L4-8
29*	※	Kamata,S; <u>Tanaka,H</u>	Minimal Doubling Fermion and Hermiticity	PTEP 2013	2013	023B05 1-10
30	※	M.Wakasugi et al. (26 名中 <u>A.Enokizono</u> 7 番目、 <u>K.Kurita</u> 16 番目)	Construction of the SCRIT Electron Scattering Facility at the RIKEN RI Beam Factory	EMIS2012 proceedings	2013	in press
31	※	R.Ogawara et al. (9 名中 <u>K.Kurita</u> 8 番目)	Ion Trapping Properties of SCRIT	EMIS2012 proceedings	2013	in press
32	※	Takei, D.; Drake, J. J.; Tsujimoto, M.; Ness, J.-U.; Osborne, J. P.; Starrfield, S.; <u>Kitamoto, S.</u>	X-Ray Eclipse Diagnosis of the Evolving Mass Loss in the Recurrent Nova U Scorpii 2010	Astrophys. J. 769	2013	L4-8
33	※	Murakami, G. et al. (9 人中 <u>Taguchi, M.</u> 6番目、 <u>S. Kameda</u> , 8番目)	Plasmaspheric filament: an isolated magnetic flux tube filled with dense plasmas	Geophy. Res. Lett., 40	2013	1-5, doi:10.1002 / GRL.50124

34	※	Yusuke Nakajima, and <u>Tetsuo Koizumi</u>	Transfer ionization processes in charge transfer reactions between slow-moving highly charged ions and atoms	Physica Scripta	2013	T156 014035 .
35*	※	K. Takahashi, K. Saito, <u>T. Koizumi</u> , S. Matoba, T. M. Kojima, H. Tanuma, and H. Shiromaru	Mobilities of Li^+ -attached Butanol Isomers in He Gas	J. Chem. Phys.	2013	39 084317
36		Sugita, S.; Morota, <u>T.</u> ; <u>Kameda</u> , S.; Honda, R.; Honda, C.; Hayabusa-2 ONC Science Team	Science Observation Strategy for Hayabusa-2 Optical Navigation Cameras (ONC)	44th Lunar and Planetary Science Conference	2013	LPI Contribution No. 1719, p.3026
37		Sugita, S. et al. (<u>Kameda</u> , <u>S.</u> 人中3番目)	Visible Spectroscopic Observations of Asteroid 162173 (1999 JU3) with the Gemini-S Telescope	44th Lunar and Planetary Science Conference,	2013	LPI Contribution No. 1719, p.2591
38	※	Suzuki, H., T. Nakamura, S. L. Vadas, M. Tsutsumi, <u>M. Taguchi</u> and Y. Fujiwara	Inertia-gravity wave in the polar mesopause region inferred from successive images of a meteor train.	J. Geophys. Res.	2013	doi:10.1002/jgrd.50228
39	※	Chul-Moon Yoo, <u>Tomohiro Harada</u> and Naoki Tsukamoto	Wave Effect in Gravitational Lensing by the Ellis Wormhole	Phys. Rev. D87	2013	84045
40	※	Naoki Tsukamoto and <u>Tomohiro Harada</u>	Signed magnification sums for general spherical lenses	Phys. Rev. D 87	2013	24024
41	※	<u>Tomohiro Harada</u> and Sanjay Jhingan	Renormalization group approach to Einstein-Rosen waves	Phys. Rev. D87	2013	64043
42*	※	H. Nemoto, <u>U. Miyamoto</u> (PD), <u>T. Harada</u> , and T. Kokubu	Escape of superheavy and highly energetic particles produced by particle collisions near maximally charged black holes	Phys. Rev. D87(12)	2013	127502
43*	※	<u>U. Miyamoto</u> (PD), S. Jhingan, and <u>T. Harada</u>	Weak cosmic censorship in gravitational collapse with astrophysical parameter values	Progress of Theoretical and Experimental Physics 2013	2013	053E01(pp. 1-9)
44	※	Masaki Ando, <u>Motoyuki Saijo</u> , and the DECIGO Working Group	DECIGO Pathfinder	International Journal of Modern Physics D22	2013	1341002 / 1 - 10
45*	※	<u>T. Kuroki</u> and F. Sugino,	New critical behavior in a supersymmetric double-well matrix model	Nucl. Phys. B867	2013	448
46	※	R.Izsak, et. al. (24名中10番目 <u>K.Ieki</u>)	Determining the $^7\text{Li}(n, \gamma)$ cross section via Coulomb dissociation of ^6Li	Phys.Rev. C	2013	88, 065808
47	※	H.Suzuki et al.(37名中11番目 <u>K.Ieki</u> , 18番目 <u>K.Kurita</u> , 21番目 <u>T.Motobayashi</u>)	Collectivity of neutron-rich Ti isotopes	Phys.Rev. C	2013	88, 024326
48	※	Kohei Kamada, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Taro Kunimitsu, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama	Graceful exit from Higgs G-inflation"	Phys.Rev. D88	2013	123518
49	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> , Norihiro Tanahashi, Masahide Yamaguchi	Multi-field G-inflation	Phys. Rev. D 88	2013	083504

50	※	Tatsuya Narikawa, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Daisuke Yamauchi, and Ryo Saito	Testing general scalar–tensor gravity and massive gravity with cluster lensing	Phys.Rev. D87	2013	124006
51	※	Yu-ichi Takamizu and <u>Tsutomu Kobayashi</u>	Nonlinear superhorizon curvature perturbation in generic single–field inflation	PTEP, 6	2013	063E03
52	※	Xian Gao, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Maresuke Shiraishi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, and Shuichiro Yokoyama	Full bispectra from primordial scalar and tensor perturbations in the most general single–field inflation model	PTEP	2013	053E03
53	※	<u>Tetsuji Kimura</u>	On static charged black holes in type IIA on a nearly–Kahler coset	Progress of Theoretical Physics	2012	128 (2012) 873
54	※	Machiko Hatsuda and <u>Tetsuji Kimura</u>	Canonical approach to Courant brackets for D–branes	JHEP	2012	1206(2012) 034
55	※	<u>Tsutomu Kobayashi</u> , Masaru Siino, Masahide Yamaguchi, and Daisuke Yoshida	New Cosmological Solutions in Massive Gravity	Phys. Rev. D 86	2012	061505(R)
56	※	Kohei Kamada, <u>Tsutomu Kobayashi</u> , Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama	Generalized Higgs inflation	Phys. Rev. D86	2012	023504
57	※	S. Kawamoto, <u>T. Kuroki</u> and D. Tomino,	Renormalization group approach to matrix models via noncommutative space	JHEP 1208	2012	168
58*	※	Sasagawa,S; <u>Tanaka, H</u>	Effect of an Imaginary part of the schwinger–Dyson equation at finite temperature and density	Phys. Rev. C85	2012	45201 1–9
59*	※	Sasagawa,S; <u>Tanaka, H</u>	Separation of the chiral and deconfinement phase transition in curved space–time	Prog. Theor. Phys. 128	2012	925–939
60*	※	Matsuzaki, A; <u>Tanaka, H</u>	Derivation of Fermi function in perturbative quantum field theory	Phys. Rev. C86	2012	65502 1–9
61	※	Todoroki, Shotaro; <u>Kitamoto, Shunji</u> ; Yoshida, Yuki; Murakami, Hiroshi	Self–Charge–Filling (SCF) Effect of Suzaku XIS	Publ. Astron.Soc. Jpn. 64	2012	101–106
62*	※	<u>Kitamoto, S.</u> ; Sakata, K.; Murakami, H.; Yoshida, Y.; Seta, H.	X–ray interferometer with an x–ray beam splitter	Proc of SPIE, 8443E	2012	0XK(8pp)
63	※	Huenemoerder, David P.; Oskinoval, Lidia M.; Ignace, Richard; Waldron, Wayne L.; Todt, Helge; Hamaguchi, Kenji; <u>Kitamoto, Shunji</u>	On the Weak–wind Problem in Massive Stars: X–Ray Spectra Reveal a Massive Hot Wind in μ Columbae	Astrophys. J. 756	2012	L34–38

64	※	Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, and Teruaki Suyama	Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations I: the odd-parity sector	Phys. Rev. D 85	2012	84025
65	※	T. Motobayashi and H. Sakurai	Research with fast radioactive isotope beams at RIKEN	Prog. Theor. Exp. Phys., 2012	2012	03C001
66*	※	S. Takeuchi et al. (T. Motobayashi, 42人中6番目)	Well Developed Deformation in ^{42}Si .	Phys.Rev.Lett., 109	2012	182501
67	※	K. -A. Li, et al. (T. Motobayashi, 11人中9番目)	Inelastic Scattering of ^{23}Mg at 190 MeV / Nucleon from a Thick Proton Target	Chin.Phys.Lett., 29	2012	102301
68*	※	Taguchi, M., T. Nakamura, and J. Ono	Development of an MgF2 aspheric corrector for a VUV Schmidt camera	JAXA-RR-11	2012	004,
69	※	Taguchi, M. et al.	Characteristic features in Venus' nightside cloud-top temperature obtained by Akatsuki/LIR,	Icarus, 219	2012	502-509, 10.1016/ j.icarus.201 2.01.024
70	※	Nakano, T. et al. (M. Taguchi, 9人中7番目)	Performance Evaluation for Pointing Control System of the Balloon-Borne Telescope	13th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS) Kyoto, Japan	2012	15-18
71	※	Taguchi, S., K. Hosokawa, Y. Ogawa, T. Aoki, and M. Taguchi	Double bursts inside a poleward-moving auroral form in the cusp	J. Geophys. Res., 117	2012	A12301, doi:10.1029 /2012JA01 8150
72	※	Murakami, Go et al. (10人中 Kameda, Shingo 5番目、Taguchi,Makoto7 番目)	Image of the Cold Plasmas around the Earth Observed by Telescope of Extreme Ultraviolet (TEX) onboard KAGUYA: Geoscience from the Moon	Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Aerospace Technology Japan, 8	2012	pp. Tn_23-Tn_2 8
73		Ishibashi, K et al. (Kameda, S. 11人中9番 目)	Analysis Method for Minerals with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for In-Situ Lunar Mineral Measurement	43rd Lunar and Planetary Science Conference	2012	Contributio n No. 1659, id.1786
74	※	Y.Togano et al. (37名中 5番目 T. Motobayashi, 13番目 K.Ieki, 20番目 K. Kurita)	Hindered Proton Collectivity in $^{28}_{16}\text{S}_{12}$: Possible Magic Number at Z=16	Phys.Rev.Lett. 108	2012	222501
75	※	D.Kameda K.Ieki, 他 58名	Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ^{238}U	Phys.Rev. C86	2012	54319

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

76*	※	<u>立花隆行、平山孝人</u>	ガス固体におけるイオン衝撃脱離(依頼執筆)	日本物理学会誌 67	2012	767-71
77*	※	<u>H. Kato, T. Tachibana and T.Hirayama</u>	Temperature effect of metastable atom desorption from solid Ne by low-energy electron impact	Low Temperature Physics 38	2012	949-52
78	※	T.Suda et al. (17名中 <u>A.Enokizono</u> 4番目、 <u>K.Kurita</u> 8番目)	Nuclear physics at the SCRIT electron scattering facility	Prog. Theor. Exp. Phys.	2012	03C008
79	※	A. Adare et al. (栗田:388人中 183番目)	Deviation from quark-number scaling of the anisotropy parameter v_2 of pions, kaons, and protons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV	Phys. Rev. C 85	2012	64914
80*	※	<u>Takahisa Igata, Tomohiro Harada and Masashi Kimura</u> (PD)	Effect of a weak electromagnetic field on particle acceleration by a rotating black hole	Phys. Rev. D 85	2012	104028
81	※	<u>宮本雲平</u> (PD)	ブラックホールと流体不安定性	ながれ(日本流体力学学会誌) 35	2012	397--406
82*	※	<u>T. Harada, H. Nemoto, and U. Miyamoto</u> (PD)	Upper limits of particle emission from high-energy collision and reaction near a maximally rotating Kerr black hole	Phys. Rev. D 86 Erratum: Phys Rev. D 86	2012	024027, pp. 1--10 069902(E), p. 1
83	※	<u>U. Miyamoto and S. Yahikozawa</u>	Information metric from a linear sigma model	Phys. Rev.E 84	2012	051133, pp. 1--3
84*	※	<u>U. Miyamoto</u> (PD)	Instability of Compressible Drops and Jets	J. of Fluid Mechanics 700	2012	441--458
85*		<u>Motoyuki Saijo, Ian Hawke</u>	Collapse of a differentially rotating supermassive star to a supermassive black hole	Proceedings of the Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity	2012	801 - 803
86*	※	<u>Motoyuki Saijo</u>	Dynamical Approaches for Secular Instabilities in Rotating Stars	Proceedings of the Twentyfirst Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	2012	104 - 107
87		<u>Motoyuki Saijo, Ian Hawke</u>	Collapse of a differentially rotating supermassive star to a supermassive black hole	Proceedings of the Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity	2012	801-803
88	※	T.Suda et al.(栗田:17人中 8番目)	Nuclear Physics at the SCRIT Electron Scattering Facility	Prog. Theor. Exp. Phys	2012	03C008
89	※	Y.Togano et al. (栗田:37人中 20番目)	Hindered proton collectivity in 28S: Possible magic number at Z=16	Phys.Rev.Lett. 108	2012	222501

90*	※	S. Matoba, R. Takahashi, C. Io, T. Koizumi and H. Shiromaru	Absolute Detection Efficiency of a High-Sensitivity Microchannel Plate with Tapered Pores	Jpn J. Appl. Phys. 50	2011	112201(4pp)
91*	※	<u>Tanaka, H</u>	NLL Order Contributions for Exclusive Processes in the Jet-Calculus Scheme	Prog. Theor. Phys. 126	2011	885-901
92	※	<u>Murakami, Hiroshi;</u> <u>Kitamoto, Shunji;</u> Kawachi, Akiko; Nakamori, Takeshi	Detection of X-Ray Emission from the Unidentified TeV Gamma-Ray Source TeV J2032+4130	Publ. Astron.Soc. Jpn. 63S	2011	873-878
93	※	<u>Kitamoto, S.;</u> <u>Murakami, H.;</u> Takei, D.; Sakata, K.; Yoshida, Y.	A new x-ray interferometer	Proc. of SPIE 8147	2011	E57K(9pp)
94	※	Suzuki, S., M. Tsutsumi, S. E. Palo, Y. Ebihara, M. <u>Taguchi</u> , and M. Ejiri	Short-period gravity waves and ripples in the South Pole mesosphere	J. Geophys. Res., 116	2011	D19109, doi:10.1029/ /
95	※	Fukuhara, T.et al. (M. <u>Taguchi</u> 14人中2番目)	LIR: Longwave Infrared Camera onboard the Venus Orbiter Akatsuki	Earth Planets Space, 63	2011	1009-1018, doi:10.5047/ /
96	※	Murakami, G. et al. (S. <u>Kameda</u> 11人中5番目、 <u>M. Taguchi</u> 11人中7番目)	Image of the cold plasmas around the Earth observed by Telescope of Extreme Ultraviolet (TEX) onboard KAGUYA: Geoscience from the Moon,	Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 8	2011	pp. Tn_23-Tn_28
97	※	Y.Togano, <u>K.Ieki</u> 他 35名	Experimental Investigation of the Stellar Reaction $30S(p, \gamma)31Cl$ via Coulomb Dissociation	J.Phys. Conf Ser. 312	2011	42025
98	※	Y.Togano, <u>K.Ieki</u> 他 42名	Resonance states in ^{27}P using Coulomb dissociation and their effect on the stellar reaction reaction $^{26}Si(p, \gamma)^{27}P$	Phys.Rev.C. 84	2011	35808
99	※	A. Adare et al. (栗田:388人中183番目)	Measurements of Higher-Order Flow Harmonics in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV	Phys. Rev. Lett. 107	2011	252301
100*	※	<u>Tomohiro Harada and Masashi Kimura</u>	Collision of an object in the transition from adiabatic inspiral to plunge around a Kerr black hole	Phys. Rev. D84	2011	124032
101	※	<u>J. Murata</u> et. al.	Test of Time Reversal Symmetry using polarized 8Li at TRIUMF-ISAC	J. Phy. Conf. Ser. 312	2011	102011
102	※	J. Onishi, <u>J. Murata</u> et. al.	Electron Transverse Polarimeter for the MTV experiment at TRIUMF	J. Phy. Conf. Ser. 312	2011	102012
103*	※	<u>U. Miyamoto (PD), H. Nemoto,</u> and M. Shimano	Naked Singularity Explosion in Higher Dimensions	Phys. Rev. D 84	2011	064045 pp.1-9

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

104	※	Seiji Kawamura, Tomohiro Harada et al.	The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO	Classical and Quantum Gravity 28	2011	0904011/ 1 -- 12
105	※	Masaki Yoshida, Shunji Kitamoto, and Hiroshi Murakami	Observation of the Cygnus OB2 Association with Suzaku and Long Term Light Curves	Publ. Astron. Soc. Jpn, 63	2011	S717-728
106	※	D. Takei, J.-U. Ness, M. Tsujimoto, S. Kitamoto, J. J. Drake, J. P. Osborne, H. Takahashi, K. Kinugasa	X-ray Study of Rekindled Accretion in the Classical Nova V2491 Cygni	Publ. Astron. Soc. Jpn, 62	2011	S729-738
107*	※	Tomohiro Harada and Masashi Kimura (PD)	Collision of an innermost stable circular orbit particle around a Kerr black hole	Phys. Rev. D83	2011	024002 (11pp)
108	※	Tomohiro Harada and Masashi Kimura	Collision of two general geodesic particles around a Kerr black hole	Phys. Rev. D83	2011	084041 (9pp)
109	※	Seiji Kawamura et al. (原田: 31th among 145 authors)	The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO	Class. Quantum Grav. 28	2011	094011 (12pp)
110	※	Tomo Tanaka, Fumitoshi Amemiya, Masahiro Shimano, Tomohiro Harada and Takashi Tamaki,	¥Discretisation parameter and operator ordering in loop quantum cosmology with the cosmo-logical constant	J. Phys. Conf. Ser. 154 ,	2011	104049 (14pp)
111		阿部文雄、原田知広、福江純	“時空のトンネル” は実在するか？	ニュートン2011 年4月号	2011	18
122	※	U. Miyamoto (PD), H. Nemoto, M. Shimano	Particle Creation by Naked Singularities in Higher Dimensions	Phys. Rev. D 83	2011	084054 (8pp)
113*		U. Miyamoto (PD)	Minimal surfaces in flat and curved spacetimes of any dimensionality	Proceedings of the 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	2011	231-234
114	※	U. Miyamoto (PD)	On Cpsmic Censor in High-Energy Particle Collisions	J. Phy. Conf. Ser. 314	2011	12123
115*	※	宮本雲平 (PD)	流体力学で高次元ブラックホールを理解する	日本物理学会誌 66	2011	610-613
116*	※	Motoyuki Saijo	Rapidly Rotating Dynamic Black Holes through Gravitational Collapse: Analysis of the multipole moment of the curvatures on the horizon	Physical Review D83	2011	124031/1-12
117	※	Seiji Kawamura, Tomohiro Harada et al	The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO	Classical and Quantum Gravity 27	2011	094011 / 1 - 12
118*		Motoyuki Saijo	Rapidly Rotating Dynamic Black Holes through Gravitational Collapse	Proceedings of the Twentieth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	2011	331 -- 335
119	※	Jiro Murata et. al.	Test of Time Reversal Symmetry using polarized 8Li at TRIUMF-ISAC	J. Phys. Conf. Ser. 312	2011	102011(6page)
120	※	J. Onishi, Jiro Murata et. al.	Electron Transverse Polarimeter for the MTV experiment at TRIUMF	J. Phys. Conf. Ser. 312	2011	102012(6page)

121*	※	Yoichi Chizaki, <u>Shigeaki Yahikozawa</u>	Low Energy Action of“Covariant”Superstring Field Theory in the NSNS pp -Wave Background	Int. J. Modern Phys. A. 26	2011	809-848
122*	※	<u>T.Kuroki</u> , A.Miwa, S.Okuda	Deformation of half-BPS solution in ABJM model and instability of supermembrane	JHEP 1105	2011	11
123*	※	<u>T.Kuroki</u> , F.Sugino	Spontaneous supersymmetry breaking in matrix models from the viewpoints of localization and Nicolai mapping	Nucl. Phys. B 844	2011	409
124	※	<u>T. Koizumi</u>	One-electron capture reactions between Kr^{2+} ions and molecules in the sub-thermal energy region.	Phys. Scr. T 143	2011	014019 (3pp)
125*	※	H. Kubotera, T. Sekitsuka, S. Jinno, <u>T. Tachibana</u> and <u>T. Hirayama</u>	Surface-sensitive measurements of excitonic processes in rare gas clusters by electron energy loss spectroscopy	J. Phys. Conf. Ser. 288	2011	012012 (6pp)
126*	※	S. Jinno, T. Isozaki, I. Naemura, <u>T. Koizumi</u> , and <u>T. Hirayama</u> ,	Temperature Effect of Ion Desorption Dynamics from Solid Ne by Low-Energy Ion Impact	Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B269	2011	1007-10
127*		Sasagawa,S; <u>Tanaka, H</u>	Spectral Functions at finite temperature and chemical potential	arXiv:1105.1423	2011	1-8
128	※	<u>Kitamoto, Shunji</u> ; <u>Murakami, Hiroshi</u> ; 他11名	X-ray polarimeter with a transmission multilayer	Review of Scientific Instruments, Volume 81	2010	023105-5
129	※	Morii, Mikio; <u>Kitamoto, Shunji</u> ; Shibazaki, Noriaki; 他7名	Suzaku Observation of the Anomalous X-Ray Pulsar 1E 1841-045	Publications of the Astronomical Society of Japan. 62	2010	1249-1259
130*	※	<u>Murakami, Hiroshi</u> ; <u>Kitamoto, Shunji</u>	Suzaku observation of TeV J2032+4130	AIP Conference Proceedings, Vol. 1248	2010	41-42
131	※	T. Enoto, N. Rea, Y. E. Nakagawa, K. Makishima, <u>H. Murakami</u> (<u>北本</u> :12番目) 他15名,	Wide-band Suzaku Analysis of the Persistent Emission from SGR 0501+4516 During the 2008 Outburst	Astrophysical Journal, Vol. 715	2010	665-670
132*	※	Rohta Takahashi and <u>Tomohiro Harada</u> ,	Observational Testability of Kerr bound in X-ray Spectrum of Black-Hole Candidates	Class. Quant. Grav. 27	2010	075003 (21pp)
133	※	Masaki Ando et al. (<u>原田</u> : 28th among 140 authors)	DECIGO and DECIGO pathfinder	Class. Quant. Grav. 27	2010	084010 (10pp)
134*	※	Cosimo Bambi, <u>Tomohiro Harada</u> , Rohta Takahashi and Naoki Yoshida	Outflows from accreting super-spinars	Phys. Rev. D 81	2010	104004 (12pp)
135	※	B.J. Carr, <u>Tomohiro Harada</u> and <u>Hideki Maeda</u>	Can a primordial black hole or wormhole grow as fast as the universe?	Class. Quant. Grav. 27	2010	183101 (28pp)

136	※	Ken-ichi Nakao, Tomohiro Harada and Umpei Miyamoto(PD)	Visible borders of spacetime generated by high-energy collisions	Phys. Rev. D82	2010	121501(R) (4pp)
137	※	Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto(PD) and Naoki Tsukamoto	Uniqueness of static spherically symmetric vacuum solutions in the IR limit of Horava-Lifshitz gravity	Int. J. Mod. Phys. D20	2010	111-118 (8pp)
138*	※	U. Miyamoto(PD)	One-Dimensional Approximation of Viscous Flows	JHEP 1010	2010	011(18pp)
139	※	Masaaki Ando et al.(140人中 27 番目 Harada, T.110 番目 Saijo.M.)	DECIGO and DECIGO pathfinder	Classical and Quantum Gravity 27	2010	084010 / 1 - 10
140		Motoyuki Saijo	Formation of Rapidly Rotating Dynamic Black Holes	Proceedings of the Nineteenth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	2010	299 - 302
141	※	T. Murakami, Jiro Murata et. al.	Pi-/Pi+ Ratio observed in the Central Collisions of $^{115}\text{In}+^{132}\text{Xe}$ reaction at 400A MeV	Nucl. Phys. A	2010	593
142	※	T.Kuroki, F.Sugino	Spontaneous supersymmetry breaking in large-N matrix models with slowly varying potential	Nucl. Phys. B 830	2010	434
143*	※	S. Matoba, T. Koizumi, T.M. Kojima, and H. Tanuma	Mobility of a Li ⁺ ion attached to 2-butanol in He gas	J. Phys. Conference Series. 204	2010	012008 (4pp)
144*	※	K. Fukai, S. Fujita, T. Tachibana, T. Koizumi and T. Hirayama,	Potential sputtering of ionic species from rare gas solids by multiply charged ion impact	J. Phys. Cond. Matt. 22	2010	084007 (4pp)
145*	※	T. Tachibana, K. Fukai, T. Koizumi and T. Hirayama	Desorption of cluster ions from solid Ne by low energy ion impact	J. Phys. Cond. Matt. 22	2010	475002 (5pp)
146	※	K. Edamoto, H. Inomata, K. Ozawa, Y. Nakagawa, K. Asakura, S. Otani	Electronic structure of Ni ₂ P(10 0) surface: Angle-resolved photoemission study	Solid State Commun 150	2010	1120-1123
147	※	枝元一之、猪俣裕幸、安野信行、小澤健一、中川雄太、朝倉清高、大谷茂樹	Ni ₂ P(10-10)単結晶表面の角度分解・共鳴光電子分光	表面科学 31	2010	324-330
148	※	A. Adare et al.(栗田:388人中 183 番目)	Double Helicity Dependence of Jet Properties from Dihadrons in Longitudinally Polarized p+p Collisions at $s^{*}(1/2) = 200\text{-GeV}$	Phys. Rev. D81	2010	12002(10pp)
149	※	A. Adare et al. (栗田:388人中 183 番目)	Detailed measurement of the e ⁺ e ⁻ pair continuum in p+p and Au+Au collisions at $s(\text{NN})^{*}(1/2) = 200\text{-GeV}$ and implications for direct photon production	Phys. Rev. C81	2010	34911(56pp)
150	※	A. Adare et al.(栗田:388人中 183 番目)	Transverse momentum dependence of J/psi polarization at midrapidity in p+p collisions at $s^{*}(1/2) = 200\text{-GeV}$	Phys. Rev. D82	2010	12001(17pp)

151	※	T.Murakami, S.Ebesu, K.Ieki, Y.Ikeda, H.Kawamura, J.Murata, et al	π^-/π^+ Ratio Observed in the Central Collisions of $^{115}\text{In}+^{136}\text{Xe}$ Reaction at 400A MeV	Nucl.Phys. A834	2010	593c
152	※	T.Ohnishi, T.Kubo, et al. (家城:28 番目)	Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a ^{238}U Beam at 345 MeV/nucleon	J.Phys.Soc.Jpn. 79	2010	73201
153	※	X.Y.Sun, J.G.Chen, et al. (家城:22 番目)	Measurement of the proton-proton correlation function from the break-up of ^{22}Mg and ^{20}Ne	Int.J.Mod.Phys. E19 ,	2010	1823
154	※	P.Zhou, D.Q.Fang, et al. (家城:22 番目)	Measurement of two-proton correlation from the break-up of ^{23}Al	Int. J. Mod. Phys. E19	2010	957
155*	※	Sasagawa,S; Tanaka, H	Numerical Calculation of Schwinger Dyson Equation with Momentum-Dependent Gauge function for Finite Temperature	Prog. Theor. Phys. 123	2010	533-545
156*	※	Matsuzaki, A; Tanaka, H	A New Proposal for Neutrino Mass and [Vud] Measurements	Prog. Theor. Phys. 123	2010	1003-1012
157	※	K. Tanaka et al. (本林:37 人中24番目)	Observation of a large reaction cross section in the drip-line nucleus ^{22}C .	Phys.Rev.Lett., 104	2010	62701
158	※	T. Motobayashi	RIKEN RI Beam Factory - recent results and perspectives	Nuclear Physics A, 834	2010	707c
159	※	P. Doornenbal et al. (本林:16人中12番目)	Exploring the 'island of inversion' by in-beam g -ray spectroscopy of the neutron-rich sodium isotopes $^{31,32,33}\text{Na}$.	Phys.Rev. C, 81	2010	41305
160	※	Y. Kondo et al. (本林:30 人中16番目)	Low-lying intruder state of the unbound nucleus ^{13}Be .	Phys.Lett. B, 690	2010	245
161	※	N. Aoi et al. (本林:22人中15番目)	Enhanced collectivity in ^{74}Ni .	Phys.Lett. B, 692	2010	302
162	※	Z. Elekes et al. (本林:23 人中13番目)	Nuclear structure study of $^{19,21}\text{N}$ nuclei by spectroscopy.	Phys.Rev. C, 82	2010	27305
163*	※	T.Ohnishi, T.Kubo, K. Ieki 他	Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a ^{238}U beam at 345 Mev/nucleon	J. Phys. Soc. of Jpn 79	2010	73201
164*	※	Taketani et al.(栗田:36 番目中 20 番目) 他	Silicon vertex tracker for RHIC PHENIX experiment.	Nucl.Instrum.Meth.A623	2010	374-376
165	※	Shuichi Sato et al. (原田: 31st among 135 authors)	DECIGO: The Japanese space gravitational wave antenna	J. Phys. Conf. Ser. 154	2009	12040
166	※	Tomohiro Harada,	Self-similar black holes in an accelerated universe	Physics and Mathematics of Gravitation: the Proceedings of the Spanish Relativity Meeting 2008, 15 - 19, Sep 2008, Salamanca, Spain	2009	288-291
167	※	Tomohiro Harada,	Singularities and self-similarity in gravitational collapse	Advanced Studies in Pure Mathematics 55	2009	15-30

168	※	<u>Tomohiro Harada</u> , Ken-ichi Nakao and Brien C. Nolan	Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry	Phys. Rev. D80 , Erratum-ibid. D80	2009	24025 109903
169	※	Ken-ichi Nakao, <u>Tomohiro Harada</u> , Yasunari Kurita and Yoshiyuki Morisawa	Relativistic Gravitational Collapse of a Cylindrical Shell of Dust II: Settling Down Boundary Condition	Prog. Theor. Phys. 122	2009	521-541
170	※	Masahiro Shimano and <u>Tomohiro Harada</u>	Observational constraints on a power spectrum from super-in ation in Loop Quantum Cosmology	Phys. Rev. D80	2009	063538 (17pp)
171*	※	Cosimo Bambi, Katherine Freese, <u>Tomohiro Harada</u> , Rohta Takahashi and Naoki Yoshida	Accretion process onto super-spinning objects	Phys. Rev. D80	2009	104023
172	※	K.Hioki, U. Miyamoto(PD), and M. Nozawa	Stability of branes trapped bu d-demensional black holes	Phys. Rev. D 80	2009	pp.1-7
173*	※	<u>Motoyuki Saijo</u> , Ian Hawke	Collapse of differentially rotating supermassive stars: Post black hole formation	Phys.I Rev. D80	2009	064001 / 1 - 17
174	※	Masaaki Ando, <u>Motoyuki Saijo</u> et al.	DECIGO pathfinder	Classical and Quantum Gravity 26	2009	094019 / 1 - 9
175		<u>Motoyuki Saijo</u> , Yasufumi Kojima	Faraday Resonance in Dynamically Bar Unstable Stars	Proceedings of the eighteenth workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	2009	130 - 133
176	※	K. Asahi, <u>J. Murata</u> et. al.	Study of Neutron-Rich Nuclei through static electromagnetic moments	Int. J. Mod. Phys. (E18)	2009	2020
177	※	K. Ninomiya, <u>J. Murata</u> et. al.	Newt Experimental Technique for Short Range Gravity Experiment	J. Phys. Conf. Ser. 189	2009	12019
178	※	M. Hata, <u>J. Murata</u> et. al.	Recent Results on Short Range Gravity Experiment	J. Phys. Conf. Ser. 189	2009	12026
179	※	D. Nagae, <u>J. Murata</u> et. al.	Ground-state electric quadrupole moment of Al-31	Phys. Rev. C (79)	2009	27301
180	※	S. Kawamoto, <u>T. Kuroki</u> , A. Miwa	Boundary condition for a D-brane from the Wilson loop, and gravitational interpretation of an eigenvalue in the matrix model in AdS/CFT correspondence	Phys.Rev. D 79	2009	126010
181	※	<u>T. Koizumi</u> , T. M. Kojima , M. Sano, N. Watanabe	Production of multiply charged ions from the 4d phoroionization of Cs ⁺	J. Phys. Conference Series. 163	2009	012099 (4pp)
182	※	<u>T. Koizumi</u> and Y. Chihara	Absolute detection efficiencies of an ion-counting system with a channel-electron multiplier	J. Phys. Conference Series. 163	2009	012114 (4pp)
183	※	T. Sonoda, S. Kamemoto, <u>T. Hirayama</u> , and <u>T. Koizumi</u>	Energy dependence of multi-electron transfer reactions between slow multi-charged ions and neutral atoms	J. Phys. Conference Series. 194	2009	82040
184*	※	S. Fujita, K. Fukai, <u>T. Tachibana</u> , <u>T. Koizumi</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Absolute sputtering yields from solid Ne by low energy He ⁺ and Arq ⁺ (q = 1- 6) impact,	J. Phys. Conf. Ser. 163	2009	12083

185*	※	H. Kubotera, T. Sekitsuka, S. Sakai, T. Tachibana and T. Hirayama,	Electronic excitation processes in rare gas clusters studied by electron energy loss spectroscopy	Appl. Surf. Sci. 256	2009	1046-9
186*	※	掛札洋平; 米田忠弘	カーボンナノチューブの自己組織化によるストライプ構造形成	表面科学 30	2009	503-506
187	※	T. Shimada, K. Imamura, K. Edamoto, and H. Orita	Electronic structures of the suboxide films formed on TiC(100) and ZrC(100) surfaces: Density functional theory studies	Surf. Sci. 603	2009	2340-2344
188	※	K. Edamoto, H. Inomata, T. Shimada, K. Ozawa, S. Otani	Valence and core-level photoelectron spectroscopy study of the electronic structure of Ni ₂ P(0001)	e-J. Surf. Sci. Nanotech. 7	2009	1月6日 p1-6
189	※	K. Imamura, H. Kaneko, K. Ozawa, K. Edamoto	A theoretical study of O/Ti co-adsorption on Ag(100)	e-J. Surf. Sci. Nanotech.	2009	7月12日 p7-16
190	※	K. Ozawa, Y. Oba, K. Edamoto, M. Higashiguchi, Y. Miura, K. Tanaka, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi	Valence-band structure of the polar ZnO surfaces studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy	Phys. Rev. B79	2009	07514 1-7
191	※	K. Ozawa, Y. Oba, K. Edamoto,	Formation and characterization of the Cu ₂ O overlayer on Zn-terminated ZnO(0001)	Surf. Sci. 603	2009	2163-2170.
192	※	A. Adare et al. (栗田:388人中183番目)	The Polarized gluon contribution to the proton spin from the double helicity asymmetry in inclusive pi ⁰ production in polarized p + p collisions at s ^{1/2} = 200-GeV	Phys. Rev. Lett. 103	2009	12003(6pp)
193	※	A. Adare et al.(栗田:388人中183番目)	Inclusive cross section and double helicity asymmetry for pi ⁰ production in p+p collisions at sqrt(s) = 62.4 GeV	Phys. Rev. D79	2009	12003(10pp)
194	※	N. Aoi et al.(栗田:37人中19番目)	Development of Large Deformation in Cr-62	Phys. Rev. Lett. 102	2009	12502(4pp)
195	※	S. Afanasiev et al.(栗田:342人中166番目)	Photoproduction of J/psi and of high mass e+e- in ultra-peripheral Au+Au collisions at s ^{1/2} = 200-GeV	Phys. Lett. B679	2009	321-329
196	※	A. Adare et al.(栗田:388人中183番目)	Photon-Hadron Jet Correlations in p+p and Au+Au Collisions at s ^{1/2} = 200-GeV	Phys. Rev. C80	2009	24908(14pp)
197	※	A. Adare et al.(栗田:388人中183番目)	Measurement of Bottom versus Charm as a Function of Transverse Momentum with Electron-Hadron Correlations in p+p Collisions at sqrt(s)=200 GeV.	Phys. Rev. Lett. 103	2009	82002(6pp)
198	※	S. Afanasiev et al.(栗田:342人中166番目)	Kaon interferometric probes of space-time evolution in Au+Au collisions at s(NN) ^{1/2} = 200-GeV	Phys. Rev. Lett. 103	2009	142301(6pp)
199	※	S. Afanasiev et al.(栗田:342人中166番目)	High-pT pi ⁰ Production with Respect to the Reaction Plane in Au +Au Collisions at s(NN) ^{1/2} = 200-GeV	Phys. Rev. C80	2009	54907(35pp)

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

200	※	T. Suda et al.(栗田:13人中6番目)	First Demonstration of Electron Scattering Using a Novel Target Developed for Short-Lived Nuclei	Phys. Rev. Lett. 102	2009	102501(4pp)
201	※	S. Afanasiev et al.(栗田:342人中166番目)	Systematic Studies of Elliptic Flow Measurements in Au+Au Collisions at $s^{*}(1/2) = 200$ -GeV	Phys. Rev. C80	2009	24909(27pp)
202	※	N. Imai et al.(栗田:40人中24番目)	First lifetime measurement of 2+(1) state in Be-12.	Phys. Lett. B673	2009	179-182
203	※	Hoi Jin Ong et al.(栗田:23人中20番目)	Anomalously hindered E_2 strengths in C-16,18	Int. J. Mod. Phys. A24	2009	2168-2174
204	※	S. Takeuchi et al.(栗田:32人中16番目)	Low-lying states in Mg-32 studied by proton inelastic scattering	Phys. Rev. C79	2009	54319(11pp)
205	※	Y. Onuki et al.(栗田:18人中10番目)	Assembly procedure for the silicon pixel ladder for PHENIX silicon vertex tracker	Nucl. Instrum. Meth. A606	2009	395-403
206	※	N.Aoi, E.Takeshita, 他(家城:12番目)	Development of Large Deformation in ^{62}Cr	Phys.Rev.Lett. 102	2009	12502
207	※	S. Takeuchi, N. Aoi, T. Motobayashi, et al.	Low-lying states in ^{32}Mg studied by proton inelastic scattering.	Phys.Rev. C, Vol. 79	2009	54319
208	※	P. Doornenbal et al (本林:54人中31番目)	Spectroscopy of ^{32}Ne and the 'island of inversion'	Phys.Rev.Lett., Vol. 103	2009	32501
209	※	T. Nakamura et al. (本林:38人中17番目)	Halo structure of the island of inversion nucleus ^{31}Ne .	Phys.Rev.Lett., Vol. 103	2009	262501

<図書>

図書名、著者名、出版社名、総ページ数、発行年(西暦)について記入してください(左記の項目が網羅されていれば、項目の順序を入れ替えても可)。また、現在から発表年次順に遡り、通し番号を付してください。

<学会発表>

No.	発表者氏名	発表標題	学会名	開催地	発表年月
1	T.Creutzig, 疋田泰章, P.B.Rønne	Extended higher spin holography and Grassmannian models	日本物理学会第 69 回年会,	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
2	伴啓佑, 仁平雄太, 住田厚美, 立花隆行, 平山孝人	多価イオン衝撃による希ガス固体からのイオン脱離機構,	日本物理学会第 69 回年会,	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
3	佐和弘祥, 小西達也, 立花隆行, 平山孝人	光電効果を利用した低エネルギー電子銃の開発,	日本物理学会第 69 回年会,	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
4	宝利剛, 安井幸則	An upper bound on the number of conformal Killing-Yano tensors	日本物理学会第 69 回年会,	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
5	田沼良介, 村田次郎他	CDCを用いた時間反転対称性の破れ探索実験(MTV 実験 Run-V)の報告	日本物理学会第 69 回年会	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
6	鳥倉優人他(栗田グループの発表)	SCRIT 電子散乱実験における反跳核検出器の開発	日本物理学会第 69 回年会	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
7	吉田徹, 小林進悟, 内堀幸夫, 栗田和好	原子力災害におけるセシウム可視化イメージングカメラの開発	日本物理学会第 69 回年会	東海大学湘南キャンパス	2014年3月
8	木村哲士	Exotic five-brane	YITP molecule-type workshop on Exotic Structures of Spacetime	京都大学基礎物理学研究所	2014年3月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

9	Saki Tanaka, <u>Jiro Murata</u> et. al.	Search of strong gravitational field at atomic scale	7th International conference on Fundamental Physics using Atom (FPUA2014)	日本科学未来館	2014年3月
10	鈴木大朗, <u>北本俊二</u>	HXD/GSO のバックグラウンドの新しい評価	2014年度春 日本天文学会	国際キリスト教大学	2014年3月
11	小川修三, <u>北本俊二</u> , 星野晶夫, 瀬田裕美, 他	X線干渉計で使う反射鏡と半透膜の特性評価	2014年度春 日本天文学会	国際キリスト教大学	2014年3月
12	杉本樹梨, 三原建弘, 松岡勝, 根来均, <u>北本俊二</u> , 橋優太郎, 他 MAXI チーム	MAXIによるCygnus X-1のハード状態, ソフト状態のパワースペクトル	2014年度春 日本天文学会	国際キリスト教大学	2014年3月
13*	<u>Shunji Kitamoto</u> (invited)	Challenge to High Precision X-ray Telescopes for Astronomical Usage	International Workshop on Atomically Controlled Fabrication Technology	Nakanoshima Center Osaka University, Osaka	2014年2月
14	<u>前田秀基</u>	Throat quantization of the Schwarzschild-Tangherlini(-AdS) Black Hole	特異点研究会	茨城大学	2014年1月
15	<u>疋田泰章</u>	W-algebra and higher spin gauge theory	研究集会「頂点作用素代数と超弦理論」	立教大学	2014年1月
16	<u>小林努</u>	The most general second-order scalar-tensor theory	第2回観測的宇宙論ワークショップ	国立天文台	2013年12月
17	<u>Tomohiro Harada</u>	Analytic formula for the threshold of primordial black hole formation'	The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Hirosaki University, Hirosaki, Japan.	2013年11月
18	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Hordeski's theory: a unified description of modified gravity	JGRG23	弘前大学	2013年11月
19	<u>木村哲士</u>	GLSM of exotic five-brane, and more	International Workshop on Theoretical Particle Physics 2013	京都府天橋立荘	2013年11月
20	<u>T. Hirayama</u> , T. Konishi, and T. Tachibana,	Development of a low energy electron beam source using the photoelectric effect,	19th International Vacuum Congress (IVC-19) / 15th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-15)	Paris, France	2013年9月
21	K. Ban, M. Akiwa, K. Koganei, M. Murakami, T. Tachibana, <u>T. Koizumi</u> , and <u>T. Hirayama</u>	Potential Sputtering from Rare Gas Solid by Low Energy Multiply-Charged Ion Impact)	19th International Vacuum Congress (IVC-19) / 15th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-15)	Paris, France	2013年9月
22	D. Miura, T. Tachibana, and <u>T. Hirayama</u> ,	Evolution of electronic excitation states in Ar clusters from surface to bulk properties,	19th International Vacuum Congress (IVC-19) / 15th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-15)	Paris, France	2013年9月
23	岩瀬あづさ, <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,	日本物理学会 2013年秋季大会	徳島大学	2013年9月
24*	伴啓佑, 仁平雄太, 住田厚美, <u>立花隆行</u> , <u>平山孝人</u>	低速多価イオンと希ガス固体の衝突による脱離過程の研究,	日本物理学会 2013年秋季大会	徳島大学	2013年9月
25	<u>木村哲士</u>	Gauged linear sigma model for exotic five-brane	日本物理学会 2013年秋季大会	高知大学朝倉キャンパス	2013年9月
26	田中佐季, <u>村田次郎</u> 他	原子核スケールにおける万有引力の法則の検証実験 II	日本物理学会 2013年秋季大会	高知大学朝倉キャンパス	2013年9月
27	村上遥菜, <u>村田次郎</u> 他	ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験 VIII	日本物理学会 2013年秋季大会	高知大学朝倉キャンパス	2013年9月
28	<u>原田知広</u> , Sanjay Jhingan	Einstein-Rosen 波に対する繰り込み群的アプローチ	日本物理学会 2013年秋季大会	高知大学朝倉キャンパス	2013年9月
29	<u>小林努</u> , 棚橋典大, 山口昌英	Multi-field G-inflation	日本物理学会 2013年秋季大会	高知大学朝倉キャンパス	2013年9月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

30	木村哲士	Gauged linear sigma model for exotic five-brane	基研研究会「場の理論と弦理論」	京都大学基礎物理学研究所	2013年8月
31	K. Wada, T. Tachibana, T. Hirayama, et al.	Materials Science at the KEK Slow Positron Facility,	Light and particle beams in materials science 2013 (LPBMS2013)	Tsukuba, Japan	2013年8月
32	K. Wada, T. Tachibana, T. Hirayama, et al.	Recent Developments and Results of the KEK Slow Positron Facility,	The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)	Chiba, Japan	2013年7月
33	和田健, 立花隆行, 平山孝人, 他	KEK 低速陽電子実験施設の現状 — 新ビームライン分岐と実験ステーションの再配置,	第50回アイソトープ・放射線研究発表会	東京大学	2013年7月
34	Tetsuji Kimura	Gauged linear sigma model for exotic five-brane	KIAS-YITP Joint Workshop 2013	京都大学基礎物理学研究所	2013年7月
35	Saki Tanaka, Jiro Murata et. al.	MTV/MTV-G experiment at TRIUMF Search of T-Violation and gravity signal at nuclear scale	The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)	幕張	2013年7月
36	R. Tanuma, J. Murata et. al.	Report of the next generation TRIUMF-MTV experiment Run-IV using Cylindrical Drift Chamber	The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)	幕張	2013年7月
37	Tsutomu Kobayashi	Cosmology of Generalized Galileons,	GR20/Amaldi10	ワルシャワ, ポーランド	2013年7月
38	Tomohiro Harada	UPPER LIMITS OF PARTICLE EMISSION FROM HIGH-ENERGY COLLISION ANDREACTION NEAR A MAXIMALLY ROTATING KERR BLACK HOLE	the 20th GR and 10th Amaldi Conference on Gravitational Waves,	University of Warsaw, Warsaw, Poland.	2013年7月
39*	M. Matsushita et al. (T. Motobayashi, 44人中32番目)	In-beam γ -ray spectroscopy of $^{38,40,42}\text{Si}$	International Nuclear Physics Conference (INPC2013)	Firenze, Italy	2013年6月
40*	Jiro Murata et. al.	T-Violation experiment at TRIUMF-ISAC using polarized ^8Li	International Nuclear Physics Conference (INPC2013)	Firenze, Italy	2013年6月
41	Saki Tanaka, J. Murata et. al.	Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin Geodetic precession	International Nuclear Physics Conference (INPC2013)	Firenze, Italy	2013年6月
42	亀田真吾, 奥村裕, 長勇一郎, 関根康人, 三浦弥生, 杉田精司	真空紫外 LIBS によるその場年代測定	日本地球惑星科学連合大会 2013	幕張メッセ	2013年5月
43	Tsutomu Kobayash	Vainshtein mechanism in Horndeski's general scalar-tensor theory (and in massive gravity)	Mini-workshop "Massive gravity and its cosmological implications"	IPMU, 柏	2013年4月
44	Xian Gao, 小林 努, 白石希典, 山口昌英, 横山順一, 横山修一郎	Full bispectra from primordial scalar and tensor perturbations in the most general single-field inflation model	日本物理学会年次大会	広島大学, 東広島市	2013年3月
45	志賀慶明, 家城和夫, 本林透	An attempt toward position-sensitive gamma detectors and Tests of LaBr_3 in a RIBF experiment	ワークショップ"Development of methods for gamma-ray measurements in nuclear structure studies with new-generation RI Beam"	クラクフ(ポーランド)	2013年3月
46*	Motoyuki Saijo	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars: Current quadrupole effect	1st Annual Symposium on New Developments in Astrophysics Through Multi-Messenger Observations of Gravitational Wave Sources	Osaka, Japan	2013年3月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

47	齋藤和幸、高橋果林、的場史朗、小泉哲夫、小島隆夫、田沼肇、城丸春夫	混合気体中における Li ⁺ -(2-butanol)イオンの移動度 II	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
48	戸塚祐実、村田次郎 他	時間反転対称性の破れ探索・TRIUMF-MTV 実験 Run-II の結果報告	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
49	田沼良介、村田次郎 他	CDC を用いた次世代 TRIUMF-MTV 開発実験 Run-IV の報告	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
50	岸礼子、村田次郎 他	ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験 VII	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
51	秋和正樹、伴啓佑、小金井寿人、村上慎、立花隆行、小泉哲夫、平山孝人	低速多価イオン衝撃による希ガス固体からの絶対脱離収率の測定	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
52	小西達、立花隆行、平山孝人	光電効果を利用した低エネルギー電子銃の開発	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
53*	西條 統之	回転星の r モード不安定性の非線形効果: 3.5PN の重力波放射を取り入れた場合	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
54	詫間晃、栗田和好、黒川明子、竹谷篤、村上浩之、田中真伸	不安定核分解反応測定のための広ダイナミックレンジ増幅回路の開発	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
55	小川原亮 他(栗田グループの発表)	SCRIT 実験におけるイオン捕獲特性	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
56	M.G. Endres, 黒木経秀、鈴木博、杉野文彦	超対称非臨界弦理論における超対称性の自発的破れ	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月
57	原田知広、Bernard J. Carr	分離宇宙条件の一般化へ向けて	日本物理学会第 68 回年次大会	広島大学	2013 年 3 月 2 日
58	木村哲士	Three Exotica	理研研究会「エキゾチック時空幾何とその応用」	理化学研究所仁科キャンパス	2013 年 2 月
59	亀田真吾、小林正規、石橋高、並木則行、荒井朋子、長男一郎、奥村裕、前田憲吾	SELENE-2 月探査ローバ搭載に向けた元素分析装置 LIBS の検討状況	第 11 回宇宙科学シンポジウム	JAXA 相模原キャンパス	2013 年 1 月
60	藤井 舞、田口 真、川原琢也	火星散逸大気の D/H 比観測	第 11 回宇宙科学シンポジウム	JAXA 相模原キャンパス	2013 年 1 月
61*	Motoyuki Saijo	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars	26th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics	Sao paulo, Brazil	2012 年 12 月
62	志賀慶明、家城和夫	インビームガンマ線核分光のための MPPC と光電子増倍管を用いた位置有感型検出器の開発	第 4 回次世代光センサーワークショップ	大阪大学	2012 年 12 月
63*	S. Takeuchi et al. (T. Motobayashi, 9 人中 2 番目)	DALI2: A NaI(Tl) detector array for measurements of γ -rays from fast-moving unstable nuclei	EMIS 2012	Matue, Japan	2012 年 12 月
64	R.Ogawara et al (Kurita, K グループの発表)	Test Experiment of the SCRIT using ¹³² Xe Isotopes produced by the ERIS	EMIS 2012	Matue, Japan	2012 年 12 月
65	Tomohiro Harada	High-velocity collision of particles around a Kerr black hole and its implication	Nishinomiya Yukawa Symposium: New Waves in Gravity and Cosmology	Kyoto University, Kyoto, Japan	2012 年 12 月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

66	<u>Tomohiro Harada</u>	High-velocity collision of particles around a Kerr black hole and its implication", , , ,	Gravity and Cosmology 2012	Kyoto University, Kyoto, Japan	2012年11月
67	<u>Tomohiro Harada</u>	Upper limits of particle emission from high-energy collision and reaction near a maximally rotating Kerr black hole	the RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION ``JGRG22''	University of Tokyo, Tokyo, Japan.	2012年11月
68	Y. Toshuka, <u>J. Murata</u> et. al.	Performance Test of MTV new detector	TRIUMF ISAC Science Forum	TRIUMF, Vancouver	2012年11月
69*	<u>Motoyuki Saijo</u>	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars	RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation	Tokyo, Japan	2012年11月
70	Saki Tanaka, <u>Jiro Murata</u> , et. al.	Search of strong gravitational field around nuclei using electron-nuclear scattering experiment by geodetic precession	RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION	Tokyo	2012年11月
71	Haruna Murakami, <u>Jiro Murata</u> , et. al.	Short-range gravity experiment searching for a large extra dimension	RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION	Tokyo	2012年11月
72*	<u>Motoyuki Saijo</u>	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars	Fifth East Asian Numerical Astrophysics Meeting	Kyoto, Japan	2012年10月
73*	D. Steppenbeck (<u>本林グループの発表</u>)	Investigating the strength of the N=34 subshell closure in 54Ca	ENSNF 2012	Tokyo, Japan	2012年10月
74	A.Takuma, A. Taketani, H. Murakami, <u>K. Kurita</u> , M. Kurokawa, M. Tanaka,	Development of an Amplifier IC with Wide Dynamic Range for Si Detector in RIKEN SAMURAI Spectrometer	IEEE NSS/MRI	Anaheim, CA, USA	2012年10月
75	<u>木村哲士</u>	On static charged black holes in type IIA on a nearly-Kahler coset	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学	2012年9月
76	安井幸則, <u>宝利剛</u>	Conformal Killing-Yano テンソルの次元公式	日本物理学会 2013 年秋季大会	高知大学(朝倉キャンパス)	2012年9月
77	<u>原田知広</u> , <u>宗像裕也</u> , <u>宮本雲平</u>	高速回転ブラックホール付近の高エネルギー粒子衝突による粒子放射に対する上限について	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学	2012年9月
78*	S. Takeuchi (<u>本林グループの発表</u>)	Invited: In-beam gamma-ray spectroscopy of neutron-rich silicon isotopes	VIII TOURS SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS AND ASTROPHYSICS	Lenzkirch-Saig, Germany	2012年9月
79*	Yumi Totsuka, <u>J. Murata</u> et. al.	First Result from the MTV experiment at TRIUMF searching T-Violation in nuclear beta decay	The 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012)	Dubna, Russia	2012年9月
80	Ryosuke Tanuma, <u>J. Murata</u> et. al.	A New FPGA-based Trigger/DAQ system for the MTV experiment at TRIUMF	The 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012)	Dubna, Russia	2012年9月
81	Saki Tanaka, <u>J. Murata</u> et. al.	Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin Geodetic precession	The 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012)	Dubna, Russia	2012年9月
82	<u>志賀慶明</u> , <u>家城和夫</u> , <u>本林透</u>	インビームγ線核分光のための位置有感型γ線検出器の開発	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学	2012年9月
83	<u>村井大地</u> , <u>家城和夫</u> , <u>久保敏幸</u> 他	²³⁸ Uの飛行核分裂によるZ~60領域の中性子過剰核の生成断面積の測定	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学	2012年9月

84	齋藤和幸、高橋果林、藤枝美菜、 <u>小泉哲夫</u> 、 <u>的場史朗</u> 、 <u>小島隆夫</u> 、 <u>田沼肇</u> 、 <u>城丸春夫</u>	混合気体中における $\text{Li}^+(2\text{-Butanol})$ イオンの移動度	日本物理学会 2012 年秋季大会	横浜国立大学	2012 年 9 月
85	Sousuke Moriya, Shiro Matoba, Karin Takahashi, <u>Tetsuo Koizumi</u> , Haruo Shiromaru	ABSOLUTE DETECTION EFFICIENCY OF A HIGH SENSITIVITY MICROCHANNEL PLATE	16th International Conference Physics of Highly Charged Ions	Heidelberg, Germany	2012 年 9 月
86	Yusuke Nakajima, Takumi Kawamura, <u>Tetsuo Koizumi</u>	TRANSFER IONIZATION PROCESSES IN CHARGE TRANSFER REACTIONS BETWEEN SLOW HIGHLY CHARGED IONS AND ATOMS	16th International Conference Physics of Highly Charged Ions	Heidelberg, Germany	2012 年 9 月
87	K Ban, M Akiwa, K Koganei, M Murakami, <u>T Tachibana</u> , <u>T Koizumi</u> , <u>T Hirayama</u>	Potential sputtering from solid Ne by low energy Ar^{q+} ($q = 1 - 6$) impact	The 16th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2012)	Heidelberg, Germany	2012 年 9 月
88	秋和正樹、伴啓佑、小井井寿人、村上慎、 <u>立花隆行</u> 、 <u>小泉哲夫</u> 、 <u>平山孝人</u>	低速 Ar 多価イオン衝撃による Ne 固体からの絶対脱離収率の測定	日本物理学会 2012 年秋季大会	横浜国立大学	2012 年 9 月
89	佐野亮太、三浦大地、 <u>立花隆行</u> 、 <u>平山孝人</u>	電子エネルギー損失分光法による Ar クラスターの電子的励起過程の研究	日本物理学会 2012 年秋季大会	横浜国立大学	2012 年 9 月
90*	<u>西條 統之</u>	回転星の r モード不安定性の非線形効果: ニュートン重力における航空工学的近似を用いた場合	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学, 京都府	2012 年 9 月
91	小川原亮 他、(栗田和好グループの発表)	SAMURAI TPC のための時間同期モニターシステムの開発	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学, 京都府	2012 年 9 月
92	浦野恭輔、竹谷篤、馬場秀忠、磯部忠昭、村上哲也、 <u>栗田和好</u>	SCRIT実験装置を用いたイオン捕獲実験	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学, 京都府	2012 年 9 月
93	<u>小林 努</u> 、 <u>鎌田耕平</u> 、 <u>高橋 智</u> 、 <u>山口昌英</u> 、 <u>横山順一</u>	Generalized Higgs inflation	日本物理学会秋季大会	京都産業大学,	2012 年 9 月
94	<u>黒木経秀</u> 、 <u>杉野文彦</u>	Nonperturbative formulation of covariant noncritical superstring with target space SUSY	日本物理学会 2012 年秋季大会	京都産業大学	2012 年 9 月
95*	S. Takeuchi (本林グループの発表)	Gamma-ray spectroscopy at RIKEN	RIBF ULIC International Symposium on Perspective in Isospin Physics ~Role of non-central interactions in structure and dynamics of unstable nuclei	Wako, Japan	2012 年 8 月
96*	<u>Motoyuki Saijo</u>	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars	Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity	Stockholm, Sweden	2012 年 7 月
97	<u>木村哲士</u>	Embedding tensors, dualities, and auxiliary fields in 4D N=2 supergravity	基研研究会「場の理論と弦理論」	京都大学基礎物理学研究所	2012 年 7 月
98*	的場史朗、守屋宗祐、高橋果林、石川学、 <u>小泉哲夫</u> 、 <u>城丸春夫</u>	高感度マイクロチャンネルプレートの絶対検出効率測定	原子衝突学会第 37 回年会	電気通信大学	2012 年 7 月
99*	齋藤和幸、高橋果林、藤枝美菜、 <u>小泉哲夫</u>	イオン移動度を用いた $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ の異性体識別	原子衝突学会第 37 回年会	電気通信大学	2012 年 7 月

プロジェクト番号

S0901029

100	T. Konishi, S. Jinno, and <u>T.Hirayama</u>	Development of a low energy electron beam source using the photoelectric effect	The 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2011)	Belfast, UK	2012年7月
101	Satoshi Jinno, <u>Tetsuo Koizumi</u> , and <u>Takato Hirayama</u>	Ion photodesorption from solid Ne with a laser plasma vacuum ultraviolet light source	The 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2012)	Belfast, UK	2012年7月
102	<u>岩渕あづさ</u> 、 <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光励起脱離実験装置の開発	原子衝突学会第37回年会	電気通信大学	2012年7月
103	<u>小西達也</u> 、 <u>津野 聡</u> 、 <u>立花隆行</u> 、 <u>平山孝人</u>	光電効果を利用した低速電子銃の開発	原子衝突学会第37回年会	電気通信大学	2012年7月
104	<u>Tsutomu Kobayashi</u>	Vainshtein mechanism in the most general scalar-tensor theory	Nonlinear massive gravity theory and its observational test	YITP, 京都	2012年7月
105	<u>Tomohiro Harada</u> and <u>Masashi Kimura</u>	High-velocity collision of two general geodesic particles around a Kerr black hole	the 13th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories	Stockholm University, Stockholm, Sweden	2012年7月
106	<u>Tomohiro Harada</u> and <u>Masashi Kimura</u>	High-velocity collision of an ISCO particle around a Kerr black hole	the 13th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories,	Stockholm University, Stockholm, Sweden	2012年7月
107*	<u>Saki Tanaka</u> , <u>Jiro Murata</u> , et. al.	MTV-G experiment : probing non-standard strong gravitational	NEB 15 - Recent Developments in Gravity	Crete, Greek	2012年6月
108*	<u>Kazufumi Ninomiya</u> , <u>Jiro Murata</u> et. al.	Short-range Gravity experiment using digital image analysis	NEB 15 - Recent Developments in Gravity	Crete, Greek	2012年6月
109	<u>亀田真吾</u> 、 <u>石橋高</u> 、 <u>小林正規</u> 、 <u>並木則行</u> 、 <u>荒井朋子</u>	月惑星探査ローバ搭載用 LIBS を用いた運用試験	日本地球惑星科学連合大会 2012	幕張メッセ	2012年5月
110	<u>村田次郎</u> 、他	時間反転対称性の破れ探索実験: TRIUMF-MTV 実験 Run-II 及び III の報告	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
111	<u>田中佐季</u> 、 <u>村田次郎</u> 他	MTV-G 実験: 原子核スケールにおける万有引力の法則の検証	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
112*	<u>守屋宗祐</u> 、 <u>的場史朗</u> 、 <u>小泉哲夫</u> 、 <u>城丸春夫</u>	高感度マイクロチャンネルプレートの絶対検出効率測定	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
113	<u>中島雄介</u> 、 <u>川村拓巳</u> 、 <u>小泉哲夫</u>	低速多価イオンと原子の衝突における電荷移行反応	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
114*	<u>齋藤和幸</u> 、 <u>浅川拓磨</u> 、 <u>阿部雅大</u> 、 <u>的場史朗</u> 、 <u>小泉哲夫</u> 、 <u>小島隆夫</u> 、 <u>田沼肇</u> 、 <u>城丸春夫</u>	Li+(2-Butanol) _n クラスターイオンの移動度のクラスターサイズ依存性	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
115*	<u>笹川修司</u> 、 <u>田中秀和</u>	Schwinger-Dyson 方程式によるカイラル相転移と閉じ込め相転移	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月
116*	<u>鎌田翔</u> 、 <u>田中秀和</u>	Two-flavors Gross-Neveu model with Minimal Doubling Fermion and Hermiticity	日本物理学会第67回年次大会	関西学院大学	2012年3月

プロジェクト番号

S0901029

117	志賀慶明、 <u>本林透</u> 、 <u>家城和夫</u>	γ 線分光法のための WLS Fiber を用いた position sensitive scintillator の開発	日本物理学会第 67 回年次大会	関西学院大学	2012 年 3 月
118	村井大地、 <u>家城和夫</u> 、久保敏幸 他	^{238}U から生成される中性子過剰核の生成断面積の測定	日本物理学会第 67 回年次大会	関西学院大学	2012 年 3 月
119	原田知広、木村匡志	重力波放射反作用を考慮したときの天体加速器としての Kerr ブラックホール	日本物理学会第 67 回年次大会	関西学院大学	2012 年 3 月 2 日
120	<u>Tomohiro Harada</u>	High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole	The 7th International Conference on Gravitation and Cosmology	Holiday Inn Goa, Goa, India	2011 年 12 月
121*	S. Takeuchi (<u>本林グループ</u> の発表)	Spectroscopy of ^{42}Si at RIKEN RIBF	ISPUN11 -International Symposium on Physics of Unstable Nuclei-	Hanoi, Vietnam,	2011 年 11 月
122*	<u>田口 真</u> 、川原琢也	火星からの水素散逸過程	第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	神戸大学	2011 年 11 月
123	<u>Tomohiro Harada</u>	High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole	The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	Tohoku University, Sendai, Japan	2011 年 9 月
124	武内聡 (45名中本林11番目)	ノックアウト反応による ^{42}Si 核の研究	日本物理学会 2011 年度秋季大会	弘前大学	2011 年 9 月
125	松下 昌史 (43名中本林11番目)	ノックアウト反応による $^{36,38,40}\text{Si}$ の励起状態の研究	日本物理学会 2011 年度秋季大会	弘前大学	2011 年 9 月
126*	齋藤和幸、浅川拓磨、阿部雅大、 <u>的場史朗</u> 、 <u>小泉哲夫</u> 、小島隆夫、田沼肇	He 気体中における Li^+ -(limonene)クラスターイオンの移動度	日本物理学会 2011 年秋季大会	富山大学	2011 年 9 月
127*	<u>西條 統之</u>	静的な時間スケールにおける動力学: 自転する星の場合	日本物理学会 2011 年秋季大会	弘前大学	2011 年 9 月
128	原田知広、木村匡志	Kerr ブラックホール周りでの一般の測地的二粒子の衝突	日本物理学会 2011 年秋季大会	弘前大学	2011 年 9 月
129	原田知広、木村匡志	Kerr ブラックホール周りでの一般の測地的二粒子の衝突	日本物理学会 2011 年秋季大会	弘前大学	2011 年 9 月
130	<u>U. Miyamoto (PD)</u>	On hydrodynamic description of black-string instability	Black holes and higher dimensions	London	2011 年 9 月
131	Shiro Matoba, Ryota Takahashi, Chiro Ito, <u>Tetsuo Koizumi</u> , and Haruo Shiromaru	Measurement of the absolute sensitivity of a high-sensitivity microchannel plate	XXVII ICPEAC (Belfast)	Belfast, UK	2011 年 8 月
132*	齋藤和幸、浅川拓磨、阿部雅大、 <u>的場史朗</u> 、 <u>小泉哲夫</u>	He 気体中におけるキラル分子クラスターイオンの移動度	原子衝突研究協会第 36 回年会	新潟大学	2011 年 8 月
133*	<u>的場史朗</u> 、 <u>小泉哲夫</u> 、城丸春夫	高感度 MCP の絶対感度測定	原子衝突研究協会第 36 回年会	新潟大学	2011 年 8 月
134*	K. Saito, S. Matoba, <u>T. Koizumi</u> , T. M. Kojima, H. Tanuma and H. Shiromaru	The mobilities of chiral molecular cluster ions in He gas	XXVII ICPEAC (Belfast)	Belfast, UK	2011 年 8 月
135	原田知広	回転ブラックホール付近での粒子の高速衝突	竹原理論物理学研究会	広島大学	2011 年 6 月
136	原田知広、木村匡志	高速回転ブラックホール付近での天体の高速衝突	日本天文学会 2011 年春季年会	筑波大学	2011 年 3 月
137*	<u>村上弘志</u> 、 <u>北本俊二</u> 、竹中恵理、柴田拓磨、吉田正樹、東慶一、武井大	レーザープラズマ光源を使った Xmas 望遠鏡の撮像実験 II	日本天文学会 2011 年春季年会	筑波大学	2011 年 3 月

プロジェクト番号

S0901029

138	大西潤一、 <u>村田次郎他</u>	時間反転対称性の破れ探索を目的とした TRIUMF-MTV 実験 Run-II の報告	日本物理学会 第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
139	二宮一史、 <u>村田次郎他</u>	ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験 IV	日本物理学会 第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
140	戸塚祐実、 <u>村田次郎他</u>	TRIUMF-MTV 実験のための TDC を用いた電荷読み出し方法 (pQTC) の開発	日本物理学会 第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
141	黒木経秀、三輪光嗣、奥田諭史	Membrane stability in ABJM model	日本物理学会 第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
142*	北本俊二、武井大、坂田和也、吉田裕貴、村上弘志	X線干渉計のための光源の開発 II	日本物理学会第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
143	<u>宮本雲平 (PD)</u>	粘性流の一次元近似	日本物理学会第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
144*	的場史朗、井尾千尋、高橋良太、 <u>小泉哲夫</u> 、城丸春夫	高感度マイクロチャンネルプレートの絶対検出効率測定	日本物理学会第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
145*	齋藤和幸、高橋直大、的場史朗、 <u>小泉哲夫</u> 、小島隆夫	He 気体中での $\text{Li}^-(2\text{-Butanol})$ の移動度測定	日本物理学会第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
146	苗村郁人、神野智史、 <u>小泉哲夫</u> 、平山孝人	多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる希ガス固体からの絶対脱離イオン収率の測定	日本物理学会第 66 回年次大会	新潟大学	2011 年 3 月
147	<u>掛札洋平</u> 、山本圭介、本田裕貴、猪狩佳幸、米田忠弘	金ナノ粒子/Si 自然酸化膜界面の電子状態の加熱温度依存性	平成 22 年度日本表面科学会東北・北海道支部講演会	宮城	2011 年 3 月
148	長谷川智、 <u>掛札洋平</u> 、 <u>枝元一之</u> 、小澤健一	Mo(100)上に作成した Ti 超薄膜の酸化により生成する周期的酸化物薄膜の電子状態	日本化学会第 91 春季年会	神奈川	2011 年 3 月
149	小澤健一、宗像紫織、 <u>枝元一之</u> 、間瀬一彦	ZnO 表面におけるテトラシアフルバレンの吸着構造	日本化学会第 91 春季年会	神奈川	2011 年 3 月
150	S. Takeuchi (<u>本林グループ</u> の発表)	NaI(Tl) array for in-beam g-ray spectroscopy -DALI2-	SAMURAI International Workshop	RIKEN	2011 年 3 月
151	<u>Jiro Murata</u>	T-Violation and Gravity	TRIUMF Seminar	Vancouver CANADA	2011 年 2 月
152	<u>Tomohiro Harada</u>	Collision of geodesic particles around a Kerr black hole	IPMU Workshop on Black Holes	IPMU, Kashiwa,	2011 年 2 月
153	<u>原田知広</u>	回転ブラックホール付近での天体の高速衝突	第 4 回『ブラックホール磁気圏勉強会』研究会	大同大学	2011 年 2 月
154	S. Takeuchi (<u>本林グループ</u> の発表)	NaI(Tl) array for in-beam g-ray spectroscopy -DALI2-	SHOGUN Workshop	RIKEN	2011 年 2 月
155	<u>Jiro Murata</u>	Test of Time Reversal Symmetry using polarized at TRIUMF and Short Range Gravity Experiment	CENPA Seminar	Seattle, USA	2011 年 1 月
156	<u>村上弘志</u> 、北本俊二、竹中恵理、柴田拓磨、吉田正樹、東慶一、武井大	補償光学を用いたミリ秒分解能を目指した X線望遠鏡の開発	第 11 回宇宙科学シンポジウム	JAXA/ISAS	2011 年 1 月

プロジェクト番号

S0901029

157*	武井大 他 (北本グループの発表)	X線干渉望遠鏡に向けたコヒーレント光源の開発	第11回宇宙科学シンポジウム	JAXA/ISAS	2011年1月
158	中村哲也、田口 真	真空紫外シュミットカメラの補正板の開発	第11回宇宙科学シンポジウム	JAXA/ISAS	2011年1月
159	原田知広	Kerr ブラックホールの周囲での粒子衝突	第12回特異点研究会「特異点と時空、および関連する物理」	神奈川工科大学	2011年1月
160	S. Takeuchi (本林グループの発表)	The DALI2 g-ray spectrometer	Workshop on advanced detector technology for nuclear physics	RIKEN	2011年1月
161	Tsunehide Kuroki	Spontaneous supersymmetry breaking in noncritical covariant superstring Theory	Bangkok Workshop on Gravity, Gauge Theory, Matrices and Strings.	Bangkok, Thailand	2011年1月
162	K. Edamoto, Y. Kakefuda, K. Ozawa	Electronic structures of Ni2P single-crystal surfaces: Angle-resolved and resonant photoemission spectroscopy	2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies	Honolulu, USA	2010年12月
163	長谷川智、掛札洋平、枝元一之、小澤健一	Mo(100)上に作成したTi超薄膜の酸化により生成する周期的酸化物薄膜の電子状態	平成22年度放射光表面科学部会シンポジウム	東京	2010年12月
164	Jiro Murata	Test of Time Reversal Symmetry using polarized unstable Nuclei (*学11)	TRIUMF Science Forum	Vancouver CANADA	2010年11月
165	中村哲也、田口 真	真空紫外シュミットカメラの補正板の開発	第128回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	那覇	2010年11月
166	長谷川智 (枝元グループの発表)	Mo(100)表面におけるチタン酸化物薄膜の合成	第30回表面科学学術講演会	大阪	2010年11月
167	枝元一之、長谷川智、掛札洋平、小澤健一	Ag(100)表面上に作成したチタン酸化物薄膜の電子状態	第30回表面科学学術講演会	大阪	2010年11月
168	掛札洋平、角田日向子、枝元一之、米田忠弘	X線光電子分光による金ナノ粒子/Si自然酸化膜界面の電子状態の評価	第30回表面科学学術講演会	大阪	2010年11月
169	原田知広	「高速回転ブラックホール付近における天体の高速衝突」	第3回『アインシュタインの物理』でリンクする研究・教育拠点研究会	大阪市立大学	2010年10月
170*	北本俊二、武井大、村上弘志、坂田和也、吉田裕樹	天体観測を目指すX線干渉計のための光源の開発	日本物理学会 2010年度秋季大会	九州工業大学	2010年9月
171	Tomohiro Harada	Uniqueness of static spherically symmetric vacuum solutions in the IR limit of nonrelativistic quantum gravity	Spanish Relativity Meeting 2010	Granada, Spain	2010年9月
172	Tomohiro Harada	Black hole candidates and the Kerr bound	Spanish Relativity Meeting 2010	Granada, Spain	2010年9月
173	高橋芳太、原田知広	ブラックホール候補天体と Kerr 限界	日本物理学会 2010年度秋季大会	九州工業大学	2010年9月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

174	<u>Tomohiro Harada</u>	Black hole candidates and the Kerr bound	The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation	YITP, Kyoto	2010年9月
175*	坂田和也他 (北本グループの発表)	新型干渉計の検討	2010年度 日本天文学会	金沢大学	2010年9月
176*	武井 大他 (北本グループの発表)	X線干渉望遠鏡に向けた光源の開発	2010年度 日本天文学会	金沢大学	2010年9月
177	<u>H. Murakami</u> , <u>M. Tsujimoto</u>	Lessons from Suzaku (1) XIS	ASTRO-H 4th science meeting	Stanford	2010年8月
178	<u>Murakami, H.</u> ; <u>Kitamoto, S.</u> ; <u>Takenaka, E.</u> ; <u>Shibata, T.</u> ; <u>Yoshida, M.</u> ; <u>Higashi, K.</u> ; <u>Takei, D.</u>	Imaging experiment of an adaptive optics with a normal-incident EUV telescope	SPIE, 7803 OE	San Diego, USA	2010年8月
179	<u>U. Miyamoto</u>	On Cpsmic Censor in High-Energy Particle Collisions	Spanish Relativity Meeting 2010	Granada, Spain	2010年9月
180	<u>H. Kubotera</u> , <u>S. Jinno</u> , <u>T. Tachibana</u> , <u>T. Koizumi</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Surface sensitive measurement of excitonic processes in rare gas clusters by electron energy loss spectroscopy, (Hot Topics, Invited talk)	MPS2010	Sendai, Japan	2010年9月
181*	笹川修司、 <u>田中秀和</u>	有限温度におけるフェルミオン自己エネルギーのゲージパラメーター依存性	日本物理学会 2010年度秋季大会	九州工業大学	2010年9月
182*	<u>Shiro Matoba</u> , <u>Tetsuo Koizumi</u> , <u>Yasuaki Yamamoto</u> , <u>Ryota Takahashi</u> , <u>Chihiro Io</u> and, <u>Haruo Shiromaru</u>	Absolute detection efficiencies of a micro channel plate	15 th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions,	Shanghai, China	2010年8月
183	<u>Tetsuo Koizumi</u>	One-electron capture reactions between Kr^{2+} ions and molecules in the sub-thermal energy region	15 th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions,	Shanghai, China	2010年8月
184*	的場史朗、井尾千尋、高橋良太、 <u>小泉哲夫</u>	Micro-Channel Plate の絶対感度測定	原子衝突研究協会第35回年会	奈良女子大学	2010年8月
185	<u>I. Naemura</u> , <u>S. Jinno</u> , <u>T. Koizumi</u> and <u>T. Hirayama</u> ,	Absolute ion yield of potential sputtering from solid Ne by Ar^{q+} ($q < 7$) impact,	HCI2010	Shanghai, China	2010年8月
186	<u>T. Motobayashi</u>	Rare isotope experiments at RIKEN RIBF	International Conference "Pan American Advanced Studies Institute on Rare Isotopes" (PASI2010)	Joao Pessoa, Brazil.	2010年8月
187	<u>Jiro Murata</u>	Test of Time Reversal Symmetry using polarized $8Li$ at ISAC (招待講演)	Fundamental Symmetries "Searching for New Physics" in Canada and Beyond	Vancouver CANADA	2010年7月
188	<u>J. Onishi</u> , <u>J. Murata</u> et. al.	Electron Transverse Polarimeter for the MTV Experiment at TRIUMF	Fundamental Symmetries "Searching for New Physics" in Canada and Beyond	Vancouver CANADA	2010年7月
189	<u>Jiro Murata</u>	Test of Time Reversal Symmetry using polarized $8Li$ at TRIUMF-ISAC	International Nuclear Physics Conference 2010	Vancouver CANADA	2010年7月
190	<u>J. Onishi</u> , <u>J. Murata</u> et. al.	Electron Transverse Polarimeter for the MTV Experiment at TRIUMF	International Nuclear Physics Conference 2010	Vancouver CANADA	2010年7月
191	<u>Motoyuki Saijo</u>	Rapidly Rotating Dynamic Black Holes through Gravitational Collapse	The Nineteenth International Conference on General Relativity and Gravitation	Mexico City, Mexico	2010年7月

192	S. Jinno, T. Isozaki, I. Naemura, T. Koizumi and T. Hirayama,	Temperature Effect of Ion Desorption Dynamics from Solid Ne by Low-Energy Ion Impact,	ICACS25	Krakow, Poland	2010年7月
193	T. Motobayashi	Nuclear structure studies at RIKEN - new measurements with inflight (fast) radioactive beams	International School of Physics Enrico Fermi on "From the Big Bang to the nucleosynthesis"	Varenna, Italy	2010年7月
194	中村哲也、田口 真	真空紫外シュミットカメラの補正板の開発	日本地球惑星科学連合 2010 年大会	幕張	2010年5月
195	原田知広、宮本雲平、塚本直樹	非相対論的量子重力の赤外極限における静的球対称解	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
196	西條統之	超高速回転する動的ブラックホールの形成およびその諸性質	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
197*	的場史朗、小泉哲夫、城丸春夫、東俊行	T-MCP の絶対感度測定	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
198	磯崎俊之、苗村郁人、小泉哲夫、平山孝人	低速イオン衝撃による希ガス固体表面からの脱離過程の温度効果	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
199	枝元一之、安野信行、掛札洋平、小澤健一	Ni ₂ P(10 0)異方性表面における電子状態	日本化学会第 90 回春季年会	大阪	2010年3月
200	今村賢司、小澤健一、枝元一之	ZrC(100)および NbC(100)における酸素吸着に関する理論的研究	日本化学会第 90 回春季年会	大阪	2010年3月
201	掛札洋平、角田日向子、枝元一之	金微粒子の自己組織化によるストライプ構造形成とその配向制御	平成 21 年度日本表面科学会 東北・北海道支部講演会	仙台	2010年3月
202*	田中秀和	Jet-Calculus 処方によるハドロン散乱断面積のQCD補正	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
203	池田友樹、村田次郎他	RHIC-PHENIX 実験における光学的位置補正システムを用いた Muon Tracking Chamber のアライメントのずれの評価	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010/3/20-23
204	二宮一史、村田次郎他	ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験2	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010/3/20-23
205	川村広和、村田次郎他	KEK-TRIAC における偏極 8Li を用いた時間反転対称性の研究	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010/3/20-23
206	聖代橋悦子、村田次郎他	TRIUMF-ISAC における偏極 8Li を用いた時間反転対称性の破れ探索実験	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010/3/20-23
207	黒木経秀・杉野文彦	行列模型における localization と large-N 極限	日本物理学会 第 65 回年次大会	岡山大学	2010.3.20-23
208	N. Aoi (本林グループの発表)	In-beam g-ray spectroscopy of unstable nuclei at RIKEN RI Beam Factory	The International Symposium: Forefront of Researches in Exotic Nuclear Structures (Niigata2010)	Niigata, Japan	2010年3月
209	原裕太(本林グループの発表)	LaBr ₃ シンチレーション検出器による荷電粒子測定	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
210	武内聡 (本林グループの発表)	陽子非弾性散乱を用いた ³² Mg 核の低励起状態の研究	日本物理学会第 65 回年次大会	岡山大学	2010年3月
211	N. Aoi (本林グループの発表)	RI Beam Factory	ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010)	Tokyo, Japan	2010年2月
212	Y. Nakaya, Jiro Murata et. al.	Test of Time Reversal Symmetry using polarized unstable Nuclei	TRIUMF Science Forum	Vancouver CANADA	2010年1月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

213	原田知広	射影可能な非相対論的量子重力理論における静的解の一意性について	第11回特異点研究会「特異点と時空、および関連する物理」	芝浦工業大学	2010年1月
214	T. Motobayashi	Present status of RIKEN RIBF	Spiral2 Week 2010	Caen, France	2010年1月
215	Tomohiro Harada	Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry	The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation	Rikkyo University,	2009年12月
216	U. Miyamoto	Instability of higher-dimensional black holes from fluid/gravity correspondence	Frontier in higher-dimensional black holes	京都大学	2009年12月
217	西條統之	超高速回転するブラックホールの形成およびその諸性質	宇宙流体力学のフロンティア	京大基研	2009年11月
218	知崎陽一・矢彦沢茂明	pp-wave 上の共変的超弦の場におけるゲージ変換と低エネルギー作用	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009.9.10-9.13
219	U. Miyamoto	Minimal surfaces in flat and curved spacetimes of any dimensionality	The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan	立教大学	2009.11.30-12.4
220	T. Kuroki	Boundary condition for D-brane from Wilson loop at the AdS boundary	The Nineteenth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG19)	立教大学	2009.11.30-12.4
221	T. Kuroki	Boundary condition for D-brane from Wilson loop at the AdS boundary	The nineteenth workshop on general relativity and gravitation in Japan	Tokyo, Japan	30 Nov.-4 Dec. 2009
222	T. Shimomura, M. Aizawa, A. Kishi, K. Edamoto, T. Hasegawa, Y. Kakefuda, K. Ozawa	Electronic structure of the TiO ₂ film formed on Ag(100)	11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure	Nara, Japan	2009年10月
223	K. Edamoto, H. Inomata, K. Ozawa, Y. Nakagawa, K. Asakura, S. Otani	Valence and core-level photoemission spectroscopy study of the electronic structure of Ni ₂ P(10-10)	11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure	Nara, Japan	2009年10月
224	枝元一之、猪股裕幸、小澤健一、中川雄太、朝倉清高、大谷茂樹	Ni ₂ P(10 0)異方性表面の角度分解光電子分光	第5回放射光表面科学部会シンポジウム	奈良	2009年10月
225	下村崇彰、相澤舞、岸亜美奈、長谷川智、掛札洋平、枝元一之、小澤健一	Ag(100)面上に作成したチタン酸化物薄膜の電子状態	第5回放射光表面科学部会シンポジウム	奈良	2009年10月
226	下村崇彰、相澤舞、岸亜美奈、長谷川智、掛札洋平、枝元一之、小澤健一	Ag(100)上に作成した TiO ₂ 薄膜の電子状態	第29回表面科学講演大会	東京	2009年10月
227	今村賢司、枝元一之	Ag(100)上における TiN 超薄膜の合成に関する量子化学計算	第29回表面科学講演大会	東京	2009年10月
228	枝元一之、安野信行、猪股裕幸、掛札洋平、小澤健一	Ni ₂ P(10 0)異方性表面における表面局在準位の二次元電子状態	第29回表面科学講演大会	東京	2009年10月
229	H. Scheit (本林グループの発表)	In-beam g-ray spectroscopy at the RIBF: recent results and future prospects	Hawaii 2009, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS	Hawaii, USA	2009年10月

230	N. Aoi (本林グループの発表)	Overview of RIBF and direct reactions with fast RI beams at RIBF	Hawaii 2009, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS	Hawaii, USA	2009年10月
231	S. Takeuchi (本林グループの発表)	Low-lying states in ^{32}Mg studied by proton inelastic scattering	Hawaii 2009, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS	Hawaii, USA	2009年10月
232	K. Kurita et al.	Development of a recoil ion detector for SCRIT	Hawaii 2009, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS	Hawaii, USA	2009年10月
233	中村哲也、田口 真	真空紫外シュミットカメラの補正板の評価	第126回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会	金沢	2009年9月
234	原田知広、中尾憲一、B.C. Nolan	Einstein-Rosen 波と円筒対称時空における自己相似仮説 II	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009年9月
235	知崎陽一・矢彦沢茂明	pp-wave 上の共変的超弦の場におけるゲージ変換と低エネルギー作用	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009年9月
236	西條統之	動力学的手法による相対論的回転性の静的な不安定性	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009年9月
237	的場史朗、藤澤諒、小泉哲夫、小島隆夫、田沼肇、城丸春夫、清水敏夫	カイラル分子イオン移動度におけるカイラリティ依存性	日本物理学会 2009年秋季大会	熊本大学	2009年9月
238	苗村郁人、磯崎俊之、小泉哲夫、平山孝人	多価イオン衝撃による希ガス固体からの脱離イオンの観測	原子衝突研究協会第34回年会	首都大学	2009年9月
239	松崎旭洋、田中秀和	トリテウム β 崩壊を利用した新しいニュートリノ質量測定 の提案	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009年9月
240	N. Aoi (本林グループの発表)	Day-One experiment programs for RIBF	XXXI Mazurian Lakes Conference on Physics	Piaski, Poland	2009年9月
241	H. Scheit (本林グループの発表)	In-beam Gamma Experiments	JUSEIPEN Workshop	LBL, USA	2009年9月
242	N. Aoi (本林グループの発表)	Overview of BigRIPS/ZeroDegree	JUSEIPEN Workshop	LBL, USA	2009年9月
243	T. Motobayashi	New Research Opportunities at RIKEN RI Beam Factory	Internal Symposium on Exotic Nuclei	Sochi, Russia	2009年9月
244	黒木経秀・杉野文彦	行列模型の large-N 極限における自発的超対称性の破れ	日本物理学会 2009年秋季大会	甲南大学	2009年9月
245	S. Matoba, T. Koizumi, T.M. Kojima, and H. Tanuma	Mobility of a Li^+ ion attached to 2-butanol in He gas	XVI International symposium on electron-molecule collisions and swarms	Toronto, Canada	2009年8月
246	的場史朗、藤澤諒、小泉哲夫、小島隆夫、田沼肇、城丸春夫、清水敏夫	ヘリウム気体中におけるカイラル分子イオンの移動度	原子衝突研究協会第34回年会	首都大学	2009年8月
247	黒木経秀	Spontaneous supersymmetry breaking in matrix models	基礎研究会「場の理論と弦理論」	京都大学基礎物理学研究所	2009.7.6-7.10
248	Tomohiro Harada, Ken-ichi Nakao, Brien C. Nolan, , 12-18 Jul 2009,	Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry	The 12th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories	Unesco Headquarters, Paris, France	2009年7月

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

249	Toshinori SONODA, Shinsuke KAMEMOTO, Takato HIRAYAMA, and Tetsuo KOIZUMI,	Energy dependence of multi-electron transfer reactions between slow multi-charged ions and neutral atoms,	ICPEAC26	Kalamazoo, USA.	2009年7月
250	T. Tachibana, K. Fukai, I. Naemura, T. Koizumi and T. Hirayama,	Secondary ions from condensed gas solids by singly and multiply charged ion impacts,	ICPEAC26	Kalamazoo USA	2009年7月
251	青井考 (本林グループの発表)	RIBF における $^{132}\text{Sn}, ^{76}\text{Ni}$ 近傍核のガンマ線核分光計画	宇宙核物理連絡会ワークショップ	理化学研究所	2009年7月
252	T. Motobayashi	RIKEN RIBF	ADVANCED STUDIES INSTITUTES ON "SYMMETRIES AND SPIN"	Prague, Czech Republic	2009年7月
253	T. Motobayashi	Direct reaction spectroscopy with g ray measurements at RIKEN	Gordon Research Conference on Nuclear Chemistry - Frontiers of Nuclear Structure Through Spectroscopy and Reactions	Colby-Sawyer College, New London, US	2009年6月
254	田口 真	Development of Finishing Process of MgF_2 Surfaces for a Far Ultraviolet Schmidt Camera	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	幕張	2009年5月
255	N. Aoi (本林グループの発表)	In beam g-ray spectroscopy at RIBF	Nuclear Structure and Dynamics	Dubrovnik, Croatia	2009年5月
256	P. Doornenbal (本林グループの発表)	The Structure of the very Neutron-Rich Ne Isotopes: First In-Beam Gamma-Ray Spectroscopy at the RIBF	8th International Conference on Radioactive Nuclear Beams(RNB8)	Grand Rapids, Michigan, USA	2009年5月
257	K. Fukai, I. Naemura, T. Tachibana, T. Koizumi and T. Hirayama,	Desorption of cluster ions from solid Ne by singly- and multiply-charged ion impact,	DIET12	Atlanta, USA	2009年4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>

- ・ 弦理論研究会(立教大学、2010年1月) 添付資料2
- ・ 2009年度成果報告会(立教大学、2010年6月) 添付資料3
- ・ TMS 研究会
(立教大学、2011年5月、TMS研究会主催、先端科学計測研究センター共催) 添付資料4
- ・ 2010年度成果報告会(立教大学、2011年6月) 添付資料5
- ・ 2011年度成果報告会(立教大学、2012年3月)外部評価を受けた。 添付資料6
- ・ 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」最終報告会(立教大学、2013年2月) 添付資料7

<これから実施する予定のもの>

14 その他の研究成果等

「13 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、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下線及び*を付してください。

※ 論文や学会発表等になじまない研究である場合は、本欄を充実させること

* 特願 2010-122928 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 発明者:村田次郎 出願人:学校法人立教学院 提出日:平成 22 年 5 月 28 日

* 特願 2012-126314 K-Ar 年代測定装置及び方法 発明者:亀田真吾 出願人:学校法人立教学院 提出日:平成 24 年 6 月 1 日

15 「選定時」及び「中間評価時」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>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

「該当なし」

<「選定時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

「該当なし」

<「中間評価時」に付された留意事項>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

「該当なし」

<「中間評価時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

「該当なし」

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21年度	施設	0	0	0				
	装置	0	0	0				
	設備	34,978	11,661	23,317				
	研究費	39,982	21,341	18,641				
平成22年度	施設	0	0	0				
	装置	0	0	0				
	設備	28,977	9,659	19,317				
	研究費	39,624	20,258	19,366				
平成23年度	施設	0	0	0				
	装置	0	0	0				
	設備	5,000	1,667	3,333				
	研究費	39,924	16,426	23,498				
平成24年度	施設	0	0	0				
	装置	0	0	0				
	設備	0	0	0				
	研究費	39,910	17,138	22,772				
平成25年度	施設	0	0	0				
	装置	0	0	0				
	設備	0	0	0				
	研究費	39,949	15,832	24,117				
総額	施設	0	0	0	0	0	0	0
	装置	0	0	0	0	0	0	0
	設備	68,955	22,987	45,967	0	0	0	0
	研究費	199,389	90,995	108,394	0	0	0	0
総計	268,344	113,982	154,361	0	0	0	0	

※ 最終年度は予定額。

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

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
4号館	—	358㎡	14	7	—	—	—
13号館	—	793㎡	19	15	—	—	—

※ 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)							
レーザープラズマ光源装置	H18	TM2931-01 他	1	7500 h	90,634	45,317	私学助成
(研究設備)							
コヒーレント光源	H21	無し	1	525 h	14,999	9,999	私学助成
大立体角MWPCプロトタイプ	H21	RP-MWPC-628-1	1	3000 h	7,000	4,666	私学助成
クラスター分子分光装置	H21	特注	1	4000 h	6,983	4,655	私学助成
反跳イオン検出用真空装置	H21	特注	1	4200 h	5,996	3,997	私学助成
大立体角MWPC	H22	RP-MWPC-628-2	1	5000 h	5,000	3,333	私学助成
クラスター分光用ビームライン	H22	特注	1	3000 h	10,978	7,318	私学助成
反跳イオン検出装置読出システム	H22	特注	1	1400 h	12,999	8,666	私学助成
NWPCデータ収集・解析システム	H23	RP-MWPC-628-3	1	5000 h	5,000	3,333	私学助成
(情報処理関係設備)				h			
				h			
				h			
				h			

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

18 研究費の支出状況

(千円)

年 度	平成 21 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	17,207	消耗品費	10,270	真空部品、実験器具、電気部品
		用品費	6,937	電気部品、計算機
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	1	郵便費	1	郵便代
印 刷 製 本 費	251		251	報告書印刷、論文別刷
旅 費 交 通 費	1,609	旅費交通費	638	旅費交通費
		海外出張費	971	海外出張費
賃 借 料	171		171	レンタカー利用、装置利用料
報 酬 ・ 委 託 料	1,332	その他の委託費	1,073	アルバイト料、実験器具送付料
		報酬・手数料	259	謝金、英文校正
(諸 会 費)	115		115	学会参加費
(そ の 他)	210	雑費、保守料	153	送金手数料、機器修理
		その他の図書資料費	57	図書資料
計	20,896			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)	0			
教 育 研 究 経 費 支 出	0			
計	0			
設 備 関 係 支 出 (1 個 又 は 1 組 の 価 格 が 5 0 0 万 円 未 満 の も の)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	16,386	機器購入	16,386	計算ファイルサーバー、計算ノード、スペクトルアナライザー
図 書	0		0	
計	16,386			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	0			
ポスト・ドクター	2,700			学外2人
研究支援推進経費	0			
計	2,700			学外2人

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

年 度	平成 22 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	12,242	消耗品費	8,038	真空部品、実験器具、電気部品
		用品費	4,204	電気部品、計算機
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	0		0	
印 刷 製 本 費	284		284	報告書印刷
旅 費 交 通 費	1,880	旅費交通費	365	旅費交通費
		海外出張費	1,515	海外出張費
賃 借 料	68		68	レンタカー利用
報 酬・委 託 料	1,973	その他の委託費	1,822	アルバイト料、実験委託
		報酬・手数料	151	謝金
(諸会費)	180		180	学会参加費
(その他)	163	雑費、保守料	21	送金手数料、機器修理
		その他の図書資料費	142	図書資料
計	16,790			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼務職員)	0			
教 育 研 究 経 費 支 出	0			
計	0			
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	14,343	機器購入	14,343	冷却CCDカメラ、四重極質量分析計、ベーシックプロセスガスモニター
図 書	0			
計	14,343			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	1,314			学内2人
ポスト・ドクター	7,177			学外2人
研究支援推進経費				
計	8,491			学内2人、学外2人

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

年 度	平成	23	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	15,169	消耗品費	10,175	真空部品、電気部品、実験器具
		用品費	4,994	実験器具、計算機
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	9		9	書類等郵送
印 刷 製 本 費	303		303	報告書印刷
旅 費 交 通 費	2,118	旅費交通費	431	旅費交通費
		海外出張費	1,687	海外出張費
賃 借 料	58		58	装置利用料
報 酬 ・ 委 託 料	1,930	その他の委託費	1,657	アルバイト料、宅配便
		報酬・手数料	273	謝金
(諸会費)	139		139	学会参加費
(その他)	623	機器備品修繕費	365	機器備品修繕
		その他図書資料費、雑費、公租公課	258	図書資料、論文投稿料、振込手数料
計	20,349			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)	0			
教育研究経費支出	0			
計	0			
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	13,199	機器購入		ピコ秒ライトバルサ、BNCハーメフレンジ、超高真空チェンバー、磁力計、カセグレン式望遠鏡
図 書	0			
計	13,199			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	954			学内1人
ポスト・ドクター	5,422			学外2人
研究支援推進経費	0			
計	6,376			学内1人、学外2人

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

年 度	平成	24	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	9,408	消耗品費	7,672	実験器具、工具
		用品費	1,736	PCソフト
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	22		22	書類等郵送
印 刷 製 本 費	194		194	成果報告書印刷
旅 費 交 通 費	3,938	旅費交通費	1,548	旅費交通費
		海外出張費	2,390	海外出張費
貸 借 料	224	貸借料	224	観測機器運搬に係る車両貸借
報 酬・委 託 料	771	その他の委託費	617	アルバイト料、宅配便
		報酬・手数料	154	謝金
(諸会費)	89		89	学会参加費
(雑費)	107		107	論文投稿料
(その他)	90	その他図書資料、燃料費	90	図書資料、観測機器運搬に係る燃料費
計	14,843			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出				
計	0			
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	12,128			デジタル・フォスファ・オシロスコープ、ターボ分子ポンプ式、超高真空排気システム一式、真空紫外分光実験装置、真空排気装置、ナスミスズーム・分光ユニット、64chリードアウトボード
図 書				
計	12,128			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	957			学内1人
ポスト・ドクター	11,982			学外3人
研究支援推進経費				
計	12,939			学内1人、学外3人

プロジェクト番号	S0901029
----------	----------

年 度	平成 25 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	18,010	消耗品費	12,855	実験器具、工具
		用品費	5,155	PCソフト
光 熱 水 費	0		0	
通 信 運 搬 費	2		2	書類等郵送
印 刷 製 本 費	0		0	
旅 費 交 通 費	3,236	旅費交通費	1,452	旅費交通費
		海外出張費	1,784	海外出張費
貸 借 料	72		72	車両貸借
報 酬・委 託 料	585	その他の委託費	434	アルバイト料、宅配便
		報酬・手数料	151	謝金
(諸 会 費)	143		143	学会参加費
(そ の 他)	443	機器備品修繕費	197	機器備品修繕
		雑費、その他図書資料、燃料費	246	論文投稿料、図書資料、車両貸借に係る燃料費
計	22,491			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)				
教 育 研 究 経 費 支 出				
計	0			
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	6,142			ハイパフォーマンス・コンピューター式、デジタルエレクトロメータ、ヘリウムリークディテクタ
図 書				
計	6,142			
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	477			学内1人
ポスト・ドクター	10,837			学外3人
研究支援推進経費				
計	11,314			学内1人、学外3人

添 付 資 料

日本物理学会ホームページより抜粋

(<http://www.jps.or.jp/activities/awards/ronbunso/ronbun18-2013.html>)

18 回論文賞受賞論文

本年度の日本物理学会第18回論文賞は論文賞選考委員会の推薦に基づき、本年3月8日に開催された第556回理事会において次の5編の論文に対して与えられました。

—略—

論文題目

Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a ^{238}U Beam at 345 MeV/nucleon

掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 79, No.7, 073201 (2010)

著者氏名

Tetsuya OHNISHI(大西 哲哉), Toshiyuki KUBO(久保 敏幸), Kensuke KUSAKA(日下 健祐), Atsushi YOSHIDA(吉田 敦), Koichi YOSHIDA(吉田 光一), Masao OHTAKE(大竹 政雄), Naoki FUKUDA(福田 直樹), Hiroyuki TAKEDA(竹田 浩之), Daisuke KAMEDA(亀田 大輔), Kanenobu TANAKA(田中 鐘信), Naohito INABE(稲辺 尚人), Yoshiyuki YANAGISAWA(柳澤 善行), Yasuyuki GONO(郷農 靖之), Hiroshi WATANABE(渡邊 寛), Hideaki OTSU(大津 秀暁), Hidetada BABA(馬場 秀忠), Takashi ICHIHARA(市原 卓), Yoshitaka YAMAGUCHI(山口 由高), Maya TAKECHI(武智 麻耶), Shunji NISHIMURA(西村 俊二), Hideki UENO(上野 秀樹), Akihiro YOSHIMI(吉見 彰洋), Hiroyoshi SAKURAI(櫻井 博儀), Tohru MOTOBAYASHI(本林 透), Taro NAKAO(中尾 太郎), Yutaka MIZOI(溝井 浩), Masafumi MATSUSHITA(松下 昌史), Kazuo IEKI(家城 和夫), Nobuyuki KOBAYASHI(小林 信之), Kana TANAKA(田中 佳奈), Yosuke KAWADA(河田 鷹介), Naoki TANAKA(田中 直樹), Shigeki DEGUCHI(出口 茂樹), Yoshiteru SATOU(佐藤 義輝), Yosuke KONDO(近藤 洋介), Takashi NAKAMURA(中村 隆司), Kenta YOSHINAGA(吉永 健太), Chihiro ISHII(石井 千尋), Hideakira YOSHII(吉井 秀彬), Yuki MIYASHITA(宮下 雄樹), Nobuya UEMATSU(植松 暢矢), Yasutsugu SHIRAKI(白木 恭嗣), Toshiyuki SUMIKAMA(炭竈 聡之), Junsei CHIBA(千葉 順成), Eiji IDEGUCHI(井手口 栄治), Akito SAITO(斉藤 明登), Takayuki YAMAGUCHI(山口 貴之), Isao HACHIUMA(八馬 功), Takeshi SUZUKI(鈴木 健), Tetsuaki MORIGUCHI(森口 哲朗), Akira OZAWA(小沢 顕), Takashi OHTSUBO(大坪 隆), Michael A. FAMIANO, Hans GEISSEL, Anthony S. NETTLETON, Oleg B. TARASOV, Daniel P. BAZIN, Bradley M. SHERRILL, Shashikant L. MANIKONDA, Jerry A. NOLEN

授賞理由

本論文は、理化学研究所仁科加速器研究センターのRIビームファクトリー (RIBF) において行われた、未知の新放射性同位元素 (RI) の探索実験に関するものである。実験は、RIBFの超伝導サイクロトロンによって光速の70%まで加速されたウランビーム (U-238) を標的に照射し、ウランの核分裂反応によって生成されるRIを、超伝導RIビーム分離生成装置 (BigRIPS) を用い、収集・分離し、精緻な解析により高分解能粒子識別 (同定) を達成することによりなされた。その結果、マンガン (原子番号25) からバリウム (原子番号56) に至る、安定線から遠く離れた中性子過剰領域の45種の新RIを発見した。さらにRI一つ一つの生成断面積も実験的に求めた。

今回発見した新RIには、宇宙における鉄より重い元素の生成に重要な役割をすると考えられている、r-プロセスと呼ばれる元素合成過程に関与するRIが多く含まれている。その中で特に、パラジウム-128 (原子番号46、中性子数82) は中性子数が82の魔法数をもったRIでその存在が特に注目されていた。

本論文のインパクトは、J. Phys. Soc. Jpn. のMost Cited Articles in 2011 from Vol. 79 (2010) に選ばれたことから明らかである。

日本の原子核物理学の実力を世界に示すとともに、RIBFでのRIビーム実験の先駆けとなった本論文は日本物理学会論文賞にふさわしい業績であると認められる。

『弦理論研究会』

2010年1月5-6日

立教大学理学研究科先端科学計測研究センター

発表プログラム

☆2010年1月5日(火) :

【座長：大川 祐司】

10:00~11:00 石橋 延幸 (筑波大)

Light-cone Gauge String Field Theory in Noncritical Dimensions

11:10~12:10 国友 浩 (京都大)

超弦の場の理論におけるゲージ固定について

【座長：矢彦沢 茂明】

13:30~14:30 風間 洋一 (東京大)

Exact Quantization of a Superparticle in $AdS_5 \times S^5$

【座長：坂井 典佑】

15:00~16:00 磯 暁 (KEK)

ウンルー効果の検証

16:10~17:10 川野 輝彦 (東京大)

F-Theory GUT

☆2010年1月6日(水) :

【座長：黒木 経秀】

10:00~11:00 福間 将文 (京都大)

Universal description of viscoelasticity

11:10~12:10 土屋 麻人 (静岡大)

Large N reduction on group manifolds

【座長：伊藤 克司】

13:30~14:30 菅野 浩明 (名古屋大)

Instanton partition function in “Omega” background and plane partition

【座長：橋本 幸士】

15:00~16:00 杉本 茂樹 (IPMU)

Mesons as Open Strings

16:10~17:10 山口 哲 (大阪大)

AdS 時空の D-brane と BPS 演算子

ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用 第1回 研究報告会
 日時: 候補 2010年6月12日(土) 13:00-18:00 (懇親会 18:00-19:30)
 場所: 立教大学4号館4411教室

プログラム

あいさつ 小泉哲夫(先端科学計測研究センター長) 13:00-13:05

A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造

(A-1) 宇宙ブラックホールの探求

- ブラックホール観測のためのX線干渉計の開発
 北本俊二、村上弘志 13:05-13:25
- 衛星搭載用可搬型計測器の開発 田口真 13:25-13:45
- 衛星取得データ処理技術の開発 柳町朋樹 13:45-14:05
- 一般相対性理論によるブラックホールの研究 宮本雲平、原田知広、西條統之
 14:05-14:25

休憩

(A-2) 時空対称性の探究

- ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験
 二宮一史、村田次郎 14:40-15:00
- 弦理論による余剰次元の理論的研究 矢彦沢茂明、黒木経秀 15:00-15:20

B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造

(B-1) 原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明

- 原子・分子クラスターの構造の実験的研究 場史朗、小泉哲夫 15:20-15:40
- クラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究
 神野智史、平山孝人 15:40-16:00
- 表面電子状態の実験的研究 枝元一之 16:00-16:20

休憩

(B-2) 原子核の構造の解明

- 不安定原子核の電子散乱実験をめざした超低エネルギー反跳イオン検出器
 の開発 栗田和好 16:35-16:55
- 3次元位置検出シンチレータの開発 家城和夫 16:55-17:15
- 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 17:15-18:35
- 不安定原子核の構造 本林透 17:35-17:55

まとめ 小泉哲夫(先端科学計測研究センター長) 17:55-18:00

18:00-19:30 懇親会

2011年 第1回 TMS研究会講演会プログラム

- 主催 ●TMS研究会
 共催 ●立教大学先端科学計測研究センター
 テーマ ●イオンモビリティ、そして質量分析
 日時 ●平成23年5月21日（土） 13:00～17:45
 場所 ●立教大学（池袋キャンパス）4号館4412教室
 受付時間 ●12:30～12:55
 参加費 ●一般 3,000円 学生 1,000円
 申込締切 ●平成23年5月18日

プログラム（敬称略）

時間	演題	講演者
13:00～13:05	開会の挨拶	酒井 康弘（東邦大学）
13:05～13:10	TMS研究会会長の挨拶	山下雅道（宇宙科学研究所）
13:10～13:20	研究会開催について	小泉 哲夫（立教大学先端科学計測研究センター、センター長）
13:20～14:20	イオンモビリティと質量分析	菅井 俊樹（東邦大学）
14:20～15:00	イオンモビリティで探る質量分析	的場 史朗（立教大学先端科学計測研究センター）
15:00～15:15	休憩	-----
15:15～16:00	イオンモビリティ研究の将来	田沼 肇（首都大学東京）
16:00～16:30	総合討論	
16:30～17:45	特別講演：薄層クロマトグラフィー・大気圧イオン化/質量分析(TLC-API/MS)の開発	持田 由幸（神奈川大学）
17:45～17:50	閉会の挨拶	酒井 康弘（東邦大学）

ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用 第2回 研究報告会

日時：候補 2011年6月25日(土) 13:00-18:00 (懇親会 18:00-19:30)

場所：立教大学4号館 4342 教室

研究報告会の目的

近年、ナノスケールの測定技術はそれほど特殊なものではなくなってきた。本研究はさらに精度の高いピコスケール精度の計測技術開発を目指し、その技術を応用して基礎科学の先端的課題である「時空の構造」および「物質の構造」の解明にあたることを目的である。最近の素粒子物理学の理論は余剰次元の存在や時空対称性の破れを予言している。また時空の特異点というべきブラックホールの存在も理論的にも観測的にも支持されるようになってきた。

本プロジェクトではピコスケール測定技術を開発し、それをを用いて立教大学理学研究科内の施設を中心にこれらの問題の解明にあたる。素粒子や時空対称性の実験研究は大型加速器を用いて行われることが多いが、当研究では精密計測技術を用いることで、大型加速器実験に匹敵する成果を立教大学内のインハウス実験であげることも可能である。

本プロジェクトは、立教大学理学研究科「先端科学計測研究センター」が中心となり、2009年度からスタートし、2年あまりが経過し研究もある程度進んできた。現状の進捗状況の全体像を一般に公開する事を目的として、第2回研究報告会を開催する。

ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用 第2回 研究報告会

日時：候補 2011年6月25日(土) 13:00-18:00 (懇親会 18:00-19:30)

場所：立教大学4号館 4342 教室

プログラム

あいさつ 小泉哲夫 (先端科学計測研究センター長) 13:00-13:05

A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造

(A-1) 宇宙ブラックホールの探求

- | | | |
|------------------------|----------------|-------------|
| ○ブラックホール観測のためのX線干渉計の開発 | 北本俊二、村上弘志 | 13:05-13:25 |
| ○衛星搭載用可搬型計測器の開発 | 田口真 | 13:25-13:45 |
| ○衛星取得データ処理技術の開発 | 柳町朋樹 | 13:45-14:05 |
| ○一般相対性理論によるブラックホールの研究 | 宮本雲平、原田知広、西條統之 | 14:05-14:25 |

休憩

(A-2) 時空対称性の探究

- | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|
| ○TRIUMFにおける時間反転対称性の破れ探索実験 | 村田次郎 | 14:40-15:00 |
| ○弦理論による余剰次元の理論的研究 | 黒木経秀、矢彦沢茂明、 | 15:00-15:20 |

B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造

(B-1) 原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明

- | | | |
|------------------------|-----------|-------------|
| ○原子・分子クラスターの構造の実験的研究 | 的場史朗、小泉哲夫 | 15:20-15:40 |
| ○クラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究 | 神野智史、平山孝人 | 15:40-16:00 |
| ○ナノ粒子の表面電子状態の実験的研究 | 掛札洋平 | 16:00-16:20 |

休憩

(B-2) 原子核の構造の解明

- | | | |
|--------------------------------------|------|-------------|
| ○不安定原子核の電子散乱実験をめざした低エネルギー反跳イオン検出器の開発 | 栗田和好 | 16:35-16:55 |
| ○3次元位置検出シンチレータの開発 | 家城和夫 | 16:55-17:15 |
| ○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 | 17:15-18:35 |
| ○不安定原子核の構造 | 本林透 | 17:35-17:55 |

まとめ 小泉哲夫 (先端科学計測研究センター長) 17:55-18:00

18:00-19:30 懇親会

ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用 中間報告会

日時：2012年3月17日(土) 13:30~18:15

場所：立教大学池袋キャンパス12号館地下1階 第1第2会議室

2009年度から文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業として推進している「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」は、5年間のプロジェクトのうち、既に折り返し点を過ぎました。最終成果の一層の飛躍を目指して、これまでの研究経過・成果をお互いに報告し議論します。

プログラム

- | | | |
|-----------------------------------|---|----------------|
| 13:30 | 初めに | 小泉哲夫 |
| B.1.原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明 | | |
| 13:40 | 原子・分子クラスターの構造の実験的研究 | 的場史朗、小泉哲夫 |
| 14:00 | クラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究 | 平山孝人、小泉哲夫 |
| B.2.原子核の構造の解明 | | |
| 14:20 | 高バックグラウンド環境における100keV-1MeV領域イオンの検出技術開発 | 栗田和好 |
| 14:40 | 3次元位置検出型シンチレーターの開発 | 家城和夫、志賀慶明 |
| 15:00 | 不安定核の構造 | 武内聡、本林透、栗田和好 |
| 15:20 | 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、笹川修司 |
| 休憩 | | |
| A.1.宇宙ブラックホールの探求 | | |
| 16:00 | X線干渉計望遠鏡のための基礎研究 | 北本俊二、村上弘志、幸村孝由 |
| 16:20 | 衛星搭載用可搬型計測器の開発 | 田口真 |
| 16:40 | 惑星探査機搭載用分光器の開発 | 亀田真吾 |
| 16:50 | 一般相対性理論によるブラックホールの研究 | 原田知広、西條統之、宮本雲平 |
| A.2.時空対称性の探求 | | |
| 17:10 | 時間反転対称性検証実験、および、ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験 | 村田次郎 |
| 17:30 | 弦理論による余剰次元の理論的研究 | 矢彦沢茂明、黒木経秀 |
| 休憩 | | |
| 議論(17:55-18:10) | | |
| 18:10 | 終わりに | 進行役：北本
小泉哲夫 |
| 18:15 | 茶話会 | |

先端科学計測研究センター
「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」
最終報告会

日時：2014年2月27日（木）13:30 - 18:20

場所：立教大学12号館地下1階第1・第2会議室

13:30 - 13:35 はじめに 小泉哲夫（研究代表者）

[座長：田中秀和]

A 1. 宇宙ブラックホールの探求

13:55 - 14:15 X線干渉計望遠鏡のための基礎研究

北本俊二, 星野晶夫

14:15 - 14:35 衛星搭載用可搬型計測器の開発

田口真, 鈴木秀彦

14:35 - 14:55 惑星探査機搭載用分光器の開発

亀田真吾

14:55 - 15:15 ブラックホール・ジェットの高波長観測

内山泰伸

15:15 - 15:35 一般相対性理論によるブラックホールの研究

宝利剛, 原田知広, 小林努, 前田秀基

A 2. 時空対称性の探求

13:35 - 13:55 時間反転対称性検証実験およびピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験

村田次郎

15:35 - 15:55 弦理論による余剰次元の理論的研究

疋田泰章, 木村哲士

休憩（15:55 - 16:10）

[座長：田口真]

B 1. 原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明

16:10 - 16:30 原子・分子クラスターの構造の実験的研究

小泉哲夫, 的場史朗, 高橋果林

16:30 - 16:50 電子・光・多価イオンと希ガス固体との相互作用に関する実験的研究

立花隆行, 平山孝人

B 2. 原子核の構造の解明

16:50 - 17:10 不安定核の構造

武内聡, 本林透, 栗田和好

17:10 - 17:30 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

17:30 - 17:50 3次元位置検出型シンチレーターの開発

志賀慶明, 家城和夫

17:50 - 18:10 高バックグラウンド環境における 100keV-1MeV 領域イオンの検出技術開発

栗田和好, 榎園昭智

18:10 - 18:20 終わりに 北本俊二（先端科学計測研究センター長）

第2部：各テーマによる研究成果

宇宙ブラックホールの探求：X線干渉計の開発

北本俊二、村上弘志、瀬田裕美、幸村孝由、星野晶夫

概要

宇宙ブラックホールの探求として、もっとも直接的にブラックホールの撮像が出来る事が理想である。その理想に向かい、本事業にて、主として二つの新しい開発を行っている。一つはX線干渉計の開発であり、本事業にて要素技術の開発を行った。もう一つは、補償光学を使った望遠鏡の試みで、撮像実験と性能評価を行った。これら実験に伴い、撮像素子として有望な電荷結合素子（CCD）の新たな読み出し方法を考案した。

1. 序論

宇宙ブラックホールの撮像観測という最終目標を掲げ、そのために、今できることとして、二つの新しい観測装置の開発を進めた[1]。一つは、新しく考案したX線干渉計の試作に向けた要素技術開発である。通常の望遠鏡と異なり、平面鏡で構成し、さらに斜入射光学系を使うため、光学系に対する要求精度がかなり軽減される。もう一つは、補償光学系を使用した直入射望遠鏡の開発である。望遠鏡で使用する光学系の形状を精度よく作成、維持する事は大変困難であるために、可変形鏡を使用する事で、能動的に光学系の制御をしようとする試みである。試作した望遠鏡の性能評価を行い、性能向上のための対策を検討している。そして、関連するX線撮像技術として、電荷結合素子の読み出し方法の研究を行い、高精度撮像が可能になった場合に必ず問題となるパイルアップに強い読み出し方法を考案した。

2. 新型X線干渉計の開発

2-1. 目的

現在知られている宇宙のブラックホール候補天体は、見かけの大きさが大きいと考えられている天体でも、30マイクロ秒角程度である。従ってそれらを撮像するためには、マイクロ秒角の分解能が必要となる。理想的な光学系が可能であるなら、X線は波長が短いので、原理的限界である回折限界は大変小さくなり、ブラックホールの直接撮像の可能性が期待できる。しかしながら、大口径の望遠鏡をX線の波長で回折限界まで実現させる事はほとんど不可能である。また、仮に実現したとしても、いろいろな温度環境や、重力環境の元で維持する事も不可能であろう。そこで、全く別の方法として、平面鏡だけを使用した光学系による、X線干渉計を検討する事とした。

2-2. 新型X線干渉計

X線干渉計は、これまで、米国のグループが検討したことがある[2]。しかしながら、検討された形状では、500kmという大きな望遠鏡長が必要であった。我々のはるかに短い形状で実現出来ると期待される新しい形状のX線干渉計を提案した[3]。図1は我々が提案している干渉計の

形状である。半透膜 (beam splitter) を使用する事で、二つのビームを同一直線上に揃え干渉させる事が特徴である。そのために、角度のついた二つのビームであっても干渉させる事が出来、短い望遠鏡長で実現出来る可能性がある。

シミュレーションにより、波長5nm で我々の銀河中心 (SgrA*) のブラックホールを観測した場合、では 8.7m、近傍の巨大銀河であるM87 のブラックホールでは 18.9m の基線長でそれらのサイズ測定が可能である事を示した。さらに、ブラックホール回りの降着円盤の形状をドーナツ状と仮定した場合、ドーナツ状の穴や輝く領域の太さの違いも観測により検出できる事を示した[3]。

2-3. 地上実験

図1で示したX線干渉計を地上実験で性能測定するためには、二つの鏡に当てるコヒーレントなX線が必要となる。しかしながら地上の施設で離れた場所で可干渉なX線ビームを作る事は大変難しい。そこで、構成を少し変更し、図2に示す形状とした。これは、斜入射であるが、良く知られたマッハツェンダー型の干渉計に他ならない。現在図3に示すように、粗動ステージとピエゾ素子を使用した微動ステージを組み合わせた、光学系全般を組み上げることができた。また、可視光であるが、同形の干渉計で取得した干渉縞を図4に示す。一方、裏面照射CCDと本研究で開発したコヒーレント光源を組み合わせ、X線検出実験を行った。X線は Al-K α 線を使って 100 μ m および 20 μ m のピンホールを通したX線の像を撮像する事ができた。

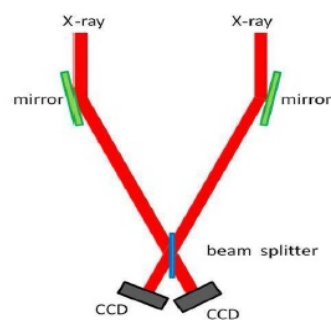


図1：新型 X 線干渉計の構成

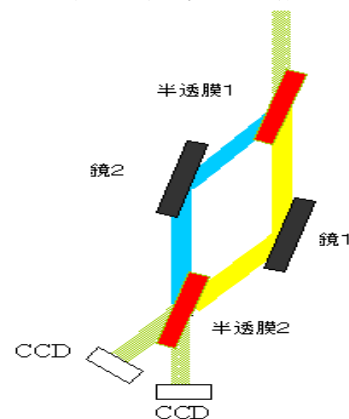


図2：実験室用の干渉計の構成



図3：実験のためにくみ上げたステージ

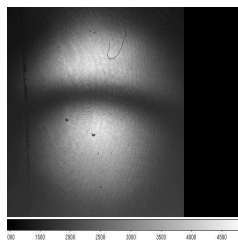


図4：可視光であるが、

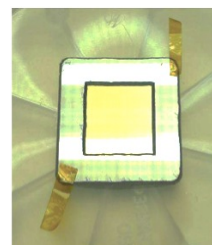


図5：試作した半透膜

2-4. テスト用反射鏡、半透膜の試作と性能評価

本開発では、半透膜の実現性が重要な鍵である。半透膜および反射鏡の Mo/Si 多層膜による試作品を製作した。完成した半透膜の写真を図 5 に示す。同時に試作した反射鏡とともに、平面度測定、反射率、透過率測定を行った。

平面度測定は、国立天文台にて Zygo 干渉計を用いて行った。その結果、反射鏡では $3\sim 6$ nm-rms、半透膜では $4\sim 7$ nm-rms であった。目標とする波長は 2nm であり、それに比べ大きい値である。しかしながら、この値は全体的な湾曲が原因である事、また、約 10 度の斜入射で使用する事を考慮すると、許容出来る範囲である。反射率、透過率測定は、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL11A でおこなった。測定結果と設計値によるシミュレーションの結果を図 6、図 7 に示す。鏡の反射率、半透膜の透過率はほぼ設計通りである事、半透膜の反射率は設計値より少し悪い事を確認した。これらの測定により、現在手に入る要素技術の性能を見極める事ができ、実験室での X 線の干渉の実証実験に向けて十分に可能性が有る事を確かめる事ができた。

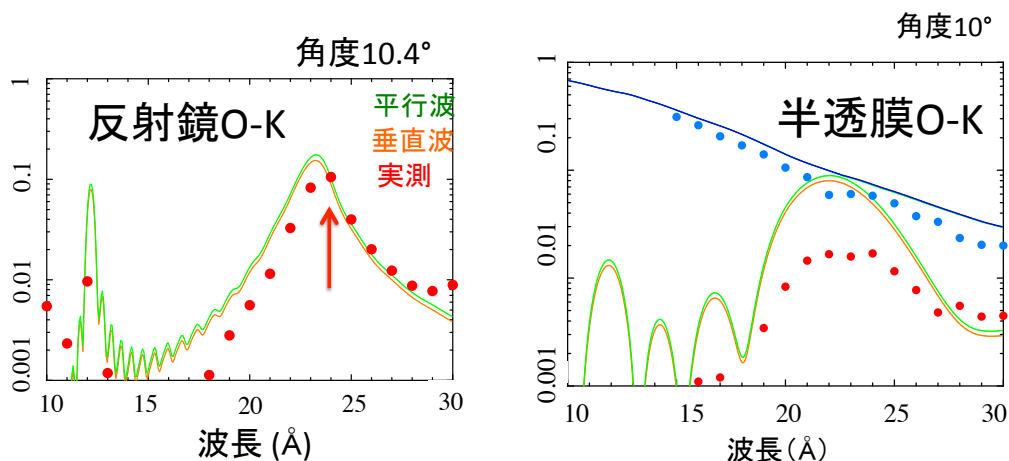


図 7：半透膜の反射率、透過率の実測値と計算値

3. X線補償光学を使った高精度直入射望遠鏡の開発

3-1. 目的

X線干渉計の開発とともに、到達分解能は悪いが、技術的には優しいと期待できる補償光学系を使用した、X線望遠鏡の開発も進めている。反射鏡等が作成しやすい直入射のX線望遠鏡であり、やはり、多層膜を使用している。可視光領域で既に実現している補償技術をX線用に導入する事で、ミリ秒角を目指そうとする計画(X-ray milli-arc-sec Project: X-mas Project)であり、開発している望遠鏡をX-mas望遠鏡と称している[4]。

3-2. 補償光学を使ったX線望遠鏡

図8に開発試験中の X-mas 望遠鏡の概念図を示す。撮像する対象からの X 線は、主鏡、可変形鏡である副鏡を反射し、裏面照射型 CCD で検出する。主鏡も副鏡も Mo/Si 多層膜コーティングにより波長 13.5nm の軟 X 線に対して 50%~70%の反射率を持つ。一方、ピンホールを通して照

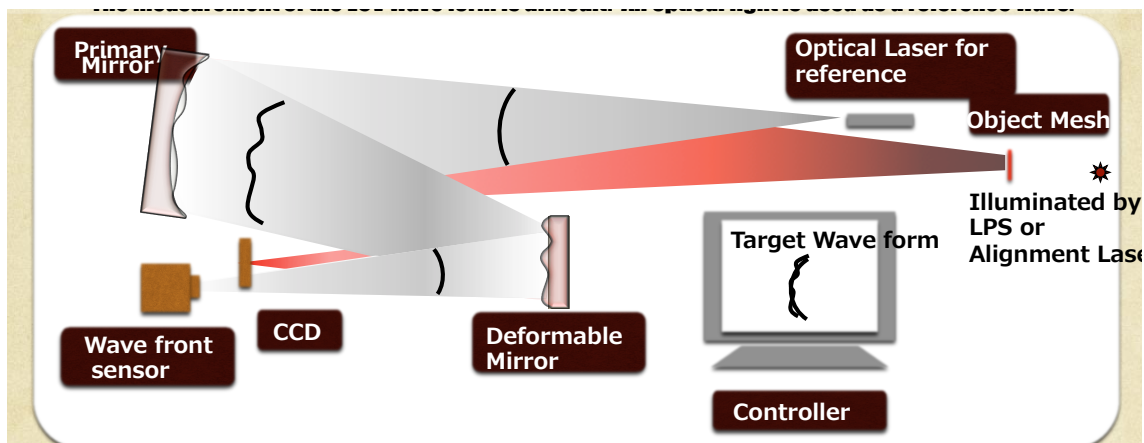


図8：X-mas 望遠鏡の概念図

射した可視レーザー光も、主鏡と副鏡で反射させ、この波面形状を波面センサーで測定する。測定した波面センサーのデータを解析し、波面のゆがみを補正するように、可変形鏡を制御する事で、目的の対象からの X 線像を良くする。

3-3. 性能評価実験

これまで、補償光学としての性能を評価する事が出来た。図9に 13.5nm 軟 X 線によるメッシュの撮像例を示す。メッシュは主鏡から 4.3m 離れた所にあり線の太さは $30\mu\text{m}$ である。上が単純な補償光学機能により撮像した物で、下が、可視光と軟 X 線では行路が異なる事を補正して

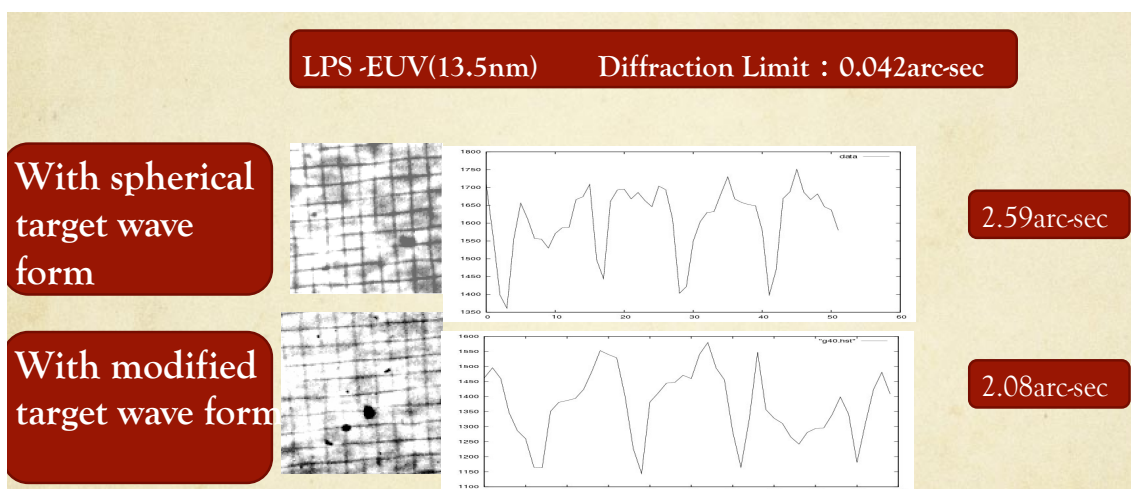


図9：X-mas 望遠鏡によるメッシュの撮像

補償を実施して撮像した物である。若干の改善が見られている。しかしながら現状での実現分解能は2秒角あまりであり、計算上の回折限界である42ミリ秒角にはまだ改良が必要である。

4. 電荷結合素子 (CCD) の新しい読み出し方法の開発

4-1. 目的

電荷結合素子 (CCD) は、X線撮像素子として大変優れた性能を持つ。 $\sim 10\mu\text{m}$ 程度の位置情報とともに、光子計数を実現することでX線のエネルギーを120eV (FWHM@6 keV) 程度で測定することができる。X-ray望遠鏡や、X線干渉計の撮像素子として大変有望である。しかしながら、CCDには、一つの欠点がある。それは、読み出しのための時間がかかる事、そのため、強いX線が素子の一部に集中してやって来た場合、パイルアップが生じる事である。パイルアップを避けるためのCCD駆動方式はこれまでも検討されて来たが、それぞれ、視野を犠牲にするもの、光子数を犠牲にする物、1次元の位置情報を犠牲にするものであった。それらと相補的となる読み出し方法を検討した。

4-2. Panning Mode

検討の結果、新しく考案した読み出し方法を Panning Mode と呼ぶ事とした[5]。CCDには、露光している状態と、露光中に蓄えた電荷を転送する状態があり、通常 (Normal Mode) は、一定時間の露光後に蓄えた電荷を読み出し口に転送する。このモードでは、露光中に一つのピクセルに複数の光子が入射するような場合にパイルアップが生じてしまう。特に、X線望遠鏡の焦点面検出器として使用する場合は、星像が決まったピクセルに写る。すなわち、星からの光子が決まったピクセルに集中する事になる。この集中を解消する事で、パイルアップを軽減できる。露光時間を読み出し時間より短くする事でも解消できるが、このばあい、読み出し中の時間をすべて露光に使用できないため、光子数が犠牲に成る。読み出し時間を短くする方法では、何らかの位置情報または、視野の一部を捨てる事に成らざるをえない。

そこで、Panning Mode では、露光中に少しの転送を行い、星からの光子が特定のピクセルに集中しないようにする。ただし、星像は点状である場合に限り有効である。このModeを実現させその性能を調べた。通常の Normal Mode での像と Panning Mode での像を図10に示した。

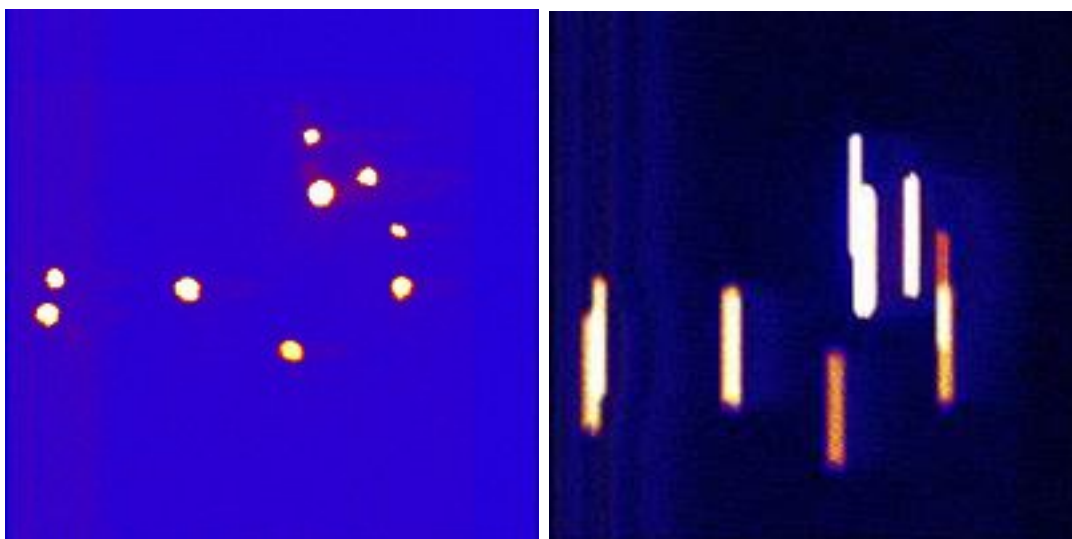


図10：(左) 通常 (Normal Mode) のイメージ。(右) Panning Mode のイメージ。

これにより、1次元の位置情報は悪くなるが、失われはしない。また、点像に対しては、パイルアップに対する耐性が格段によくなっている事がわかる。

5. 結論

本事業にて、X線干渉計の要素技術の開発、可視光であるが、干渉縞の取得を確認し、X線干渉計開発への目処を得る事ができた。補償光学望遠鏡では、報償光学による像の改善を確認できた。今後、性能向上のための問題点の改良が必要である。また、これら実験に伴い、撮像素子として有望な電荷結合素子 (CCD) の新たな読み出し方法を考案した。

参考文献

- [1] Kitamoto, S. 2014, invited talk in “Workshop on Atomically Controlled Fabrication Technology”, Osaka, Japan, Frb. 5-6, 2014
- [2] Cash, W., 2005, ASP Conference Series, Vol. 340,
- [3] Kitamoto, S. et al. 2012, Proc of SPIE8443E, 0XK
- [4] Kitamoto, S. et al. 2011. Proc of SPIE8147E, 57K
- [5] Murakami, H. et al. 2011. Proc of SPIE7803E, 9M
- [6] Umezu, R. et al. 2014, RSI, submitted

衛星搭載用可搬型計測器の開発

田口 真、鈴木秀彦

I. 真空紫外シュミットカメラ用非球面補正板製作技術の開発

1. 目的

地球超高層大気の酸素原子(OI)が放射再結合によって発する禁制線 135.6 nm の発光強度は電離層 F 層（ピーク高度約 240 km）の電子密度の自乗に比例する。この光を使って電離層 F 層高度の電離圏を撮像することによって、伝播性電離層擾乱やプラズマバブル等の電離圏電子密度擾乱現象の消長過程を可視化できる。しかし、これらの現象を捉えるためには F1 程度の明るく高効率の光学系が必要である。そのため、衛星から OI 135.6 nm 大気光を撮像するシュミットカメラタイプの真空紫外イメージャーの技術開発を行ってきた。

真空紫外領域のシュミットカメラとしては外国では ARGOS/GIMI の一例があるが、これまで国内では製作された例がない。補正板材質は 135.6 nm を透過する MgF_2 を使う。本研究は、2006 年度から開始された研究の継続として、技術的に未知である真空紫外用 MgF_2 シュミット補正板の高精度製作技術を開発する。これまでの研究で、純シュミットカメラから出発して、像面の平坦化、主鏡・補正板距離の縮小、補正板修正量の最小化、結像性能を最適化した設計を行った。 MgF_2 補正板研磨技術開発として、ダイヤモンド研削と磁性流体研磨の応用可能性を調べた。

2. 研究成果

2009 年度の研究によって、高精度ダイレクト研削によって、回折限界性能を有する球面の製作が可能であることがわかった。2010 年度は、当初研究計画を繰り上げて 2009 年度に製作された 1/2 スケール非球面シュミット補正板の面評価を実施した。フィゾー型干渉計を使って面評価を実施するために必要なヌルレンズを製作した。ヌルレンズとは複数枚の球面レンズを組み合わせて、シュミット非球面補正板のパワーを打ち消すレンズ系のことである。ヌルレンズと非球面シュミット補正板を組み合わせたレンズ系に入射した平行光は、非球面シュミット補正板が設計通りにできていれば平行光として出力されるが、設計との誤差が干渉計を通したときに干渉縞として現れる。それを観察することで非球面シュミット補正板の面形状を評価する。

表 1 に製作した非球面シュミット補正板の仕様を、表 2 に非球面シュミット補正板及びヌルレンズ系のレンズデータを示す。

表 1 シュミット小型モデルの仕様

項目	値・仕様	制約条件
材料	MgF_2	フライトモデルの補正板と同じ材料
波長	632.8 nm	ヌルレンズを干渉計で評価するため、HeNe レーザーと一致させる
視野	1°(FOV)	軸上で評価するのではほぼ 0°だが干渉計のルール上のズレを考慮する

F 値	1.0	フライトモデルと一致させる。最大サグ量や最大偏角が F 値に強く依存するため
補正板の外径	有効径 φ 50 mm	基板 65×5t(mm)を使用する
補正板最大サグ量	0.25 mm 以上 0.56 mm 以下	フライトモデルの値と過去の凹球面研磨試験における量
補正板最大偏角	28 分角以上 4.3°以下	同上

表 2 補正板+ヌルレンズ光学系のレンズデータ

エレメント番号	面番号	面形状	曲率半径 [mm]	次の面との面間隔 [mm]	材質	エレメント半径 [mm]
1	1	平面	無限	4.50	MgF ₂	28.0
	2	非球面	-754	43.8		28.0
2	3	球面	-196	9.00	SBSL7	28.4
	4	球面	-80.5	0.50		28.7
3	5	球面	-258	5.0	SBSL7	28.2
	6	球面	220	5.0		27.9

波面測定でのコマ収差が最小となるようにヌルレンズ2枚を固定したままMgF₂補正板とヌルレンズの偏芯調整を行った。偏芯調整の結果、波面収差のピークと谷の差(PV)は波長135.6 nmに対し約0.864 λとなった。FUVIのフライトモデルでは中心に検出器が置かれるため、入射光束の中心部分は遮蔽される。そこで、検出器の大きさであるφ27 mmにマージンを追加して中央のφ28 mmを遮蔽し、透過波面を評価した。図1のように波面収差のPVは 0.527λ@135.6 nm となった。この値はまだ回折限界性能には到達していない。

次に、FUVI が回折限界性能を必要とするかについて検討する。光学系の F ナンバが 1.0 であることから光学系が回折限界に達している場合のレイリー限界は像面において $1.22\lambda F = 0.165 \mu\text{m}$ である。一方、この像面に置かれる検出器の仮想的な画素寸法は $200 \mu\text{m}$ であるため、結像光学系が回折限界の性能を有していても、画像解像度は検出器サイズによって決定されていることがわかる。すなわち、今回、 MgF_2 非球面シュミット補正板の試作に用いた高精度ダイレクト研削技術を補正板製作に適用すること

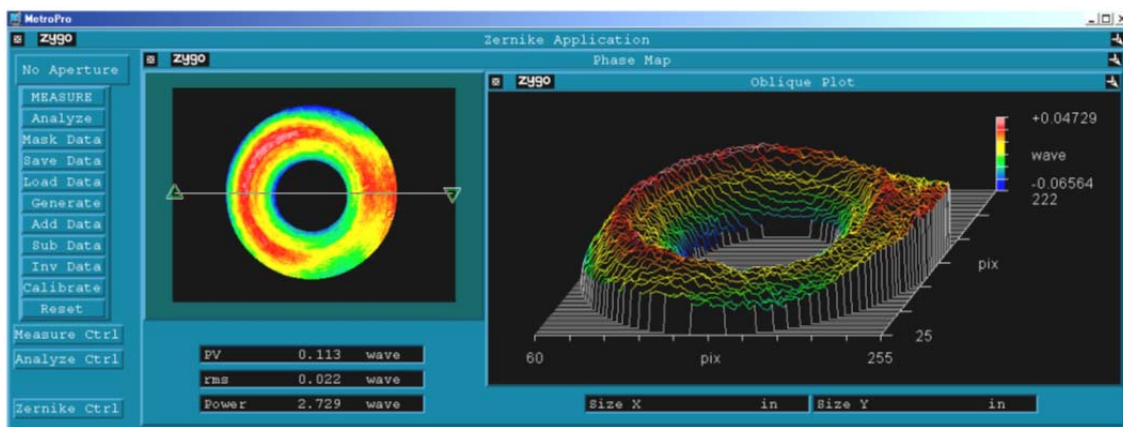


図 1 フライトモデルと同等の検出器による中心遮蔽($\phi 28\text{mm}$)を考慮して解析した透過波面。

で、試作した MgF_2 補正板と同程度の面精度を有する補正板を用いて真空紫外シュミットカメラを構成すれば、空間分解能に関する要求仕様を満たすことができると結論づけた。

II. 水素・重水素吸収セルの開発

1. 目的

これまでの火星探査や地上観測から、火星にはかつて流水が存在していたと考えられている。しかし、現在の火星には大気中に水蒸気の形で、また極冠に氷としてごくわずかに、そして地下に氷として存在することが確認されている。この理由としては、火星形成時に存在した水の大部分が宇宙空間に散逸したからだと考えられている。火星は重力が小さいので、大気は脱出速度を超えるエネルギーを比較的容易に獲得して散逸が可能だからである。また、火星の固有磁場は非常に弱いので、太陽風と火星大気が直接相互作用する。その結果、電離層の一部が剥ぎ取られて流れ去っていくことが予想される。

火星大気中の水に含まれる水素は光解離によって水素原子(H)となり熱的及び非熱的散逸過程により、火星大気から宇宙空間へ散逸する。そのとき、重水素(D)は水素に比べて重いので、大気に残りやすい。そのため、形成初期と現在の火星大気中の D/H 比を比べることで、過去に水がどれだけ散逸したかを推定することができる。将来の火星探査機に搭載し、火星コロナの水素ライマン α 光を観測する水素・重水素吸収セルを開発することを目的とする。

2. 水素吸収セルの原理

水素と重水素のライマン α 光は波長差が 33 pm しかなく、これらを分離でき探査機に搭載できる小型軽量の分光器は実現困難である。そこで、水素ガスと重水素ガスを封入したガラスセルを水素ライマン α 光のネガティブフィルターとして用いる。ガラスセル内に封入された水素ガスは、セル内のフィラメントを点灯すると

熱解離して水素原子になる。水素原子は共鳴散乱によって水素ライマン α 光を選択的に散乱させ、セルを透過させない。重水素セルも重水素ライマン α に対して同様の効果がある。直列に並べた水素吸収セルと重水素吸収セルを通したライマン α 光は、水素セルまたは重水素セルのフィラメントを点灯させることで減少した分として分別して検出される。吸収セルボディーの材料として金属ではなくガラスを使用する理由は、脱ガスが少なく、水素原子が分子に戻る表面反応が遅いためである。セルの窓材としては水素ライマン α 光の波長 121.6 nm の光を透過し、安定な MgF_2 結晶を使用する。

3. 大口径吸収セル開発

3.1 振動試験

ロケットで探査機を打ち上げる際に、観測機器には大きな振動がかかる。観測機器はそれに耐える性能を持っている必要がある。吸収セルイメージャーはガラスセルという構造上脆い部品を搭載している。「のぞみ」UVS はかなり高いレベルの振動試験をクリアした実績があるが、今回試作するセルはガラスや窓材の肉厚は UVS のセルと同じで、管の直径が約 2 倍になっているため、振動や衝撃に対してより脆弱である可能性がある。そのため振動試験は必須である。

2011 年度の研究では、火星探査機「のぞみ」搭載紫外撮像分光計用に開発された吸収セルと比較して、口径を倍増したガラス管に MgF_2 の窓を取り付けただけの吸収セル構造モデルを製作した。2012 年度は、この構造モデルを振動試験に供した。振動試験には JAXA(相模原キャンパス)の小型振動試験機を使用した。この振動試験機は 1 軸方向にしか加振することが出来ない。そのために、試験治具に吸収セルを固定する向きを変えることで、3 軸方向別々に加振した。

まず、 MgF_2 窓を融着していない吸収セルを試験した。振動波形は 20 Hz~2000 Hz の周波数で、50 Hz~1000 Hz がフラットなスペクトルのランダム波を使用した。全体の加速度は 12 Grms で 1 分間振動させた。この条件で向きを変え 3 回行った結果、吸収セルの破損は見られなかった。その後、同じ条件で MgF_2 窓を融着した吸収セルを試験した。3 軸共に破損することはなかった。今回の振動試験レベルは振動試験機的能力によって制限された。今後、より大型の振動試験機を使ってさらに高いレベルの振動に耐えられるか試験により確認する必要がある。

3.2 耐圧試験

吸収セルは水素ガスまたは重水素ガスを封入すると、外気とは完全に遮断され密閉される。その状態で外気圧が変化したときに、外部と内部の圧力差に耐えることができるか試験する。吸収セル内部に封入するガス圧はおよそ 1/100 気圧(10^3 Pa)を予定しているので、それを基準に試験条件を設定した。

まず、大気中では吸収セルにほぼ 1 気圧の外圧がかかる。窓付きの吸収セルの内部を排気して、大気圧に耐えることができるか試験する。吸収セルを真空ポンプに接続し、内部を排気する。排気中にセルが破損しても真空ポンプに被害が及ばないように、配管を工夫した。真空ポンプを使い 2 時間程かけ吸収セル内部を 10 Pa に減圧した。その後、バルブを閉じることによって、吸収セルと真空ポンプを遮断した。その状態で吸収セル内圧力をモニターしながら 24 時間放置したが、吸収セルの外観上も吸収セル内圧力ともに変化はなかった。吸収セルは外部から大気からかかる圧力に耐える性能を持つことが確認された。

次に吸収セルが宇宙空間にあるときは 1/100 気圧(10^3 Pa)の内圧がかかる。吸収セルがこの条件に耐えられるか試験するために、吸収セル内部を外気と遮断した状態で、温度変化による圧力変化(シャルルの法

則)を利用して、内圧試験を行った。外気温 16.5°C のとき、吸収セルとそれを塞ぐ器具を外気にさらした状態で1時間以上放置した。それらの温度が外気と同じになった状態で、吸収セルを密閉した。その状態を維持したまま、気温 25°C の室内に放置した。シャルルの法則より、体積を一定に保ったまま温度を 16.5°C のから 25°C まで上昇させると内圧はおおよそ 290 Pa 高くなる。これは宇宙空間でかかる内圧 100 Pa よりも十分高いので、吸収セルは内圧に耐えることが確認できた。

3.3 吸収セル製作装置の開発

吸収セルに水素を封入するための排気及び水素ガス供給装置の開発を進めた。高性能な吸収セルを製作するためにはベーキングしながら高真空に排気できる性能が必要である。ガラスが溶けない 200°C ぐらいでベーキングする。ガラス管と真空排気装置の金属配管の接続部分もその温度でベーキングするため、シール部もその温度に耐える必要がある。充填する水素ガスの純度も高くなければならない。特に重水素を充填する際には、コンタミネーションとして水素の混入を避ける必要がある。そのためにパラジウムフィルターを用いる。パラジウムフィルターとは、加熱したパラジウムの原子間がちょうど水素分子だけが通り抜けられる間隔であることを利用して、水素ガスのみを高純度で取り出すガスフィルターのことである。

吸収セル製作装置用排気装置は以前に別のプロジェクトで使用していたものを流用した。吸収セルをベーキングしながら排気するためのアダプター、ヒータ、支持治具を新たに設計製作した。高純度水素ガスを購入し、パラジウムフィルターを通して排気装置に配管接続した。

水素ガスを使用するにあたって安全に十分に配慮する必要がある。水素ガスボンベはドラフトチャンバー内に設置し、バルブを開けるときには必ずドラフトチャンバーを稼働させる。吸収セル製作装置の排気もドラフトチャンバーに導く。水素ガスが漏れると爆発の危険があるため、水素ガス警報器を設置する。水素ガス警報器は 2012 年度内に設置予定である。警報器の設置が済むまでは水素ガスボンベのバルブは開けない。

3.4 吸収セルの試作

2012 年度には吸収セルを試作するために、ガラスボディーの製作を行った。また「のぞみ」UVS に搭載した吸収セルを製作した際に購入した大量のフィラメントの中から、実際に使用されたフィラメントの選定を行った。フィラメントはボタンステムと呼ばれる電極を通したガラス部品を使ってガラスボディーに取り付けられる。ボタンステムへのフィラメントの溶接を行った。

2013 年度にボタンステムと MgF_2 窓のガラスボディーへの取付けを浜松ホトニクスに依頼した。図 2 に試作された吸収セルボディーの写真を示す。まだ内部に



図 2 試作された口径 50 mm の吸収セルボディー。まだ内部に水素ガスは封入されていない。

水素ガスを封入する作業は実施していない。フィラメントは 2 個のボタンステムに 4 本ずつ取り付けられている。ボタンステムの金属と接するガラス部分に大きな歪みがあり、クラックが入ることが多く作業性が悪いという問題がある。

今後、フランスの SOLEIL/DESIRS beamline を利用した吸収プロファイル測定を計画している。

惑星探査機搭載用分光器の開発～真空紫外分光による K-Ar 年代測定～

亀田真吾

概要

月表面が形成された年代は現在でも議論が続いており、アポロ計画によって 40 年以上前に地球に持ち帰られた岩石の年代測定結果に大きく依存している。一方、以降に打ち上げられた極軌道周回衛星により、アポロの着陸点は鉱物分布の観点から見ると特殊な場所に集中しており、月全球を代表していない可能性が高いことが分かった。そのためアポロの着陸地点とは異なる場所での年代測定が急務となっている。しかし、現在その場で年代測定を行なう技術は確立しておらず、アポロ計画以降に月試料を持ち帰ることも出来ていない。本研究ではこの状況を打開するために、月着陸機にレーザ誘起絶縁破壊分光装置(LIBS)を搭載し、その場での K-Ar 年代測定法によって着陸点付近の形成年代を求めることを目標とした。LIBS によって K を定量し、脱ガス質量分析によって Ar を定量する手法は既に考案されている。しかし現時点では、Ar 定量に必要な質量分析装置は大型であり、着陸機搭載に向けた小型化の目処が立っていない。本研究では、質量分析装置を使わずに K/Ar 比を計測する方式を提案した。具体的には、レーザアブレーションで放出された Ar が発する真空紫外領域の輝線を分光測定し、LIBS のみで K と Ar の両者を計測する手法の確立を目指した。この手法では同一試料から発生する K と Ar を同時測定するため、試料質量測定も不要となる。これにより装置の大幅な小型軽量化が可能となり、月着陸機を用いたその場の年代測定の実現性を飛躍的に高める事が期待される。

1. 地上実験用真空紫外 LIBS 装置

計画当初は配分予算の制約から既存の真空紫外分光実験設備を利用して実験を行なうことも検討していたが、既存の市販の分光器では Ar 輝線 105nm 付近の効率が非常に低いという問題があった。また、十分に効率が高い他機関の設備は存在するが、汚染の危険性のある岩石アブレーション実験を共同利用の設備では行なう事が困難である、ということから既存の設備を利用する事を断念し、Ar 輝線分光に特化した装置を設計・製作して実験を行なうこととした。図 1 に装置の設計図、図 2 に外観を示す。

1-1 Nd:YAG レーザ+集光光学系

アブレーションのために使用したパルスレーザのエネルギーは 50mJ、パルス幅は 4-8ns である。ビームエキスパンダを用いてビーム径を 3mm から 10mm に広げることにより、レーザの広がり角を低減し、岩石試料表面において $\sim\phi 0.5\text{mm}$ 程度の集光スポット系が得られる。これにより岩石試料(カリ長石)やアルミニウム合金表面でアブレーションを起こすために十分なエネルギー密度が得られることを確認した。

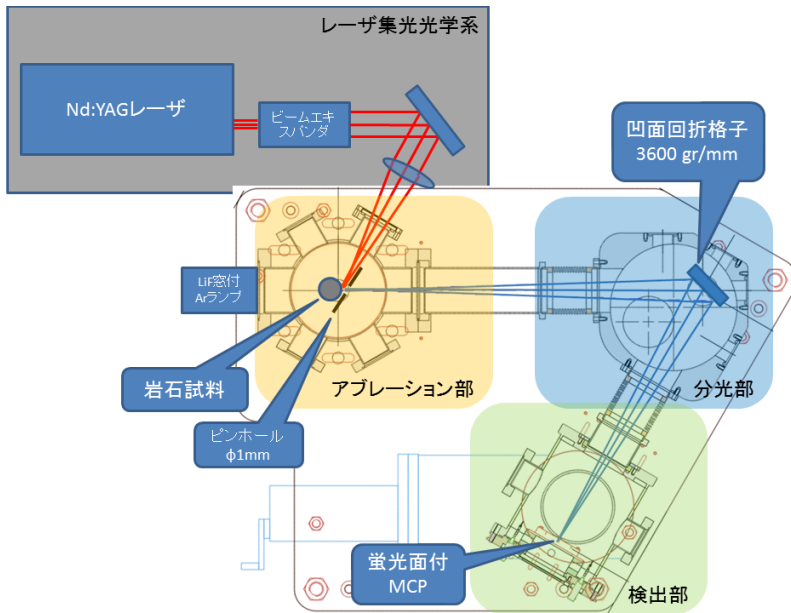


図 1 Ar 検出用真空紫外 LIBS 装置設計図

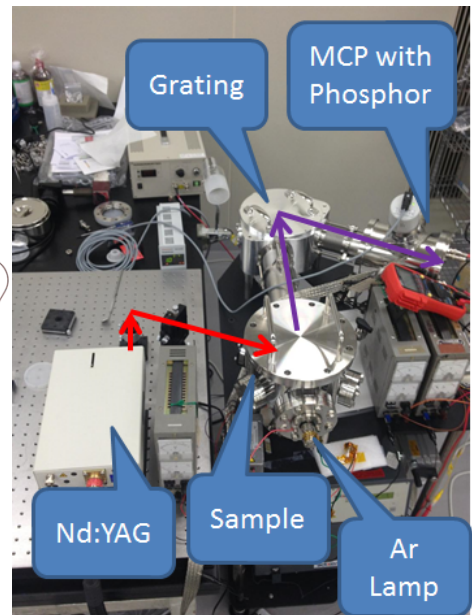


図 2 装置外観

1-2 アブレーション部

測定対象の表面上にレーザを集光させ、発生するプラズマプリュームの発光を分光器に導入する。特にレーザ集光点付近における強度が高いため、集光点を極力ピンホールに近づけるように集光光学系で調整を行なう。試料の同じ地点にレーザを照射し続けると表面が削られプラズマ発光が捉えにくくなる。これを避けるためには岩石試料表面におけるレーザ集光点の位置を変更する必要があるが、分光のためにピンホールとの相対位置を固定する場合、試料側を動かす必要がある。試料の位置移動を効率的に行なうために、直進導入器やベローズを用いた水平駆動機構を用い、真空中で試料台を 3 軸方向に動かせるようにした。また、波長較正のために電極放電式の Ar ランプを設置し、試料台を昇降させることで真空を保ったまま較正用のデータを取得できるようにした(図 3)。

1-3 分光部

Ar 輝線と他の元素輝線を識別するのに充分高い波長分解能を得つつ、効率低下を防ぐため 3600gr/mm の凹面回折格子を使用した。105nm 波長域において、1 次回折光の分散方向が検出器平面と概ね平行になるように設計した。回折格子の回転角度は 24 度程度までに限られているが、真空を保ちつつ 0 次光と 1 次光を検出器に導く事ができる。図 4 に Ar 輝線(104.82nm, 106.67nm)のスポットダイヤグラムを示す。本装置では球面回折格子を用いたため、点像が分散方向と垂直方向に広がってしまうが、分散方向には 2 つの Ar 輝線を分離するには充分狭い集光スポットが得られている。

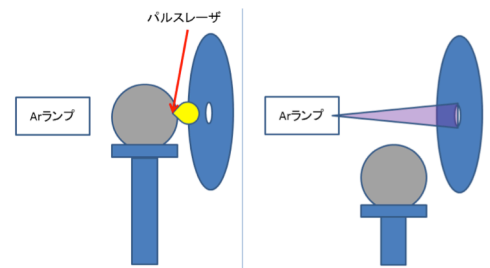


図 3 LIBS 測定と Ar ランプによる較正

1-4 検出部

検出器は 2 段 MCP と蛍光面で構成されている。MCP により真空紫外光を電子に変換し、蛍光面で可視光に変換する。蛍光面側に光学窓を設置し、真空槽の外から蛍光面像を撮影する事によってスペクトルが得られる。図 5 に Ar ランプのスペクトル像を示す。蛍光面右側に 2 波長の Ar 輝線が集光され

た像を確認する事ができる。中央付近には迷光が到達しているため、検出面の一部のみを用いて測定を行なう事とした。検出部真空槽の下部に排気装置を取り付けることで、MCP や蛍光面に高電圧を印加可能な $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 程度の真空度が達成される。アブレーション時にはガスが放出されるが、カリ長石にレーザを照射した際の気圧上昇は大きくなく、高電圧の印加には問題が無い事を確認した。

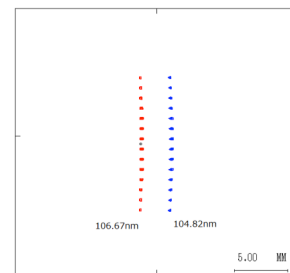


図 4 Ar 輝線のスポットダイアグラム

2. 測定結果

測定にはカリ長石(岐阜県蛭川)を使用した。本測定で使用した試料の年代は不明であり、月面などの岩石より固化年代は新しいと推定されるが、K の量が多いため Ar が含まれている可能性がある。

レーザを 1Hz で照射しつつ、蛍光面を露出時間 1.5 秒で 50 枚撮像した。露出時間が充分長いため、各画像で必ず分光データが得られている。プラズマの発光時間は $\sim 10 \mu\text{s}$ 程度と露出時間に対して非常に短いため、蛍光面を撮像する CCD をトリガー駆動することにより S/N を向上する余地がある。今年度はトリガー駆動式を導入できなかったものの、1度のレーザ照射によって背景光に対して充分強い輝線発光を検出することができた。得られたスペクトルを図 6 に示す。Ar 輝線 106.67nm と非常に近い波長の輝線が検出されたが、もう 1 つの Ar 輝線 104.8nm は検出されなかった。次項ではここで検出された輝線について考察する。

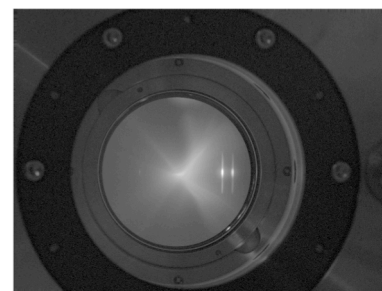


図 5 蛍光面に投影された Ar ランプのスペクトル像

3. 検出された輝線

Ar 106.67nm 付近にはその他の原子・イオンの輝線も複数存在する。この分光装置において Ar ランプ輝線の広がり半値幅 0.3nm であった。Ar ランプの温度・圧力は充分低いためこの広がり装置関数によると考えられる。NIST Atomic Spectra Database Lines Data によると、 $106.67 \pm 0.15 \text{nm}$ の波長範囲には 73 本の原子・イオン輝線が存在する。今回検出された輝線はそのうちの 1 つ、あるいは複数の組み合わせであると考えられる。

73 の輝線のうちアインシュタイン係数が求められているのは 27 本であり、同種イオンの複数輝線が含まれているため原子・イオン種は N I, N II, O IV, Na VI, Mg VI, Mg VIII, Si IV, P IV, S XII, Cl II, Ar I, Zr III, Xe I の 13 種に限られる。今回測定した波長範囲における、これらの種の輝線とアインシュタイン係数から予測される輝線強度の相対値を図 7 に示す(S XII は省略)。測定波長範囲において、Si IV と S XII には 106.67nm 付近に 1 つだけ輝線があるが、その他の種には他にも同程度かそれ以上の強度の輝線がある。他の輝線が見えないという事はそれらの種の密度が低いということを示すと考えられる。また S XII 106.7nm はエネルギー準位 371.73eV から 360.11eV への脱励起時に生じる輝線であり、アブレーションによって生じるプラズマプリュームの最

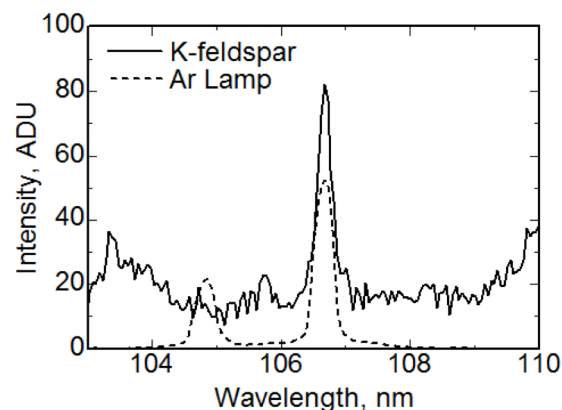


図 7 カリ長石の LIBS スペクトル

高温度が 1eV 程度であることを考えるとこのような遷移が起きる確率は非常に低い。消去法で Si IV 106.66nm が残るが、こちらも 31.51eV という高いエネルギー準位から 19.88eV への脱励起時に生じる輝線である。岩石中の Si の量は多いが、全ての Si が 3 価のイオンになるわけではない。また、平均エネルギーを 1eV としたボルツマン分布に従う場合、31.51eV のエネルギーを得るイオンの割合は 2×10^{-14} となり、非常に微量となる。さらに、Si III の輝線 108.32nm は Si IV 106.67nm より強度が高いはずであるが検出されておらず、Si III より Si IV の方が安定して存在することは考えにくい。半波長の輝線の 2 次回折光である可能性もあるが、 $53.33 \pm 0.08 \text{ nm}$ の範囲の輝線を調べてもほぼ同様である。

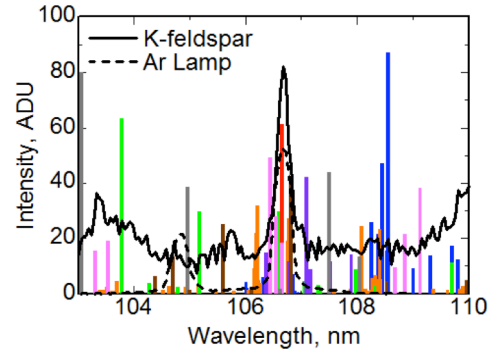


図 7 各種の輝線波長と相対強度
青 N I-II, 橙 O IV, 緑 Mg VI,VIII, 赤 Si IV,
桃 P iv, 紫 Cl II, 灰 Zr III, 茶 Xe I

4. Si 試料測定と輝線の判別

Si IV の輝線であるかどうかを判別するために、高純度 Si 試料で輝線測定を実施した。結果を図 8 に示す。この条件で 106.66nm の輝線が検出されたことから、カリ長石の測定で検出された 106.66nm の輝線について、岩石中に含まれる Si の輝線の輝度が支配的であるという結論に至った。LIBS 測定において、大気中で生成されるプラズマ温度は照射するレーザーのエネルギー密度にほとんど寄らず、約 1 万 K 程度 (~1eV 相当) であり、YAG レーザの光子あたりのエネルギーも 1eV 程度であるが、真空中では数十 eV 程度のプラズマが生成される、ということが分かった。このことから、Ar が発光するのに十分なエネルギーが得られていると考えられる。また、エネルギー密度に応じて Si III と Si IV の強度比が変化するという結果も得られており、エネルギー密度を制御することによってプラズマの温度を制御することが可能である。今後は、Si IV を抑え、Ar I が相対的に検出しやすくなるようにエネルギー密度を最適化し、Ar 輝線の検出を目指す。

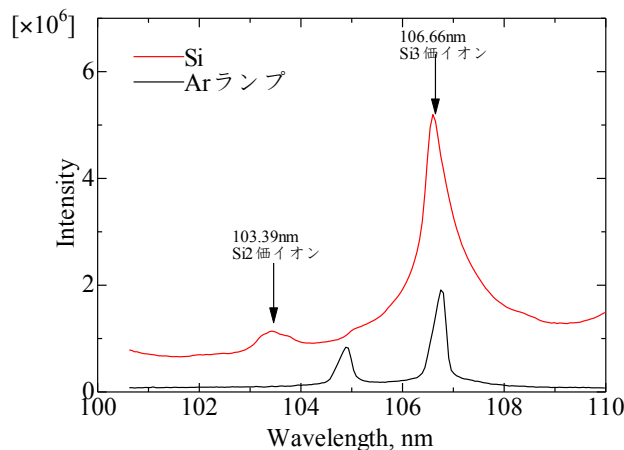


図 8 Si(99.9999%)試料のスペクトル(赤)と Ar ランプのスペクトル(黒)

宇宙ブラックホールの探求：一般相対性理論によるブラックホールの研究

原田知広、小林努、西條統之、前田秀基、宮本雲平、宝利剛

概要

本グループは「ピコスケール精密計測技術開発」事業において「ブラックホールの理論的探求」の部分を担当してきた。近年、ブラックホール物理学は宇宙物理学・宇宙論・重力波天文学・素粒子物理学・物性物理学などの様々な分野で中心的役割を果たすようになっており、我々が一般相対論・その他の重力理論を用いて行うブラックホール研究も多岐にわたる。本グループが行う研究は全て理論的研究であるが、それらの結果は天文観測・加速器実験・実験室実験になんらかの示唆を与えるものであり、本事業で行われる技術開発の動機・方向付けを目指してきた。我々は、高速回転ブラックホールの形成過程を解明し、相対論的回転星の永年の不安定性に関する数値シミュレーションに取り組んだ。高速回転ブラックホールによる粒子加速の一般性を明らかにし、超回転星の観測による識別の可能性を示唆した。高次元ブラックホールの相転移と流体力学のそれとに対応があることを明らかにし、流体力学における新しい不安定性を発見した。最も一般的なスカラートensor理論でのブラックホール解の安定性条件を与え、共形スカラール場の毛をもつブラックホールが回転に対して不安定であることを示唆した。最も一般的なスカラートensor理論に基づくインフレーション宇宙論について揺らぎの計算などを行った。初期宇宙で形成される原始ブラックホールが形成されるための原始密度揺らぎに対する条件を調べた。高次元ブラックホールの量子化を行った。時空の対称性を尊重した高次元厳密解の生成を行い、また与えられた時空の対称性の個数に対する上限公式を得た。これらの成果は、本グループのメンバーの有機的な結びつきの結果得られたものである。

1. 高速回転ブラックホールの形成過程

西條らは、ブラックホール形成後の動力学を解明すべく、差動回転する超大質量星の重力崩壊の一般相対論的3次元流体シミュレーションを行い、星の差動回転を考慮すればより高速回転するブラックホールが形成可能であることを示し、世界で初めて回転パラメータが0.95程度の数値ブラックホールを形成することに成功した。そして、次の描像を得た。まず、超大質量星は単位質量あたりの局所的な角運動量を保存しながら崩壊し、ブラックホール形成に至る。その後、ブラックホールは、ある半径内に存在するまわりの流体素片を吸い込みながら成長する。星の重力崩壊によってブラックホールとディスクの系が形成される場合には、ディスクの存在による準周期的な重力波も発生することを発見し、ブラックホ

ールが非常に速く回転している場合、この準周期的な重力波は時間とともに増幅する傾向にあることを示した。この増幅の要因として、ディスク中の流体素片の運動、衝撃波の生成、ディスクの不安定性（共回転共鳴）が考えられる。

西條は動的な地平線上の曲率の多重極モーメントを詳細に解析することにより、動的ブラックホールの角運動量の定義や定常ブラックホールへ収束する進化の過程という基本的な問題にも重要な洞察を得ることに成功した。また、動的に形成されたブラックホールは、たとえ形成時にその形状が定常ブラックホールのそれからかけ離れていても、崩壊前の星の回転周期程度のタイムスケールで定常ブラックホールに落ち着くことを示した。さらに、ブラックホールの準固有振動後に発生する新しいフェーズの重力波の波形を動的なブラックホールの多重極モーメント等を用いて解析し、その発生源の特定を試みた。

相対論的回転星に現れる様々な静的な不安定性を動力学的に研究するためには、系に含まれる動力学的な時間スケールの運動を殺す必要がある。音波の伝搬は航空工学的な近似を施すことにより、また星の回転周期は一様回転を仮定して共動座標系に乗ることにより、殺すことが可能である。こうした手法を用いて、西條は相対論的回転星の永年的な時間スケールの変化を研究するための基礎方程式の数学的定式化に成功した。次に回転星の永年的な不安定性の一つであるある重力波放出に伴う r モード不安定性を研究すべく、ニュートン重力場中の流体動力学に重力波放射反作用の最低次である $2.5PN$ の質量四重極モーメントを取り入れた形式の 3 次元流体動力学の数値解析コードを新たに開発した。そして、従来の研究と比較して 100 倍以上長い時間スケールの時間進化が可能なこと、不安定性の持続する時間スケールは少なくとも動力学的時間スケールの 100 倍よりは長いこと、不安定性の重力波に対する飽和振幅は弱非線形理論のモデルの結果を支持すること、等を明らかにした。最後に r モード不安定性により本質的に効く重力波放射反作用 $3.5PN$ の流速四重極モーメントを取り入れたモデルで数値的に研究し、反作用 $2.5PN$ の質量四重極モーメントの結果と定性的にはほぼ一致する示唆を得た。これは回転星の r モード不安定性の最終状態には、系の不安定性によって励起されるモード間相互作用の非線形性が本質的に重要であることを意味している。

2. 高速回転ブラックホールと超回転星の宇宙物理学

Einstein 方程式の真空厳密解である Kerr ブラックホールには回転パラメータに上限が存在する。この回転パラメータが上限に近い場合には、ブラックホールがその周りの粒子を加速することが発見された。原田らは、粒子加速器としての高速回転ブラックホールがもつ宇宙物理学的な意義についてしらべるため、高速回転ブラックホール周りの最内安定円軌道を運動する粒子と他の一般的な落下粒子との衝突エネルギーが非常に高くなることを示した。さらに、高エネルギー粒子衝突が高速回転ブラックホールの赤道面上のみならずそこから外れた軌道でも起こることを示し、粒子加速が赤道面以外のブラックホール地平線付

近でも起こることを示した。

原田らは、回転ブラックホールの地平線付近の荷電粒子の衝突において回転と磁場の相互作用によって衝突エネルギーが著しく高くなることを示した。原田・宮本らは、高速回転ブラックホール付近の高エネルギー粒子衝突によって放射される粒子のエネルギーと質量に非常に強い上限を与えた。これにより、ブラックホール付近で高エネルギー衝突がおこっても、それによって生じた高エネルギー粒子を遠方で直接観測することはできないことが分かった。その一方、原田・宮本らは、回転ブラックホールの付近で加速される粒子による高エネルギー衝突では無限遠方へ高エネルギー粒子が到達することは出来ないのに対して、これと類似の現象であると考えられている荷電ブラックホールによる荷電粒子の加速では無限遠方に高エネルギー粒子が到達しうることを示した。また、原田らは高次元極限回転ブラックホールについて4次元の場合と同じような粒子加速が起こることを示し、極限回転ブラックホールの不安定性の一種とみなせることを示唆した。

Kerr 解において回転パラメータが上限を超えると裸の特異点が現れる。最近、この裸の特異点が弦理論的な効果によって正則化される可能性が示唆され、そのような天体は超回転星と呼ばれている。原田らは、ブラックホールと超回転星との降着円盤からの放射光をそれぞれ計算し、定常的な熱的放射の観測だけは超回転星とブラックホールを識別できる場合とできない場合があることを示した。さらに原田らは超回転星へのガスの非定常的降着に関する一般相対論的数値流体シミュレーションを行い、爆発的な物質噴出現象などの特徴的な現象を発見し、非定常現象の観測によって超回転星が識別できる可能性を示唆した。

3. 高次元ブラックホールとブラックホール=流体対応

大きな余剰次元を伴う高次元宇宙モデルは、加速器による微小ブラックホールの形成を予言する。原田と宮本は、これまで見逃されてきた、加速器実験における裸の特異点形成の可能性を考察した。その結果、高次元宇宙シナリオが正しければ、ブラックホールよりも裸の特異点がよりたやすく形成されることを指摘した。また、宮本らは、高次元宇宙理論において裸の特異点形成が起こった際の粒子生成を評価し、実験・観測的にブラックホール形成とどのように区別されるかを明らかにした。

高次元ブラックホールの顕著な特徴は不安定性と相転移の存在であるが、これらの性質を非線形領域まで解析することは困難であり、新たなアプローチが求められている。宮本はブラックホールと流体の双対性に着目し、流体力学でブラックホール・ダイナミクスを解明することに取り組んだ。特に、流体計算によってブラックホールの不安定性を解析する強力な近似法を開発した。さらに、そこから派生する流体力学の基礎研究において、表面張力で支えられた流体における新しい不安定性を発見した。

4. スカラー場とブラックホール

スカラー場は宇宙論・宇宙物理学・素粒子論のさまざまな場面で登場する。近年、スカラー場と計量から構成され、運動方程式が 2 階になる最も一般的な理論(ホルンデスキ理論)が(再)発見され、盛んに研究されている。小林らは最も一般的なスカラー・テンソル理論におけるブラックホールについて、奇パリティ摂動の解析をおこなった。奇パリティセクターの解析に続いて、偶パリティセクターについて、摂動の従う 2 次のラグランジアンを書き下し、そこからブラックホール解が安定であるための条件を導出した。ホルンデスキ理論は 4 つの任意関数の自由度を持つが、これに対し、安定性条件から制限をつけることが可能になった。

一方、重力と共形的に結合するスカラー場の場合には、それが非自明な配位を持つ球対称ブラックホール厳密解である Bocharova-Bronnikov-Melnikov-Bekenstein (BBMB) 解が存在し興味を持たれている。現在までに BBMB 解に回転を加えた厳密解は見つかっていないが、前田らはゆっくり回転する BBMB 解を摂動的に求めた。この解ではブラックホール半径の二倍の位置で計量が発散する。これは、BBMB ブラックホールが回転すると裸の特異点が発生するかスカラー場が自明になってしまうかのいずれかであることを示唆している。

5. 初期宇宙とブラックホール

小林らは、Horndeski 理論に基づいて、既存のすべての Higgs インフレーションモデルを統合的に扱うことができる「一般化された Higgs インフレーション」を提唱し、一様等方宇宙のダイナミクスならびに密度揺らぎのスペクトルの解析・再加熱期に関する研究をおこなった。また、小林らは最も一般的な単一場インフレーションモデルにおける揺らぎの 3 点相関関数を完全な形で導出し、非線形揺らぎのふるまいを、勾配展開の 2 次のオーダーで一般解を求めることにより解析した。さらに、小林らは有質量重力理論において新しい宇宙論解をはじめとするさまざまな厳密解の導出に成功した。Horndeski 理論の複数スカラー場理論への拡張を狙った研究をおこなった。また、小林らは、Horndeski 理論にもとづいた新たな宇宙創生シナリオを提案した。

初期宇宙においてインフレーションなどによって生成された揺らぎはある確率でブラックホールになる。このようなブラックホールは原始ブラックホールと呼ばれ、現在の観測によって強く制限されているので、それを通して初期宇宙の密度揺らぎの情報を得ることができる。原田らは、初期宇宙に生成された原始ブラックホールの形成条件を解析公式として導出し、従来用いられてきた解析公式に比べて桁違いに良い精度で数値シミュレーションと一致することを示した。

6. ブラックホールと量子重力

重力は他の力とともに宇宙における四つの相互作用の一つを担っているが、他の相互作用と異なり、現在に至るまで誰もその量子化に成功していない。しかし、球対称真空系など限定的な場合には、重力の量子化がある程度成功しており、そこではブラックホールが量子化される。そこで、前田らはスロート量子化という手法を用い **Schwarzschild-Tangherlini** 型ブラックホールの質量スペクトルを一般次元で求めた。スペクトルが厳密に求まらない場合には大きな質量の範囲で **WKB** 近似を用いた。その結果、漸近的平坦の場合にはブラックホールの面積（エントロピー）が等間隔に離散化されるのに対し、漸近的反ドジッターの場合には質量が等間隔になることが分かった。この結果は、三次元 **Banados-Teitelboim-Zanelli (BTZ)** ブラックホールの場合には、他の手法を用いた結果と一致しており、信頼性が高いと考えられる。

7. 時空の対称性

Einstein 重力理論の下での完全流体解の探索が、ブラックホール解の探索と同じように盛んに研究されている。それは、我々の宇宙に存在している星たちが完全流体として記述される、と考えられているからである。他方、近年の素粒子物理学の発展により、我々の宇宙が高次元の世界である可能性が示唆されている。それゆえ、高次元の世界に存在する星たちが **Einstein** 重力理論の下でどのように記述されるのかという疑問があった。宝利らは、現在見つかっている 4 次元の完全流体解の中で、**Wahlquist** 解とよばれる定常軸対称な完全流体解に注目し、それが定常性や軸対称性とは別に **Killing-Yano** 対称性とよばれる対称性を持っていることを発見した。そして、**Walquist** 解の持つ **Killing-Yano** 対称性を尊重しながら高次元へと拡張することにより、定常軸対称な高次元完全流体解を構成することに成功した。しかしながら、得られた高次元完全流体解の状態方程式は圧縮性流体としては非現実的なものである。また、知られている真空解との接続条件を上手く満たせないことから、得られた解が真空中に存在する星を記述していないことが強く示唆される。

対称性の存在は複雑な物理の問題を扱いやすい簡単な問題へと帰着させ、問題の本質を明らかにしてくれるので、現代物理学の強力な武器となっている。それゆえ対称性それ自身を対象とした数理物理学的な研究が物理の問題に適用され、多くの手助けとなってきた。時空の対称性もその一つであり、時空の対称性の理解は相対論において重要な役割を果たす。宝利らは、**Killing-Yano** 対称性とよばれる対称性の個数について考察を行い、その上限を与える解析公式を導いた。普通、対称性の個数を数える場合、偏微分方程式系を解かなければならない。今回得られた上限公式の場合、代数方程式を解く問題に帰着するのでかならず解くことが出来き、対称性の個数に関してとても強い制限を与える。また、得られた上限公式は、多くの知られた時空に対して、正しい個数そのものを与えることを確認した。これはこの公式が、とても精度のよい上限公式になっていることを示唆する。

8. まとめ

本グループは「ピコスケール精密計測技術開発」事業において「ブラックホールの理論的探究」を担い、ブラックホールをキーワードとして、宇宙物理学のみならず宇宙論・素粒子論・流体力学・量子重力・数理物理学といった、多面的なアプローチによって研究を遂行した。本事業により、それぞれの研究者が個々に研究していただけでは不可能であった、ブラックホールの多面性の相互の密接な連関を露にすることができた。また、本事業を結節点として、本グループのメンバー間の活発な議論が行われたことは言うまでもなく、本事業における実験・観測グループの研究も意識した理論研究に関する議論、あるいは実験・観測グループとの直接の議論なども行われ、大変意義深い成果が得られた。

時間反転対称性検証実験及び、 ピコ精度画像処理型変位計を用いた近距離重力実験

村田次郎

概要

弱い相互作用の精密検証実験を行う為の放射線、とりわけ時間反転対称性の破れ検証実験の為の電子線飛跡検出技術の構築を行った上で、高エネルギー加速器研究機構において実際に偏極核のベータ崩壊を用いたテスト実験の成功を受け、2009年にカナダ・バンクーバーの TRIUMF 研究所に実験装置一式を移設してテスト実験を行った上で、2010年度に物理のデータ収集の本番実験 Run-II を実行した。この本実験では、飛跡検出器を用いたバックグラウンドフリーの環境での信頼性の高い時間反転対称性の破れの制限を初めて与えることが出来、TRIUMF 研究所の高偏極・高強度ビーム環境を利用する事で世界最高統計精度での時間反転対称性の破れ探索実験を成功させる事が出来た。さらに、系統誤差を根本的に解決すべく、次世代機を建設し、2011年度に KEK での開発実験、TRIUMF への移設とビームを用いた動作試験、そして 2012年度には本番実験実行可能な検出器系の構築とテストを行った。データ収集系の整備などを経て、2013年度には物理測定に向けた最終セットアップを完成させ、最初の物理データの収集も行う事に成功した。

平行して、オンライン画像処理型二次元変位計測技術を確立させ、その応用としてミリメートルスケールでの万有引力の法則の検証実験を、新たな計測原理に基づいて進めた。逆二乗則の検証として、逆二乗則に従う重力が抑制されるヌル実験原理を考案し、Newton-IV 号を建設、重力実験を実行した。ミリメートルスケールでの逆二乗則の検証は本プロジェクトの大きな目標であったが、2013年度について重力信号を捉える事が出来、余剰次元がミリメートルまで広がっているとの予言に対し、逆二乗則が破れていないという実験的な証拠を示す、二番目の追試に成功する事が出来た。

I. 電子線検出器を用いた時間反転対称性の破れ探索実験

電子線横方向偏極測定による時間反転対称性の破れの探索実験は 2007 年度に KEK-TRIAC にてスタートした。2009 年度からは KEK での成功を受けて、光ポンピング法により偏極度 80%以上、ビーム強度は KEK の 100 倍の 10^7 pps の 8Li ビームが生成可能なカナダの TRIUMF 研究所に KEK の装置を移設してテスト実験を行い、2010 年度にデータ収集系の高速化などの新規開発を経て本番測定を行ない、世界最高精度での探索実験を成功さ

せる事が出来た。

ベータ崩壊生成率のうち、**R** 相関項と呼ばれるベクトル三重相関は時間反転対称性並びにパリティ対称性を破る相関項である。もしこの項が存在すれば、すなわち、相関係数 **R** がゼロでなければ偏極した原子核から放出される電子はパリティ非保存による縦偏極の他、時間反転対称性を破る、横方向偏極も持つことになる。この測定に必要な要件は偏極核の生成、電子線の運動量ベクトルの計測と、その横方向偏極度の測定である。これらのうち、最後の横方向偏極度の測定が技術的に最も困難なものであり、本研究では主としてこの課題をクリアする為の技術開発を行った上で本番測定 (MTV Run-II) を、2010 年に TRIUMF 研究所にて遂行した。また、平行して次世代機として円筒形のドリフトチェンバー (Cylindrical Drift Chamber : CDC) を建設し、ガスや読み出し回路系の基礎開発を KEK にて 2011 年に行った上で TRIUMF へ移設し、 ^8Li ビームを用いた動作試験を行った。また、2012 年度にはトリガー検出器系を全て本番仕様に揃えると共に、全チャンネル読み出し可能な電子回路群を新規開発し、Run-II の 100 倍のデータ収集効率で時間反転対称性の破れを探索できるセットアップが完成した[1]。

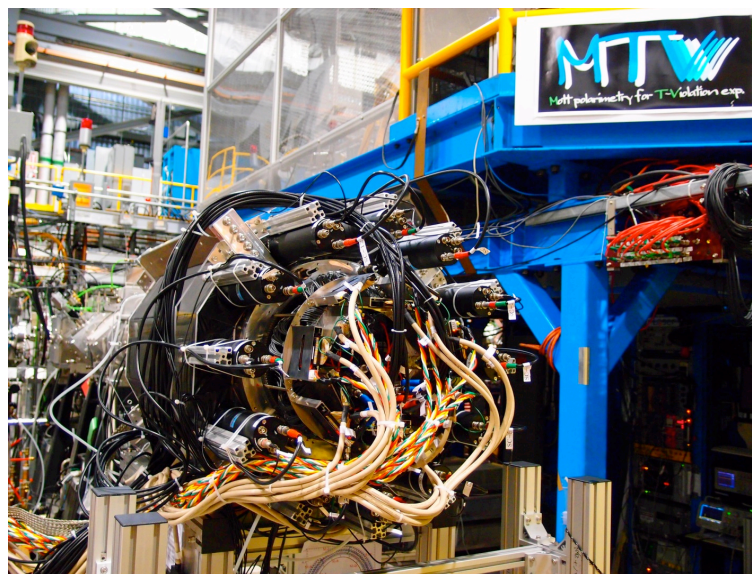


図1 CDC 実験装置概略図

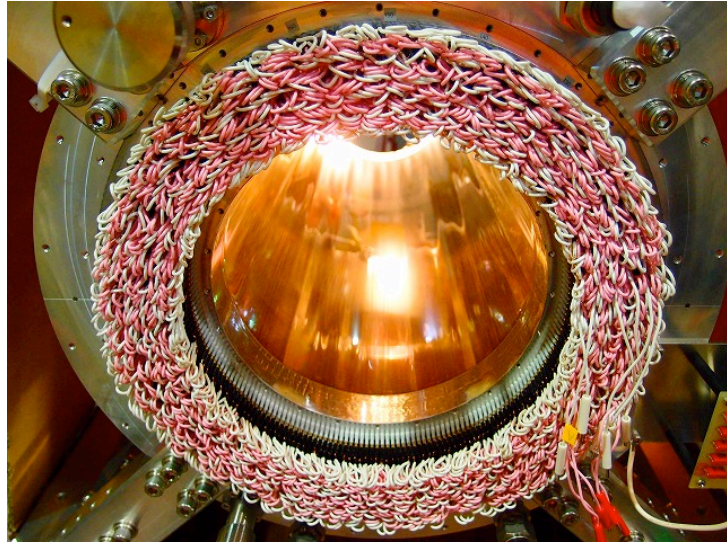


図2 Cylindrical Drift Chamber

図3に、典型的な事象を示す。Run-IIまで使用していた平面型ドリフトチェンバーに比べて圧倒的に信頼性の向上した電子散乱飛跡を得る事が出来る様になった。一方で、Run-IIのデータ解析を進め、ビームのスピンの反転に伴う検出効率の変化、という系統性が残っている可能性が判明した。その為、2013年度にはCDCを用いた実験において、同様の系統性が残るかどうかを最終的にチェックすべく、データ収集系の整備を経て、初の物理計測を行うと共に、系統性の調査に十分な統計のデータを得る事が出来た。

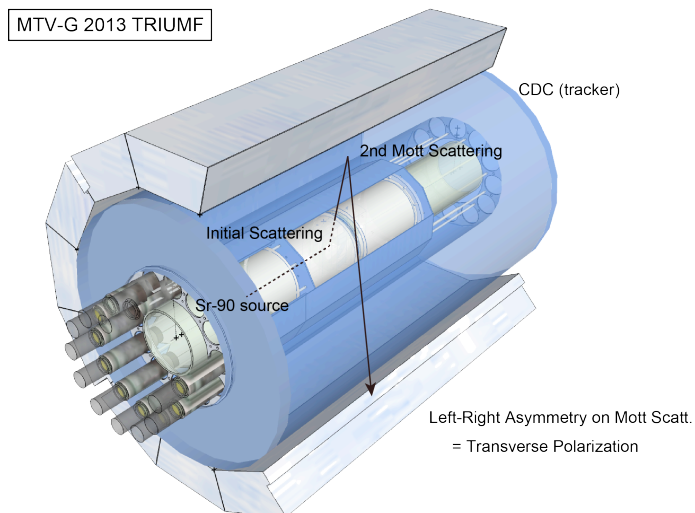


図3 MTV-G 実験 [2]

一方で、MTV 実験を応用した、原子核スケールでの重力の逆二乗則の検証実験 (MTV-G 実験) も進め、結果を出すことが出来た。これは、電子の原子核による二回散乱事象を観測する事で、そこでの散乱左右非対称性から MTV 実験の測定器の較正、並びに電磁相互作用では説明できない、大きな歳差運動の有無についての検証を行うものである。もし、原子核近傍に強い重力場が存在するものとする、一般相対論の効果で電子が散乱される際にスピン歳差運動が Geodetic 歳差運動の効果として増幅される事が期待される。ここでは、偏極して放出されるベータ線を用いて、二回散乱後のその横偏極度を計測する事で上限値を評価する事に成功した [2]。

II. ピコ精度画像処理型変位計の開発と余剰次元探索を目指した万有引力の法則の検証

このプロジェクトでは、我々の開発したデジタル画像処理技術を応用した、ピコ精度変位計測システムを用いた近距離での重力の逆二乗則の検証実験を進めた。本研究では、観察対象物を、CCD カメラを用いてデジタルイメージ情報として動画形式で記録し、ピクセル毎に二次元配列として得られた輝度情報から統計解析処理により重心位置などの情報を時系列データとして得るという原理に基づいている。平均値としての測定量に対しては検出した総光子量の統計で精度が決定する為、光学分解能をはるかに下回る精度が非常に簡単なシステムで達成可能である。

この発明を応用した物理学の実験として、実験室スケールでの万有引力の法則の検証実験を進めてきた。センチメートル以下の大きさの物体間に働く重力は高々フェムト N~ピコ N 程度であり、弾性体の変位計測で測定する際には極めて高い位置分解能が必要とされるものである。本研究で開発された画像処理型変位計はこの困難な実験を新しい手法により大きく発展させるポテンシャルを持ったものと考え、「ねじれ秤」を用いた実験を開始した。また、本原理に基づく微小力測定技術に関する特許申請を行った。

2012 年度には、100 ミクロンスケールでの余剰次元探索を実行すべく、回転対称性の高い Newton-IV を建設して重力を計測する実験を行い、ニュートン重力からの逸脱に対して制限をつけることに成功した。2013 年度にはこれを更に改良して Newton-IVh とし、計測精度を飛躍的に高め、約 10%の相対精度で、1mm スケールでの重力の計測に成功した。

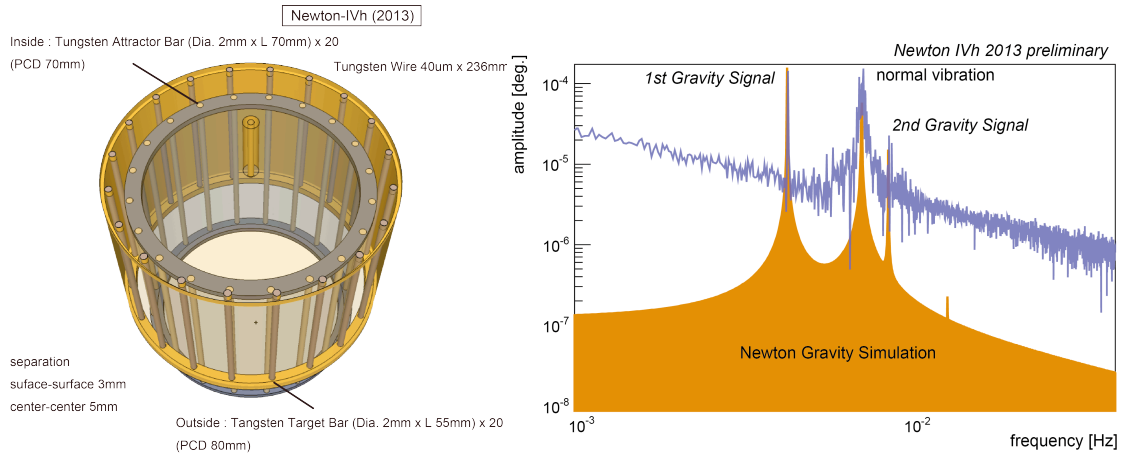


図4 Newton-IV 2012 実験の装置と結果 [3]

図4はNewton-IVhの装置概略と結果であるが、ニュートン重力の予言と矛盾のない、見事な重力起源のピークが周波数スペクトルで観測された。この結果は系統誤差の評価を同時に進めており、最終結果を公表する予定である。このミリメートルスケールでの万有引力の法則の検証は、このプロジェクトを開始して以来の大目標であり、第二追試とはいえ、大きな余剰次元模型が最初に提案した、ミリメートルスケールでの逆二乗則の破れに対し、それを否定する実験的な証拠を提示する事が出来た大きな成果である。今後は、ここで得た経験と技術を応用して、より近距離での、これまでと全く異なる計測原理に基づく逆二乗則の検証、そしてその破れの探索を進めて行く予定である。

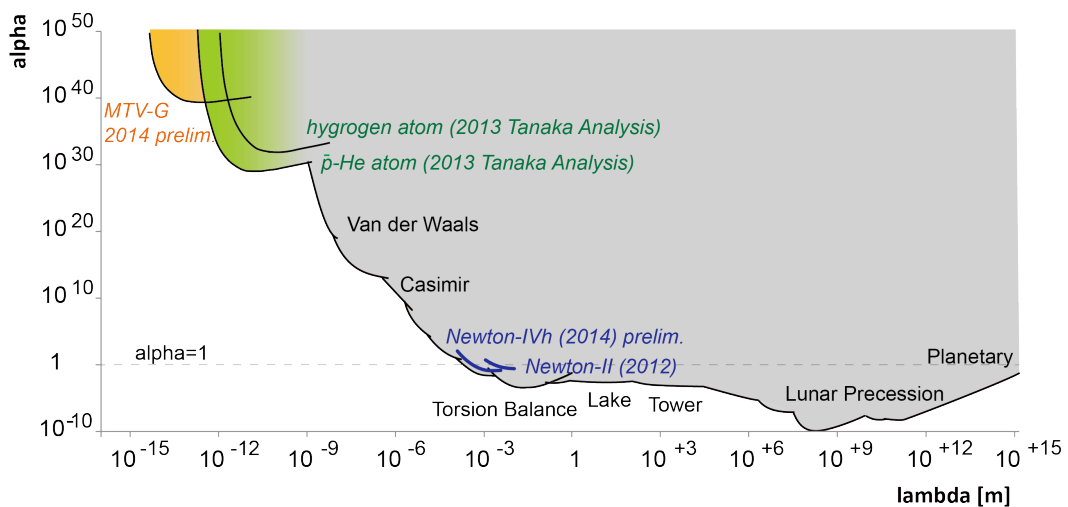


図6 逆二乗則の検証結果のまとめ [3]

MTV-G 実験、Newton-IVh 実験によって得られた、重力の逆二乗則の検証結果を図 6 に示す。本研究によって、ミリメートルではわずかに世界記録には及ばないものの、大きな余剰次元の存在予言に対し、明確な実験的な回答を与える事が出来た成果をあげ、精度も向上した事がわかる。一方の原子核スケールでは全くの未検証領域において、重力の強さに対する上限値を与える事が出来た。その過程で、MTV 実験を離れ、広く原子スケールでの既存の実験による制限を検証し、これも初めて原子スケールでの強い重力場に対する上限値を評価する事が出来た。

本プロジェクトにより、時間反転対称性の破れ探索実験はついに技術開発と建設の段階を終了し、物理測定を強力に推進する準備が整った。また、近距離重力実験も長年の目標であったミリメートルスケールでの検証に成功し、いよいよ未検証のマイクロスケールでの余剰次元探索へ進める準備が整った。原子・原子核スケールでの重力解析の方法論も確立する事が出来た。今後は、これらの成果の上に立ち、それぞれ本格的な研究を進めて行く予定である。

- [1] J. Murata *et al.*, *Hyperfine Interact* **225** (2014) 193-196.
- [2] S. Tanaka *et al.*, *J. Phys. CS* **453** (2013) 012018;
- [3] 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* **32** (2014) 233

弦理論による余剰次元の理論的研究

足田泰章、木村哲士、黒木経秀、矢彦沢茂明

【1】

超弦理論は点粒子のかわりに弦を基本的な物体として扱う理論で、特に量子重力理論の有力な候補となっている。さらに、超弦理論における無矛盾性から、時空の次元が $4 + 6 = 10$ 次元であることが導ける。このことは、我々の4次元空間の他に、6次元の余剰次元が存在することを示唆している。そこで、超弦理論を詳しく調べることで、余剰次元を含む時空構造に関する知見を得るというのが研究目的である。また、超弦理論を用いると、ゲージ理論と重力理論の対応のひとつである、AdS/CFT 対応を自然に導くことができる。この対応を利用することで、取り扱いの難しい重力理論を、比較的よく定義されているゲージ理論を用いて解析できると考えられている。

ところが、超弦理論は難解な理論として有名であり、平らな背景上以外ではあまり理解がすすんでいない。そこで私は、超弦理論のおもちゃ模型として、高いスピンのゲージ理論を利用することで解析を行った。超弦理論には、質量を持つてはいるが高いスピンの場が数多く含まれている。そのため、超弦理論における質量がない極限を、高いスピンのゲージ理論で記述できるのではないかと期待されている。また、高いスピンのゲージ理論を用いることで、超弦理論を使うよりもより簡単な AdS/CFT 対応を構成することができる。最も有名な例は、4次元の高いスピンのゲージ理論と3次元の $O(N)$ ベクトル模型との対応である。さらに数年前には、一次元低い次元の場合の対応が提唱されている。

最近数多くの研究がなされているため、高いスピンのゲージ理論の理解に関しては大きな進展が得られている。ところが、超弦理論との関係性については、あまり明らかにされていなかった。そのような状況の中で、数年前に高次元の場合に興味深い指摘がなされた。それによると、4次元の高いスピンのゲージ理論で行列に値を取るよう拡張された理論は、いわゆる Aharony-Bergman-Jafferis (ABJ) 理論と対応している。ABJ 理論は超弦理論と対応することが知られているため、この対応は高いスピンのゲージ理論と超弦理論の間の新しい関係を示唆している。私たちはそこで、同じような双対性を低い次元の場合に見つけることができれば理論が解析しやすいため、より多くの情報を引き出せるのではないかと考えた。3次元の高いスピンの重力理論が2次元の Grassmannian 型の模型と対応すると主張し、その対応に対していくつかの証拠をあげた。最も強い証拠として、スペクトルが両者で一致することを示した。超弦理論との関連性については、現在研究が進んでいる最中であり、近いうちに発表する予定である。

【2】

超弦理論は10次元で定義されるが、4次元時空理論とつながるために、空間6次元がコンパクト化されていると考える。私はコンパクト化される空間の幾何学が、従来考えられるよりも豊富な情報を持つべきであると考えて、幾何学の一般化と物理への応用を研究している。

コンパクト化される空間は振率を持つべきである。そうしなくては、4次元理論で物質と相互作用するゲージ理論が自然に登場しない。この観点で私は真空構造を研究してきた。2012年度はその設定で、漸近 AdS 空間上の荷電ブラックホール解が存在できるかを追究した。結果としては、静的条件を課しただけで、漸近 AdS 荷電ブラックホール解 (AdS Reissner-Nordstrom 解) は存在できないこと、AdS 真空か Schwarzschild-AdS ブラックホール解になることをみた。

また、2012年度には、上記に平行して、コンパクト化で登場するゲージ理論の性質を深く掘り下げる研究を展開した。用いたのは共形変換不変な超重力理論 (共形超重力理論) である。この理論は、通常 on-shell 形式でしか扱えない超重力理論よりも対称性が高いため、off-shell 形式での取り扱いが可能であり、場の量子論として優れている。この模型に embedding tensor formalism を適用することで、off-shell で、かつ大域的対称性を最大限利用して、ゲージ不変性と双対不変性を併せ持つ模型に格上げされた模型 [arXiv:1107.3305] を出発点とした。Embedding tensor formalism では、対称性を拡大するために補助場としての反対称テンソル場を導入する。このテンソル場は、電気的配位では補助場のままであるが、系を磁氣的配位に双対変換させると力学的場になることを追跡した。双対変換においてスカラー場がテンソル場に変換されることを、この formalism でも確認すべきであるとするのが、主たる動機であったので、それが直接確認できた。この課題は、embedding tensor が弦理論のコンパクト化におけるフラックスの期待値と密接に関係するであろうことを意識している。何故なら、超弦理論から始まる10次元理論では、反対称テンソル場が最初から存在するからである。しかるに通常知られているような、低次元時空での超重力理論では、そのようなテンソル場は存在しないか、見えなくなっている。そのため、私が示した「磁氣的配位では反対称テンソル場が力学場になる」という結果は、どのような低次元時空上の理論が、10次元時空の超弦理論との関連が強いかを考察する資料と成り得る。

2013年度は、超弦理論特有の双対性とそれから得られる「エキゾチックブレーン」と呼ばれる奇妙な物体についての基礎的性質を研究した。エキゾチックブレーンは通常の重力理論で記述すると不可思議な性質を帯びているが、弦で記述するとまったく自然な物体であることを追究する。この物体は、ブラックホールの量子論を超弦理論で理解するためには必要であるという指摘に乗っ取り、私は北里大学の佐々木伸氏と共同で研究を行った。研究成果として、エキゾチックブレーンを弦の世界面上のゲージ理論である Gauged Linear Sigma Model (GLSM) という模型で記述できた。これは、エキゾチックブレーンに弦が巻き付く様子を端的に表現できる画期的な研究成果である。弦が巻き付く様子を与えると、時空の大域的・量子論的構造に対する理解が進むと期待できる。

【3】

弦理論は時空、物質、相互作用すべてを統一する究極理論の最有力候補であるが、摂動論的にしか定義されていないため、現実世界に対する説明能力、予言能力を持たないという致命的な欠陥がある。そこでゲージ理論ないし行列模型の large- N 極限 (N は行列の階数) によって弦理論を非摂動的に定義する試みが提案されている。実際、このアプローチでは時空自体が余剰次元として行列から創発されるため、余剰次元のダイナミクスの解明に役立つと期待される。

しかし、行列模型の large- N 極限は、現実世界に存在しない高い対称性を持つため、それがいかに破れて現実世界が生ずるか、という large- N 極限における対称性の破れのダイナミクスの研究が余剰次元の理解には不可欠である。その重要性にも関わらず、large- N 極限の解析の難しさから、これまでこのような研究はほとんどなされてこなかった。そこで単純化された模型において、超対称性を持つ行列模型の large- N 極限のダイナミクス、特に超対称性の破れを中心に研究した。基本的なアイデアは、南部氏の「自発的対称性の破れ」を行列模型の large- N 極限に適用することである。

まず、超対称性の自発的破れが通常演算子形式で議論されており、行列模型への適用に不向きであるため、経路積分形式によって破れを議論する枠組みを提唱した。実際この定式化は知られている結果を再現することを確認した。またこの定式化を適用することにより、1次元以下で超対称性が自発的に破れうることを、具体例をもって示すことができた。この事実は、Mermin-Wagner の定理の超対称性版が成立しないことを示しており、意義が深い。また、この定式化を用いて、有限の N では超対称性があるが large- N 極限ではそれが自発的に破れる例、その逆に有限の N では超対称性が破れているが large- N 極限ではそれが回復する例など、興味深いダイナミクスを持つ簡単な行列模型を系統的に構成することに成功した。

そのような行列模型の中でも、特に double-well タイプのポテンシャルを持つ行列模型の large- N 極限に注目した。この模型はパラメータを持ち、その臨界点では超対称性を保つ相、破れている相の間の新しい3次相転移を示すことを見出した。そこで、相転移点に近づくと同時に large- N 極限を取るいわゆる double scaling limit を取ることにより、冒頭に述べた、超弦理論が非摂動的に定義できる可能性がある。Double scaling limit の同定のため、この行列模型の相関関数を求めたところ、相転移点近傍で \log のべきといった新しい臨界的振る舞いをすることを示した。このことは、この行列模型が2次元の超弦理論の非摂動的定義を与えている可能性を示唆している。もしこれが確立されれば、2次元といった低次元の toy model ではあるが、超対称性を持つ超弦理論が、きちんと同定された double scaling limit の下で定義される初の例になる。実際、まず対称性の観点から行列模型と超弦理論に存在する場の同定を行うと、両者は同じ対称性を持つ理論であることを確認できた。次に超弦理論側でやはり \log のべきといった相関関数が得られれば、両者の等価性の強い証拠になると期待される。

その他、行列模型の固有値の余剰次元解釈の具体例を与えるため、超対称 Yang-Mills 理論における Wilson loop の期待値を AdS/CFT を用いて考察し、固有値の場所が D3-brane 上の電束に対

応することを示した。また、large- N 極限の新しい解析法として、非可換幾何学と繰り込み群のアイデアを行列模型に適用した手法を提案し、知られている結果を再現すること、および創発された2次元球面上の場の理論の非自明な結果を与えることを示した。この結果は独立にシミュレーションによって得られた結果とよく一致しており、我々の手法の正しさを裏付けている。また、他の究極理論の候補として M-theory があるが、その基本的構成要素の膜理論が健全な量子論でないという深刻な問題があることを踏まえ、近年提唱された膜の有効作用 (ABJM 模型) がこの問題を回避しているかどうか調べ、否定的な結果を得た。

【4】

全ての基本物質と四つの力をまとめあげる第一候補は超弦理論であり、この理論は、量子化も含めた高次元・余剰次元における理解を行っている。特に、背景場を持った超弦理論の量子化を行い、対称性の条件から時空次元や物理状態や分配関数を計算し、背景場上における超弦の場の理論の研究を行った。超重力波を背景場とし、超対称性を持った超弦理論を厳密に共変的量子化し、そこから時空次元数や物理状態や分配関数の物理量を求め上げ、超弦の場の理論と超重力場との関連を厳密に証明することを行った。超対称性や重力波については、実験や観測でも盛んに行われており、その観点からも理論構成が大切であった。

様々な背景場が存在している場合に、超弦の場の理論は矛盾することなく成立しているだろうか。調べた背景場は時空の曲がりによって表される重力場、NS-NS 反対称テンソル場、ディラトン場についてである。もし、一般の背景場中の超弦の場の理論について詳しい理解が得られれば、背景場が強く効くようなブラックホール内部の物理や AdS/CFT 対応に対して詳しい解析が可能となり非常によい。超弦の場の理論の構成には、以前の研究で、NS-NS pp-wave 上の超弦理論を第一量子化する際に構成し、一般解としての超弦座標やマヨラナ・フェルミオン場、および、それらを自由モードで表示する表現も用いた。超弦の場の状態を定義する必要なモードは、超弦座標やマヨラナ・フェルミオン場を直接フーリエモード展開して定義するが、すべてこの自由モードを用いて表示できる。NS-NS セクターの真空に、左右の生成モードをかけて状態を定義し、それらのモードの係数として重力場、反対称テンソル場、二つのスカラー場および補助場を導入する。

超弦理論において「超弦の場の理論」(SSFT) が重要であるため、SSFT が全て成立しているかどうかについて詳しく計算をして調べた。特に、複雑な背景場が登場しているとき、超重力場と低エネルギーの SSFT が正確に一致しているかどうかについて計算を行った。今回は、NS-NS pp-wave の背景場の場合に、超重力場の作用と低エネルギーの SSFT の作用が2次摂動展開までにおいて一致していることを証明した。更に、NS-NS pp-wave の背景場の場合に、超重力場のゲージ変換と低エネルギーの SSFT のゲージ変換が一致していることを証明した。NS-NS pp-wave の背景場における超弦理論の第一量子化の方法も使った。

別の発表ですが、情報幾何で重要なフィッシャー情報行列(計量)が登場されています。スカラー場によって、フィッシャー情報行列(計量)からミンコフスキー時空が登場しました。2012年度に雑誌論文に載っています。

原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明

—原子・分子クラスターの構造の実験的研究—

小泉哲夫、的場史朗、高橋果林

概要

多原子分子イオンおよびそのクラスターイオンについて、気体中のイオン移動度を測定し、イオン移動度による構造異性体の分離を目指して研究を行った。キラル分子イオンの右手系、左手系についてイオン移動度が異なるという報告があるが、我々の測定ではそのような分離は観測されなかった。しかしながらブタノールの4つの構造異性体については明らかに移動度が異なることが観測できた。これらの成果は最近、分子同定の手法として利用されている Ion Mobility Mass Spectrometry (IMS) の物理的・化学的基礎を与えるものである。

また、このような実験で粒子検出によく用いられる Micro Channel Plate (MCP) で、新たに高検出効率のものを開発し、その絶対検出効率を測定し MCP の特性を明らかにした。

1. イオン移動度の構造異性体効果

気体中のイオン移動度はイオンと中性気体原子間の相互作用によって決まる。多原子分子には分子式が同じでも構造の異なる構造異性体が存在するが、構造異性体によって気体原子との相互作用は異なっているため、気体中のイオン移動度はイオンの質量が同じでもイオンの構造によって異なった値となる。最近ではこの性質を使って分子の同定を行う Ion Mobility Mass Spectrometry (IMS) が質量分析の一つの手法としてさかんに利用されている。しかしながら IMS では分離が可能かどうかという応用上の観点のみが注目され、移動度と分子構造の関係の物理的・化学的基礎は十分に理解されているとはいえない。本研究では分子構造がどのように移動度に寄与するのか明らかにし、IMS の物理的・化学的基礎を与えることを目指す。

本研究では 2-butanol と、その構造異性体である 1-butanol, i-butanol, t-butanol に Li^+ を付着させたクラスターイオンの移動度を測定し、移動度で構造異性体が区別できるかを測定した。また 2-butanol と、その構造異性体である 1-butanol, i-butanol, t-butanol に Li^+ を付着させたクラスターイオンの移動度を測定し、移動度で構造異性体が区別できるかを測定した。

1-2. 研究方法

本研究では、入射イオン型移動管を用いてイオン移動度の測定を行っている（装置の詳細は T. Koizumi, *Physica Scripta* **T143** (2011) 014019 を参照）。分子イオン生成においては、親分子の構造を保持させるためにソフトイオン化が必要となる。イオン源として通常用いられる電子衝撃型イオン源では、電子衝撃により親分子は解離してしまい、親分子イオンはほとんど生成されない。そこで、本研究では分子イオン源として、 Li^+ イオンを緩衝気体中で分子に付着させてイオン化するイオンアタッチメント法を採用した。これにより従来より10倍以上の Li^+ 付着イオンを得ることができ、十分な精度で実験を行うことが可能になった。

1-3. 研究成果

本研究では、2-butanolとその構造異性体である1-butanol, i-butanol, t-butanol を用いて Li^+ 付着クラスターイオンのHe気体中の移動度を室温および液体窒素温度で測定した。結果を図1室温の結果、図2に液体窒素温度の結果をに換算電場 E/N の関数として示す。室温で測定された移動度は構造異性体によって、それほど大きな違いは無いが、詳細に見ると、わずかな異性体依存性(0.5~1%)が存在し、しかもその大小関係が E/N の領域によって逆転するという興味深い結果が得られた。これは低い E/N (低エネルギー) の領域ではイオン分子間相互作用ポテンシャルの引力項が、高い E/N (低エネルギー) の領域では斥力項が寄与していることで説明できる。液体窒素温度の測定では構造による違いが低 E/N で顕著に観測されている。これは低エネルギーにすることでイオン-分子相互作用の微弱な項の寄与が大きくなったためと考えられる。この移動度を正確に再現するためには量子化学計算によりポテンシャルを定量的に評価し移動度を計算することが必要である。この測定で我々の実験装置では、移動度に0.5%の違いがあれば十分に検出出来ることが確認された。室温の結果についてはすでに論文として発表済みである(K. Takahashi et al. J. Chem. Phys. 139(2013) 084317)。

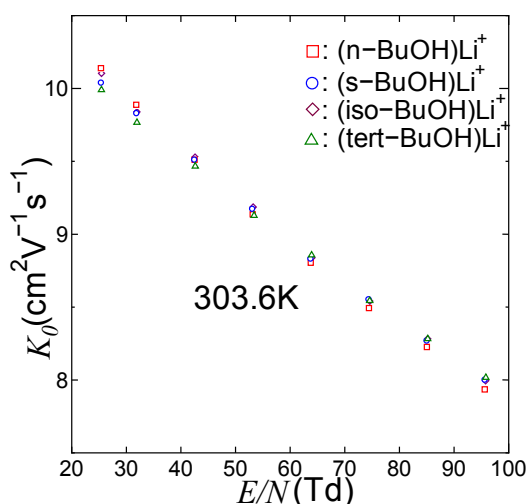


図1. 室温 He 気体中における Li^+ -(butanol isomer) イオンの移動度

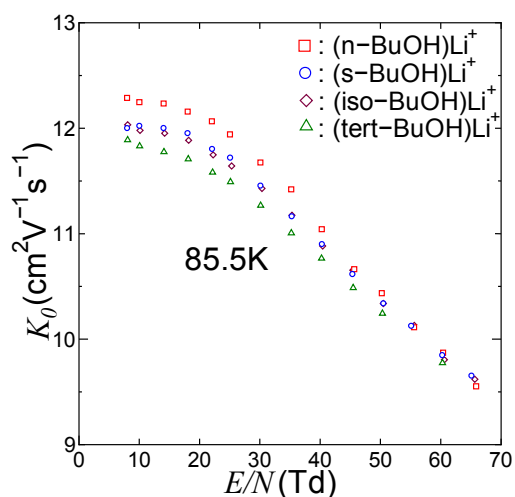


図2. 液体窒素温度の He 気体中における Li^+ -(butanol isomer) イオンの移動度

2. キラル分子クラスターイオン移動度におけるキラリティー依存性の研究

2-1. 研究の学術的背景

光学異性体を持つ分子同士の衝突では、分子のキラリティーが反応性に大きく寄与する場合もあり、特にキラル分子同士の相互作用に大きな興味もたれている。しかしながら真空中におけるキラル分子同士の衝突実験報告は非常に少ない。特に熱エネルギー領域(1 meV~1 eV)における相互作用の情報は環境中での分子の振る舞いを考察する上で非常に重要であるが、このエネルギー領域ではビーム実験が非常に困難であるために、二体間相互作用のキラリティー依存性についてはこれまでほとんど検討されてこなか

った。

このような熱エネルギー領域では移動管法による移動度測定が有効である。移動管法によって測定される移動度はイオンと気体分子の衝突における運動量移行断面積と直接的に結びついており、この断面積は粒子間に働く相互作用ポテンシャルによって決定される。それ故、移動度の測定によって、他の方法では測定することが不可能な低エネルギー領域における運動量移行断面積が求められるだけでなく、粒子間ポテンシャルに関する詳細な情報も得られる。

キラリ分子イオンと中性キラリ分子の衝突を考えると、キラリティーは構造異性体の一つと考えることが可能である。本研究では移動管法による気相中のイオン移動度の測定を行うことで、キラリ分子クラスターイオンの構造分離および熱エネルギー領域におけるキラリ分子クラスターイオンとキラリ分子の相互作用や衝突ダイナミクスについてのキラリティー依存性の解明を行うことを目指した。ブタノール構造異性体の測定結果からも分かる通り、我々の実験装置では、移動度に0.5%の違いがあれば十分に検出できる。この結果をもとに、ヘリウム気体中に光学分割されたキラリ分子を混合して、移動度を測定し、キラリティーの効果を検証する実験を行った。

2-2. 研究成果

本研究では He に光学分割された (S)-2-butanol を 0.2% 混合した混合気体中の Li^+ -(S)-2-butanol および Li^+ -(R)-2-butanol の移動度を測定した。結果を図3に示す。今回の測定ではキラリティーによる移動度の差は検出されなかった。Dwivedi らは N_2 にわずか 10ppm の 2-butanol を混ぜるだけでキラリ分子クラスターイオンのキラリティーによって移動度に数%の差が出ることを報告している。今回の測定は彼らと実験条件がまったく同じではないのでまだ検討が必要だが、彼らの言うような大きなキラリティー依存性は無いものと思われる。

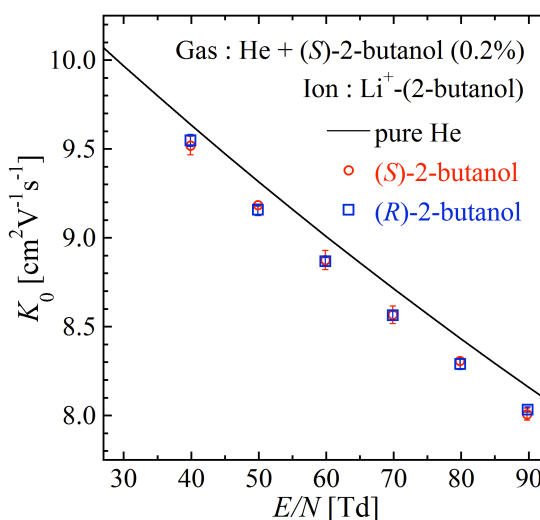


図3. 混合気体中における Li^+ -(2-butanol) イオンの移動度のキラリティー依存性

3. 高感度MCP の開発・評価

Micro Channel Plate (MCP)は荷電粒子、紫外以上の光子、高速中性粒子等を検出する二次電子増倍素子であり、非常に広い分野で使われている。MCP では粒子がチャンネル内に入射しないと検出されないため検出効率の上限は開口率(OAR)によって制限され、市販のMCP の場合約60%である。同時計測実験を行う場合は、もっと検出効率の高いMCPが必要とされる。そこで、我々は開口率を上げれば検出効率を増加させる事が出来ると考え、入射部にテーパ加工を施し実効的に開口率を90%に上げたT-MCPを製作

した(浜松ホトニクス社製F1217-01GMOD)。本研究では、一段目にT-MCP、二段目に通常のMCP(浜松ホトニクス社製F1217-01)を用いたアセンブリで検出器を構成し、この検出器のXeイオンに対する絶対検出効率を測定したところ、入射エネルギー約6 keV以上で検出率はおよそ90%となり、ほぼ開口率とほぼ等しくなることが解った(図4; S. Matoba, Jpn J. Appl. Phys. 50 (2011) 112201)。

さらにテーパー部の加工を工夫し開口率100%に近づけたT-MCPを製作し、その検出効率を測定した。図5は、Heの1,2価イオンに対するMCP およびT-MCP の検出効率を入射エネルギーの関数としてプロットしたものである。両検出器とも入射エネルギー3 keV以上で検出率はほぼ一定となる。従来のMCPの検出率は開口率とほぼ同等であるが、T-MCPの検出率は従来のMCPより高いが、約85%で100%には達していない。この原因は現在のところ明確になっていない。開口率90%のT-MCPと製造方法が異なるのでそこに原因があるのかもしれない。また開口率90%のT-MCPとバイアス角が異なるのでバイアス角依存性があることも考えられる。そこでMCPに対するイオンの入射角に検出率が依存するかどうかの検証実験を行った。その結果、明らかに入射角依存性は存在するが、検出率85%にとどまった理由を説明できるほど大きな依存性ではないことが確認された。テーパー部の二次電子放出機構に関するより詳細な検討が必要であろう。今後は、より広い入射エネルギー範囲での測定を行うとともに、イオンの質量依存性や価数依存性をより詳細に測定していく必要がある。

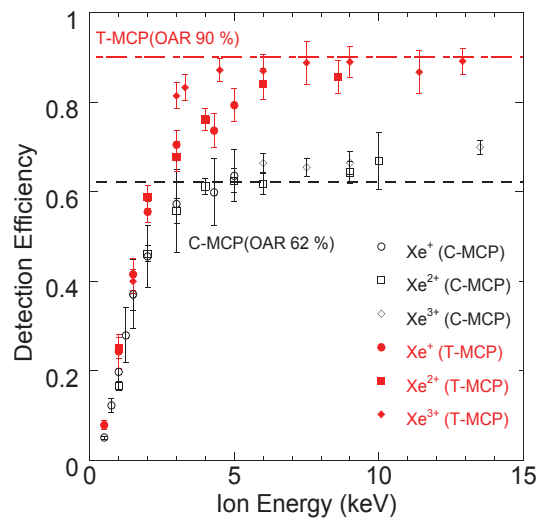


図4。Xeイオンに対するT-MCPの絶対検出効率

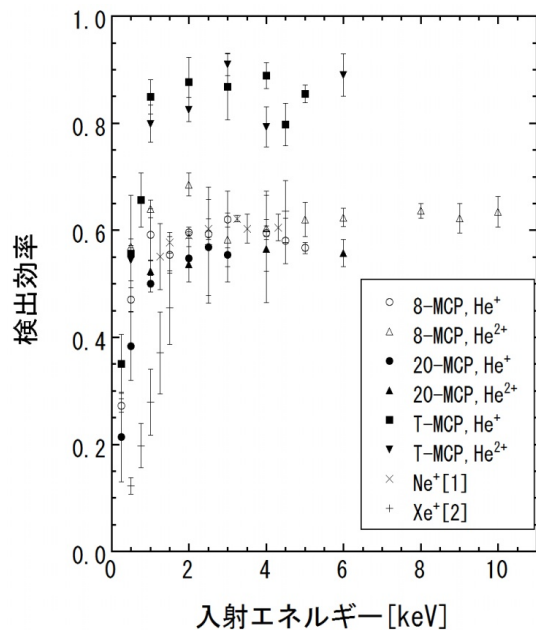


図5. MCP および T-MCP の検出効率

概要

新規高性能触媒として期待されるニッケルリン化合物の角度分解光電子分光、およびその結果の理論的解析を行った。また、新規ナノ材料として期待される金ナノ粒子の配列構造の形成機構に関する研究を行った。

1. ニッケルリン化合物表面の電子状態

近年、原油に含まれるイオウ分の濃度が年々増加する傾向にある。環境保持の観点から、石油の精製過程における水素化脱硫反応(HDS)の転化効率を高めることが喫緊の課題となっており、HDSにおける現行の硫化物触媒に代わるより高活性な触媒の開発が急がれている。近年、一連の遷移金属リン化合物が HDS に対し高い触媒活性を示すことが見いだされ、中でもリン化ニッケル(Ni₂P)の活性が最も高いことが報告された[1]。Ni₂P は、dibenzothiophen を用いた HDS のモデル研究において 100%近い驚異的な転化率を示し、次世代の HDS 触媒の決め手と目されている[1]。最近、Ni₂P の触媒活性の本質を解明するためにその表面に関する研究がはじめられ、構造解析の研究より、加熱により表面に P が偏析することが提案されている。表面上の P 原子は、もし負に帯電しておれば理論的に HDS においてプロトントラップとして働くことが期待され、触媒活性に直接的に寄与すると考えられる。また、より本質的な働きとしては、表面 Ni 原子との結合により活性点として働く Ni の 3d 準位を安定化させ(ligand 効果)、さらに活性 Ni 原子を物理的にブロックする ensemble 効果により、表面の S 原子による被毒を抑えて活性を維持すると考えられている。従来のモデルによれば、加熱という物理的刺激的度合い(温度)により P の偏析量が制御され、それにより Ni₂P 表面の触媒活性が制御されると考えられる。しかしながら、P の偏析が本当に起こるかどうか、また表面の P がどのように働くかについて直接的な研究は行われてこなかった。本研究は、Ni₂P の代表的な低指数面である(10-10)表面について、表面電子状態の解明を目指したものである。特に、P の偏析過程と、P 偏析に伴う表面電子状態の変化を解明することを目指した。

図1はNi₂P(10-10)の[0001]方向で測定した角度分解光電子スペクトル(ARPES)である。表面は Ar⁺イオン衝撃と 400°Cの加熱のサイクルを繰り返して清浄化されており、この時表面は c(2×4)構造となっている。1 eV 以下に観測されるバン

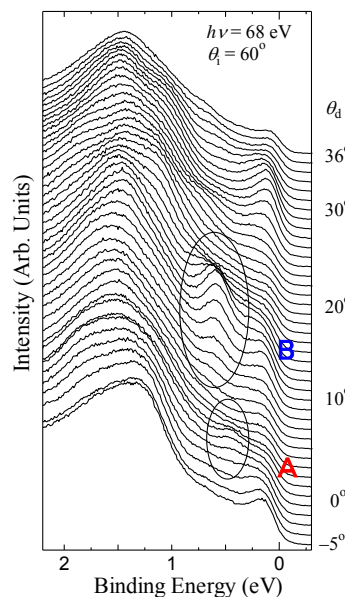


図 1. Ni₂P(10-10)の[0001]方向の角度分解光電子スペクトル。

ドはバルクバンドであるが、その低結合エネルギー側に観測される 2 つのピーク(A、B)は Ar^+ イオン衝撃に対する応答その他の解析から表面準位に同定される。表面準位の二次元バンド構造および $c(2 \times 4)$ 表面の表面ブリルアンゾーン(SBZ)を図 2 に示した。

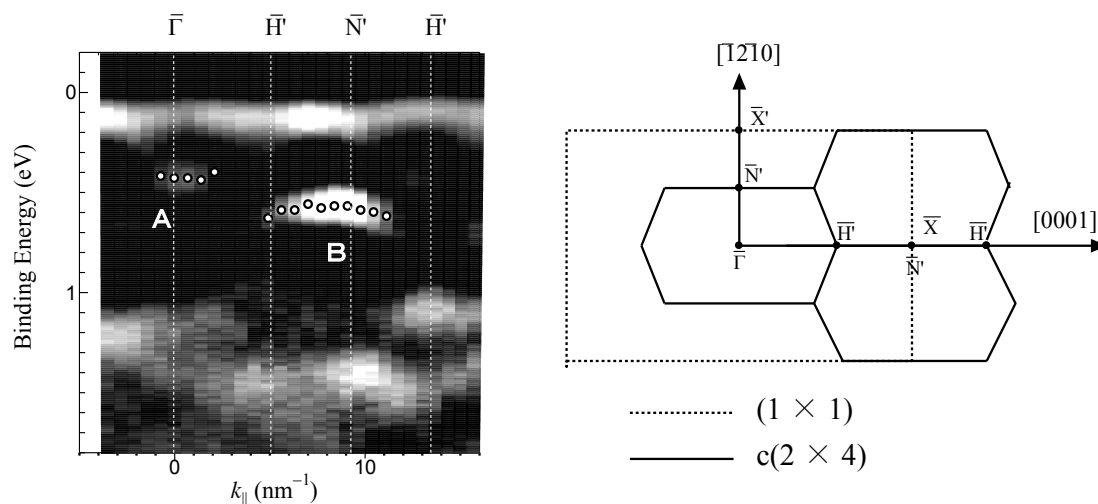


図 2. $\text{Ni}_2\text{P}(10\text{-}10)$ 表面の二次元バンド構造 (左図)、および (1×1) (破線) と $c(2 \times 4)$ (実線) の表面 S B Z (右図)。

構造解析の研究より、 $c(2 \times 4)\text{Ni}_2\text{P}(10\text{-}10)$ 表面には $c(2 \times 4)$ 領域と (1×1) 領域が共存していることが示されている[2]。スペクトルの加熱温度依存性の解析より、準位 A は (1×1) 領域、準位 B は $c(2 \times 4)$ 領域に形成された表面準位であることが分かった。

$\text{Ni}_2\text{P}(10\text{-}10)$ におけるリンの偏析過程について調べるため、オージェ電子スペクトル(AES)の加熱温度依存性を測定した。図 3 は、 $\text{Ni}_2\text{P}(10\text{-}10)$ の AES スペクトルにおける P LMM ピークと Ni MVV ピークの強度比(P/Ni)を、加熱温度に関してプロットしたものである。清浄表面を軽度 (1 keV、15 min) に Ar^+ イオン衝撃すると、P/Ni 強度比は大きく減少する。これは、表面の P 原子が選択的にスパッタリングされたことを示している。この段階で LEED ではスポットが消失してバックグラウンドのみが観測され、表面の規則性が失われたことが分かる。この表面を加熱すると、P/Ni 強度比は 260°C – 330°C の領域で増大する。加熱温度 330°C 以上では強度比はほぼ清浄表面と同じになり、LEED は $c(2 \times 4)$ パターンが回復する。以上により、

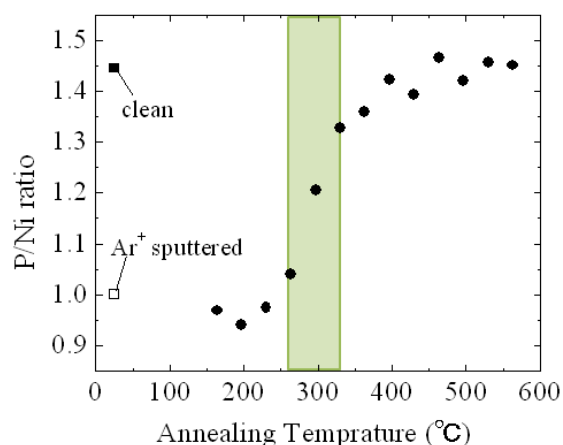


図 3. P LMM と Ni MVV オージェピーク強度比の加熱温度依存性。

260°C–330°Cにおいてバルク中の P 原子が表面に偏析し、 $c(2 \times 4)$ 構造は偏析 P 原子により形成されていることが分かる。図 4 は、 Ar^+ イオン衝撃直後と、その表面をリンの偏析が起こる温度領域 (240°C–400°C) で加熱した後の $\text{Ni}_2\text{P}(10-10)$ の価電子帯スペクトルである。0–4 eV の領域に観測される Ni 3d – P 3d 混成バンドは、リンの偏析の進行に伴い強度が減少し、バンドの重心が高結合エネルギー側にシフトする。用いた入射光エネルギー (74 eV) において、P 3p の光

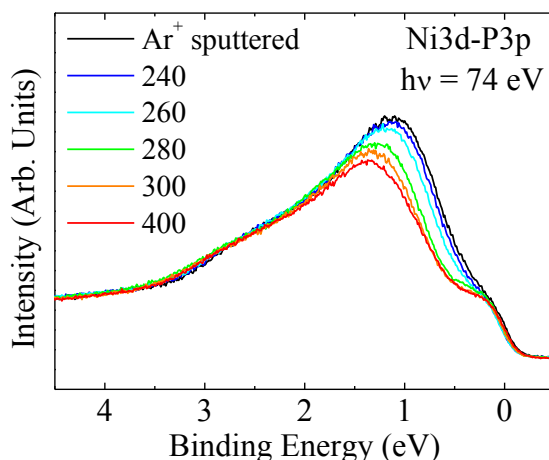


図 4. $\text{Ni}_2\text{P}(10-10)$ の Ar^+ イオン衝撃後、およびその後 240°C–400°C で加熱後の ARPES スペクトル。

イオン化断面積は Ni 3d に比べ 1 桁以上小さく [3]、よって図 4 においてスペクトルはほぼ Ni 3d の状態密度を反映している。よって、スペクトルの加熱変化は、表面領域の Ni 原子が偏析したリン原子と結合し、その結果 3d レベルが全体として安定化したことを示している。金属化合物を主体とする触媒において、金属原子の結合による安定化はリガンド効果と呼ばれ、図 4 の結果はリガンド効果を分光学的に実証したものとと言える。 Ni_2P の場合、表面 Ni サイトの安定化は HDS において Ni–S 原子間の結合を弱め、S の H_2S としての脱離を促進して触媒活性を維持していると考えられる。

2. 自己組織化を用いた金ナノ粒子の低次元配列

金ナノ粒子は、表面増強ラマン散乱に見られるように特異な光学的性質を示し、また近年酸化物上に担持されると CO の常温酸化等に極めて高い触媒活性を示すことが見いだされた興味深い物質である。近年、金ナノ粒子のコロイド溶液中に平坦な基板を置き、溶媒を蒸発させると金ナノ粒子が規則的な 2 次元配列構造を取ることが見いだされた。この現象と既存の Si テクノロジーと組み合わせることで様々なデバイスを構築可能であると考えられる。特に、ナノスケールでの配列構造は、より高感度なデバイスの構築のために重要である。しかし、過去に Au 薄膜/Si 基板系においては界面および表面において容易に合金を形成することが報告されているため、金微粒子と Si 基板を接合させたときの構造および電子状態変化を測定することは重要な課題である。本研究では、金ナノ粒子を $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ 基板に堆積させたときの自己組織化構造および、その微細構造および表面・界面電子状態の加熱による変化について、走査電子顕微鏡 (SEM) および X 線光電子分光 (XPS) を用いて調査した。

Au 微粒子 (直径 5, および 20nm, CRL 社製、水中に分散) を純水中に分散させた溶液を、Si(100) 基板を斜めに設置したスクリー管瓶中に静かに滴下し、基板下部を溶液に浸した。

それぞれの溶液中の微粒子濃度は 1.0×10^{13} および $1.4 \times 10^{11} \text{ mL}^{-1}$ となるよう調製した。そして、真空デシケーター内 ($\sim 38 \text{ Torr}$) で完全に乾燥させた後、SEM(Hitachi S-4800)を用いて試料表面に生成した構造の観察を行った。SEM 観察は物質・材料研究機構 ナノ集積ラインにおいて行った。また、粒径 5,10,20nm の金微粒子を Si 基板に堆積させた構造に対し、80,100 および 140°C においてそれぞれ大気下で 10 分間加熱を行い、その微細構造の変化を SEM を用いて調査した。また、粒径 10nm の金ナノ粒子を 150°C で 10 分加熱した試料に関して、XPS を用いてその表面電子状態を測定した。

図 5(a)および(b)に、粒径 5 および 20nm の金ナノ粒子が溶媒乾燥後に形成した構造の SEM 観察像を示す。粒径 5-20nm の金ナノ粒子は、水中に分散後、特定の粒径に依存しない条件下で溶媒を除去することにより、直鎖状に配列させることが可能であることが分かった。これらの溶液中において微粒子の占有する体積(体積分率)はほぼ同等であることから、このような直鎖状の自己組織化構造は、粒径に依存せず、体積分率および圧力を制御することで生成させることが可能であることが示唆された。

堆積したナノ粒子を加熱すると、平均粒径が 100°C 前後から増加することが分かった。この結果は、 100°C 前後の加熱によって微粒子表面の金原子の拡散が促進されることを示唆している。その一方で、粒径 10nm の金ナノ粒子を基板に堆積後 150°C に加熱した後の表面電子状態を測定したところ、金微粒子表面は金原子のみで構成されていることが明らかになった。この結果は、基板 Si の拡散は 150°C においても進行しないことを示唆している。

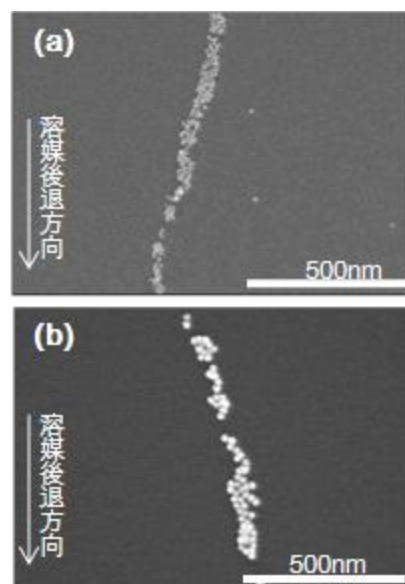


図 5. SEM 画像 : 粒径 5(a) および 20nm(b) の金ナノ粒子が溶媒乾燥後に形成した構造。

[参考文献]

- [1] S. T. Oyama, J. Catal. **216** (2003) 343.
- [2] D. Guo et al., Surf. Sci. **604** (2010) 1347.
- [3] J. J. Yeh and I. Lindau, At. Data Nucl. Data Tables **32** (1985) 1.

希ガスクラスターおよび希ガス固体表面の実験的研究

平山孝人^{*}，神野智史[†]，立花隆行

1 はじめに

我々のグループでは、クラスターと固体の二つの様態の希ガスを対象として、そこで起こる電子的励起過程およびその崩壊過程に関する実験的研究を行っている。希ガスはその安定性のために、気相および固相においてもその電子的性質は似通っていることが知られている。そのため、原子数が最小の極限である孤立原子、および最大の極限である固体、またその中間であるクラスターという3つの状態を「電子的励起過程」という一つのキーワードで統一的に理解することが可能であると考えている。

本研究期間内には、多価イオン入射による希ガス固体からの脱離過程の観測を行い、絶対脱離収率およびポテンシャルスパッタリング収率を測定し、中性原子およびイオンの脱離に関する知見を得た [1, 2, 3, 4]。また、希ガスクラスターを標的とした電子エネルギー損失分光実験を行い、Ar クラスターではクラスターサイズ (原子数) が 100 個程度からバルク励起子が出現することを見いだした [5]。また、前方散乱電子のみを検出することにより、クラスターの表面励起過程の選択的観測に成功した [6]。

2 イオンと希ガス固体の相互作用

2.1 目的

本研究では希ガス固体を標的として、運動エネルギーと内部エネルギーを持つ低エネルギー多価イオンビームを照射し、固体表面および固体中での劇的な構造変化を伴うさまざまな緩和過程を、主に脱離粒子の測定により観測し、Van der Waals 力により結合している非常にもろい希ガス固体の表面および固体中で、多価イオンの持つ巨大な静電エネルギーがどのように消費されるのかを定量的に明らかにすることを目的とした実験を行っている。本研究期間内には主に絶対脱離収率を測定し、エネルギー消費についての定量的議論を行った [1, 2, 3]。また、イオン衝撃により生じる希ガス固体中のチャージアップ現象の観測から、低温固体中でのホールの拡散の活性化エネルギーを求めた [7]。

2.2 イオンの脱離運動エネルギーの試料温度依存性の測定

低エネルギーイオン照射により固体 Ne 表面から脱離するクラスターイオンの運動エネルギーに、強い試料温度依存性があることを見いだした。1.0keV の Ar⁺ を固体 Ne に入射した際に脱離する Ne₂⁺ の脱離運動エネルギーが、試料温度の 1K 以下の温度変化で 1eV 以上も変化していることがわかった。この結果は、絶縁体である固体 Ne 中でのホールの拡散の温度依存性により説明できた。この結果からホールの拡散の活性化エネルギーとして 1meV 程度の値が得られた。このような極低温における拡散係数に関する測定は今までになく、ホールの拡散に関する情報を得るための新しい手法となりえることを示した [7]。

2.3 多価イオン衝撃による全脱離収率の測定

低エネルギー Ar イオン衝撃による固体 Ne からの全脱離収率の測定結果を Fig. 1 に示す [1]。入射エネルギーが 1keV 程度でも、1 入射イオンあたり約 3000 個の原子が脱離するという驚くべき結果が得られた。入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギーの寄与を観測するため、入射イオンの価数を 1 価から 6 価まで変えて測定したが、絶対脱離収率には有意な差が見られなかった。この結果は、この系では入射イオンの持つ運動量による Kinetic Sputtering の寄与が主であり、Potential Sputtering 収率はそれに比べて非常に小さいことを示している。6 価イ

^{*}hirayama@rikkyo.ac.jp, <http://www2.rikkyo.ac.jp/web/hirayama/>

[†]現：東京大学大学院工学系研究科原子力専攻重照射管理部 助教

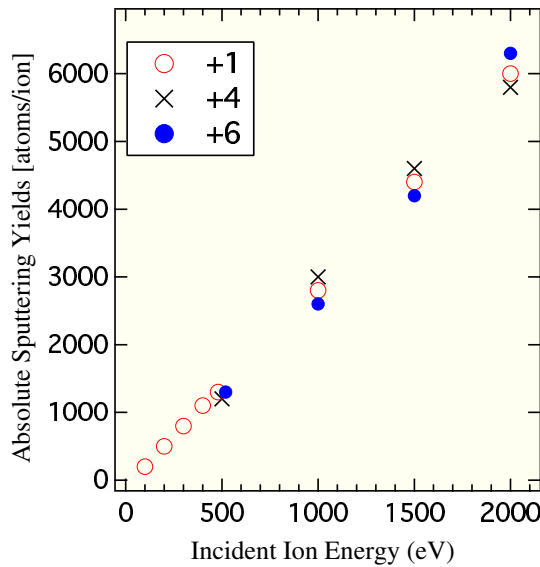


Fig. 1. Absolute sputtering yields of solid Ne by Ar^{q+} ($q = 1, 4, 6$) impact as a function of the incident ion energy. Thickness of the sample film is about 500 atomic layers. From ref. [1].

オンの持つ内部エネルギーは約 310eV であり, Ne 固体中に励起子あるいはイオンを生成するのに必要な最低エネルギーは約 20eV であるので, 6 価イオン入射により Ne 固体中には最大 15 個程度の励起子あるいはイオンが生成される。1 個の励起子・イオン生成により引き起こされる脱離収率は 1 ~ 5 原子程度であるので [8], Ar^{6+} 入射による Potential Sputtering 収率は最大でも 100 原子程度と見積ることができる。この収率は Kinetic Sputtering の収率に比べて非常に小さいために, 本研究の結果では Potential Sputtering による寄与は見られなかったと考えている。

2.4 多価イオン衝撃によるイオンのポテンシャルスパッタリング収率の測定

Kinetic Sputtering による生成粒子は主に中性原子であるため, Potential Sputtering の効率的な観測を目的として脱離イオンの観測を行った。固体 Ne に低速イオンを入射すると, 主な脱離イオン種はクラスターイオン Ne_n^+ であり, そのクラスターサイズ分布が入射イオンの価数に依存することを見いだした。そのサイズ分布の変化より Potential Sputtering 収率の相対値を見積もることに成功した [2]。この結果より, Potential Sputtering 収率は入射イオンのポテンシャルエネルギーに比例することがわかり, 真空紫外光入射の場合でよく知られている電子遷移誘起脱離機構 [8] により Potential Sputtering 過程が説明できることを明らかにした。

上記は相対値のみの測定であったが, 脱離イオン量の直接測定法を新たに開発し, イオンの Potential Sputtering 収率の絶対測定に成功した。実験結果を Fig. 2 に示す。入射イオンの運動エネルギーは 200 ~ 2000 eV であり, 標的が Ne 固体の結果を赤丸で, Ar 固体の結果を青三角で示してある。色の濃さは入射イオンの運動エネルギーを示している (薄い: 低エネルギー, 濃い: 高エネルギー)。1 入射イオンあたり 1 イオン以上という, 非常に大きな脱離収率が得られた。このような大きなイオンの脱離収率は今までに測定例が無い。また, 以前行った相対測定と同じく, 入射イオンの持つポテンシャルエネルギーに比例する脱離収率が得られた。

この結果より, 絶対脱離イオン収率は入射イオンの種類が違っていてもほぼポテンシャルエネルギーにのみ依存し, また標的が Ne 固体と Ar 固体で脱離収率が 5 倍ほど違うことがわかった。この結果は, イオンの脱離モデルとしてよく知られているクーロン爆発モデルでは説明ができず, 我々は新たなイオン脱離モデルを提唱した。このモデルでは, 入射イオンのポテンシャルエネルギーにより固体中にイオンが生成され, そのイオンが周囲の中性原子の脱離とともに真空中に放出されるというものである。このモデルが正しければ, イオンの脱離収率は

$$\frac{\text{PE}(\text{A}^{q+})}{\text{IP}(\text{B})} \times \sigma_{\text{ion}} \times Y_{\text{Total}}$$

に依存するはずである。ここで第 1 項は入射イオンのポテンシャルエネルギーにより生成されうるイオン数

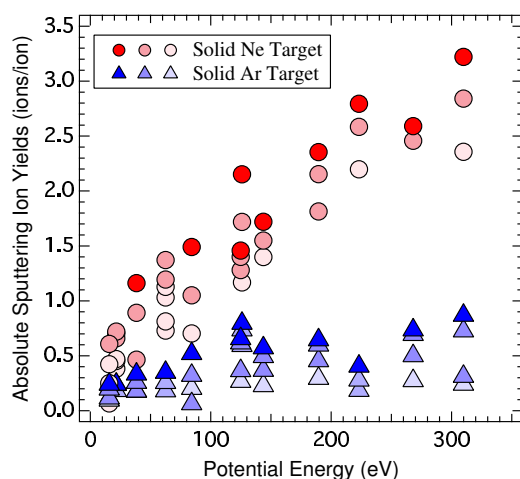


Fig. 2. Absolute sputtering ion yields as a function of the potential energy of the incident ion. Incident ions are Ne^{q+} ($q = 1 \sim 4$), Ar^{q+} ($q = 1 \sim 6$) and Kr^{q+} ($q = 2 \sim 6$), and the target is solid Ne (circles) and solid Ar (triangles). The thickness of the marks denotes the kinetic energy of the incident ions (200 ~ 2000 eV, the thicker, the higher).

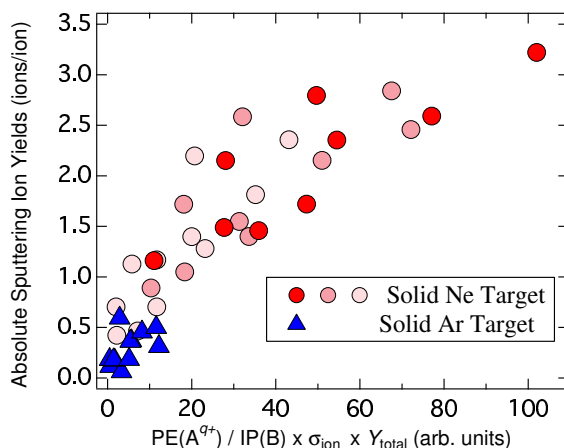


Fig. 3. Absolute sputtering ion yield vs. scaling parameter. See text for detail.

($\text{PE}(A^{q+})$, $\text{IP}(B)$ はそれぞれ入射イオンのポテンシャルエネルギー、標的固体のイオン化エネルギー), σ_{ion} はイオンの生成断面積, Y_{Total} は全脱離収率である。

Fig. 2 の結果を上式でスケールリングして書き直したのが Fig. 3 である。このグラフからわかるように、スケールリングすることにより入射イオンの種類・荷数、標的固体の種類、入射イオンの運動エネルギーが違ってても、すべてのデータがほぼ1本の曲線で表されることがわかり、我々の新しいモデルの正当性が示された。

3 希ガスクラスターの電子的励起過程の研究

電子エネルギー損失分光法を用いて、希ガスクラスターにおける電子的励起過程のクラスターサイズおよび入射電子エネルギー依存性の測定を行った [5, 6]。Fig. 4 に平均クラスターサイズ $\langle N \rangle$ が 120 ~ 3500 の範囲で測定した、Ar クラスターの電子エネルギー損失スペクトルの結果を示す。クラスターサイズ 200 以下程度から 12.1 eV 付近にバルク励起子の生成が確認できる。

バルク励起子生成に起因する構造の強度は、クラスターサイズが 1000 以上で減少することがわかる。これは、入射電子のクラスター粒子中での平均自由行程を考慮することでこの現象が説明できることを示した。Fig. 5 は

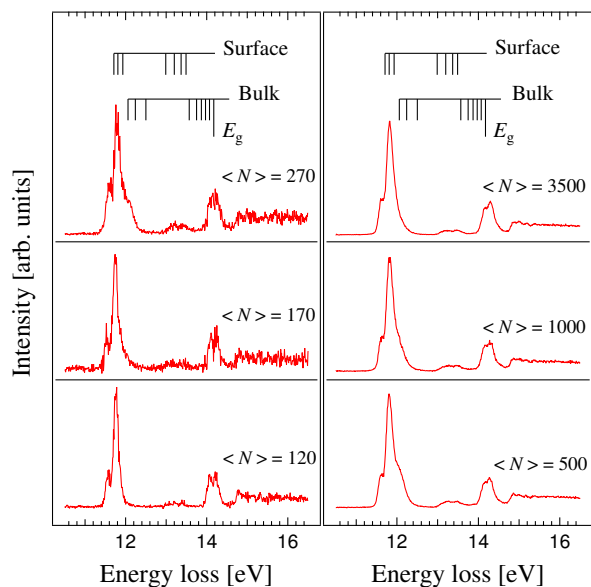


Fig. 4. Electron energy loss spectra of Ar clusters with $\langle N \rangle$ ranging from 120 to 3500 atoms/cluster. The incident electron energy is 100 eV and the observation angle is 0 deg. Vertical lines show the energy positions of surface and bulk excitons and the band gap energy, E_g , in solid Ar.

クラスター中での電子の平均自由行程を考慮して計算した結果であり、横軸はクラスターサイズ N の $1/3$ 乗、縦軸は $3p \rightarrow 4s$ ピークの面積と表面励起子ピークの比に $N^{1/3}$ をかけたものであり、クラスター中のすべての原子の励起が観測可能な場合は一定値 4 になる。光吸収の結果 (×) ではほぼ 4 の値を取るのに対し、我々の実験および計算結果は特にクラスターサイズが大きい場合には直線的に増加している。これは、大きなクラスターサイズの場合には、我々の実験手法ではバルク励起子生成に対する感度が非常に低いことを示し、大きなクラスターにおける表面に高感度な測定手法となりうることを示している。

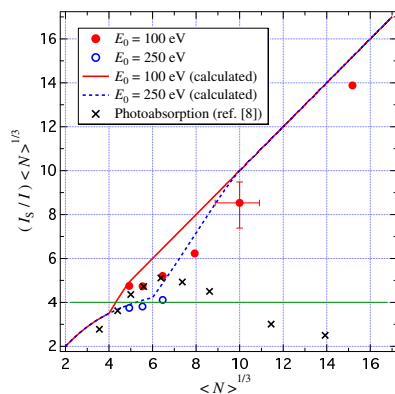


Fig. 5. $(I_S/I) \langle N \rangle^{1/3}$ for incident electron energy $E_0 = 100$ eV (closed circles) and 250 eV (open circles). Also shown are our results of simple calculation using the model taking into account the mean free path of incident electrons for electron energies of 100 eV (solid line) and 250 eV (dashed line). Photo-absorption results (crosses) are also plotted for comparison. See text for details.

参考文献

- [1] S. Fujita, K. Fukai, T. Tachibana, T. Koizumi and T. Hirayama, J. Phys. Conf. Ser. **163**, (2009) 012083.
- [2] K. Fukai, S. Fujita, T. Tachibana, T. Koizumi and T. Hirayama, J. Phys. Cond. Matt. **22**, (2010) 084007.

- [3] T. Tachibana, K. Fukai, T. Koizumi and T. Hirayama, *J. Phys. Cond. Matt.* **22**, (2010) 475002.
- [4] 立花隆行, 平山孝人, *日本物理学会誌* **67**, (2012) 767-71.
- [5] H. Kubotera, T. Sekitsuka, S. Sakai, T. Tachibana and T. Hirayama, *Appl. Surf. Sci.* **256**, (2009) 1046-9.
- [6] H. Kubotera, T. Sekitsuka, S. Jinno, T. Tachibana and T. Hirayama, *J. Phys. Conf. Ser.* **288**, (2011) 012012.
- [7] S. Jinno, T. Isozaki, I. Naemura, T. Koizumi, T. Hirayama, *Nucl. Instrums. Meth. Phys. Res.* **B269**, (2011) 1007.
- [8] T. Hirayama and I. Arakawa, *J. Phys. Cond. Matt.* **18**, (2006) S1563.

SCRIT実験における電子蓄積リング内のイオン捕獲特性

立教大学理学部: 栗田和好, 榎園昭智

1、SCRITを用いた不安定核の電子散乱測定

電子は強い相互作用をしないため基本的に原子核中で電荷を持つ陽子の空間分布に感度があり、その散乱断面積は電荷分布のフーリエ変換で記述できて理論的なあいまいさが全くない。これまでの原子核物理学では最も基本となるパラメータとして陽子の広がりを原子核の大きさの指標として扱ってきた。しかるに、これまで不安定核での電子散乱実験は不可能であった。また、中性子の分布が陽子の分布より極端に広がっているケースなど常識を覆す結果が次々と発見されたこともあり、世界中の原子核物理学者が注目してルネッサンス時代が訪れている。この不安定核の知見は天体内で起こる元素合成を左右する情報であり天体核物理における元素の起源を探る手がかりともなっている。このように不安定核の電子散乱データは多くの研究者から切望されている状況にある。

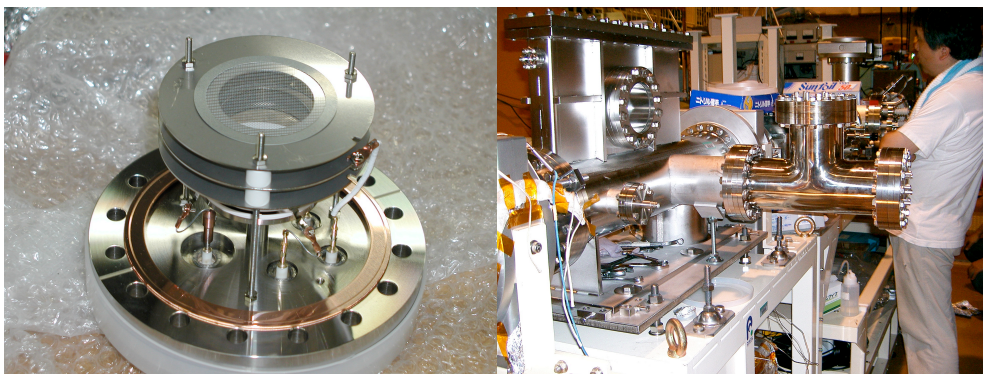


図 1-a : ビームパイプに接地した MCP セットアップ b: T 字管で設置したところ

この不安定核電子散乱実験を可能にする手法として我々は電子ストレージリング（電子シンクロトロン）中に不安定核の浮遊標的（Self Confining RI Ion Target）を作ることを提唱し、実際に開発研究を続けている。これは電子ストレージリング中でビーム強度をあげる際に大きな問題となるイオントラッピング（残留ガスが電子ビームにひきつけられてビームの強度が落ちていく現象）を逆手に利用して不安定核を横方向に閉じ込め縦方向には電極を用いたポテンシャルでトラップするという世界でも類を見ない極めて独創的な手法である。

京都大学化学研究所の協力を得て電子ストレージリングKSRにSCRITのプロトタイプを導入してイオンがトラップされることの確認が済んだ。2007年12月のテスト実験では実際に入射したCs原子からの散乱電子の測定に成功し、その成果はPhysical Review Lettersに発表済みである。

電子散乱で反跳を受けるイオンについては反跳イオンが物質表面にぶつかったときに出てくる二次電子を channeltron 電子検出器で捕らえる技術が利用可能であることが確認されている。

2、検出技術開発

1) SCRIT実験のための低エネルギーイオン検出

SCRIT でのイオン検出のためにはまず電子散乱実験と同じ環境下で動作可能な検出器が存在するのかどうかを突き止める必要がある。そのために SCRIT チェンバーの脇に T 字管を取り付けて電子ビーム領域から光や荷電粒子が直接入射できる位置(MCP1)と、T 字管の陰になる部分(MCP2)に図 1-a のような追い返し電極付きの MCP を取り付けてバックグラウンド測定を行った。そのときの写真が図 1-b である。

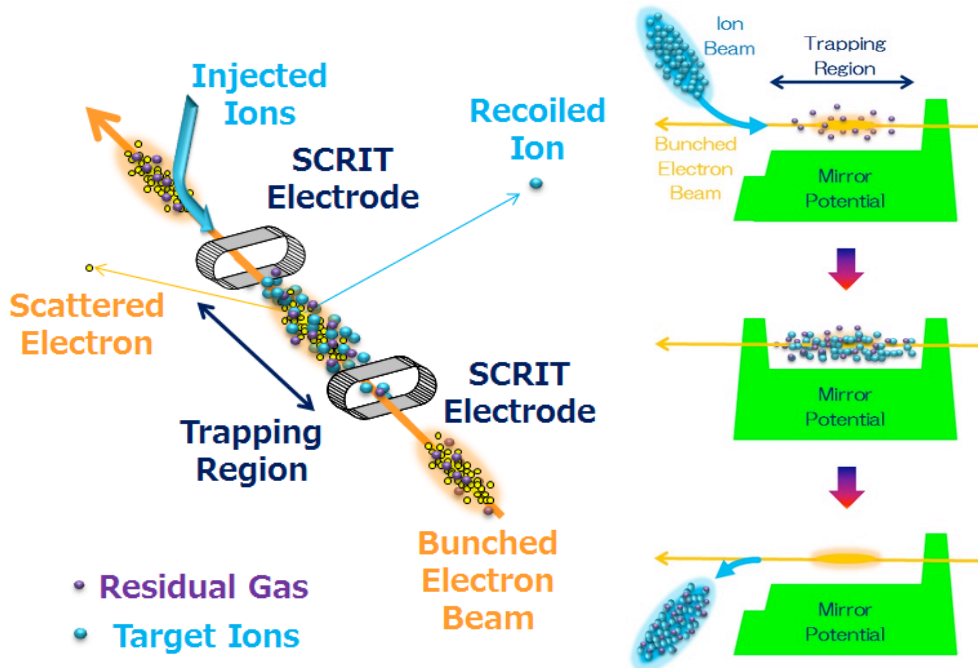


図 2. SCRIT 法における注入イオンの運用手順

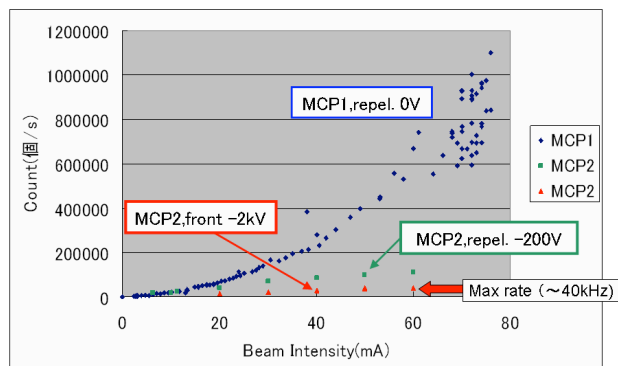


図 3. バックグラウンドの計数率のビーム電流依存性を示す。
電圧は追い返し電圧の値を示し、-2kV の追い返し電圧をかけた MCP2 については最大計数率が 40kHz になっている。

その後バックグラウンド測定を継続し、追い返し電極による計数率の変化などから直射を避けた位置で主に検出器に入射するのは荷電粒子ではなく光であることが分かった。よって、反跳イオンを 2 度静電ミラーで反射してバックグラウンドを桁違いに低減した環境で測定を試みるために試作品を作成した。KSR 加速器で電子検出器との同時計測を試みたが再現性のある結果にはいたらなかった。その後、チェンバーテストを重ねて実験時の設定ミス、チェンバーの設計ミスなどの検討を行うためベンチテストを重ねてきた。この段階で分かったことは、イオン源でイオンを打ち込んだ感応部の中心については効率よくイオンの検出が行われるが、ある角度を付けてイオンを打ち込んだ場合、検出部が全体をカバーしていないことである。その誤りが設計時の誤りなのかそれとも工作精度の問題なのか不明な点が問題として残った。

2) イオン捕獲特性の理解に向けて

標的イオンは電極電圧の操作により図2のように入射、捕獲、掃出しを繰り返されている。掃き出されたイオンは、後段の検出器でその成分等を調べることができる。また、残留ガスが標的イオンと同時に捕獲されてしまうので、我々は残留ガスのみを捕獲する実験も同時に行っている。そして、そこからバックグラウンドの見積りや残留ガスの捕獲特性を測定している。特に、集団的シンクロトロン振動の強度に依存する残留ガスの捕獲特性を詳細に調べた。

図4の様な SCIRT System と呼ばれる装置を用いて捕獲特性が調べられた。Scraper では入射イオン数、Total Charge Monitor では捕獲後のイオンの全電荷を測定し、ExB Ion Analyzer では捕獲イオンを速度分離し成分や価数分布等を測定した。Electron Loss Monitor は弾性散乱実験のデータからルミノシティの絶対値校正を行い、現在はルミノシティモニターとして活用している。

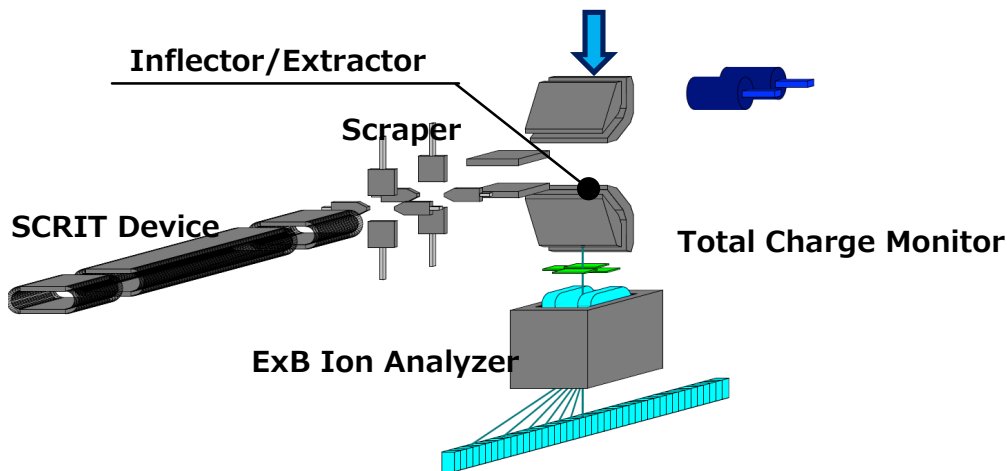


図4. SCIRT System

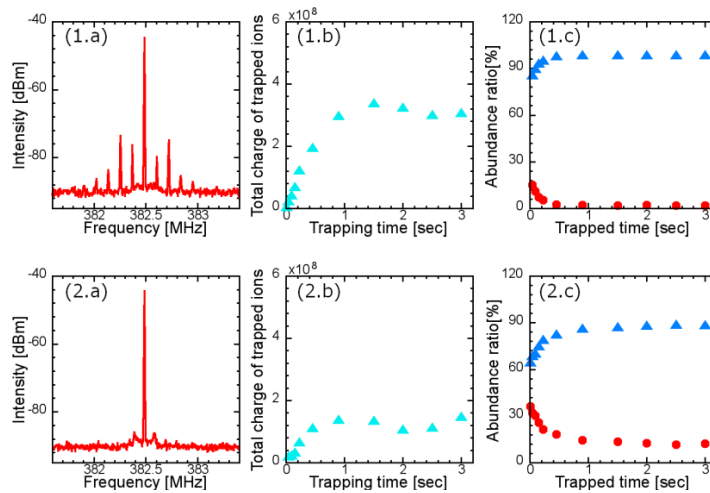


図5. Effects of electron beam instabilities

^{133}Cs を用いた 2011 年度の実験では、 4×10^8 [ions/Cycle] の入射イオン数でルミノシティ 1×10^{27} [/cm²/s] であったが、今年度は 1×10^8 [ions/Cycle] の入射イオン数でルミノシティ 4×10^{26} [/cm²/s] という倍の効率での実験に成功した。更に、電子ビームの集団的シンクロトロン振動の強度による残留ガスイオンの捕獲特性の変化を測定した。図5. (a, b, c) から、振動強度が強いビームでは水素の様な軽いイオンは捕獲が

困難であるという事が分かり、その傾向はシミュレーションでも裏付けられている。我々は、故意に電子ビームに不安定性を与える事で、SCRIT 中の標的イオンの純度を調整できる可能性を発見した。

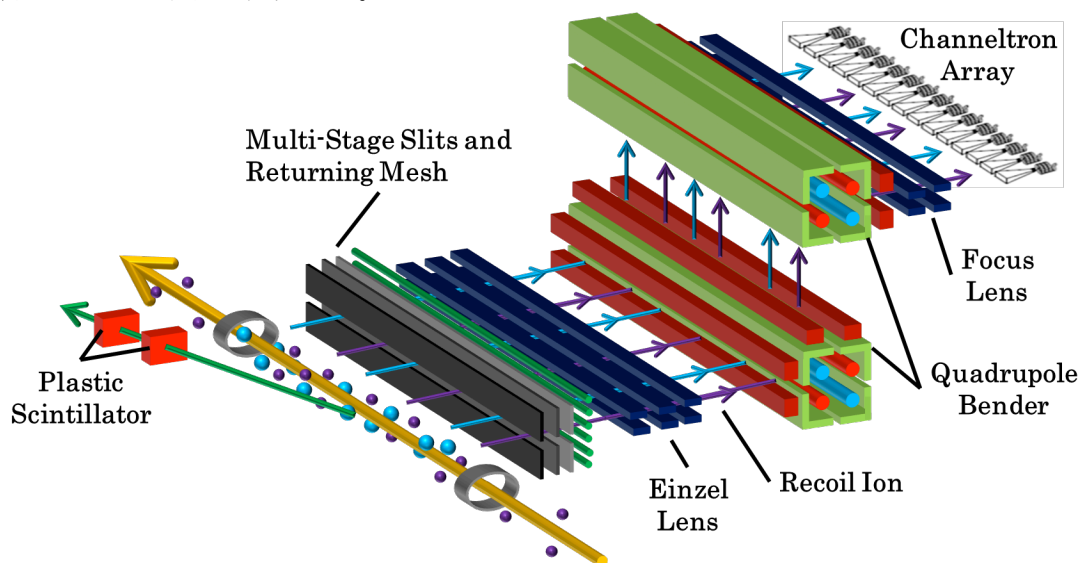


図 6. 反跳核検出器の最終デザイン

3) 反跳核検出器開発状況

バックグラウンド測定を継続し、追いつき電極による計数率の変化などから直射を避けた位置で主に検出器に入射するのは荷電粒子ではなく光であることが分かった。よって、図6のように反跳イオンを四重極ベンダーで直角に曲げてバックグラウンドを桁違いに低減した環境で測定するための検出器を設計した。また、前方に散乱される電子とのコインシデンス測定を基準として飛行時間測定(図7)を行えば残留ガスイオンとの区別が可能である。

SCRIT 法による電子散乱実験の準備に向けて ^{133}Cs イオン (安定核) をビーム中に閉じ込めてルミノシティ最適化を行った。相対ルミノシティ測定器としてはトラップ領域の前方でビームパイプの直上に置いた2つのプラスチックシンシレーションカウンター対を用いた。二つの信号のコインシデンスを用いることでその計数率がルミノシティに比例することがわかり、さらに電子散乱の実験と比較すると既知の電子- ^{133}Cs 散乱断面積から絶対ルミノシティも求められることが判明した。さまざまなマシンパラメータの調整で最終的に最大ルミノシティ $1 \times 10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成することに成功した。

一方、反跳核イオン検出器であるが、電磁シャワーなどのバックグラウンドイベントのためにその前方シンチレーターとの同時計測が困難ではないかと思われていた。しかしルミノシティモニターの計数率が数千 Hz であることから非常にクリーンな環境で同時計測が可能であることが判明した。よって、慎重な調整が必要なベロシティフィルターを用いた質量分離を行う前に同時計測モードでの運用を目指す方向で方針を転換した。当初、2011年度内に SCRIT チェンバーとの接続の可能性があったが、開発状況の変化のために来年度導入予定の東北大学電磁スペクトロメータが設置される時期にあわせて反跳核検出器の組み込み時期を模索中である。

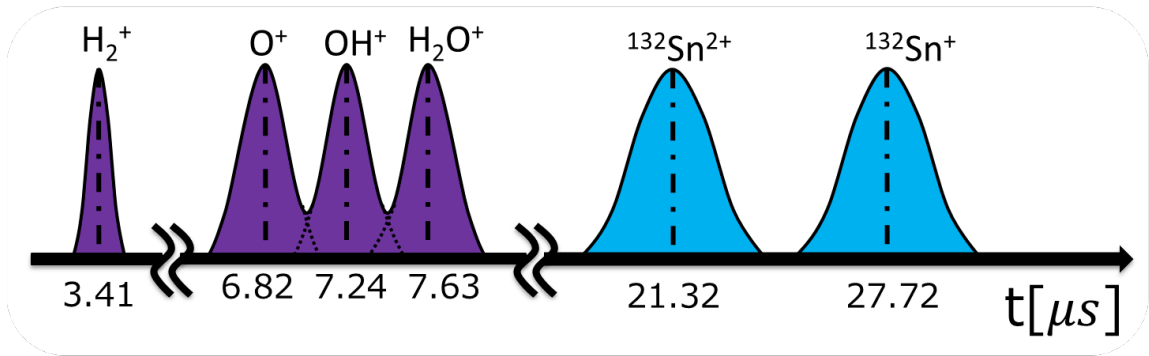


図7. 飛行時間測定法に Sn の 2 価までと残留ガスイオンの分離

4) 散乱電子検出ドリフトチェンバー用の読み出しシステム開発状況

SCRIT領域から散乱された電子は、電磁石と前方+後方ドリフトチェンバー(DC)およびトリガー用シンチレータで構成されるスペクトロメータで検出される。1130チャンネルからなる後方DCのシグナル読み出しには林栄精器が新規開発した64ch読み出しボード(RAINER V1)を16台使用する(図8)。この読み出し回路はFPGAテクノロジーを用いて、64チャンネルのADCのTDC読み出し機能を15cm x 19cmという小型ボードに集約し、更に全データをボード上のFPGAでデジタル化した上でEthernet通信にて送信する。これにより取り扱いが容易であり、アナログノイズに強いメリットを持っている。

理化学研究所においてプロトタイプ読み出しボードを使用しDCからのシグナル読み出しテストや環境ノイズレベルの検証を行った。SCRIT実験では電子蓄積リング(SR2)のRF源近傍に散乱電子検出器が置かれるためにRF起源のノイズが一番の懸念であったが、実際のRF環境下でのノイズテストを行い、β線のシグナルのバルス高が600~800mVに対してRF起源のノイズが最大でも100mV以下であることが測定から判明し、十分に実用に耐えられることを確認した(図9)。林栄精器においてSCRIT実験で用いられる最終バージョンの読み出しボードも完成し、8月のインストレーションに向け、理研において電源等のインフラ系の設置作業が進行中である。また現在立教大学において、DAQ用のプログラム及びDCのトラッキングやキャリブレーション用のコードを開発中である。

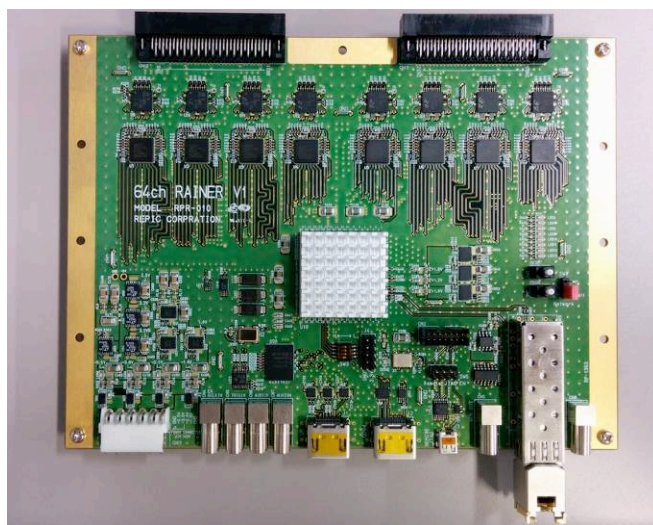


図8. 64ch読み出しボード(RAINER V1)

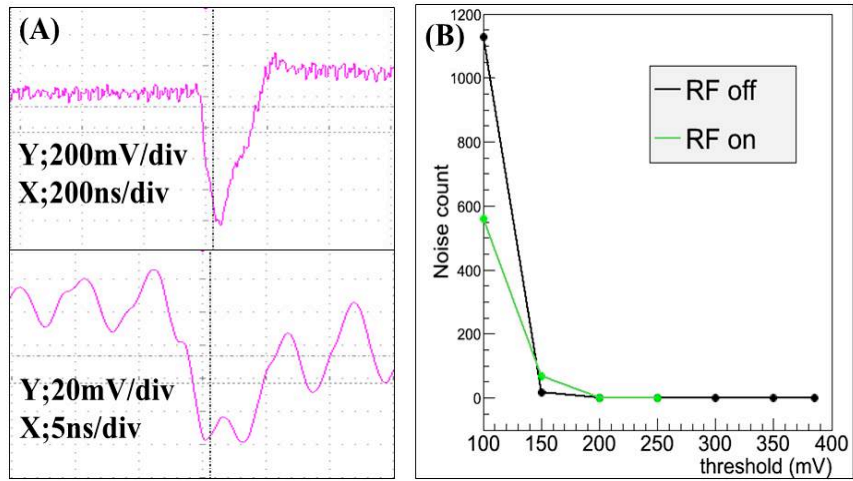


図9. (A) SR2 RF (191MHz) 環境下での β シグナル(上図)とRF起源ノイズ(下図)の比較。
 (B) ノイズレートのThreshold依存性

3 次元位置検出型シンチレーターの開発

志賀慶明*、本林透、家城和夫

概要

不安定核ビームを用いた核反応等で放出される高速中性子の測定のためには大きな検出効率だけでなく運動量を精密に決定するための十分な位置分解能が必要となる。これを可能とする 3 次元位置検出型の中性子検出器を高い光検出感度を持つ MPPC を用いて行った。また、この手法を γ 線検出器の開発についても応用した。

1. 中性子検出器

核反応で放出される中性子の運動量・エネルギーを精度良く求めるには飛行時間法が利用される。検出効率が比較的小さい中性子検出器では検出器のサイズが大き過ぎざるを得ない。ところが、速度を計算する際に、検出位置が検出器の大きさにより不定性がきまるために時間情報に比べて精度が悪く、それが運動量の精度の上限を決める要因となってしまう。中性子検出器内で中性子が反応した位置はシンチレーションの発光位置として知ることができる。これまでの大型の中性子検出器では棒状の検出器の両端に光電子増倍管を設置し、光検出の時間差から長さ方向の位置情報を得る方式は使われていたが、本研究では検出器の厚さ方向の位置に関する情報を 3 次元的に得るために、検出器側面に WLS ファイバーを設置して波長変換されたシンチレーション光も同時に読み出す方式の検出器を開発した。この場合、変換のために光量が少なくなることを考慮していくつかのデバイスを検討した結果、光検出器としては小型で大きな増倍能力をもつ半導体素子の MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) が有望であることがわかり、その特性を調べてきた。

1.1 MPPC の温度特性

MPPC は高感度であってシングルフォトンの検出も可能であるので、この目的にはたいへん適しているが、一方でダークカウントが多いという欠点が存在する。MPPC のダークカウントは半導体内での熱励起による。この熱励起を抑えるには MPPC を冷却することが有効であると考えられる。実際、冷凍庫内でダークカウントの計数率を測定したところ、室温より減少していることが確認できたので、ペルチェ素子を用いた冷却システムの開発を行った。ペルチェ素子は TEC1-12708 を 2 枚用いた。これは高温側が常温(20-30°)に対して 60° 程度の温度差を作り出せるので、低温側を -30° 程度まで冷やすことが可能であってダークカウントを十分に減らすことが期待できる。ペルチェ素子の放熱側を水冷することにより MPPC を -15°C に冷却して光子数分布を測定した。その結果、常温で見られた熱励起による励起のピークはほぼ消滅したが、ペDESTAL のピークに長いテールが見られた。これは MPPC 出力のベースラインが変動していたと考えられる。

実際に MPPC を検出器に取り付ける場合の温度はペルチェ素子の高温側の放熱効率により決まる。温度変化はダークカウントの計数率だけでなく MPPC のゲインやベースラインの変動に影響するので、熱電対によって MPPC の温度を測定し、それをフィードバックすることによって温度の安定化を図るシステムを試作した。市販の CPU クーラーにより空冷を行い、チノー社の温度指示調整計によってペル

チェ素子に流れる電流をリレー制御することにより、 -5° 、 -10° において $\pm 0.1^{\circ}$ で温度を一定に制御することができた。熱画像カメラにより、ペルチェ素子全体での温度一様性も確認している。

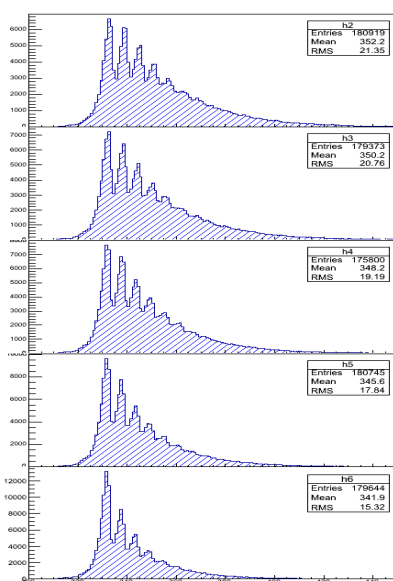
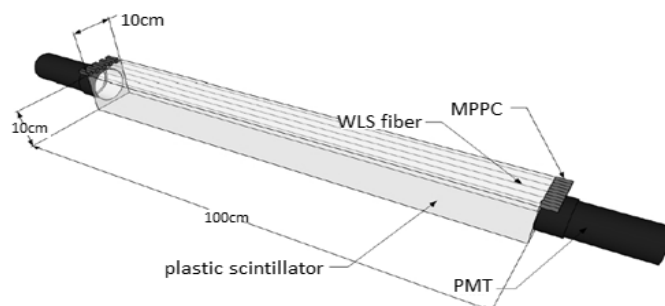
以上の測定からペルチェ素子を用いた冷却が可能であることが検証できたが、ペルチェ素子の放熱を安定に行うためにはファンによる空冷が欠かせないことも判明した。これは実際に検出器に使用する場合に必要なシンチレーション検出器全体の遮光と相反する要求となる。この両者を両立させるようなデザインは今後の課題である。

1.2 前置増幅器の開発

MPPC の信号は微弱であるためにノイズに弱い。これまではドライバー回路から同軸ケーブルを経てアンプで 100 倍程度増幅をおこなっていたがケーブルで伝送する際のノイズが問題となっていた。そこでドライバー回路に増幅器を組み込む形の前置増幅器を開発した。増幅には AD8001ANZ による非反転増幅を用いて、MPPC 信号の周波数である 150MHz の帯域で安定した増幅率をもつように設計された。増幅器を MPPC の読み出し回路と同一の基板上で製作し、ピコ秒ライトパルスによって MPPC に光信号を入力させてテストを行ったところ、従来のものに比べ MPPC 印加電圧についての安定性に優れ、また光子数分布における光子数を分離するのに十分な分解能をもっていることが検証できた。

1.3 位置依存性の測定

発光位置による信号の差を測定するために右図のような検出器を製作した。この検出器は長さ 1m のプラスチックシンチレーターの両端に光電子増倍管を設置して光量と時間差を測定し、長さ方向の位置を決定する。中性子は側面



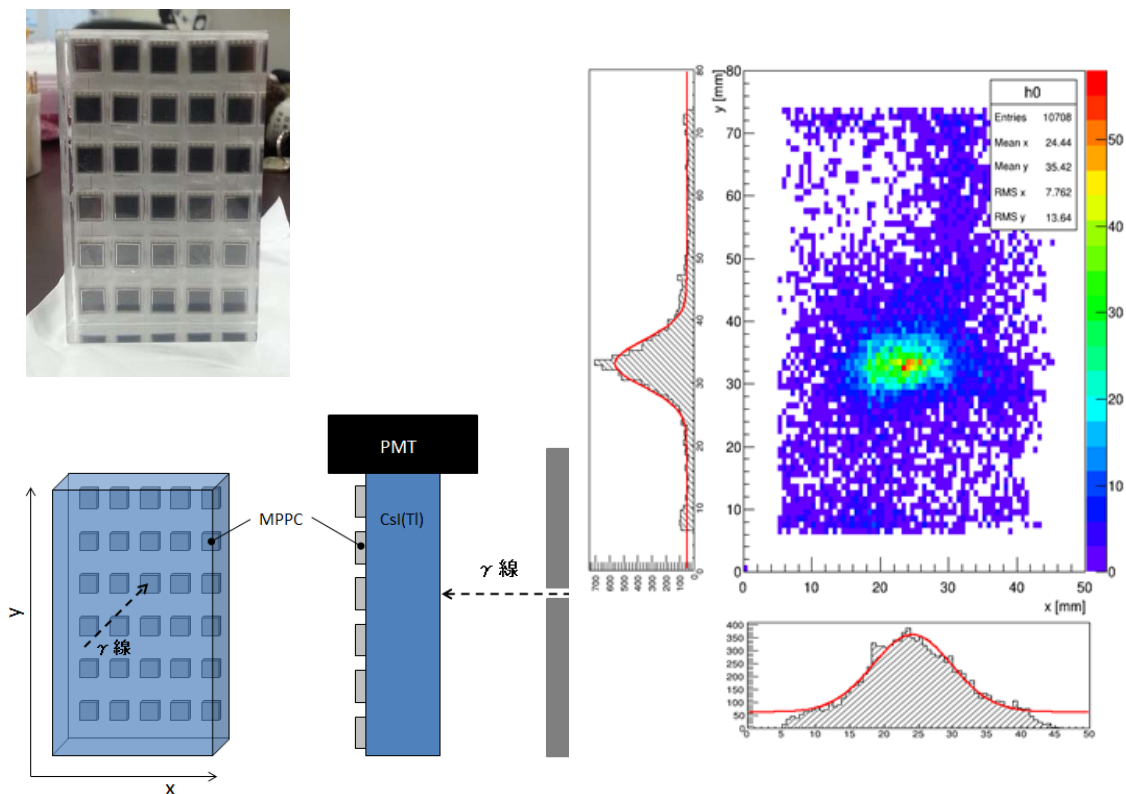
から入射するが、運動量の精度は厚さ方向の反応位置によって決まるので、それを知るために側面に各 5 本の WLS ファイバーを張り、側面から外に出た光を波長変換して両端の MPPC によって検出した。シンチレーション光に近い紫色の LED を用いて行ったテストでは入射位置によって左図のように MPPC の光量に変化し、入射位置との間に一定の相関をもっていることが確認できた。しかしながら、シンチレーターからの光のファイバーで再発光する際の効率がまだ十分ではないため、光量の統計が十分ではなく、光量分布から逆に位置を求めるには至っていない。ファイバーの設置や MPPC との接続などにいくつかの改良を加えたものの、WLS ファイバーを用いる方法では光量の収集・変換効率に限界があることがわかってきたため、今後はファイバーの代わりに WLS bar を用いた測定を試みることを予定している。

2. γ 線検出器

中性子検出器と同じ手法により3次元位置の検出可能な γ 線検出器の開発も2013年度より開始した。核破砕反応で生成される不安定核ビームを用いた研究では高速で運動する核からの γ 線を測定することになるため、ドップラーシフトの補正が欠かせない。そのためには γ 線の放出方向を γ 線の検出位置から正確に求めなければならないので3次元での位置検出が必要となる。このような技術はPETの分解能向上など応用面でも重要であると考えられる。当初、中性子検出器と同様にWLSファイバーを用いる方式を検討したが、光子の変換効率が低いこととサイズが相対的には小さいことから、シンチレーター側面に大面積のMPPCを直接つける方式を試みた。

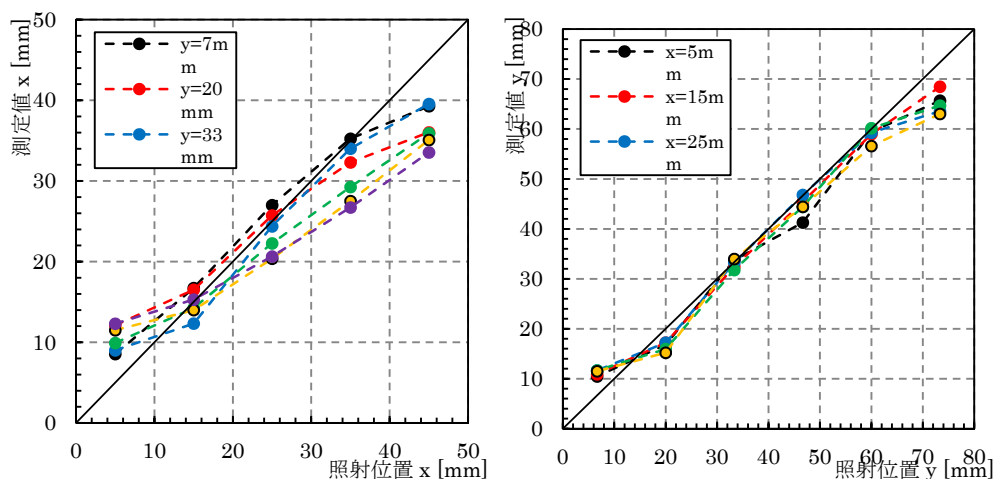
まず、シンチレーター内の発光位置とMPPCの位置の関係でどの範囲が検出可能となるかを調べたところ、MPPCの信号はシンチレーターの側面などで反射し、発光位置にはよらない成分と、発光位置から直接入射したと考えられる成分が存在することがわかった。後者はシンチレーター内での減衰と表面での入射角度により限定されていることがわかった。これを利用すれば発光位置を絞りこむことが可能となる。

実際に位置が検出できるかどうかを調べるために下図のように $20 \times 50 \times 80 \text{mm}^3$ と $40 \times 50 \times 80 \text{mm}^3$ の2つのCsI(Tl)シンチレーターにそれぞれPMTとMPPCを固定し、コリメートした γ 線によりxy面内の照射方向を操作して発光位置と γ 線のエネルギーを測定した。MPPCは側面に $6 \times 6 \text{mm}^2$ の受光面をもつものを30個使用している。



図右はMPPC出力から計算された γ 線の入射位置である。PMTの出力から光電ピーク的事象を選

んでいる。MPPCは発光点の直近のものだけが信号を出すわけではないので、MPPCの出力の光量を重みとして用いて位置を計算したところ、 γ 線の入射位置を再現することができた。位置分解能はx方向、y方向ともに10mm程度であり、発光位置がわからないためのドップラー効果による分解能劣化に対してはこの情報を用いた補正が可能であり、有効である。位置の線形性は中心部分ではよく保たれているが、厚さ40mmのシンチレーターに対してはx方向のずれが大きいことが明らかになり、MPPCの配置方法についてはまだ改善の余地があることがわかった。



厚さ 20mm のシンチレーターに対する位置再現性

今回の検出器ではMPPCを取り付けた面を全反射面としたため、PMTに入射する光量の低下によるエネルギー分解能の劣化が考えられる。そのため、比較としてPMT受光面以外を反射材で覆った場合のエネルギー分解能を比較したところ、25%程度の劣化が見られた。MPPCの間には隙間があるために光が漏れ出てしまっているため、この領域は反射材を覆うなどの工夫をする必要があると考えられる。

3. 結論

検出器内での反応位置を3次元情報として知ることができる中性子検出器、 γ 線検出器の開発を行った。中性子検出器についてはWLSファイバーとMPPCの組み合わせで位置情報と相関をもつデータを得ることができたが、位置の再現には至っていない。これは光量の収集・変換の効率が不十分である点が主要な原因と考えられるため、今後、WLS barのような光量をより効率的に集められる方法により改善を図っていきたいと考えている。 γ 線検出器については側面からMPPCで直接に読み出す方法で目標に近い位置情報を得ることができた。より効率的に位置を求める方法を探究し、実用化に向けた改善を進めていきたい。

* 理学研究科物理学専攻博士課程

本研究の一部は安西央、栗山彩香、鳴島茜、松澤秀之、臼倉拓弥、伊勢遼、吉田鷹雅、山田裕之らの卒業研究の成果に基づいている。また、温度特性の測定においては(株)チノーの助力を得た。

不安定原子核の構造

理化学研究所仁科加速器研究センター 本林 透

1. はじめに

「原子核の構造の解明-不安定原子核の構造-」では、理化学研究所と共同開発した高感度 γ 線検出装置 DALI2¹⁾を用いて、自然界には存在しない不安定な原子核を対象とした γ 線核分光実験を行い、中性子過剰領域でみられる魔法数の出現・消失を含む新奇な原子核構造の研究を行っている。DALI2 と理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリー(RIBF)で供給される大強度二次ビームを組み合わせることで実験効率を向上させ、魔法数近傍の軽い原子核を対象とした実験を進めてきたが、本プロジェクトの5年間では、さらに広い範囲の不安定核を対象として研究を行った。具体的な成果は、中性子魔法数 $N=28, 50, 82$ 近傍の原子核である ^{42}Si 、 ^{78}Ni と ^{126}Pb 、そして2001年に $N=34$ の魔法数をもつと予測された ^{54}Ca を対象としたインビーム γ 線核分光実験によりもたらされた。以下に詳細を述べる。

2. 理化学研究所仁科加速器研究センターでのインビーム γ 線核分光実験

本プロジェクトで対象としている原子核は、安定線から離れており、中性子数が陽子数に比べて非常に多い。このような原子核は寿命が短いため、標的として用いることは事実上不可能である。そのかわり、安定な原子核（重イオン）をビームとした破碎反応によって生成し、不安定核ビームとして使用する。例えば、理化学研究所の RI ビームファクトリーでは、 ^{238}U 、 ^{70}Zn 、 ^{48}Ca などの重イオンを核子あたり 345MeV まで加速し、ベリリウムなどの標的に照射し、破碎された原子核を粒子識別ビームラインで分離・識別する。重イオンなどの加速には、超電導リングサイクロトロンをはじめとした加速器を用い、破碎片は、粒子識別装置である BigRIPS ビームラインで必要となる原子核を識別して不安定核ビームとして取り出す。概略を図1に示す。

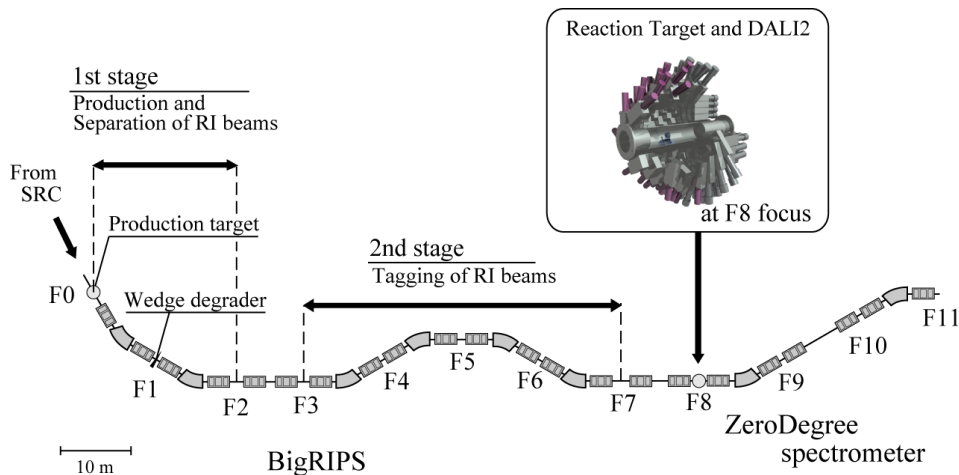


図1 理研仁科センターRIBF施設の BigRIPS ビームライン、ゼロ度スペクトロメータ。実験ポート F8 焦点に標的と γ 線検出装置 DALI2 を設置。二次ビームの生成と識別を BigRIPS で行い、反応後の出射粒子の識別をゼロ度スペクトロメータで行う。反応によって放出される γ 線は DALI2 で測定し、励起状態の決定を行う。

BigRIPS で識別した不安定核ビームを F8 焦点に設置した反応標的に照射し、核子除去反応、非弾性散乱などの核反応を研究する。反応後の散乱粒子は下流に設置されているゼロ度スペクトロメータによって粒子を識別する。散乱粒子から放出される γ 線は F8 に設置した DALI2 で測定する。ビーム粒子と散乱粒子を同時に計測することによって反応チャンネルを同定する。これは、インビーム γ 線核分光と呼ばれる方法を高速の不安定核ビームによる研究に発展させてものである。1990 年代に立教大グループにより本格的に始められて以来、世界的にさまざまな原子核を対象とした実験が行われてきた。本プロジェクトは、この方法と世界最高の RI ビーム発生能力を持つ理研 RI ビームファクトリーを組み合わせることにより、不安定原子核研究を大きく発展させようとするものである。

3. 研究成果

理研仁科センターの RIBF 施設では、ビーム強度が低いため効率的に実験を行うことができなかった領域の研究が新たに可能である。RIBF での最初の実験では、中性子数が陽子数に比べて非常に多い ^{32}Ne をビームとする非弾性散乱と中性子除去反応によって、第一励起状態からの γ 線を DALI2 により初めて観測した²⁾。その後、RIBF 施設のビーム増強にともない、中性子過剰領域での魔法数の変化や集団運動の発達といった現象を、広い範囲で実験的に調べることが可能になってきている。

特に本プロジェクトでは、中性子魔法数 $N=28, 50, 82$ 近傍、そして新魔法数 $N=34$ に関わる核構造研究を行った。本報告では、以下の三つの成果を例としてあげる。

i. 中性子魔法数 $N=28$ の消失

^{42}Si は、2010 年に、第一 2^+ 状態の励起エネルギー $[E_x(2^+)]$ についてアメリカとフランスで矛盾した実験結果が発表されて話題となった原子核である。我々は、この ^{42}Si の励起状態を調べる実験を行い、矛盾に決着を与えることをめざした³⁾。 ^{42}Si は中性子魔法数 $N=28$ を持ち、その形が球形であるか楕円体のように変形しているかによって $E_x(2^+)$ の予測値が異なる。アメリカ NSCL の実験では、 $E_x(2^+)$ に対応する γ 線が検出されず、生成断面積も変形核である場合の予想値を下回ったため、 ^{42}Si は球形であると報告された。一方、フランス GANIL で行われた実験では、 $E_x(2^+)=770$ keV の γ 線が検出され、 ^{42}Si は大きく変形しているとされた。我々のグループは RIBF 施設で供給される大強度ビームと DALI2 の組み合わせにより、統計量を飛躍的に向上させ、第 2 励起 (4^+) 状態の観測までを視野に入れた実験を行った。その結果、GANIL で得られた 2^+ 状態を確認し、 4^+ 状態を同定することに初めて成功した。その結果、得られた $E_x(2^+)$ と $E_x(4^+)$ から ^{42}Si が大きく変形し、魔法数 $N=$

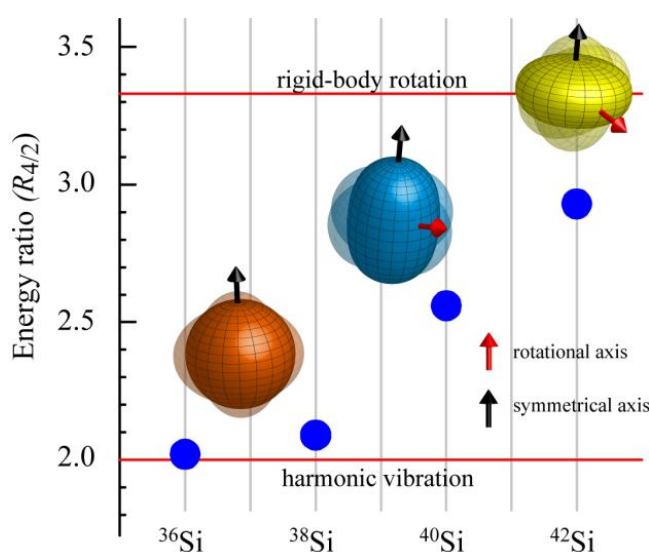


図 2 Si アイソトープの励起エネルギー比と原子核の形

28 がこの原子核では消失していることが明らかになった。

さらに、 $N=24, 26$ の ^{38}Si , ^{40}Si についても同様の測定を行い、 $4+$ 状態の励起エネルギーの決定を行い、 $\text{Ex}(2+)$ と $\text{Ex}(4+)$ の比を求めた。励起エネルギーの比を系統的にみると、中性子数の増加に伴って原子核が球形から変形状態へ移行していることがわかった (図 2 参照)。このような傾向は Mg アイソトープでもみられており、他の実験によって得られた Mg アイソトープの結果⁴⁾と合わせて考えると、少なくとも魔法数 $N=28$ が Mg, Si アイソトープで消失していると考えられる。

ii. 中性子魔法数 $N=34$ の出現

安定な原子核を記述する従来の殻模型は、実験的に確立されている 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の魔法数を説明する。しかし、中性子過剰領域の原子核で i. で示した例のように、魔法数が消失したり、新たな数、例えば 16 や 32 が魔法数となることがわかってきた。これらの新しい魔法数は殻模型に安定な原子核ではその効果が隠れていた有効相互作用によって説明できる可能性があり、その延長で 34 が新しい魔法数となることが 2001 年に東京大学のグループにより予測された。具体的には、中性子過剰なカルシウム (^{54}Ca) でその $N=34$ の魔法数が発現するとされ、それを確かめるために世界の加速器施設で実験が計画された。ところが、十分な量の ^{54}Ca を生成することが困難であったため、この研究は世界最高の RI ビーム強度を誇る理研仁科センターの RIBF 施設の完成を待たなくてはならなかった。RIBF では 2007 年の実験開始以来、重イオンビーム強度の増強が図られ、近年ようやく ^{54}Ca の実験を行うことが可能になった。

^{54}Ca の第一 $2+$ 状態の励起エネルギー [$\text{Ex}(2+)$] を決定する実験は 2012 年に行われた⁵⁾。 $\text{Ex}(2+)$ は、原子核が魔法数をもつとき周辺の原子核に比べて高い値になる。そのため、魔法数を持つかどうかは ^{54}Ca の励起状態を生成し、脱励起の際に放出される γ 線を測定すればよい。2. で説明した方法で ^{55}Sc と ^{56}Ti を不安定核ビームとして生成し、反応標的のベリリウムに照射し、核子除去反応により ^{54}Ca の励起状態をつくる。放出された γ 線を DALI2 で測定し、第一 $2+$ 状態の励起エネルギーを決定した。

実験の結果、 $\text{Ex}(2+)$ は 2043keV であることがわかった。この値は魔法数をもたないカルシウム同位体よりも有意に大きく、 ^{54}Ca が中性子魔法数 34 をもつ、言いかえると、中性子数 34 の上に大きなエネルギー間隙 (シェル・ギャップ) が生じていることを示唆している。また、34 の魔法数を出現させる理論計算の結果は実験結果を良く再現する。さらに、陽子数が魔法数の 20 であることとあわせると ^{54}Ca は二重閉殻構造を保っていると考えられる。これは、中性子過剰領域で新しい魔法数を含む二重閉核が実現し得ることを示す際立った研究成果であり、Nature 2013 年 10 月 10 日号⁶⁾に掲載された。

iii. 中性子魔法数 $N=82$ のふるまい

$N=82$ の閉殻性が中性子過剰領域でどうふるまうかは、宇宙での爆発的重元素合成を引き起こす r -過程の理解にとって大きな意味を持つ。この領域で代表的な原子核は、陽子数が 50、中性子数が 82 の ^{132}Sn があり、二重閉殻構造を持つことが知られている。しかし、陽子数が少ない同位体である Cd や Pd の情報は少なく、これらの同位体で $N=82$ の閉殻性が保たれているかはわかっていない。閉殻性を保っていれば、 $N=82$ の原子核が多く生成され、温度が下がった後に β 崩壊して行き着く原子核による元素組成の「 r -過程」ピークがより際立つ。反対に閉殻性が弱まると、ピーク以外の元素の存在量が相対的に増える。

閉殻性の指標として、 $2+$ 、 $4+$ 状態の励起エネルギーが有用であることは上に述べた。

我々は陽子数が 46 であるパラディウム (Pd) の同位体について、 $N=82$ 付近での励起エネルギーのふるまいを調べる研究を行った。実験手法は、i., ii.の場合と同様であるが、RI ビームの生成には ^{238}U ビームの飛行核分裂を用いた。調べた原子核は ^{122}Pd , ^{124}Pd , ^{126}Pd であり、 ^{133}Sn を主としたカクテルビームの破砕反応により生成し、 $^{122,124}\text{Pd}$ については、 2^+ 状態と 4^+ 状態、 ^{126}Pd については 2^+ 状態のエネルギーを初めて測定した。図 3 に示すように、エネルギーは $N=82$ に近づくにつれ増加しており、その増加の具合は既に知られている陽子数がより大きく安定線に近い Xe ($Z=54$) の同位体と似ている。Xe と陽子数が 48 の Cd では、 $N=82$ で急に 2^+ 状態のエネルギーは増大し、 $N=82$ の閉殻性が確かに保たれている。Pd の同位体でも同様、閉殻性がおおしく崩れていることはないと考えられる。

この研究は、 $N=82$ 領域では、今までで一番安定線から離れた原子核に到達したものである。 $Z=46$ では r -過程元素合成に大きく影響を与えるほどの閉殻性の変化が見えなかった、というのが結果だが、今後さらに中性子過剰な領域や $N=82$ を越える領域の研究により、 r -過程核の研究を世界に先駆けて進めることを目指している。

4. まとめと展望

本プロジェクトでは、中性子過剰な領域に存在する不安定核を対象として核構造を研究してきた。不安定核をビームとしたインビームγ線核分光を用い、中性子過剰領域に存在する原子核の励起状態や集団性、形を調べた。とくに魔法数 $N=28$ をもつ原子核である ^{42}Si では、その魔法数が消失し大きく変形していることをあきらかにした。また ^{54}Ca の研究では、魔法数 34 の存在を実験的に明らかにし、長年未解決であった問題に終止符を打った。さらに、Pd 同位体の実験のように質量数の大きい領域での実験も成功した。この手法を発展させることで研究対象を拡大することが可能である。本プロジェクトで得られたこれらの研究成果が核構造理論に大きく貢献し、原子核構造のより深い理解に繋がると期待している。

今後も理研仁科センターRIBF で実験研究をつづけ、中性子過剰領域に出現または消失する魔法数を検証し、核構造の理解を進めていく計画である。

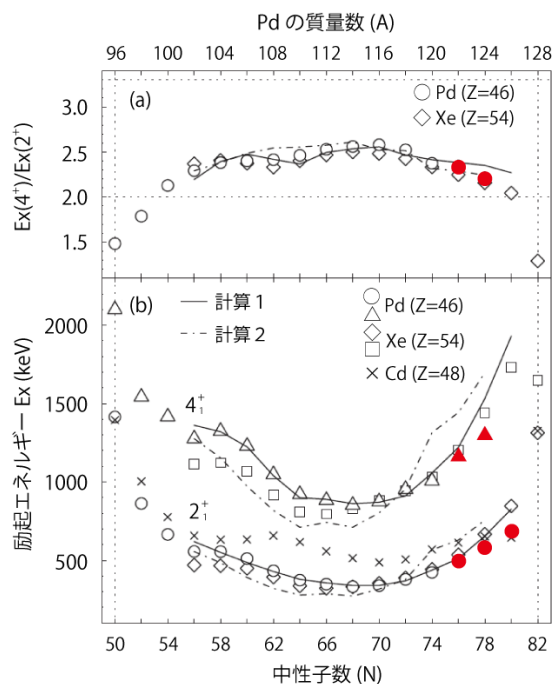


図 3 (a) Pd(\circ), Xe(\diamond)同位体の 2^+ , 4^+ 状態の励起エネルギー比。2.0 と 3.3 の破線は原子核が振動状態、回転状態のときを表す。(b) Pd, Xe, Cd 同位体の 2^+ , 4^+ 状態の励起エネルギー。 \circ (Pd)、 \diamond (Xe)、 \times (Cd)が 2^+ 状態、 \triangle (Pd)、 \square (Xe)が 4^+ 状態を表す。赤が実験で得られたデータを示す。実線と破線は IBM 計算の結果を表す。

参考文献

- 1) S. Takeuchi, *et al.*: submitted to Nucl. Instrum. Methods A, arXiv: 1403.5349 (2014).
- 2) P. Doornenbal, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 032501.
- 3) S. Takeuchi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 182501.
- 4) P. Doornenbal, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 212502.
- 5) D. Steppenbeck, *et al.*: Nature **502** (2013) 207.
- 6) H. Wang, *et al.*: Phys. Rev. C **88** (2013) 054318.

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

目的

本プロジェクトにおいては、核子（陽子・中性子）およびその集合体である原子核の性質をそれらの基本構成要素であるクォーク・グルーオン系から調べることを目指すものであった。

概要

クォーク・グルーオン系の相互作用を記述する量子色力学（QCD）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り、現在のところ一つの描像・手法で全ての領域をカバーすることは実現していない。QCDでは、短距離領域では相互作用が弱くなり摂動展開が可能であるが、長距離領域では相互作用が強くなり通常の摂動的な計算では不十分となる。本プロジェクトでは、この二つの領域に対して異なる方法により、クォーク・グルーオン系を解析する手法の開発を行った。

(1) 原子核・核子現象の評価法の開発

(1-1) QCDの高次効果を含めた散乱断面積の計算法

核子・原子核構造を知る方法の一つは散乱現象を調べることである。この理論計算において、QCDからの輻射補正の効果を見積もる際に単純に有限項までで摂動計算を打ち切る方法は、関与するエネルギーと横運動量が十分に大きい場合（ハード散乱）にのみ有効である。非摂動領域とハード散乱過程の中間に位置するエネルギー領域あるいはエネルギーに比べて小さな横運動量の領域においては、無限次数の摂動項の足し上げを行う必要がある。この領域の非包含過程の計算で現在主に用いられているのは、対数的寄与の最も大きな項(Leading log(LL))のみを足し上げる近似である。そこで、まずLL近似を用いた非包含過程の計算を核子・核子散乱におけるレプトン対生成過程を例として行い、強い相互作用の基礎理論であるQCDの効果と理論計算の際に生じる任意性について調べた。結果として、LL近似を基礎とした非包含過程の計算では、理論的任意性が大きいことが分かった。これは、LL近似を超えたNext-to-leading log(NLL)近似に拡張する必要性を示唆している。ここで得られた成果は日本物理学会で発表した。(日本物理学会第65回年次年会(2010年3月22日 岡山大学)、「Jet-Calculus 処方によるハドロン散乱断面積のQCD補正」田中秀和)

次に、LL 近似を超えた高次効果として Next-to-leading log (NLL) 項を考慮して計算法の拡張を行った。ここでは、非包含過程の評価に適していると期待される Jet-Calculus (JC) 処方を採用して、具体的に計算アルゴリズムを検討した。これまで、JC 処方を用いた核子散乱断面積の高次項の評価は行われておらず、今回が新しい試みであった。

まず JC 処方を陽子-反陽子散乱におけるレプトン対生成過程に適用し、この処方の有用性を検証した。結果としてはこれまで用いられていた処方よりも摂動の高次項の振舞いが非包含過程の評価には適していることが分かった。そこで、この研究成果を踏まえて JC 処方の NLL 項を含めたハドロン散乱断面積をモンテカルロ法を用いて評価する数値計算アルゴリズムを構築した。ここで採用した JC 処方では、これまで用いられていた因子化法で生じてくる負の寄与はほとんど現れず、始状態パートンからの正の効果とハード過程の collinear 領域で生じる負の寄与との強い数値的な相殺が無く、計算処方の理論的任意性と数値計算の精度が著しく改善されることが分かった。ここで得られた成果は論文として発表した。(NLL Order Contributions for Exclusive Processes in Jet-Calculus Scheme、H. Tanaka、Prog. Theor. Phys. 126 (2011), 885-901)

(1-2) β 崩壊を用いた原子核構造の研究

原子核内のクォークの状態を知る材料として、原子核の β 崩壊から得られる情報がある。より精密な情報を得るために必要な理論計算として、ニュートリノの質量を考慮した崩壊幅の計算を行った。まずこの計算結果を利用して、原子核 (トリチウム) の β 崩壊で生成されるニュートリノの質量測定法を提案した。ここでは、トリチウム系に対する測定精度によりニュートリノ質量がどこまで測定できるかを解析した。(日本物理学会 2009 年度秋季大会 (2009 年 9 月 甲南大学) 「トリチウム β 崩壊を利用した新しいニュートリノ質量測定の提案」、松崎旭洋、田中秀和)

次に、トリチウムの崩壊過程を精密に調べることにより、原子核内においてクォークが対消滅を起こす際のクォーク間でのフレーバー混合の情報が得られることを指摘した。(A New Proposal for Neutrino Mass and $|V_{ud}|$ Measurements、A. Matsuzaki and H. Tanaka、Prog. Theor. Phys. Vol.123 (2010), 1003-1012) 更に、実験との比較をより精度良く行うために、 β 崩壊の輻射補正を計算しその効果を調べた。(Derivation of Fermi function in perturbative quantum field theory、H. Matsuzaki and H. Tanaka、Phys. Rev. C 86 (2012) 65502 1-9)

(2) 有限温度・有限密度におけるゲージ場・フェルミオン系の評価法

(2-1) 再帰的方程式による計算法の開発

クォークの質量をゼロにするとクォーク・グルーオン系はカイラル対称性を持つ。しかし、絶対零度においてはQCDの相互作用によりこの対称性が自発的に破れ、クォークは質量を持つように振舞う。この非摂動的効果を、クォーク場を扱い易い場の量子論から得られる再帰的方程式 (Schwinger-Dyson (SD) 方程式) を用いて計算処方 of 検討を行った。SD方程式はグルーオンのゲージ変換に対して不変な形をしていないが、絶対零度では、ゲージ不変性から要請されるワード・高橋恒等式を満たすゲージを選んで計算を行っている。

そこでまず、有限温度へ拡張する際に問題となるSD方程式のゲージパラメーター依存性を調べた。ここでは、ゲージパラメータも外線運動量の関数としてSD方程式を数値的に解き評価した結果、絶対零度においてワード・高橋恒等式を満たすゲージ (ランダウゲージ) の近くに解が存在することを示した。更に、有限温度系に拡張したSD方程式のゲージ依存性をより明確に理解するために解析的に loop 計算を行い、その中でゲージパラメータを含み温度に依存する項の振舞いを、SD方程式を用いた数値計算と比較しその性質を調べた。(Numerical Calculation of Schwinger-Dyson Equation with Momentum-Dependent Gauge Parameter at Finite Temperature、S. Sasagawa and H. Tanaka、Prog. Theor. Phys. 123 (2010)、533-545、日本物理学会 2010年度秋季大会 (2010年9月13日 九州工業大学) 「有限温度におけるフェルミオン自己エネルギーのゲージパラメーター依存性」、笹川修司、田中秀和)

次に、SD方程式を有限密度系にも適用できるように拡張するために、化学ポテンシャルを加えてその効果を調べた。有限密度においては、化学ポテンシャルを加えることによりSD方程式には虚数部分を生じる。これまでは、実数部分のみを用いて相転移などが調べられてきたが、ここでは、虚数部分の寄与を含めてポテンシャル密度による変化を調べ、相転移の様相を解析した。結果は、相転移の起こる化学ポテンシャルの値が数10 MeV程度引き下げられることにより、無視できない効果があることを指摘した。(Effect of an Imaginary part of the schwinger-Dyson equation at finite temperature, and density、S. Sasagawa and H. Tanaka、Phys. Rev. C85 (2012) 452011-9)

また、カイラル対称性の破れと閉じ込め・非閉じ込め相転移は異なった機構で起こっているかどうかを調べるために、仮想的に曲がった空間上でSD方程式を解き、相転移点の違いを調べた。その結果、時空の曲率により二つの相転移が分離して観測されることが分かった。(Separation of the chiral and deconfinement phase transition in curved space-time、S. Sasagawa and H. Tanaka、Prog. Theor. Phys. 128 (2012) 925-939、日本物理学会第67回年次年会 (2012年3月27日 関西学院大学) 「Schwinger-Dyson 方程式によるカイラル相転移と閉じ込め相転移」)

(2-2) 格子理論における計算法の研究

非摂動計算法の一つとして、時空間を格子化して場の理論を取り扱う格子場の理論がある。この形式で格子上に1つのフェルミオンを導入すると、時空間の連続極限において複数のフェルミオンが生ずる。これは、フェルミオン多重問題と呼ばれ、格子場の理論を用いて物理量を評価する際の困難の一つである。この問題について、カイラル対称性を保持した場合に格子上で保たれるその他の対称性との関連について調べ、連続極限において少数のフェルミオンに帰着する格子化の処方の違いにより、保たれる対称性が異なることを指摘した。また、格子上で成立すべき対称性が輻射補正によりどの様に変化するかを調べた。(日本物理学会第67回年次年会(2012年3月27日 関西学院大学)「Two-flavors Gross-Neveu model with Minimal Doubling Fermion and Hermiticity」、鎌田翔、田中秀和、Minimal Doubling Fermion and Hermiticity、S. Kamata and H. Tanaka、PTEP 023B05 (2013) 1-10)

まとめ

本プロジェクトでは、原子核を構成するクォーク・グルオン系について、低エネルギー領域から高エネルギー領域の広い範囲でその性質を評価する計算手法の研究を行った。また、この手法を用いた解析により、特に中間エネルギー領域と低エネルギー領域においてクォーク・グルオン系の性質の新たな面を明らかにした。

立教大学

平成21年度～平成25年度

「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」

研究成果報告書

平成26年5月発行

発行所: 立教大学先端科学計測研究センター

〒171-8501 東京都豊島区西池袋3丁目34番1号

Tel/Fax: 03-3985-4584

<http://www.rikkyo.ac.jp/~z3000145/HighTech/index.html>